



Ministério da
**Ciência, Tecnologia
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2012/01.31.13.30-TDI

ESTUDO DA VARIAÇÃO DA CORRENTE FOTOGERADA NOS PAINÉIS SOLARES DOS SATÉLITES DO INPE

Mario Ferreira Baruel

Dissertação de Mestrado do
Curso de Pós-Graduação em
Engenharia e Tecnologia Espaciais/
Gerenciamento de Sistemas
Espaciais, orientada pelo Dr. Nelson
Veissid, aprovada em 28 de
fevereiro de 2012.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3B9TDP2>>

INPE
São José dos Campos
2012

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE (RE/DIR-204):

Presidente:

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Membros:

Dr. Antonio Fernando Bertachini de Almeida Prado - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr^a Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Dr. Germano de Souza Kienbaum - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

Dr. Manoel Alonso Gan - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr^a Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Deicy Farabello - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Vivéca Sant´Ana Lemos - Serviço de Informação e Documentação (SID)



Ministério da
**Ciência, Tecnologia
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2012/01.31.13.30-TDI

ESTUDO DA VARIAÇÃO DA CORRENTE FOTOGERADA NOS PAINÉIS SOLARES DOS SATÉLITES DO INPE

Mario Ferreira Baruel

Dissertação de Mestrado do
Curso de Pós-Graduação em
Engenharia e Tecnologia Espaciais/
Gerenciamento de Sistemas
Espaciais, orientada pelo Dr. Nelson
Veissid, aprovada em 28 de
fevereiro de 2012.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3B9TDP2>>

INPE
São José dos Campos
2012

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Baruel, Mario Ferreira.
B288e Estudo da variação da corrente fotogerada nos painéis solares dos satélites do INPE / Mario Ferreira Baruel. – São José dos Campos : INPE, 2012.
 xxvi + 98 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m19/2012/01.31.13.30-TDI)

Dissertação (Gerenciamento de Sistemas Espaciais) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2012.
Orientador : Dr. Nelson Veissid.

1. célula solar. 2. SCD1. 3. SCD2. 4. degradação. 5. albedo I.Título.

CDU 629.7:621.383.51

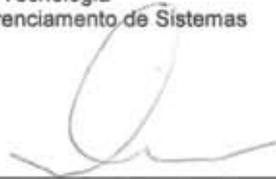
Copyright © 2012 do MCT/INPE. Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida, armazenada em um sistema de recuperação, ou transmitida sob qualquer forma ou por qualquer meio, eletrônico, mecânico, fotográfico, reprográfico, de microfilmagem ou outros, sem a permissão escrita do INPE, com exceção de qualquer material fornecido especificamente com o propósito de ser entrado e executado num sistema computacional, para o uso exclusivo do leitor da obra.

Copyright © 2012 by MCT/INPE. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, microfilming, or otherwise, without written permission from INPE, with the exception of any material supplied specifically for the purpose of being entered and executed on a computer system, for exclusive use of the reader of the work.

Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de Mestre em

Engenharia e Tecnologia
Espaciais/Gerenciamento de Sistemas
Espaciais

Dr. Chen Ying An



Presidente / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Nelson Veissid



Orientador(a) / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. Celso Costa Vaz



Convidado(a) / Orbital Eng* / SJC Campos - SP

Este trabalho foi aprovado por:

() maioria simples

unanimidade



Aluno (a): Mario Ferreira Baruel

São José dos Campos, 28 de fevereiro de 2012

“O pouco com Deus é muito, o muito sem Deus é nada.”

*Trecho de uma canção de capoeira cantada pelo saudoso amigo
Mestre Paulo dos Anjos (1936-1999).*

Dedico este trabalho a meus pais, Eliseu e Isaura, pela educação e incentivo ao estudo, a minha esposa Cristine pela paciência, apoio e amor, e a meus filhos Camila e Guilherme, pelo estímulo e alegria de viver.

AGRADECIMENTOS

Em especial, agradeço, enormemente, ao meu amigo e orientador Dr. Nelson Veissid, pela valorosa orientação e confiança. Ele que teve competência e paciência para transferir o conhecimento neste período de mestrado.

Aos servidores do CCS, Sr. Odair A. de Oliveira, Sra. Cláudia Medeiros e Sr. Jun Tominaga, pelo empenho no levantamento dos dados.

À Dra. Maria do Carmo A. Nono, Dr. Leonel Perondi e Dr. Chen Y. An, pela confiança e incentivo depositado nos servidores da ETE.

Aos amigos do INPE, Dr. Antônio Claret P., Sr. Luiz Celso G T. e Sr. Diego Sciammarella L. M., que me substituíram com responsabilidade nas minhas ausências em atividades da divisão.

Ao amigo Dr. Célio C. Vaz, que me ensinou o caminho profissional na área de geradores fotovoltaicos.

Aos amigos Sr. Edison A. Ribeiro e Sr. Miguel A. Carretero, pelo apoio e incentivo.

Aos professores do curso de pós-graduação do INPE pelos ensinamentos e dedicação.

Aos membros da Banca examinadora e da biblioteca, pela contribuição para melhorar o conteúdo deste trabalho.

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 satélite, a descrição do projeto elétrico, a simulação da influência do albedo e a análise dos dados da corrente elétrica do gerador solar em órbita. Adicionalmente, é apresentada a análise da degradação do desempenho das células solares do Experimento Célula Solar que está instalado no satélite SCD2. O experimento permite, também, medir o albedo planetário para estudos da variabilidade climática terrestre.

THE STUDY OF PHOTOGENERATED CURRENT VARIATION IN THE INPE'S SATELLITES SOLAR PANELS

ABSTRACT

The Brazilian Complete Space Mission, established in 1979 by the Brazilian government began with a series of satellites to collect meteorological data. The solar panels of these satellites were manufactured with silicon solar cells and specified to generate up to 76 W of electrical power at the end of life. The correct design of solar panels is of fundamental importance to define the satellite lifetime. During the design stage are carried out analysis of degradation factors that define the decrease of power generation. Several sensors are installed in satellites to measure the parameters associated with energy generation. The values of these parameters are transmitted in real time telemetry and stored by the Satellite Tracking and Control Center of the National Institute for Space Research. This work retrieves the data and makes the necessary treatment in order to study the behavior of electric power generation. Thus, it is confirmed the validation of satellite project by comparisons with true data. This paper presents a brief history of the solar cell used in satellites, the description of the electrical design, simulation the influence of albedo and the analysis of in orbit power generator. Additionally, it is presented the analysis of solar cell degradation in the Solar Cell Experiment, which is installed at the SCD2 satellite. This experiment also allows measuring the planetary albedo to study Earth climate variability.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 1.1 - O sistema de coleta de dados ambientais.....	1
Figura 1.2 - Os satélites da MECB, o SCD1 (a), e o SCD2 (b).	2
Figura 1.3 - Partes das órbitas do satélite SCD2 durante o mês de novembro de 1998 na visada da estação receptora de Cuiabá-MT (latitude 16°S e longitude 56°O).....	2
Figura 1.4 - As órbitas dos satélites SCD1 e SCD2 são complementares.	3
Figura 1.5 - Evolução do número de PCDs de 1993 a 2008.	4
Figura 2.1 - Distribuição da energia dos fótons provenientes do Sol que chega ao planeta Terra.	7
Figura 2.2 - Diagrama de uma célula solar de junção iluminada e seu modo de operação semelhante ao de uma pilha.....	9
Figura 2.3 - O satélite sino-brasileiro de recursos terrestres, “China Brazil Earth Resources Satellite” (CBERS) a esquerda, e o satélite brasileiro SCD a direita.	11
Figura 2.4 - O satélite SCD2 sendo testado no Laboratório de Integração e Testes (LIT) do INPE.....	13
Figura 2.5 - Diagrama esquemático de absorção luminosa de uma célula solar de três junções.	15
Figura 2.6 - (a) Simulador solar desenvolvido e comercializado no Brasil por INPE/Orbital Eng. Ltda., (b) Simulador solar desenvolvido nos USA pela empresa AOPT.....	17
Figura 2.7 - A tela de resultados de um teste de desempenho elétrica de um gerador solar testado no simulador do LAPSS do LIT-INPE.	18
Figura 3.1 - Característica corrente por tensão de uma célula solar típica iluminada.....	21
Figura 3.2 - Circuito elétrico equivalente de uma célula solar.	23
Figura 3.3 - A distorção da direção do vento solar causada pelo campo magnético terrestre.	24
Figura 4.1 - Fases de desenvolvimento do PSS dos satélites SCDs.	30
Figura 4.2 - Diagrama elétrico em blocos do PSS dos satélites SCDs.	31
Figura 4.3 - Vista explodida dos SCDs.....	32
Figura 4.4 - Formação por camadas de um painel solar.	33
Figura 4.5 - Solar cell assembly (SCA) - Célula solar com interconector e vidro de proteção.	34

Figura 4.6 - Foto do SCA do painel solar do SCD1.....	35
Figura 4.7 (a) - Foto da face frontal do cupom de testes dos painéis solares do SCD1.....	36
Figura 4.7 (b) - Foto da face traseira do cupom de testes dos painéis solares do SCD1.....	37
Figura 4.8 - Desenho de detalhes do painel lateral do SCD2.....	38
Figura 4.9 - Esquema de iluminação do satélite SCD2 que tem forma geométrica octogonal.	40
Figura 4.10 - 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.....	42
Figura 5.1 - O satélite SCD1 integrado ao foguete Pegasus.....	47
Figura 5.2 - Velocidade de rotação do satélite SCD1.....	47
Figura 5.3 - Velocidade de rotação do satélite SCD2.....	48
Figura 5.4 - Esquema da geometria de iluminação dos painéis solares.....	49
Figura 5.5 – Ângulo de aspecto solar do satélite SCD1.	50
Figura 5.6 – Ângulo de aspecto solar do satélite SCD2.	50
Figura 5.7 - Intensidade solar causada pelos ciclos solares.	51
Figura 5.8 - Variação anual da intensidade solar de acordo com a distância Terra-Sol.	53
Figura 5.9 - Temperatura dos painéis solares em março de 1994.	54
Figura 6.1 - As órbitas vistas pelas estações de Cuiabá e Alcântara.....	56
Figura 6.2 - Curvas da telemetria da corrente do SCD1 entre 01 e 05 de novembro de 2010.	57
Figura 6.3 – Diagrama de iluminação do satélite.	58
Figura 6.4 - Variação da corrente do SCD1 associada a rotação do satélite, a geometria octogonal do satélite e ao albedo planetário.	58
Figura 7.1 - Corrente fotogerada no SCD1 de 1994 a 2011.....	62
Figura 7.2 – Degradação da corrente fotogerada no SCD1 em 18 anos.....	63
Figura 7.3 – Corrente fotogerada no SCD1 e a degradação por fluência de elétrons de $5 \times 10^{13} \text{ e/cm}^2$ e de $1 \times 10^{13} \text{ e/cm}^2$	64
Figura 7.4 - Curvas da órbita, do albedo, da temperatura e dados de correntes fotogeradas obtidos em 01 julho 2003.....	66
Figura 7.5 - Curvas da órbita, do albedo, da temperatura e dados de correntes fotogeradas obtidos em 01 janeiro 2004.	67
Figura 7.6 - Curvas da órbita, do albedo, da temperatura e dados de correntes fotogeradas obtidos em 01 janeiro 2006.	67

Figura 7.7 - Curvas da órbita, do albedo, da temperatura e dados de correntes fotogeradas obtidos em 02 julho 2006.....	67
Figura 7.8 - Curvas da órbita, do albedo, da temperatura e dados de correntes fotogeradas obtidos em 02 janeiro 2008.	68
Figura 7.9 - Curvas da órbita, do albedo, da temperatura e dados de correntes fotogeradas obtidos em 02 janeiro 2009.	68
Figura 7.10 – Corrente fotogerada no SCD2 de 2003 a 2010.	70
Figura 7.11– Degradação da corrente fotogerada no SCD2 em 07 anos.....	71
Figura A.1 - Amostra de dados do ECS recebido pela telemetria do satélite SCD2.....	84
Figura A.2 - Curva dos dados da Figura A.1 depois da transformada de variável de tempo para fase de rotação do SCD2.	85
Figura A.3 - Valores de albedo medidos pelo ECS sobre a cidade de Manaus, dentro de uma resolução de $\pm 5^\circ$	86
Figura A.4 - Valores médios do albedo medido pelo ECS do satélite SCD2 para jul. 2000.....	87
Figura A.5 - Valores da radiação de onda curta (SWR) obtidos do satélite ERBE, para jul. 2000.....	87
Figura B.1 – Evento solar que provocou uma Ejeção de Massa Coronal (CME) em 23 jan. 2012.....	89
Figura B.2 - Fluxo de partículas medidos no satélite GOES-8 em julho de 2000 (a) e novembro de 2000 (b).....	90
Figura B.3 - Fluxo de partículas medidos no satélite GOES-8 em novembro de 2001 (a) e outubro de 2003 (b).....	90
Figura B.4 - Fluxo de partículas medido pelo satélite GOES-8.	91
Figura B.5 - Variação da fluência durante os dez anos de vida do SCD2.	91
Figura D.1 - Diagrama das diversas camadas do SCE.	96
Figura D.2 – (a) Variação da corrente de curto circuito e (b) do coeficiente térmico em função do tempo de vida do SCD2.	97
Figura D.3 - (a) Variação da tensão circuito aberto e (b) do coeficiente térmico em função do tempo de vida do SCD2.....	97
Figura D.4 - Variação da eficiência de conversão das células solares em função do tempo de vida do SCD2.	98

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 4.1- Número de células solares instalados nos SCDs.....	39
Tabela. 5.1: Parâmetros elétricos da célula solar.....	45
Tabela. 5.2: Coeficientes de temperatura da célula solar.....	46
Tabela. 5.3: Coeficientes de radiação.	46
Tabela 5.5 – Variação da intensidade solar com a distância Terra-Sol.....	52
Tabela 7.1 - Valores da corrente dos painéis solares do satélite SCD1, extraídos dos arquivos de dados das órbitas de janeiro de 1994 a janeiro de 2011.	61
Tabela 7.2 - Valores característicos extraídos dos dados mostrados nas Figuras 7.4 até 7.9 e valores de arquivos de outras órbitas de julho de 2003 a julho de. 2010.....	69
Tabela C.1 – Principais diferenças entre o SCD1 e o SCD2.....	93

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASCII	American Standard Code
AM0	Air Mass Zero
AOPT	Alpha-Omega Power Technologies
BCR	Battery Discharge Regulator
BDR	Regulator Discharge Regulator
BOL	Begin of life
BSF	Back surface field
BSR	Back surface reflector
CBERS	China Brazil Earth Resources Satellite
CCS	Centro de Controle de Satélites
CME	Coronal Mass Ejection
ECS	Experimento Célula Solar
DC/DC	Corrente contínua/corrente contínua
DEA	Divisão de Eletrônica Aeroespacial
ECSS	European Cooperation for Space Standardization
EOL	End of life
ESA	European Space Agency
FINEP	Financiadora de Estudos e Projetos
IFOV	Instantaneous field of view
IMM	Inverted Metamorphic Solar Cell
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
LAPSS	Large Area Pulsed Solar Simulator
LAS	Laboratório Associado de Sensores
LIT	Laboratório de Integração e Testes
LME	Laboratório de Microeletrônica
MEA	Main Amplifier Error
MECB	Missão Espacial Completa Brasileira
NASA	National Aeronautics and Space Administration

NREL	National Research Energy Laboratory
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
PCD	Plataforma de Coleta de Dados
PCU	Power Conditioning Unit
PDU	Power Distribution Unit
PSS	Power Supply Subsystem
SAG	Solar Array Generator
SCA	Solar Cell Assembly
SCD	Satélite de Coleta de Dados
SEU	Single event upset
SINDA	Sistema Nacional de Dados Ambientais
SOLSIM	Simulador Solar de Baixo Custo
SWR	Standing wave radio
USP	Universidade de São Paulo
WETE	Workshop de engenharia e tecnologia

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Fator de qualidade do diodo
A_a	Radiação refletida
A_s	Radiação solar
FF	Fator de preenchimento
GaAs	Gálio-arsênio
Ge	Germânio
GaInP	Gálio-índio-fósforo
H_s	Medida da altura do pico solar
H_T	Medida da altura da refletividade terrestre
I	Corrente elétrica que flui através dos terminais da célula solar
$I \times V$	Gráfico corrente versus tensão da célula solar
I_L	Corrente fotogerada
I_{mp}	Corrente de máxima potência
I_{op}	Corrente de operação
IR	Infravermelho
I_s	Corrente de saturação da célula solar
I_{sag}	Corrente total do gerador solar
I_{sc}	Corrente de curto-circuito
$I_{sc}(AM0)$	Corrente de curto circuito na condição de iluminação AM0
I_{shunt}	Corrente do equipamento Shunt
J_{imp}	Densidade de corrente de máxima potência
J_{isc}	Densidade de corrente de curto-circuito
K	Constante de Boltzmann ($8,617 \times 10^{-5}$ eV/K)
K_L	Coeficiente de dano (comprimento de difusão)
L	Comprimento final de difusão dos portadores minoritários
L_0	Comprimento inicial de difusão dos portadores minoritários
P_{inc}	Potência incidente
P_{max}	Máxima potência de conversão

P_{mp}	Potência máxima de saída
q	Carga eletrônica ($1,602 \times 10^{-19}$ C)
R_P	Resistência em paralelo do circuito elétrico equivalente
rpm	Rotações por minuto
R_S	Resistência série do circuito elétrico equivalente à célula solar
T	Temperatura absoluta
t	Tempo
UV	Ultravioleta
V	Tensão
V_{mp}	Tensão de máxima potência
V_{oc}	Tensão de circuito aberto
β_{Voc}	Coefficiente de temperatura para tensão de circuito aberto
β_{Isc}	Coefficiente de temperatura para corrente de curto-circuito
η	Eficiência de conversão de energia solar em energia elétrica
τ	Tempo de vida dos portadores minoritários
τ_0	Tempo de vida dos portadores minoritários antes da irradiação
τ_e	Tempo de vida dos portadores minoritários devido a irradiação de elétrons
τ_p	Tempo de vida dos portadores minoritários devido a irradiação de prótons
τ	Tempo de vida final dos portadores minoritários
τ_0	Tempo de vida inicial dos portadores minoritários
$K\tau$	Coefficiente de dano (tempo de vida)
ϕ	Fluência da radiação
θ	Rotação do satélite
γ	Ângulo de aspecto solar
β	Ângulo de rotação do satélite
π	3,14159265

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1. INTRODUÇÃO	1
2. ENERGIA SOLAR, CONVERSÃO E CÉLULAS SOLARES.....	7
2.1. Conversão da energia solar	8
2.3. Células solares de uso espacial	11
2.4. Medida de eficiência de conversão fotovoltaica e sua evolução	15
2.5. Classificação e vida útil dos satélites	19
3. CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS DE CÉLULAS SOLARES.....	21
3.1. Parâmetros da curva I x V	21
3.2. Efeito da radiação espacial nas células solares	24
4. O SUBSISTEMA DE SUPRIMENTO DE ENERGIA E O GERADOR SOLAR.....	29
4.1. Fases de desenvolvimento do PSS.....	29
4.2. Descrição do PSS dos satélites SCDs	30
4.3. Descrição dos painéis solares dos SCDs.....	32
4.4. Projeto elétrico do gerador solar	39
4.5. Simulação da influência do albedo na corrente fotogerada.....	40
5. PROJETO DO GERADOR SOLAR: A ANÁLISE PRELIMINAR DAS POTÊNCIAS GERADAS	43
5.1. Análise de potência do gerador solar	44
5.1.1. Especificações de células solares dos SCDs.....	45
5.1.2. Fatores de perda de potência.....	46
5.1.3. Rotação do satélite.....	47
5.1.4. Variação da intensidade solar devido ao ângulo de aspecto solar, a irradiância solar e a distância Terra-Sol.....	48
5.1.4.1. Ângulo de aspecto solar.....	48
5.1.4.2. Irradiância solar	51
5.1.4.3. Distância Terra-Sol	51
5.1.5. Temperatura dos painéis solares	53

6.	ANÁLISE DAS CORRENTES ELÉTRICAS DOS PAINÉIS SOLARES EM ÓRBITA	55
6.1.	Recuperação das telemetrias de voo	55
6.2.	Análise das telemetrias de corrente do satélite SCD1	56
6.3.	Análise das telemetrias de corrente do satélite SCD2	59
7.	RESULTADOS DAS ANÁLISES DAS CORRENTES ELÉTRICAS.....	61
7.1.	Resultados das análises dos dados do SCD1.....	61
7.2.	Resultados das análises dos dados do SCD2.....	65
8.	CONCLUSÃO.....	73
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77
	APÊNDICE A - O ALBEDO PLANETÁRIO COMO SUBPRODUTO DO ECS..	83
	APÊNDICE B - A RADIAÇÃO ESPACIAL MEDIDA PELO SATÉLITE GOES 8	89
	APÊNDICE C – PRINCIPAIS DIFERENÇAS ENTRE O SCD1 E O SCD2	93
	APÊNDICE D - ANÁLISE DAS CORRENTES DO EXPERIMENTO CÉLULA SOLAR (ECS) DO SCD2.....	95

..

1. INTRODUÇÃO

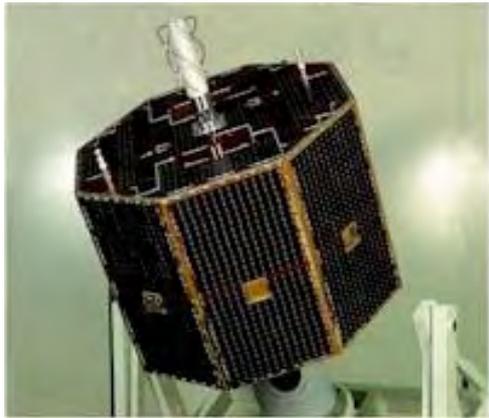
Como parte da Missão Espacial Completa Brasileira (MECB), o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) lançou os dois primeiros satélites de coleta de dados (SCDs) brasileiros, o SCD1 e o SCD2, nos dias 9 de fevereiro de 1993 e no dia 22 de outubro de 1998, respectivamente. Eles são partes de um 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 as estações terrenas e posteriormente são distribuídos aos usuários. A Figura 1.1 mostra o sistema de coleta de dados ambientais.



Figura 1.1 - O sistema de coleta de dados ambientais.

Fonte: INPE (2011).

Os satélites SCDs, vistos na Figura 1.2, tem massa de 115 kg, tem forma de prisma octogonal de 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 (INPE, 2003).



(a)



(b)

Figura 1.2 - Os satélites da MECB, o SCD1 (a), e o SCD2 (b).

Fonte: Souza (2003).

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 a 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. A Figura 1.3 mostra as linhas das órbitas percorridas pelos SCDs sobre o Brasil, dentro da visada da estação de Cuiabá.

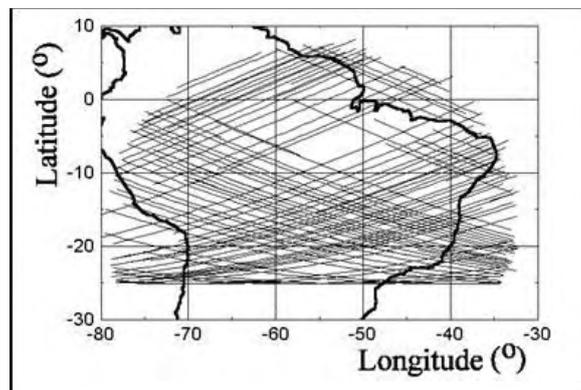


Figura 1.3 - Partes das órbitas do satélite SCD2 durante o mês de novembro de 1998 na visada da estação receptora de Cuiabá-MT (latitude 16°S e longitude 56°O).

Fonte: Veissid e Pereira (2000).

Os satélites continuam operando em órbita (MAIOLINO, 2012) 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, como mostrado na Figura 1.4, para minimizar o período diário em que fique sem passagens de um satélite sobre a estação terrena de Cuiabá.

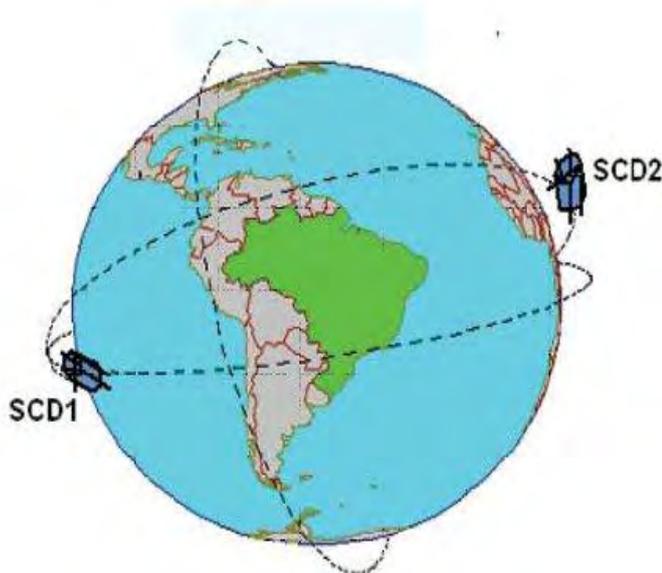


Figura 1.4 - As órbitas dos satélites SCD1 e SCD2 são complementares.

Fonte: UNESP (2012).

De acordo com o Sistema Nacional de Dados Ambientais (SINDA), as PCDs surgiram da necessidade de coletar informações de lugares remotos ou espalhados por uma região muito extensa. Como por exemplo, o controle de volume de água que chega numa barragem deve ser previamente conhecido para evitar desastres. A Figura 1.5 mostra a evolução da rede de PCDs até 2008.

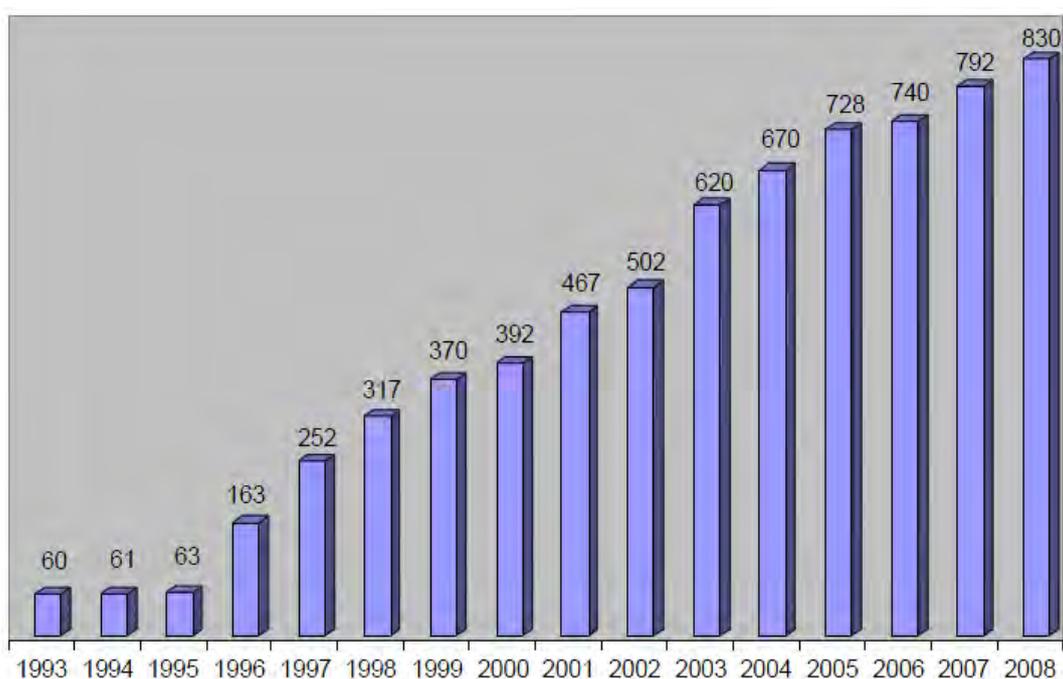


Figura 1.5 - Evolução do número de PCDs de 1993 a 2008.

Fonte: YAMAGUTI (2009).

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).

Além de coletar os dados ambientais das PCDs, os satélites levam a bordo os Experimentos Célula Solar (ECS), desenvolvidos pelo Laboratório Associado de Sensores e Materiais (LAS-INPE), em São José dos Campos/SP. O objetivo dos experimentos é estudar a degradação de células pela radiação, pelos ciclos térmicos e por outros efeitos ambientais encontrados fora da atmosfera terrestre durante o tempo de vida dos satélites (VEISSID,1990).

Este trabalho apresenta no capítulo 2 o histórico da conversão de energia solar em elétrica, o efeito fotovoltaico, as células solares de uso espacial, as medidas de eficiência de conversão fotovoltaica e sua evolução, a classificação e a vida útil dos satélites. O capítulo 3 trata das considerações teóricas de células solares descrevendo os parâmetros da curva de corrente por tensão e o efeito da radiação espacial nas células solares. O capítulo 4 descreve o subsistema de suprimento de energia (PSS) dos satélites SCDs, responsável pela geração, armazenamento e distribuição de potência. Este capítulo também trata das fases de desenvolvimento, da descrição detalhada do projeto dos painéis solares e da simulação da influência do albedo na corrente fotogerada. O capítulo 5 trata dos requisitos necessários para elaboração da análise da potência que o gerador solar (SAG) deverá apresentar quando estiver em órbita: especificações das células solares, fatores de perda, rotação do satélite, variação da intensidade solar e temperatura são alguns destes fatores. O capítulo 6 apresenta as análises da corrente elétrica das células solares dos painéis dos satélites SCD1 e SCD2 em órbita, descrevendo como foi realizada a recuperação dos dados e a análise das telemetrias. O capítulo 7 apresenta os resultados das análises da corrente elétrica dos satélites SCD1 e SCD2 e a degradação ocorrida no período de vida já decorrente. O capítulo 8 trata da conclusão deste trabalho e propostas para estudos futuros.

2. ENERGIA SOLAR, CONVERSÃO E CÉLULAS SOLARES

A principal fonte de energia da Terra é o Sol. O Sol é composto de 92% de gás hidrogênio pressurizado pelo forte campo gravitacional. Por meio da fusão nuclear, esse hidrogênio é convertido em átomos de hélio. Esse processo libera energia em forma de fluxo de fótons – pacotes de ondas eletromagnéticas – que são emitidos pelo Sol, de maneira homogênea, em todas as direções do cosmos.

A Terra distante 150 milhões de quilômetros do Sol recebe em média, por minuto, a mesma quantidade de energia que é produzida pela usina hidrelétrica de Itaipu durante 25 anos. Apenas a superfície do Brasil recebe, por minuto, a mesma energia que essa usina demora a produzir em seis meses.

A luz solar é composta por fótons, que são caracterizados por sua frequência ou comprimento de onda. A energia de cada fóton aumenta com a diminuição do seu comprimento de onda. A Figura 2.1 mostra de forma gráfica a distribuição da energia solar na superfície do globo terrestre.

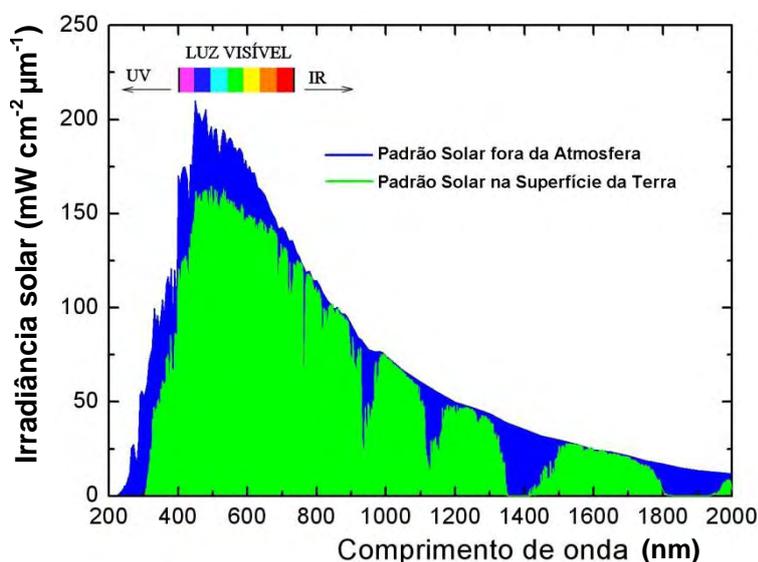


Figura 2.1 - Distribuição da energia dos fótons provenientes do Sol que chega ao planeta Terra.

Fonte: Veissid (2010).

Na curva externa da Figura 2.1, a área azul corresponde ao espectro encontrado fora da atmosfera terrestre e tem uma potência de 1.367 W/m^2 . Na curva interna da Figura 2.1, a área verde tem uma potência de 1.000 W/m^2 e incide sobre a superfície da Terra com céu claro e sem nuvens. A irradiância solar no topo da atmosfera possui 6,3% de raios ultravioletas (UV), 44,9% de luz visível e 48,8% de raios infravermelhos (IR) em energia. Por outro lado, na superfície ao nível do mar, tem-se 3,2% de raios ultravioletas (UV), 49,1% de luz visível e 47,7% de raios infravermelhos (IR) em energia.

2.1. Conversão da energia solar

A conversão direta da energia solar em energia elétrica é feita através de células solares, que são dispositivos semicondutores. O fenômeno físico responsável pelo funcionamento de uma célula solar é chamado de efeito fotovoltaico.

A eficiência de conversão de energia é uma característica inerente aos processos físicos e químicos que transformam uma forma de energia em outra.

O ideal em um processo de conversão de energia é que sua eficiência seja a maior possível, quanto mais próximo de 100% melhor. Isso acontece quando a totalidade de determinada energia é transformada em outro tipo de energia sem nenhuma perda. A eficiência das “máquinas” de transformação de energia, como motores elétricos, lâmpadas, geradores hidroelétricos, chuveiros elétricos, coletores solares e células solares, dependem do avanço da tecnologia. Ou seja, ela está atrelada a novas descobertas que acarretem em um aumento de conversão de energia.

2.2. Efeito fotovoltaico

O efeito fotovoltaico é caracterizado pelo aparecimento de uma diferença de potencial ou tensão elétrica, quando um dispositivo é submetido a uma iluminação. Os fótons incidentes em alguns materiais semicondutores transferem os elétrons da banda de valência à banda de condução dentro do próprio material da célula. Esse efeito por si só não garante o funcionamento da célula solar. É necessária uma estrutura apropriada, em que os elétrons excitados possam ser coletados, gerando uma corrente útil. Através da união dos cristais do tipo n e p, forma-se a junção na qual haverá uma difusão de elétrons e a formação de um campo elétrico. No momento em que a luz solar incidir na célula haverá a formação de pares elétrons-buracos que irão fluir para os lados n e p, produzindo a corrente elétrica (ABREU, 2004).

A Figura 2.2 mostra o efeito fotoelétrico, que é similar ao de uma pilha.

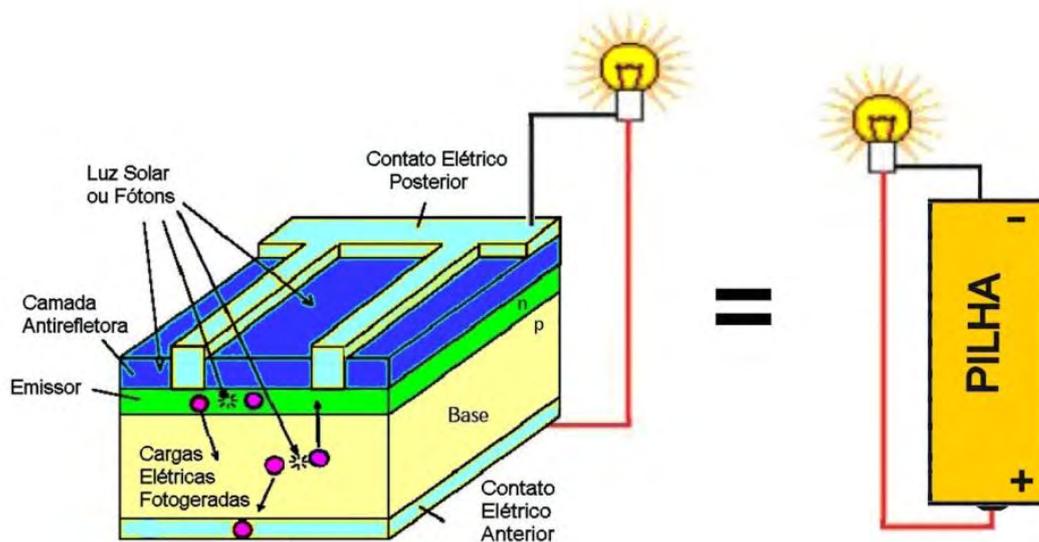


Figura 2.2 - Diagrama de uma célula solar de junção iluminada e seu modo de operação semelhante ao de uma pilha.
Fonte: Veissid (2010b).

Edmund Becquerel, em 1839, foi o primeiro cientista a perceber esse fenômeno físico. Desde então, os cientistas tinham conhecimento sobre a possibilidade de geração de energia elétrica através do efeito fotovoltaico. Os dispositivos de conversão de energia desse tipo sempre transformavam menos de 1% da energia solar em energia elétrica: uma eficiência de conversão muito baixa, que não justificava sua produção comercial. Por isso, até meados da década de 1950, experimentos nessa área eram apenas curiosidades de laboratório. Somente em 1954, com a publicação de um artigo científico por pesquisadores dos laboratórios Bell (CHAPIN et al., 1954), relatando os passos tecnológicos para se conseguir uma célula solar com mais de 10% de eficiência, teve início a corrida para se conseguir células solares com eficiências cada vez maiores.

Por coincidência, essa época também foi marcada pela corrida espacial e produção dos satélites artificiais. Esses satélites, que possuíam suas baterias alimentadas por fontes radioativas, começaram a utilizar células solares como geradores de potência elétrica.

Um material semicondutor com uma junção iluminada mostra tensão elétrica e corrente elétrica nos terminais de maneira análoga a uma bateria química. Por exemplo, uma pilha comum tem voltagem de 1,5 V e uma célula solar iluminada, feita com material de silício, tem 0,5 V. Os valores de tensão elétrica e de corrente elétrica são dependentes da carga colocada nos terminais, e existe um valor de carga ideal no qual o produto de tensão por corrente é máximo. A potência de saída calculada neste ponto fornece a eficiência de conversão de energia da célula solar.

A Figura 2.2 mostra que, quando os fótons penetram no material semicondutor, são geradas cargas elétricas livres, que são separadas pelo campo elétrico entre a junção do semicondutor tipo p (base) e do semicondutor tipo n (emissor). Essas cargas chegam até os contatos metálicos e provocam uma tensão elétrica nos terminais positivo e negativo. Se um aparelho consumidor estiver ligado a esses terminais, existirá um fluxo de corrente elétrica através

dos polos da célula solar. Deve-se observar que o contato elétrico posterior, sendo metálico, não é transparente à luz. Um óxido nessa superfície atua como uma camada anti-refletora. Esse processo diminui a perda de energia por refletividade na superfície da célula solar, pois os fótons refletidos que não penetram no material semicondutor representam uma perda de eficiência.

As células solares podem ser classificadas quanto ao tipo de material, aplicações e outras características do processo de fabricação.

2.3. Células solares de uso espacial

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, 2012a). Atualmente, a maioria dos satélites em órbita em torno da Terra têm painéis solares gerando vários milhares de Watts de potência.

Painéis solares compostos por células solares estão localizados nas partes externas dos satélites. Os painéis podem estar juntos ao corpo do satélite ou abertos e orientados para o Sol, conforme mostra a Figura 2.3.



Figura 2.3 - O satélite sino-brasileiro de recursos terrestres, “China Brazil Earth Resources Satellite” (CBERS) a esquerda, e o satélite brasileiro SCD a direita.

Fonte: Souza (2003).

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 nenhum tipo de 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. Devido à órbita baixa dos dois satélites, eles experimentam uma grande oscilação de temperatura.

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, que está preparado para executar os ensaios ambientais e funcionais necessários para qualificar equipamentos para uso em satélite. A Figura 2.4 mostra o satélite SCD2 sendo testado no LIT.



Figura 2.4 - O satélite SCD2 sendo testado no Laboratório de Integração e Testes (LIT) do INPE.

Fonte: Souza (2003).

Atualmente, os tipos de células solares de uso em satélites mais comuns são:

- a) Células solares de silício monocristalino - são dispositivos resistentes e altamente confiáveis, do ponto de vista eletrônico e de resistência mecânica. Durante mais de 20 anos de uso em satélites, ficaram comprovadas essas qualidades. Seus pontos fracos são a média resistência à radiação e a média eficiência de conversão de energia (18%). O estágio tecnológico dessa célula solar já alcançou seu topo e quase não há mais pesquisas a serem feitas. Ao longo dos anos, várias melhorias foram incorporadas a essas células solares: junção rasa, material de silício de alta pureza (99,999999%), crescimento do monocristal por fusão lenta de camadas gerando pouquíssimos defeitos, espelho de alumínio na face anterior, campos elétricos adicionais e deposição metálica por feixe de elétrons, entre outras. Esses incrementos tecnológicos no dispositivo resultaram em um aumento da eficiência desse tipo de célula solar de 10% na década de 1960 para quase 20% nos dias atuais.

- b) Células solares de arsenieto de gálio e índio – as células de arsenieto de gálio de uma junção apresentam eficiência superior as de silício, podendo chegar a 24% (ABREU, 2004). Para atingir eficiências superiores foi necessário desenvolvimento de nova tecnologia. O uso de células multijunção trouxe grande aumento na eficiência das células solares. As células de duas junções utilizando arsenieto de gálio com índio atingem eficiência de 25,7%.
- c) 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 semiconductor é absorvido 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 (Figura 2.5). Dessa maneira, esse espectro é mais bem aproveitado, e a eficiência de conversão de energia é superior a 30%.
- d) Atualmente, células solares com mais de três junções estão sendo testadas em laboratório e, provavelmente, dentro de poucos anos serão comercializadas. O desenvolvimento de células solares com estrutura de montagem invertida, chamadas IMM (Inverted Metamorphic Solar Cell), possibilita alcançar valores eficiência de 39%.

As células de tripla junção vêm sendo cada vez mais utilizado em programas espaciais, apesar de seu custo ser muito superior ao das células solares convencionais de silício para uso em satélite. O programa sino-brasileiro de satélites CBERS colocou em órbita, em outubro de 1999, o primeiro satélite, o CBERS1; em outubro de 2003, o segundo satélite, o CBERS2; e, em setembro

de 2007, o terceiro satélite, o CBERS2B (DE OLIVEIRA, 2009). Cada um deles com 15.000 células solares de silício que geravam 1.500 W no começo de vida do satélite. O quarto satélite da série, CBERS3, equipado com 10.000 células solares de tripla junção gerará 2.500 W e tem data de lançamento prevista para 2012.

A Figura 2.5 mostra o esquema de funcionamento de uma célula solar de tripla junção. A junção do topo absorve a luz ultravioleta (UV), violeta, anil e azul. A junção do meio absorve a luz verde e a junção da base absorve as luzes amarela, laranja, vermelha e infravermelha (IR). O topo é feito com material semiconductor de liga gálio-índio-fósforo (GaInP), o meio é feito com material semiconductor de liga gálio-arsênio (GaAs) e a base é feita de germânio (Ge).

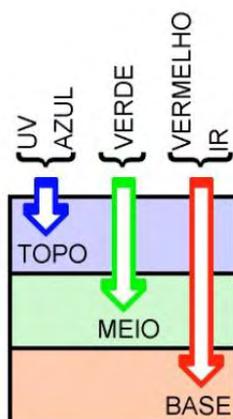


Figura 2.5 - Diagrama esquemático de absorção luminosa de uma célula solar de três junções.
Fonte: Veissid (2010b).

2.4. Medida de eficiência de conversão fotovoltaica e sua evolução

A eficiência de uma célula solar é medida em laboratórios de pesquisa e centros de produção, pois caracteriza o estado da arte dos processos usados na fabricação. Para uso espacial esse índice é obtido por meio da curva experimental de corrente elétrica por tensão obtida com a célula solar em condições específicas, isto é, iluminação padrão definida na norma ECSS-E-ST-20-08C (ECSS, 2008) e temperatura de 25°C.

A medida de eficiência de conversão fotovoltaica é realizada em laboratório com o simulador solar (que reproduz a luz solar natural). O Grupo de Células Solares do LAS – INPE e o LIT executam essa medida para satisfazer às exigências dos programas de satélites brasileiros e, também, como serviço à comunidade para interessados externos (estudantes e pesquisadores de outros institutos e empresas).

Pela curva de corrente por tensão, conhecida como característica $I \times V$, é possível extrair várias informações a respeito dos processos físicos do funcionamento e do estado da arte da fabricação da célula solar. Os pesquisadores do LAS–INPE têm publicado artigos em revistas internacionais e apresentado em congressos da área dezenas de trabalhos sobre esse tipo de pesquisa fundamental como, por exemplo, Veissid et al. (1990, 1997 e 1998) e por Nubile et al. (1994).

Deve-se ressaltar que uma boa medida da característica de uma célula solar iluminada depende crucialmente da fonte de luz usada, ou seja, depende do simulador solar. Em função disso, o LAS–INPE desenvolveu um projeto financiado pela Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) chamado de Simulador Solar de Baixo Custo (SOLSIM). A tecnologia desse equipamento foi patenteada e repassada para a Orbital Engenharia Ltda., em São José dos Campos, SP, que já produziu e comercializou vários desses sistemas.

A Figura 2.6(a) mostra a foto do SOLSIM. A Figura 2.6(b) mostra o Simulador Solar Pulsado de Grande Área (LAPSS) instalado no LIT-INPE, fabricado pela empresa “Alpha-Omega Power Technologies Limited Company” (AOPT), utilizado para testar os painéis solares dos satélites brasileiros e de outros países.



(a)



(b)

Figura 2.6 - (a) Simulador solar desenvolvido e comercializado no Brasil por INPE/Orbital Eng. Ltda., (b) Simulador solar desenvolvido nos USA pela empresa AOPT.

Fonte: (a) Veissid (2010b) e (b) AOPT (2006).

O simulador solar de grande área, LAPSS, do LIT-INPE pode apresentar na tela, os resultados dos testes de desempenho elétrico dos geradores solares em formato de fácil compreensão para o operador (Figura 2.7). São apresentados como resultados a curva $I \times V$, os pontos mais importantes como V_{oc} , I_{sc} , e outros.

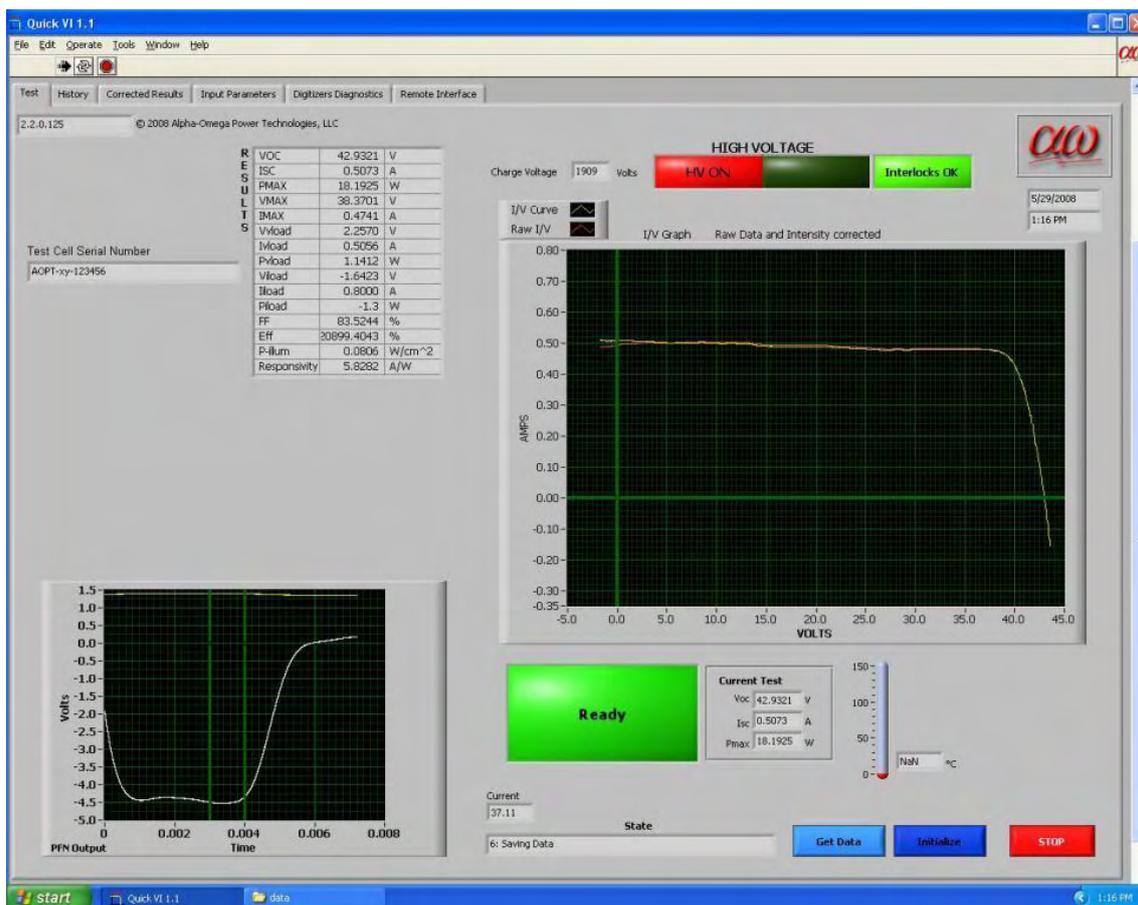


Figura 2.7 - A tela de resultados de um teste de desempenho elétrica de um gerador solar testado no simulador do LAPSS do LIT-INPE.
Fonte: AOPT (2006).

Para uma determinada célula solar entrar na lista de melhor eficiência, ela deve ter sido caracterizada por laboratórios credenciados internacionalmente. Os dois principais institutos que fazem e divulgam o estudo da corrida de eficiência de células solares são o “National Research Energy Laboratory” (NREL), nos Estados Unidos, e o Instituto Fraunhofer, na cidade de Freiburg, na Alemanha.

Um marco importante realizado pelo LAS-INPE foi o projeto, desenvolvimento, fabricação e testes de lotes de células solares de silício de qualificação espacial para uso nos experimentos que estão a bordo dos satélites brasileiros SCD1 e SCD2.

2.5. Classificação e vida útil dos satélites

Os satélites artificiais são classificados segundo a massa, a órbita (trajetória que descrevem em volta da Terra), o tamanho e a finalidade. São exemplos os satélites geoestacionários de órbita alta, os telescópios espaciais, os de sensoriamento remoto, meteorológicos, GPS e militares. A massa define os pequenos satélites como nano, micro e mini.

A altitude da órbita e as características do satélite (massa, orientação por spin ou três eixos e outras) estabelecem o ciclo de temperatura de operação. Os satélites brasileiros de coleta de dados SCDs enfrentam uma variação de temperatura de -40°C a $+40^{\circ}\text{C}$ a cada volta em torno da Terra. A rotação do satélite em torno de seu eixo colabora para que este ciclo térmico não seja mais intenso.

Os satélites sino-brasileiros da série CBERS têm os painéis solares voltados constantemente para o Sol, em um sistema de controle de três eixos. Devido a esses fatores, sua temperatura de operação varia entre -80°C a $+80^{\circ}\text{C}$, apresentando um ciclo térmico mais rigoroso do que os satélites SCDs.

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. Pesquisas com degradação de células solares em satélites artificiais em órbita da Terra são realizadas desde o ano de 1961 (FISCHELL et al., 1967).

Em um projeto de satélite, após definido seu tempo de vida útil é calculada por estimativa qual seria a potência elétrica gerada após esse período: eficiência de fim de vida, ou EOL (End of Life). O projeto do painel solar usa esse valor de eficiência para o cálculo da área necessária de painéis que irá gerar uma determinada potência. Dessa maneira, a área calculada deve “caber” no satélite, caso contrário o projeto de suprimento de energia deverá ser refeito. O valor de potência no começo de vida do satélite ou BOL (Begin of Life) deve mostrar que o painel solar atende a especificação de projeto e é utilizado para testar o painel solar em laboratório.

A vida útil de um satélite em órbita é muitas vezes superior a vida especificada. Quando o fluxo real de bombardeamento por partículas ionizantes é menor do que o estimado, a vida do satélite se prolonga.

O satélite SCD1 foi montado com componentes de qualificação espacial, mas com custo moderado. Em função das características dos componentes, o gerenciamento da MECB definiu a vida útil do SCD1 como sendo de um ano. O SCD2, em função da experiência adquirida no desenvolvimento do SCD1, foi fabricado com EOL de dois anos.

3. CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS DE CÉLULAS SOLARES

3.1. Parâmetros da curva I x V

Para melhor compreender o principal assunto deste trabalho que são os painéis solares, é necessário conhecer o equacionamento matemático que trata da variação da corrente de saída por tensão. Os principais parâmetros da curva característica de corrente por tensão são mostrados na Figura 3.1.

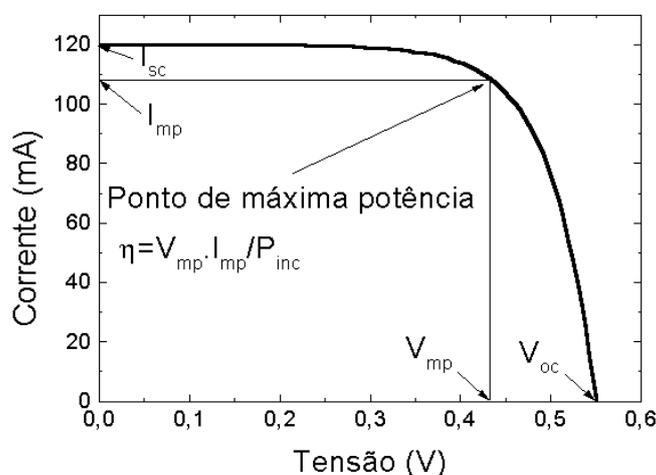


Figura 3.1 - Característica corrente por tensão de uma célula solar típica iluminada.

Fonte: Adaptada de Veissid (2005).

O valor I_{sc} é a corrente de curto circuito, isto é, a corrente fornecida pela célula solar quando ela está conectada a uma carga de valor ôhmico próximo de zero. Este valor é proporcional a quantidade de intensidade luminosa que incide na célula solar (RAUSCHENBACH, 1980).

O valor V_{oc} é a tensão de circuito aberto da célula solar, isto é a tensão elétrica quando ela não está conectada a nenhuma carga.

Os valores I_{mp} e V_{mp} são os valores de corrente e tensão no ponto de máxima potência. O ponto de máxima potência é o ponto ao longo da curva característica de tensão por corrente em que o produto deles é máximo. Neste ponto encontra-se o retângulo de maior área inscrito na curva $I \times V$.

A variação da corrente com a temperatura é dada pela Equação 3.1 (VEISSID, 1989):

$$I_{sc} = I_{scamb} + \beta I_{sc} (T-300) \quad (3.1)$$

Todos os outros parâmetros de saída mostram variação com a temperatura de maneira análoga à da Equação (3.1).

O fator de preenchimento é definido pela Equação 3.2.

$$FF = I_{mp} \cdot V_{mp} / (I_{sc} \cdot V_{oc}) \quad (3.2)$$

A eficiência de conversão da energia solar (η) em energia elétrica é definida como sendo a razão entre a potência máxima de saída (P_{mp}) e a potência luminosa incidente (P_{inc}), conforme a Equação 3.3.

$$\eta = P_{mp} / P_{inc} = I_{mp} \cdot V_{mp} / P_{inc} = FF \cdot I_{sc} \cdot V_{oc} / P_{inc} \quad (3.3)$$

Os valores de corrente, I_{sc} e I_{mp} aumentam com o aumento da temperatura. Os valores de tensão, V_{oc} e V_{mp} , diminuem com o aumento da temperatura, conforme a Equação 3.4.

$$V_{oc} = V_{ocamb} - \beta V_{oc} (T-300) \quad (3.4)$$

O valor da máxima potência diminui com o aumento da temperatura porque o aumento de corrente não é tão significativo a ponto de compensar a diminuição da tensão no ponto de máxima potência. Conseqüentemente, a eficiência de conversão diminui com o aumento da temperatura de operação do dispositivo. Este formalismo é muito conveniente para aplicações a projetos de painéis solares para satélites.

Utilizando parâmetros fundamentais ou analíticos da célula solar é possível obter equações que descrevem o comportamento das células solares dependentes das variações de tensão, temperatura, iluminação e irradiação por partículas ionizantes.

O circuito elétrico equivalente de uma célula solar real é mostrado na Figura 3.2.

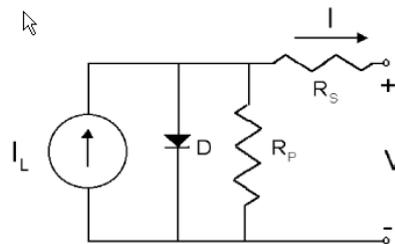


Figura 3.2 - Circuito elétrico equivalente de uma célula solar.

Fonte – Veissid et al (2010a).

O comportamento da característica corrente por tensão da uma célula solar iluminada é dada pela Equação 3.5 (WOLF et al., 1977):

$$I = I_L - I_S \left\{ \exp \left[\frac{q(V + IR_S)}{AkT} \right] - 1 \right\} - \frac{V + IR_S}{R_p} \quad (3.5)$$

I_L é a corrente foto gerada, I_S é a corrente de saturação, R_S e R_P são as resistências em série e em paralelo, A é o fator de qualidade do diodo, T é a temperatura do dispositivo, k é a constante de Boltzman e V é a tensão para uma dada corrente I (VEISSID et al, 1991 e 1995).

Para os satélites SCDs a corrente dos painéis solares pode ser extrapolada pela Equação 3.6 (VEISSID et al., 2010a):

$$I_{sc} = I_{sc}(AM0) \cdot \text{sen}(\gamma) \cdot (1 + \beta I_{sc} \cdot (T - T_0)) \quad (3.6)$$

$I_{sc}(AM0)$ é a corrente do painel solar de curto circuito na condição de iluminação AM0 (Air Mass Null), γ é o ângulo de atitude do satélite (orientação do satélite em relação à direção dos raios solares) e βI_{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 Equação 3.6. No entanto, o coeficiente de proporcionalidade térmico para V_{oc} (βV_{oc}) é negativo, pois a tensão de circuito aberto diminui com o aumento da temperatura.

3.2. 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 Figura 3.3 mostra a distorção causada no vento solar pelo campo magnético terrestre no espaço interplanetário.

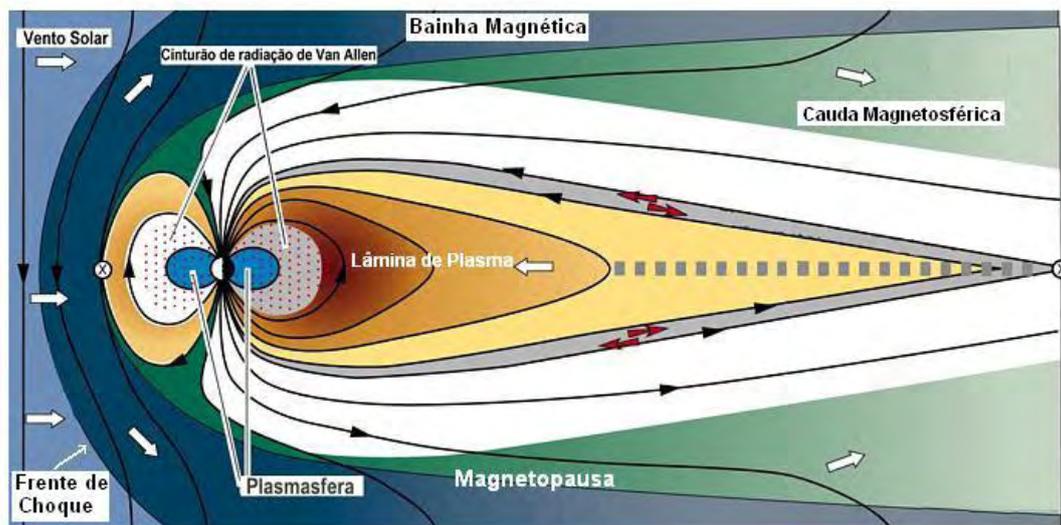


Figura 3.3 - A distorção da direção do vento solar causada pelo campo magnético terrestre.

Fonte: MURALIKRISHNA (2009).

A degradação dos parâmetros elétricos em células solares pode ser causada principalmente pela irradiação de elétrons e prótons, devido a 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.

A taxa de recombinação pode ser dada pela Equação 3.7 (TADA et al., 1982):

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_0} + \frac{1}{\tau_e} + \frac{1}{\tau_p} + \dots \quad (3.7)$$

Onde:

τ = tempo de vida dos portadores minoritários;

τ_0 = tempo de vida dos portadores minoritários antes da irradiação;

τ_e = tempo de vida dos portadores minoritários devido à irradiação de elétrons;

τ_p = tempo de vida dos portadores minoritários devido à irradiação de prótons;

A determinação da degradação por tipo e energia das partículas pode ser dada pela Equação 3.8:

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_0} + K\tau \cdot \phi \quad (3.8)$$

Onde:

τ - tempo de vida final dos portadores minoritários;

τ_0 - tempo de vida inicial dos portadores minoritários;

$K\tau$ - coeficiente de dano (tempo de vida);

ϕ – fluência da radiação (e/cm²).

O comprimento de difusão dos portadores minoritários é o parâmetro mais aplicável e mais facilmente determinável para fazer análises. A Equação 3.9 relaciona a degradação ao comprimento de difusão dos portadores minoritários:

$$\frac{1}{L^2} = \frac{1}{L_0^2} + K_L \cdot \phi \quad (3.9)$$

Onde:

L - comprimento final de difusão dos portadores minoritários

L_0 - comprimento inicial de difusão dos portadores minoritários

K_L – coeficiente de dano (comprimento de difusão)

ϕ –fluência da radiação (e/cm²).

4. O SUBSISTEMA DE SUPRIMENTO DE ENERGIA E O GERADOR SOLAR

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 (SOUZA, 2010).

4.1. Fases de desenvolvimento do PSS

Devido a diversidades de equipamentos, partes, materiais e funções que compõem um subsistema de suprimento de energia, o correto desenvolvimento somente pode ser realizado com uma equipe de especialistas em mecânica, eletrônica e física. A norma ABNT-NBR-14857 (Sistema espaciais - gerenciamento do programa) é utilizada para estabelecer a estruturação dos programas espaciais (ABNT, 2002)

Durante a fase de concepção do satélite alguns tópicos relativos ao subsistema são estabelecidos, como por exemplo, qual tipo de geração primária de energia seria utilizado para atender os requisitos de missão, os custos, a exequibilidade e o cronograma de desenvolvimento.

A fase seguinte é a de projeto preliminar onde são estabelecidos os requisitos de sistema (para o satélite) e de equipamentos, os planos de desenvolvimento, de garantia do produto, o plano de controle de configuração e outros. As soluções de projeto também são estabelecidas nesta fase.

A terceira fase é a de projeto detalhado, onde são concluídos os estudos e análises da solução de projeto para a configuração de lançamento e em órbita. São estabelecidas as especificações das estruturas, das células solares, das interfaces e como seriam atendidos os requisitos mecânicos, térmicos e elétricos. A revisão crítica de projeto no final desta fase autoriza a fabricação do modelo de voo.

Por causa da similaridade entre os dois satélites, para o SCD2 foram realizadas somente as fases da fabricação do modelo de voo, a fase de integração e teste, a fase de lançamento e a de voo. A Figura 4.1 apresenta as fases de desenvolvimento dos satélites SCDs.

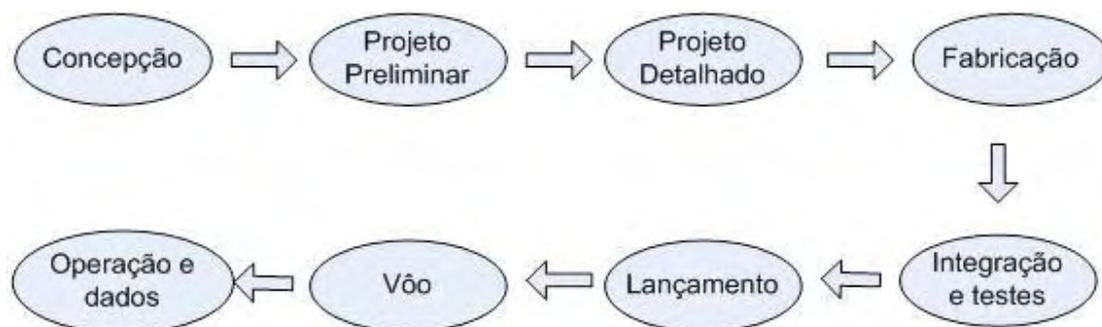


Figura. 4.1 - Fases de desenvolvimento do PSS dos satélites SCDs.

4.2. Descrição do PSS dos satélites SCDs

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 (SOUZA, 2010). A Figura 4.2 ilustra o diagrama elétrico em blocos do PSS.

A Unidade de Condicionamento de Potência (PCU) controla a energia gerada nos painéis solares que é armazenada numa bateria de níquel-cádmio formada por dezesseis células de 8Ah, e distribuída pelo barramento principal. A energia é distribuída aos equipamentos do satélite através da PDU e dos conversores DC/DC. O Shunt dissipa a potência excedente dos painéis solares.

O principal circuito da PCU é o MEA (Amplificador de Erro Principal) que controla as principais funções da PCU. O BDR (Battery Discharge Regulator) e o BCR (Battery Charge Regulator) controlam a entrada e saída de corrente da bateria (VAZ et al., 1995).

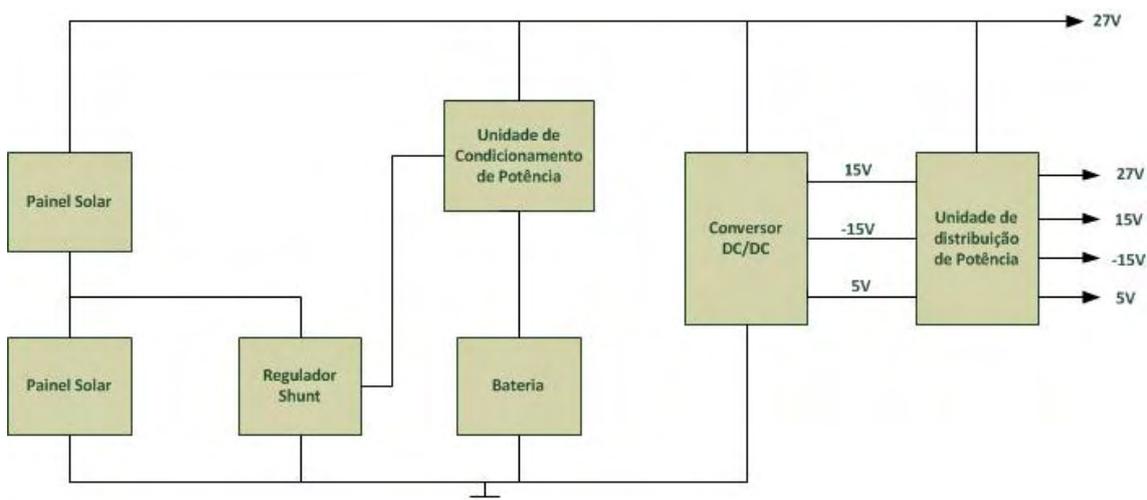


Figura 4.2 - Diagrama elétrico em blocos do PSS dos satélites SCDs.

Fonte: INPE (1986).

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. A corrente de operação I_{op} do satélite é determinada pela Equação 4.1.

$$I_{op} = I_{sag} - I_{shunt} \quad (4.1)$$

Os painéis solares do sistema de suprimento de energia do SCD1 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 (Figura 1.2).

4.3. Descrição dos painéis solares dos SCDs

Os SCDs utilizam a tecnologia de painéis solares integrados ao corpo do satélite como mostrado na Figura 4.3. 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.

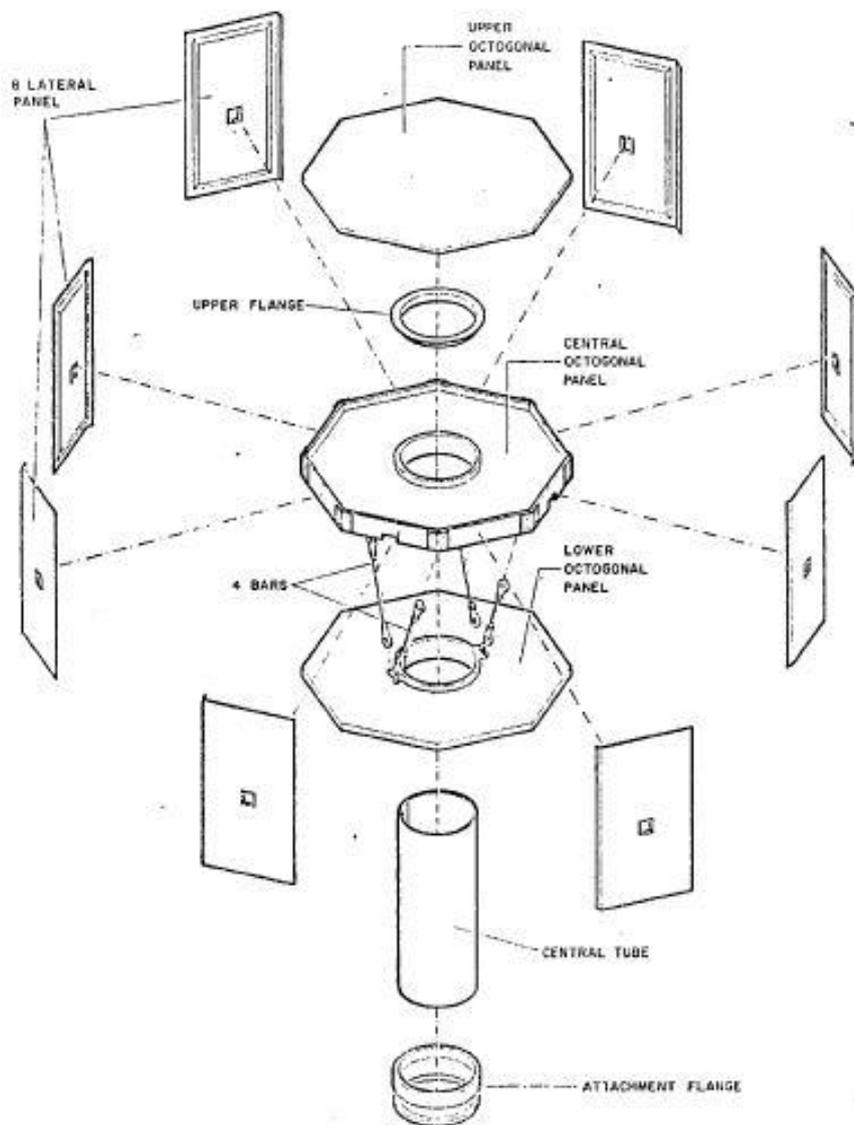


Figura 4.3 - Vista explodida dos SCDs.

Fonte: INPE (1990a).

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 borosilicato, dopado com 5% de dióxido de Cério (CMX-200), de 200 µm de espessura (INPE, 1990b), 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 (VAZ, 2000). A Figura 4.4 mostra as diversas camadas que compõem um painel solar.

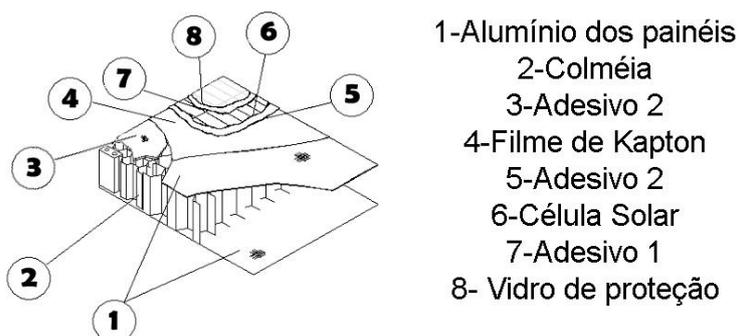
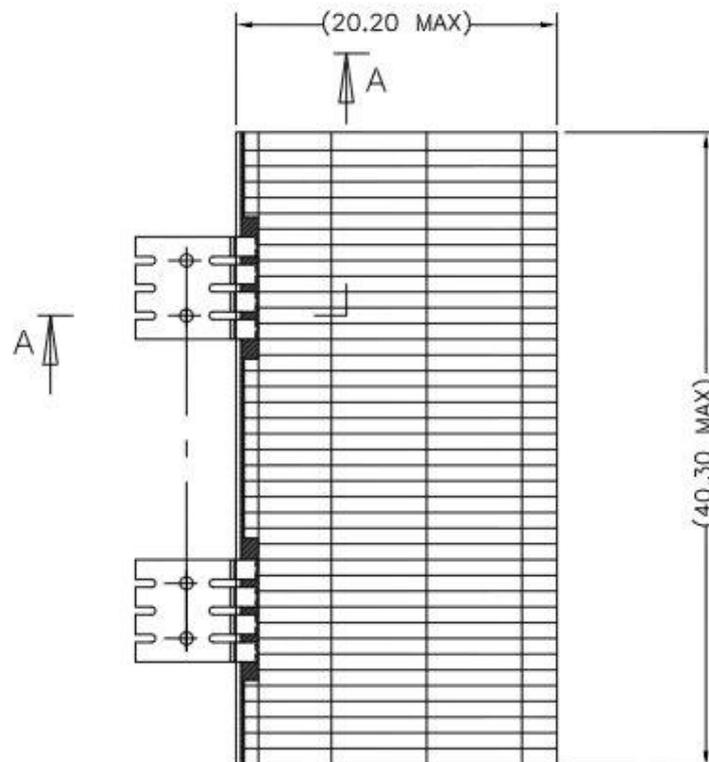
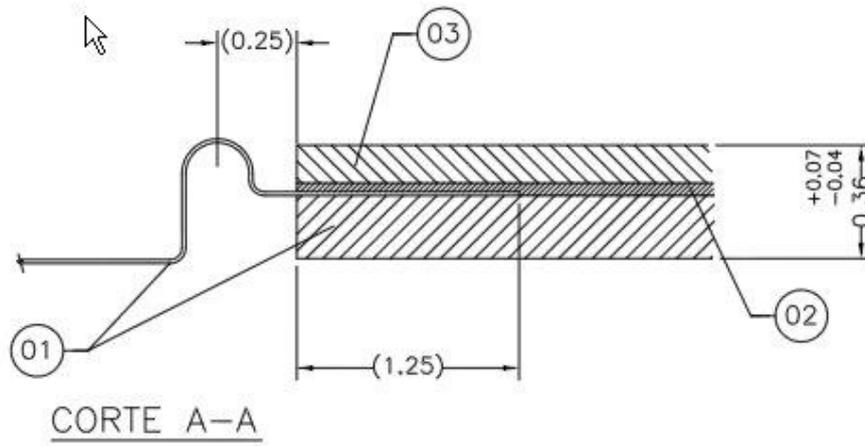


Figura 4.4 - Formação por camadas de um painel solar.

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. A Figura 4.5 mostra o desenho com dimensões de um SCA típico de uso espacial, e a Figura 4.6 mostra a foto de um SCA utilizado nos satélites do INPE, semelhante ao utilizado nos SCDs.



NOTA:
 20.20 MAX SOLAR CELL
 40.30 MAX COVERGLASS

Figura 4.5 - Solar cell assembly (SCA) - Célula solar com interconector e vidro de proteção.
 Fonte: INPE (2006).

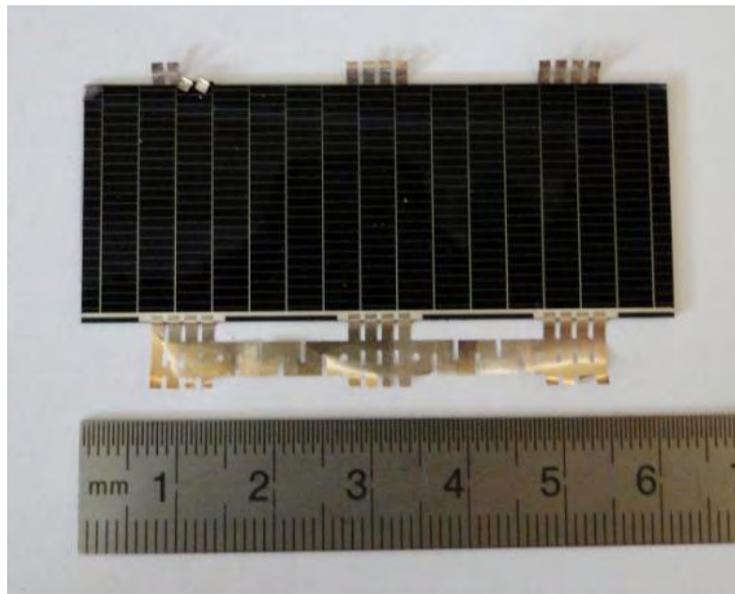


Figura 4.6 - Foto do SCA do painel solar do SCD1.

Fonte: Laboratório da Divisão de Eletrônica Aeroespacial (DEA – INPE).

As principais características das células solares dos SCDs são (SPECTROLAB, 1983):

- Fabricante: Spectrolab type K70, silício;
- Resistividade: 10 Ohm.cm;
- Eficiência: 14,93%, 28°C, AM0;
- Dimensões: 25,05 x 62,05 x 0,20 cm nos painéis laterais e 20,85 x 62,05 x 0,20 cm no painel de topo;
- Contato frontal: TiPdAg, “weldable”;
- Contato traseiro: AlTiPdAg, “weldable”;
- Absortividade solar: 0,86 ±0,02;
- Emissividade termal = 0,81 ± 0,02;
- $J_{Isc} = 45,12\text{mA/cm}^2$, $V_{oc} = 0,595\text{V}$, $J_{Imp} = 41,66\text{mA/cm}^2$, $V_{mp} = 0,485\text{V}$
- Célula com campo retrosuperficial – “Back surface field” (BSF);
- Célula com refletor retrosuperficial – “Back surface reflector” (BSR);
- Dupla camada anti-refletor de TiO_2 e Al_2O_3 .

A Figura 4.7(a) mostra a face frontal de um dos modelos de qualificação (cupom de testes) dos SCDs, composto por 02 “strings” de 10 células em série, utilizado para os testes de choque térmico e vácuo-térmico. A Figura 4.7(b) mostra a face traseira do modelo de qualificação com o conector, a fiação de painel e os diodos montados em barras de suporte. Também são instalados os seguradores de cabos utilizados para suportar a fiação nos pontos em que ela é mais pesada, evitando problemas de danos nos momentos em que o satélite sofre altas acelerações.

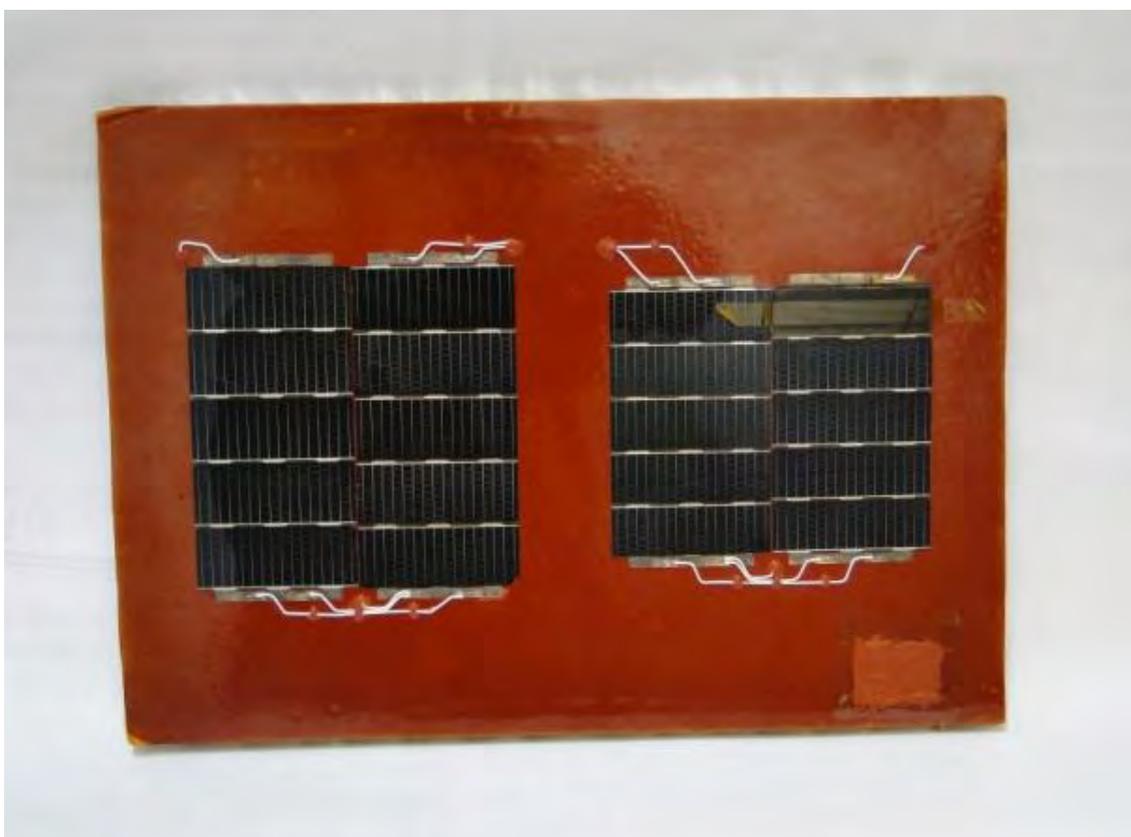


Figura 4.7 (a) - Foto da face frontal do cupom de testes dos painéis solares do SCD1.
Fonte: Laboratório da Divisão de Eletrônica Aeroespacial (DEA – INPE).

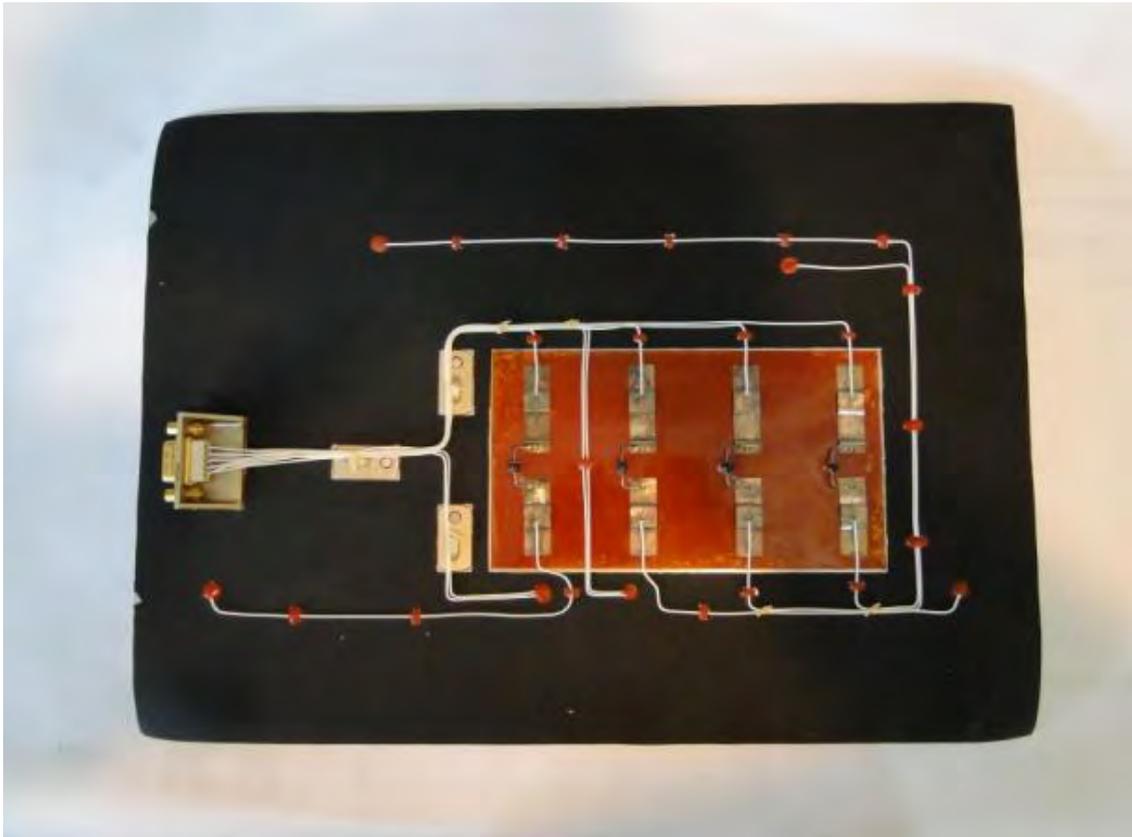


Figura 4.7 (b) - Foto da face traseira do cupom de testes dos painéis solares do SCD1.
Fonte: Laboratório da Divisão de Eletrônica Aeroespacial
(DEA – INPE).

Para formar o gerador solar os painéis laterais retangulares dos SCDs foram preenchidos de células solares, conforme mostrado na Figura 4.8. Foram realizadas diversas análises de distribuição para minimizar o momento magnético e maximizar o preenchimento da área de ocupação pelas células solares.

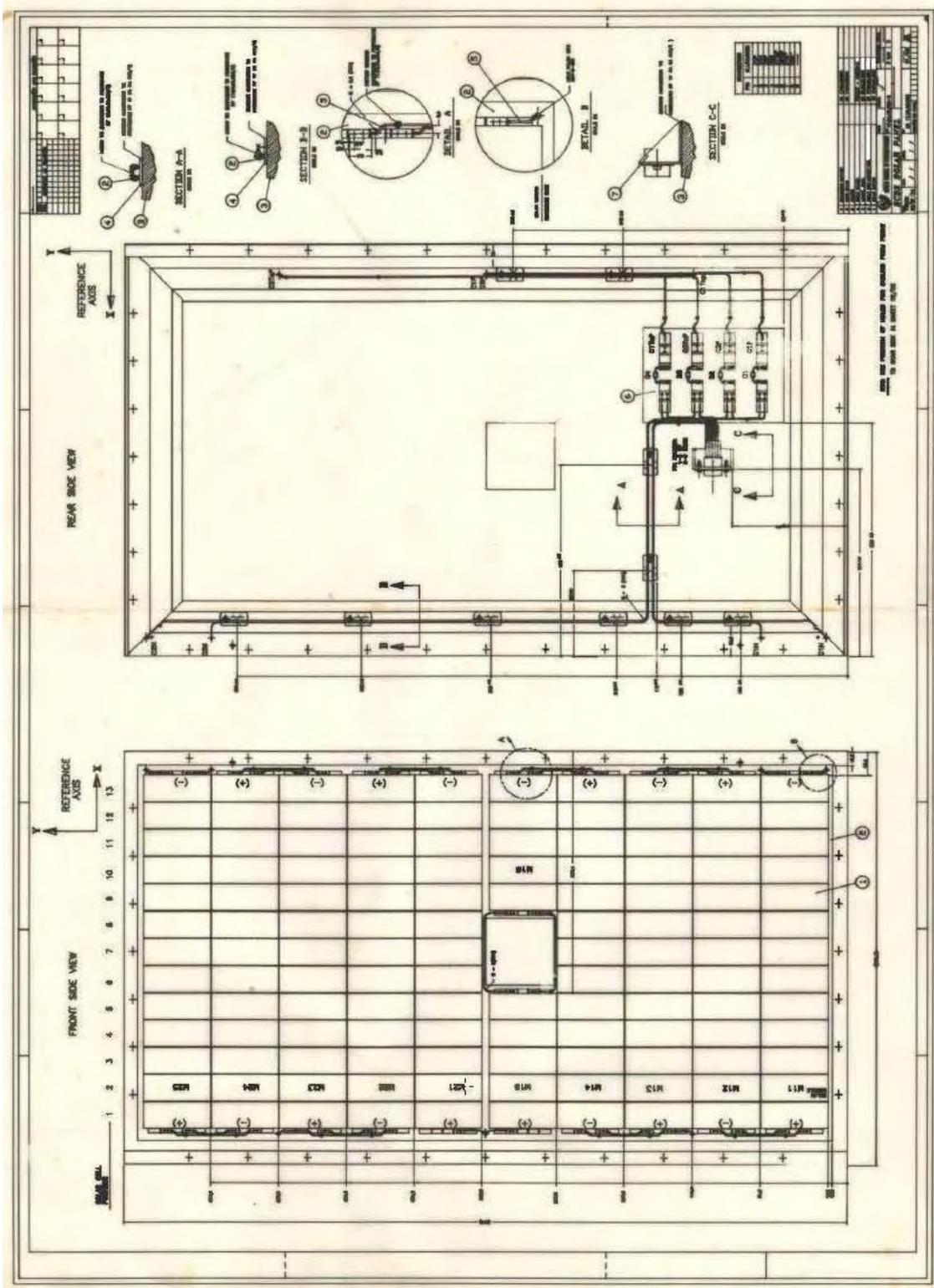


Figura 4.8 - Desenho de detalhes do painel lateral do SCD2.

Fonte: INPE (1989).

4.4. Projeto elétrico do gerador solar

Nos SCDs cada painel lateral tem dois “strings” e no SCD1 o painel superior tem cinco “strings”. Cada “string” tem duas saídas: uma para o barramento principal e outra para a derivação do Shunt aproximadamente no meio do “string”. Todas as saídas dos “strings” são protegidas por diodos para evitar que a corrente reversa flua para o gerador solar (INPE, 1988). Os diodos são montados na parte traseira dos painéis solares como mostrado na Figura 4.7(b).

A corrente total gerada é monitorada por uma telemetria analógica. A máxima corrente especificada pelos painéis solares é de 5,0 A e eles foram projetados para fornecer uma potência mínima de 70 W para o SCD1 e 72 W para o SCD2, EOL, sobre a pior condição de órbita (INPE, 1988). A Tabela 4.1 mostra a distribuição das células nos SCDs.

Tabela 4.1- Número de células solares instalados nos SCDs.

Painel	Quantidade	Circuito	Células em série	Derivação do Shunt
Lateral	8	1	65	39
		2	62	39
Topo	1	1	69	44
		2	70	42
		3	70	42
		4	70	41
		5	69	39

Fonte: Vaz et al., (1995).

A corrente total do gerador solar para o final de vida, para uma tensão de 27 V, 40°C, 1353 W/m² na condição de iluminação normal, demonstrada em simulação é de 2,9 A, sendo que o pico é de 2,95 A. (VAZ et al., 1995). Cabe ressaltar que nesta simulação não foram consideradas a radiação terrestre e o albedo, considerados mínimos na condição de início e final da órbita iluminada.

4.5. Simulação da influência do albedo na corrente fotogerada

Os satélites SCDs tem uma 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 32 e 36 rpm de modo ativo através do seu acoplamento com o campo magnético da Terra. A 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 Figura 4.9 mostra esta geometria de iluminação do satélite.

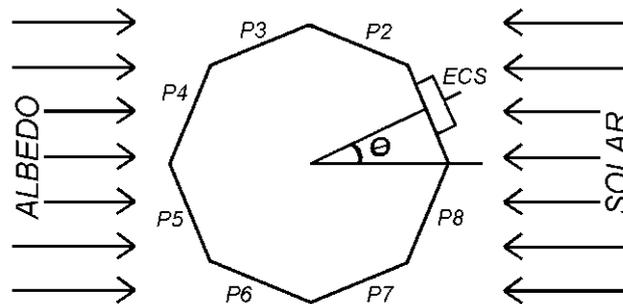


Figura 4.9 - Esquema de iluminação do satélite SCD2 que tem forma geométrica octogonal.

Para o ângulo de fase θ entre 0° e 45° , têm-se as seguintes potências de iluminação solar dos oito painéis laterais:

- $P1S = P_{solar} \cdot \cos(\theta)$,
- $P2S = P_{solar} \cdot \cos(\theta + 45^\circ)$,
- $P3S = 0$, $P4S = 0$, $P5S = 0$, $P6S = 0$,
- $P7S = P_{solar} \cdot \cos(\theta + 270^\circ)$
- $P8S = P_{solar} \cdot \cos(\theta + 315^\circ)$.

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

- $P1A=0$, $P2A=0$,
- $P3A=Palbedo.\cos(180^\circ - \theta - 90^\circ)$,
- $P4A=Palbedo.\cos(180^\circ - \theta - 135^\circ)$,
- $P5A=Palbedo.\cos(180^\circ - \theta - 180^\circ)$,
- $P6A=Palbedo.\cos(180^\circ - \theta - 225^\circ)$,
- $P7A=0$ e $P8A=0$.

Para ângulos de fase entre 45° e 360° as equações são similares. O sistema gerador do satélite soma as correntes de todos os painéis. A Figura 4.10 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 tem duração da ordem de 15 minutos, e neste intervalo, a telemetria transmite aproximadamente 1.500 sinais. O satélite gira nesta passagem da ordem de 400 voltas em torno do seu eixo, isto é, o SCD2 neste tempo de 15 minutos faz 400 gráficos iguais ao da Figura 4.10. 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 de 1 A e, também, que todos os painéis laterais são idênticos.

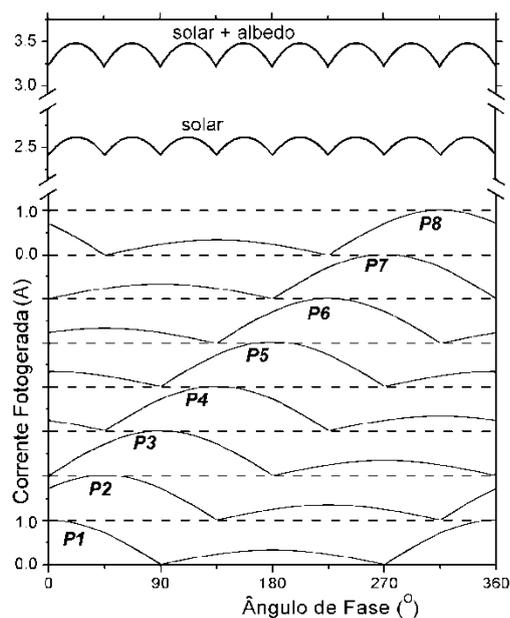


Figura 4.10 - Curvas P1 até P8 mostrando separadamente as correntes fotogerada dos oito painéis laterais em função do ângulo de fase do “spin” do satélite. As curvas solar e solar + albedo são as composições dos painéis.

A Figura 4.10 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 normal e, em outro instante, dois painéis tem iluminação oblíqua. A Figura 4.9 mostra a iluminação oblíqua. A oscilação da Figura 4.10 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 diferentes entre elas.

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

Para que o gerador solar atenda aos objetivos do satélite, vários requisitos técnicos são estabelecidos para garantir que as especificações no nível de componentes e de equipamento sejam atendidas:

As principais normas internacionais utilizadas na elaboração e no acompanhamento de projetos de geradores solares de uso espacial são publicadas pela “European Space Agency” (ESA):

- ECSS-E-ST-20C - Space engineering - Electrical and electronic, (ECSS, 2008a);
- ECSS-E-ST-10-04C - Space engineering - Space environment, (ECSS, 2008b);
- ECSS-E-ST-20-08C - Space engineering – Photovoltaic assemblies and components - EEE components, (ECSS, 2008c);
- ECSS-Q-ST-30-11C –Rev. 1 - Space product assurance – Derating and end-of-life parameter drifts; (ECSS, 2010).
- ECSS-Q-ST-30-02C – Failure modes, effects (and criticality) analysis (FMEA/FMECA); (ECSS, 2009)

A norma ECSS-E-ST-08C define os requisitos de testes ambientais e medidas aplicáveis à qualificação de células solares: inspeção visual, dimensão e massa, desempenho elétrica, 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 EOL).

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 varias 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.

5.1. Análise de potência do gerador solar

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

- as especificações do gerador solar:

As especificações definem as potências no início de vida BOL, no final de vida EOL e em condições de laboratório. Também são definidos os casos de falhas, o nível de radiação a que será submetido e as temperaturas mínima e máxima.

- os dados orbitais:

Os dados orbitais são dados do satélite, isto é, dados que especificam o tipo de órbita, a altura da órbita, o tipo de controle de atitude e o tempo de vida do satélite.

- as especificações ambientais:

As temperaturas nas condições de órbita e as doses de radiação a que será submetido o gerador solar também são estabelecidas no documento.

- as especificações de células solares (ver 5.1.1);
- os fatores de perda de potência (ver 5.1.2);
- a rotação do satélite (ver 5.1.3);
- a variação da intensidade solar devido ao: ângulo de aspecto solar, a irradiância solar e a distância Terra- Sol (ver 5.1.4);
- a temperatura dos painéis solares (ver 5.1.5).

5.1.1. Especificações de células solares dos SCDs

Os parâmetros elétricos da célula solar a serem considerados na análise de potência são apresentados na Tabela 5.1:

Tabela. 5.1: Parâmetros elétricos da célula solar.

<i>J_{lsc}</i> (mA/cm ²)	<i>V_{oc}</i> (mV)	<i>J_{lmp}</i> (mA/cm ²)	<i>V_{mp}</i> (mV)	<i>η</i> (%)
Densidade de corrente de curto circuito	Tensão de circuito aberto	Densidade de corrente de potência máxima	Tensão de potência máxima	Eficiência
45,12	0,595	41,66	0,485	14,93

Os coeficientes de temperatura da célula solar são apresentados na Tabela 5.2:

Tabela. 5.2: Coeficientes de temperatura da célula solar.

dJ_{isc}/dT ($\mu A/cm^2/^{\circ}C$)	dV_{oc}/dT ($mV/^{\circ}C$)	dJ_{imp}/dT ($\mu A/cm^2/^{\circ}C$)	dV_{mp}/dT ($mV/^{\circ}C$)
Varição da corrente de curto circuito com a temperatura	Varição da tensão de circuito aberto com a temperatura	Varição da corrente de potência máxima com a temperatura	Varição da tensão de potência máxima com a temperatura
27,5	-1,955	~ 0	-1,955

Os coeficientes de radiação BOL da célula solar são apresentados na Tabela 5.3:

Tabela. 5.3: Coeficientes de radiação.

Fluência (e/cm^2)	J_{isc} (%)	V_{oc} (%)	J_{imp} (%)	V_{mp} (%)
1MeV	0,9657	0,9466	0,9747	0,9405

Fonte: INPE (1987).

5.1.2. Fatores de perda de potência

Os demais fatores a serem considerados para a perda de potência na estimativa EOL, utilizados nos SCDs foram (INPE, 1987):

- Descasamento: 0,99;
- Raios ultravioletas e micrometeoritos: 0,9975;
- Randômicas: 0,985;
- Perda por calibração solar (calibração da célula de padrão secundário): 0,98;

5.1.3. Rotação do satélite

O satélite SCD1 não tem controle de rotação, que foi imposta pelo lançador Pegasus em 120 rotações por minuto no início. A Figura 5.1 mostra o satélite SCD1 integrado ao foguete Pegasus.

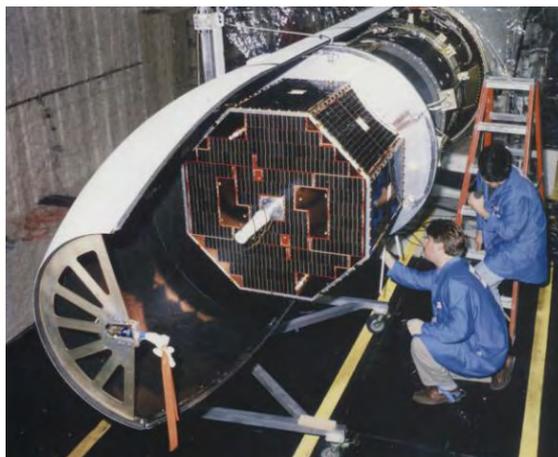


Figura 5.1 - O satélite SCD1 integrado ao foguete Pegasus.

Fonte: INPE (2012).

A rotação inicial de 120 rpm foi diminuindo e estabilizou em torno de 42 rpm, como mostrado na Figura 5.2.

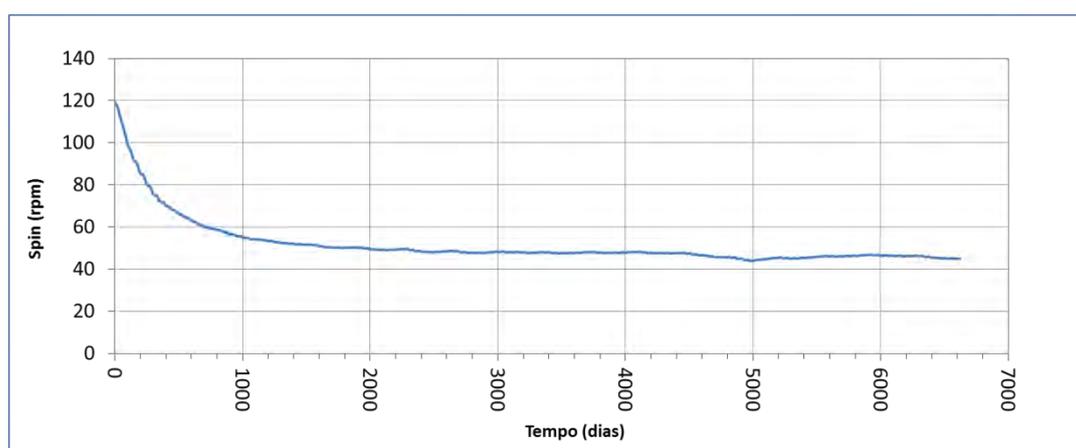


Figura 5.2 - Velocidade de rotação do satélite SCD1.

Fonte: Dados fornecidos pelo CCS-INPE.

No SCD2 foi instalado no subsistema de controle de atitude do satélite o controle autônomo para o ajuste da velocidade de rotação que mantem a velocidade entre 32 e 36 rpm conforme mostrado na Figura 5.3. Este controle é realizado por bobinas magnéticas, similares às utilizadas no controle do ângulo de aspecto solar.

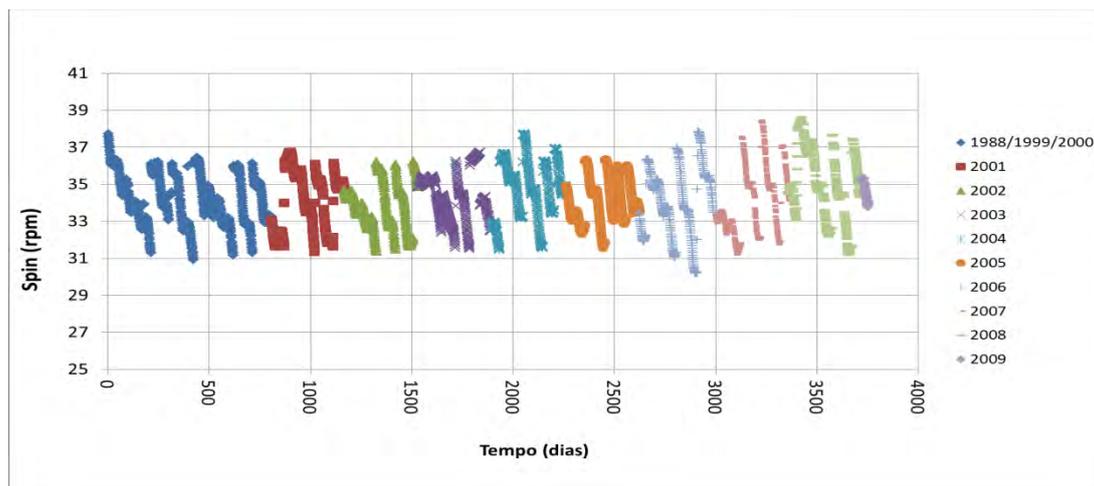


Figura 5.3 - Velocidade de rotação do satélite SCD2.

Fonte: Dados fornecidos pelo CCS-INPE.

5.1.4. Variação da intensidade solar devido ao ângulo de aspecto solar, a irradiância solar e a distância Terra-Sol

O capítulo 4.5 descreveu a influência que o albedo planetário tem na intensidade solar incidente nos painéis solares. Existem ainda três fatores adicionais: a influência da orientação do satélite, ou seja, o ângulo de aspecto solar, a irradiância solar e a distância Terra-Sol.

5.1.4.1. Ângulo de aspecto solar

A Figura 5.4 mostra o esquema da geometria de iluminação dos painéis solares em relação ao Sol e o ângulo de aspecto solar γ . Os seguintes vetores são mostrados na Figura 5.4:

Vetor \vec{OZ} – direção paralela ao eixo de rotação do satélite;
 Vetor \vec{OY} – projeção do vetor \vec{OS} ;
 Vetor \vec{OS} - vetor satélite – Sol;
 Vetor \vec{OE} – vetor normal ao painel solar;
 Ângulo γ – ângulo entre os vetores \vec{OZ} e \vec{OS} ;
 Ângulo β – ângulo entre os vetores \vec{OY} e \vec{OE} .

O ângulo β é o ângulo de rotação do satélite e o ângulo γ indica a inclinação dos painéis. Então, para os painéis laterais o nível de iluminação é descrito pelas Equações 5.1 e 5.2.

$$P = P_o \cdot \text{sen } \gamma \cdot \text{cos } \beta, \text{ para } -90^\circ < \beta < +90^\circ, \quad (5.1)$$

$$P = 0, \text{ para } \beta < -90^\circ, \text{ ou } \beta > +90^\circ. \quad (5.2)$$

Assim a iluminação de cada painel individualmente é da forma de meia senóide com a mesma frequência de rotação do satélite.

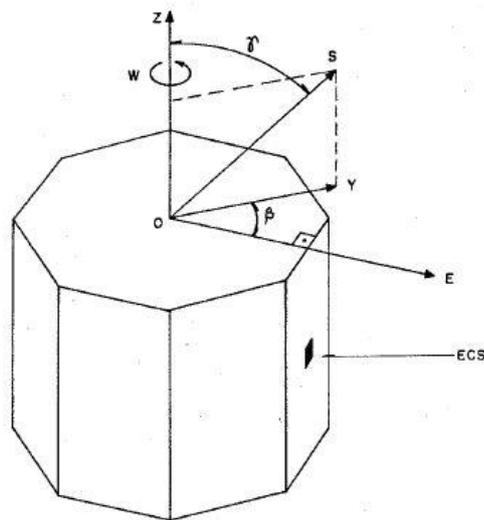


Figura 5.4 - Esquema da geometria de iluminação dos painéis solares.

Fonte: Veissid (1989).

A Figura 5.5 e a Figura 5.6 mostram a variação do ângulo de aspecto solar γ dos satélites SCDs em órbita, que deve ser mantido entre 80° e 100° (INPE, 1993).

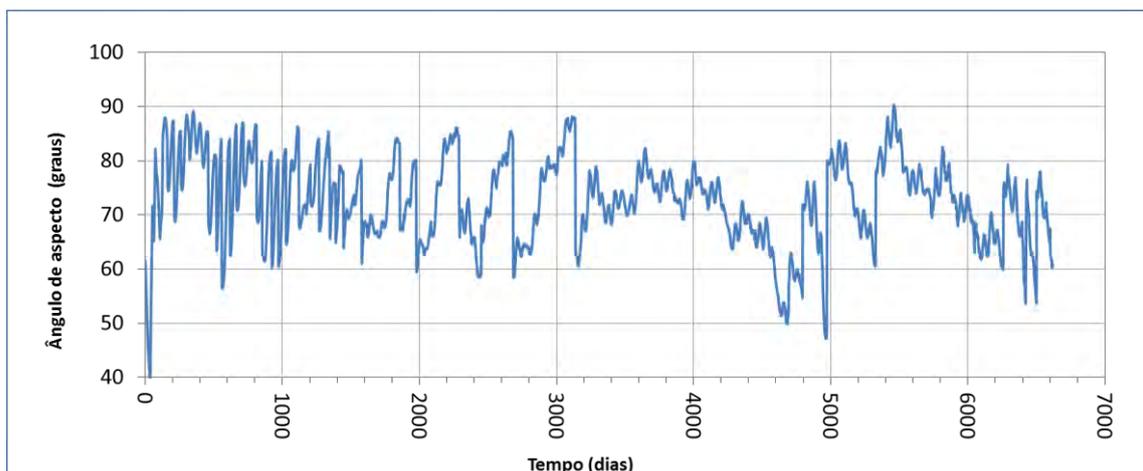


Figura 5.5 – Ângulo de aspecto solar do satélite SCD1.

Fonte: Dados fornecidos pelo CCS-INPE.

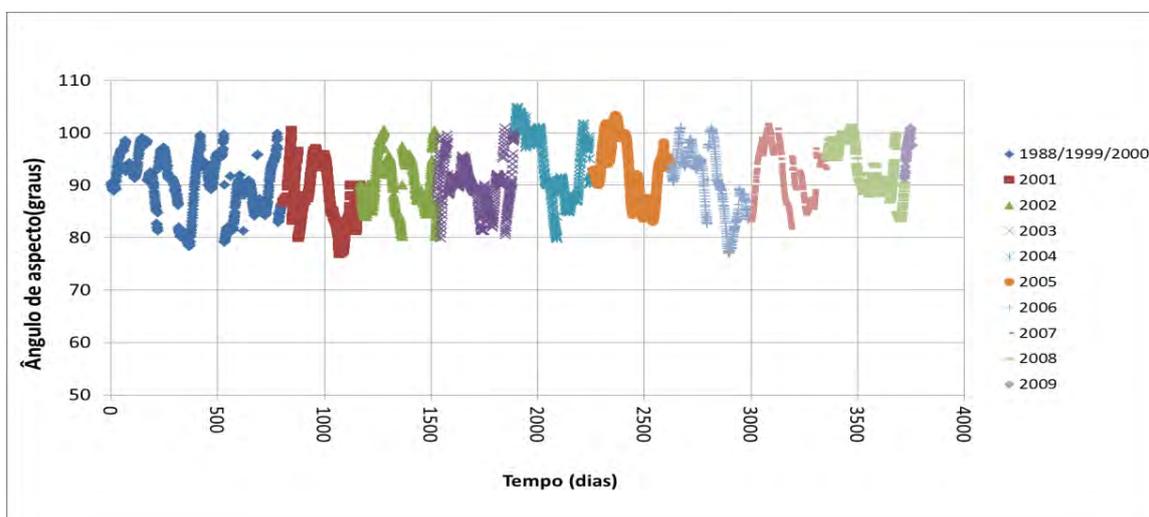


Figura 5.6 – Ângulo de aspecto solar do satélite SCD2.

Fonte: Dados fornecidos pelo CCS-INPE.

5.1.4.2. Irradiância solar

O Sol passa por ciclos de aproximadamente 11 anos entre máximos e mínimos. O mínimo recente, caracterizado pela menor incidência de manchas e tempestades solares, foi o mais calmo em quase 100 anos. Mas a variação solar da intensidade solar ou irradiância solar, causada pelas manchas solares provoca uma oscilação menor do que 2 W/m^2 , como mostrado na Figura 5.7.

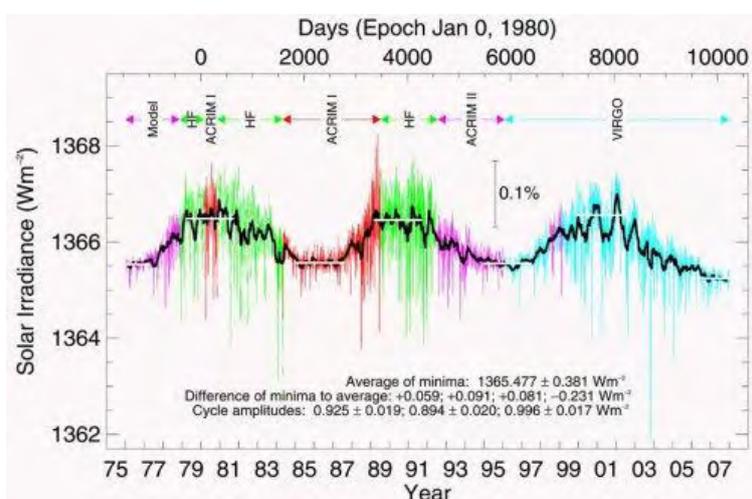


Figura 5.7 - Intensidade solar causada pelos ciclos solares.

Fonte: Veissid (2010b).

5.1.4.3. Distância Terra-Sol

A órbita elíptica da translação da Terra em torno do Sol é a responsável pela maior variação anual da intensidade solar. A intensidade solar é normalmente expressa em frações ou múltiplos da constante solar. O valor da constante solar tem sido revisado constantemente. Para as análises de potência dos primeiros satélites do INPE se utilizava 1353 W/m^2 . Recentemente este valor foi corrigido para 1367 W/m^2 . Este valor é baseado numa distância média entre o Sol e a Terra considerando uma unidade astronômica de distância ($1.496 \times 10^{11} \text{ m}$) e sem atmosfera. A variação anual, relativa a 1353 W/m^2 , é apresentada na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Variação da intensidade solar com a distância Terra-Sol.

Data	Intensidade solar (W/m ²)	Valor relativo
3 de janeiro	1399	1,0340
01 de fevereiro	1393	1,0296
01 de março	1378	1,0185
01 de abril	1355	1,0015
01 de maio	1332	0,9845
01 de junho	1316	0,9727
04 de julho	1309	0,9675
01 de agosto	1313	0,9704
01 de setembro	1329	0,9823
01 de outubro	1350	0,9978
01 de novembro	1374	1,0155
01 de dezembro	1392	1,0288

Fonte: (RAUSCHENBACH, 1980).

Outra forma de apresentar a variação anual da intensidade solar é através da utilização da Equação de Paltridge e Platt (VEISSID, 2010b):

Considerando P_0 a constante solar de referencia igual a 1367 W/m², a constante solar relativa à distância Terra-Sol durante o ano é dada pela Equação 5.3:

$$P = P_0 * (R_0/R)^2 \quad (5.3)$$

Onde:

$$- (R_0/R)^2 = 1,000110 + 0,034221.\cos\theta + 0,001280.\sen\theta + 0,000719.\cos2\theta + 0,000077.\sen2\theta \quad (5.4)$$

$$- \theta = 2.\pi. da / 364, \theta \text{ em radianos;} \quad (5.5)$$

$$- da = \text{o dia do ano de 0 a 364/365.} \quad (5.6)$$

A Figura 5.8 mostra de forma gráfica a variação anual da intensidade solar de acordo com a distância Terra-Sol. A curva pode ser aproximada por uma senóide, cuja equação é mostrada na Figura 5.8.

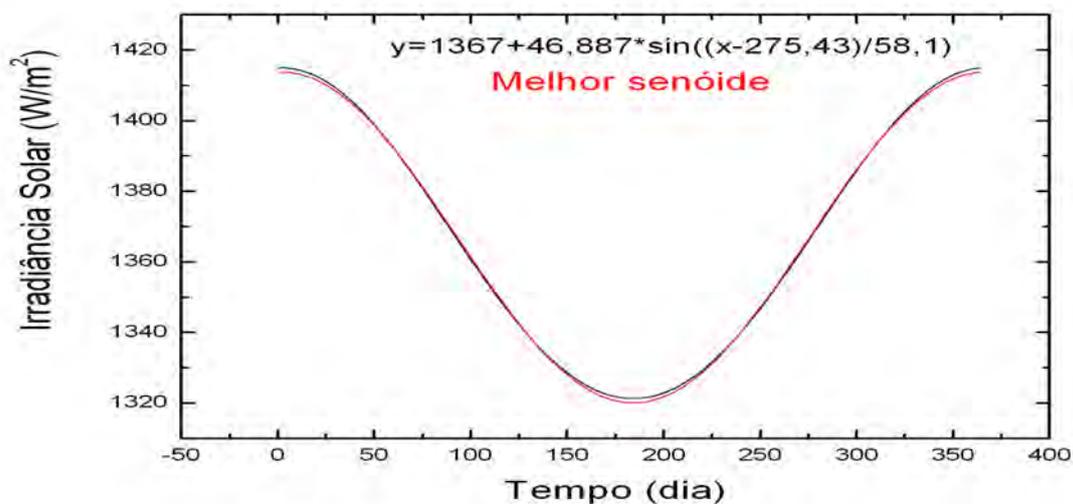


Figura 5.8 - Variação anual da intensidade solar de acordo com a distância Terra-Sol.
Fonte: Veissid (2010b).

5.1.5. Temperatura dos painéis solares

Os painéis solares foram projetados para suportar uma variação de temperatura de -70°C a $+70^{\circ}\text{C}$, porém as telemetrias indicam que eles estão operando bem abaixo do limite conforme a Figura 5.9. A curva de cima mostra a temperatura dos painéis laterais, enquanto que a curva de baixo mostra a temperatura do painel de topo durante uma órbita (VAZ et al., 1995).

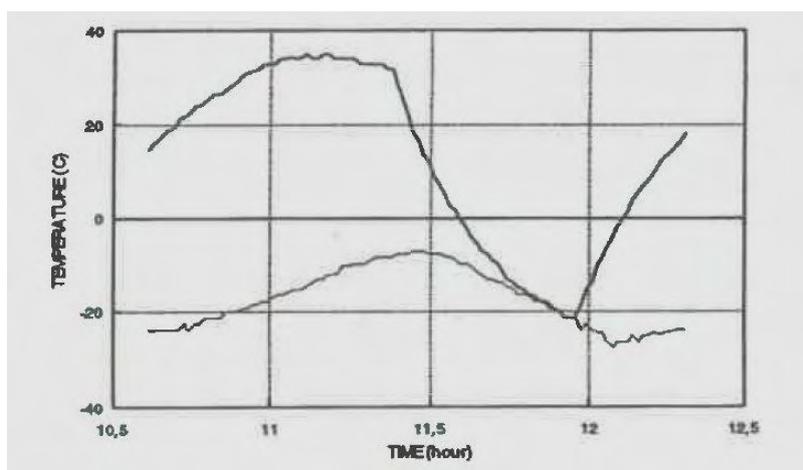


Figura 5.9 - Temperatura dos painéis solares em março de 1994.

Fonte: Vaz et al. (1995).

Considerando que o valor do coeficiente de variação da corrente I_{sc} , por área e por temperatura é $27,5 \mu A/cm^2/^{\circ}C$, pode-se estabelecer o impacto da temperatura na corrente total dos painéis:

Área de cada célula solar = 15 cm^2

Numero de "strings" SCD1= 16 laterais + 5 topo = 21 "strings"

Numero de "strings" SCD2= 16 laterais = 16 "strings"

Influência da temperatura na corrente do SCD1= $\Delta T \times 15 \times 27,5 \times 10^{-6} \times 21 \text{ (mA)}$

Influência da temperatura na corrente do SCD2= $\Delta T \times 15 \times 27,5 \times 10^{-6} \times 16 \text{ (mA)}$

Onde, ΔT = diferença entre a temperatura do painel e $+25^{\circ}C$.

Embora para efeito deste trabalho a variação de temperatura nos painéis não cause significativa alteração no valor das correntes totais geradas nos painéis, os dados utilizados para as análises foram convertidos para a temperatura de $25^{\circ}C$.

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 (TM137) 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 e da temperatura. A intensidade solar deve ser corrigida utilizando a Tabela 5.5 e o ângulo de aspecto solar fornecido pelas telemetrias do sensor solar (TM353 e TM354). Estas telemetrias não são diretas, isto é, elas são apresentadas após processamento no CCS.

A análise preliminar das correntes realizadas em 1996 nos dados de telemetrias das correntes do SCD1 em órbita, para o mês de junho de 1993 mostravam valores maiores que o da simulação realizada antes do lançamento, pois a corrente total alcançava até 3,8 A. (VAZ et al., 1995). Valores ainda maiores foram constatados em março de 1994, isto é, valores de pico da corrente total de 4,5 A. Isto indicava que o gerador solar estava gerando mais potência do que os resultados previstos na simulação. Mas este excesso de potência, na média 15% acima do simulado, ainda estava dentro da margem de dissipação do Shunt e, nenhuma degradação havia sido verificada até março de 1994. Os altos valores encontrados podem ter sido causados pela influência do albedo e da temperatura dos painéis.

6.1. Recuperação das telemetrias de voo

Os dados dos satélites SCD1 e SCD2 estão armazenados em computadores não ligados a rede 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. Os dados de telemetrias mais importantes estão disponíveis no CCS do INPE de São José dos Campos que acompanha os

satélites 24 horas por dia. 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.

6.2. Análise das telemetrias de corrente do satélite SCD1

A Figura 6.1 mostra as visadas das estações de Cuiabá e Alcântara e as órbitas dos satélites SCDs em que foram obtidos os dados de telemetrias.

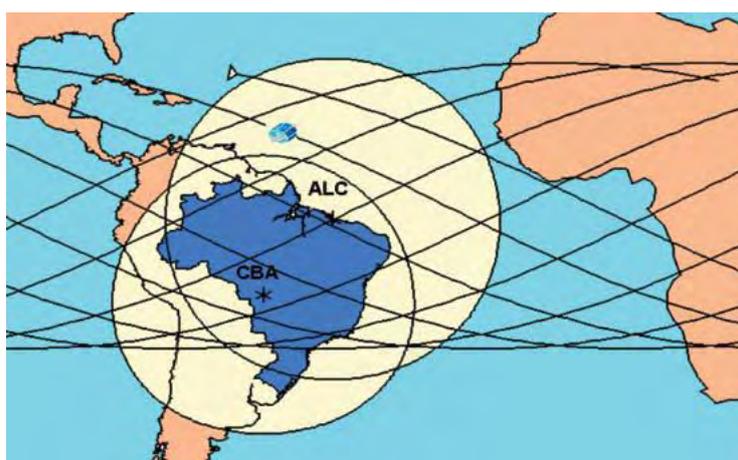


Figura 6.1 - As órbitas vistas pelas estações de Cuiabá e Alcântara.

Fonte: UNESP (2012).

A Figura 6.2 mostra os 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 rastreio 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 Figura 6.2 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 6.3).

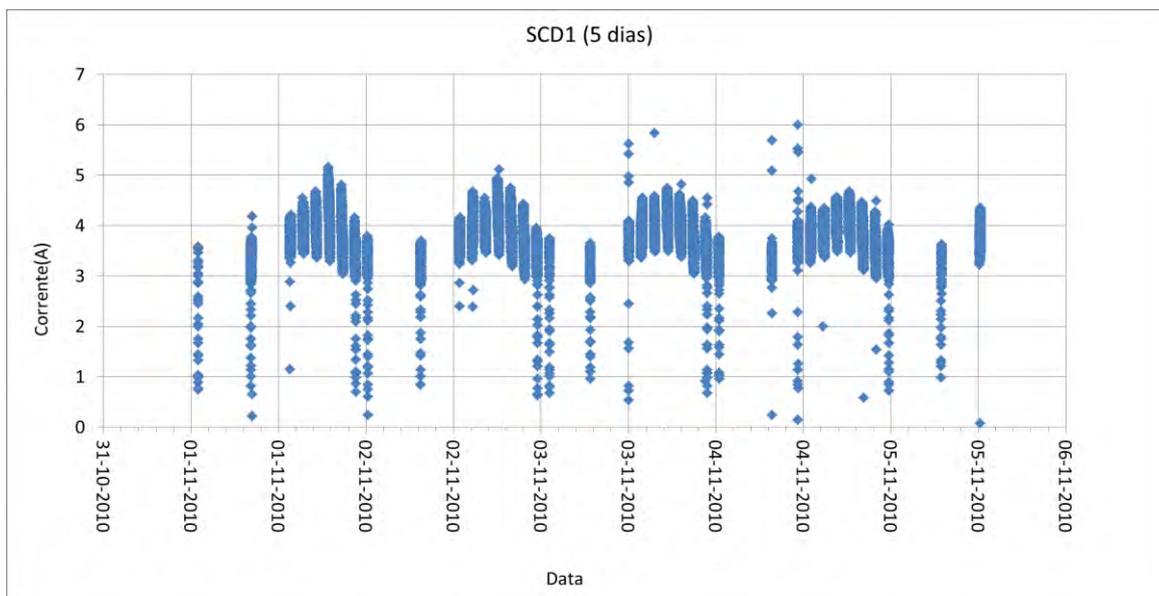


Figura 6.2 - Curvas da telemetria da corrente do SCD1 entre 01 e 05 de novembro de 2010.

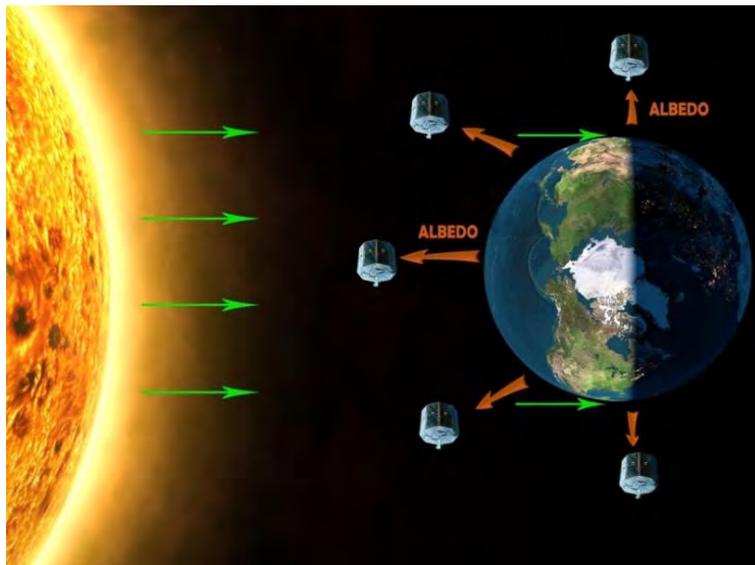


Figura 6.3 – Diagrama de iluminação do satélite.

A Figura 6.4 é um “zoom” em uma das barras da Figura 6.2, e mostra a variação da corrente para o intervalo de uma passagem. A variação da corrente está associada à rotação do satélite, a geometria octogonal do satélite e ao albedo planetário, conforme explicado na seção 4.5. A taxa de amostragem é de meio segundo.

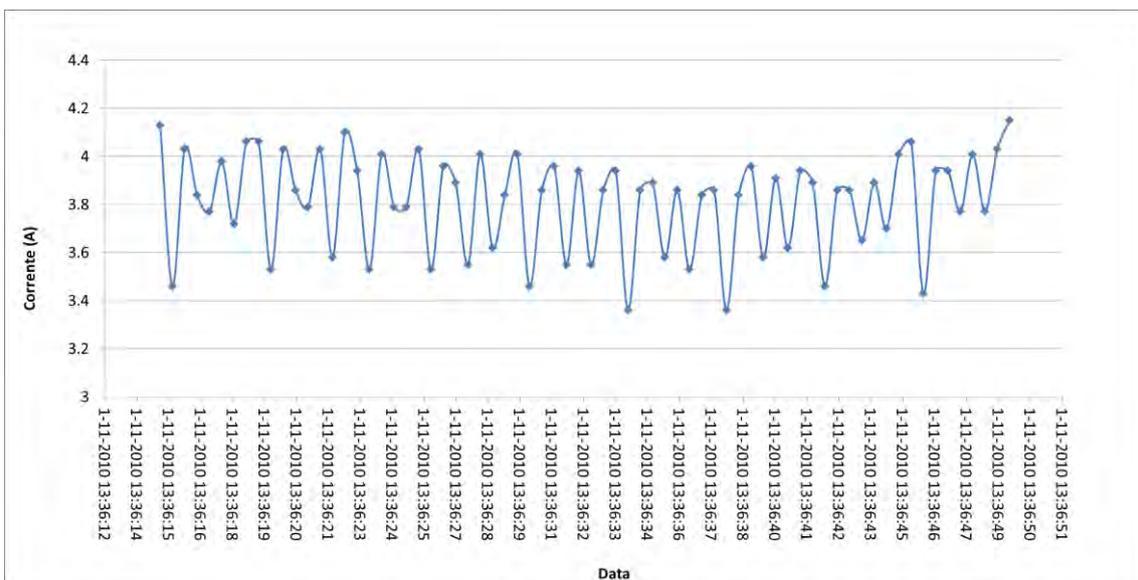


Figura 6.4 - Variação da corrente do SCD1 associada a rotação do satélite, a geometria octogonal do satélite e ao albedo planetário.

Para a execução da análise de degradação da corrente fotogerada foram utilizados os dados da telemetria de corrente total do gerador solar (TM137) dos seguintes dias:

- Dias 01 e 02 do mês de janeiro do ano de 1994;
- Dias 01 e 02 do mês de janeiro dos anos de 2003 a 2011.

A seção 7.1 apresenta os resultados da análise das correntes elétricas do SCD1.

6.3. Análise das telemetrias de corrente do satélite SCD2

Todos os dias são recebidos de três a cinco arquivos de dados de medidas do ECS, 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 Figura 6.1. Estes períodos 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 de Veissid e Pereira (2000) e seu estudo também é descrito no Apêndice A deste trabalho.

As medidas da corrente de curto circuito do gerador solar do satélite são amostradas a cada meio segundo, exatamente como os dados do ECS. Para este trabalho foram escolhidas várias órbitas, onde os pontos lidos pela telemetria são os círculos cheios denominados “ANTES”, mostrados no lado direito das Figuras 7.4 até 7.9. Estas figuras também mostram os valores destas correntes fotogeradas corrigidos pelo albedo (pontos denominados “DEPOIS” da correção do albedo). A variação da temperatura ao longo da órbita, a trajetória do satélite em latitude e longitude e o albedo planetário em função da longitude da órbita, completam as figuras.

O algoritmo de correção do albedo das curvas de corrente fotogerada está fundamentado na informação mostrada na Figura A.2 do Apêndice A. Sendo as alturas do pico solar e do pico de refletividade terrestre dadas por H_S e H_T , respectivamente, tem-se 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 Equação 6.1.

$$F(t) = H_S(t) / (H_S(t) + H_T(t)) \quad (6.1)$$

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 Equação 6.1, juntamente com correções esféricas geométricas (VEISSID e PEREIRA, 2000). Os dados usados para fazer a correção usando a equação 6.1 são extraídos dos dados históricos do ECS do SCD2.

A seção 7.2 apresenta os resultados da análise das correntes elétricas do SCD2.

7. RESULTADOS DAS ANÁLISES DAS CORRENTES ELÉTRICAS

Este capítulo trata dos resultados obtidos das análises das telemetrias obtidas dos satélites SCD1 e SCD2. As curvas de degradação das correntes elétricas mostram que painéis solares estão suportando bem as agressões do ambiente do espaço sideral. Este fato é confirmado também, pela longevidade dos satélites: o SCD1 com 19 anos e o SCD2 com 13 anos.

7.1. Resultados das análises dos dados do SCD1

A Tabela 7.1 mostra os dados da corrente dos painéis do SCD1 no período de 1994 a 2011. Os pontos foram obtidos a partir dos arquivos de dados das telemetrias de corrente fotografada do SCD1. Foi utilizado o critério de escolher os pontos de menor corrente durante cada passagem, de forma a minimizar a influência do albedo.

Tabela 7.1 - Valores da corrente dos painéis solares do satélite SCD1, extraídos dos arquivos de dados das órbitas de janeiro de 1994 a janeiro de 2011.

Nome do arquivo	Data medida	I corrigido (A)	FdTS	1/sen(γ)	I extrapolado (A)
D01011994	1-Jan-1994	4,448	1,034	1,013	4,583
D02011994	2-Jan-1994	4,377	1,034	1,013	4,489
D01012003	1-Jan-2003	4,335	1,034	1,027	4,472
D02012003	2-Jan-2003	4,335	1,034	1,027	4,435
D01012004	1-Jan-2004	4,300	1,034	1,041	4,477
D02012004	2-Jan-2004	4,227	1,034	1,041	4,410
D01012005	1-Jan-2005	4,197	1,034	1,065	4,404
D02012005	2-Jan-2005	4,197	1,034	1,065	4,424
D01012006	1-Jan-2006	4,262	1,034	1,125	4,385
D02012006	2-Jan-2006	4,240	1,034	1,125	4,377
D01012007	1-Jan-2007	4,114	1,034	1,013	4,278
D02012007	2-Jan-2007	4,235	1,034	1,013	4,404
D01012008	1-Jan-2008	4,206	1,034	1,006	4,305
D01012009	1-Jan-2009	4,103	1,034	1,023	4,269
D02012009	2-Jan-2009	4,072	1,034	1,023	4,245
D01012010	1-Jan-2010	4,091	1,034	1,065	4,272
D02012010	2-Jan-2010	4,038	1,034	1,065	4,211
D01022011	1-Jan-2011	4,052	1,034	1,036	4,155
D02012011	2-Jan-2011	4,155	1,034	1,036	4,280

Os dados da Tabela 7.1 permitem gerar o gráfico da Figura 7.1, que mostra a variação da corrente elétrica dos painéis solares em função dos anos, de janeiro de 1994 a janeiro de 2011. A corrente elétrica tem um valor médio inicial de 4,55 A no início da medida (1994) e cai para 4,20 A (2011).

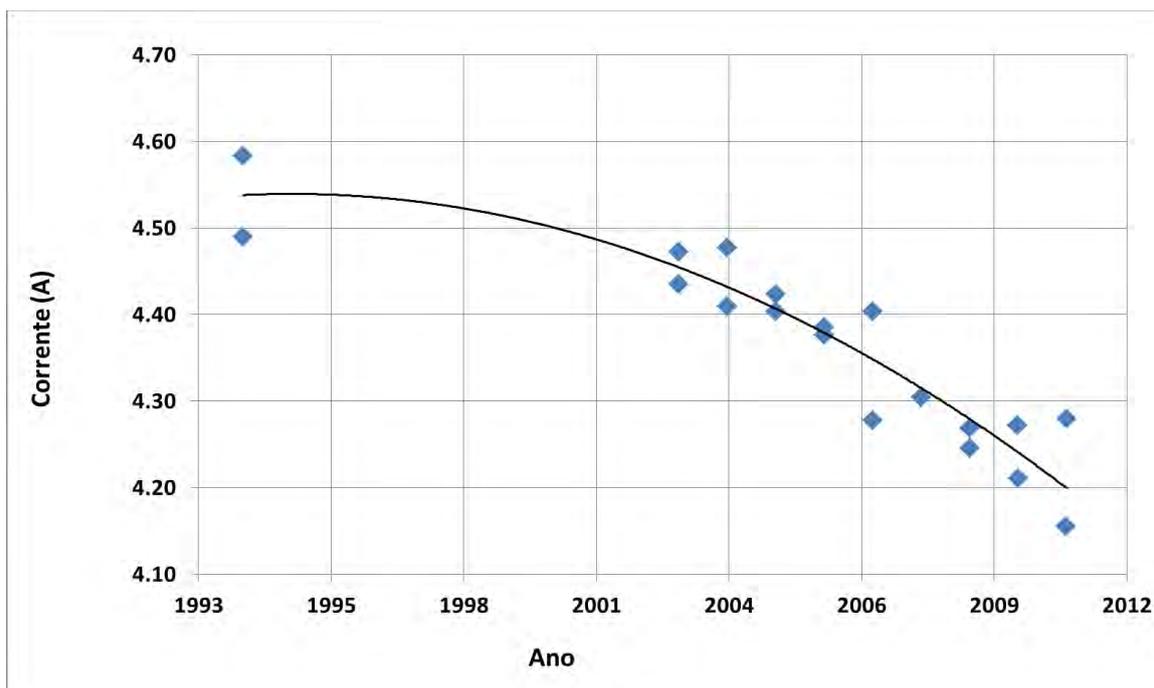


Figura 7.1 - Corrente fotografada no SCD1 de 1994 a 2011.

A degradação da corrente em função do tempo de vida do satélite SCD1, provocada pela radiação espacial é ilustrada na Figura 7.2. Os valores de corrente foram corrigidos pelo ângulo de aspecto solar, temperatura e constante solar.

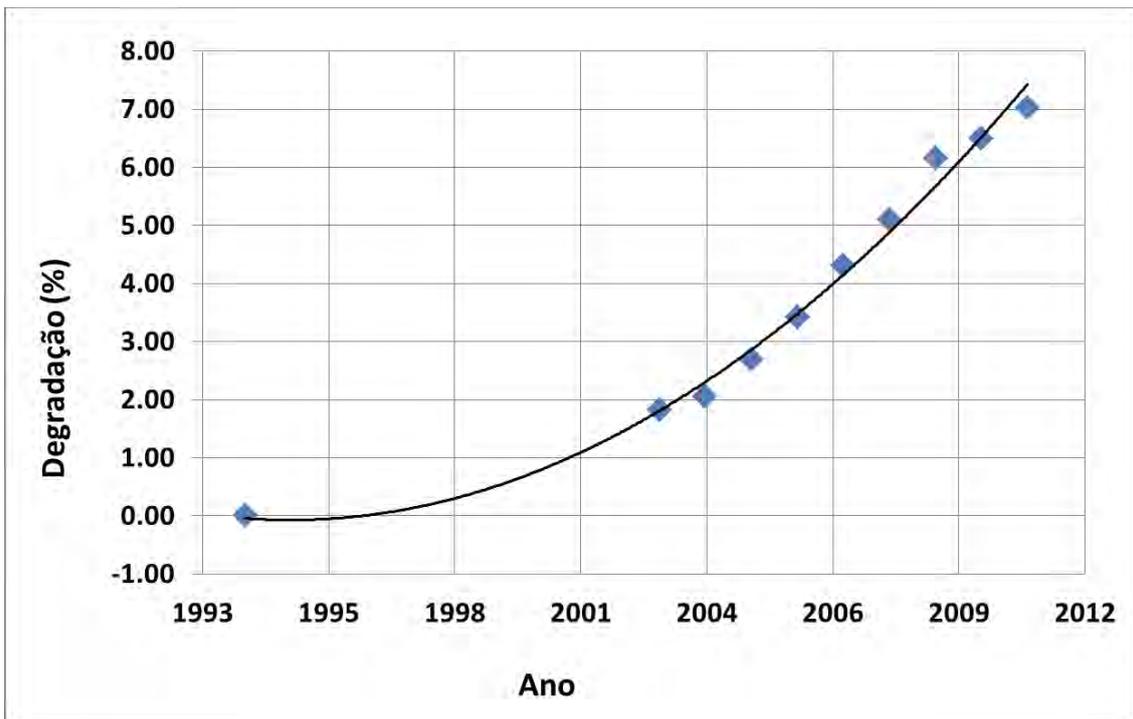


Figura 7.2 – Degradação da corrente fotografada no SCD1 em 18 anos.

A melhor aproximação para a equação que define a degradação da corrente dos painéis solares do SCD1 é dada pela Equação 7.1, onde x é o ano e y a degradação.

$$y = 0.0295 x^2 - 0.0645 x \quad (7.1)$$

Na literatura (TADA et al., 1982) são encontrados valores de degradação de células de silício em função da fluência de elétrons com energia de 1MeV. Diferentes altitudes e tipos de órbita definem a relação entre um ano de vida do satélite e esta fluência. Por exemplo, para os SCDs numa altitude de 750 km, e órbita equatorial tem-se a seguinte relação:

$$2 \text{ anos} \Rightarrow 5 \times 10^{13} \text{ e/cm}^2 \quad (7.2)$$

Considerando a relação acima e os dados obtidos de Tada et al. (1982), Figura 3.90, pagina 3-131, extrapolados para o valor de corrente do SCD1, tem-se a figura que relaciona a variação real da corrente fotogerada em função da corrente estimada. A Figura 7.3 mostra esta função na curva de cor verde.

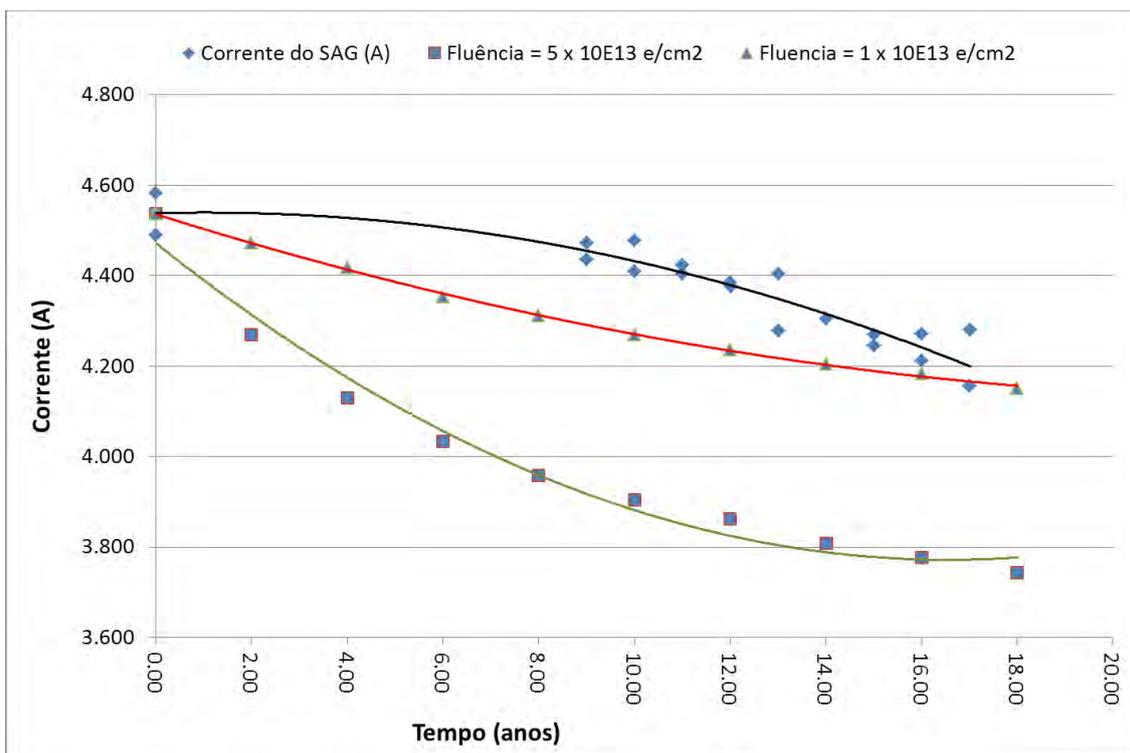


Figura 7.3 – Corrente fotogerada no SCD1 e a degradação por fluência de elétrons de $5 \times 10^{13} \text{ e/cm}^2$ e de $1 \times 10^{13} \text{ e/cm}^2$.

Considerando-se as curvas mostradas na Figura 7.3 observa-se que o valor na relação 7.2 foi superestimado, isto é, o valor da fluência utilizado na análise de potência de $5 \times 10^{13} \text{ e/cm}^2$, poderia ter sido $1 \times 10^{13} \text{ e/cm}^2$ ou menor. Isto é mostrado na Figura 7.3 na curva de cor vermelha.

Considerando uma degradação com variação linear da vida do satélite, observa-se uma taxa de diminuição da corrente de 7% em 16,5 anos, portanto 0,42% ao ano.

7.2. Resultados das análises dos dados do SCD2

Conforme simulação feita na seção 4.5 a respeito dos dados de corrente da estrutura octogonal do satélite, é esperada variação das leituras de corrente elétrica dentro de uma faixa com largura de 7,5% do valor máximo. Este valor é explicado unicamente devido a forma octogonal do satélite. Larguras maiores podem ser explicadas por efeito de temperatura e efeito da não homogeneidade das células solares nos oito painéis (ver Figuras 7.4 a 7.9). Nestas figuras a direita é mostrada as telemetrias de corrente elétrica sem tratamento durante uma passagem. Os pontos denominados como “ANTES” representam estes dados. O albedo planetário produz um acréscimo nesta corrente que dificulta extrair resultados da análise. Esta dificuldade vem do fato que o albedo sofre abruptas oscilações devido as condições meteorológicas. Por exemplo, atmosfera com grande cobertura de nuvens tem alta refletividade e conseqüentemente alto valor de albedo. A curva na cor vermelha das figuras a direita representam a temperatura dos painéis solares.

A compensação do albedo planetário nos dados é possível porque o ECS mede constantemente este parâmetro. Esta compensação é feita conforme procedimento descrito na seção 6.3. As figuras do lado direito com pontos denominadas “DEPOIS da correção do albedo” mostram comportamento uniforme, como seria esperado para um sistema sem albedo.

Do lado esquerdo das Figuras 7.4 a 7.9 é mostrado o mapa da América do Sul, a projeção da órbita do satélite SCD2 (curva de cor azul) e a curva do albedo planetário visto pelo ECS nesta órbita (curva de cor vermelha) em função da longitude.

Algumas peculiaridades podem ser observadas nas Figuras 7.4 a 7.9:

- Para albedo menor que 10%, os valores de corrente "ANTES" ficam próximos dos valores de corrente "DEPOIS" (Figuras 7.4, 7.5, 7.7 e 7.8);
- Valores de albedo de 50% podem aumentar em até 33% a corrente elétrica dos painéis solares (Figura 7.9);
- Valores iguais de albedo planetário produzem incrementos diferentes na corrente elétrica dos painéis, porque o incremento também é função da geometria esférica espacial, do posicionamento relativo e angular entre Sol-satélite-Terra. As Figuras 7.5, 7.6 e 7.7 apresentam 20% de incremento na corrente elétrica para albedo planetário de 30%. No entanto, as Figuras 7.8 e 7.9 apresentam incremento de 14% e 26% respectivamente, para o mesmo valor de 30% de albedo.

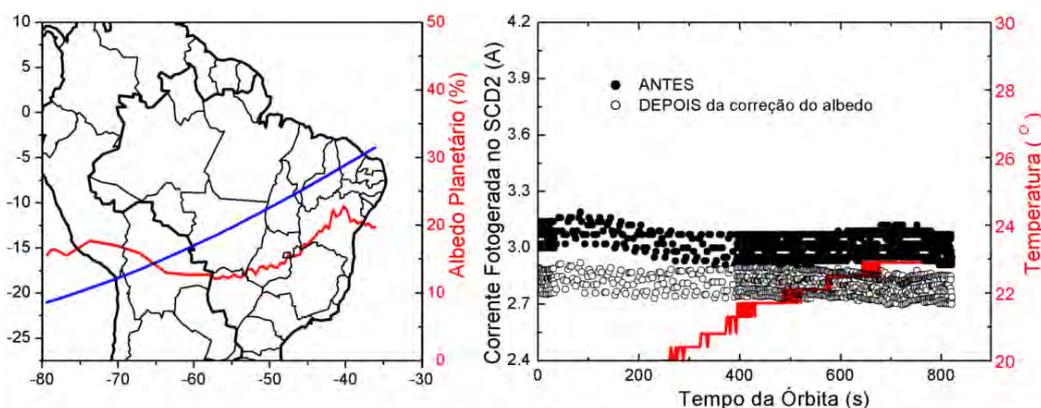


Figura 7.4 - Curvas da órbita, do albedo, da temperatura e dados de correntes fotogeradas obtidos em 01 julho 2003.

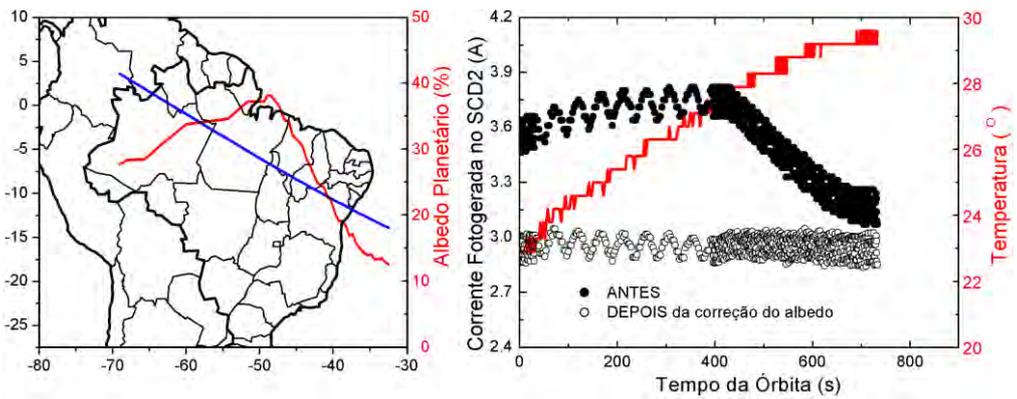


Figura 7.5 - Curvas da órbita, do albedo, da temperatura e dados de correntes fotogeradas obtidos em 01 janeiro 2004.

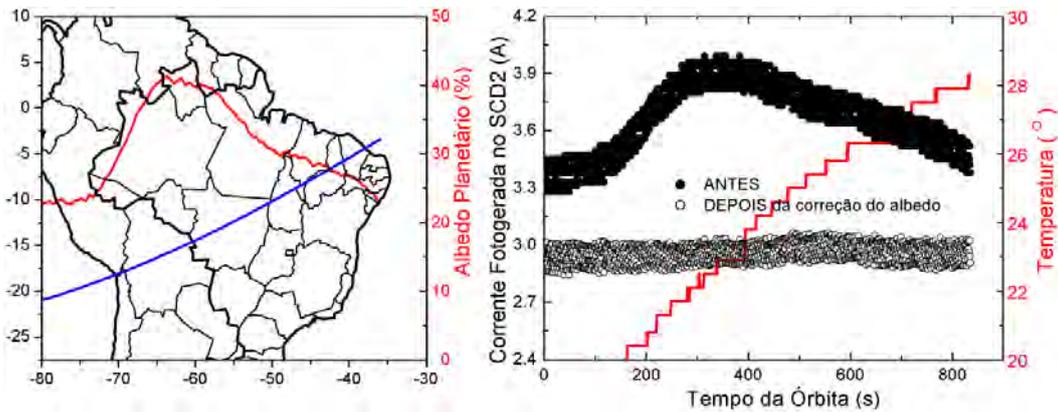


Figura 7.6 - Curvas da órbita, do albedo, da temperatura e dados de correntes fotogeradas obtidos em 01 janeiro 2006.

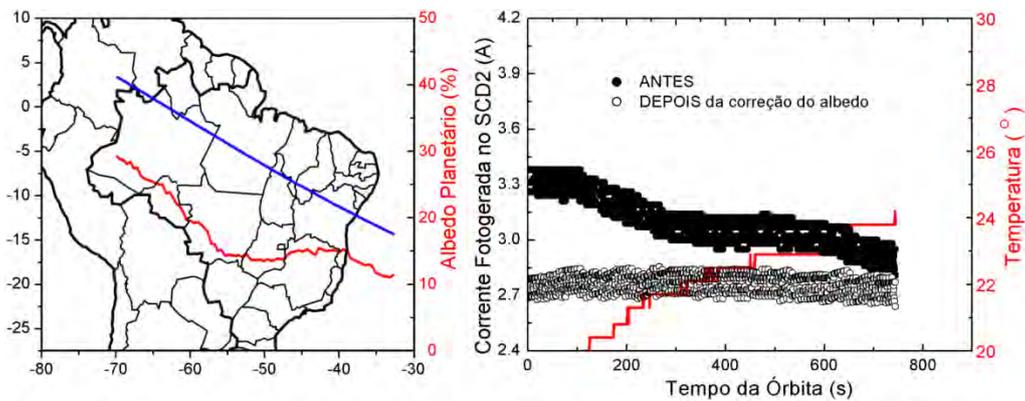


Figura 7.7 - Curvas da órbita, do albedo, da temperatura e dados de correntes fotogeradas obtidos em 02 julho 2006.

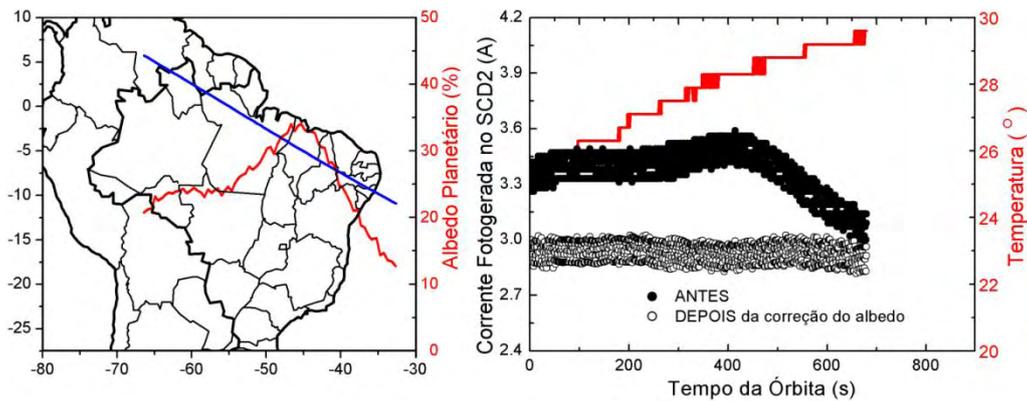


Figura 7.8 - Curvas da órbita, do albedo, da temperatura e dados de correntes fotogeradas obtidos em 02 janeiro 2008.

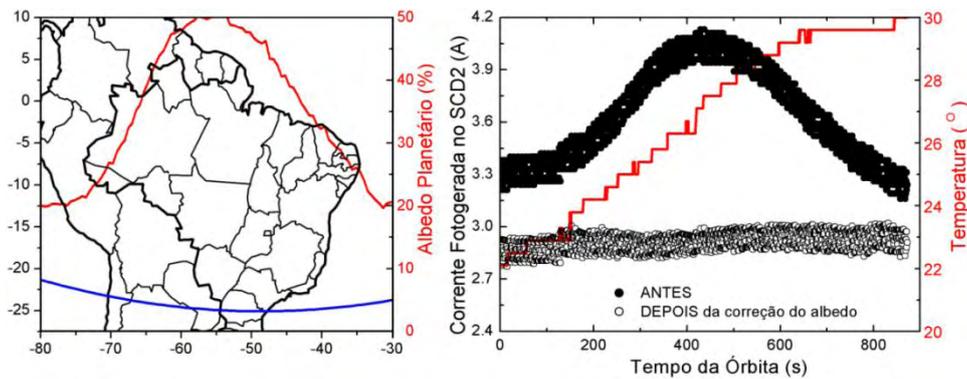


Figura 7.9 - Curvas da órbita, do albedo, da temperatura e dados de correntes fotogeradas obtidos em 02 janeiro 2009.

Os valores dos parâmetros de corrente fotogerada corrigidos pelo albedo planetário podem ser extrapolados para condição de iluminação padrão AM0 (1367 W/m^2). Para tanto, é necessário conhecer o fator de correção devido distância Terra-Sol (FdTS) (RAUSCHENBACH, 1980) e o ângulo de aspecto solar (γ) mostrado na Figura 5.4. A Tabela 7.2 mostra estes valores e o valor da corrente fotogerada extrapolados para condição padrão AM0 (coluna I extrapolado). Pode-se observar que os valores de corrente fotogerada extrapolados seguem uma tendência de diminuição com o tempo de vida do satélite.

A primeira coluna mostra o nome do arquivo, a segunda a data da medida, a terceira o valor da corrente elétrica do painel depois da correção do albedo, a quarta coluna é o fator de correção da distancia Terra-Sol. A quinta coluna é a correção do ângulo de atitude. I extrapolado é obtido pelo produto destes fatores.

Tabela 7.2 - Valores característicos extraídos dos dados mostrados nas Figuras 7.4 até 7.9 e valores de arquivos de outras órbitas de julho de 2003 a julho de. 2010.

Nome do arquivo	Data medida	I corrigido (A)	FdTS	1/sen(γ)	I extrapolado (A)
D030701S	Jul. 2003	2.85502	0.968	1.0003	2.9502
D030702Q	Jul. 2003	2.85145	0.968	1.0003	2.9465
D040101P	Jan. 2004	3.0014	1.034	1.0191	2.9581
D040101Q	Jan. 2004	3.01195	1.034	1.0191	2.9684
D040101R	Jan. 2004	2.96736	1.034	1.0191	2.9245
D040102P	Jan. 2004	2.98509	1.034	1.0205	2.9461
D040702Q	Jul. 2004	2.80333	0.968	1.0082	2.9197
D050102Q	Jan. 2005	3.03662	1.034	1.0011	2.9400
D050102R	Jan. 2005	3.03694	1.034	1.0011	2.9403
D050702P	Jul. 2005	2.83439	0.968	1.0043	2.9407
D050702Q	Jul. 2005	2.81517	0.968	1.0043	2.9207
D060101P	Jan. 2006	2.99698	1.034	1.0019	2.9039
D060101Q	Jan. 2006	3.03763	1.034	1.0019	2.9432
D060101R	Jan. 2006	3.04159	1.034	1.0019	2.9471
C060102Q	Jan. 2006	3.02204	1.034	1.0012	2.9262
D060102R	Jan. 2006	3.0469	1.034	1.0012	2.9502
D060702Q	Jul. 2006	2.8013	0.968	1.0125	2.9300
D060702R	Jul. 2006	2.83997	0.968	1.0125	2.9704
D060702S	Jul. 2006	2.77902	0.968	1.0125	2.9067
D070102P	Jan. 2007	2.96935	1.034	1.0071	2.8921
D070702R	Jul. 2007	2.79628	0.968	1.0052	2.9036
D070702S	Jul. 2007	2.78566	0.968	1.0052	2.8926
D080102P	Jan. 2008	2.99720	1.034	1.0045	2.9116
D080102Q	Jan. 2008	3.00147	1.034	1.0045	2.9157

Continua

Tabela 7.2 - Continuação

D080701S	Jul. 2008	2.78681	0.968	1.0001	2.8792
C080702R	Jul. 2008	2.79191	0.968	1.0001	2.8844
D090101Q	Jan. 2009	2.96148	1.034	1.0004	2.8654
D090101R	Jan. 2009	3.00184	1.034	1.0004	2.9044
D090101S	Jan. 2009	2.97679	1.034	1.0004	2.8802
D090102Q	Jan. 2009	2.98361	1.034	1.0007	2.8876
D090102R	Jan. 2009	2.96858	1.034	1.0007	2.8731
D100102R	Jan. 2010	2.88307	1.034	1.0038	2.7989
D100102S	Jan. 2010	2.97422	1.034	1.0038	2.8874
D100701Q	Jul. 2010	2.78134	0.968	1.0030	2.8818
D100701R	Jul. 2010	2.75449	0.968	1.0030	2.8540
D100702P	Jul. 2010	2.79953	0.968	1.0026	2.8995
D100702Q	Jul. 2010	2.70729	0.968	1.0026	2.8040

Os dados da Tabela 7.2 permitem gerar o gráfico da Figura 7.10, que mostram a variação da corrente elétrica dos painéis solares em função dos anos, de Jul. 2003 a Jul. 2010.

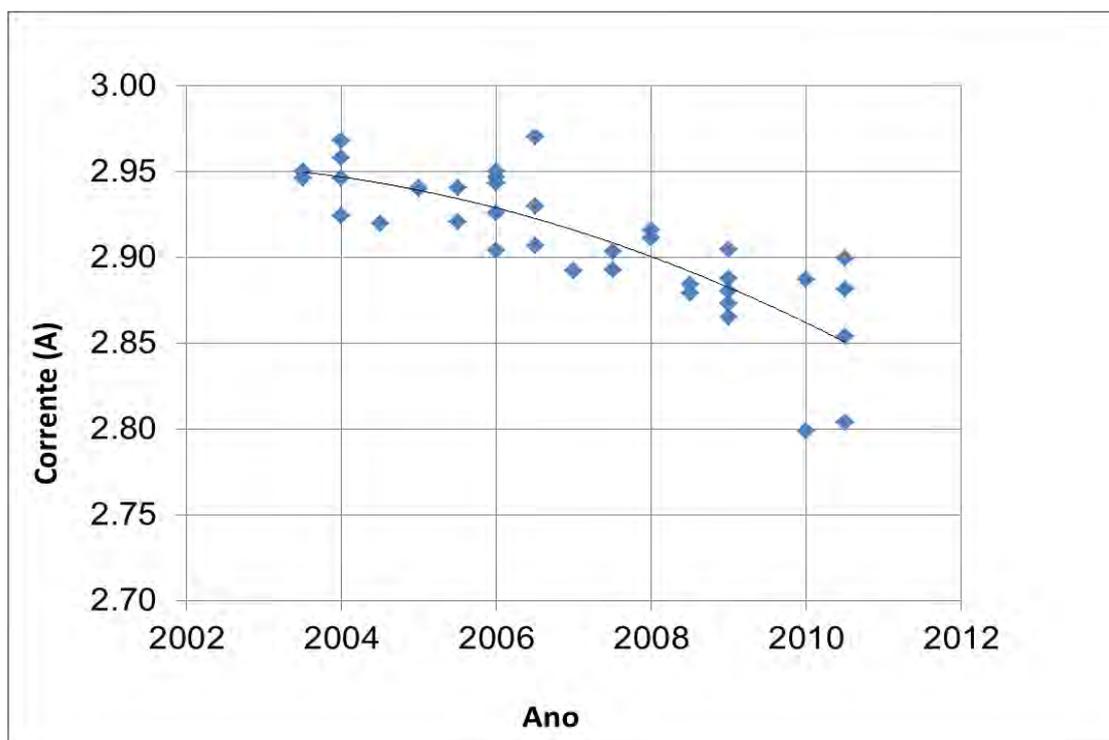


Figura 7.10 – Corrente fotografada no SCD2 de 2003 a 2010.

Na curva da Figura 7.10, a corrente elétrica tem um valor médio inicial de 2,95 A no início da medida (2003) e cai para 2,85 A (2011). A degradação desta corrente em função do tempo de vida do satélite, provocada pela radiação espacial é ilustrada na Figura 7.11 Os valores de corrente foram corrigidos pelo ângulo de aspecto solar, temperatura e constante solar.

A melhor aproximação para a equação que define a degradação da corrente dos painéis solares do SCD2 é dada pela Equação 7.3, onde x é o ano e y a degradação.

$$y = 0,027 x^2 - 107,97x + 107874 \quad (7.3)$$

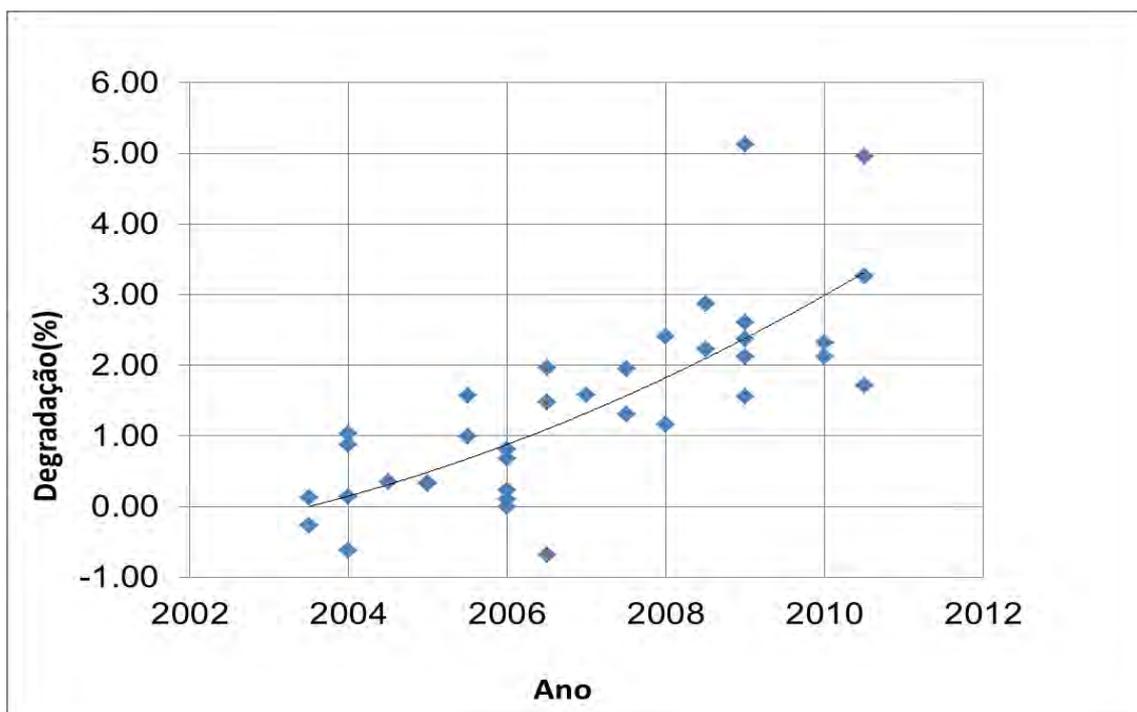


Figura 7.11– Degradação da corrente fotografada no SCD2 em 07 anos.

Considerando uma degradação com variação linear da vida do satélite, observa-se uma taxa de diminuição da corrente de 3,26% em 7 anos, portanto 0,47% ao ano.

8. 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 fotogerada extrapolada da última coluna da Tabela 7.2, 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 são apresentados fundamentos da física de conversão de energia solar em elétrica em células solares através do efeito fotovoltaico, a descrição do subsistema de suprimento de energia, parâmetros de projeto do gerador solar e os resultados das análises das correntes elétricas das células do ECS (experimento célula solar) e dos painéis solares em órbita.

Adicionalmente, os dados do albedo planetário medidos pelo ECS, que esta a bordo do satélite SCD2, contribuíram para se obter as curvas da corrente fotogerada no gerador solar, sem a influência da refletividade solar da Terra. Desta forma, consegue-se ver com clareza a diminuição da potência gerada com a vida do satélite, porque sem esta correção os pontos das curvas teriam uma alta dispersão.

O experimento célula solar utiliza uma tecnologia simples e de baixo custo em conjunto com um algoritmo adequado de tratamento de dados para obter valores de albedo planetário no território brasileiro. Este método apresenta-se como uma alternativa tecnológica totalmente nacional para o emprego em satélites científicos de pequeno porte e promove o avanço da ciência e tecnologia espacial a custo moderado.

Os resultados de degradação das correntes elétricas dos painéis dos satélites SCD1 e SCD2 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.

Para trabalhos futuros sugere-se realizar uma análise de degradação nos geradores solares dos satélites CBERS1, 2 e 2B lançados pelo INPE. Os satélites da série CBERS mostram desafios diferentes dos satélites da série SCD, pois os painéis solares ficam constantemente apontados para o Sol. Os dados do CBERS estão integralmente armazenados no Centro de Controle e Rastreamento de Satélites, e isto é uma vantagem em relação aos SCDs que tiveram perda parcial de seus dados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, R. A. S. **Caracterização elétrica de células solares de tripla junção - GaInP/GaAs/Ge**. São José dos Campos: INPE, 2004. Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais, área de Concentração em Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores. (INPE-11659-PUD/150).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICAS (ABNT). **Sistemas espaciais** – gerenciamento do programa. ABNT, 2002. (ABNT-NBR-14857).

AGÊNCIA ESPACIAL BRASILEIRA (AEB). **Programa Nacional de Atividades Espaciais - PNAE**. Brasília: AEB, 2005, 114p.

ALPHA-OMEGA POWER TECHNOLOGIES (AOPT). **Large area pulsed solar simulator**. Albuquerque: AOPT, 2006. Folder.

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.

CHAPIN D. M.; FULLER C. S.; PEARSON G. L. A new silicon p-n junction photocell for converting solar radiation into electrical power. **Journal of applied physics**, v.25, p. 676–677. 1954.

DE OLIVEIRA, F. **Brasil-China, 20 anos de cooperação espacial**, CBERS – o satélite da parceria estratégica. São Carlos: Editora Cubo, 2009. 100 p. ISBN (978-85-60064-18-2).

EUROPEAN COOPERATION FOR SPACE STANDARDIZATION (ECSS). **Space engineering** - electrical and electronic. Noordwijk: ESA Publications Division, 2008a. (ECSS-E-ST-20C).

EUROPEAN COOPERATION FOR SPACE STANDARDIZATION (ECSS). **Space engineering** – space environmental. Noordwijk: ESA Publications Division, 2008b. (ECSS-E-ST-10-04C).

EUROPEAN COOPERATION FOR SPACE STANDARDIZATION (ECSS). **Space engineering** – photovoltaic assemblies and components. Noordwijk: ESA Publications Division, 2008c. (ECSS-E-ST-20-08C).

EUROPEAN COOPERATION FOR SPACE STANDARDIZATION (ECSS). **Failure modes, effects (and criticality) analysis (FMEA/FMECA)**. Noordwijk: ESA Publications Division, 2009. (ECSS-Q-ST-30-02C).

EUROPEAN COOPERATION FOR SPACE STANDARDIZATION (ECSS). **Space product assurance** – derating and end-of-life parameter drifts – EEE components. Noordwijk: ESA Publications Division, 2010. (ECSS-Q-ST-30-11C).

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). Serviço de Garantia do Produto. **Power supply subsystem specification**. São José dos Campos, 1986. 27 p. (A-ETC-006).

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). Serviço de Garantia do Produto. **Solar generator specification**. São José dos Campos, 1987. 14 p. (A-ETC-0036).

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). Serviço de Garantia do Produto. **SCD1 Data collecting satellite operation handbook**. São José dos Campos, 1988. 80 p. (A-MIN-0014).

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). Serviço de Garantia do Produto. **SCD2 Solar panel**. São José dos Campos, 1989. 1 p.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). Serviço de Garantia do Produto. **SCD2 Configuration status**. São José dos Campos, 1990a. 56 p. (A-CFG-0012).

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). Serviço de Garantia do Produto. **Statement of work, manufacturing of solar cell assembly for SCD2**. São José dos Campos, 1990b. 07 p. (A-SOW-0006).

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). Serviço de Garantia do Produto. **SCD2 Operation handbook**. São José dos Campos, 1993. 99 p. (A-MIN-0085).

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). Coordenação de Relações Institucionais. **INPE comemora 10 anos de SCD1**. São José dos Campos, 2003. Folder.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). Serviço de Garantia do Produto. **Solar Cell Assembly**. São José dos Campos, 2006. 1 p. (ORB-CBDQ-046).

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, 2012. Disponível em: <http://www.inpe.br/scd1/site_scd/fotos.htm>. Acesso em: 02 fev. 2012.

MAIOLINO, J. V. **Uma proposta para a atualização do segmento espacial do sistema brasileiro de coleta de dados orientada pela engenharia de sistemas**. 2011. 222 p. (sid.inpe.br/mtc-m19/2011/03.22.13.25-TDI). Dissertação (Mestrado em Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2011. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/39CMM2S>>. Acesso em: 23 jan. 2012.

MURALIKRISHNA, A. **Previsão do índice geomagnético DST utilizando redes neurais artificiais e árvore de decisão**. 2009. 132 p. (INPE-15706-TDI/1471). Dissertação (Mestrado em Computação Aplicada) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2009. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2009/04.13.13.16>>. Acesso em: 02 fev. 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.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). **Geo-effective Flare and Coronal Mass Ejection - close up**. [S.l.], 2012b. Disponível em: <<http://sdo.gsfc.nasa.gov/gallery/potw.php?v=item&id=85>>. Acesso em: 31 jan. 2012.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA). **Space weather prediction center**. [S.l.], 2012. Disponível em: <<http://www.swpc.noaa.gov/ftpmenu/warehouse.html>>. Acesso em 25 jan. 2012.

NUBILE, P.; VEISSID, N.; BELOTO, A. F.; The Solar Cell Experiment of the First Brazilian Satellite: 500 Days of Data Analysis. In: WORLD CONFERENCE ON PHOTOVOLTAIC ENERGY CONVERSION, 1, 1994, v.2, Hawaii: USA, **Proceedings...** Hawaii: IEEE, 1994. p. 2232-2235. ISBN (0-7803-1460-3).

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.

SOUZA, P. N. **Curso introdutório de tecnologia de satélites**. São José dos Campos: INPE, 2003. (INPE-9605-PUD/126).

SOUZA, P. N. **Engenharia de plataformas orbitais e cargas úteis**. (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2010). 25 slides. Curso de Pós-Graduação.

SPECTROLAB INC. **Solar cell design handbook**. USA. 1983. Folder.

TADA, H. Y.; CARTER J. R.; ANSPAUGH B. E.; DOWNING R. G. **Solar cell radiation handbook**. Pasadena: Editora JPL, 1982.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA (UNESP) – Faculdade de engenharia de Guaratinguetá. **Os satélites SCD1 e SCD2 da Missão Espacial Completa Brasileira – MECB**. Guaratinguetá, 2012. Disponível em: <<http://www.feg.unesp.br/~orbital/sputnik/Capitulo-5.pdf>>. Acesso em: 14 jan. 2012.

VAZ C. C.; SANTANA C. E.; KONO J.; ALMEIDA M.C.P.; FREIRE C. F. S.; SCHULTZE W. In-orbit performance of the SCD-1 satellite power supply subsystem; In: EUROPEAN SPACE POWER CONFERENCE, 4, 1995, v.2, Poitiers, France, **Proceedings...** Poitiers: IEEE, 1995, p.187.

VAZ, C.C. **Análise termo-óptica de sistemas multi-camada de uso espacial**. 2000. Tese (Doutorado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica) - Instituto Tecnológico da Aeronáutica (ITA), São José dos Campos.

VEISSID, N. **Estudo e desenvolvimento do experimento célula solar do primeiro satélite da Missão Espacial Completa Brasileira**. 1989. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica da USP: Universidade de São Paulo, São Paulo.

VEISSID, N.; NUBILE, P.; BELOTO, A.F.; DE ANDRADE, A.M. The solar cell experiment of the first Brazilian complete space mission satellite. In: IEEE PHOTOVOLTAIC SPECIALISTS CONFERENCE, 21., 1990, v.2, Kissimmee: FL. **Proceedings...** Kissimmee: IEEE, 1990. p. 1184-1187.

VEISSID, N.; ANDRADE, A. M. The I-V silicon solar cell characteristic parameters temperature dependence: an experimental study using the standard deviation method. In: E.C. PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY CONFERENCE, 10., 1991, Lisbon, Portugal. **Proceedings...** Lisbon: [s.n], 1991. p.43-48.

VEISSID, N.; BONNET, D.; 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**, v.38, n.1, p.1937-1943, Nov. 1995.

VEISSID, N.; NUBILE, P.; BELOTO, A. F. Results of the solar cell experiment of the first Brazilian satellite. **Solar energy materials and solar cells**. v.46, n.1, p.1-16, 1997.

VEISSID, N.; NUBILE, P.; BELOTO, A. F. The solar cell experiment of the first Brazilian satellite: 1000 days of data analysis. In: WORLD CONFERENCE AND EXHIBITION ON PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY CONVERSION, 2., 1998, Vienna. **Proceedings...** Vienna: [s.n], 1998. p.3582-3585

VEISSID, N.; PEREIRA E. B. Estimativa do albedo planetário empregando dados do Experimento Célula Solar do satélite brasileiro SCD2. **Revista brasileira de geofísica**, v.18, n.1, p.25-38, 2000. (ISSN 0102-261X).

VEISSID, N. Variabilidade climática pelo desvio padrão do albedo planetário. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA E A GESTÃO DE ENERGIA, 12., 2002, Foz do Iguaçu. **Anais...** Rio de Janeiro: SBMet, 2002.

VEISSID, N. Células solares para aplicações espaciais. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA, 2., 2005, Rio de Janeiro. **Anais...**Rio de Janeiro: CEPEL, 2005.

VEISSID, N. **Elementos de teoria de erro**. (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2009). Curso de Pós-Graduação.

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, 2010a.

VEISSID, N. **Células solares**: princípios de funcionamento, processos de fabricação, tipos de células e curva característica de corrente por tensão. (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2010b). Curso de Pós-Graduação.

YAMAGUTI, W.; ORLANDO, V.; PEREIRA, S. P. Sistema Brasileiro de Coleta de Dados Ambientais: Status e planos futuros. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14. (SBSR), 2009, Natal. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2009. p. 1633-1640. DVD, On-line. ISBN 978-85-17-00044-7. (INPE-16070-PRE/10679). Disponível em: <<http://urlib.net/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.17.21.20.46>>. Acesso em: 29 fev. 2012.

WOLF, M.; NOEL, G. T.; STIM, R. J. Investigation of the double exponential model in the current-voltage characteristics of silicon solar cell. **IEEE Transactions on Electron Devices**, v.24, n.4, p. 419-428, Apr 1977.

APÊNDICE A - O ALBEDO PLANETÁRIO COMO SUBPRODUTO DO ECS

O principal objetivo inicial do ECS a bordo dos satélites de coleta de dados, é o de medir a degradação com radiação ionizante no espaço, de células solares de fabricação nacional. Entretanto, outros estudos foram realizados, como por exemplo, a medida do albedo terrestre para interpretação de mudanças climáticas no Brasil.

A eletrônica do ECS do SCD2 amplifica o valor de tensão lido na resistência do par que simula a condição de curto circuito e passa para um conversor analógico-digital de oito bits. Este sinal é transmitido por telemetria para a Terra a cada meio segundo. O modelo matemático usado para determinar o desempenho das células solares a partir destes dados usa a rotação intrínseca do satélite, que é mantida em torno de 34 rpm. Em função do algoritmo usado para interpretar os sinais verificou-se que, além da função principal do experimento de monitorar em tempo real o desempenho de suas células em missão, ele permite determinar os valores da radiação solar refletida pela Terra durante a passagem do SCD2 pela visada da estação receptora de Cuiabá em Mato Grosso. Sua rotação intrínseca permite também obter leituras da radiação incidente no topo da atmosfera durante o período em que o experimento está apontado para o Sol e, desta forma, obter-se valores auto calibrados do albedo planetário no campo de visada instantâneo ou “instantaneous field of view” (IFOV) do experimento. Através de um algoritmo, desenvolvido especificamente para a análise dos dados deste experimento, determina-se o mosaico de albedo em uma grade sintética com resolução de $2.5^\circ \times 2.5^\circ$, em latitude e longitude, sobre a América do Sul (VEISSID e PEREIRA, 2000).

Para o estudo do albedo, através dos dados do ECS, consideramos que as células solares atuam como sensor de radiação visível (VEISSID, 2002). Neste caso são considerados apenas os dados de telemetrias provenientes do par de células solares que opera na condição de curto circuito, pois este valor é proporcional a intensidade luminosa solar (VEISSID et al., 1990), tanto aquela

vinda diretamente do Sol como a parte que é refletida pela Terra. Conforme explicado adiante neste capítulo, só é possível de ser observado o albedo quando a curva que o representa não se superpõe com a curva da radiação solar. Portanto, esta condição de defasagem entre os picos da curva só é satisfeita na visada de Cuiabá durante o horário local entre 8:30 h e 15:30 h.

A Figura A.1 apresenta uma amostra de como os sinais são recebidos para o par da condição de curto circuito. Nesta figura são mostrados os pontos de leitura da telemetria do sinal do ECS que, em função da rotação intrínseca do satélite, variam de um valor máximo quando o ECS está orientado para o Sol até um valor mínimo. Estes pontos estão separados de meio segundo, pois a amostragem de leitura do computador de bordo do satélite tem uma taxa de duas leituras por segundo. O valor da telemetria está na unidade de mA, pois a resistência de carga permite a conversão da tensão em corrente.

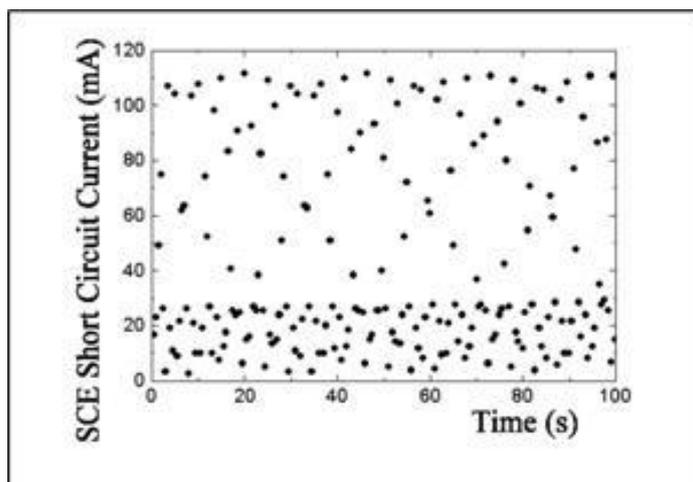


Figura A.1 - Amostra de dados do ECS recebido pela telemetria do satélite SCD2.
Fonte: Baruel e Veissid (2010).

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 (VEISSID, 2009). A Figura A.2 mostra a curva dos dados da Figura A.1, obtida pela transformada de variável de tempo (t) para ângulo de fase da rotação intrínseca do satélite (θ).

Esta rotina de ajuste permite obter os valores experimentais dos picos associados à radiação refletida (A_a) e radiação solar (A_s). Após correções geométricas, estes valores convertem-se nas intensidades das radiações refletida e solar e o albedo é calculado pela razão entre estas duas intensidades.

A defasagem entre os dois picos vistos na Figura A.2 é função da normal à superfície da Terra na posição em latitude e longitude do satélite e a direção dos raios solares. O satélite na saída do cone de sombra da Terra apresenta um valor nesta defasagem menor do que 90° , e na entrada do cone de sombra este valor é maior do que 270° . Nestas condições os dois picos estão superpostos e, isto, dificulta a leitura do sinal referente à radiação solar refletida. Portanto, a leitura deste sinal só é possível para ângulos entre 100° e 260° , sendo que a condição ideal é em torno de 180° , pois nesta situação o satélite encontra-se exatamente entre o Sol e a Terra.

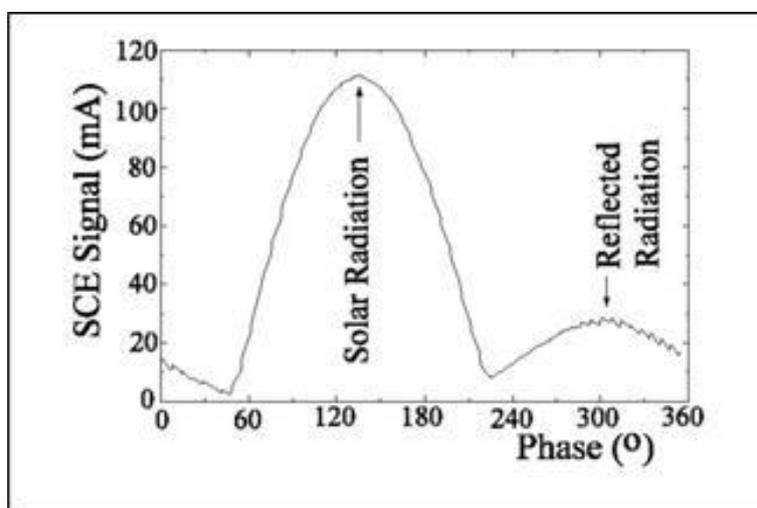


Figura A.2 - Curva dos dados da Figura A.1 depois da transformada de variável de tempo para fase de rotação do SCD2.

Fonte: Veissid et al. (2010a).

Os dados de albedo podem ser apresentados na forma de gráfico (local definido pela latitude e longitude) e de imagens (gráfico tridimensional do albedo sobre a América do Sul). A Figura A.3 mostra um exemplo da variação local do albedo sobre a cidade de Manaus (latitude de 3°S e longitude 60°W), na resolução de $\pm 5^\circ$ e para os anos de 1999 e 2000. A partir de gráficos deste tipo são extraídas informações úteis sobre os valores dos albedos mínimo, máximo, médio e do desvio padrão em relação à média.

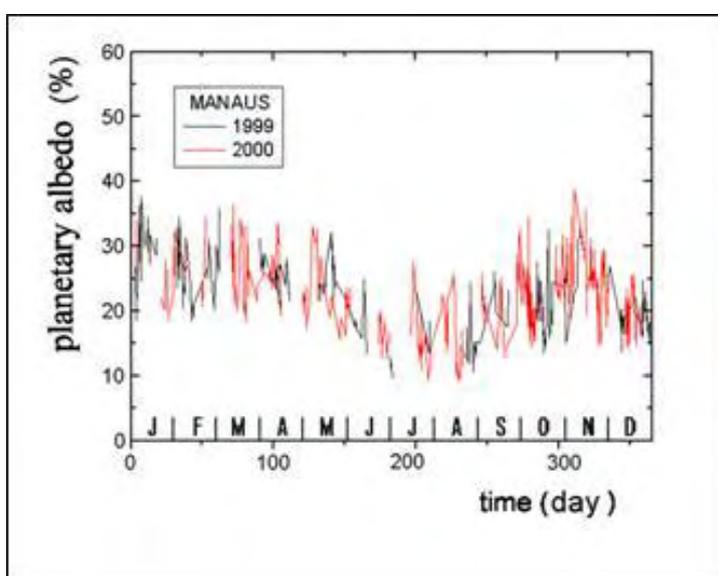


Figura A.3 - Valores de albedo medidos pelo ECS sobre a cidade de Manaus, dentro de uma resolução de $\pm 5^\circ$.

Os resultados do ECS podem, também, serem apresentados na forma de imagens que correspondem a gráficos tridimensionais dos valores de albedo sobre a América do Sul. Por exemplo, a Figura A.4 mostra a imagem do valor médio do albedo medido pelo ECS do satélite SCD2 para o mês de julho de 2000. Estes valores foram obtidos usando uma grade de células com dimensões de $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ em latitude e longitude. Todas as passagens do satélite sobre as células desta grade foram registradas e os valores médios do albedo calculados para cada célula.

A Figura A.4 mostra a barra de cores superior que corresponde ao valor de albedo médio entre 8% e 35%. Para comparação, a Figura A.5 mostra a imagem do valor médio da radiação de onda curta obtido pelo satélite ERBE (BARUEL e VEISSID, 2012). Ela representa a radiação de onda curta ($0,3\mu\text{m} - 5\mu\text{m}$) que escapa do topo da atmosfera da Terra para o espaço. A barra de cores mostra a escala dos “pixels” da figura na unidade de W/m^2 . As duas figuras correspondem ao mesmo mês.

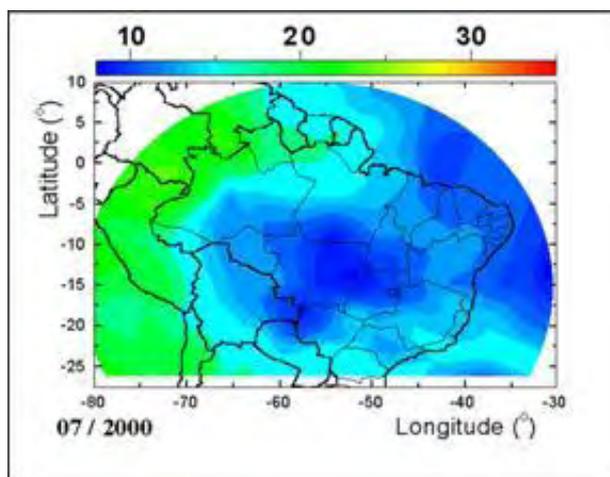


Figura A.4 - Valores médios do albedo medido pelo ECS do satélite SCD2 para jul. 2000.

Fonte: Baruel e Veissid (2010).

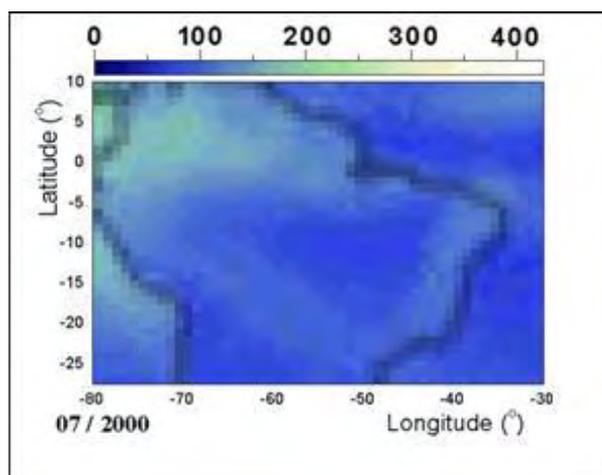


Figura A.5 - Valores da radiação de onda curta (SWR) obtidos do satélite ERBE, para jul. 2000.

Fonte: Baruel e Veissid (2010).

APÊNDICE B - A RADIAÇÃO ESPACIAL MEDIDA PELO SATÉLITE GOES 8

Painéis solares a bordo de satélites sofrem degradação da radiação proveniente dos raios cósmicos e dos eventos solares, isto é, partículas de alta energia maiores que 50 MeV que podem penetrar um satélite. Raios cósmicos são partículas com fluxo relativamente baixo resultando em baixas taxas de eventos únicos (SEU). Durante mínimos solares o Sol expele pouco material e os campos magnéticos terrestres podem afastar os raios cósmicos que chegam a Terra. Os eventos solares significativos são eventos de próton que ocorrem normalmente durante anos de máximo solar, após potentes explosões solares com rápidas ejeções de massa coronal (CME) (Figura B.1). Elas podem chegar a Terra em até 30 minutos após o evento solar.

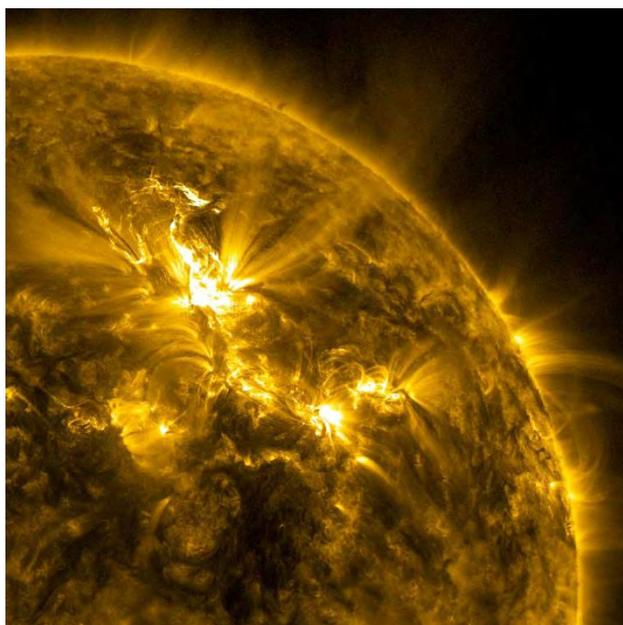


Figura B.1 – Evento solar que provocou uma Ejeção de Massa Coronal (CME) em 23 jan. 2012.

Fonte: NASA (2012b).

O fluxo de partículas medidos no satélite GOES 8 mostra que as datas, julho e novembro de 2000 (Figura B.2), novembro de 2001 e outubro de 2003 (Figura B.3), foram os mais intensos.

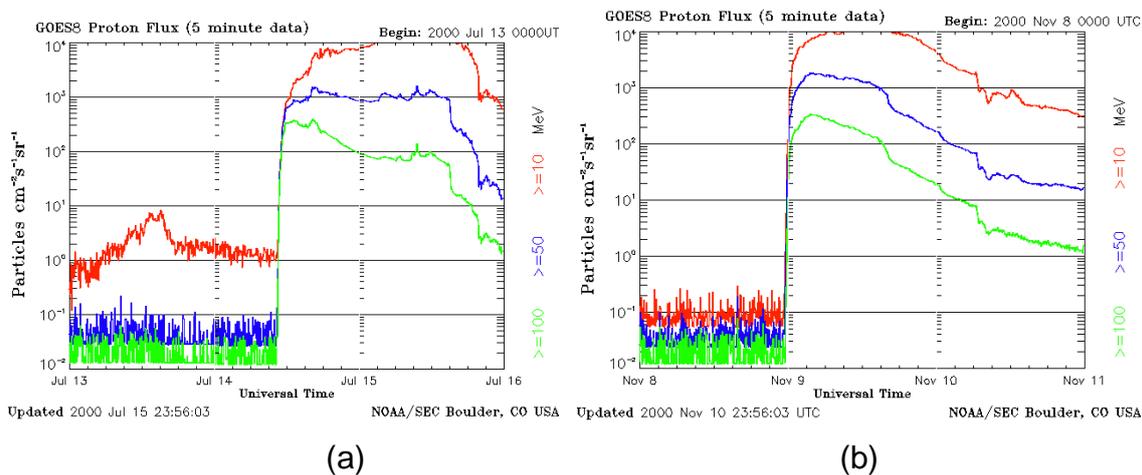


Figura B.2 - Fluxo de partículas medidos no satélite GOES-8 em julho de 2000 (a) e novembro de 2000 (b).
 Fonte: NOAA (2012).

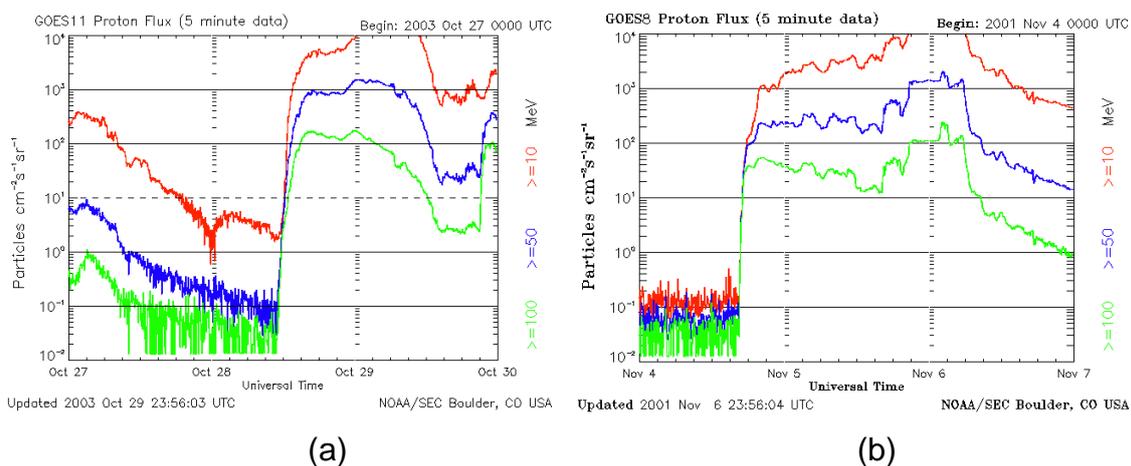


Figura B.3 - Fluxo de partículas medidos no satélite GOES-8 em novembro de 2001 (a) e outubro de 2003 (b).
 Fonte: NOAA (2012).

A Figura B.4 mostra a data dos picos com alto fluxo de partículas e a Figura B.5 a variação da fluência durante os dez anos de vida do satélite SCD2. A fluência é o fluxo integrado no tempo e a degradação dos parâmetros da célula solar é proporcional a esta fluência.

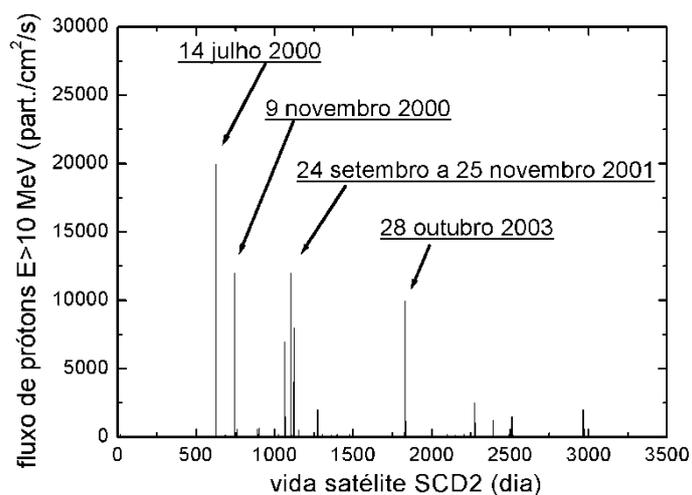


Figura B.4 - Fluxo de partículas medido pelo satélite GOES-8.

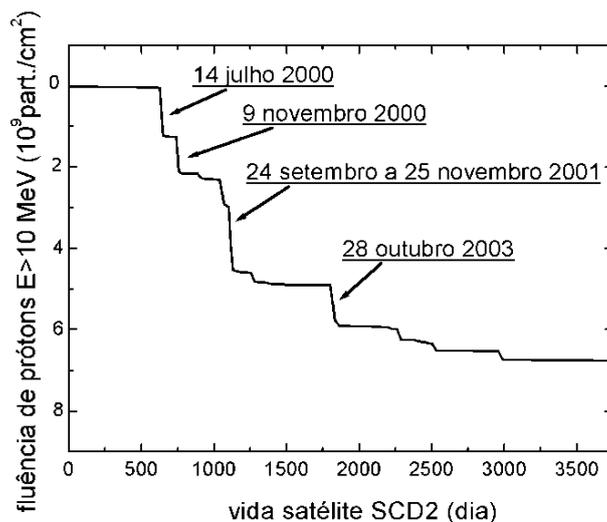


Figura B.5 - Variação da fluência durante os dez anos de vida do SCD2.

APÊNDICE C – PRINCIPAIS DIFERENÇAS ENTRE O SCD1 E O SCD2

Tabela C.1 – Principais diferenças entre o SCD1 e o SCD2

Item	SCD1	SCD2
Tempo de vida	1 ano com 75% de confiabilidade	2 anos com 65% de confiabilidade
Índice de nacionalização	73%	85%
Velocidade de rotação	120 rpm a 0 rpm	34 rpm (controle ativo)
Carga útil experimental	Computador de bordo e experimento célula solar	Roda de reação e experimento célula solar
Orientação do eixo de rotação	Variável	Sempre perpendicular ao plano da eclíptica
Probabilidade de acesso ao satélite	90%	100%
Gerador solar	Oito painéis laterais e células solares na face de topo, Figura 1.2(a)	Oito painéis laterais sem células solares na face de topo, Figura 1.2(b)
Potência máxima (W) Aspecto 90 °	88 (BOL)	90 (BOL)
Potência mínima (W) Aspecto 35 °	71 (BOL)	80 (BOL)
Potência máxima (W) Aspecto 90 °	76 (EOL)	76 (EOL)
Potência mínima (W) Aspecto 35 °	70 (EOL)	72 (EOL)

Fonte: INPE (1988,1990b)

APENDICE D - ANÁLISE DAS CORRENTES DO EXPERIMENTO CÉLULA SOLAR (ECS) DO SCD2

Os satélites SCDs carregam a bordo experimentos de células solares de silício. 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 (VEISSID e PEREIRA, 2000).

Os três sinais gerados pelos três 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 digitalmente seu valor para a estação receptora em Cuiabá-MT. 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 (VEISSID et al, 2010a).

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. A análise dos dados do ECS1 atestou o bom desempenho das células solares brasileiras para uso em satélite, conforme Veissid et al. (1990 e 1998) e por Nubile et al. (1994).

Descrição do experimento

As células solares foram fabricadas por especialistas do LAS-INPE usando infraestrutura do Laboratório de Microeletrônica da Escola Politécnica da USP (LME-USP). Estes dispositivos são estruturas semicondutoras tipo n+/p/p+ de

junção rasa com área de 4cm^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 células foram aprovadas por ensaios de qualificação ao voo (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.

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 a 5 V. 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 Figura D.1 mostra o diagrama do experimento célula solar.

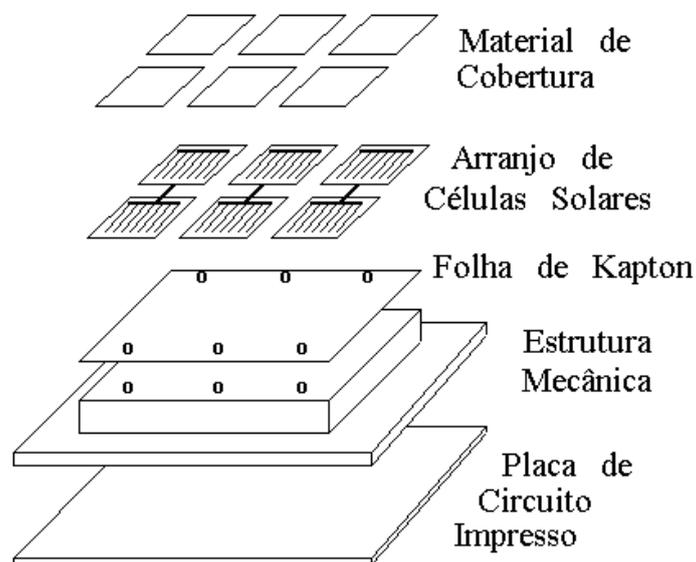


Figura D.1 - Diagrama das diversas camadas do SCE.

Fonte: Veissid e Pereira (2000).

Análise dos dados do ECS

Vários arquivos de dados de telemetria 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. A Figura D.2 (a) mostra os resultados destas análises para a corrente de curto circuito e a Figura D.3 (a) para a tensão de circuito aberto, respectivamente. Os pontos destes gráficos correspondem a média mensal dos valores, extrapolados para as condições padrão de iluminação (AM0) e temperatura de 25°C (VEISSID et al, 2010a). As Figuras D.2 (b) e D.3 (b) mostram a variação dos coeficientes de temperatura de I_{sc} e V_{oc} em função do tempo de vida do satélite.

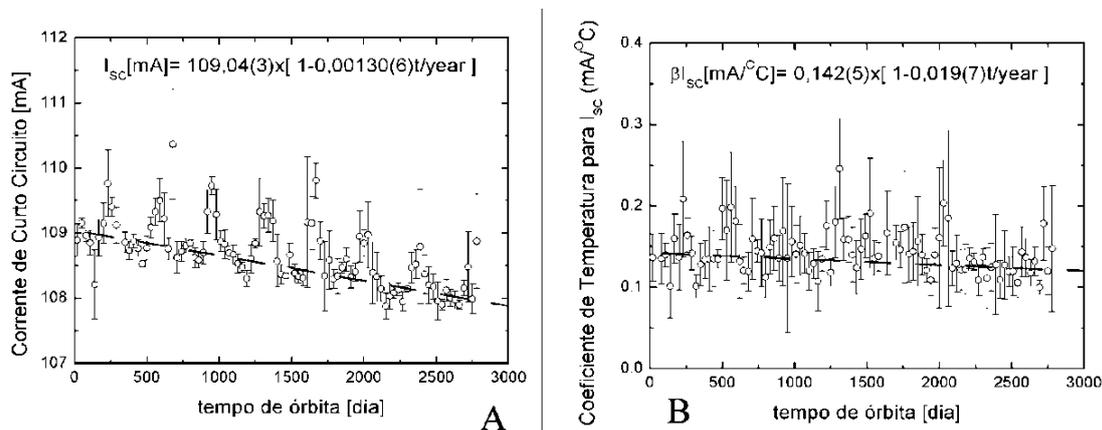


Figura D.2 – (a) Variação da corrente de curto circuito e (b) do coeficiente térmico em função do tempo de vida do SCD2.

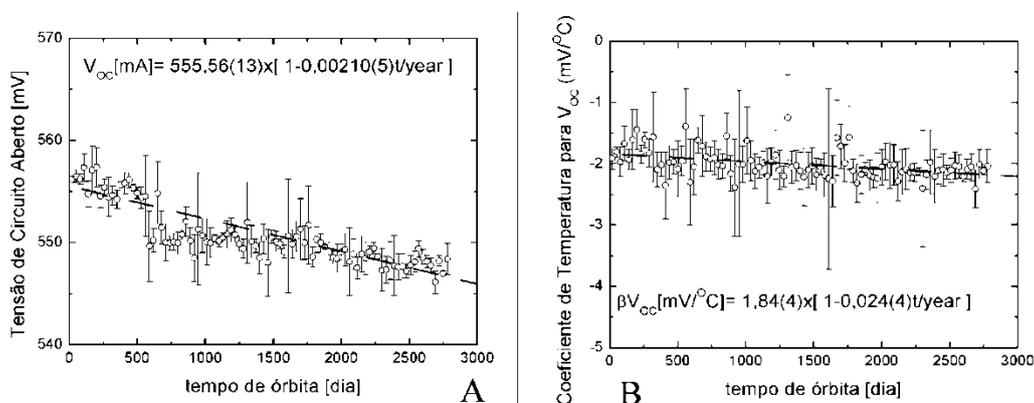


Figura D.3 - (a) Variação da tensão circuito aberto e (b) do coeficiente térmico em função do tempo de vida do SCD2.

Tendo-se todos os parâmetros da curva I x V da Equação 3.3, consegue-se calcular a eficiência de conversão (η) da célula solar ao longo da vida do satélite. A Figura. D.4 mostra os pontos de valor médio com respectivo desvio padrão.

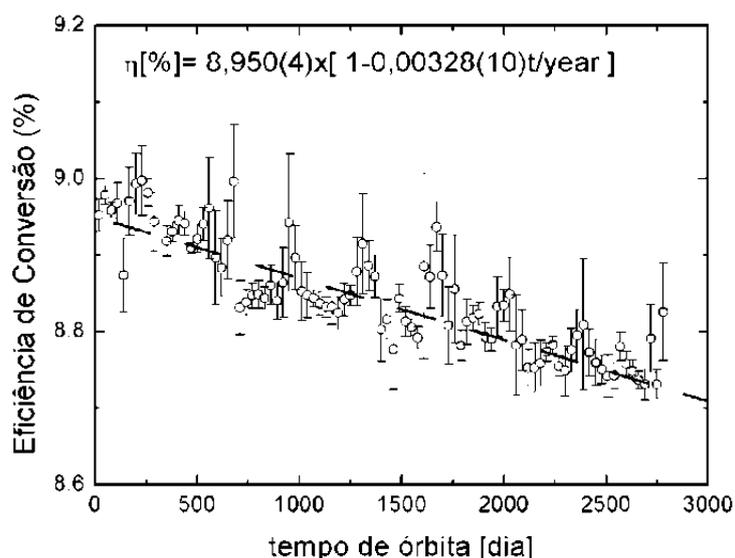


Figura D.4 - Variação da eficiência de conversão das células solares em função do tempo de vida do SCD2.

Resultados das análises dos dados do ECS

A degradação do desempenho das células solares, pela radiação ionizante encontrada no espaço exterior, está conforme o previsto para o tipo de células utilizado no ECS. Esta degradação é de 0,029% por ano e é menor do que a degradação esperada, conforme dados de Tada et al. (1982), que é de 0,08% por ano para a órbita do satélite.