



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

**INPE-13977-PRE/9152**

**PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM RADIADOR DE GRADE  
COM RESISTÊNCIAS TUBULARES (CAL-ROD'S)**

Guilherme Soares e Silva\*

\* ITA, bolsista PIBIC/CNPq

Relatório Final de Projeto de Iniciação Científica (PIBIC/CNPq/INPE), orientado pelo  
Dr. José Sergio de Almeida.

INPE  
São José dos Campos  
2006

INPE - 13997 - PRE/9152



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

**PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM RADIADOR DE GRADE  
COM RESISTÊNCIAS TUBULARES  
(CAL-ROD's)**

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

Guilherme Soares e Silva (ITA, Bolsista PIBIC/CNPq)  
E-mail: [guilhermesilva@redecasd.ita.br](mailto:guilhermesilva@redecasd.ita.br)

José Sergio de Almeida (LIT/INPE, Orientador)  
E-mail: [jsergio@lit.inpe.br](mailto:jsergio@lit.inpe.br)

Agosto de 2006

*“Tudo acaba bem, se não está bem é porque ainda não acabou”*

DOMÍNIO PÚBLICO.



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pela concessão da bolsa de iniciação científica.

Aos professores do meu curso que auxiliaram e sugeriram algumas soluções para eventuais problemas.

Ao meu orientador José Sergio de Almeida.

Ao INPE, e principalmente ao Laboratório de Integração e Testes – LIT, pela utilização das instalações, mas principalmente a todo o pessoal da técnica do LIT que mais de perto auxiliou no desenvolvimento do projeto.

Aos amigos que forma os que estiveram mais próximos durante o desenvolvimento do trabalho.

Aos meus pais, Domingos de Oliveira e Silva e Neusa Maria Soares e Silva, que mesmo longe durante o desenvolvimento do trabalho, sempre estiveram perto de mim, e permitiram o meu acesso ao conhecimento.



## **RESUMO**

O trabalho aqui descrito tem como objetivo desenvolver e qualificar um dispositivo para aplicação de cargas térmicas por efeito de radiação, utilizando-se da técnica de disposição de resistências tubulares em disposição de grades paralelas que será utilizado durante os testes vácuo-térmicos do modelo de vôo do satélite CBERS FM2B. Para ser utilizado em tal aplicação, duas condições são exigidas do dispositivo: uniformidade de distribuição de calor e alta taxa de transferência de calor após desligada a fonte de tensão das resistências. Este trabalho ainda não está concluído, neste relatório é desenvolvido o modelamento teórico e projeto de tal dispositivo, bem como a preparação do dispositivo para realizar ensaios térmicos que validará o modelo do aparelho. Ainda, faz-se menção do projeto futuro de otimização do dispositivo, que permitirá ter domínio da técnica e conseguir aplica-la em qualquer tipo de teste vácuo-térmico.



## **PROJECT AND CONSTRUCTION OF A RADIATOR OF GRATE WITH TUBULAR HEATERS (CAL-ROD' s)**

### **ABSTRACT**

The here described work has as objective to develop and to characterize a device for thermal load application for radiation effect, using the technique of disposal of tubular heater in disposal of grate parallel bars that will be used during the vacuum-thermal tests of the model of flight of satellite CBERS FM2B. To be used in such application, two conditions are demanded of the device: uniformity of heat distribution and high tax of transference of heat after off the source of tension of the heaters. This work not yet is concluded, in this report is developed the theoretical model and project of such device, as well as the preparation of the device to carry through thermal assays that the theoretical model of the device will validate. Still, mention of the future project of improve on of the device becomes, that will allow to have domain of the technique and to obtain applies it in any type of vacuum-thermal test.



## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	14
LISTA DE TABELAS	16
CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	18
CAPÍTULO 2 MOTIVAÇÃO	19
CAPÍTULO 3 DESENVOLVIMENTO TEÓRICO	20
3.1 CAL-ROD	20
3.2-Modelo Analítico da irradiância emitida pelo CAL-ROD	20
3.3-Translação e rotação de eixos	22
3.3.1- Translação	22
3.3.2- Rotação	22
3.4- Desenvolvimento do CAL-ROD no MATLAB	23
3.5- Considerações a respeito do fabricante	24
CAPÍTULO 4 CRIAÇÃO DO DISPOSITIVO	26
4.1- Método Utilizado	26
4.2- Modelos de dispositivos desenvolvidos	27
4.2.1- Primeiro Modelo (Caixa de resistências)	28
4.2.1.1- Programa desenvolvido para encontrar uniformidade	29
4.2.1.2- Resultados do primeiro modelo	29
4.2.2- Segundo Modelo (Caixa com Baffles)	30
4.2.2.1- Posicionamento dos CAL-ROD's	30
4.2.2.1.1- Uniformidade	31
4.2.2.1.2- Taxa de transferência de calor quando desligadas as fontes dos CAL-ROD's	32
4.2.2.2- Efeito dos Baffles	33
4.2.2.3- Modelagem Computacional	34
4.2.2.3.1- Truncamento na primeira série de reflexões	35
4.2.2.4- CAL-ROD's com potência variada	36
4.2.2.5- Resultados obtidos	37
CAPÍTULO 5 VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL	38
5.1- Primeiro experimento realizado	39

CAPÍTULO 6 PRÓXIMOS PASSOS E  
CONCLUSÕES

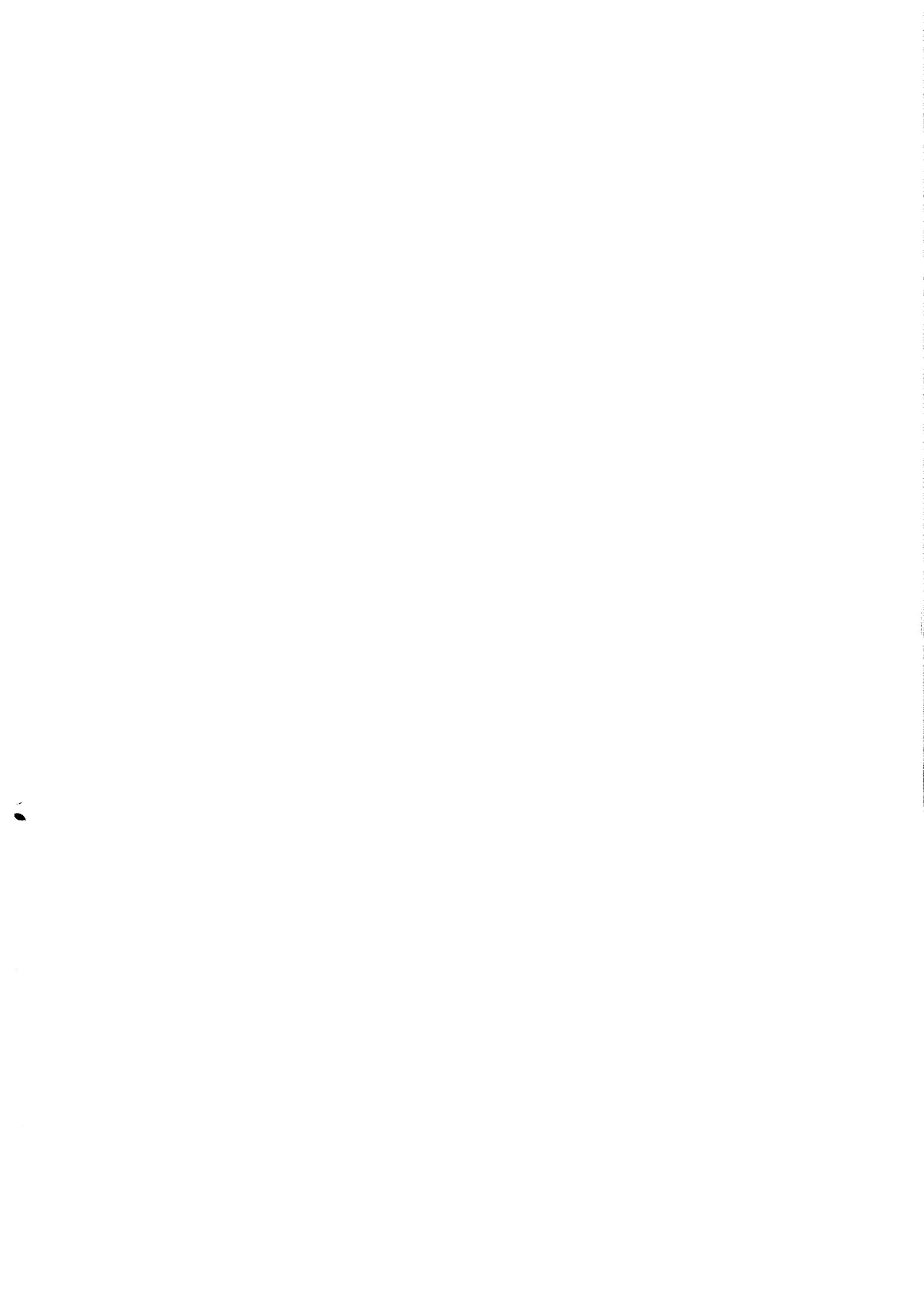
41

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

42

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2 – comparação das dimensões do satélite com as do Sol, o que permite admitir uma uniformidade de distribuição de calor.	19
Figura 2.2- esquema utilizado para realizar a modelagem do comportamento da irradiância emitida pelo <i>CAL-ROD</i> .	20
Figura 2.4.1-curva característica de um <i>CAL-ROD</i> a 40 cm do plano e com uma potência nominal de 800W, no gráfico acima mostra-se apenas metade da curva.	24
Figura 2.4.2- curva característica de um <i>CAL-ROD</i> a 10 cm do plano e com uma potência nominal de 800W.	25
Figura 2.5 – imagem da região efetiva do <i>CAL-ROD</i> da Chromalox, retirada de [2].	25
Figura 3.1-organograma do processo iterativo utilizado para criação do dispositivo.	27
Figura 4.2.1- ilustração do primeiro modelo proposto com as resistências dispostas nas cinco faces da caixa.	28
Figura 4.2.2- dois <i>CAL-ROD</i> 's dispostos paralelamente evidenciando o problema que se obtém nas borda da caixa	29
Figura 4.2.3 – imagem do novo modelo proposto da caixa de <i>CAL-ROD</i> 's.	30
Figura 4.2.4- caixa com baffles espelhados e seis <i>CAL-ROD</i> 's paralelos.	31
Figura 4.2.5- caixa com baffles espelhados e seis <i>CAL-ROD</i> 's rotacionados	32
Figura 4.2.6 – caixa com resistências perpendiculares umas as outras com baffles	33
Figura 4.2.7 – caixa com resistências perpendiculares umas as outras sem baffles.	34
Figura 4.2.8- efeito da presença dos baffles no dispositivo	35
Figura 4.2.9- truncamento feito na primeira série de reflexões.	36
Figura 5.1- detalhes do projeto da caixa de <i>CAL-ROD</i> 's.	38
Figura 5.2- fotos da caixa de <i>CAL-ROD</i> , com detalhe mostrando o calço que auxiliara na avaliação da variação do parâmetro da altura.	39



## LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1- obtenção da constante de Stefan-Boltzman.

40



## **CAPÍTULO 1**

### **INTRODUÇÃO**

Este relatório pretende descrever as atividades desenvolvidas no período de julho de 2005 a agosto de 2006, no processo de desenvolvimento e qualificação de um dispositivo para aplicação espacial de cargas térmicas por efeito de radiação, utilizando-se da técnica das resistências tubulares em disposição de grades paralelas, que será utilizado durante os testes vácuo-térmicos do modelo de vôo do satélite CBERS FM2B.

O projeto além de ter como meta desenvolver um dispositivo de radiação que seja utilizado nos testes vácuo-térmicos do satélite CBERS FM2B, pretende desenvolver e otimizar a técnica, que se utiliza de resistências tubulares (CAL-ROD's) como fonte de calor.

## CAPÍTULO 2

### MOTIVAÇÃO

O que motivou o desenvolvimento deste trabalho foi análise de dois critérios que devem ser respeitados durante a execução do teste vácuo-térmico. Durante o ensaio o dispositivo de radiação térmica deve simular as condições de operação do satélite em órbita. São duas essas condições :

- Uniformidade de distribuição de calor:

Como indicado na figura 2, temos que as dimensões do satélite em órbita são desprezíveis quando comparadas com a distância dele ao Sol (fonte de radiação), por isso podemos admitir que a radiação chega na superfície do satélite de maneira uniforme.

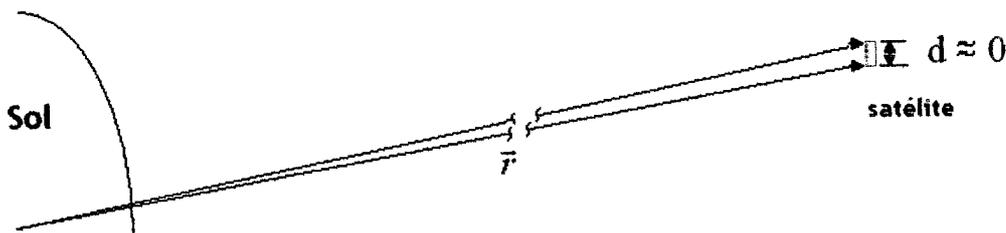


Figura 2 – comparação das dimensões do satélite com as do Sol, o que permite admitir uma uniformidade de distribuição de calor.

- Alta taxa de transferência de calor através do dispositivo quando inativo:

Esse critério corresponde a situação de sombra e eclipse que o satélite é disposto, ou seja, o satélite atinge temperaturas muito baixas em um pequeno intervalo de tempo. Na câmara de vácuo isso deve acontecer quando as fontes de tensão que alimentam os CAL-ROD's são desligadas, o dispositivo deve permitir que haja uma alta taxa de perda de calor para a câmara vácuo-térmica.

## CAPÍTULO 3

### DESENVOLVIMENTO TEÓRICO

#### 3.1 CAL-ROD

Devido a dificuldade de se encontrar na literatura uma equação que descrevesse a irradiância de resistências tubulares, baseando-se em [3] desenvolveu-se o modelo analítico de fluxo de calor para o Cal-Rod, descrito abaixo.

#### 3.2 MODELO ANÁLITICO DA IRRADIÂNCIA EMITIDA PELO CAL-ROD

A figura 2.2, mostra esquematicamente um Cal-Rod, e algumas grandezas que serão interessantes na descrição do modelo analítico do Cal-Rod.

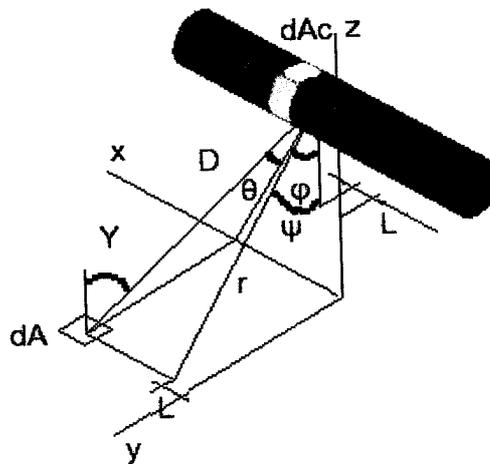


Figura 2.2- esquema utilizado para realizar a modelagem do comportamento da irradiância emitida pelo *CAL-ROD*.

A intensidade de radiação emitida pelo elemento de área  $dAc$  na direção de  $D$  é dada por :

$$E \cos(\psi) dAc \quad (3.1)$$

Onde  $E$  é a potência emitida pelo CAL-ROD.

A intensidade de radiação incidente na superfície do elemento  $dA$  é proporcional a:

$$\frac{\cos(\gamma)}{D^2} dA \quad (3.2)$$

Logo a radiação recebida por  $dA$  é dada por:

$$dq = \int_{Ac} E \cos(\psi) dAc \frac{\cos(\gamma)}{D^2} dA \quad (3.3)$$

Mas, temos ainda que :

$$dAc = \Phi \cdot dL \quad (3.4)$$

$$D^2 = (x - L)^2 + y^2 + H^2 \quad (3.5)$$

Onde  $\Phi$  é o diâmetro da resistência e  $H$  é a distância entre a resistência e o plano  $xOy$ .

De (03), (04) e (05), tem-se que :

$$I = \frac{dq}{dA} = \int_{-\frac{s}{2}}^{\frac{s}{2}} E \Phi r H \frac{dL}{[(x-L)^2 + y^2 + H^2]^2} \quad (3.6)$$

Sendo  $s$  o comprimento do CAL-ROD.

A equação (05), nos fornece :

$$I = E \Phi \frac{H}{2r} \left\{ \frac{\delta_r}{\delta_r^2 + r^2} - \frac{\delta_L}{\delta_L^2 + r^2} + \frac{1}{r} \left[ \text{ac tan} \left( \frac{\delta_r}{r} \right) - \text{ac tan} \left( \frac{\delta_L}{r} \right) \right] \right\} \quad (3.7)$$

Onde,

$$\begin{aligned}\delta_r &= \frac{s}{2} - x, \\ \delta_L &= -\frac{s}{2} - x, \\ r^2 &= y^2 + H^2.\end{aligned}\tag{3.8}$$

### 3.3 TRANSLAÇÃO E ROTAÇÃO DE EIXOS

Para a disposição dos CAL-ROD's no dispositivo foi necessário rotacionar e transladar as resistências de modo que pudéssemos utilizar o modelo analítico desenvolvido em 2.2, para qualquer posição do plano.

#### 3.3.1 TRANSLAÇÃO

Para a translação do eixo Ox para um ponto em (s,y,z), a translação do eixo Oy para um ponto em (x,p,z) e a translação do eixo Oz para um ponto (x,y,q) no novo sistema de coordenadas (x',y',z') que tem como origem o ponto (s,p,q) do sistema original de coordenadas, tem-se :

$$\begin{aligned}x' &= x - s, \\ y' &= y - p, \\ z' &= z - q.\end{aligned}\tag{3.9}$$

#### 3.3.2 ROTAÇÃO

Para a rotação usa-se as matrizes de rotação abaixo

- Rotação em z :

$$A(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \text{sen}(\theta) & 0 \\ -\text{sen}(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

- Rotação em y:

$$A(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 & -\text{sen}(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ \text{sen}(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

- Rotação em x :

$$A(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta) & \text{sen}(\theta) \\ 0 & -\text{sen}(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

### 3.4 DESENVOLVIMENTO DO CAL-ROD NO MATLAB

O MATLAB foi utilizado como ferramenta auxiliador no processo de desenvolvimento do modelo do CAL-ROD, para isso foi necessário que a expressão (3.7), se tornasse matricial, isso foi feito considerando  $x$  e  $y$  matrizes, isto é  $x = x(i,j)$  e  $y = y(i,j)$ , isso é feito através da função *meshgrid(\*,\*)* do MATLAB.

A expressão (3.7), matricialmente fica assim :

$$I(i,j) = E\Phi \frac{H}{2 r_{(i,j)}} \left\{ \frac{\delta_{r(i,j)}}{\delta_{r(i,j)}^2 + r_{(i,j)}^2} - \frac{\delta_{L(i,j)}}{\delta_{L(i,j)}^2 + r_{(i,j)}^2} + \frac{1}{r} \left[ \text{ac tan} \left( \frac{\delta_{r(i,j)}}{r_{(i,j)}} \right) - \text{ac tan} \left( \frac{\delta_{L(i,j)}}{r_{(i,j)}} \right) \right] \right\} \quad (3.13)$$

Onde,

$$\begin{aligned} \delta_{r(i,j)} &= \frac{s}{2} - x(i,j), \\ \delta_{L(i,j)} &= -\frac{s}{2} - x(i,j), \\ r_{(i,j)}^2 &= y(i,j)^2 + H^2. \end{aligned} \quad (3.14)$$

Entrando com parâmetros como altura (H) do CAL-ROD, comprimento (s), Potência (E), e fixando o diâmetro do CAL-ROD em 0,375 pol(  $\Phi$  ), obtivemos algumas curvas características dos CAL-ROD's que auxiliaram na avaliação do comportamento do CAL-ROD e auxiliaram na tentativa de encontrar um posicionamento dos CAL-ROD's no dispositivo, tal que fornecesse a uniformidade desejada. As figuras 2.4.1 e 2.4.2, ilustram essa distribuição de irradiância I no plano x0y.

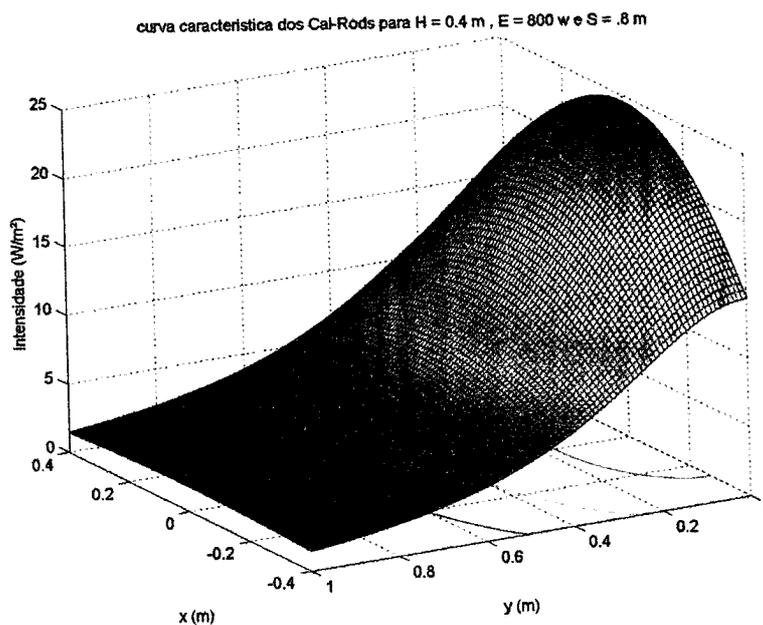


Figura 2.4.1-curva característica de um CAL-ROD a 40 cm do plano e com uma potência nominal de 800W, no gráfico acima mostra-se apenas metade da curva.

### 3.5 CONSIDERAÇÕES A RESPEITO DO FABRICANTE

Para o desenvolvimento deste trabalhou-se com as resistências tubulares do fabricante Chromalox. No manual do fabricante, faz-se menção a respeito da região da resistência em que é emitida a radiação com o valor nominal, a região que é indicada na figura 2.5, é a região B, esse valor varia do modelo da resistência e dependem principalmente do diâmetro da mesma e do comprimento total da resistência.

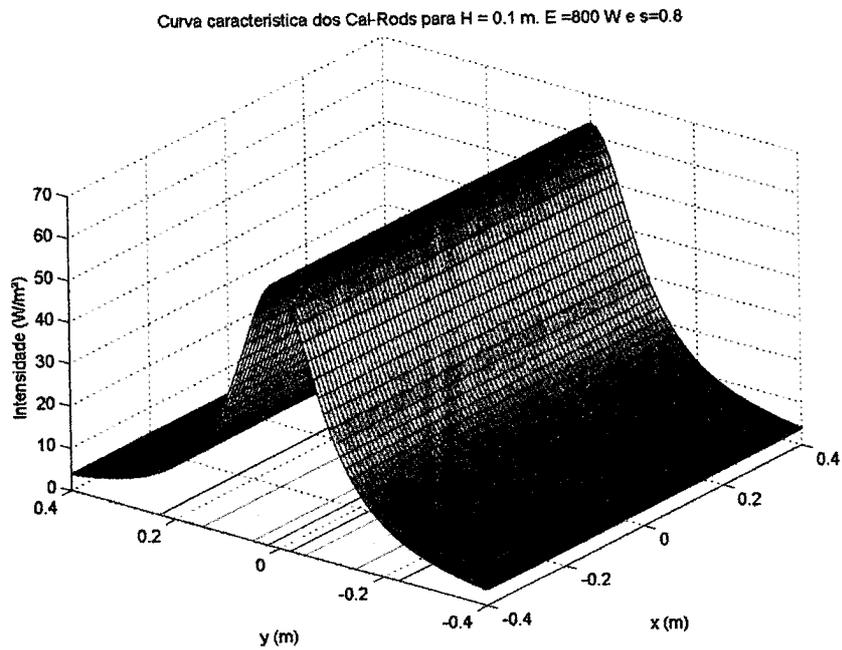


Figura 2.4.2- curva característica de um CAL-ROD a 10 cm do plano e com uma potência nominal de 800W.

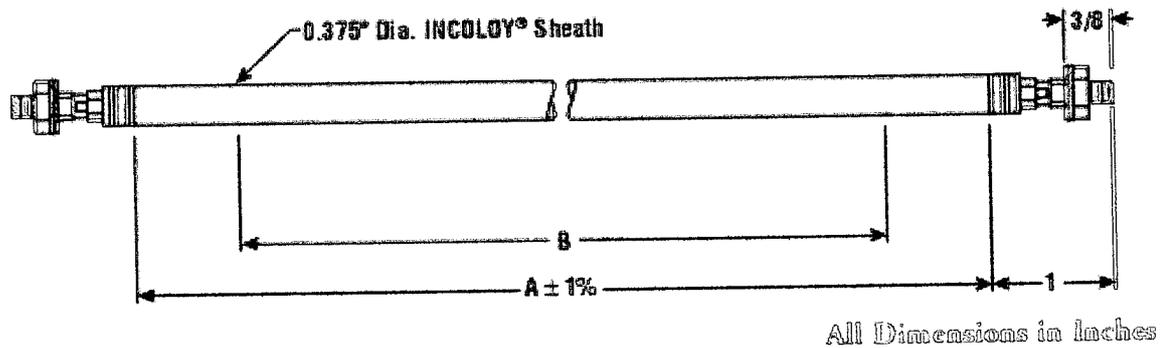


Figura 2.5 – imagem da região efetiva do CAL-ROD da Chromalox, retirada de [2].

## CAPÍTULO 4

### CRIAÇÃO DO DISPOSITIVO

Descreve-se aqui o processo de desenvolvimento do projeto do dispositivo que satisfizesse as condições citadas no capítulo 2, o processo utilizado para a obtenção do mesmo foi o desenvolvimento de um processo iterativo de projeto, isto é, tentativa e erro baseado em disposição de CAL-ROD e geometria do dispositivo.

#### 4.1 MÉTODO UTILIZADO

Para desenvolver o dispositivo e encontrar a uniformidade desejada, utilizou-se o processo iterativo de determinação do projeto final que é mostrado no organograma da figura 3.1. Citemos aqui a que se refere cada um dos quadros do organograma.

- **Proposta** : Os dois critérios de uniformidade, exigidos para realização do teste vácuo-térmico;
- **Modelo teórico** : modelo sugerido do dispositivo que será usado com os CAL-ROD's;
- **Disposição de CAL-ROD's** : maneira que os CAL-ROD's serão dispostos na caixa para que se obtenha a uniformidade desejada;
- **Uniformidade maior que 5%**: caso a uniformidade for maior que cinco por cento o modelo do dispositivo e a disposição dos CAL-ROD's são satisfatórias e se passa para o próximo passo, caso contrário muda-se a disposição dos CAL-ROD's para tentar encontrar a uniformidade desejada, caso a uniformidade desejada não seja obtida após inúmeras tentativas, muda-se o modelo do dispositivo que esta sendo usado para tentar encontrar novamente a uniformidade.

- **Verificação experimental:** Após o último passo ter sido realizado, faz-se a verificação experimental do modelo do dispositivo, para poder dessa forma validar o modelo teórico do dispositivo.

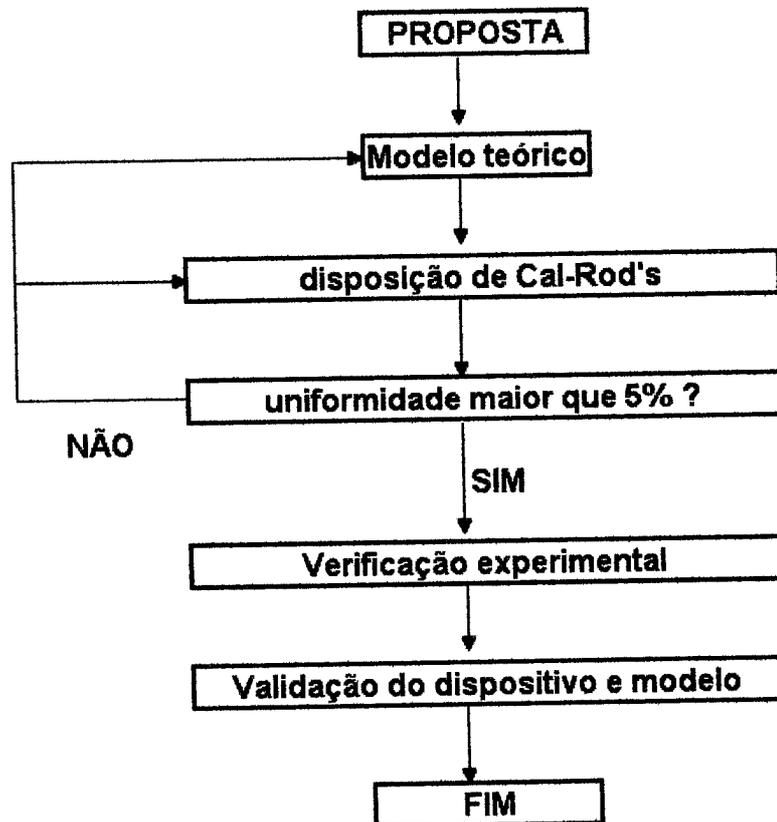


Figura 3.1-organograma do processo iterativo utilizado para criação do dispositivo.

#### 4.2 MODELOS DE DISPOSITIVOS DESENVOLVIDOS

No procedimento iterativo citado acima, para conseguir a uniformidade desejada foram criados dois dispositivos, e apenas um deles satisfaz critério de uniformidade.

#### 4.2.1 PRIMIRO MODELO (CAIXA DE RESISTÊNCIAS)

O primeiro modelo, possuía cinco faces abertas com as resistências dispostas nas cinco faces da caixa, a figura 4.2.1 ilustra a proposta desenvolvida para esse primeiro modelo.

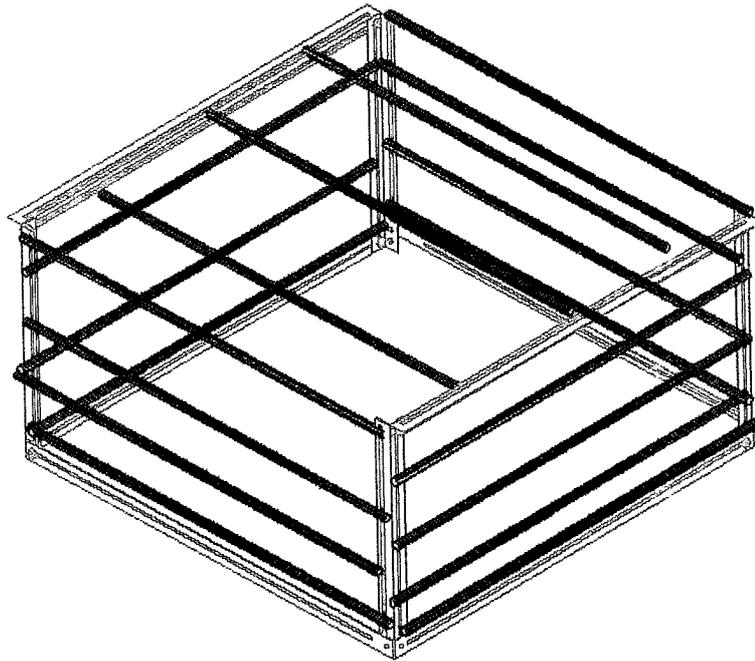


Figura 4.2.1- ilustração do primeiro modelo proposto com as resistências dispostas nas cinco faces da caixa.

Admitiu-se essa proposta interessante por acreditar que teria uma grande taxa de perda de calor, já que é aberta em todas as faces, além de controlar problemas de uniformidade nas bordas devido as resistências dispostas nos lados da caixa, esse problema de uniformidade nas bordas fica evidenciado na figura 4.2.2.

curva característica de dois Cal-Rods ha uma distancia de 50 cm para  $H = 0.4$  m ,  $E = 800$  w e  $S = .8$  m

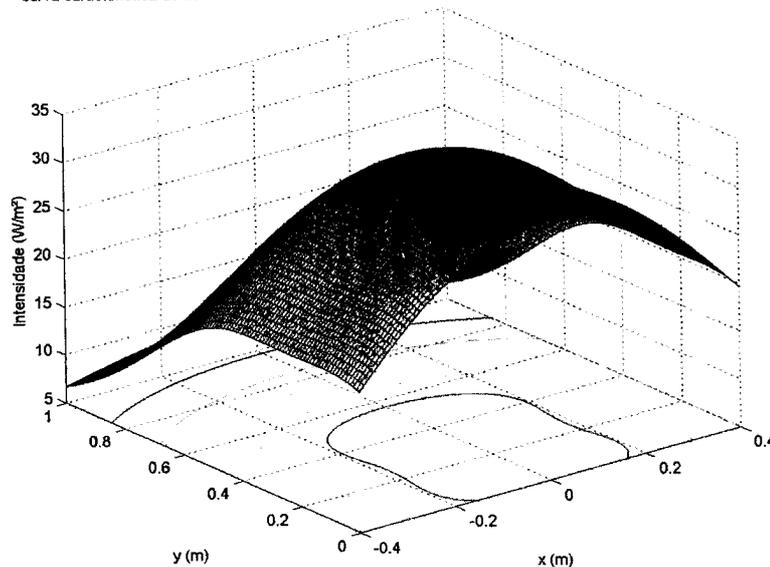


Figura 4.2.2- dois CAL-ROD's dispostos paralelamente evidenciando o problema que se obtém nas borda da caixa

#### 4.2.1.1 PROGRMA DESENVOLVIDO PARA ENCONTRAR UNIFORMIDADE

Diante da dificuldade de encontrar de forma arbitrária uma disposição de CAL-ROD' s que fornecessem uniformidade foi desenvolvido um programa em linguagem C que fizesse esse trabalho. Esse programa não foi desenvolvido em MATLAB porque devido ao excessivo número de cálculos que teria que realizar, ficaria inviável devido ao tempo excessivo de processamento que seria exigido caso fosse desenvolvido em MATLAB.

#### 4.2.1.2 RESULTADOS DO PRIMEIRO MODELO

O programa citado no item 4.2.1.1 ficou em tempo de processamento de mais de sessenta e duas horas (62 h) sem apresentar nenhum resultado satisfatório (uma uniformidade menor que cinco por cento).

Diante desse resultado, decidiu-se mudar o modelo do dispositivo, para tentar encontrar um dispositivo que garantisse maior facilidade de trabalho.

#### 4.2.2 SEGUNDO MODELO (CAIXA COM BAFFLES)

A proposta do novo modelo mostrado na figura 4.2.3 utiliza o conceito de baffles. O fator que motivou a utilização desse modelo se baseou principalmente no critério de uniformidade, isso porque a utilização de baffles espelhadas, anularia o problema das bordas da caixa, que como se pode observar pela figura 4.2.2, é onde se encontra a região de maior dificuldade de controle da uniformidade.

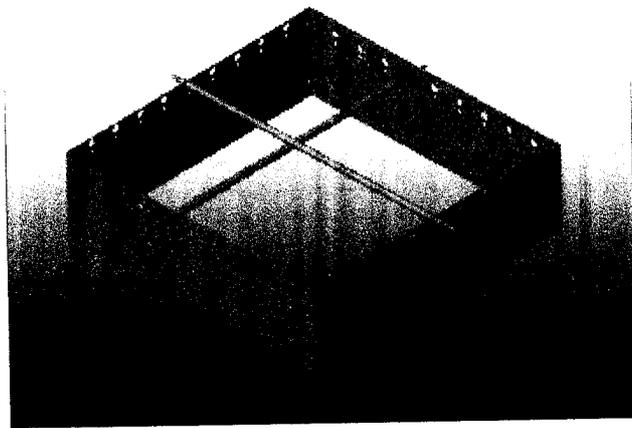


Figura 4.2.3 – imagem do novo modelo proposto da caixa de CAL-ROD'S.

##### 4.2.2.1 POSICIONAMENTO DOS CAL-ROD'S

No novo modelo proposto devido a simetria em qualquer direção e posição da caixa devido a existências das reflexões criadas pelos *baffles* espelhados (veja figura 4.2.8), avaliou-se a possibilidade de posicionar os CAL-ROD'S em posições perpendiculares uns aos outros. Para avaliar esse benefício, os dois critérios foram avaliados, o controle da uniformidade e a taxa de perda de calor quando as fontes de tensão das resistências são desligadas.

#### 4.2.2.1.1 UNIFORMIDADE

Para comparar os benefícios de rotacionar em 90° os CAL-ROD's um em relação ao outro foi plotado gráficos em uma caixa com baffles espelhados com 6 CAL-ROD's em paralelos, figura 4.2.4, e perpendiculares, figura 4.2.5.

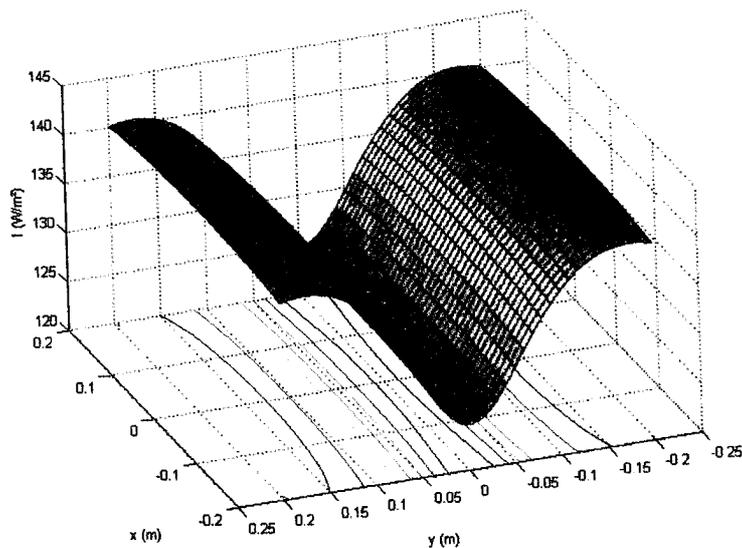


Figura 4.2.4- caixa com baffles espelhados e seis CAL-ROD's paralelos.

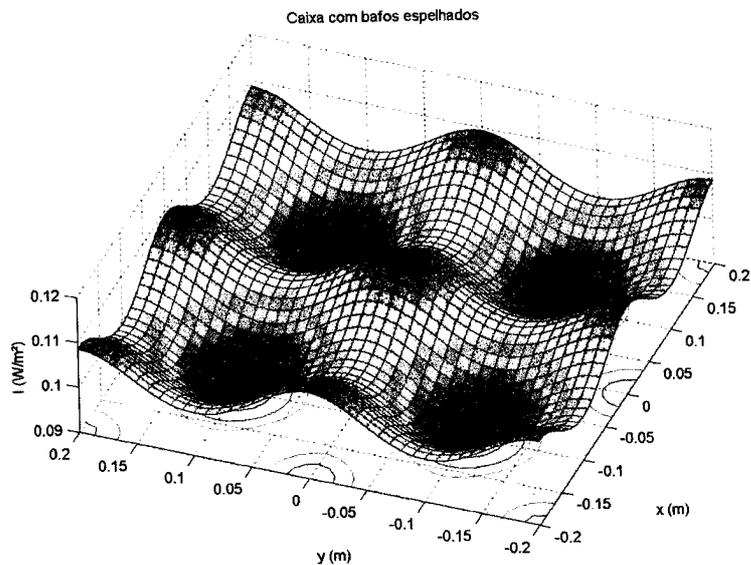


Figura 4.2.5- caixa com baffles espelhados e seis CAL-ROD's rotacionados.

As duas figuras deixam explícitos os benefícios de se rotacionar os CAL-ROD's, pode-se observar uma maior simetria na figura 4.2.5 do que a presente na figura 4.2.4, isso além de se verificar uma variação muito menor dos pontos máximos e mínimos dos dois gráficos, vemos que a distância entre os valores máximo e mínimo de irradiância na caixa com CAL-ROD's em paralelos é muito maior. Para controlar a uniformidade com CAL-ROD's perpendiculares temos apenas que nos preocupar com o controle das regiões de "vale" e "cumes" dos gráficos, diferente da disposição dos CAL-ROD's em paralelos.

#### 4.2.2.1.2 TAXA DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR QUANDO DESLIGADAS AS FONTES DOS CAL-ROD's

Essa é uma grandeza que só pode ser determinada experimentalmente, porém podemos fazer estimativas a respeito do benefício de rotacionar a resistências.

O primeiro parâmetro a se avaliar é o aumento da área sem resistências no topo do dispositivo, quanto maior esse aumento de área maior é a taxa de transferência de calor, esse aumento ao rotacionar as resistências não é significativo, já que corresponde a área de  $n$

quadrados de lado igual ao diâmetro do CAL-ROD, onde  $n$  é o produto entre a quantidade de resistências de cada um dos lados da caixa.

Outro parâmetro é a distância entre a resistências, quanto maior essa distância maior será também a taxa de transferência de calor, essa distância é claramente maior no dispositivo com as resistências rotacionadas.

Baseando-se nesse último parâmetro espera-se que o dispositivo com resistências rotacionadas apresentará uma taxa de transferência de calor maior, após desligadas as fontes de tensão dos CAL-ROD's.

#### 4.2.2.2 EFEITO DOS BAFFLES

A análise do efeito dos baffles foi feita de maneira análoga ao efeito de rotação dos CAL-ROD's; plotou-se superfícies com e sem baffos, e analisou-se o benefício de ter ou não se ter baffles. Esses gráficos são mostrados nas figuras 4.2.6 e 4.2.7.

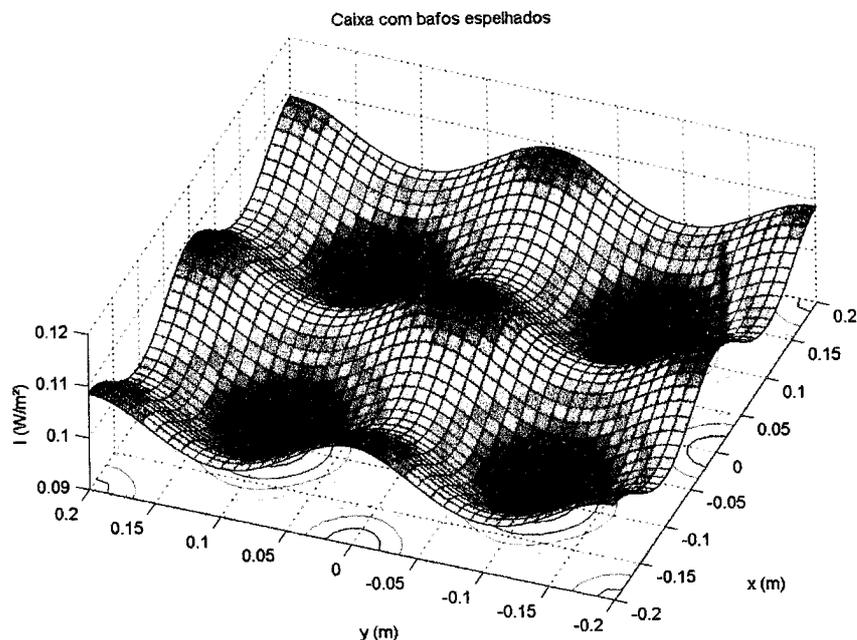


Figura 4.2.6 – caixa com resistências perpendiculares umas as outras com baffles espelhados.

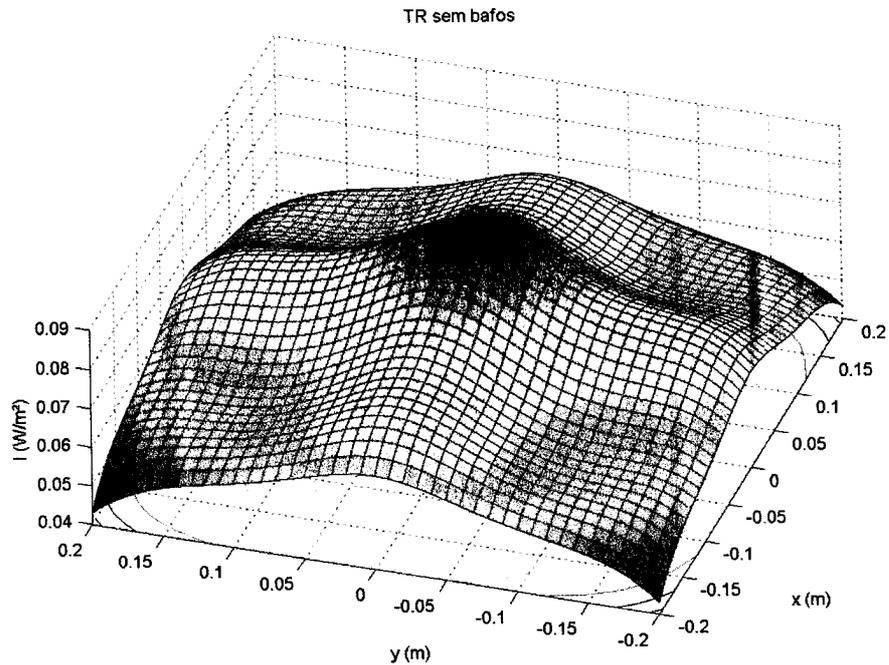


Figura 4.2.7 – caixa com resistências perpendiculares umas as outras sem baffles.

Nas duas figuras podemos observar a diferença da presença dos baffles, é claro o efeito positivo dos baffles no controle da uniformidade do dispositivo.

#### 4.2.2.3 MODELAGEM COMPUTACIONAL

Para a análise teórica do efeito dos baffles espelhados, foi necessário fazer modificação do código fonte desenvolvido em MATLAB para o primeiro modelo, modificação essa provocada pela presença dos baffles, a figura 4.2.8, mostra de forma simplificada a maneira de analisar o efeito dos baffles.

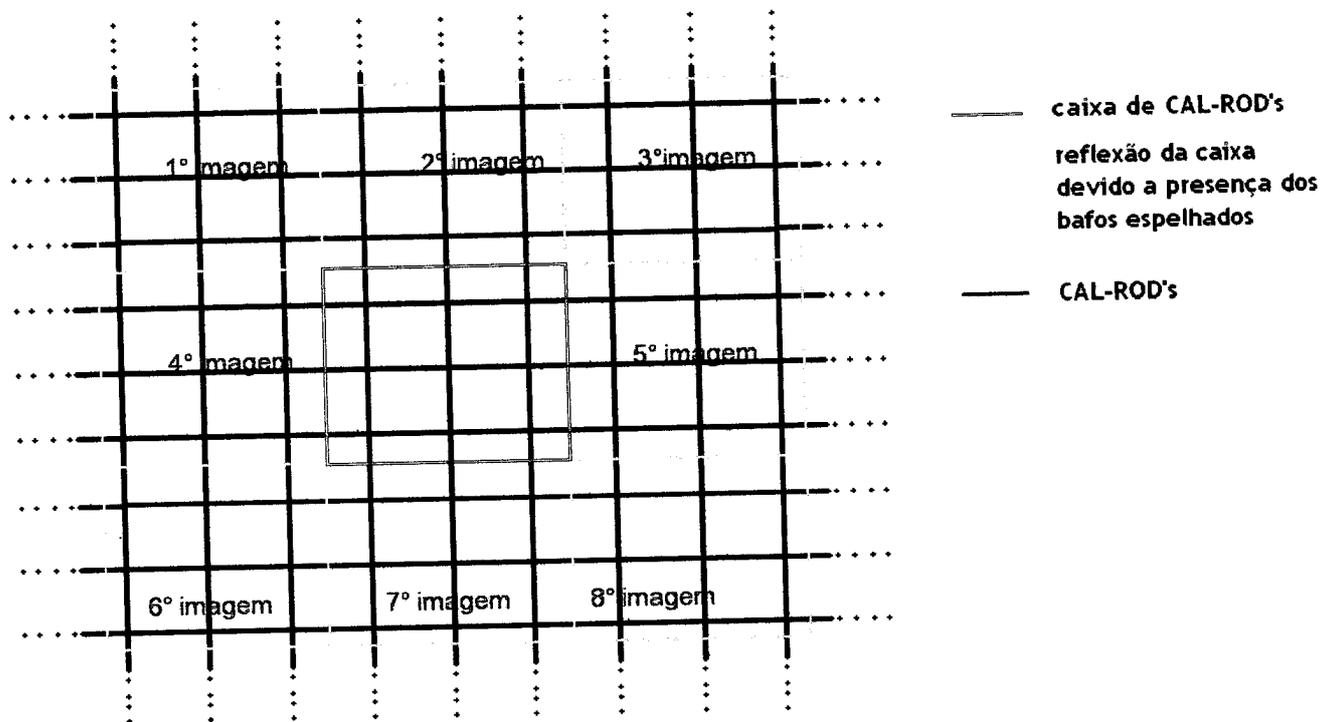


Figura 4.2.8- efeito da presença dos baffes no dispositivo

O espelhamento dos baffles faz com que apareçam dispositivos virtuais lado do dispositivo inicial, isso implica no surgimento de uma rede infinita de resistências dispostas perpendiculares umas as outras, como fica explícito na figura 4.2.8, é esse efeito que elimina o problema da alta taxa perda de calor da irradiância nas extremidades da caixa..

Para reproduzir esse efeito, transladamos cada um dos CAL-ROD's da caixa real para a posição ocupada por cada nova imagem da caixa de CAL-ROD's.

#### 4.2.2.3.1 TRUNCAMENTO DA SÉRIE DE REFLEXÕES

Para a simulação do modelo computacional dos baffles dois fatores foram levados em conta, tempo de processamento, e o fato da superfície refletora dos baffles, não possuir uma reflexão de cem por cento (100%). Devido ao primeiro motivo (tempo de processamento), foi necessário fazer um truncamento da série de reflexões, esse

truncamento foi feito como mostrado na figura 4.2.9 na primeira série de reflexões, 1° a 8° imagem da figura 4.2.8.

O que motivou o truncamento na primeira série de reflexões foi um valor empírico, verificou-se em um ensaio térmico no laboratório do LIT, que o tipo de refletor usado nos baffles do dispositivo permitia uma visualização com nitidez das imagens 1 a 8 indicadas na figura 4.2.8.

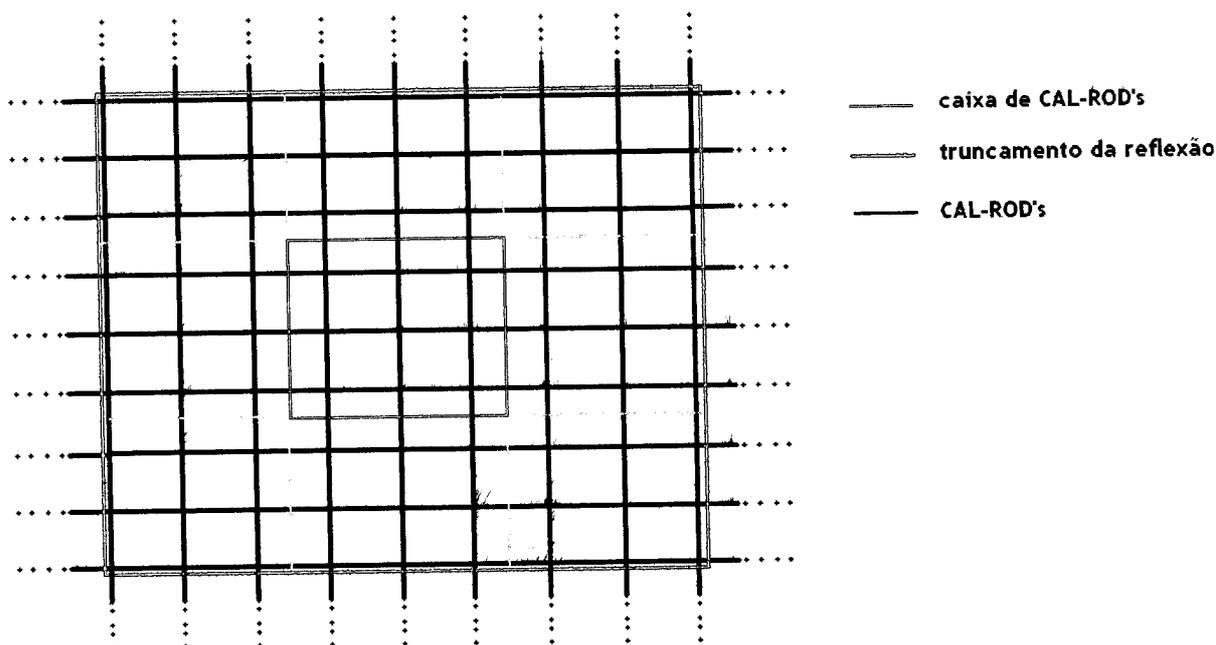


Figura 4.2.9- truncamento feito na primeira série de reflexões.

#### 4.2.2.4 CAL-ROD's COM POTÊNCIA VARIADA

De forma análoga ao executado no primeiro modelo, foi desenvolvido um programa em MATLAB, que determina o potencial ideal de cada um dos CAL-ROD's em uma distribuição simétrica de seis CAL-ROD's em uma caixa de 40 cm, com as resistências a uma altura de 10 cm.

Fazendo a suposição de que os CAL-ROD's são ôhmicos, fez-se variar o potencial aplicado de 10 volts a 120 volts com um passo de 5 volts, em cada um dos seis CAL-ROD's, o programa fornece como resultado a disposição de potenciais que fornece a maior uniformidade.

O resultado do programa, para os CAL-ROD's com a disposição citada anteriormente, foi de que o potencial em cada uma das resistências deve valer 10 volts e devem ser todos iguais. Que é o resultado esperado, já que a simetria da disposição dos CAL-ROD's sugere que essa simetria esteja presente no valor de potência das resistências, enquanto que o menor valor de potencial fornece uma distância menor entre os cumes e vales identificados na figura 4.2.5, e assim uma uniformidade menor.

#### **4.2.2.5 RESULTADOS OBTIDOS**

O segundo modelo aqui apresentado foi considerado satisfatório, por satisfazer o critério de uniformidade, teoricamente foi obtida uniformidade menor que inço por cento, e por esperarmos que possua uma alta taxa de transferência de calor.

## CAPÍTULO 5

### VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL

Para tornar válido o modelo teórico usado no dispositivo, faz-se necessário a verificação experimental do mesmo. Para isso construiu-se a caixa de CAL-ROD's, cuja imagem com detalhes de fixação são mostrados na figura 4.2.3 e 5.1. A imagem da caixa pronta com seis CAL-ROD's dispostos também é mostrada na figura 5.2.

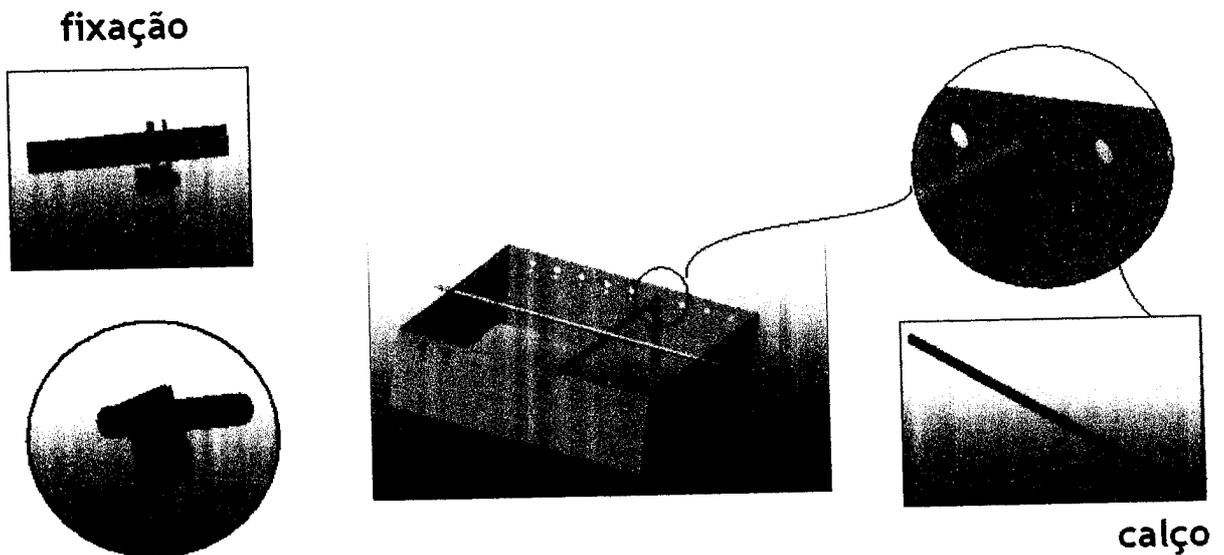


Figura 5.1- detalhes do projeto da caixa de CAL-ROD's.

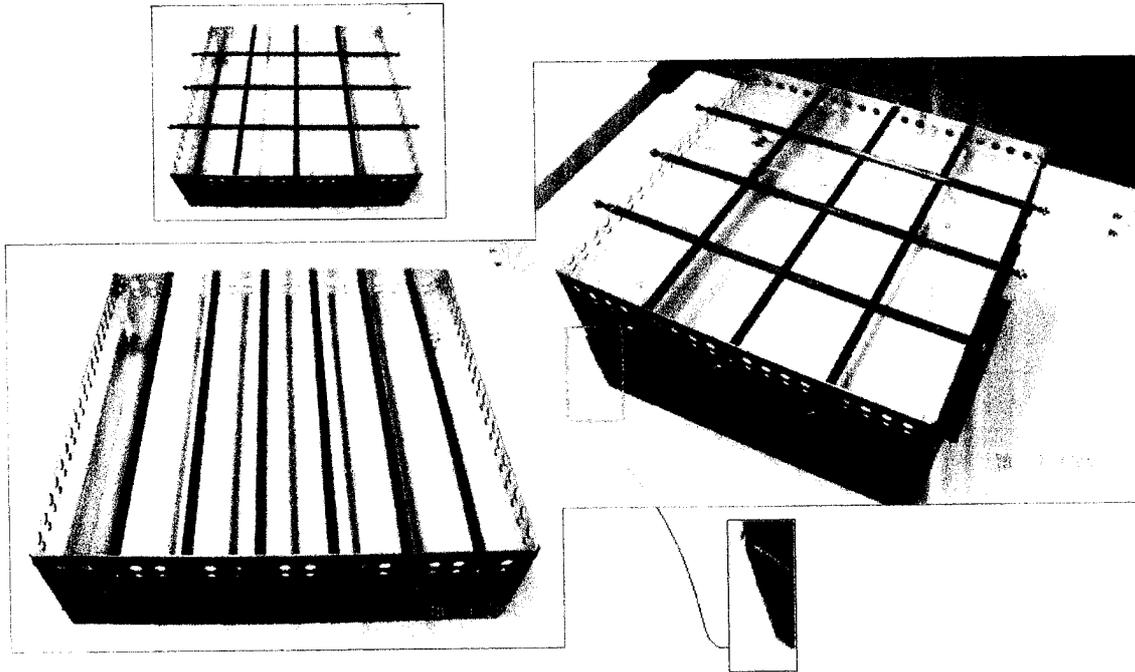


Figura 5.2- fotos da caixa de CAL-ROD, com detalhe mostrando o calço que auxiliara na avaliação da variação do parâmetro da altura.

### 5.1 PRIMEIRO EXPERIMENTO REALIZADO

Com o intuito de verificar a perda de temperatura nas extremidades dos CAL-ROD's, citado no item 3.5, foi realizado um experimento a temperatura e pressão ambiente de objetivo apenas qualitativo, que determinou com o auxílio de radiômetros a temperatura abaixo do CAL-ROD (Chromalox TRI 0,375 -350W) a uma distância de 10 cm.

Baseando-se nos resultados obtidos no experimento, determinou-se com o auxílio da equação(07) o valor da constante de Stefan-Boltzmann ( $\sigma$ ), através da equação 5.1.

$$\alpha I = \varepsilon \sigma T^4 \quad (5.1)$$

Onde para o radiômetro utilizado, tem-se :

$$\begin{aligned} \alpha &= 0,898 \\ \varepsilon &= 0,884 \end{aligned} \quad (5.2)$$

Os valores obtidos para  $\sigma$  estão indicados na tabela 5.1, veja que em todos os valores temos valores com mesma ordem de grandeza ( $10^{-8}$ ) da constante de Stefan-Boltzmann ( $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/(m}^2\text{K}^4)$ ), a não ser a partir dos três últimos valores, mas devemos lembrar que para o CAL-ROD utilizado a região efetiva esta a uma distância de 8,43 cm da extremidade, ou seja, os três últimos valores estão fora da região a ser considerada. Levando-se em conta ainda que o experimento não foi realizado sob condições do teste vácuo-térmico, podemos considerar o experimento satisfatório. Imagina-se que um ensaio mais rigoroso, apresentara valores muito mais próximos dos valores da constante de Stefan – Boltzmann.

<i>Posição em relação a extremidade do Cal-Rod (cm)</i>	<i>Temperatura (°C)</i>	<i><math>\sigma</math> (W/m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>)</i>
20,5	150,1	1,60117E-08
24,5	140,1	1,31667E-08
27,5	134,2	1,61644E-08
31,5	107,3	8,70561E-09
35,5	47,4	1,37226E-08
<b>39,0</b>	29,2	

Tabela 5.1- obtenção da constante de Stefan-Boltzmann.

## **CAPÍTULO 6**

### **PRÓXIMOS PASSOS E CONCLUSÕES**

Para continuar o processo descrito no organograma da figura 3.1, é necessário realizar ensaios de validação do modelo teórico da caixa utilizada, dispondo resistências e variando parâmetros como altura e potência das mesmas.

Acredita-se da necessidade de correção do modelo teórico utilizado devido as hipóteses feitas no modelamento computacional dos baffles (100% de reflexão ) e truncamento na primeira reflexão, supõe-se que haverá necessidade de criação de um coeficiente de correção baseado em alguns experimentos que serão realizados.

O projeto a ser desenvolvido tem esperança de tempo de duração de três anos, que envolve a otimização do dispositivo através do domínio da técnica criada para que possa ser utilizada com variações de geometrias das caixas e variações das aplicações a que se destina.

Vale lembrar que o dispositivo ainda está em fase de desenvolvimento e aperfeiçoamento, porém ao propósito inicial de sua criação (ensaio vácuo-térmico do CBERS FM2B) já está em conclusão, bastando apenas a validação experimental do modelo do mesmo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] **J.S. Almeida, E.C. Garcia e M.B. Santos** -*Results from the Thermal Vacuum Tests of the Chinese-Brazilian Earth Resources Satellite – CBERS FM2.53<sup>rd</sup>* International Astronautical Congress. The World Space Congress – 2002. 10-19 Oct 2002/Houston, Texas.
- [2] **Chromalox** -Product data sheet : Simulate IR. Julho de 1998.
- [3] **M.Donato, C.Ruel, A. Harris e B Muir** -*Absorbed Flux Predictions for Spacecraft IR Testing*. Fourteenth Intersociety Conference on Environmental Systems. San Diego, California , 16 -19 Julho 1984.
- [4] **J.A. Graham, S. Ahmed e J. Dumoulin**. *Test Evolution : RADARSAT – 1 TO RADARSAT -2*.
- [5] **M. Donato, J. Green, D. St-Pierre e M. Reeves**. *Evaluation of the Infrared Test Method for the Olympus Thermal Balance Tests*. 13th Space Simulation Conference, 8 de Outubro de 1984.