



RADIÔMETRO ABSOLUTO PARA MEDIÇÃO DA TSI

LOPES, A. G.¹, BERNI, L. A.¹, VILELA, W.A.¹, IRITA, R. T.¹, SAVONOV, G. S.¹,
CARLESSO, F.¹, VIEIRA, L. E. A.¹, MIRANDA, E. L.¹.

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil
Aluno de Mestrado do curso de Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores - CMS.

andre.lopes@inpe.br

Resumo. A radiação solar que chega no topo da atmosfera terrestre é uma das mais importantes variáveis que compõem os modelos matemáticos dedicados às análises das mudanças climáticas. A medição da Irradiância Solar Total (TSI) exige a utilização de radiômetros especiais de alta precisão e sondas ou satélites para medição fora da atmosfera terrestre. Dentro deste contexto, o Grupo de Dispositivos Fotovoltaicos – GDF do INPE está desenvolvendo um protótipo de um radiômetro absoluto espacial afim de estudar e compreender a teoria sobre este tipo de dispositivo e com os resultados encontrados, auxiliar na construção do modelo de voo para uma futura missão espacial do INPE que irá estudar os fenômenos solares.

Palavras-chave: Radiação Solar, Radiômetro absoluto; TSI; Mudanças climáticas.

1. Introdução

A radiação solar é a principal fonte de energia da Terra, que supera em até 2500 vezes as demais fontes de energias somadas, tais como geotérmica, cósmica, eólica, etc, (CARLESSO, 2018). A radiação solar influencia diretamente o clima da Terra, sendo esta uma das 50 variáveis que compõem os modelos matemáticos dedicados às análises das mudanças climáticas em todo o mundo, segundo *United Nations Framework Convention on Climate Change* (UNFCCC) e *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC). O conhecimento preciso do valor da radiação solar que chega a Terra é de fundamental importância na determinação precisa gerada pelos modelos de previsão da alteração no clima do planeta Terra.

As medidas de irradiância solar são definidas como potência da energia vindo do Sol por unidade de área (perpendicular aos raios solares) normalizado a 1 UA (unidade astronômica). Esta pode ser descrita em termos de irradiância solar total (TSI) (CARLESSO, 2018) A medição da TSI teve seu primeiro registro em 1612, e com o passar dos anos, foi-se conseguindo estimar o valor da TSI com mais precisão, cujos resultados preliminares apresentaram uma grande incerteza devido as influências atmosféricas (KOPP, 2019). Na década de 1970, iniciou-se as medições em ambiente espacial, sendo possível a aquisição de dados mais precisos, capazes de identificar com uma melhor confiabilidade e maior sensibilidade, as variações da energia transmitida pelo Sol (KOPP et al., 2012). Assim, ao longo das décadas seguintes, foi-se aprimorando a construção dos radiômetros utilizados nas



missões espaciais, tornando-os ainda mais precisos para os estudos sobre os fenômenos solares (CARLESSO, 2018).

Para poder contribuir cientificamente para os estudos sobre os fenômenos solares e uma melhor compreensão das mudanças climáticas no planeta Terra, o INPE está desenvolvendo um modelo de radiômetro absoluto para uma futura missão espacial, tendo como objetivo principal a análise dos fenômenos solares em ambiente de espaço profundo. O GDF/INPE em colaboração com a CEA/INPE está desenvolvendo o primeiro protótipo deste dispositivo no Brasil. Este primeiro protótipo irá auxiliar no estudo e compreensão deste tipo de sensor, permitindo capacitar o INPE para a construção do modelo definitivo que irá voar na missão especial proposta para o futuro próximo..

2. Metodologia

Radiometria é a ciência que estuda a radiação eletromagnética em termos de potência, polarização, conteúdo espectral e outros parâmetros relevantes, provenientes de uma determinada fonte. Um instrumento que mede a radiação eletromagnética é chamado genericamente de radiômetro. Os radiômetros dedicados a medir a TSI são denominados radiômetros absolutos, cujo a resposta obtida é o valor integral da radiação solar em toda a sua faixa espectral sem a interferência da atmosfera (DATLA; PARR, 2005).

O princípio de funcionamento dos radiômetros absolutos consiste na obtenção da relação entre o fluxo radiante, proveniente do Sol, e a variação térmica de um elemento sensor que é sensível à esse fluxo radiante. Basicamente todo radiômetro solar absoluto irá conter uma abertura de precisão, um elemento sensor que terá uma superfície absorvedora da radiação solar eletromagnética, uma aleta condutora de calor (*heat link*) que ligará o elemento sensor à um reservatório de calor (*heat sink*), gerando, assim, um fluxo térmico que será proporcional ao fluxo radiante (DATLA; PARR, 2005). A figura 2.1 apresenta um esquema deste tipo de radiômetro, onde podemos observar a entrada óptica que faz admissão da radiação proveniente do Sol. A radiação solar ao incidir numa superfície absorvedora irá se converter em calor que fluirá para um bloco metálico que denominamos de reservatório de calor. O fluxo de calor é diretamente proporcional ao fluxo da radiação que está incidido na superfície absorvedora.

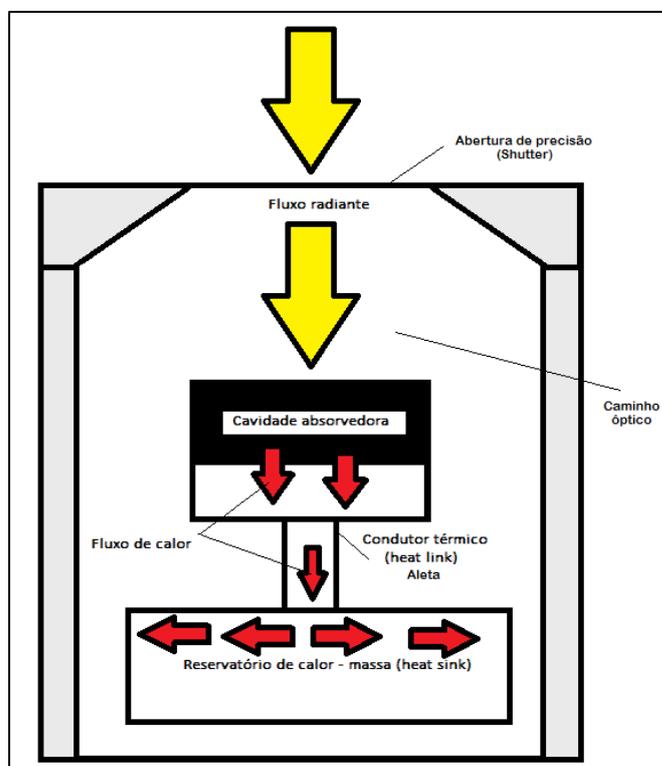
A transferência de calor entre a superfície absorvedora e o reservatório de calor é dada pela equação (2.1) (FOX; RICE, 2005).

$$\Delta T = RQ \left(1 - \exp \left[-\frac{t}{RC} \right] \right) \quad (2.1)$$

Onde ΔT é a diferença de temperatura do elemento sensor em relação a temperatura do reservatório, R é a resistência térmica do sistema, Q é o fluxo radiante que incide sobre o elemento sensor do radiômetro, C é a capacidade térmica do elemento sensor e t é o tempo de exposição do elemento sensor a radiação solar. Mantendo o elemento sensor exposto à uma radiação solar constante, é possível determinar o fluxo da radiação incidente medindo o ΔT entre o elemento sensor e o reservatório de calor.



Figura 2.1 – Diagrama geral de um radiômetro absoluto para medir TSI



Fonte: Adaptado de (DATLA; PARR, 2005)

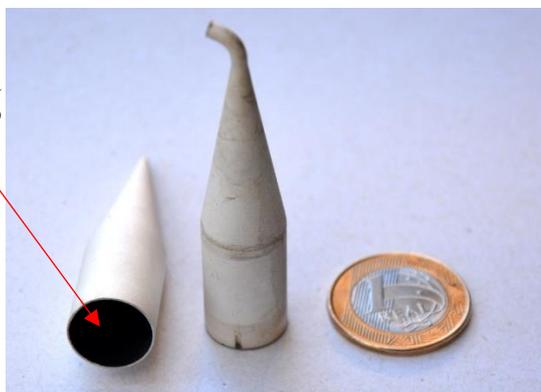
Para estudar o comportamento deste tipo de radiômetro e comparar os dados experimentais com a equação (2.1), construiu-se um radiômetro simplificado para testes. Este radiômetro simplificado foi construído tendo como referência o radiômetro TIM lançado ao espaço a bordo de um satélite de órbita baixa numa missão da Nasa que visava monitorar a radiação solar total e espectral por cinco anos a partir de 2003 (KOPP; LAWRENCE; ROTTMAN, 2004)

O elemento sensor do radiômetro absoluto é constituído basicamente por três componentes. O componente principal é a cavidade absorvedora que tem o formato de cone oco. Ela é confeccionada em prata pura (Ag) para conduzir melhor o calor. A superfície interna do cone é a região absorvedora da radiação solar. Esta superfície é formada por uma camada fina de níquel-fósforo enegrecido (Ni-P) obtida por ataque químico. Esta geometria permite maximizar a absorção da radiação solar que incide dentro do sensor. (CARLESSO, 2018). Na figura 2.2 mostra uma foto do elemento sensor no formato de cone.



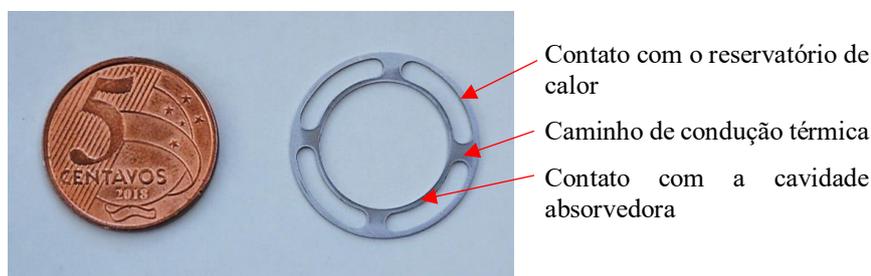
Figura 2.2 – Imagem do elemento sensor no formato de cone oco de prata cuja superfície interna é a região absorvedora da radiação solar

Superfície interna enegrecida para admissão da irradiação solar no elemento sensor



O segundo componente é uma aleta de aço inox. Sua geometria dificulta a condução térmica reduzindo o tempo da transferência de calor da cavidade absorvedora para o reservatório de calor permitindo assim maior ganho de temperatura da cavidade absorvedora, ao mesmo tempo que possibilita o fluxo de calor para a massa quando a cavidade não estiver exposta à radiação solar (FOX; RICE, 2005). A figura 2.3 mostra detalhes desta aleta.

Figura 2.3 – Aleta de aço inox



Fonte: Produção do autor.

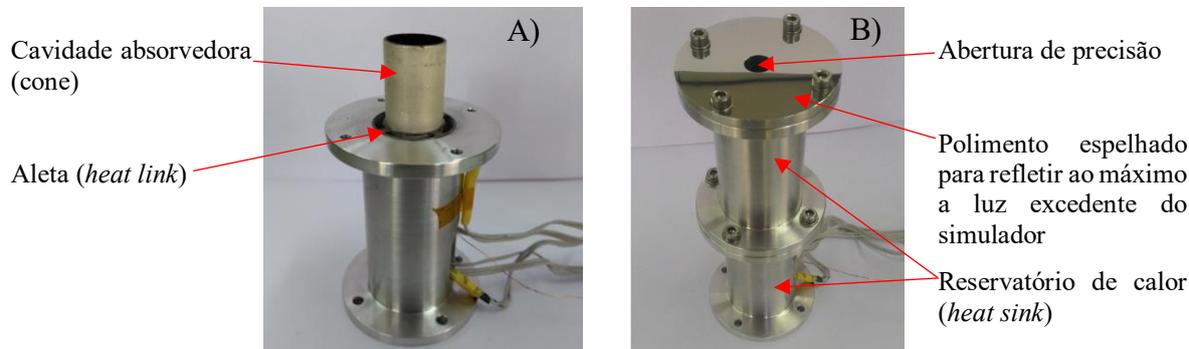
O terceiro componente é o reservatório de calor (heat sink), que foi confeccionado em alumínio com uma massa de 180g. Neste protótipo o reservatório é a própria estrutura do elemento sensor.

Os três componentes são acoplados entre si para formar a estrutura do elemento sensor. Na figura 2.4 A é possível observar todos os componentes do elemento sensor integrados e na figura 2.4 B é mostrado o elemento sensor com a abertura de precisão. A admissão da radiação solar na cavidade absorvedora se dá somente através desta abertura. A Abertura de precisão tem acabamento polido para evitar a dilatação da mesma devido a absorção da radiação incidente.

Para estudar o comportamento térmico do elemento sensor desenvolvido, foram instalados cinco sensores de temperatura do tipo NTC, com área de contato de 2 mm de diâmetro, sendo três no cone, um na aleta e um no reservatório de calor. O elemento sensor foi instalado dentro de uma câmara de vácuo com uma janela de quartzo para entrada da radiação solar.



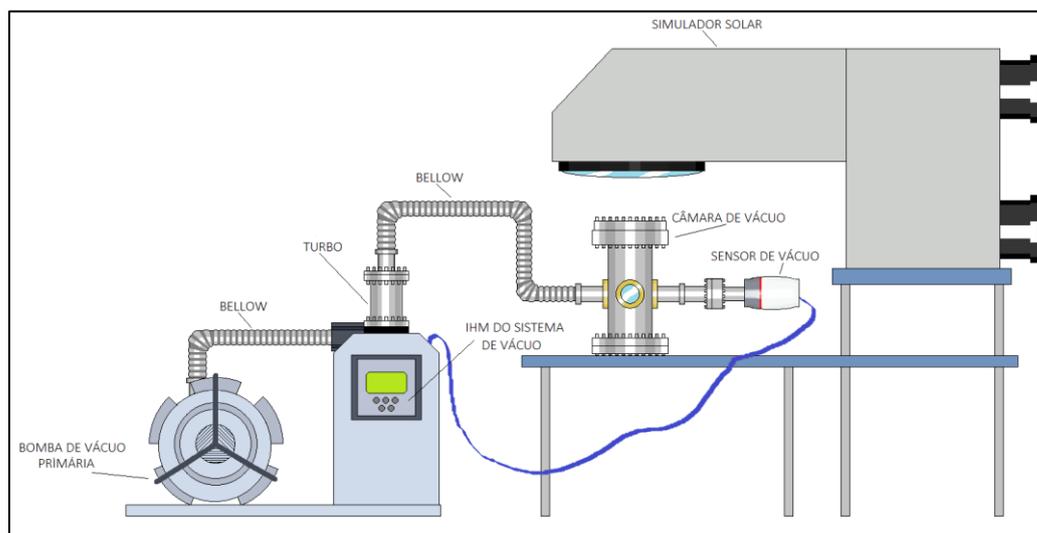
Figura 2.4 – Componentes do elemento sensor do radiômetro absoluto integrados.



A) imagem do elemento sensor onde se pode observar a cavidade absorvedora, a aleta e parte do reservatório de calor B) imagem do elemento sensor integrado utilizado no estudo de comportamento térmico onde pode-se observar a janela ótica com sua superfície espelhada.

Como fonte de radiação solar foi utilizado um simulador solar ORIEL que é utilizado normalmente para caracterização de células solares. Um diagrama esquemático do sistema de medição é mostrado na Figura 2.5.

Figura 2.5 – Diagrama da montagem geral do experimento



Fonte: Produção do autor

Também foi instalado um disco refletor sobre a janela principal da câmara de vácuo para evitar o aquecimento do sistema, o que poderia influenciar nas medições de temperatura no elemento sensor. Este disco tem um diâmetro de 305 mm com uma abertura central de 54 mm de diâmetro e foi pintado de branco para reduzir a absorção da radiação. Na figura 2.6 é mostrado uma foto do experimento para estudo do comportamento térmico do elemento sensor no simulador solar do LABAS.



Figura 2.6 – Execução do experimento



Fonte: Produção do autor

Para a aquisição de dados, utilizou-se o microprocessador ARDUINO UNO com dois conversores AD 15 bits (NANOSHIELD's), para leitura de precisão dos cinco sensores. Para transferir os dados coletados do Arduino para a planilha no Excel foi utilizando o software PLX-DAQ, com taxa de amostragem de uma amostra por segundo.

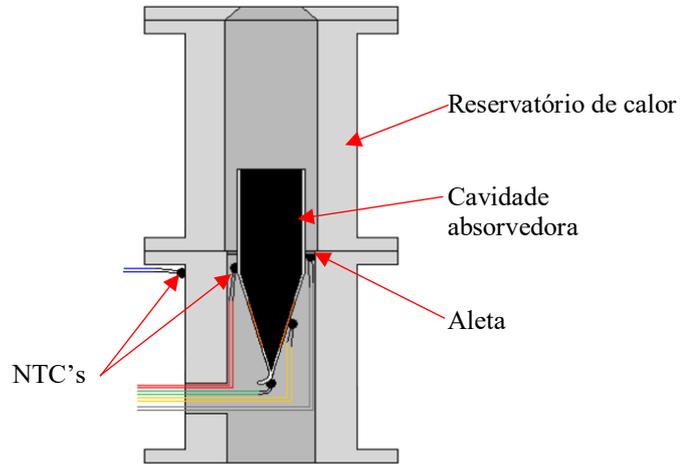
3. Resultados e Discussão

Para o estudo do comportamento térmico do primeiro protótipo desenvolvido no INPE, foram realizadas medições automaticamente a cada segundo nos cinco sensores de temperatura instalados no protótipo em duas condições de operação, em vácuo e em atmosfera. O tempo total de exposição da cavidade absorvedora à irradiação do simulador solar foi de uma hora para cada condição de operação. Durante os testes, a temperatura ambiente variou de 24,0°C até 22,8°C e a irradiância na entrada do cone foi fixada em 540 W/m². A figura 3.1 mostra um diagrama do posicionamento dos sensores de temperatura que foram instalados no elemento sensor.

Os resultados das medições de temperatura demonstram o comportamento térmico de cada uma das partes do radiômetro. No teste em vácuo nota-se que o aumento de temperatura do cone em relação ao reservatório é maior devido à ausência de troca de calor com a atmosfera, contudo o equilíbrio térmico não permite um ajuste adequado à curva teórica. No teste em atmosfera observou-se que a temperatura ambiente interfere nos resultados, pois o reservatório de calor tende a ficar na temperatura do ambiente, contudo a influência da troca de calor com atmosfera facilita o equilíbrio térmico permitindo um bom ajuste à curva teórica, mas neste caso o ΔT ficou pequeno o que dificultou a determinação da irradiância.



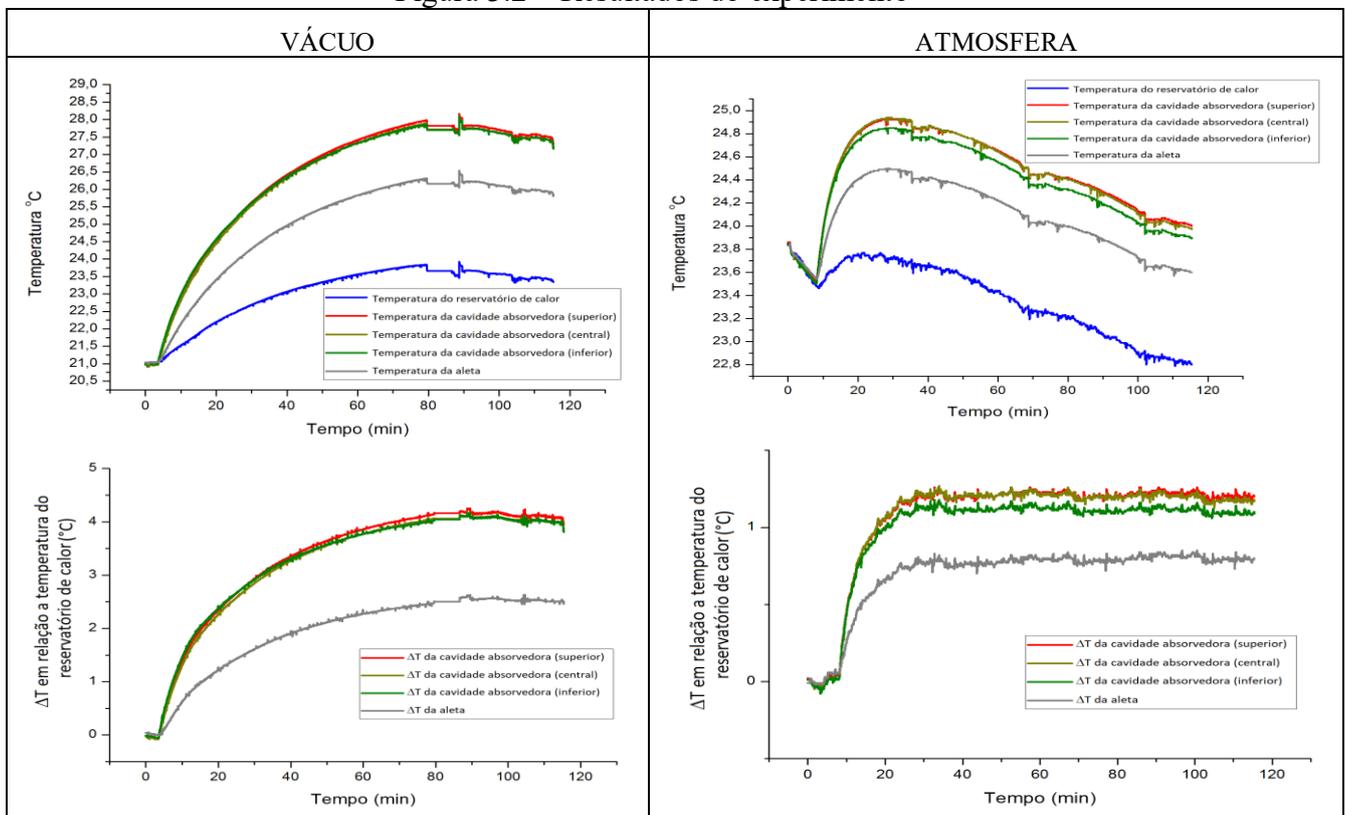
Figura 3.1 – Diagrama do posicionamento dos sensores NTC's



Fonte: Produção do autor

Na figura 3.2 podemos observar o comportamento da temperatura, tanto em vácuo como em atmosfera. Nesta figura também é mostrado os resultados absolutos das temperaturas medidas (gráficos superiores) e as temperaturas relativas comparadas com a temperatura do reservatório (gráficos inferiores).

Figura 3.2 – Resultados do experimento

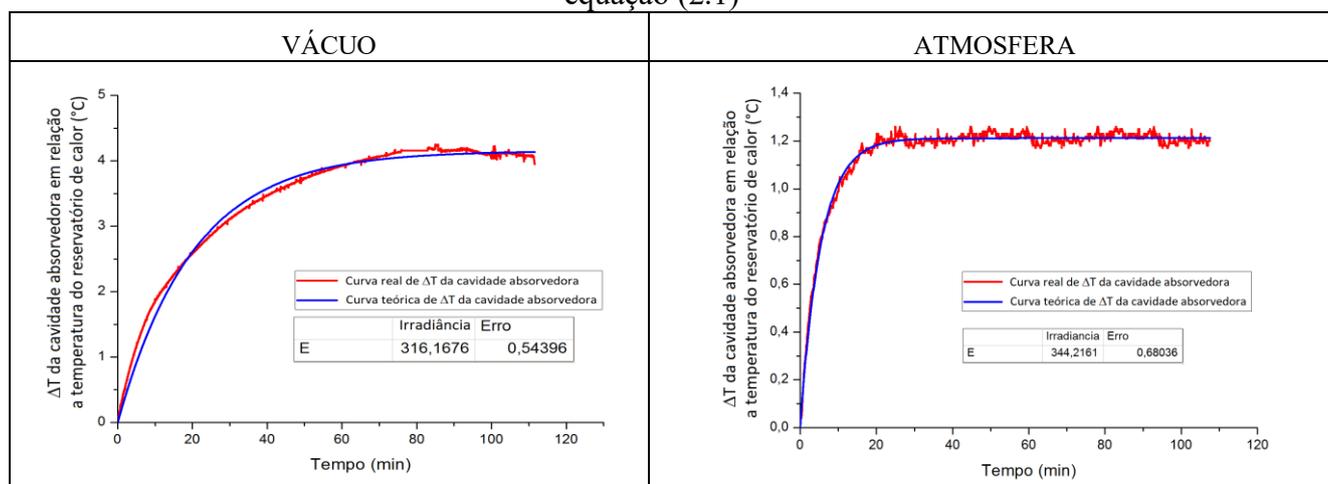


Fonte: produção do Autor.



A irradiância incidente na cavidade absorvedora foi medida utilizando um piranômetro calibrado da Kipp & Zonen, modelo CM11. O valor da irradiância medida foi comparado com a irradiância determinada utilizando o protótipo. Para facilitar a determinação da irradiância absorvida no protótipo, foi feito um ajuste exponencial com base na equação (2.1) na curva do ΔT , assim obteve-se o valor da irradiância diretamente pelo o programa utilizado para o ajuste, conforme apresentado nos gráficos da figura 3.3.

Figura 3.3 – Ajuste das curvas relativas para determinação da irradiância conforme a equação (2.1)



Fonte: produção do autor.

4. Conclusão

Os resultados preliminares na determinação da irradiância comparada com a medida no piranômetro apresentaram um erro acima de 40% na condição de vácuo e em atmosfera aproximadamente 35%. Tal erro deverá ser reduzido significativamente para atender as necessidades do projeto.

Foi possível observar que o fluxo térmico é fortemente influenciado pela massa do reservatório. Para melhorar o comportamento do reservatório em relação a variação da temperatura será necessário um aumento da massa do reservatório e melhorar o isolamento térmico do reservatório em relação a câmara de vácuo.

Agradecimentos: O aluno Lopes, A. G. agradece ao CNPq pela concessão da bolsa.

Referências

CARLESSO, F. **Desenvolvimento de elemento sensor para medida da irradiância solar integrada.** 2018. Tese (Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE de São José dos Campos - SP, São José dos Campos - SP, 2018.

KOPP, Greg; LAWRENCE, George; ROTTMAN, Gary. **The Total Irradiance Monitor Design and On-Orbit Functionality.** SPIE, Bellingham, WA, p. 14-25, 4 fev. 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1117/12.505235>. Acesso em: 10 jul. 2019.



X Workshop em Engenharia e Tecnologia Espaciais

7 a 9 de agosto de 2019

KOPP, Greg. **Total Solar Irradiance Data**. Colorado - EUA, 2019. Disponível em: <http://lasp.colorado.edu/home/sorce/data/tsi-data/>. Acesso em: 21 jun. 2019.

KOPP, G. et al. Total solar irradiance data record accuracy and consistency improvements. **IOP Science**, Colorado EUA, p. 29-33, 2 mar. 2012. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0026-1394/49/2/S29>. Acesso em: 21 maio 2018.

DATLA, R.; PARR, A. Introduction to Optical Radiometry. In: PARR, A.; DATLA, R.; GARDNER, J. **Optical Radiometry**. San Diego CA EUA: Elsevier Inc., 2005. E-book.

FOX, N.; RICE, J. Absolute Radiometers. In: PARR, A.; DATLA, R.; GARDNER, J. **Optical Radiometry**. San Diego CA EUA: Elsevier Inc., 2005. E-book.