



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

CONSTRUÇÃO E QUALIFICAÇÃO DO MODELO DE APLICAÇÃO DE UM RADIADOR DE GRADE COM RESISTÊNCIAS TUBULARES (CAL-ROD´S)

**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

ORIENTADORES

José Sérgio de Almeida (LIT/INPE)
Dr. Dênio Lemos Panissi (LIT/INPE)

COLABORADORES

Dr. Márcio Bueno dos Santos (LIT/INPE)
Dr. Ezio Castejon Garcia (LIT/INPE)

Julho de 2009

Sumário

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	4
CAPÍTULO 2 – HISTÓRICO DO PROCESSO	4
CAPÍTULO 3 – RESULTADOS E ANÁLISES	8
CAPÍTULO 4 – CONCLUSÕES	14
ANEXO I - PISO FRIO	15
ANEXO II - ANÁLISE DE INCERTEZAS.....	16
ANEXO III - GRÁFICOS DE CONVERGÊNCIA DOS TESTES ESTUDADOS.....	19

Índice de figuras

Figura 1 - Modelagem computacional da distribuição térmica por radiadores dispostos paralelamente	5
Figura 2 - Modelagem da distribuição térmica por radiadores dispostos paralelamente e perpendicularmente.....	5
Figura 3 - Exemplo de caixa de simulação de cargas térmicas.....	5
Figura 4 - Ampliação das curvas de desempenho da média dos radiômetros.....	6
Figura 5 - Ilustração de uma câmara imagiadora de satélite.....	6
Figura 6 - Modelo estrutural de uma câmara imagiadora de satélite	7
Figura 7 - Desempenho do teste – corrente elétrica.....	8
Figura 8 - Desempenho do teste – tensão	8
Figura 9 - Desempenho do teste – potência	9
Figura 10 - Incerteza do teste – corrente elétrica. Problemas nas 14ª e 15ª fases	9
Figura 11 - Incerteza do teste – tensão. Dispositivo 7º apresentou inconsistências.	10
Figura 12 - Incerteza do teste – potência.....	10
Figura 13 - Modelo de placa imagiadoras pronta para teste de calibração dos radiômetros.....	11
Figura 14 - Modelo dos IRAs com baffle preparados.....	12
Figura 15 - Detalhe da fixação dos CAL-RODs no suporte.....	12
Figura 16 - Detalhe do tampão de alumínio usado para controle de dispersão de calor	13
Figura 17 - Foto dos IRAs prontos para teste com os radiômetros.....	13

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 câmeras e subsistemas à irradiação térmica proveniente da Terra é freqüente e não comparável à irradiação térmica observada na superfície deste planeta. Com isso, o comportamento dos sistemas diferencia-se da situação usual, o que requer um estudo mais aprofundado dos efeitos dessa exposição. Com a trajetória orbital de um satélite de sensoriamento remoto, por exemplo, a exposição das suas câmeras imagiadoras à radiação térmica proveniente da superfície da Terra, tanto na condição de radiação emitida como de albedo, deve ser simulada com precisão, além das trocas de calor com o espaço, na radiação térmica provinda do Sol, e com o próprio interior do satélite.

Ensaaios satisfatórios devem simular com grande precisão e uniformidade a distribuição de calor e alta taxa de transferência de calor do satélite para o meio espacial. As duas primeiras são o objetivo principal deste trabalho de iniciação científica.

CAPÍTULO 2 – HISTÓRICO DO PROCESSO

O comportamento das câmeras e sistemas do satélite sob influência direta das condições espaciais é um dos principais aspectos que devem ser abordados durante o projeto dos mesmos. Essas condições têm duas características principais:

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, portanto, uma exposição uniforme de irradiação térmica sobre as placas e câmaras testadas. Tal irradiação será também chamada de 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 – 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 288K, e com outro lado voltado para o espaço aberto, considerado um sorvedouro térmico a 4K.

Para satisfazer essas condições, foi escolhido o modelo de radiador de grade de resistências tubulares, que usa uma caixa contendo uma rede de aquecedores tubulares. São os “radiadores tubulares de grade”. 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.

Quanto à exigência de 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 primeiras criam zonas pontuais de diferença de incidência de carga térmica. As Figuras 1 e 2 abaixo mostram, respectivamente, uma modelagem computacional do comportamento de IRAs

com radiadores dispostos apenas paralelamente e dispostos paralela e perpendicularmente, respectivamente.

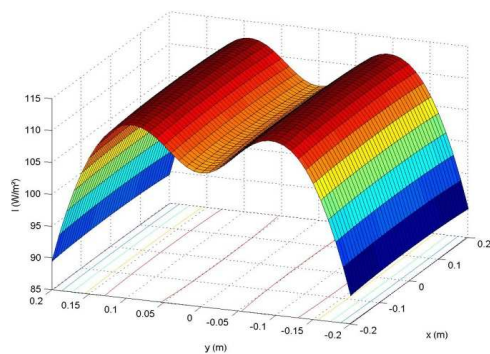


Figura 1 - Modelagem computacional da distribuição térmica por radiadores dispostos paralelamente

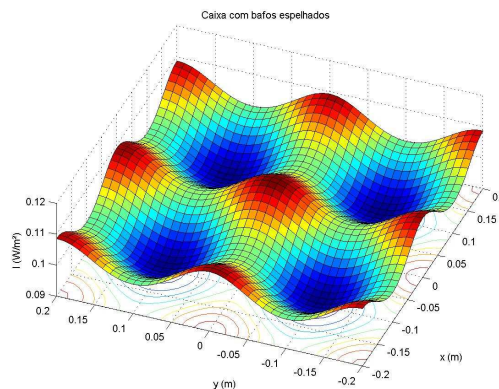


Figura 2 - Modelagem da distribuição térmica por radiadores dispostos paralelamente e perpendicularmente.

Para a exigência de transferência de calor, a distribuição escolhida é compatível com as necessidades da simulação uma vez que promovem um menor bloqueio entre a superfície da câmara estudada e a 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 3 abaixo mostra uma caixa (baffle) com três radiadores paralelos e três perpendiculares.



Figura 3 - Exemplo de caixa de simulação de cargas térmicas.

Para que houvesse um controle do fluxo de radiação incidente na caixa, bem como o que é 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. O processo de acompanhamento foi feito por um controle de fontes programáveis por computador (uma para cada radiômetro) e um sistema de aquisição de dados para a leitura da potência aplicada e dos fluxos de radiação obtidos.

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 deu basicamente pelo fato de a concentração de radiômetros nesses locais ser menor que no restante da caixa, sofrendo, então, menor incidência de cargas térmicas.

Outra parte do projeto incluiu a incerteza de calibração dos radiômetros. Como foi mencionado, os dados de uniformidade de distribuição de cargas térmicas na placa são medidos diretamente pelos radiômetros. A chamada “incerteza de calibração do radiômetro” reflete a certificação da qualidade do processo utilizado no laboratório. Veja a Figura 4 abaixo.

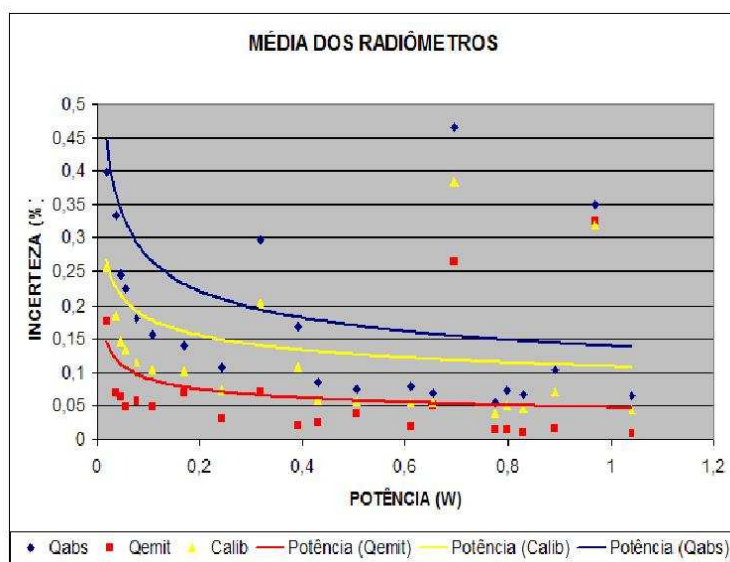


Figura 4 - Ampliação das curvas de desempenho da média dos radiômetros

Para uma análise desse nível são usadas ferramentas matemáticas de Cálculo e Teoria dos Erros da Estatística. Com base nesses métodos expostos anteriormente, foi calculada a incerteza de calibração média dos trinta e seis radiômetros a partir do banco de dados do conjunto de testes. O resultado obtido foi de uma incerteza média de 0,3%. Aplicando-se esse valor de incerteza no valor de uniformidade de incidência de cargas térmicas, vê-se que tal uniformidade fica descrita por $(95,2 \pm 0,3)\%$, que 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.

Passada a fase de estudo de radiadores de grade dispostos em câmaras de formato quadrado, entrou-se na etapa de estudo em câmaras de formato oval/elíptico, que representa mais significativamente a maioria das câmaras do satélite, principalmente as imagiadoras. As Figuras 5 e 6 abaixo ilustram, respectivamente, o desenho esquemático de uma câmara imagiadora de formato elíptico e o modelo estrutural respectivo.

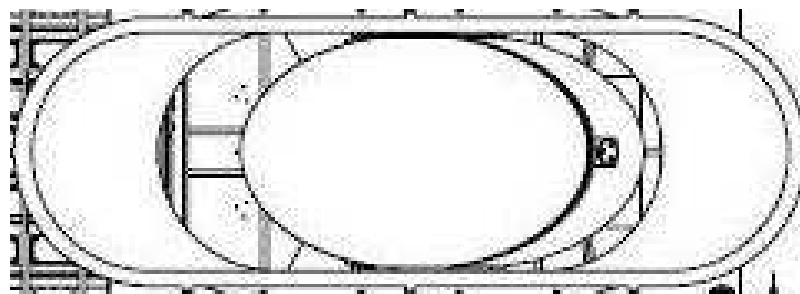


Figura 5 - Ilustração de uma câmara imagiadora de satélite



Figura 6 - Modelo estrutural de uma câmara imagiadora de satélite

Como se pode observar, essa simulação de incidência de cargas térmicas deve levar em conta os efeitos que os fluxos de calor eminentes dos radiadores de grades terão na uniformidade nesse tipo de região. Para que os efeitos desse tipo de perda de calor fossem minimizados, houve a necessidade de um projeto que utilize os radiadores de grade disponíveis da forma mais efetiva possível, sempre levando em consideração as dimensões da câmara.

Para isso foi feita a análise dimensional, qualitativa e de lay-out, dos cal-rods na placa. Logo depois de concluída essa parte, foi feita a análise de lay-out dos radiômetros a serem utilizados. Feito esse estudo, tem-se conhecimento do que convém às disposições dos cal-rods e dos radiômetros. Ficou pronto, assim, o projeto a ser inserido no programa de análise térmica do LIT e as especificações da construção do baffle, suporte do IRA. Essas duas etapas, na realidade, ocorreram em paralelo para poupar tempo do projeto. Para o teste do IRA quanto à uniformidade, entretanto, fez-se novamente necessária uma análise de qualificação dos radiômetros. Seguem os resultados encontrados até o momento.

CAPÍTULO 3 – RESULTADOS E ANÁLISES

Como no trabalho realizado anteriormente, o teste de calibração dos radiômetros a serem utilizados na câmara compôs-se de 36 dispositivos. Desta vez contou-se com um novo sistema de aquisição de dados. Os testes ocorreram em 19 fases de convergência e os resultados prévios seguem discutidos nos gráficos abaixo.

A Figura 7 mostra o gráfico das 6 fontes de corrente (com valores dados em Ampères) para cada uma das fases. Observe que cada uma das fontes comporta-se semelhantemente no que confere às etapas de crescimento e queda do valor de corrente elétrica no circuito.

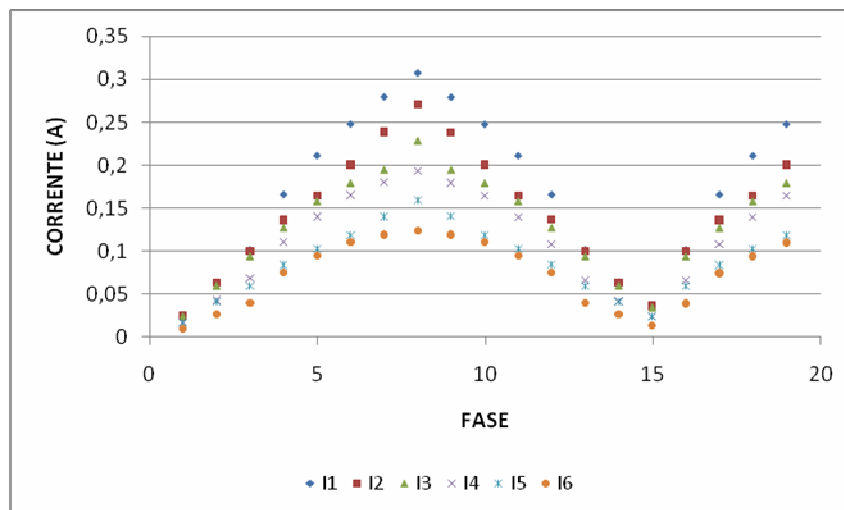


Figura 7 - Desempenho do teste – corrente elétrica

A Figura 8 mostra o gráfico de tensão – em Volts – para os radiômetros de 31 a 36, em cada uma das fases. Observe que também cada um dos radiômetros respeita as sintonias de crescimento e queda do valor de tensão elétrica no circuito.

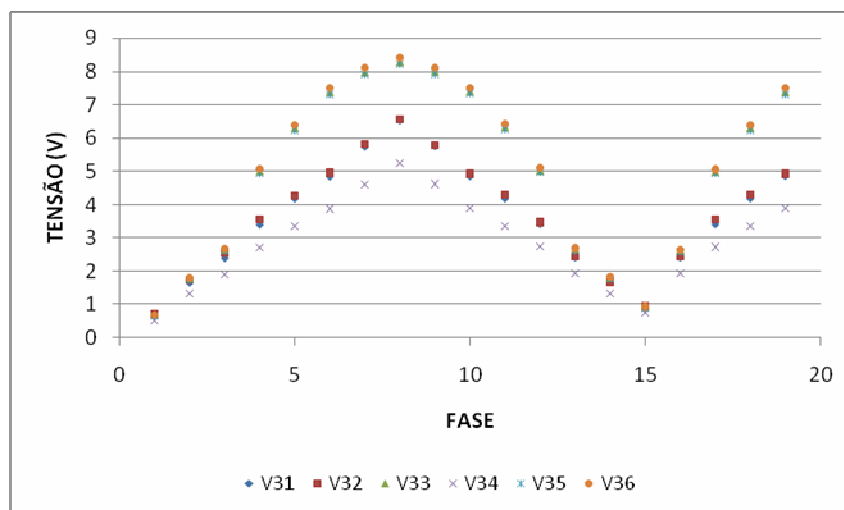


Figura 8 - Desempenho do teste – tensão

A Figura 9 mostra o gráfico de potência – em Watts – para os radiômetros de 31 a 36, em cada uma das fases. Eles refletem o comportamento médio dos radiômetros, dentro do esperado.

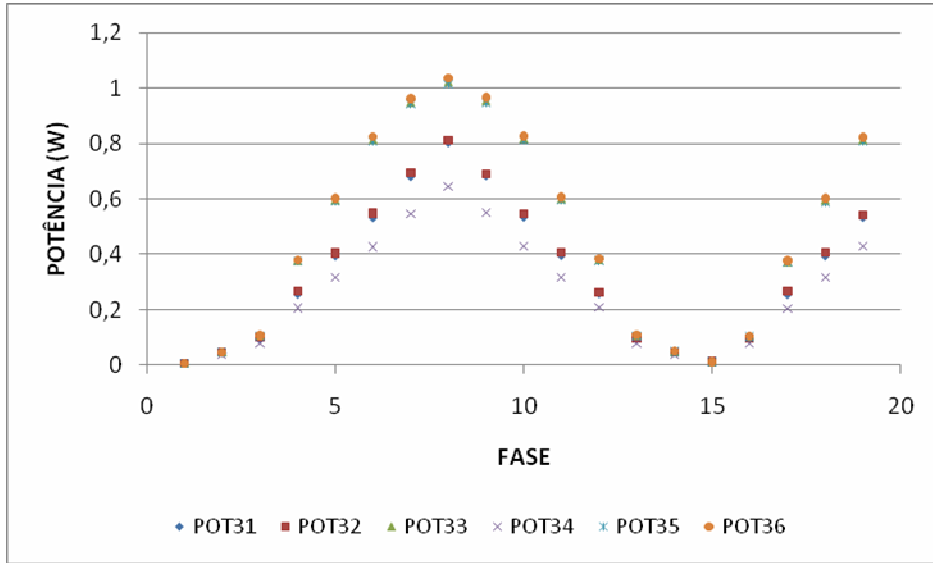


Figura 9 - Desempenho do teste – potência

A partir das medições de corrente durante a convergência obtém-se as respectivas incertezas em cada uma das fases. Os resultados aparecem explícitos no gráfico de superfície da Figura 10 abaixo. Fica evidente que as fases de números 14 e 15 não responderam satisfatoriamente ao teste. Isso é motivo para análises nas próximas etapas do projeto. A saber, a média foi de 0,09% de incerteza.

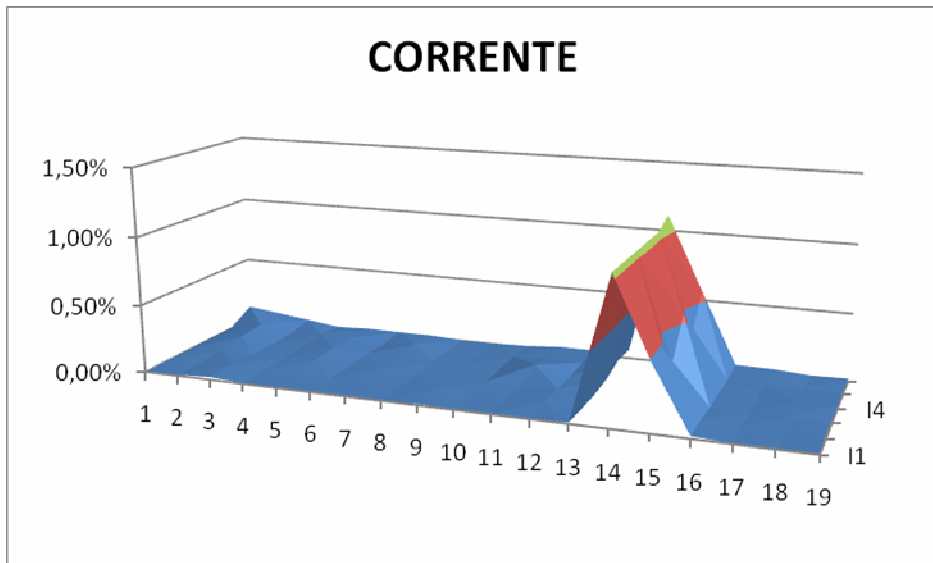


Figura 10 - Incerteza do teste – corrente elétrica. Problemas nas 14ª e 15ª fases

Também a partir das medições feitas durante a convergência obtêm-se as respectivas incertezas, em cada uma das fases, para as tensões incidentes no circuito do teste. Os resultados aparecem explícitos no gráfico de superfície da Figura 11 abaixo. Fica evidente que o dispositivo de número 7 não respondeu satisfatoriamente ao teste. Isso também é motivo para análises nas próximas etapas do projeto. A saber, a média foi de 0,15% de incerteza.

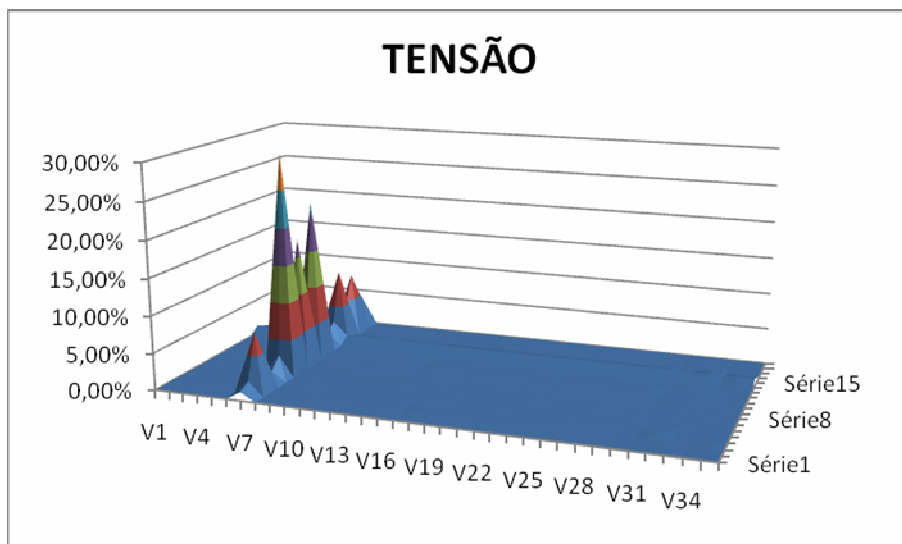


Figura 11 - Incerteza do teste – tensão. Dispositivo 7º apresentou inconsistências.

Semelhantemente, a partir das incertezas relativas às medições de corrente e tensão – adquiridas por meio das fontes programáveis – obtêm-se as incertezas das potências incidentes, em cada uma das fases. Os resultados aparecem explícitos no gráfico de superfície da Figura 12 abaixo. Fica evidente o problema devido aos dados providos tanto das fases 14 e 15, como também do dispositivo de número 7. A saber, a média foi de 0,3% de incerteza.

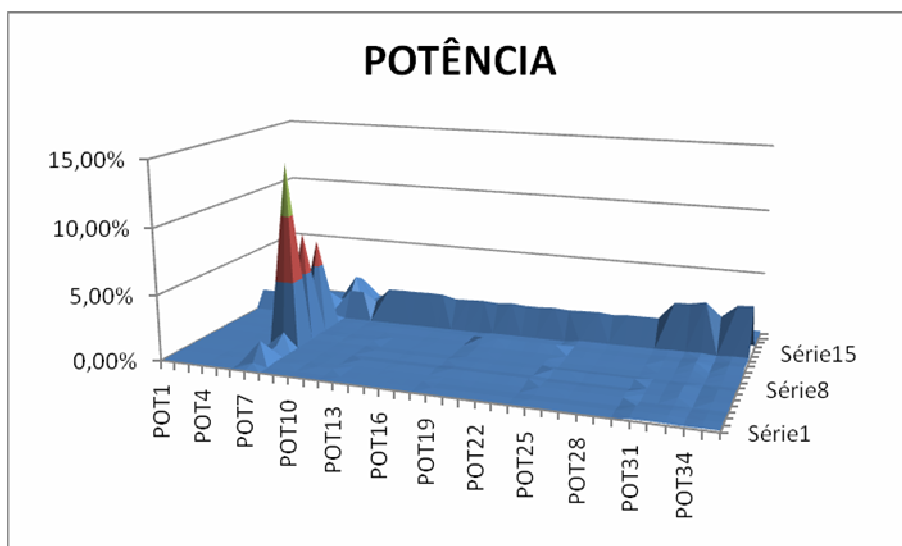


Figura 12 - Incerteza do teste – potência

Devido aos resultados obtidos, uma verificação dos sistemas de aquisição 14 e 15, bem como do radiômetro de número 7, foi realizada e constatou-se que houve falha no processo de fixação dos termopares do mesmo, de modo que esses sistemas, bem como o radiômetro, apresentaram termopares abertos. Tal verificação resultou na exclusão dos valores referentes ao sistema 14, ao sistema 15 e ao radiômetro 7.

Isso confirma a suspeita estabelecida durante a verificação de dados e serve de indício da qualidade do processo de calibração dos radiômetros feita, uma vez que os radiômetros e sistemas além desses mencionados mostraram resultados bastante satisfatórios no que diz respeito ao valor da incerteza de calibração, tanto para os valores de corrente como também de tensão e de potência.

Também foi dado auxílio no layout de distribuição de termopares para outras simulações, feitas na câmara de vácuo de dimensão 3mx3m do laboratório térmico do LIT, sendo utilizado um piso com propriedades de resfriamento. Tal aparato foi adquirido pelo laboratório com uma placa justaposta a tubulações para entrada e saída de nitrogênio líquido. A imagem do piso frio segue ilustrada n Anexo I.

Para os testes de calibração dos radiômetros e dos IRAs referente à nova disposição de câmara imagiadora foram apresentadas algumas possibilidades de layout tanto para os radiômetros na placa modelo quanto para os IRAs. Tais possibilidades de disposições ou layouts foram submetidas a simulações térmicas no software SINDA, aplicativo do programa AUTOCAD, para verificação do melhor tipo de uniformidade.

Como já mencionado no presente relatório, tal procedimento de busca pela uniformidade é parâmetro importante na busca por uma simulação otimizada da incidência de carga térmica na placa do satélite - neste caso, uma placa elíptica, de uma câmara imagiadora.

Após a simulação térmica do programa SINDA foi feito o posicionamento dos radiômetros na placa modelo de acordo com o melhor layout encontrado. A Figura 13 mostra o modelo de placa imagiadora pronto para teste e incluindo o layout escolhido dos radiômetros.



Figura 13 - Modelo de placa imagiadoras pronta para teste de calibração dos radiômetros

Nota-se que a placa modelo encontra-se coberta por uma camada amarelada. Tal camada é uma superfície fina de resistências elétricas dispostas uniformemente e com espaçamento curto. São chamadas de skin-heaters e têm por objetivo a distribuição uniforme de calor sobre os radiômetros da placa.

Também após a simulação no SINDA, a distribuição ótima de CAL-RODs foi escolhida levando-se em conta as resistências tubulares presentes no laboratório. A Figura 14 mostra o modelo de IRAs, já com o baffle da placa modelo, preparado para teste.



Figura 14 - Modelo dos IRAs com baffle preparados.

Vale notar que, nesse novo modelo, foi adicionado um suporte retangular para os IRAs em vez de ser feita a adaptação dos mesmos no baffle, como foi feito na edição anterior do teste de calibração do sistema. Tal decisão foi tomada devido ao fato de a usinagem do baffle com os furos referentes aos CAL-RODs ser mais difícil do que o da edição anterior visto que o baffle tem dimensionamento fixo - e igual ao da placa modelo, com formato elíptico - e que os CAL-RODs presentes no laboratório terem tamanhos não compatíveis com essas dimensões.

Com a necessidade de construção de um suporte surgem outros pontos importantes: a fixação dos CAL-RODs nesse suporte, o método de isolamento entre esses dois e o isolamento térmico da região dos CAL-RODs que não se encontram diretamente sobre o baffle. A Figura 15 mostra uma vista detalhada dessa fixação, do isolamento entre suporte e IRAs e o isolamento térmico das partes dos CAL-RODs externas ao baffle.



Figura 15 - Detalhe da fixação dos CAL-RODs no suporte.

A fixação dos radiadores de grade no suporte foi feita mediante a usinagem de furos circulares de diâmetros semelhantes aos dos radiadores a serem suportados. Basicamente, esse é o mesmo processo feito na edição anterior, com a diferença que o baffle e o suporte são estruturas diferentes.

Com relação ao isolamento entre o suporte e cada radiador de grade, foram usados dois pinos de pequeno diâmetro fixados ao suporte. Dessa forma, a área de contato entre os radiadores

e o pino é bastante reduzida, o que reduz os efeitos de transferência de carga térmica para o suporte, já que não é de interesse que o suporte sofra aquecimento e, assim, sirva ele mesmo como fonte de carga térmica não controlada durante os ensaios de calibração.

Para a área dos radiadores direcionada à área externa dos baffles apenas, haveria incidência térmica fora da região do baffle, mas que serviria para aquecer o suporte do modelo, incidindo no mesmo problema discutido no parágrafo anterior, o que não é de interesse para o teste. Surgiu, então, a necessidade de isolamento térmico da região de cada CAL-ROD entre o suporte e o baffle. Para tanto, foi usado um tubo de alumínio, material cuja emissividade térmica é bastante baixa, como isolante. A Figura 16 mostra detalhes do tampão de alumínio utilizado controle de dispersão de calor dos radiômetros durante o ensaio dos IRAs.



Figura 16 - Detalhe do tampão de alumínio usado para controle de dispersão de calor

A Figura 17 mostra uma foto dos IRAs juntamente com a placa modelo prontos para teste. A visualização dos dois juntos é importante para verificação da simetria esperada pelo layout inicial do sistema.

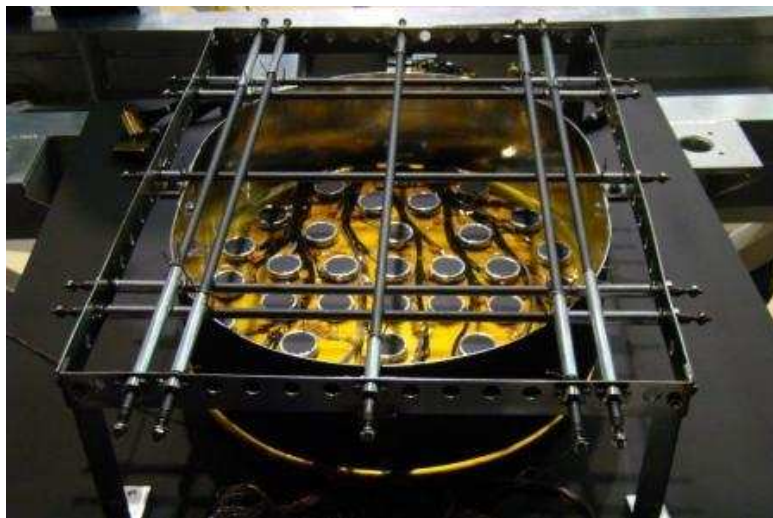


Figura 17 - Foto dos IRAs prontos para teste com os radiômetros.

CAPÍTULO 4 – CONCLUSÕES

Uma incerteza total de 0,3% no intervalo de potência de carga térmica, valor encontrado na análise feita por teoria de incertezas, pode ser considerada satisfatória. Os cálculos da incerteza média de calibração dos radiômetros foram revistos - uma vez que apenas um dos dispositivos destacou-se da média - objetivando enquadrar o processo adotado dentro dos padrões internacionais e encontrou-se uma falha no processo de fixação dos termopares. Equívoco no uso dos dados pode ter sido a causa do ocorrido.

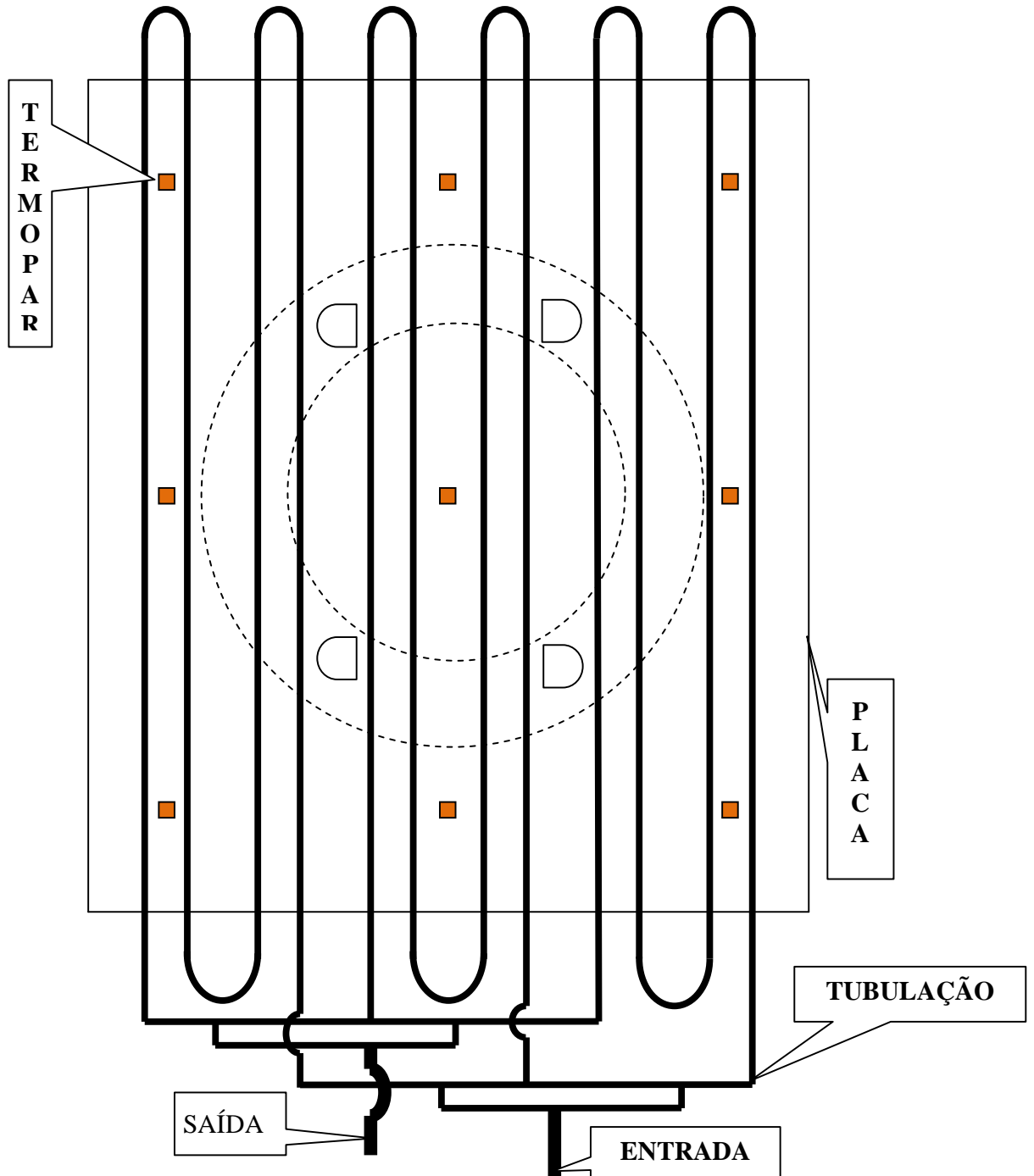
Outro ponto importante mostrado no relatório foram os patamares de crescimento e queda para tensão, corrente e, conseqüentemente, potência foram bem estabelecidos em seus gráficos.

Faltam apenas as análises de fluxo de calor emitido e absorvido para fechamento da calibração, dando fechamento à qualificação do modelo de radiadores de grade com resistências tubulares em placas de formato elíptico. Vale notar, no entanto, que se pode esperar um valor de qualificação não inferior ao obtido na versão anterior do trabalho - com câmaras de formato retangular - uma vez que os sistemas utilizados foram melhores do que este último em todos os aspectos, o que inclui os resultados da simulação térmica feitos no SINDA.

O trabalho apresentado neste relatório refere-se aos meses de setembro/2008 a junho/2009. Agradecimentos devidos ao CNPq, que forneceu suporte ao trabalho por meio da Bolsa de Iniciação Científica, ao LIT/INPE, em cujos laboratórios foi possível agregar grande quantidade de trabalho e conhecimento científico, e aos professores e doutores envolvidos no projeto, especialmente aos orientadores, José Sérgio de Almeida e Dênio Lemos Panissi, que orientaram o trabalho, e aos Doutores Márcio Bueno dos Santos e Ezio Castejon Garcia, que sempre estiveram bem dispostos a esclarecer procedimentos e retirar dúvidas do trabalho, dando motivação e passando sua experiência.

MARCO ANTÔNIO BARROS DA SILVA BEZERRA

ANEXO I - PISO FRIO



ANEXO II - ANÁLISE DE INCERTEZAS

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 fluxo de calor absorvido (Q_{abs}) em cada fase é dada por:

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

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 fluxo de 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 fluxo de calor residual em cada fase é dada por:

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

Deve-se ter, em cada fase,

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

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

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 fluxo de calor residual, tem-se

$$s_{Q_{res}} = \left[\left(\frac{\partial Q_{res}}{\partial T_s} \cdot s_{T_s} \right)^2 + \left(\frac{\partial Q_{res}}{\partial T_c} \cdot s_{T_c} \right)^2 \right]^{1/2} \Rightarrow$$

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

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

Logo, a calibração tem incerteza

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

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

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

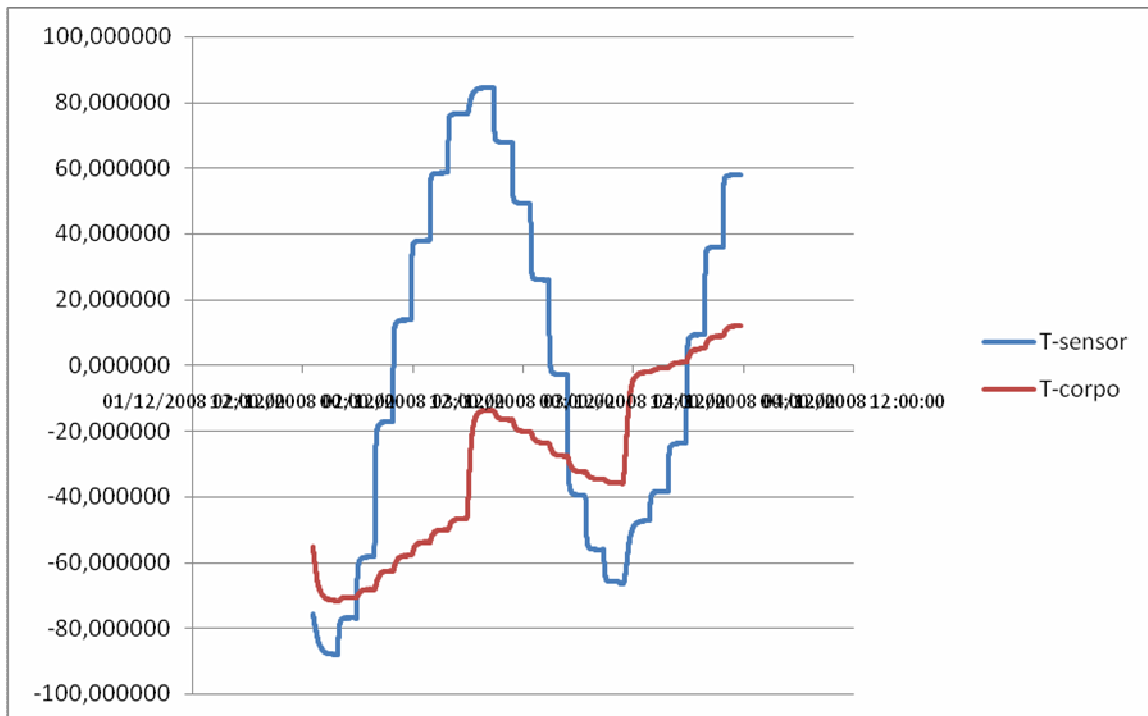
$$s_{cal} = \left\{ \frac{16}{\pi^2 L^4} \cdot \left[(I \cdot s_U)^2 + (U \cdot s_I)^2 + \left(2 \frac{UI}{L} \cdot s_L \right)^2 \right] + \left[\left((4 \cdot \epsilon \cdot \sigma + G_2 \cdot \sigma) T_s^3 + G_3 \right) \cdot s_{T_s} \right]^2 + \left[G_3 \cdot s_{T_c} \right]^2 \right\}^{1/2}$$

Para efeitos de simplificação do relatório, a memória de cálculos foi omitida e foram

apresentados apenas os valores finais de incerteza de calibração.

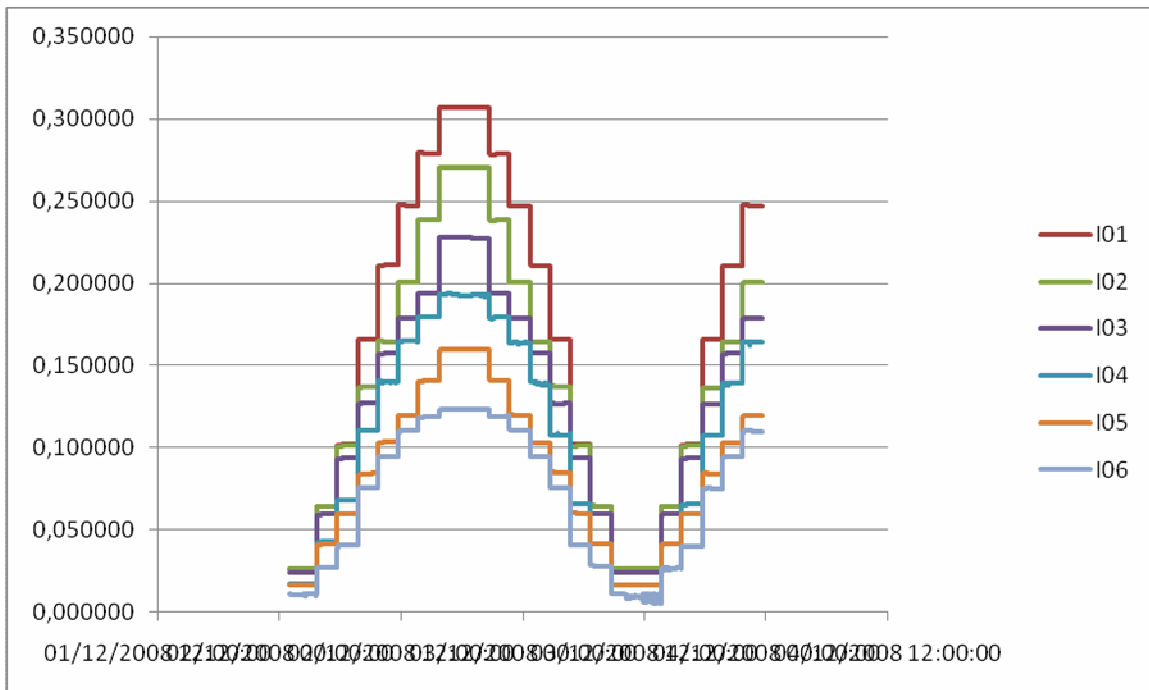
ANEXO III - GRÁFICOS DE CONVERGÊNCIA

A Figura abaixo mostra os gráficos de comportamento médio da temperatura do sensor e da temperatura do corpo durante o ensaio de calibração dos radiômetros.



Nota-se que os patamares de convergência são bem estabelecidos, o que indica boa confiança dos dados de aquisição frente ao esperado.

A Figura abaixo mostra os gráficos de convergência de corrente estabelecida nas fontes durante os intervalos de convergência dos testes de calibração. Nota-se também que os patamares de convergência são bem estabelecidos.



A Figura abaixo mostra os gráficos de convergência de tensão elétrica estabelecida nos intervalos de convergência dos testes de calibração. Nota-se mais uma vez a boa convergência dos dados adquiridos. Os dados são dos radiômetros de 1 a 5 apenas, mas refletem o comportamento geral dos demais 31 radiômetros ao longo do ensaio.

