

ANÁLISE DE EVOLUÇÃO DE LONGO PRAZO DAS TEMPERATURAS DO SATÉLITE SCD-1

Andreia Fátima Sorice

Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA) - Div. Eng. Mecânica-Aeronáutica (IEM)
Pr. Marechal Eduardo Gomes, 50 - Vila das Acácias CEP 12228-900 – São José dos Campos – SP – Brasil
andreia.sorice@uol.com.br

Issamu Muraoka

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) – Div. Mecânica Espacial e Controle (DMC)
Av. dos Astronautas, 1.758 - Jd. Granja - CEP: 12227-010 -São José dos Campos – SP – Brasil
issamu@dem.inpe.br

Ezio Castejon Garcia

Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA) - Div. Eng. Mecânica-Aeronáutica (IEM)
ezio@ita.br

Resumo: O objetivo deste artigo é apresentar os resultados da investigação das causas da variação da temperatura do satélite SCD-1 (Satélite de Coleta de Dados) por análise da evolução de seu comportamento térmico ao longo de 13 (treze) anos em órbita. O SCD-1 é o primeiro satélite projetado e construído no Brasil, lançado com sucesso em 1993, e ainda em operação. Um modelo matemático foi desenvolvido para simular o comportamento térmico do SCD-1 em órbita, sendo utilizado como ferramenta de trabalho durante a fase de projeto. As temperaturas em órbita do SCD-1 foram monitoradas e registradas no Centro de Controle e Rastreamento (São José dos Campos – SP) desde o lançamento. Uma análise feita no início da missão mostrou que todas as temperaturas estavam nas faixas previstas pelo modelo. Ao longo dos anos, a bateria, que é o equipamento mais sensível termicamente, apresentou um aumento de temperatura alcançando seu limite superior. Desenvolveu-se uma metodologia para investigar as causas deste desvio, no qual uma rotina de otimização, acoplada ao modelo matemático, corrige um conjunto selecionado de parâmetros do modelo de forma a ajustar as temperaturas teóricas às experimentais. Através desta metodologia, analisaram-se os dados do SCD-1 num período entre 1995 a 2005 e concluiu-se que a elevação da temperatura foi causada pelo aumento da dissipação interna de calor da bateria e pelo aumento da absorvidade, no espectro solar, de alguns revestimentos externos do satélite, sendo ambos consequência da degradação de longo prazo.

Palavras chaves: degradação de propriedades termoópticas, projeto térmico de satélites, otimização, satélite SCD-1

1. Introdução

A verificação final de um projeto térmico de satélite é feita comparando-se as temperaturas medidas em voo com as previstas durante o projeto (Rajagopalan e Willson, 1980), (Hayashi *et al*, 1984), (Cluzet *et al*, 1989). Este estudo é geralmente bem simplificado, considerando dados de um curto período de tempo, logo após o lançamento. Uma vez constatado que o projeto térmico está satisfatório, raramente os dados térmicos são analisados novamente, exceto se for observada alguma anomalia que afete o funcionamento do satélite.

Na literatura existem poucos estudos sobre o comportamento térmico de longo prazo, embora estas sejam úteis para avaliar fatores como degradação de revestimentos externos, células solares, baterias e tubos de calor. Um dos motivos desta escassez é a dificuldade de extrair dados precisos da degradação a partir dos dados de temperatura, uma vez que as degradações são pouco perceptíveis individualmente. Em geral observam-se variações térmicas resultantes de efeitos cumulativos de várias degradações simultâneas, o que torna necessária uma análise apurada dos dados para identificar os efeitos individuais de cada uma.

Em casos específicos onde o efeito de uma determinada degradação é preponderante sobre os demais, é possível avaliá-la com boa precisão, como o estudo apresentado por Kelly e Reisenweber (1988). Neste, determinou-se a degradação da absorvidade solar de OSRs (Optical Solar Reflectors) em um satélite geoestacionário ao longo de 7 anos em órbita. Esta análise pôde ser feita por uma simples análise da evolução da temperatura dos OSRs pois eles estavam instalados em um radiador isolado do restante da estrutura do satélite, ou seja, seu comportamento térmico era fortemente influenciado pela propriedade termoóptica do OSR.

Os vários experimentos embarcados em satélites para avaliar degradação de propriedades termoópticas de revestimentos utilizam este princípio (Beckmann, 1983), (Ohnishi e Hayashi, 1983). Ou seja, uma amostra do material é instalada numa área exposta ao ambiente espacial e isolada termicamente das demais partes do satélite. Desta forma a sua degradação pode ser avaliada pela sua temperatura numa relação direta. Estes estudos têm custos elevados, pois envolvem embarcação de experimentos específicos para este fim.

Este trabalho apresenta uma análise do comportamento térmico de longo prazo do satélite SCD-1, com o objetivo de identificar os principais fatores que causaram uma pequena elevação de temperatura global do satélite, ao longo de

sua vida orbital. Estabeleceu-se uma metodologia para, a partir da análise das temperaturas em órbita, medidas em datas distribuídas ao longo da vida do satélite, determinar a variação sofrida por um conjunto de parâmetros durante este período. A metodologia utiliza como ferramenta principal o modelo matemático que simula a evolução da temperatura do satélite ao longo da órbita em função destes parâmetros. Uma rotina de otimização acoplada a este modelo matemático, faz a procura dos valores destes parâmetros que melhor ajustam as curvas de temperaturas teóricas às experimentais. Repetindo-se esta análise para cada data, pode-se levantar a evolução destes parâmetros ao longo do período analisado.

2. Metodologia

A metodologia proposta para o estudo da evolução de longo prazo do comportamento térmico SCD-1 baseia-se na análise comparativa entre as temperaturas medidas em órbita e as obtidas através de simulação matemática. A simples análise da variação das temperaturas medidas ao longo do tempo não fornece informações suficientes para determinar as causas dos desvios observados, pois as mesmas condições térmicas dificilmente se repetem ao longo da vida do satélite.

A simulação matemática é feita através de um modelo, geralmente desenvolvido durante a execução do projeto térmico, baseado no método nodal. Neste método, o satélite é dividido em um número finito de regiões isotérmicas denominadas "nós", as quais são atribuídas uma temperatura e uma capacitância térmica. Cada nó interage com os demais nós do modelo através de condutâncias formando uma malha, análoga a um circuito elétrico.

O equacionamento térmico surge do balanço de calor feito em cada nó, considerando sua interação com os demais nós do modelo e com o meio, resultando em um sistema de equações diferenciais dado pela Eq. (1):

$$m_i C p_i \frac{dT_i}{dt} = \sum_{j=1}^{n+1} R_{ji} \sigma (T_j^4 - T_i^4) + \sum_{j=1}^n B_{ji} (T_j - T_i) + Q_i + A_i \alpha_i q_s + A_i \varepsilon_i q_{ir} \quad i = 1 \dots n \quad (1)$$

onde:

T_i e T_j são temperaturas absolutas dos nós i e j ;

t é tempo;

$m_i C p_i$ é capacitância térmica do nó i ;

R_{ji} é a condutância radiativa entre os nós j e i ;

σ é a constante de Stefan-Boltzmann;

B_{ji} é a condutância condutiva entre os nós j e i ;

Q_i é o calor gerado internamente no nó i ;

A_i é a área do nó i exposta ao meio;

α_i é a absorvidade térmica no espectro solar do nó i ;

ε_i é a emissividade térmica no espectro infravermelho do nó i ;

q_s é a intensidade de radiação no espectro solar incidente em i ;

q_{ir} é a intensidade de radiação no espectro infravermelho incidente em i ;

n é o número de nós em que o satélite foi dividido;

$n + 1$ é o nó representando do meio.

A solução do sistema de equações (Eq. 1) resulta na evolução das temperaturas dos vários nós do modelo ao longo do tempo.

Para se fazer a comparação entre as temperaturas medidas em vôo e as obtidas através de simulações matemáticas é necessário que todas as condições de contorno atuantes no instante em que foram registradas as temperaturas sejam fielmente representadas no modelo. Na Eq. (1) estas condições de contorno são representadas pelas variáveis Q_i , q_s , e q_{ir} . Os fatores que determinam estas condições de contorno são: parâmetros de órbita, posição do satélite na órbita, orientação do satélite em relação ao sol e a terra, status e histórico recente da operação de cada equipamento embarcado, valor da constante solar, do fator de albedo e da radiação terrestre.

Para obter as condições de contorno, determinar as curvas de temperaturas teóricas e depois compará-las com as medidas, estabeleceu-se o procedimento ilustrado na Figura 1.

O arquivo de telemetria contém dados de telemetria em função do instante de medida num determinado período de tempo (aproximadamente 8 órbitas). O de propagação de órbita e atitude contém dados previstos de órbita e atitude desde a data do lançamento do satélite até instantes de um futuro próximo. Um programa computacional, de nome LETEL, extrai os dados de temperaturas e os "status" dos equipamentos embarcados (ligado ou desligado) do arquivo de telemetria e os de órbita e atitude nos instantes correspondentes aos primeiros, gerando dois arquivos conforme indicados na Figura 1. O programa computacional CATER calcula as intensidades de radiação solar e terrestre (q_s , e q_{ir}) incidentes em cada nó do satélite para o período em questão, de acordo com os dados de órbita e atitude. Os "status" dos equipamentos embarcados definem as potências geradas internamente aos nós (Q_i). Tendo a condição de contorno e o modelo matemático, representados na Eq. (1), outro programa, ANATER, determina a evolução da temperatura, resolvendo numericamente o sistema de equações. As curvas de temperaturas obtidas são então comparadas com as curvas experimentais. Uma diferença média é também calculada através da Eq. (2) (ver ilustração na Figura 2):

$$\bar{\delta}_i = \frac{\sum_{k=1}^m (T_{i,k} - T_{E,i,k})}{m} \quad (2)$$

onde:

$\bar{\delta}_i$ é a diferença média para o nó i ;

$TT_{i,k}$ é a temperatura calculada para o nó i no instante t_k ;

$TE_{i,k}$ é temperatura medida no nó i no instante t_k ;

m é o número total de medidas.

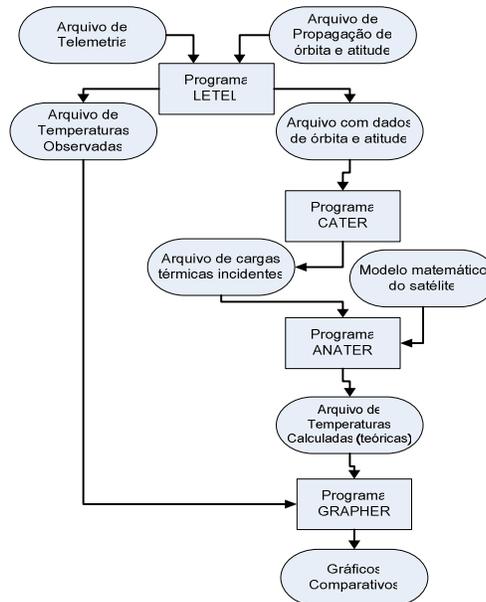


Figura 1 - Fluxograma para obter curvas comparativas.

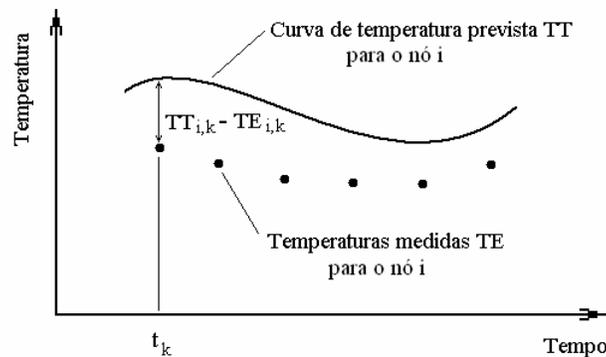


Figura 2 – Ilustração da diferença entre temperaturas calculadas e medidas.

Numa segunda etapa, uma vez tendo o modelo matemático com a condição de contorno representativa do período de medida, estabeleceu-se uma metodologia para ajustar as curvas teóricas às experimentais. As variáveis de ajuste podem ser qualquer um dos coeficientes do Sistema de Equações (1), ou seja, $m_i C_{p_i}$, R_{ji} , B_{ji} , Q_i , A_i , α_i , ε_i , q_s , e q_{ir} . Pode-se escolher um ou um conjunto destes coeficientes para serem otimizados, sendo que a busca é feita dentro das faixas estabelecidas para cada um. Para tanto, utilizou-se uma rotina de otimização estocástica denominada GEO_{var} , descrito por Sousa *et al* (2003), acoplada ao programa ANATER de cálculo de temperatura. O fluxograma do processo de procura dos valores dos coeficientes que melhor ajusta as curvas de temperaturas teóricas e experimentais é mostrado na Figura 3. O ajuste das curvas é avaliado pela diferença quadrática média entre as temperaturas teóricas e experimentais, calculada pela Eq. (3) (ver ilustração na Figura 2):

$$\bar{\delta}_{all} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{nno} \sum_{k=1}^m (TT_{i,k} - TE_{i,k})^2}}{m^2} \quad (3)$$

onde:

$\bar{\delta}_{all}$ é a diferença quadrática média considerando todos os nós;

$TT_{i,k}$ é a temperatura calculada para o nó i no instante t_k ;

$TE_{i,k}$ é temperatura medida no nó i no instante t_k ;

m é o número total instantes em que foram realizadas medidas;

nno é o número total de nós nos quais fora realizadas medidas experimentais.

O processo de otimização tem como objetivo minimizar a diferença quadrática média dada pela Eq. (3), que será chamada função objetivo.

Cada um dos N coeficientes a ser otimizado, chamado de variáveis de busca, é codificado por um conjunto de L bits, ou seja, cada variável de busca pode assumir 2^L valores discretos, igualmente espaçados, incluindo os dois valores limites que devem ser estabelecidos. As N variáveis de busca são então representadas por um conjunto de $(N \times L)$ bits.

O processo de otimização inicia-se com uma configuração de bits, escolhida aleatoriamente. A busca da melhor configuração de bits é iniciada flipando-se os bits um por um e para cada bit flipado (i) decodifica-se o conjunto de bits nas variáveis de busca; (ii) com estas variáveis, determinam-se as curvas de temperaturas teóricas e em seguida (iii) calcula-se diferença quadrática média, $\bar{\delta}_{all}$.

Tendo percorrido todos os bits, ranqueia-os em função do $\bar{\delta}_{all}$ obtido quando o mesmo foi flipado, independentemente para cada variável de busca. Ou seja, atribui-se o rank $k = 1$ para o bit que resultou no menor $\bar{\delta}_{all}$, $k = 2$ para segundo menor, até $k = L$ para o que resultou no maior $\bar{\delta}_{all}$.

O passo seguinte é mutar probabilisticamente um bit em cada variável, sendo que a probabilidade do bit mutar é proporcional a $k^{-\tau}$ onde k é o seu rank do bit na variável e τ é um parâmetro da otimização. Se $\tau = 0$, a busca é totalmente aleatória e quando $\tau \rightarrow \infty$ a busca torna-se totalmente determinística. Sugerem-se valores entre 0,25 e 3.

Uma vez feita a mutação, retorna-se ao processo de flipagem um a um dos bits, agora com uma nova configuração de bits. Este processo é repetido até alcançar o número determinado de avaliações. O resultado da otimização é a combinação das variáveis de busca que resultou na menor diferença quadrática média. O processo mostrado no fluxograma (Figura 3) é repetido utilizando várias sementes distintas, selecionando-se no final, o melhor resultado obtido entre as sementes.

Para análise de longo prazo do SCD-1, selecionaram-se 8 coeficientes da Eq. (1), considerados os de maior incerteza na determinação de seus valores e/ou os potenciais causadores de variações térmicas. Foram analisadas telemetrias em 23 datas distintas, espaçadas de aproximadamente 6 meses. Para cada data, as telemetrias abrangem um período de aproximadamente 8 órbitas consecutivas (800 minutos).

A metodologia apresentada anteriormente foi aplicada a cada uma das 23 telemetrias (período de 800 minutos cada), obtendo-se os valores dos 8 coeficientes para cada data através da otimização. O resultado final é a evolução dos coeficientes estudados ao longo do tempo.

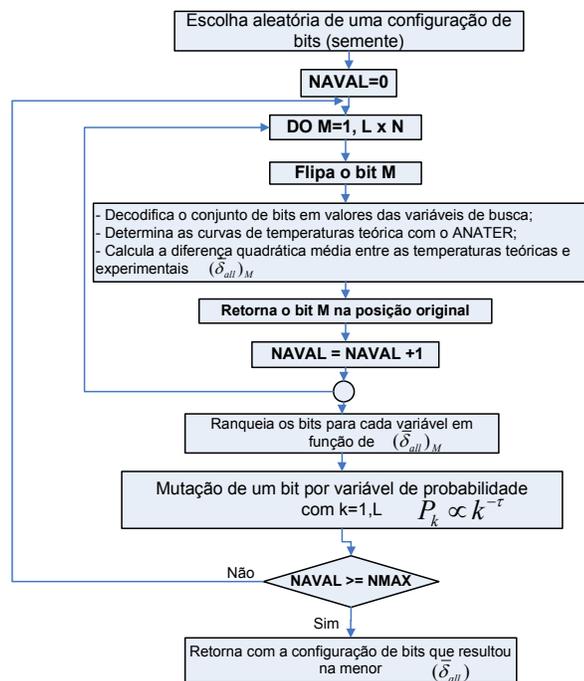


Figura 3 – Fluxograma do Processo de Otimização.

3. Descrição do Satélite SCD-1

3.1. Missão do SCD-1

O satélite SCD-1 faz parte da Missão de Coleta de Dados que, através de um sistema de coleta de dados ambientais baseado na utilização de satélites e plataformas de coleta de dados (PCDs) distribuídas pelo território nacional, objetiva fornecer ao país dados ambientais diários coletados nas diferentes regiões do território nacional.

As PCDs são pequenas estações automáticas, instaladas, geralmente, em locais remotos. Os dados adquiridos pelas PCDs são enviados aos satélites que os retransmitem para as estações terrenas do INPE, em Cuiabá e Alcântara. A partir daí, os dados são enviados para o Centro de Missão, em Cachoeira Paulista, onde é realizado o seu tratamento e a sua distribuição imediata aos usuários do sistema. Os usuários cadastrados recebem os arquivos com os dados já processados, utilizando a Internet.

Os dados coletados pelo satélite SCD-1 são utilizados em diversas aplicações, tais como a previsão de tempo do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), estudos sobre correntes oceânicas, marés, química da atmosfera, planejamento agrícola, entre outras. Uma aplicação de grande relevância é o monitoramento das bacias hidrográficas através das plataformas da Agência Nacional de Águas (ANA) e do Sistema de Vigilância da Amazônia (SIVAM), que fornecem dados fluviométricos e pluviométricos.

3.2. Dados da Estrutura Física e da Órbita do SCD-1

O SCD-1 é um satélite de pequeno porte no formato de um prisma octogonal pesando 115 Kg, conforme apresentado na Figura 4a. Possui diâmetro da base de 1,00 m e altura de 0,80 m. O equipamentos eletrônicos estão montados nos painéis inferior e central, conforme mostra a Figura 4c. Seu eixo é estabilizado por rotação (120 rpm) e desenvolve órbita circular com inclinação de 25° a uma altitude de 750Km, conforme apresentado na Figura 4b.

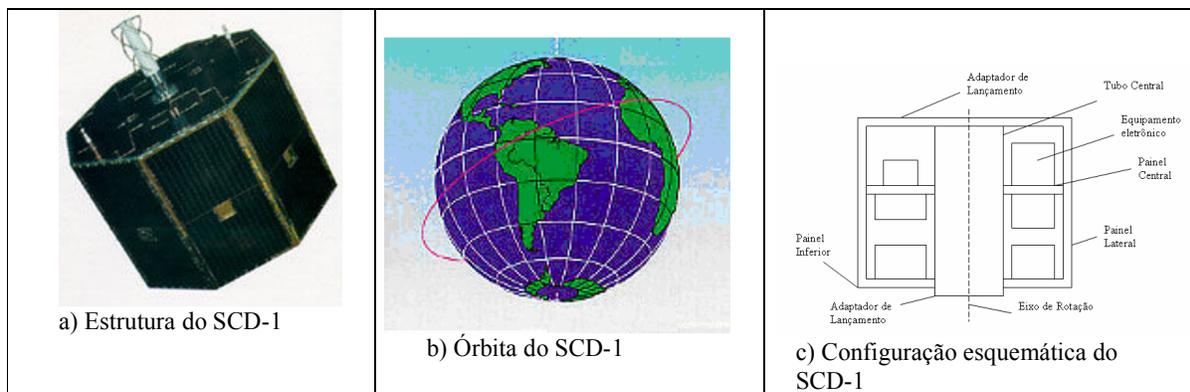


Figura 4. Satélite de Coleta de Dados 1

3.3. Projeto Térmico do SCD-1

O controle térmico de satélite SCD-1 é dito passivo (Muraoka e Leite, 1994), ou seja, através da escolha de revestimentos e condutores/isoladores condutivos adequados. O projeto térmico foi estabelecido em função das incidências críticas de radiação solar direta. As incidências críticas para o satélite SCD1 foram:

- Perpendicular ao painel superior com constante solar mínima e período de eclipse máximo;
- Perpendicular ao eixo de rotação do satélite, com constante solar mínima e período de eclipse máximo;
- Formando ângulo de 48° com o eixo de rotação do satélite, com constante solar máxima e período de eclipse mínimo.

O painel inferior não recebe radiação solar direta, durante a vida útil do satélite.

Devido à rotação do satélite, os painéis solares laterais não estão sujeitos a temperaturas muito altas. Considerando as incidências críticas de radiação solar direta, o projeto térmico do satélite SCD-1 foi estabelecida da seguinte forma (i) as superfícies internas pintadas com tinta negra (alta emissividade) exceto os painéis laterais nos quais utilizou-se fita de alumínio (baixa emissividade); (ii) os painéis laterais isolados condutivamente do restante do satélite; (iii) a superfície externa do painel inferior revestida com fita metalizada com ouro (baixa emissividade); (iv) as superfícies externas, não recobertas por células solares, do painel superior recoberta com fita de kapton (alta emissividade); (v) as superfícies externas, não recobertas por células solares, dos painéis laterais recoberta com fita de alumínio (baixa emissividade).

Dois equipamentos embarcados tiveram atenção especial, sendo eles o "shunt", pela sua alta geração de calor interno, e a bateria, pela sua estreita faixa de temperatura (-5 a 25 °C). O "shunt" foi encaixado numa abertura do painel inferior e a sua face exposta ao ambiente espacial foi recoberta com fita de kapton (alta emissividade) para permitir a

irradiação de sua alta dissipação interna. A bateria foi instalada sobre o painel inferior e uma área externa deste painel, definida pelo contorno da base da bateria, foi parcialmente recoberta com fita de kapton (alta emissividade) para ajustar a temperatura do equipamento dentro da sua faixa permissível.

4. Resultados

Para a investigação das causas da elevação da temperatura do satélite SCD-1 foram recuperados 23 arquivos de telemetria em datas distribuídas entre junho/1995 a dezembro/2005, com espaçamento aproximado de 6 meses. A orientação do satélite e a posição do sol em relação à órbita em cada uma das datas, geradas pelo programa LETEL (ver fluxograma da Figura 1), estão apresentadas na Tabela 1, sendo os ângulos definidos na Figura 5. O valor da constante solar previsto para as datas também é apresentado.

Os dados de telemetria incluem temperaturas de 30 pontos do satélite (21 em equipamentos e 9 em partes estruturais), registradas a cada 0,5 s. Em função do grande número de dados e considerando que a inércia térmica do satélite, os dados de temperatura foram tomados a cada 30 s. Cada arquivo de telemetria abrange um período de aproximadamente 8 órbitas consecutivas nas quais o satélite passa pela área de visibilidade da estação de Cuiabá.

Somente dois arquivos (22-23/Jun/95 e 21-22/Fev/97) contêm dados da órbita completa, sendo que os restantes contêm dados somente do período visível de aproximadamente 12 minutos em cada órbita. Para se ter dados da órbita completa é necessário que o computador esteja operando para armazenar os dados no período fora da visibilidade.

Para cada arquivo de telemetria, aplicando-se o fluxograma da Figura 1, levantaram-se as curvas comparativas entre as temperaturas teóricas e experimentais. Em função do grande número de gráficos, selecionaram-se duas datas para apresentação dos resultados. As Figuras 6, 7 e 8 apresentam as temperaturas calculadas e experimentais para temperaturas nos painéis inferior, laterais e superior respectivamente, referentes aos dados de 22-23 de Junho de 1995.

Tabela 1. Orientação do Satélite SCD-1 nas Datas Analisadas

Data	Ang_Sol (graus)	Spin_Sol (graus)	CODEC (graus)	ASCRES (graus)	Constante Solar (W/m ²)
22-23/Jun/95	8,2	62,1	67,4	26,9	1.308
22/Dez/95	-21,5	69,8	58,7	42,3	1.409
22-23/Jun/96	39,3	73,2	90,2	22,1	1.308
21-22/Dez/96	-47,9	75,2	90,2	22,1	1.409
21-22/Fev/97	-13,5	70,6	109,7	16,1	1.388
22-23/Dez/97	-29,8	76,9	116,3	0,5	1.409
22/Jun/98	17,3	79,7	73,8	6,0	1.308
22/Dez/98	-3,3	75,7	97,0	14,0	1.409
21-22/Jun/99	-1,3	67,5	113,6	24,0	1.308
22/Dez/99	-2,4	69,7	82,3	20,8	1.409
22-23/Jun/00	17,1	58,5	103,6	39,5	1.308
22/Dez/00	-32,3	71,6	75,3	33,5	1.409
22-23/Jun/01	45,6	83,3	94,3	14,0	1.308
22-23/Dez/01	-46,3	77,7	92,8	14,9	1.409
22/Jun/02	36,0	73,0	63,8	2,6	1.308
22-23/Dez/02	-16,1	79,2	102,4	7,8	1.409
22/Jun/03	5,2	78,0	78,4	11,2	1.308
22/Dez/03	1,5	73,7	83,7	16,3	1.409
22-23/Jun/04	6,2	72,7	108,9	20,7	1.308
10/Out/04	14,2	65,5	89,5	25,2	1.380
22/Dez/04	-20,9	65,9	75,3	33,5	1.409
22-23/Jun/05	38,0	66,6	101,1	41,9	1.308
22/Dez/05	-48,3	59,4	107,5	26,6	1.409

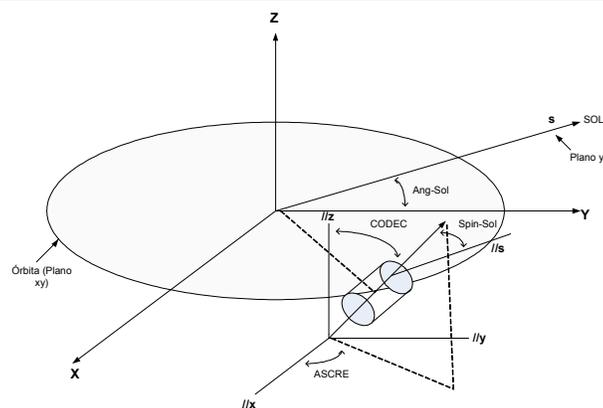


Figura 5. Ângulos que Definem a Orientação do Satélite e Posição do Sol em Relação à Órbita

As Figuras 9, 10 e 11 apresentam as mesmas referentes aos dados de 22 de dezembro de 2005. Nestas últimas observa-se que os dados experimentais aparecem somente nos períodos de visibilidade (aproximadamente 12 minutos em cada órbita).

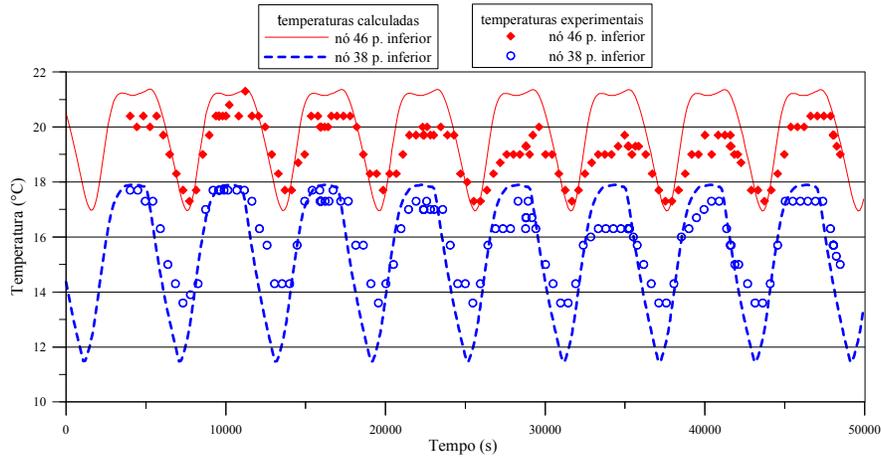


Figura 6. Temperaturas no painel inferior em 22-23 de Junho de 1995

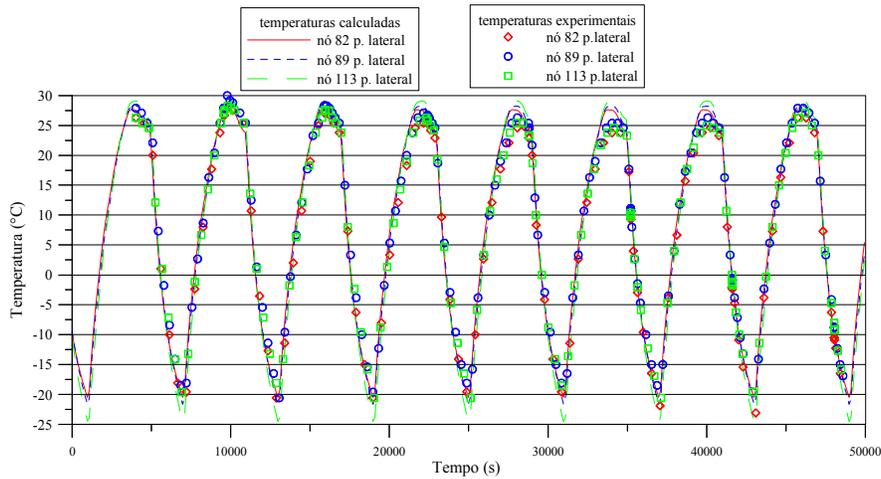


Figura 7. Temperaturas nos painéis laterais em 22-23 de Junho de 1995

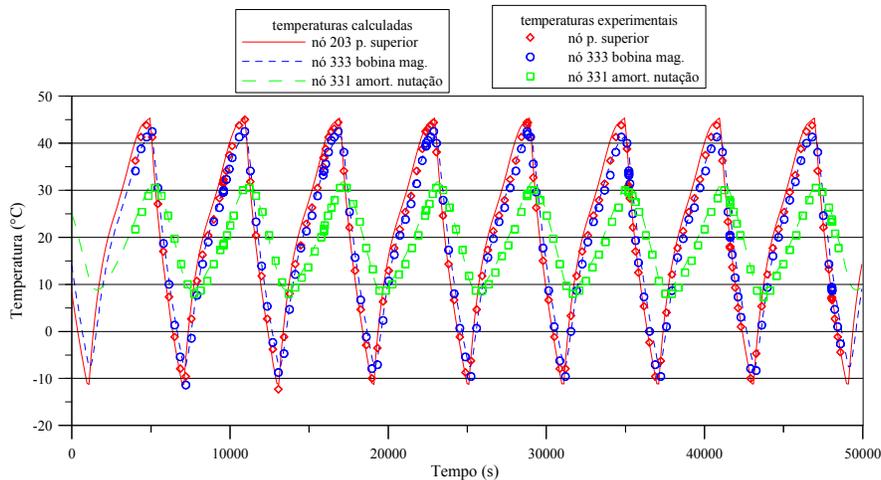


Figura 8. Temperaturas no painel superior em 22-23 de Junho de 1995

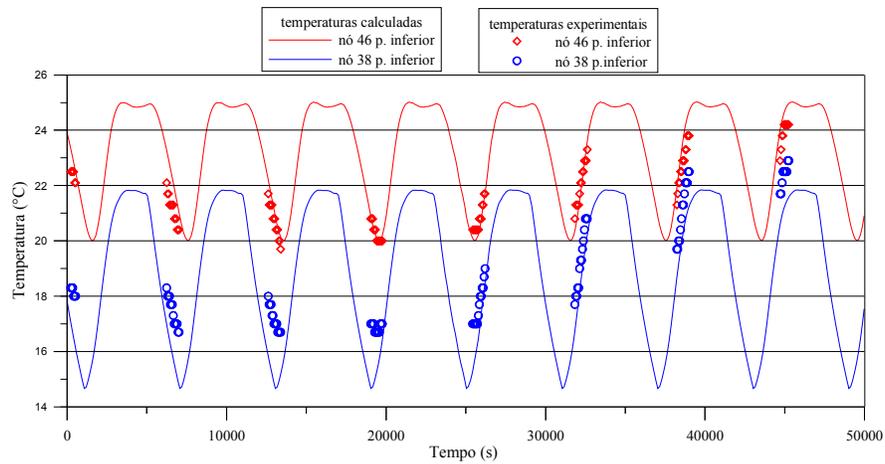


Figura 9. Temperaturas no Painel Inferior em 22 de Dezembro de 2005

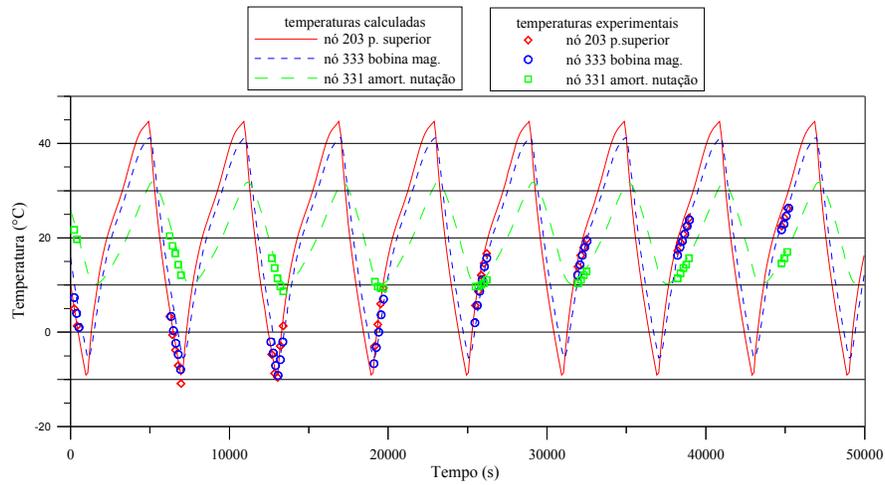


Figura 10. Temperaturas nos Painéis Laterais em 22 de Dezembro de 2005

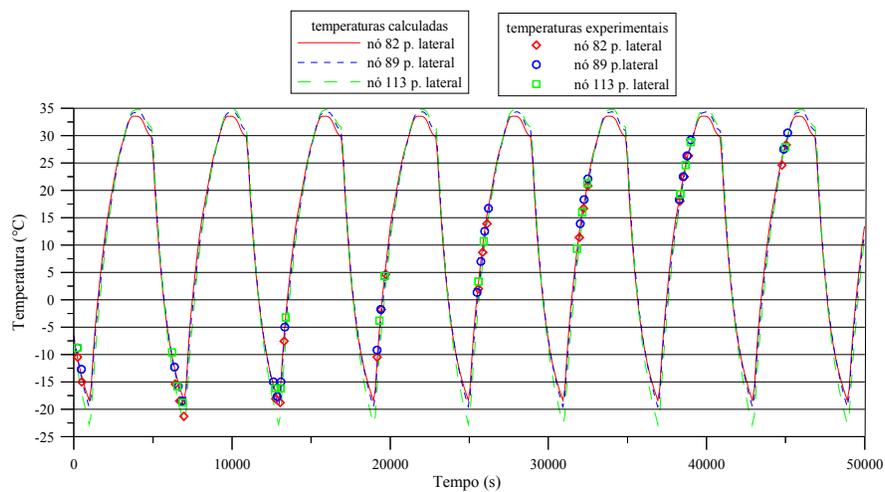


Figura 11. Temperaturas no Painel Superior em 22 de Dezembro de 2005

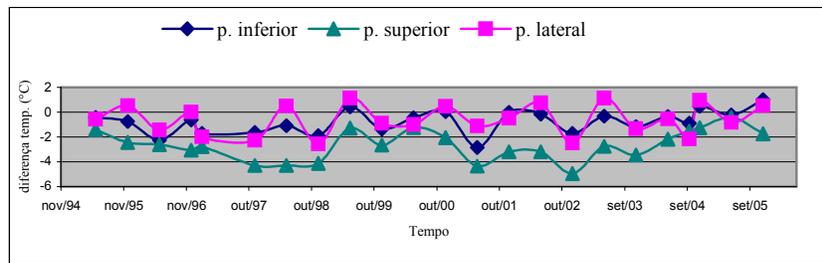


Figura 12. Evolução da diferença entre as temperaturas teóricas e experimentais em painéis estruturais externas

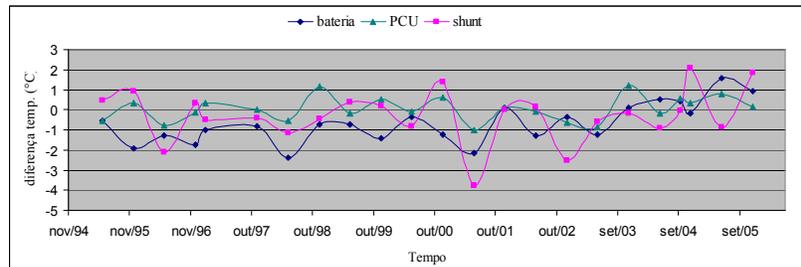


Figura 13. Evolução da diferença entre as temperaturas teóricas e experimentais em equipamentos do subsistema de energia

Embora sejam observadas algumas tendências nas diferenças apresentadas nas Figuras 12 e 13, não é uma tarefa trivial determinarem as suas causas. Para tanto aplicou-se a metodologia proposta.

Identificaram-se oito possíveis causas da variação de temperatura de longo prazo no SCD-1, sendo cinco relacionadas com degradação de propriedades termoópticas de revestimentos externos ao satélite e três relacionadas com variação na geração interna de calor em equipamentos eletrônicos embarcados.

A degradação de revestimentos externos está associada ao aumento da sua absortividade no espectro solar (Silverman, 1995), representada pelo coeficiente α_i da Eq. (1). Quanto a variação na geração interna de calor (coeficiente Q_i da Eq. 1), esta pode ocorrer em equipamentos do suprimento de energia como o dissipador “shunt”, bateria e o PCU. Nestes, a geração interna de calor é de difícil previsão teórica, pois depende de uma combinação de fatores como tempo de eclipse, ângulo de incidência solar, eficiência das células solares, energia consumida pelo satélite, e no caso da bateria, também da degradação.

A Tabela 2 lista as oito causas investigadas. Para cada uma definiu-se um fator de correção, cujo valor será otimizado de forma a obter o melhor ajuste entre as curvas de temperaturas teóricas e as medidas, utilizando a metodologia proposta. A faixa de procura, assim como a resolução, está também apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 - Oito Causas Investigadas pelo Aumento da Temperatura do SCD-1

Causa Investigada	Valor original	Faixa e resolução do fator de correção	Material
$\Delta\alpha$ do painel inferior	0,3	0,95 ~ 1,10 / 0,01	kapton metalizado (ouro)
$\Delta\alpha$ do radiador da bateria	0,34	0,96 ~ 1,11 / 0,01	kapton metalizado (ouro) e kapton 5 mil
$\Delta\alpha$ do radiador do shunt	0,51	0,96 ~ 1,11 / 0,01	kapton 5 mil
$\Delta\alpha$ dos painéis laterais	0,640 ~ 0,759	0,95 ~ 1,10 / 0,01	célula solar
$\Delta\alpha$ do painel superior	0,516 ~ 0,769	0,745 ~ 1,030 / 0,015	célula solar + kapton 5 mil
Q do dissipador shunt	ver Figura 14	0,875 ~ 1,250 / 0,025	
Q do PCU	ver Figura 14	0,925 ~ 1,300 / 0,025	
Q da bateria	ver Figura 14	0,85 ~ 1,30 / 0,03	

A procura dos fatores de correção ótimos foi realizada para cada uma das 23 datas, cujas telemetrias foram obtidas. No processo de procura, o fluxograma da Figura 3 foi lançada 400 vezes (sementes) com 500 avaliações (NMAX), totalizando 200.000 avaliações para cada data analisada, utilizando $\tau = 1,5$. A cada semente lançada obtém-se um conjunto de oito fatores multiplicativos que resultou no menor erro quadrático médio dentre as 500 avaliações realizadas. Sendo um método estocástico, tomou-se como o resultado final o valor médio dos cinco conjuntos de fatores de correção (dentre os 400 obtidos) que resultaram nos menores erros quadráticos médios. As Figuras 15, 16 e 17 mostram os resultados.

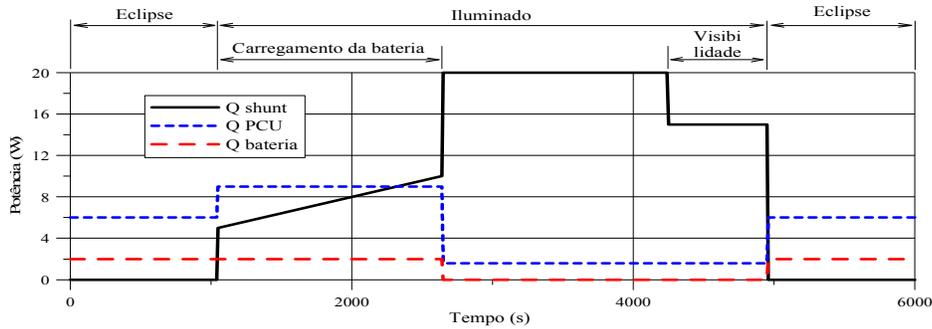


Figura 14. Perfil Original da Dissipação do Shunt, PCU e bateria

A Figura 15 mostra a evolução dos fatores de correção das absorvidades no espectro solar dos revestimentos dos painéis inferior, lateral e superior, assim como as tendências para os dois primeiros. Observa-se, pela linha de tendência, que a absorvidade solar do painel lateral não sofreu alteração significativa enquanto que a do painel inferior sofreu um aumento da ordem de 7% no período analisado (10,5 anos). A grande oscilação na absorvidade do painel superior deve-se principalmente à sua dependência em relação ao ângulo de incidência solar, não considerada no modelo original (ângulo entre o eixo do satélite e a direção dos raios solares, “spin-sol” na Figura 5). Esta dependência torna-se muito forte para ângulos próximos de 90 graus (Sparrow e Cess, 1978). A Figura 18 apresenta os valores obtidos em função do ângulo spin-sol.

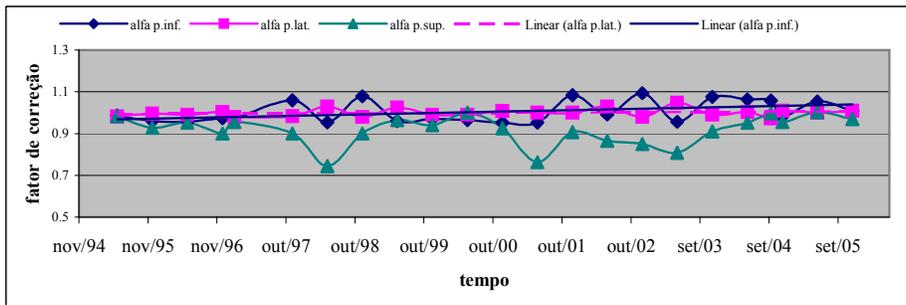


Figura 15. Fatores de Correção para Absortividade Solar dos Painéis Inferior, Lateral e Superior

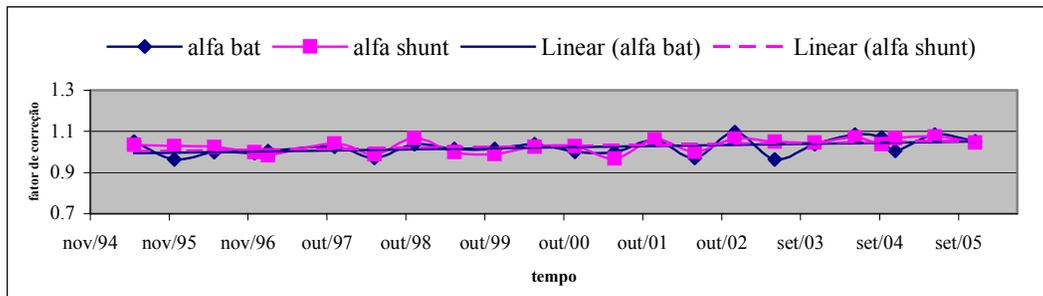


Figura 16. Fatores de Correção para Absortividade Solar dos Radiadores da Bateria e do Shunt

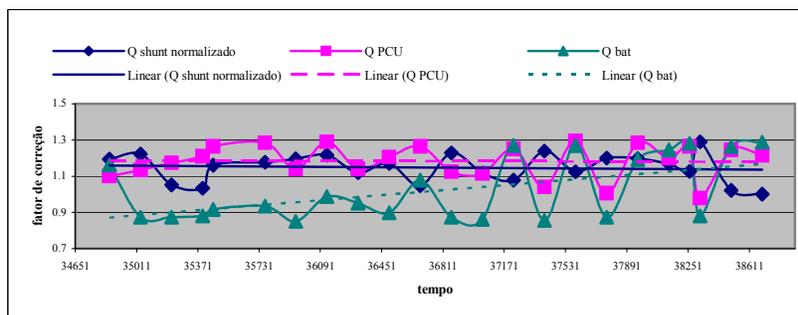


Figura 17. Fatores de Correção para Dissipação Interna do Shunt, PCU e Bateria

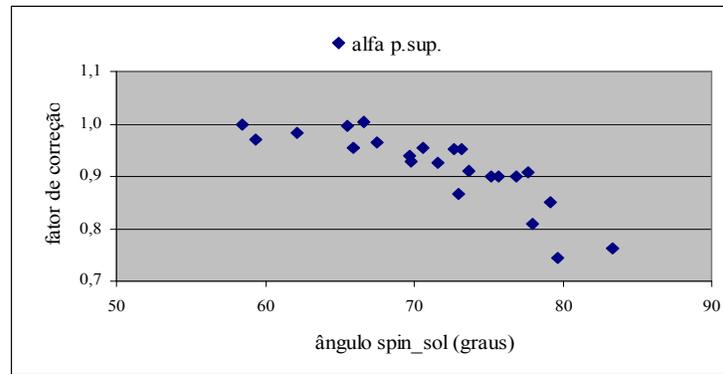


Figura 18. Absortividade solar do painel superior em função do ângulo de incidência

A Figura 16 apresenta a evolução dos fatores de correção das absortividades dos radiadores do shunt e da bateria e as respectivas linhas de tendência. Ambas apresentam um aumento da ordem de 5% no período de 10,5 anos.

Quanto às evoluções das dissipações internas dos equipamentos mostradas na Figura 17, somente a da bateria sofreu variação significativa, que pela linha de tendência, observa-se um aumento da ordem de 35% no período de 10,5 anos. No “shunt”, que é um equipamento que rejeita a energia excedente gerado pelas células solares, a sua dissipação foi normalizada em relação a constante solar, tempo de iluminação e a área projetada do satélite em relação aos raios solares. A constância na dissipação do “shunt” ao longo dos anos significa que os geradores solares mantiveram sua eficiência no período.

5. Conclusões

Investigaram-se as causas do aumento da temperatura do satélite SCD-1 observado entre junho de 1995 a dezembro de 2005, utilizando dados de telemetria enviadas ao longo do período analisado. Estabeleceu-se uma metodologia na qual o modelo matemático, que simula a evolução das temperaturas do satélite em órbita, é acoplado a uma rotina de otimização que corrige alguns parâmetros do modelo, de forma a ajustar as temperaturas teóricas às experimentais. Os parâmetros citados são relacionados às possíveis causas investigadas pelo aumento da temperatura do satélite.

Concluiu-se que o aumento da temperatura foi causado pela degradação de alguns revestimentos externos do satélite e pelo aumento da dissipação interna da bateria em função também da sua degradação. Conclui-se também que as células solares não sofreram degradação perceptível nas suas propriedades “termoópticas” nem no valor da potência gerada.

Durante a análise verificou-se também que as propriedades das células solares são bastante dependentes do ângulo de incidência solar quando esta se aproxima de 90 graus. Esta dependência não foi considerada durante a fase de projeto.

A metodologia proposta permitiu identificação das causas das alterações térmicas do SCD1 mesmo sendo elas fortemente acopladas como por exemplo, a dissipação térmica de um equipamento e a absortividade solar do radiador deste equipamento.

6. Referências

Cluzet, G., Salancon, J.L., Giovannini, R., Amidieu, M. and Moschetti, B., 1989, “The Thermal Control of TDF-1 the First Six Months in Orbit”, 19th Intersociety Conference on Environmental Systems, SAE Technical Paper Series 891523, San Diego, CA.

Beckmann, K., 1983, "Eight Years of In-orbit Experience with the Helios Solar Probe Thermal Control Subsystem", Proceedings of International Symposium of Environmental & Thermal Control Systems for Space Vehicles, ESA SP-200, pp.419-424.

Hayashi, T., Ohnishi, A., Machida, T., Katoh, S., Matsufuji, Y., Mase, I., Okamoto, A., Hasui, T., Fujii, G., 1984, “Thermal Control for Sun Pointing Satellites”, Proceedings of International Symposium on Space Technology and Science, Tokyo, Japan, pp. 627-632.

Kelly, W.H., Reisenweber, J.H., 1988, “Program Overview and In-Orbit Performance Evaluation of the INTELSAT V Spacecraft Thermal Control Subsystem”, AIAA Thermophysics, Plasmadynamic and Lasers Conference, AIAA-88-2690, San Antonio TX.

Rajagopalan, R., Willson, V.J., 1980, “Thermal Performance of Anik-B Satellite in Orbit”, AIAA 15th Thermophysics Conference, AIAA-80-1498, Snomass, CO.

Muraoka, I., Leite, R.M.G., 1994, "Thermal Design of the SCD1 Satellite", 19th International Symposium on Space Technology and Science, Yokohama, Japan.

Ohnishi, A. e Hayashi, T. , 1983, "Measurement of α/ε Ratio by Using a Sun Pointing Satellite Tansei-4", Proceedings of International Symposium of Environmental & Thermal Control Systems for Space Vehicles, ESA SP-200, pp.437-440.

Sousa, F.L., Ramos, F.M., Paglione, P., Girard, R.M., 2003, "New Stochastic Algorithm for Design Optimization", AIAA Journal, Vol. 41, No. 9, pp. 1808-1818.

Silverman, E.M., 1995, "Space Environmental Effects on Spacecraft: LEO Materials Selection Guide" NASA CR4661.

Sparrow E.M. e Cess, R.D. , 1978, "Radiation Heat Transfer", McGraw-Hill.

TITLE: ANALYSIS OF LONG-TERM EVOLUTION OF SCD1 SATELLITE TEMPERATURES

Andreia Fátima Sorice

Technological Institute of Aeronautics (ITA) – Mechanical-Aeronautical Engineering (IEM)

Pr. Marechal Eduardo Gomes, 50 - Vila das Acácias CEP 12228-900 – São José dos Campos – SP – Brazil

e-mail: andreia.sorice@uol.com.br

Issamu Muraoka

National Institute for Space Research – INPE

Av. dos Astronautas, 1.758 - Jd. Granja - CEP: 12227-010 - São José dos Campos – SP – Brazil

e-mail: issamu@dem.inpe.br

Ezio Castejon Garcia

Technological Institute of Aeronautics (ITA) – Mechanical-Aeronautical Engineering (IEM)

e-mail: ezio@ita.br

Abstract

This paper investigates the possible causes of long-term temperature deviation on SCD-1 satellite (Data Collect Satellite) by analyzing the evolution of its thermal behavior along 13 years in orbit. SCD-1 is the first satellite designed and constructed in Brazil. It was launched successfully in 1993, and is still in operation. The thermal control was achieved by passive means using coatings and conductive paths appropriately chosen to keep the satellite temperatures in the specified levels. A mathematical model was developed to simulate the SCD-1 thermal behavior in orbit and it was used as a tool to define all thermal design variables. The temperatures of thirty SCD-1 components have been monitored and recorded in the Satellite Tracking and Control Center since the launching. An analysis done at the beginning of the mission indicated that all temperatures were in the predicted ranges. Along the years the battery, that is the most thermal sensitive equipment, presented a temperature increase reaching its upper limit. A methodology was developed to investigate the causes of this deviation. It is based on an optimization routine that, coupled to the mathematical model, corrects the values of a selected set of the model parameters to adjust the theoretical temperature profiles to the experimental ones. Using this methodology, the SCD-1 temperature data , for a period between 1995 and 2005, were analyzed. The study concluded that the elevation of the satellite temperature was caused by the increase of battery internal heat dissipation and by increase of solar absorptivity of some satellite external coating, both consequence of the long term degradation. The results of this investigation can be useful for the ongoing satellite development, particularly to be aware of the possible causes of the long-term temperature deviation and to consider them more accurately in the design analysis.

Keywords: degradation of thermal-optical properties, satellites thermal design, optimization, SCD-1 Satellite.