



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

**ANÁLISE DE DESMPENHO DE DADOS DE UM RADIADOR DE
GRADE COM RESISTÊNCIAS TUBULARES (CAL-ROD´S) E
RADIÔMETROS EM SIMULAÇÕES DE EXPOSIÇÃO
SOLAR/ECLIPSE DO SATÉLITE**

**RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA
(PIBIC/CNPq/INPE)**

Marco Antônio Barros da Silva Bezerra (ITA, Bolsista PIBIC/CNPq)
E-mail: marco_fisica@yahoo.com.br

Dr. José Sérgio (LIT/INPE, Orientador)
E-mail: jsergio@lit.inpe.br

Julho de 2007

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

CAPÍTULO 2 – HISTÓRICO DO PROCESSO

CAPÍTULO 3 – MÉTODO UTILIZADO

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E ANÁLISES

CAPÍTULO 5 – EMPENHO ATUAL

CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

Desde o início das pesquisas na área espacial, a utilização de satélites, com objetivos que variam desde a coleta de dados de determinadas regiões até a troca instantânea de informação digital, tem sido a principal base ferramental envolvida. Com isso, uma atenção especial no processo de qualificação dos mesmos é necessária. Um dos fatores ao qual se dá grande importância nesse sentido é a simulação térmica, um campo entre muitos trabalhados no Laboratório de Integração e Testes (L.I.T.) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

Com a permanência do satélite em órbita terrestre ou mesmo em trajetória não-orbital, a exposição de suas câmaras e sistemas à irradiação térmica proveniente do Sol é freqüente e não comparável à irradiação térmica observada na superfície da Terra. Com isso, o comportamento dos sistemas diferencia-se da situação usual, o que requer um estudo mais aprofundado dos efeitos dessa exposição.

Para o estudo das novas condições de atuação, ensaios de simulação das condições de operação do satélite em órbita devem ser feitos. Esses ensaios devem simular com grande precisão as condições impostas pelo ambiente espacial, que seriam uniformidade na distribuição de calor e alta taxa de transferência de calor do satélite para o meio espacial.

Com base nisso, foi desenvolvido um processo iterativo para desenvolvimento do projeto. Esse processo consiste na proposta de um modelo que simule com grande acurácia as condições mencionadas, no desenvolvimento de modelo proposto e, finalmente, no teste do modelo desenvolvido.

Foi nessa área que se desenvolveu o estudo referente à bolsa de iniciação científica. Em cada um desses processos houve subtópicos, dentre os quais está a qualificação do processo, baseado no uso de ferramentas matemáticas de Cálculo e Teoria dos Erros.

CAPÍTULO 2 – HISTÓRICO DO PROCESSO

O estudo do comportamento das câmaras e sistemas do satélite frente à sua exposição às condições espaciais é um dos pontos principais do desenvolvimento do mesmo. Para isso, itens determinados devem ser satisfeitos:

1. Uniformidade de distribuição de calor nas câmaras do satélite;

O satélite, uma vez em órbita terrestre, estará a uma grande distância média do Sol, de forma que suas dimensões podem ser desprezadas, sendo considerado como corpo pontual. Dessa forma, a irradiação térmica sobre o satélite pode ser considerada constante.

Os testes desenvolvidos devem simular, por conseguinte, uma exposição uniforme de irradiação térmica sobre as placas e câmaras testadas.

A irradiação térmica é também conhecida como incidência de carga térmica.

2. Alta taxa de transferência de calor.

Em órbita, o satélite não só deve passar por períodos de incidência constante de cargas térmicas, como também por períodos de eclipse. Entende-se por eclipse a situação em que a Terra está entre o Sol e o satélite.

Nessas condições, o satélite está com um lado voltado para a Terra, com temperatura média da ordem de 250K, e com outro lado voltado para o espaço aberto, considerado um sorvedouro térmico a 4K.

CAPÍTULO 3 – MÉTODO UTILIZADO

Para satisfazer essas condições, foi escolhido o modelo que usa uma caixa que contém uma rede de grades de aquecedores tubulares. Com isso, consegue-se uma fonte de incidência térmica para as simulações. A terminologia “radiadores tubulares de grade” traduz-se para o inglês como “infrared arrays” e, por isso recebem a abreviação IRAs. Os radiadores utilizados foram os CAL-RODs, que são tubos de emissão infravermelha de boa eficiência e baixo custo. A Figura 1 abaixo mostra um CAL-ROD.



Figura 1 – CAL-ROD (barra preta) comparado com uma lapseira.

Quanto à uniformidade de distribuição da radiação térmica, adotou-se a disposição de CAL-RODs postos tanto paralelamente quanto perpendicularmente em vez de apenas paralelamente, pois essa última cria zonas de não-uniformidade lineares, enquanto as criadas pela primeira criam zonas pontuais de diferença de incidência de carga térmica. As Ilustrações 1 e 2 abaixo mostram uma modelagem computacional do comportamento de IRAs com radiadores dispostos apenas paralelamente e dispostos paralela e perpendicularmente, respectivamente.

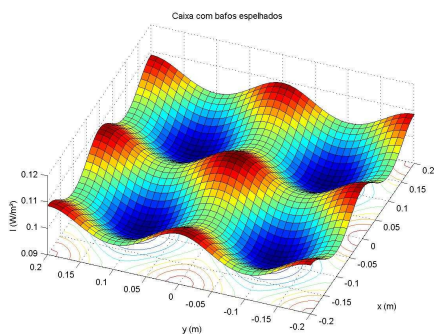


Ilustração 1 – Modelagem da computacional da distribuição térmica por radiadores dispostos paralelamente.

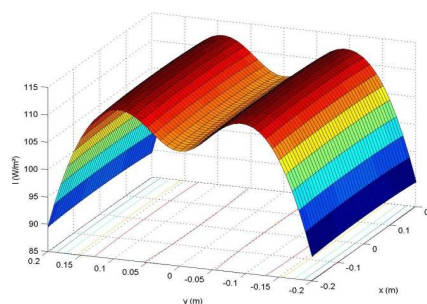


Ilustração 2 – Modelagem da distribuição térmica por radiadores dispostos paralelamente e perpendicularmente.

Para a transferência de calor, o processo descrito é compatível com as necessidades da simulação uma vez que promovem um menor bloqueio entre a superfície da câmara estudada e parede fria da câmara de vácuo-térmico, promovendo uma maior transferência de calor no período de simulação de eclipse do satélite.

Estabelecido o método pelo qual se deve distribuir a grade de radiômetros e o tipo de radiômetro que deve ser utilizado, a construção da caixa fica bem definida. A Figura 2 abaixo mostra uma caixa com três radiômetros paralelos e três perpendiculares.



Figura 2 – Exemplo de caixa de simulação de cargas térmicas.

Para que houvesse um controle do fluxo de radiação incidente na caixa, bem como o que a emitido para a vizinhança da caixa, foram usados 25 radiômetros uniformemente distribuídos dentro da caixa e 11 radiômetros externos com a função de monitorar o fluxo emitido para a vizinhança. A Figura 3 mostra um IRA dentro de uma câmara de vácuo-térmico e pronto para teste.



Figura 3 – IRA com radiômetros internos e externos.

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E ANÁLISES

O processo de acompanhamento foi feito por um controle de fontes programáveis por computador (uma por cada radiômetro) e um sistema de aquisição de dados para a leitura da potência aplicada e dos fluxos de radiação obtidos. A Figura 4 ilustra uma foto dos sistemas de controle e aquisição de dados de potência e tensão utilizados nos testes.



Figura 4 – Sistema de controle e aquisição de dados dos testes.

Como resultado, obteve-se uma uniformidade de 95,2% com relação à incidência de cargas térmicas sobre os radiômetros espalhados nas placas. Isso enquadra os testes e métodos utilizados pelo L.I.T. dentro dos padrões exigidos pelo programa CBERS (China-Brazil Earth-Resources Satellite), que é de 95% de uniformidade.

As previsões feitas também foram condizentes com o esperado, uma vez que as arestas das caixas foram os locais mais críticos no conceito de uniformidade de cargas térmicas distribuídas. Isso se deveu basicamente pelo fato de a concentração de radiômetros nesses locais é menor que no restante da caixa, sofrendo, então, menor incidência de cargas térmicas.

CAPÍTULO 5 – EMPENHO ATUAL

O empenho atual visa a incerteza de calibração dos radiômetros, explicada a seguir. Como foi mencionado, os dados de uniformidade de distribuição de cargas térmicas nas placas são medidos diretamente pelos radiômetros, sendo estes os responsáveis pela certificação do processo utilizado.

Com isso, também um método de análise da confiabilidade das medidas do radiômetro deve ser utilizado. Essa medida é chamada “incerteza de calibração do radiômetro” e, como explicitado, reflete a certificação da qualidade do processo utilizado no laboratório. Para uma análise desse nível são usadas ferramentas matemáticas de Cálculo e Teoria dos Erros da Estatística. A seguir entra-se em detalhes do processo de análise de incertezas realizado.

Os testes e aquisições de dados compõem-se de períodos para os quais há estabilidade dos dados. Tal período é chamado de fase. A partir de então, é feito o estudo dos dados adquiridos pelos radiômetros. A expressão do calor absorvido em cada fase é dada por:

$$Q_{abs} = \frac{Pot}{S} = \frac{U.I}{\pi.L^2/4} = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{UI}{L^2} \quad (1)$$

$$\text{em que } \begin{cases} U = \text{tensão no sistema} \\ I = \text{corrente no sistema} \\ L = \text{diâmetro do radiômetro} \end{cases}$$

Para a incerteza $s_{Q_{abs}}$ do calor absorvido em função das incertezas da tensão, s_U , da corrente, s_I e do diâmetro do radiômetro, s_L , tem-se:

$$\begin{aligned} s_{Q_{abs}} &= \left[\left(\frac{\partial Q_{abs}}{\partial U} \cdot s_U \right)^2 + \left(\frac{\partial Q_{abs}}{\partial I} \cdot s_I \right)^2 + \left(\frac{\partial Q_{abs}}{\partial L} \cdot s_L \right)^2 \right]^{1/2} = \\ &= \frac{4}{\pi} \cdot \left[\left(\frac{I}{L^2} \cdot s_U \right)^2 + \left(\frac{U}{L^2} \cdot s_I \right)^2 + \left((-2) \frac{UI}{L^3} \cdot s_L \right)^2 \right]^{1/2} \Rightarrow \\ \Rightarrow s_{Q_{abs}} &= \frac{4}{\pi L^2} \cdot \left[(I \cdot s_U)^2 + (U \cdot s_I)^2 + \left(2 \frac{UI}{L} \cdot s_L \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2) \end{aligned}$$

A expressão do calor residual em cada fase é dada por:

$$Q_{res} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_s^4 + G_2 \cdot \sigma \cdot (T_s^4 - T_c^4) + G_3 \cdot (T_s - T_c) + G_4 \cdot \frac{(T_{s(n)} - T_{s(n-1)})}{t_{(n)} - t_{(n-1)}} \quad (3)$$

em que

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon = \text{radiometer black surface emissivity} \\ \sigma = \text{constante de Stefan-Boltzmann} \left(\frac{W}{m^2} \cdot K^4 \right) \\ G_2 = \text{coeficiente de irradiação corpo-sensor do radiômetro} \left(K^{-3} \right) \\ G_3 = \text{coeficiente de condução corpo-sensor do radiômetro} \left(\frac{W}{m^2} \cdot K \right) \\ T_s = \text{temperatura do sensor} \\ T_{s(i)} = \text{temperatura do sensor na referência } i \\ T_c = \text{temperatura do corpo} \\ t_{(i)} = \text{tempo na referência } i \end{array} \right.$$

Para o regime estacionário em cada fase,

$$Q_{res} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_s^4 + G_2 \cdot \sigma \cdot (T_s^4 - T_c^4) + G_3 \cdot (T_s - T_c) \quad (4)$$

Para a incerteza $s_{Q_{res}}$ do calor residual, tem-se

$$\begin{aligned} s_{Q_{res}} &= \left[\left(\frac{\partial Q_{res}}{\partial T_s} \cdot s_{T_s} \right)^2 + \left(\frac{\partial Q_{res}}{\partial T_c} \cdot s_{T_c} \right)^2 \right]^{1/2} \Rightarrow \\ \Rightarrow s_{Q_{res}} &= \left\{ \left[((4 \cdot \varepsilon \cdot \sigma + G_2 \cdot \sigma) T_s^3 + G_3) \cdot s_{T_s} \right]^2 + [G_3 \cdot s_{T_c}]^2 \right\}^{1/2} \quad (5) \end{aligned}$$

sendo s_{T_s} e s_{T_c} as incertezas de temperatura do sensor e do corpo respectivamente.

Deve-se ter, em cada fase,

$$Q_{abs} + Q_{res} = 0.$$

Logo, a calibração tem incerteza

$$s_{cal} = [s_{Q_{abs}}^2 + s_{Q_{res}}^2]^{1/2},$$

em que $s_{Q_{abs}}$ e $s_{Q_{res}}$ são as incertezas dos valores absorvido e residual.

De (2) e (5) tem-se:

$$s_{cal} = \left\{ \frac{16}{\pi^2 L^4} \cdot \left[(I \cdot s_U)^2 + (U \cdot s_I)^2 + \left(2 \frac{UI}{L} \cdot s_L \right)^2 \right] + \left[((4 \cdot \epsilon \cdot \sigma + G_2 \cdot \sigma) T_s^3 + G_3) \cdot s_{T_s} \right]^2 + [G_3 \cdot s_{T_c}]^2 \right\}^{1/2}$$

CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

O desenvolvimento de métodos de simulação dos componentes do satélite foi bem sucedido para a simulação de câmaras ou placas de formato quadrado. Uma uniformidade incidência de carga térmica de 95,2% foi obtida, o que enquadra o processo adotado no L.I.T. dentro dos padrões do projeto CBERS, que adota padrão de uniformidade de 95%.

Outro ponto importante foi que as previsões de zonas críticas (de maior diferença de uniformidade de incidência térmica) foram confirmadas: as arestas das caixas. Como previsto, a menor concentração de CAL-RODs nas proximidades de cada uma dessas quatro regiões fez com que nelas houvesse uma menor incidência de cargas térmicas.

O empenho atual de busca pela incerteza de calibração dos radiômetros tem grande importância uma vez que as incertezas de medições medem os intervalos de confiança das medidas realizadas e dos resultados obtidos, podendo também servir de base para localização de pontos dos experimentos em que se deve dar mais atenção a erros aleatórios, influenciando diretamente nas decisões de métodos de medição futuros.

Nas condições de métodos de aplicações de cargas térmicas em placas quadradas, o processo está basicamente concluído. No entanto, há vários tipos de formatos de placas e câmaras no satélite. Para cada uma delas, há um método melhor de simulação de incidência térmica. Uniformidades maiores do que 95,2% podem ser, dessa forma, obtidos. Propostas já existentes envolvem o uso de radiadores de grade de formatos diferenciados, como elípticos e retangulares, dependendo do formato das respectivas placas.

Com essa nova proposta de um modelo criada, desenvolve-se o modelo e testa-o, assim como foi feito com o modelo anterior, descrito no presente relatório, e seguem-se novas análises de desempenho. Assim, o método iterativo de desenvolvimento do projeto é seguido.