



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

**ANÁLISE DOS DADOS OBTIDOS NA QUALIFICAÇÃO DO
RADIADOR DE GRADE COM RESISTÊNCIAS TUBULARES
(CAL-ROD's) PARA USO EM SIMULAÇÃO ESPACIAL,
UTILIZANDO-SE DE RADIÔMETROS CALORIMÉTRICOS**

**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

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

COLABORADORES

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

Julho de 2008

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....	3
CAPÍTULO 2 – HISTÓRICO DO PROCESSO	4
CAPÍTULO 4 – EMPENHO ATUAL.....	14
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES	18
ANEXO I – GRÁFICOS DOS RADIÔMETROS	19
ANEXO II – ANÁLISE DE INCERTEZAS.....	34

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 subsistemas à irradiação térmica proveniente da Terra 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.

Com a trajetória orbital de um satélite de sensoriamento remoto, por exemplo, a exposição das suas câmaras 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.

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 e uniformidade a 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.

CAPÍTULO 2 – HISTÓRICO DO PROCESSO

O comportamento das câmaras 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 250K, 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 que contém 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. A Figura 1 abaixo mostra um CAL-ROD. Uma lapiseira comum foi posta junta ao mesmo para fins comparativos.



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

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 2 e 3 abaixo mostram, respectivamente, uma modelagem computacional do comportamento de IRAs com radiadores dispostos apenas paralelamente e dispostos paralela e perpendicularmente, respectivamente.

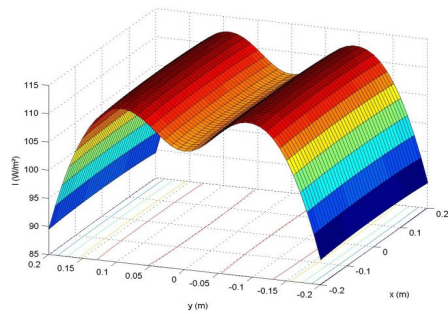


Figura 2 – Modelagem da computacional da distribuição térmica por radiadores dispostos paralelamente.

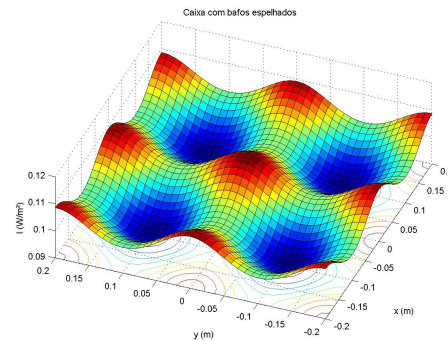


Figura 3 – Modelagem da distribuição térmica por radiadores dispostos paralelamente e perpendicularmente.

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 4 abaixo mostra uma caixa com três radiômetros paralelos e três perpendiculares.



Figura 4 – 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. A Figura 5 mostra um IRA dentro de uma câmara de vácuo-térmico e pronto para teste.



Figura 5 – IRA com radiômetros internos e externos.

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 6 ilustra uma foto dos sistemas de controle e aquisição de dados de potência e tensão utilizados nos testes.



Figura 6 – 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 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 inclui 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.

Para uma análise desse nível são usadas ferramentas matemáticas de Cálculo e Teoria dos Erros da Estatística. No Anexo II entra-se em detalhes do processo de análises realizadas.

CAPÍTULO 3 – RESULTADOS E ANÁLISES

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. Os cálculos foram efetuados diretamente por meio de funções nas planilhas do Excel. 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 $(95,2 \pm 0,3)\%$. Para o conjunto de vinte e cinco fases experimentadas, foram plotados gráficos e traçadas as curvas referentes aos fluxos da calibração, fluxo do calor emitido e fluxo do calor absorvido. Tais curvas encontram-se discriminadas por cores e devidamente legendadas em cada gráfico.

Para efeitos de simplificação, serão apresentados diretamente abaixo apenas os gráficos relativos ao comportamento médio dos radiômetros, e os gráficos referentes a radiômetros que apresentaram comportamento diferente do esperado. Os demais gráficos estão presentes no Anexo I pois mantêm o comportamento desejado mas diferem bastante entre si.

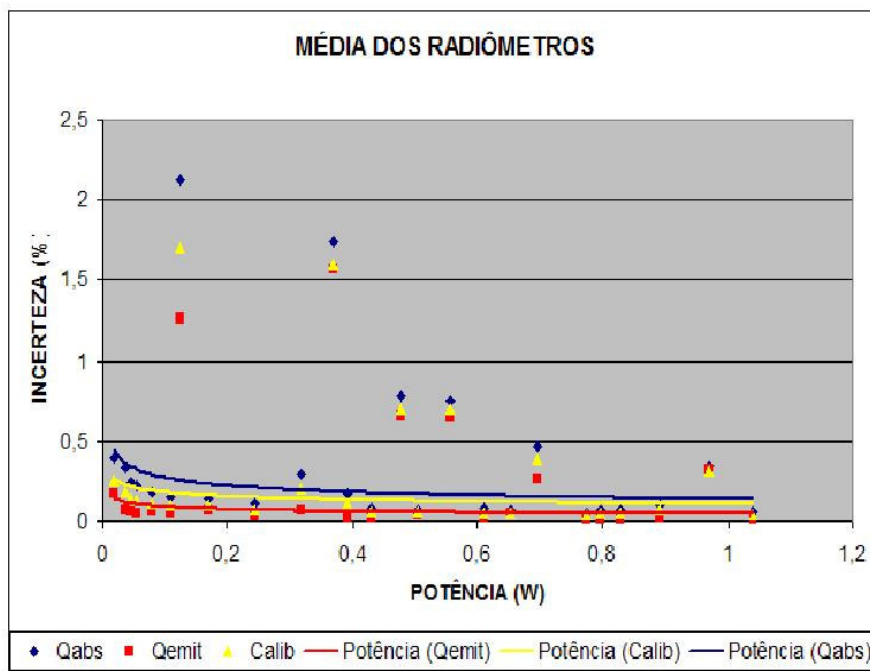


Figura 7 – Gráfico e curvas de desempenho da média dos radiômetros

Com diminuição de escala da incerteza, para melhor visualização da curva, obtém-se o gráfico abaixo.

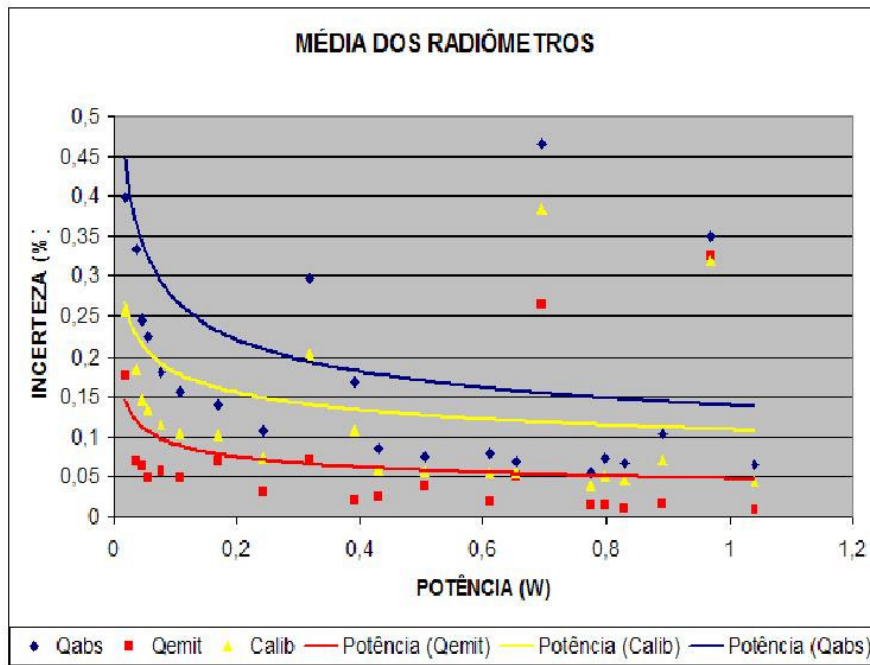


Figura 8 – Ampliação das curvas de desempenho da média dos radiômetros

Os radiômetros de 1 a 36 tiveram comportamento gráfico semelhante no que se refere à curva Potência x Incerteza (percentual) para os três tipos de incerteza analisados: a incerteza do fluxo de calor absorvido, a do fluxo de calor emitido e a da calibração (total). Os valores absolutos das incertezas diminuíram à medida que aumentaram os valores da potência incidente, o que era teoricamente esperado. Nos radiômetros de 22 a 25, no entanto, o comportamento das curvas de calibração e de calor emitido foi o oposto do esperado: os valores foram crescentes com a potência.

Para a maioria dos radiômetros, a curva de calibração fica situada abaixo da curva de calor absorvido e acima da curva de calor emitido. Os radiômetros 23, 25, 27, 29, 33 e 35 apresentaram uma incerteza de calibração maior do que a incerteza de calor absorvido para os valores mais altos de potência. Já o radiômetro 32 apresentou, na faixa de valores mais baixos de potência, incerteza de calor emitido maior que a incerteza de calibração, por sua vez maior que a incerteza de calor absorvido.

Abaixo seguem os gráficos de Incerteza x Potência dos radiômetros de 22 a 25, 27, 29, 33 e 35, cujas curvas apresentaram padrão diferente do esperado.

A escala do eixo relativo às incertezas foi diminuída a fim de mostrar melhor o comportamento das curvas. Em consequência disso, alguns pontos foram omitidos, o que não compromete a interpretação dos resultados.

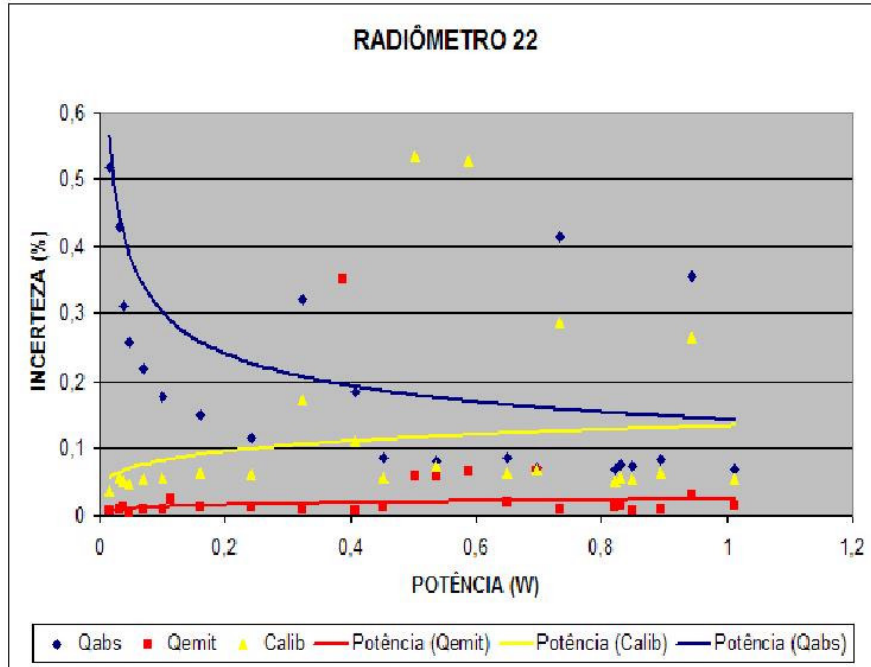


Figura 9 – Ampliação das curvas de desempenho do radiômetro 22

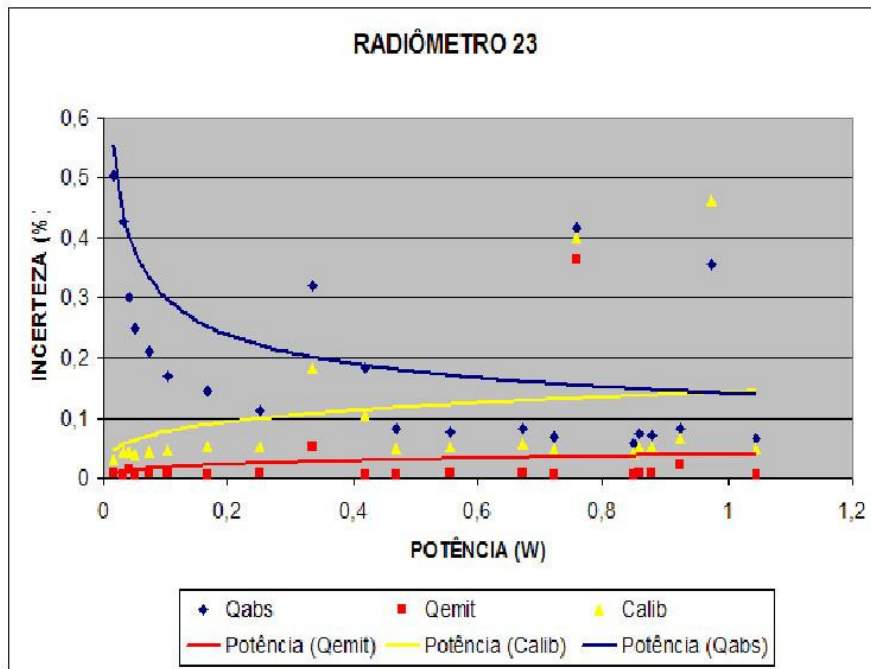


Figura 10 – Ampliação das curvas de desempenho do radiômetro 23

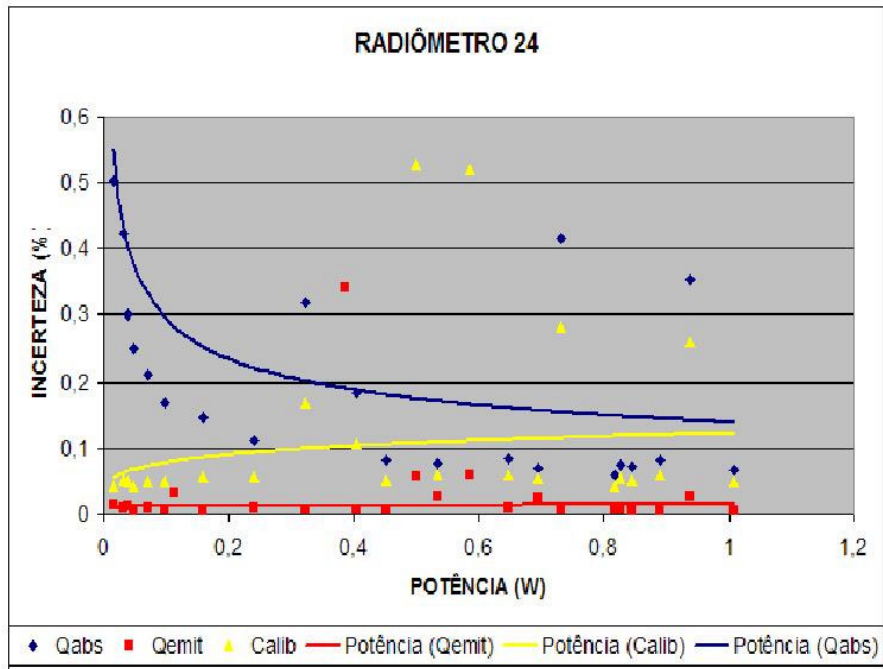


Figura 11 – Ampliação das curvas de desempenho do radiômetro 24

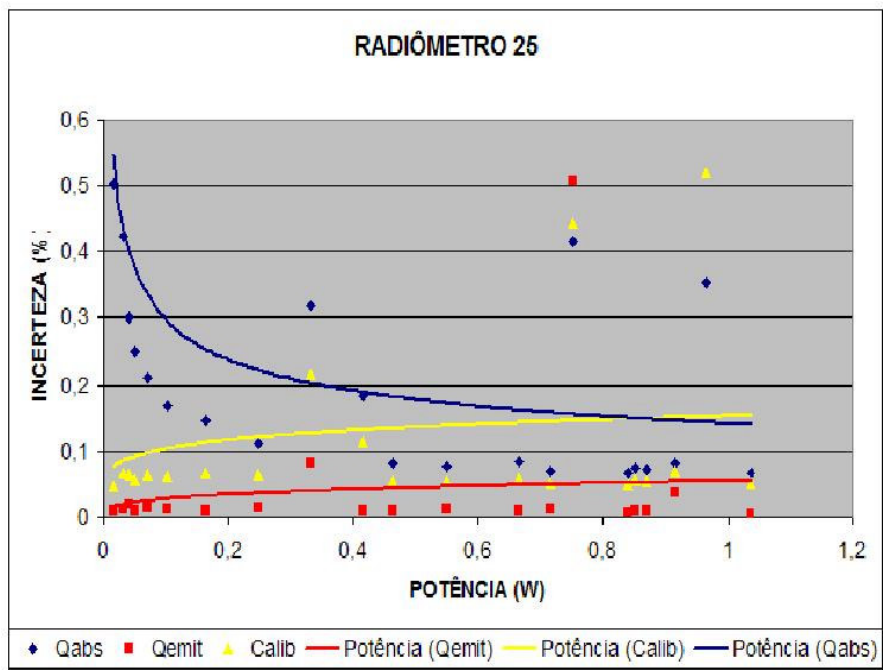


Figura 12 – Ampliação das curvas de desempenho do radiômetro 25

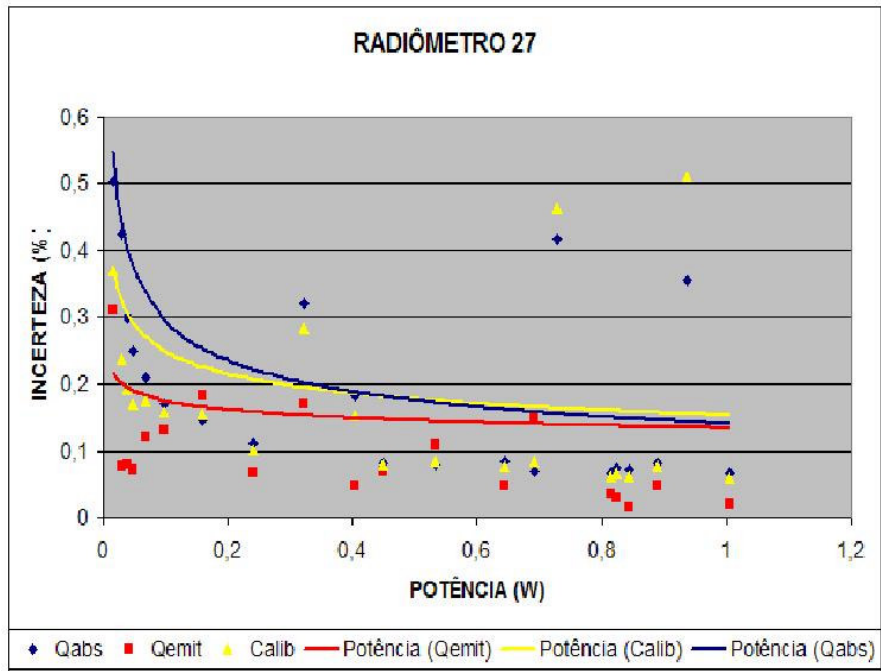


Figura 13 – Ampliação das curvas de desempenho do radiômetro 27

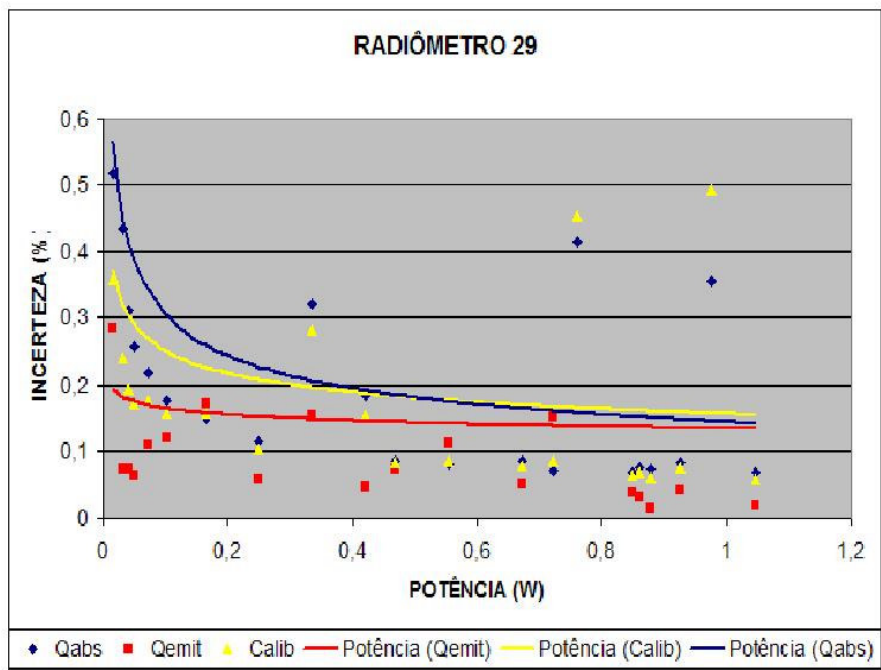


Figura 14 – Ampliação das curvas de desempenho do radiômetro 29

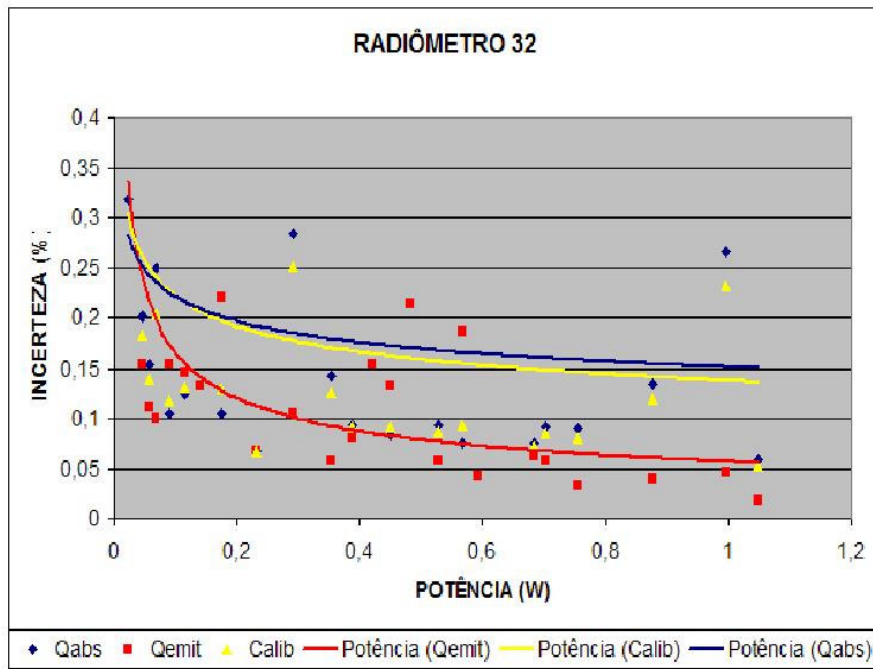


Figura 15 – Ampliação das curvas de desempenho do radiômetro 32

Cabe agora analisar as principais fontes de erro, de forma a explicar satisfatoriamente os motivos que levaram alguns radiômetros a apresentarem comportamentos anômalos referentes às curvas de fluxo de calor absorvido e fluxo de calor emitido, mostrando tendência de aumento da incerteza na medida em que se aumentava a potência incidente no radiômetro – o contrário do esperado teoricamente.

Os testes estiveram sujeitos a variadas formas de erros. Para se exemplificar, os intervalos de convergência podiam não ter sido alcançados até o início da aquisição de dados – o que era algo esperado nas respectivas fases. Outro fator que foi fonte de erros da calibração é que o sistema de registro de dados não fazia a aquisição de todos os termopares instantaneamente, isto é, os dados dos termopares eram verificados uns após os outros, de forma que entre o primeiro e o último termopar havia uma diferença de tempo que foi relevante quando se levava em conta o desempenho conjunto dos mesmos, pois a interpretação feita levava em consideração que os dados eram adquiridos instantaneamente.

Além disso, era esperado que o próprio radiador de grade não tivesse comportamento ideal (o que se resume em uma emissão homogênea de calor ao longo do comprimento do tubo), definitivamente expondo algumas regiões da placa – bem como os radiômetros situados naquela região – a flutuações de emissão de carga térmica durante o teste.

CAPÍTULO 4 – EMPENHO ATUAL

Passada a fase de estudo de radiadores de grade dispostos em câmaras de formato quadrado, passa-se à etapa de estudo em câmaras de formato oval/elíptico, que representa mais significativamente a maioria das câmaras do satélite, principalmente as imagiadoras. As Figuras 16 e 17 abaixo ilustram, respectivamente, o desenho esquemático de uma câmara imagiadora de formato elíptico e o modelo estrutural construído.

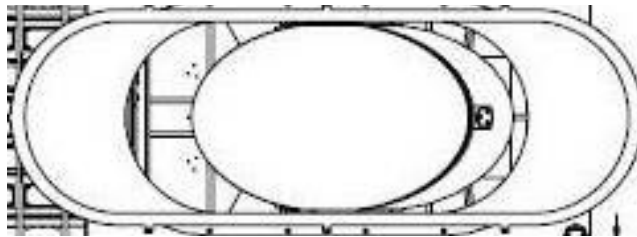


Figura 16 – Ilustração de uma câmara imagiadora de satélite

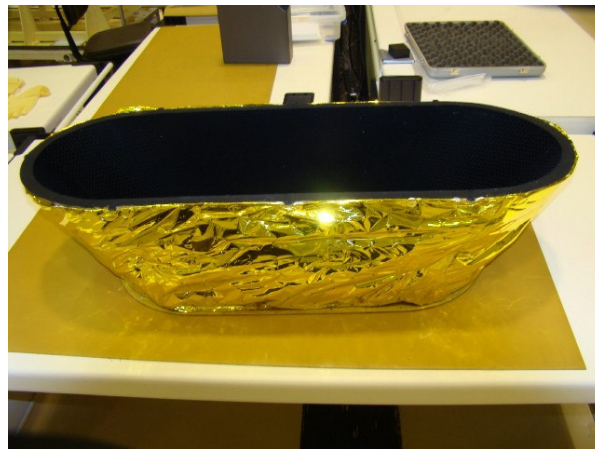


Figura 17 – Modelo estrutural de uma câmara imagiadora de satélite

Como se pode observar, a simulação de incidência de cargas térmicas deve levar em conta, agora, os efeitos que os fluxos de calor eminentes dos radiadores de grades terão na uniformidade nesse tipo de região. A Figura 18 a seguir mostra o modelo estrutural da câmara oval sobre a qual será estudado a uniformidade de distribuição de cargas térmicas.

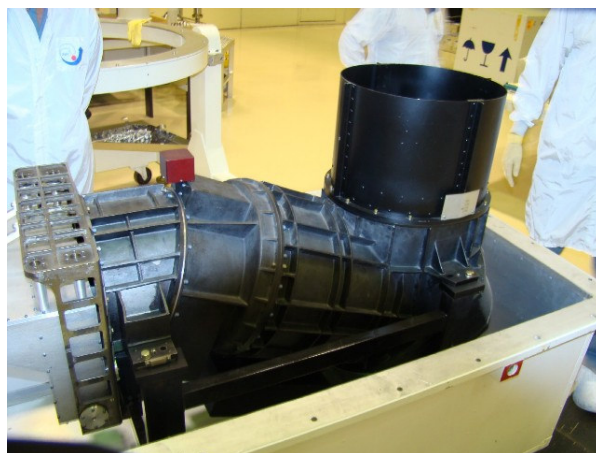


Figura 18 - Modelo estrutural da câmara Imagiadora a ser estudada

Para que os efeitos desse tipo de perda de calor sejam minimizados, há 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.

A Tabela 1 abaixo ilustra a variedade de CAL-RODS disponíveis no laboratório, a partir do qual o projeto de estruturação da grade de radiadores deve ser definida.

Tabela 1 – Listagem dos radiadores de grade disponíveis

CAL-RODS EXISTENTES NO LIT			
DIÂMETRO (mm)	COMP. TOTAL (mm)	COMP. ÚTIL (mm)	QUANTIDADE
9,525	711,2	539,75	24
9,525	508	33,655	28
9,525	406,4	234,95	10
12,065	762	587,375	15
12,065	812,8	638,175	15
9,525	812,8	641,35	15
12,065	457,2	282,575	15
12,065	711,2	536,575	15
12,065	406,4	231,775	15
6,604	304,8	190,5	15
6,248	304,8	180,848	15
5,08	254	177,8	15
5,08	203,2	127	15

As Figuras 19 e 20 abaixo ilustram as etapas de dimensionamento do baffle da câmara a ser estudada, bem como a melhor distribuição possível de radiadores infravermelhos na superfície da mesma.

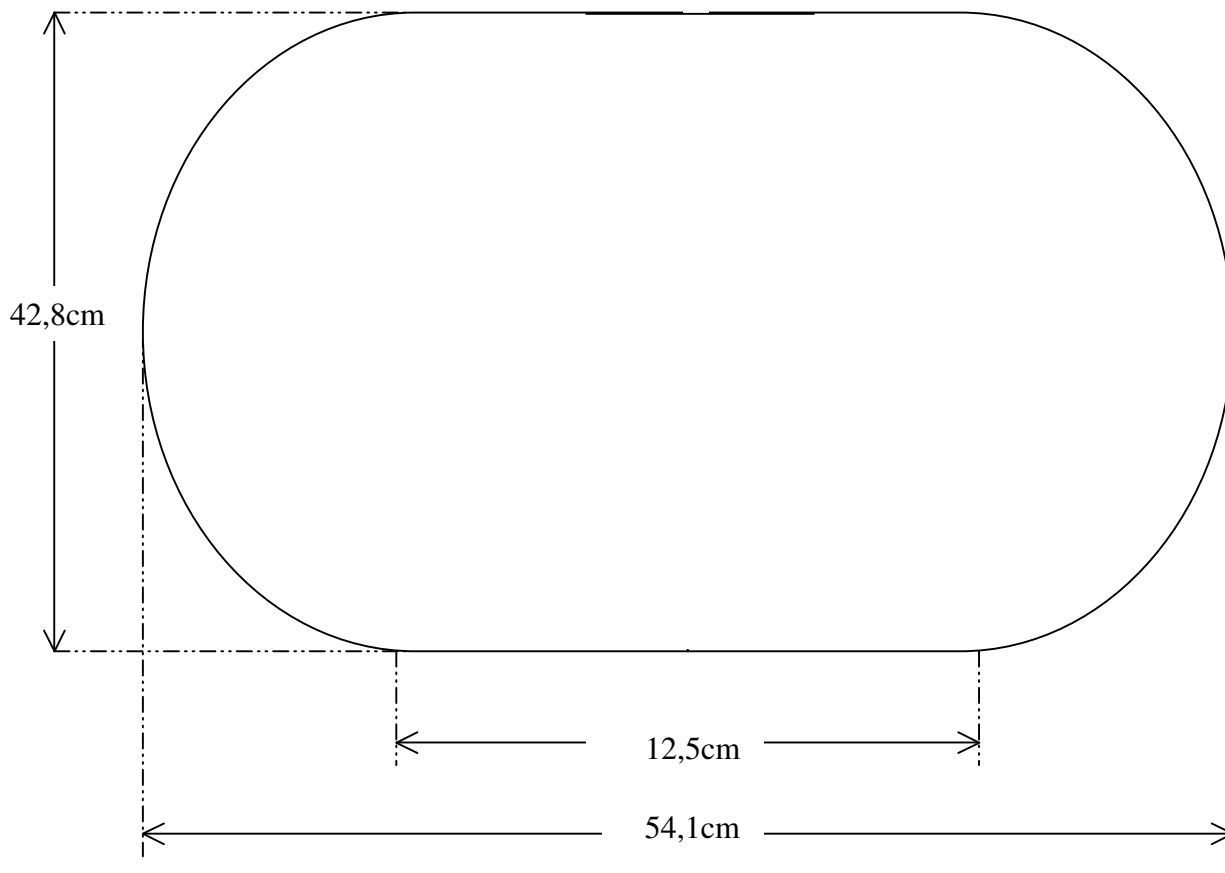


Figura 19 –Especificações do modelo estrutural

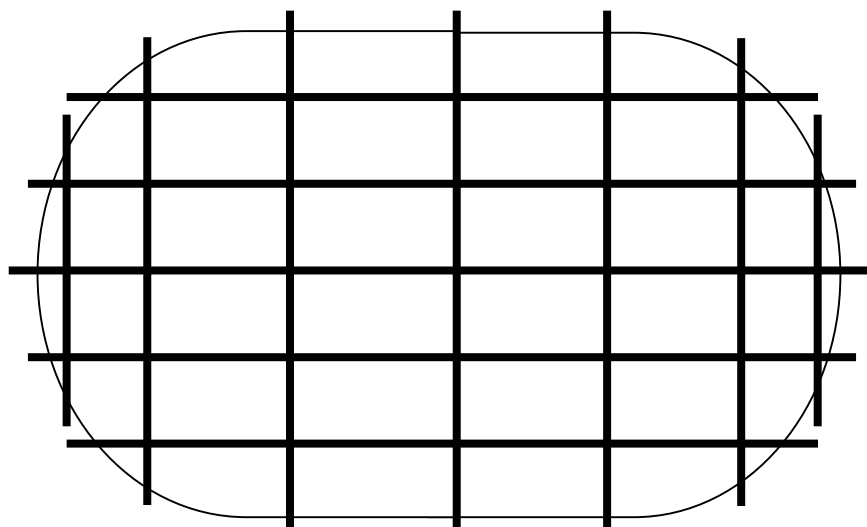


Figura 20 – Exemplo de distribuição dos CAL-RODS

Medições de uma réplica do baffle construída a partir das especificações do modelo estrutural servem de base para a construção do IRA respectivo para essa câmara. Essa é a etapa em que se encontra este projeto de iniciação científica. Ao término desse processo, seguem novamente os testes de uniformidade em busca de alcançar os padrões de qualidade do programa CBERS.

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES

O valor da incerteza média de calibração dos radiômetros foi satisfatório. O desenvolvimento de métodos de simulação dos componentes do satélite foi bem sucedido para a simulação de câmaras/placas de formato quadrado. Com uma uniformidade de 95,2% e uma incerteza de 0,3% na incidência de carga térmica, o processo adotado no L.I.T. se enquadra dentro dos padrões do projeto CBERS, que adota padrão de uniformidade de 95%. Outro ponto importante foi que o comportamento das curvas de calibração e fluxo de calor saiu como o previsto para a maioria dos radiômetros para os radiadores de grade de formato quadrado.

O empenho atual consiste em estudar câmaras com formatos elípticos, sendo passo seguinte àquele do estudo de IRAs de formato retangular. Os passos referentes à construção de uma estrutura réplica de uma das câmaras do satélite já foi concluída no laboratório. Segue agora o estudo da melhor distribuição de radiadores que promova também uma uniformidade dentro dos padrões de qualidade especificados no programa internacional em parceria com a China.

Vale notar que o trabalho apresentado no presente relatório refere-se aos meses de outubro/2007 a junho/2008, em que houve a renovação da Bolsa de Iniciação Científica.

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 ao professor José Sérgio de Almeida, que orientou o trabalho, e aos Doutores Márcio Bueno dos Santos, Ezio Castejon Garcia e Dênio Lemos Panissi, 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 – GRÁFICOS DOS RADIÔMETROS

Abaixo seguem os gráficos de Incerteza x Potência dos radiômetros de 1 a 21, 26, 28, 30, 31, 33, 34, 35 e 36, cujas curvas apresentaram padrão dentro do esperado.

A escala do eixo relativo às incertezas foi diminuída a fim de mostrar melhor o comportamento das curvas. Em consequência disso, alguns pontos foram omitidos.

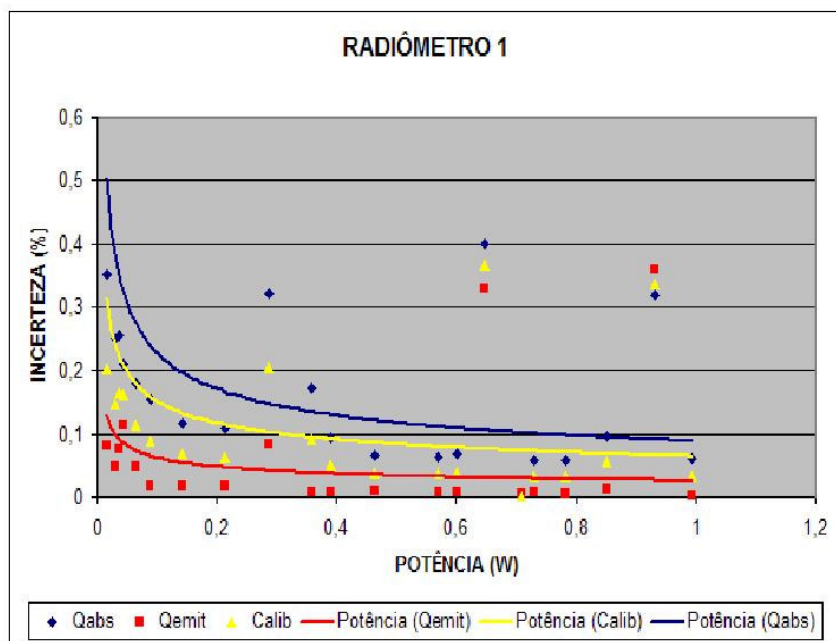


Figura 10 – Ampliação das curvas de desempenho do radiômetro 1

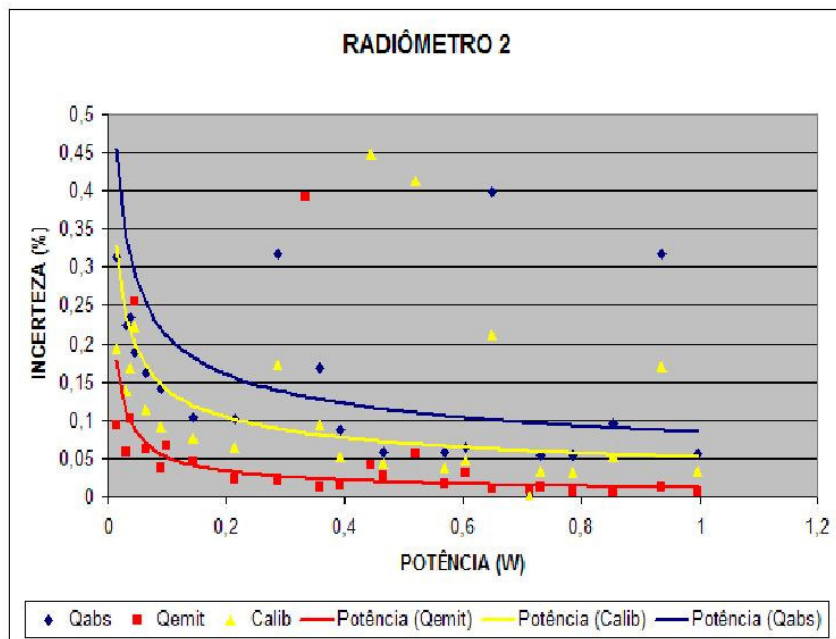


Figura 12 – Ampliação das curvas de desempenho do radiômetro 2

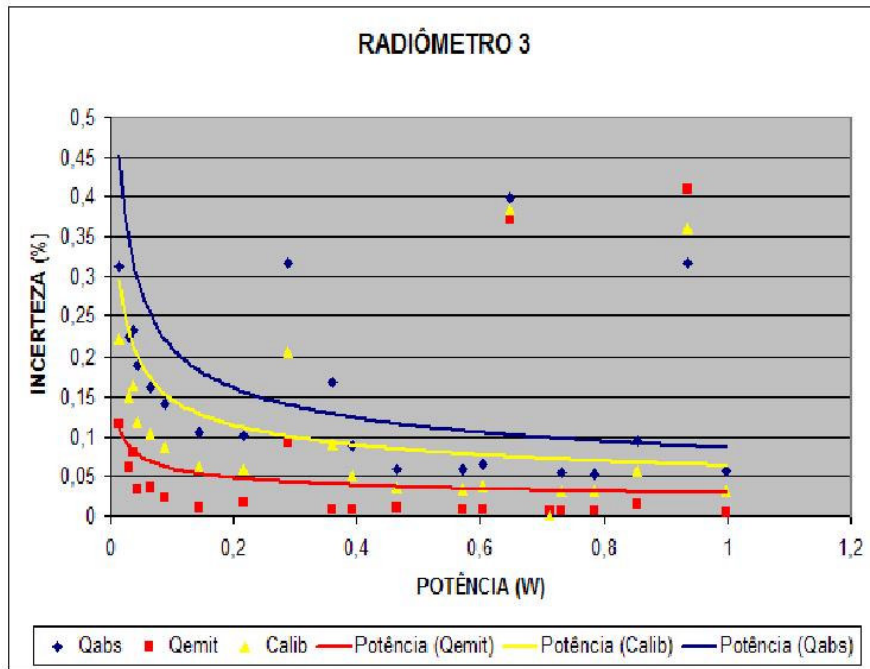


Figura 14 – Ampliação das curvas de desempenho do radiômetro 3

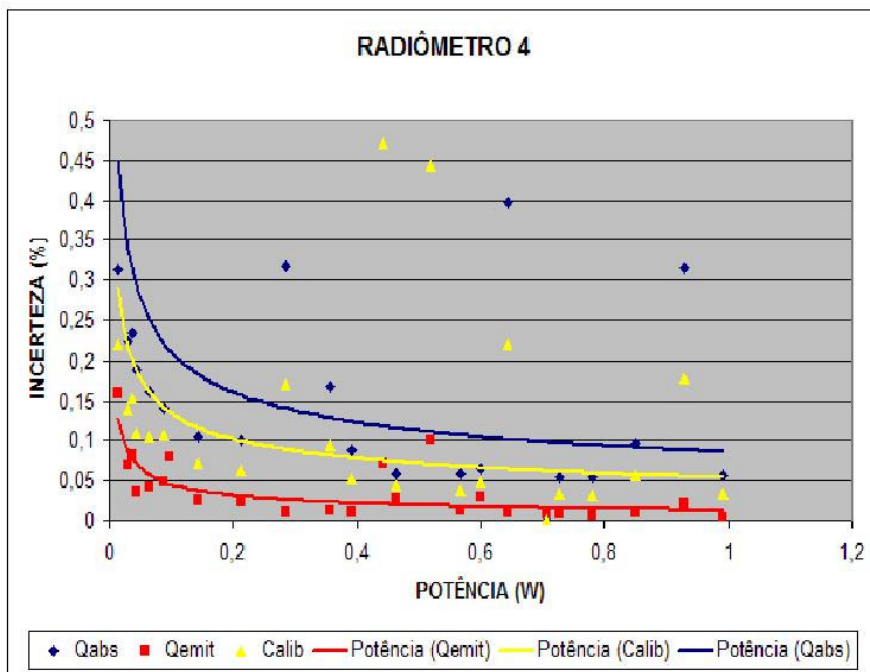


Figura 16 – Ampliação das curvas de desempenho do radiômetro 4

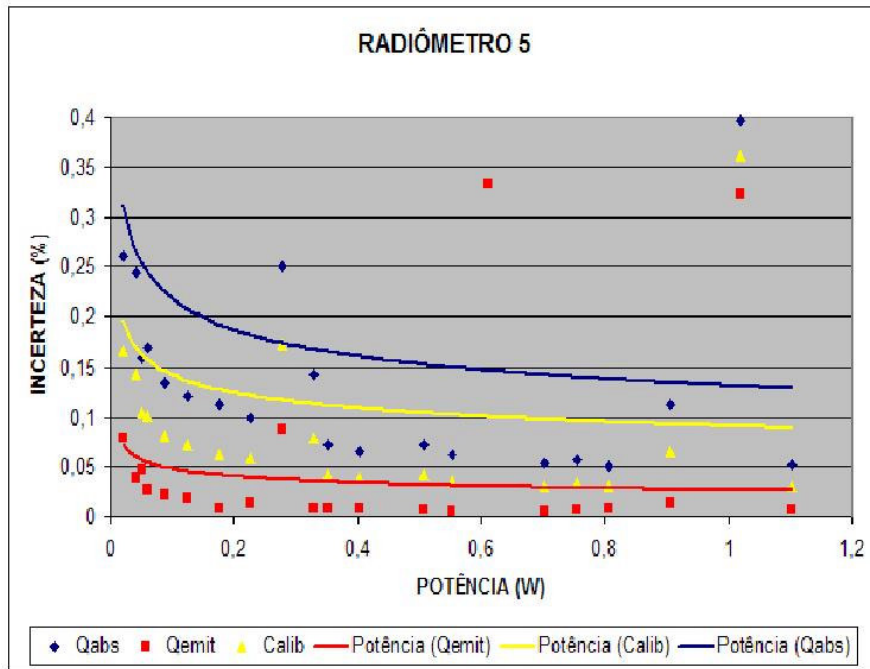


Figura 18 – Ampliação das curvas de desempenho do radiômetro 5

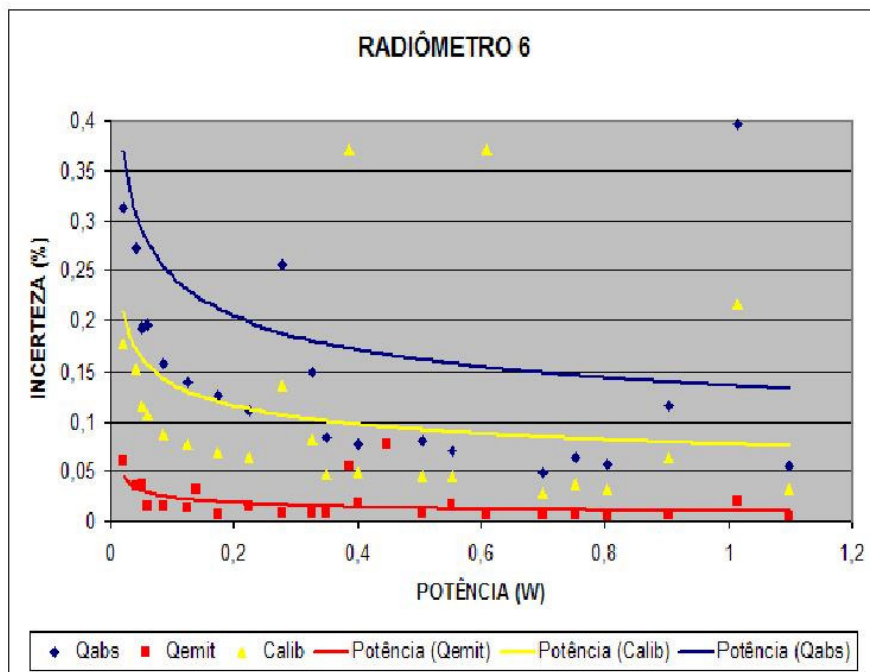


Figura 20 – Ampliação das curvas de desempenho do radiômetro 6

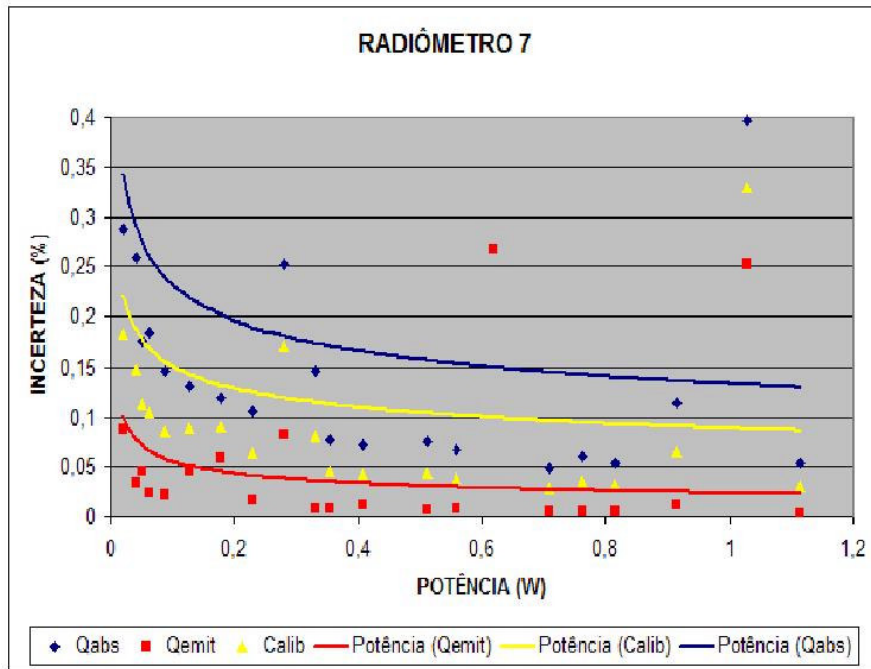


Figura 22 – Ampliação das curvas de desempenho do radiômetro 7

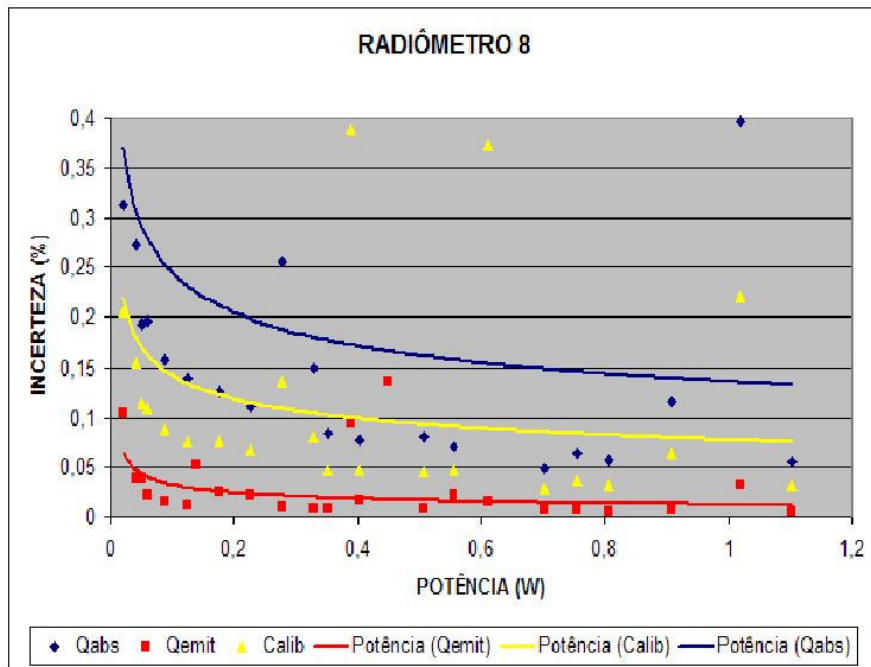


Figura 24 – Ampliação das curvas de desempenho do radiômetro 8

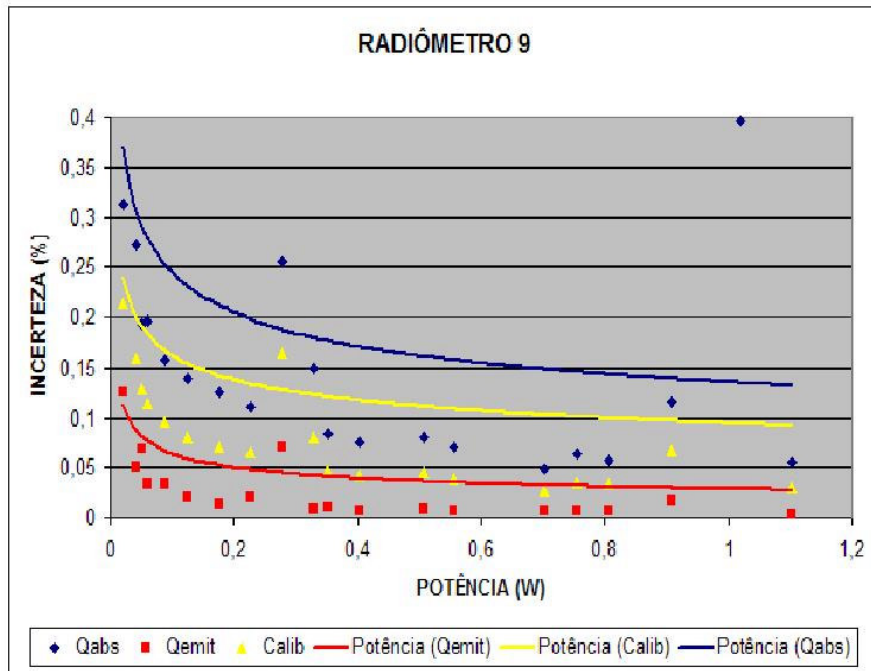


Figura 26 – Ampliação das curvas de desempenho do radiômetro 9

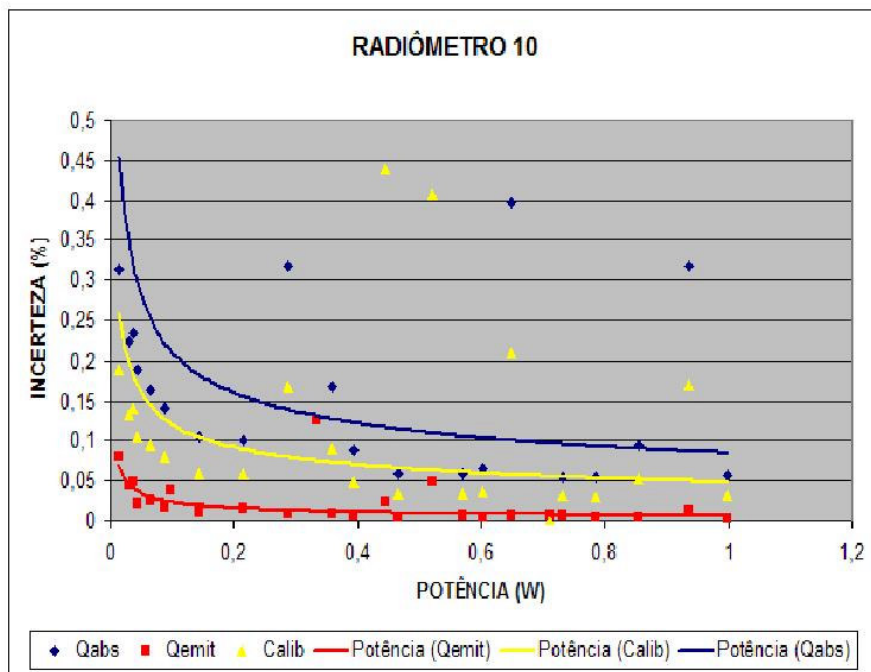


Figura 28 – Ampliação das curvas de desempenho do radiômetro 10

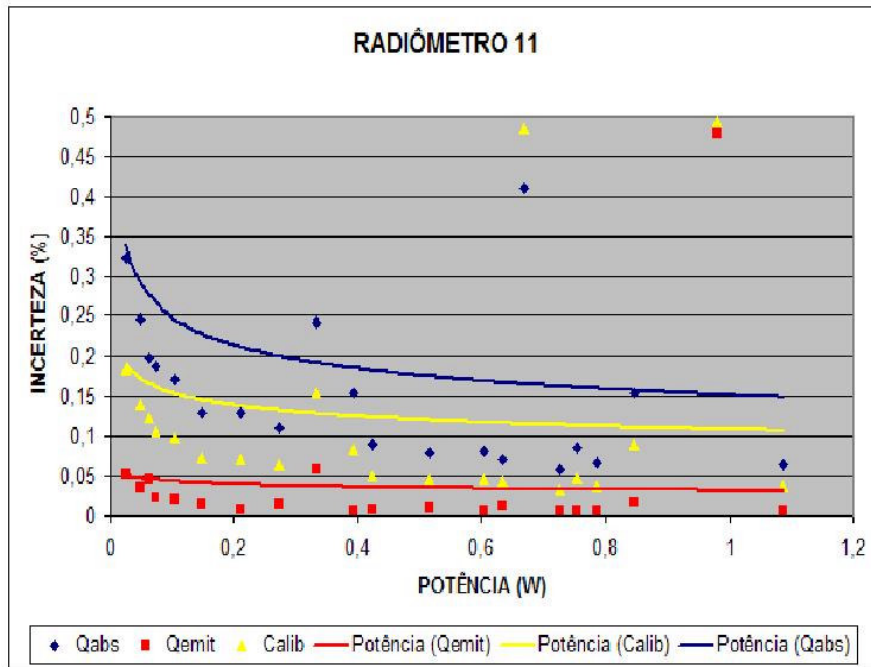


Figura 30 – Ampliação das curvas de desempenho do radiômetro 11

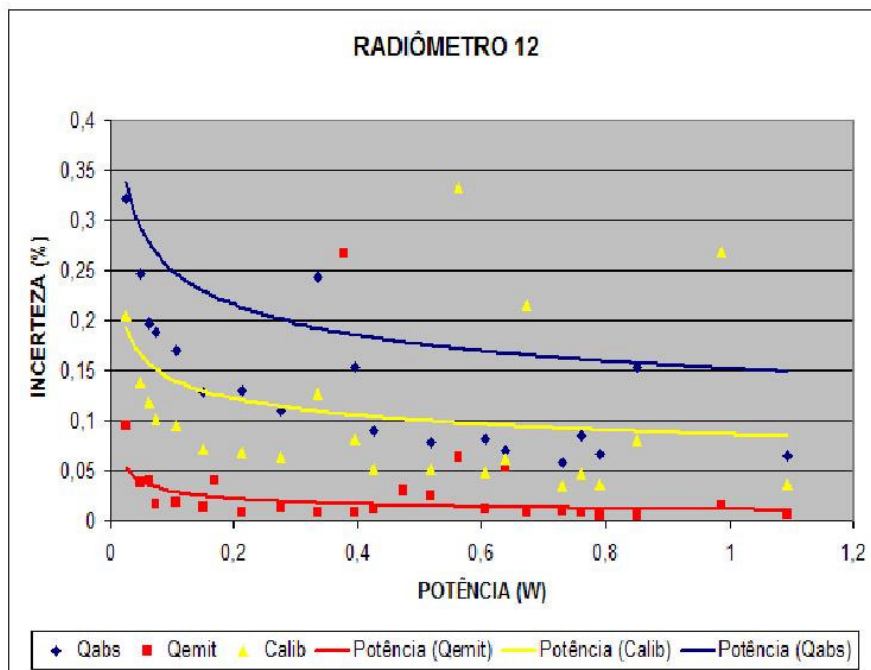


Figura 32 – Ampliação das curvas de desempenho do radiômetro 12

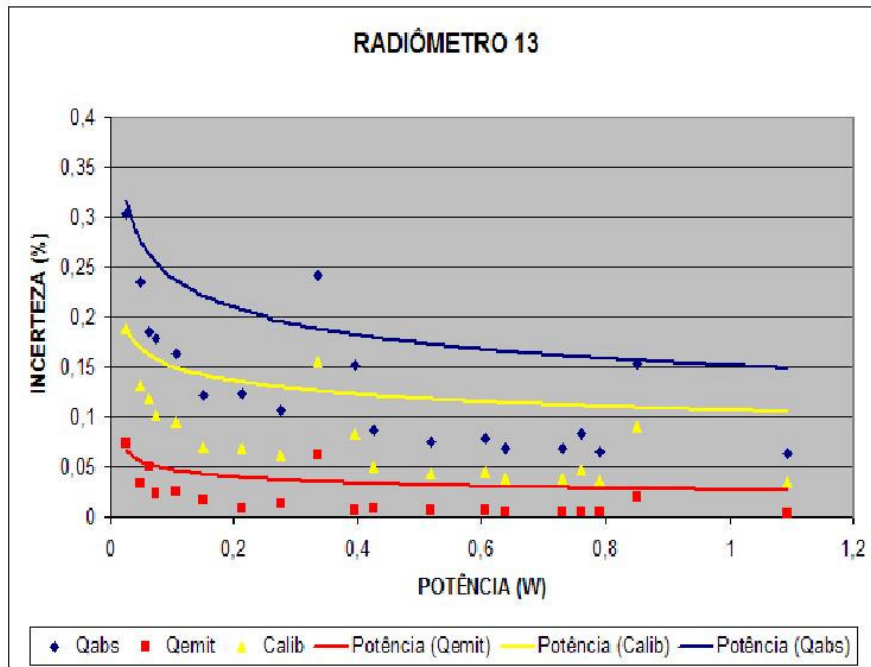


Figura 34 – Ampliação das curvas de desempenho do radiômetro 13

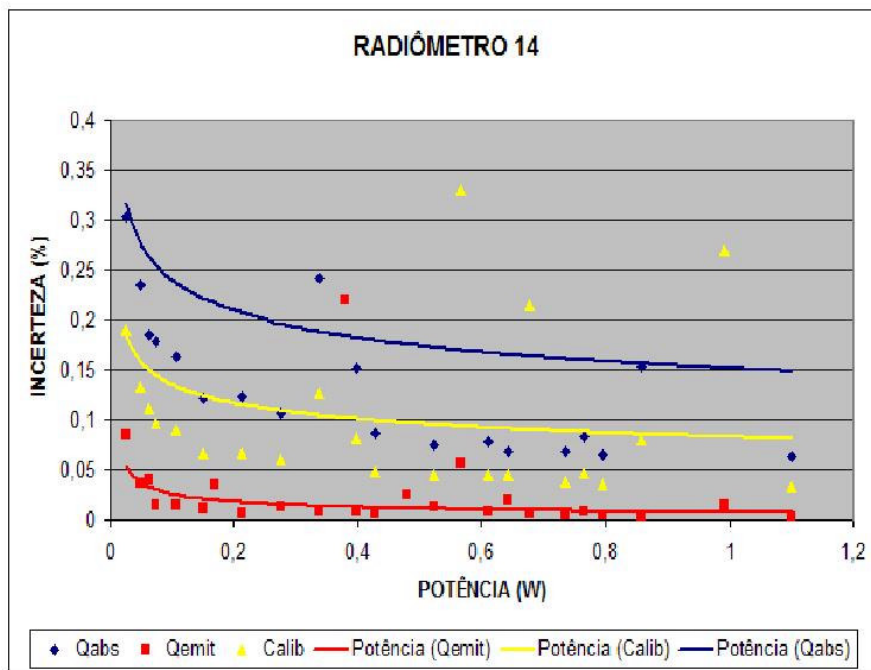


Figura 36 – Ampliação das curvas de desempenho do radiômetro 14

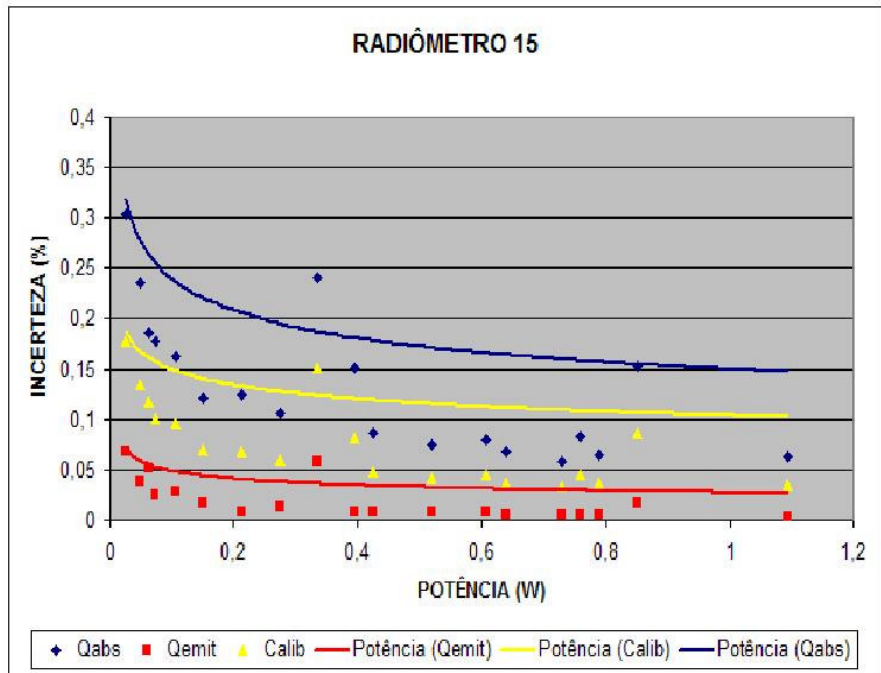


Figura 38 – Ampliação das curvas de desempenho do radiômetro 15

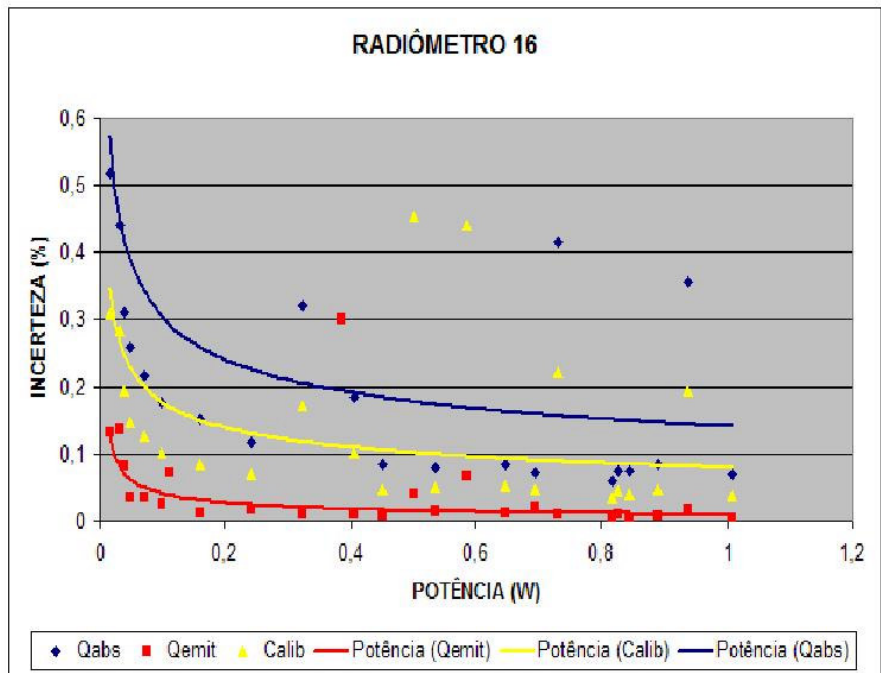


Figura 40 – Ampliação das curvas de desempenho do radiômetro 16

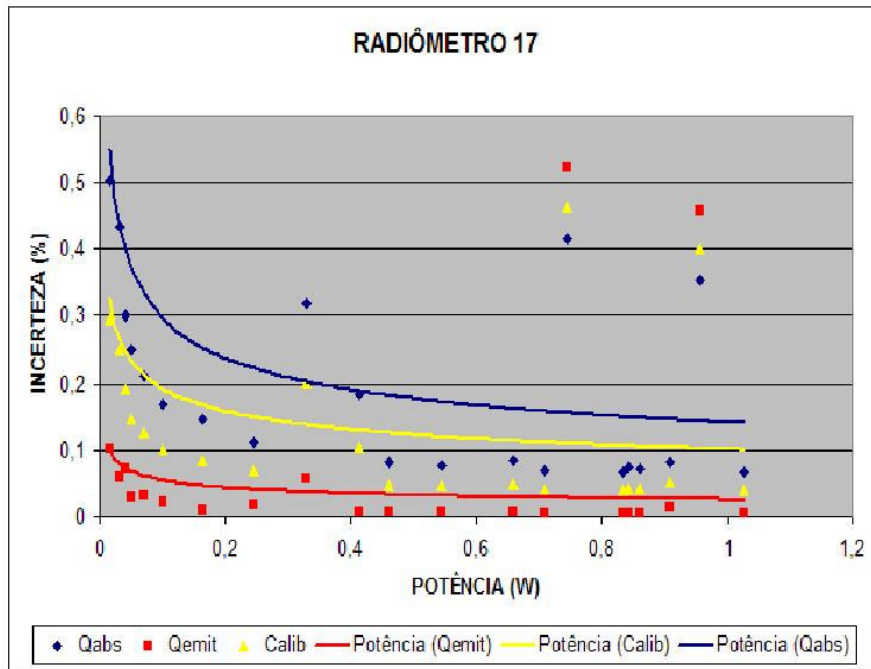


Figura 42 – Ampliação das curvas de desempenho do radiômetro 17

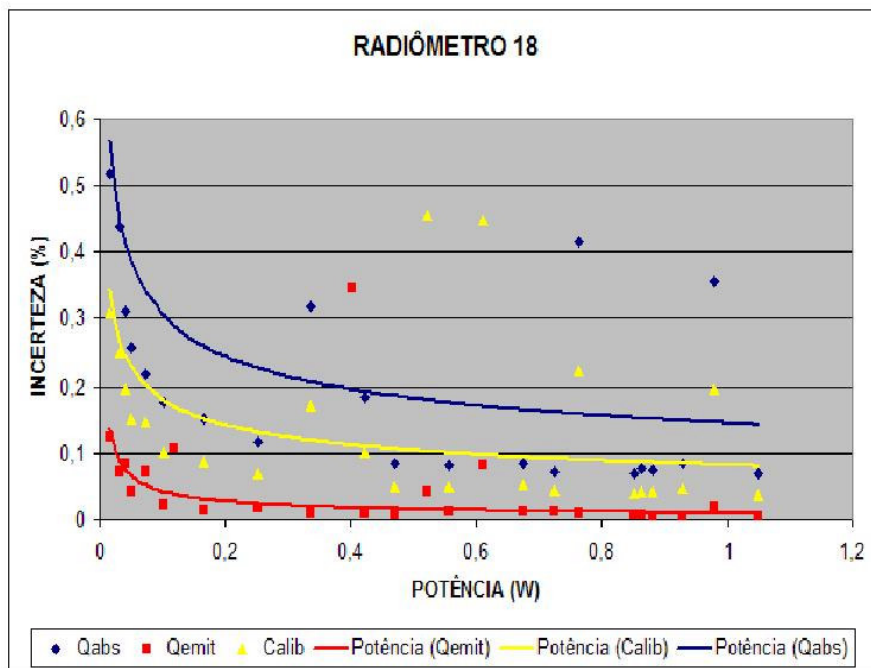


Figura 44 – Ampliação das curvas de desempenho do radiômetro 18

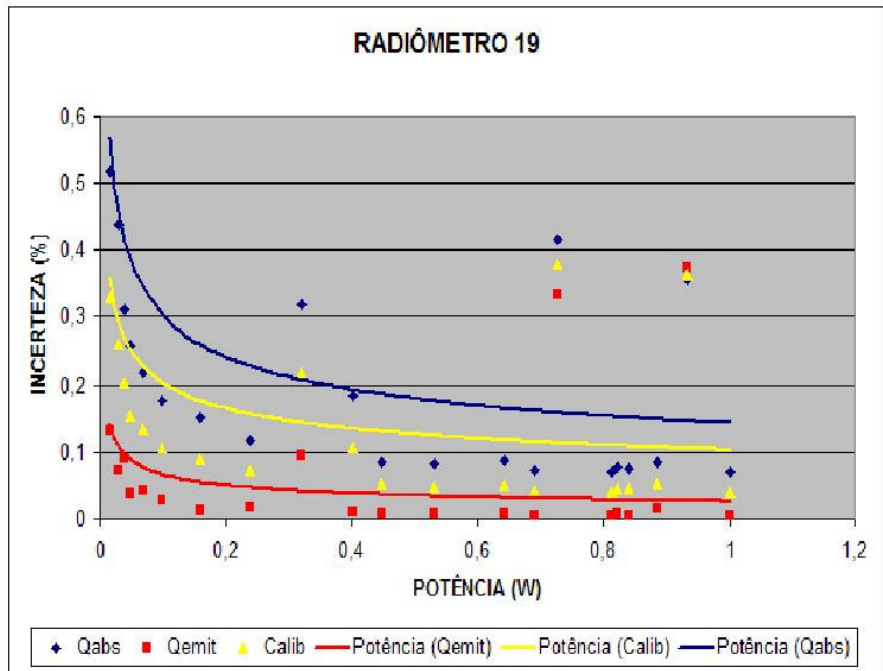


Figura 46 – Ampliação das curvas de desempenho do radiômetro 19

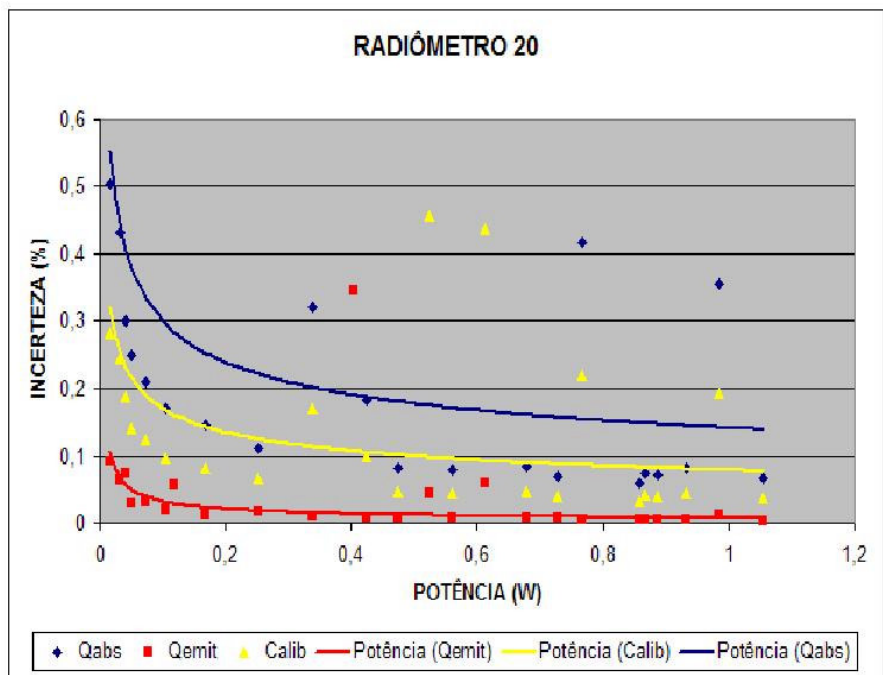


Figura 48 – Ampliação das curvas de desempenho do radiômetro 20

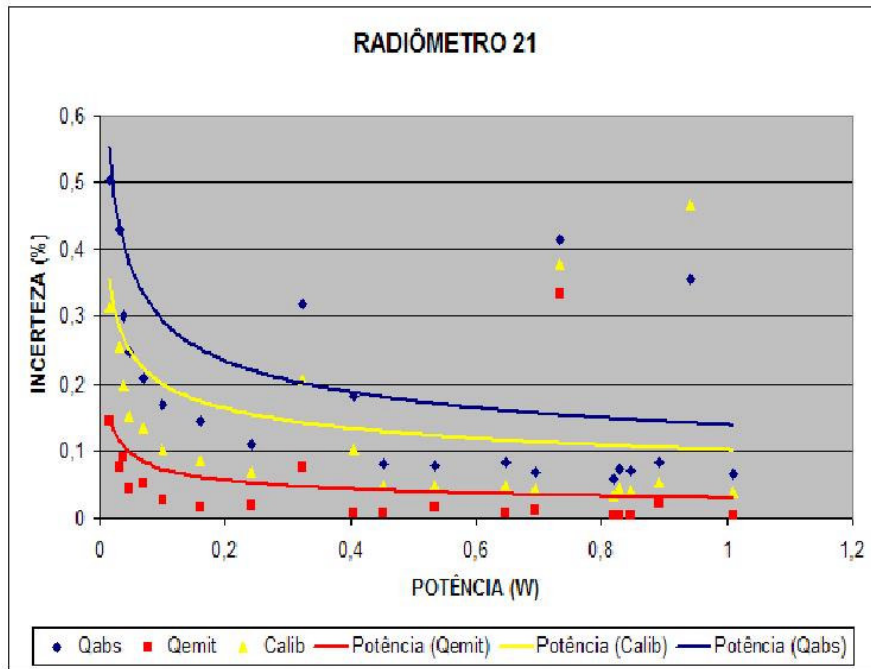


Figura 50 – Ampliação das curvas de desempenho do radiômetro 21

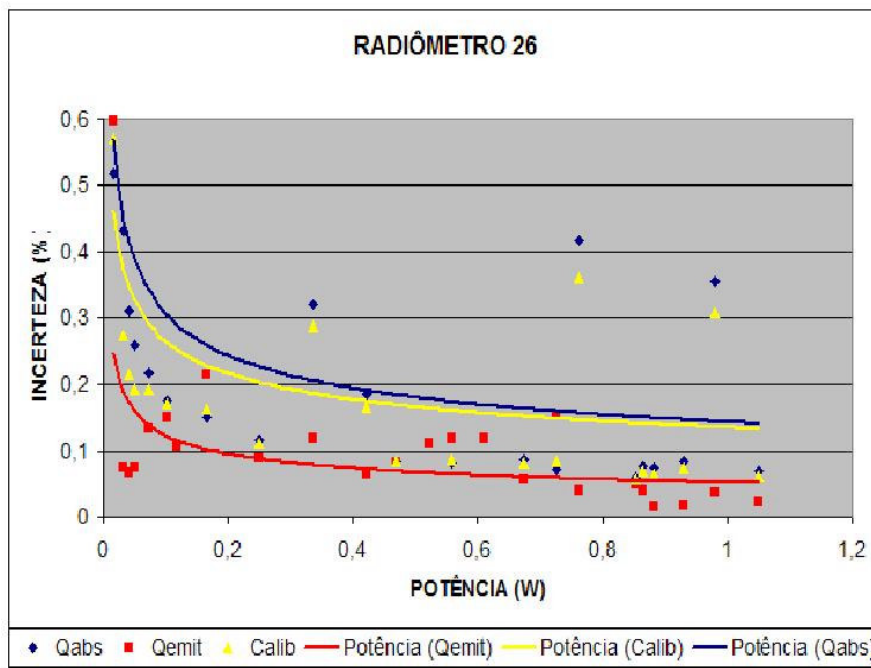


Figura 60 – Ampliação das curvas de desempenho do radiômetro 26

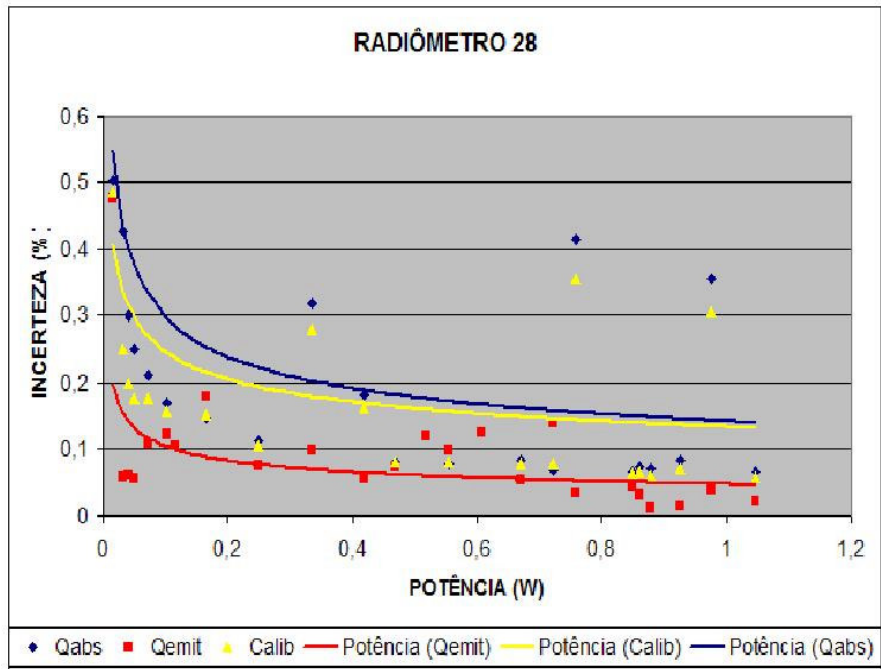


Figura 64 – Ampliação das curvas de desempenho do radiômetro 28

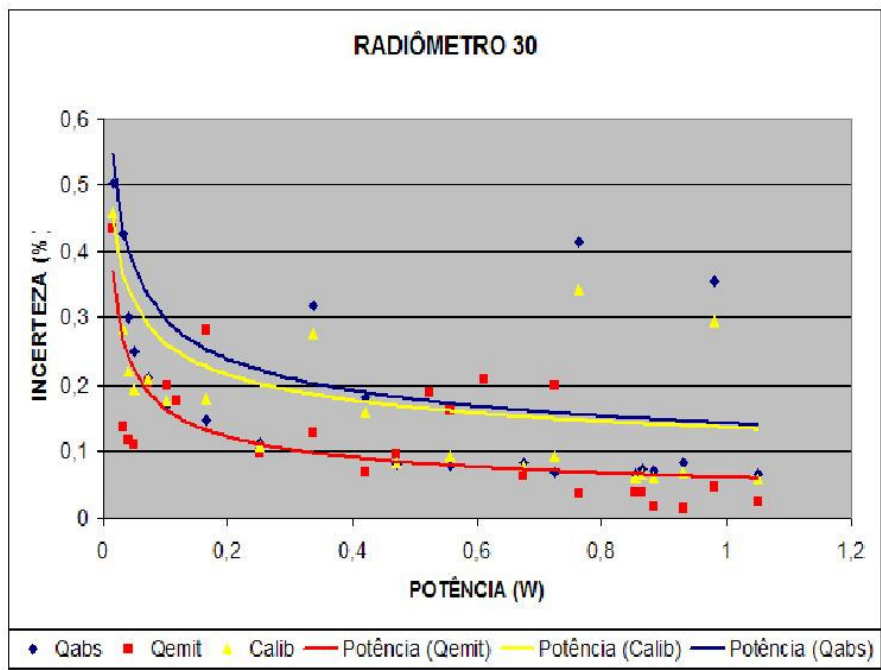


Figura 68 – Ampliação das curvas de desempenho do radiômetro 30

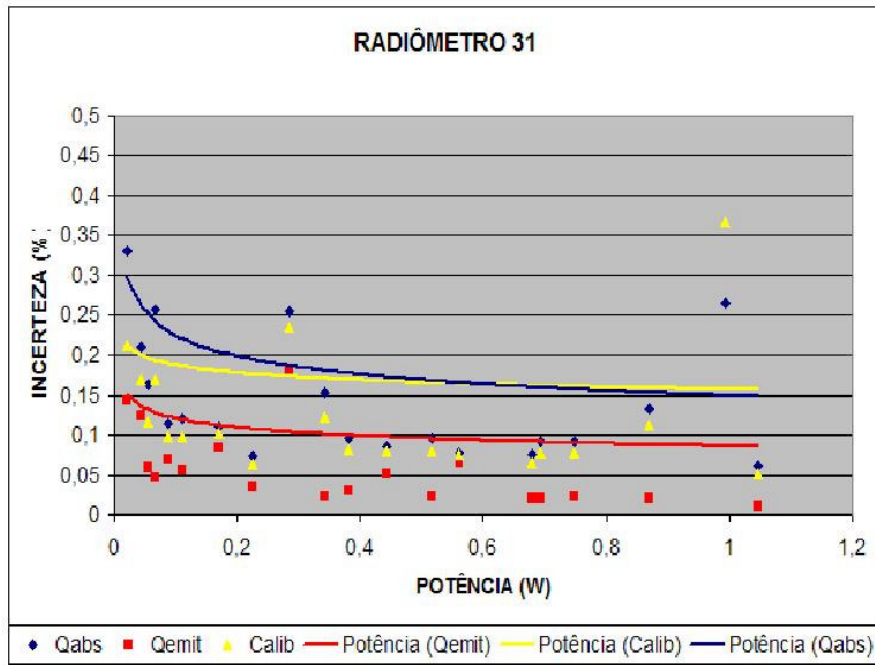


Figura 70 – Ampliação das curvas de desempenho do radiômetro 31

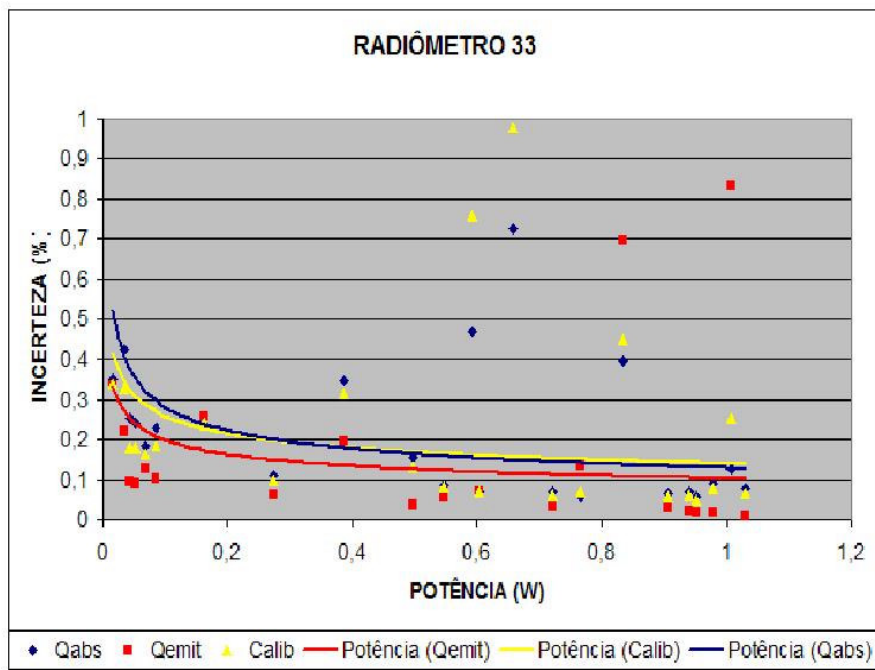


Figura 74 – Ampliação das curvas de desempenho do radiômetro 33

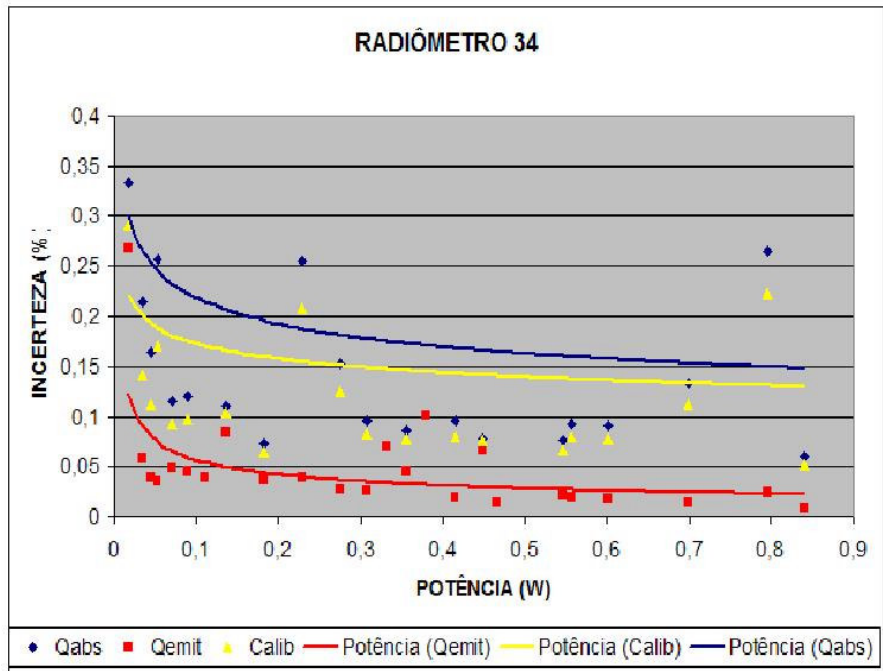


Figura 76 – Ampliação das curvas de desempenho do radiômetro 34

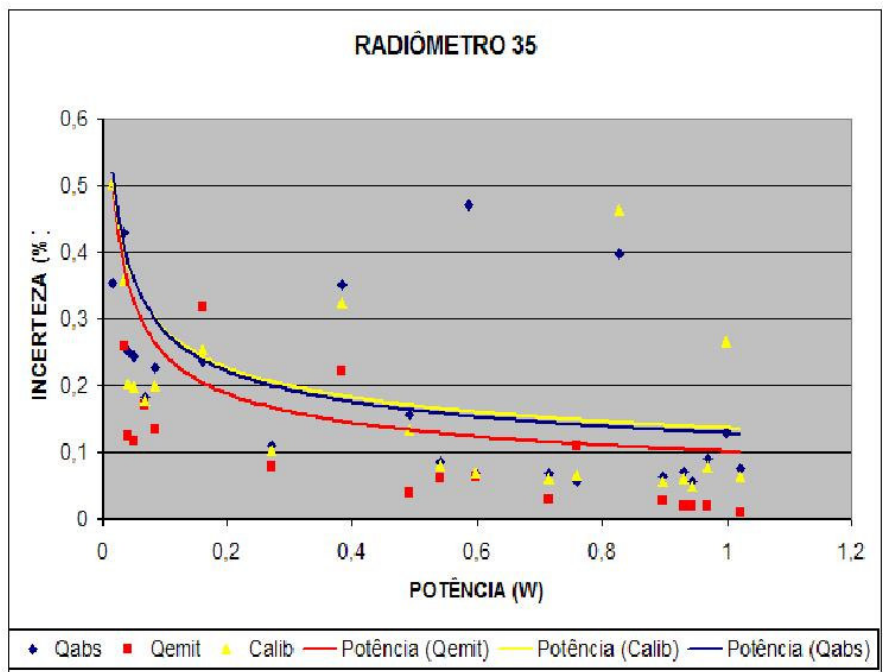


Figura 78 – Ampliação das curvas de desempenho do radiômetro 35

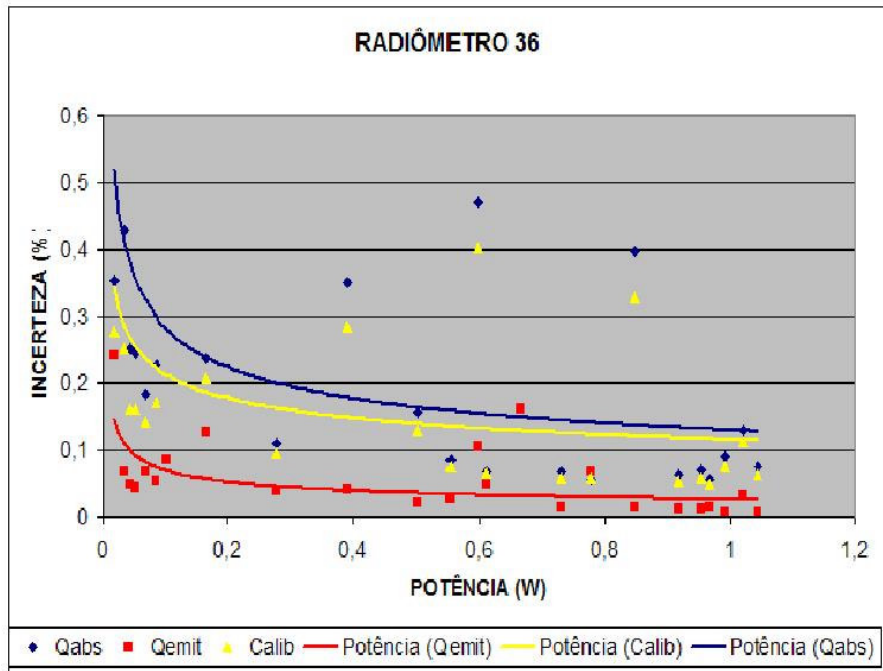


Figura 80 – Ampliação das curvas de desempenho do radiômetro 36

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:

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

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

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

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

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 calores absorvido e residual, respectivamente.

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

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