

PROJETO PRELIMINAR DE UM RADIÔMETRO ABSOLUTO PARA MEDIR A IRRADIÂNCIA SOLAR TOTAL

Franciele Carlesso – fccarlesso@gmail.com
Jenny Marcela Rodriguez – jemfisi@gmail.com
Luiz Ângelo Berni – luiz.berni@inpe.br
Graziela da Silva Savonov – graziela.savonov@inpe.br
Luís Eduardo Vieira – luis.vieira@inpe.br
Waldeir Amaral Vilela - waldeir.vilela@inpe.br
Edson Miranda - edson.miranda@inpe.br
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

1. Radiação solar

Resumo. *As variações da Irradiância Solar Total (TSI, em inglês) têm impacto no balanço de energia e no clima da Terra. Medidas da TSI tem sido realizadas continuamente por instrumentos a bordo de satélites durante os últimos quatro ciclos solares. No entanto, combinar essas medidas ainda é desafiador devido à degradação dos elementos do sensor e à estabilidade a longo prazo da eletrônica. Aqui descrevemos os esforços preliminares para projetar um radiômetro absoluto com base no princípio de substituição elétrica que está em desenvolvimento no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).*

Palavras-chave: *Radiômetro absoluto, Irradiância solar total, Cavidade absorvedora*

1. INTRODUÇÃO

A energia proveniente do sol está diretamente relacionada com os processos biológicos, físicos e químicos, ou seja, está relacionada com a vida na Terra. Essa energia é um fator determinante de influência no clima e supera em 2500 vezes todas as outras fontes de energias naturais combinadas (KOPP, Greg, 2014). As mudanças climáticas tem sido objeto de estudo e discussão pela comunidade científica e é uma das grandes preocupações mundiais. O *World Meteorological Organisation* do *Global Climate Observing System* (WMO/GCOS) identificou a Irradiação solar total (TSI, do inglês) como uma das 50 variáveis climáticas essenciais para os trabalhos da *United Nations Framework Convention on Climate Change* (UNFCCC) e também do conhecido *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) (WALTER *et al.*, 2017). Por exemplo, o IPCC, 2013 quantificou a influência da TSI no clima em torno de 8 % (ERMOLLI *et al.*, 2013).

A radiação solar é o fluxo de energia emitida pelo Sol e transmitida sob a forma de radiação eletromagnética. As medidas de Irradiância Solar Total são definidas como potência total da energia proveniente do Sol por unidade de área a 1 UA (unidade astronômica) integradas espacial e espectralmente. As medidas são realizadas utilizando radiômetros absolutos, os quais são definidos como um instrumento que pode detectar e quantificar o nível de radiação incidente utilizando meios de quantificação diretos a outros fenômenos físicos mensuráveis, por exemplo a temperatura (PARR; DATLA; GARDNER, 2005). Durante muitos anos essa energia foi considerada erroneamente uma constante de valor 1.365 Wm^{-2} . No entanto, desde 1978 o monitoramento contínuo da TSI tem demonstrado variações em diferentes escalas de tempo. Essas variações, além de impacto no clima, também têm impacto na atmosfera da Terra, ou seja, na química da atmosfera superior, da ionosfera e da estratosfera (ERMOLLI *et al.*, 2013; VIEIRA, L. E. A. *et al.*, 2011).

Nos últimos 39 anos as medidas da TSI foram realizadas por mais de doze instrumentos a bordo de satélites em diferentes missões, conforme visualizado na Fig. 1. As observações realizadas por esses instrumentos estavam convergindo para um determinado valor, no entanto, em 2003 foi lançado o instrumento Total Irradiance Monitor (TIM) que apresentou valores em torno de 4 W/m^2 inferiores aos apresentados por instrumentos como o VIRGO E ACRIM III. Em 2005, um workshop foi realizado para identificar as possíveis razões das diferenças observadas nas medidas e concluiu-se que a parcela da luz espúria, devido ao design do instrumento, é uma das principais fontes da diferença juntamente com outras potenciais fontes de erro como a calibração da cavidade, degradação do filme absorvedor e da área de abertura (BUTLER *et al.*, 2008). Como resultado do workshop observou-se que além da sobreposição de medidas com diferentes instrumentos, era necessário haver uma intercalibração dos radiômetros em solo. Como resultado, KOPP, G *et al.* (2007) iniciou a montagem de um laboratório para calibração absoluta dos instrumentos em solo o TRF (Total Solar irradiance Radiometer Facility) em Boulder, Colorado, USA. Os dados apresentados na Fig. 1 evidenciam as diferenças das medidas devido a calibração instrumental e também devido a degradação, principalmente do elemento sensor, que ocorre em ambiente espacial.

A reconstrução da irradiância com base nos dados observados pelos instrumentos é fundamental para estudo do clima global em longas escalas de tempo como também em outras áreas de estudo da física solar como a heliosismologia ou variações em curtas escalas de tempo como são os *flares* ou as ejeções de massa coronal que podem afetar o clima

espacial. Dessa forma o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais iniciou o desenvolvimento de um radiômetro absoluto de banda larga com a finalidade de estudo e desenvolvimento da tecnologia nacional desse modelo de instrumento. Nesse artigo descrevemos os esforços preliminares no INPE para construir um protótipo para testes de bancada e para auxiliar na caracterização mecânica e eletrônica do instrumento.

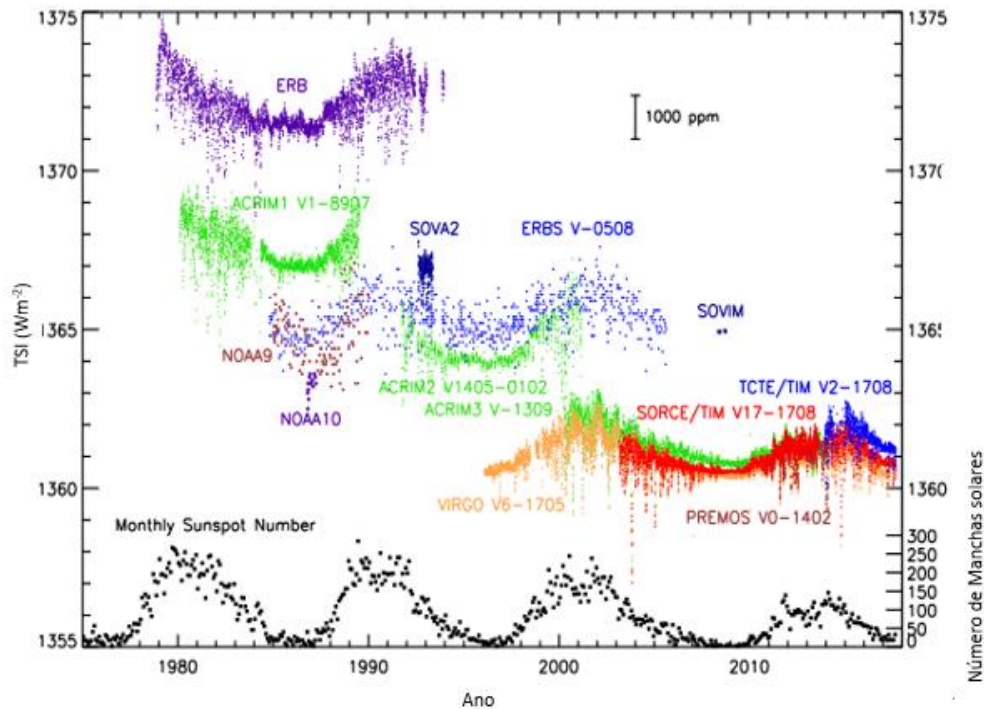


Figura 1- O registro de dados da TSI realizada por diferentes instrumentos. Adaptado de KOPP, G, 2016

2. Delineamento do Projeto

O instrumento faz parte da Missão GSST (Galileo Solar Space Telescope) que tem como objetivo realizar observações da evolução da estrutura magnética da fotosfera, cromosfera, região de transição e corona solar. A missão é composta por um conjunto de instrumentos incluindo um radiômetro para monitorar a variabilidade da emissão eletromagnética total que chega ao topo da atmosfera terrestre (TSI). Atualmente, a missão está em fase de análise na divisão de Engenharia e Tecnologia Espaciais do INPE. Além dos objetivos científicos, o desenvolvimento do instrumento tem importância fundamental para a capacitação e exploração de novas tecnologias em diferentes áreas.

O projeto engloba uma equipe multidisciplinar do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais em cooperações com o Laboratório Nacional de Astrofísica (LNA) e a Universidade de São Paulo (USP). A elaboração do projeto está seguindo um procedimento formal e estruturado de engenharia de sistemas para o desenvolvimento do radiômetro de banda larga. Essa abordagem nos permite definir objetivamente os requisitos para o instrumento, especificamente, no gerenciamento dos seguintes itens: definição dos objetivos, o escopo, e os produtos do projeto; identificação de restrições, premissas, riscos e dependências; desenvolvimento de conceito; requerimentos técnicos; definição dos orçamentos; definição de normas técnicas; preparação da documentação para aquisição de componentes; modelagem de desempenho; verificação e validação; montagem, integração, testes, e comissionamento. Nesta fase do projeto, estamos construindo um protótipo de bancada para a realização dos testes iniciais e para ajudar na caracterização da estrutura mecânica, eletrônica e óptica. Embora seja o projeto de um protótipo de prova de conceito, todos os requisitos estão sendo definidos próximos aos requisitos para a operação espacial (BERNI, L. A. *et al.*, 2016)

3. Descrição do Projeto

O Radiômetro de banda larga brasileiro é um radiômetro de substituição elétrica (*electrical substitution radiometer*). O projeto conceitual do instrumento baseia-se em radiômetros existentes, como o instrumento TIM a bordo do satélite SORCE (KOPP, Greg; LAWRENCE, 2005). Esse tipo de instrumento depende fortemente de cavidades absorvedoras de radiação solar, a qual foi construída de prata pura (99,4 - 99,9%) eletrodepositada devido à alta condutividade térmica. O interior da cavidade foi revestido com um material preto para absorver a luz solar incidente. Como material absorvedor, nesse projeto, foi utilizado um filme de Ni-P enegrecido. O desenvolvimento do filme de Ni-P enegrecido foi estudado e as relações entre estrutura morfológica, composição química e absorção de revestimento foram descritas em CARLESSO *et al.* (2017). O filme de Ni-P foi depositado no interior da cavidade utilizando a técnica electroless e, posteriormente, enegrecido através de ataque químico utilizando um ácido oxidante. Na Figura 2 observa-se duas versões com diferentes geometrias das cavidades construídas. A geometria cônica foi alterada adicionando-se uma extremidade curva com o objetivo de auxiliar no fluxo da solução durante a deposição do Ni-P e também no enegrecimento do filme.

Posteriormente, um fio resistor será envolto na parede exterior das cavidades, somente na região cônica, para aquecer a mesma região aquecida quando o sensor é exposto a radiação solar. Essa resistência é encapsulada com uma camada epoxy para manter uma boa condução térmica do enrolamento para a cavidade. Externamente a cavidade é revestida com ouro para reduzir as perdas radiativas para o meio.

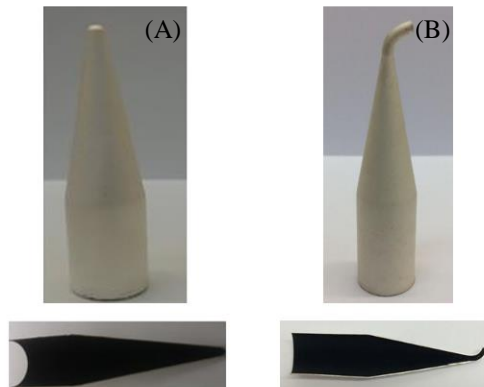


Figura 2 - Cavidade absorvedora de radiação solar cônica (A) e cavidade de extremidade curva (B) com revestimento interno de Ni-P enegrecido.

A calibração do radiômetro completo é um fator determinante para obtenção de medidas confiáveis. Além disso a calibração de cada subsistema permite fazer um levantamento completo de todas as incertezas envolvidas. A absorção da cavidade (α) é uma das fontes individuais de incerteza, ou seja, contribui para a incerteza do instrumento completo. A grandeza medida para a determinação da incerteza é a refletância da cavidade ($1 - \alpha$). As medidas de refletância foram realizadas no INPE utilizando uma configuração experimental, visualizada Figura 3, constituída basicamente de uma lâmpada halogênia de quartzo como fonte, um monocromador (*OL 750-M-D Double Monochromator da Gooch & Housego*), um módulo óptico (*OL 750-10 Mirror Imaging Optics Module*) para focar na saída da esfera integradora (*Newport*) e um detector (*OL 750-HDS-300 Silicon*). Como referência foi utilizado o padrão Labsphere^R (*Spectralon Reflectance SRT-99-050*). Na Figura 4 visualiza-se a refletância espectral total da cavidade na região de 400 nm a 1000 nm. Observa-se que a refletância total aumenta significativamente partir de 700 nm, mas não excede 0,5 % para comprimentos de onda menores que 1000 nm.

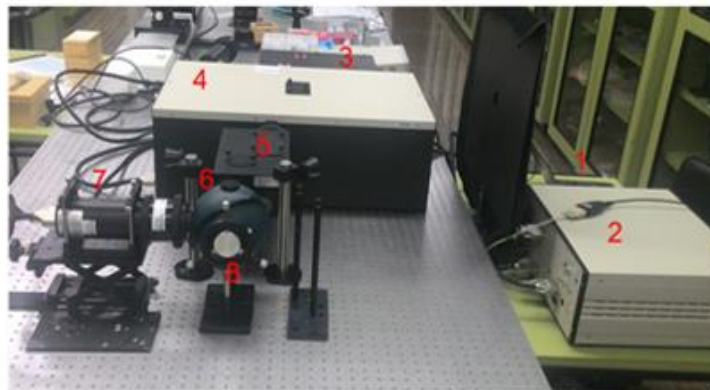


Figura 3 - Imagem da configuração experimental para medidas de refletância. 1 – Computador, 2 – Controlador, 3 – Fonte, 4 – Monocromador duplo, 5 – Módulo de Imagem Óptica de Espelho, 6 – Esfera integradora, 7 – Detector e 8 – Amostra.

O instrumento (Fig. 5) opera com três cavidades alternadamente, para aumentar a vida útil do dispositivo enquanto a quarta cavidade é utilizada como referência e só é exposta anualmente. Através desse ciclo de exposição das cavidades é possível monitorar a degradação do material absorvedor e fazer as correções necessárias nas medidas da TSI. As cavidades cônicas são mantidas a uma temperatura de equilíbrio de 31°C através da passagem de uma corrente elétrica pelos resistores. Quando um dos *shutter* é aberto, expondo a cavidade à radiação solar, a temperatura da cavidade tende a aumentar. A corrente é, então, ajustada para que a temperatura seja mantida. Assim a queda de corrente é mensurada, e conhecendo a área de entrada do radiômetro é possível determinar, a potência ótica. Para essas medidas as cavidades operam sempre em pares enquanto uma é exposta a radiação a outra é mantida com o obturador fechado à temperatura de referência. A determinação da potência ótica é relativamente simples, no entanto, a verificação das incertezas envolvidas e aplicação das correções é primordial para obtenção de medidas válidas.

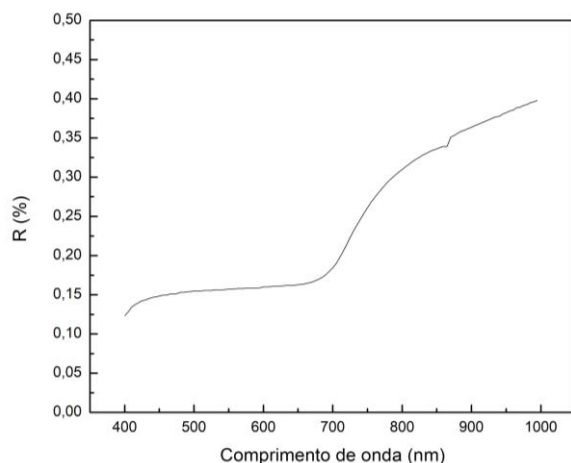


Figura 4 - Refletância total da cavidade em função do comprimento de onda.

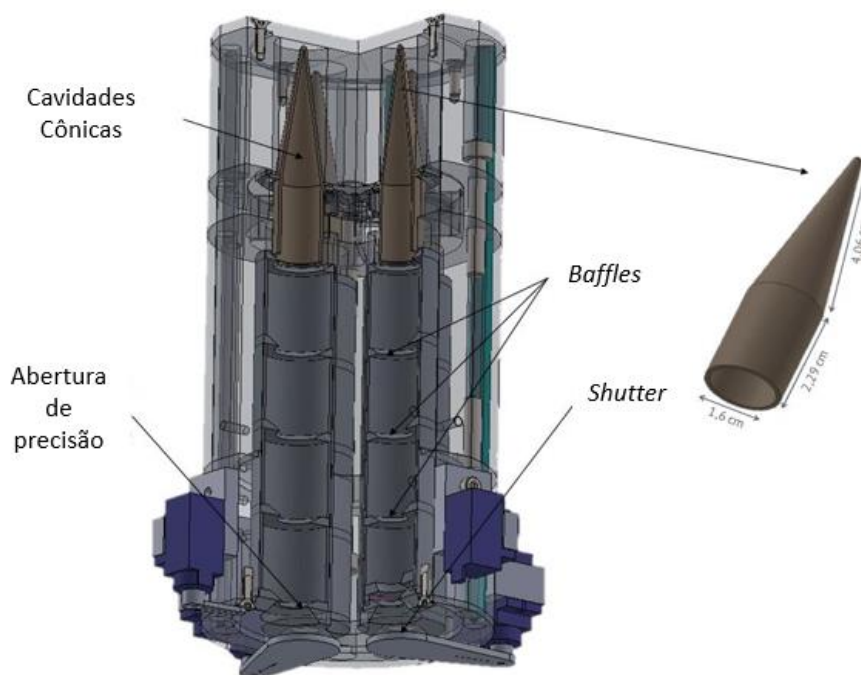


Figura 5- Projeto do Radiômetro absoluto em desenvolvimento. Adaptado de BERNI, L. A. *et al.*, 2016

Uma primeira versão do desenvolvimento do radiômetro foi construída na Escola da engenharia EEL-USP/Lorena utilizando a plataforma Arduino para a capacitação de recursos humanos. Foram elaborados circuitos de alimentação, drivers de potência, circuitos de conversão de sinais e um sistema para transmissão de dados via radiofrequência. O radiômetro realiza medidas em solo, embora funcione similarmente aos instrumentos TIM (MENEZES, 2017).

4. Considerações Finais

Esse é o primeiro projeto de um radiômetro absoluto de banda larga no Brasil e nessa fase está sendo construído um demonstrador de conceito. Para isso estamos empregando um modelo para o ciclo de vida do desenvolvimento do sistema que descreve as atividades a serem realizadas e os resultados que devem ser produzidos durante o desenvolvimento. Uma primeira versão do elemento sensor com baixa refletância já foi finalizada bem como o desenvolvimento de metodologias para a sua caracterização óptica.

REFERÊNCIAS

- BERNI, L. A. *et al.* Preliminary design of the Brazilian's national institute for space research broadband radiometer for solar observations. **Proceedings of the international astronomical union**, 2016. v. 12, n. S328, p. 224–226.
- BUTLER, J. J. *et al.* Sources of differences in on-orbital total solar irradiance measurements and description of a proposed laboratory intercomparison. **Journal of research of the national institute of standards and technology**, 1 ago. 2008. v. 113, n. 4, p. 187–203.
- CARLESSO, F. *et al.* Nickel-phosphorous development for total solar irradiance measurement. **Proceedings of the international astronomical union**, 2016. v. 12, n. S328, p. 221–223.
- ERMOLLI, I. *et al.* Recent variability of the solar spectral irradiance and its impact on climate modelling. **Atmospheric chemistry and physics**, 2013. v. 13, n. 8, p. 3945–3977.
- KOPP, G. *et al.* The TSI radiometer facility - absolute calibrations for total solar irradiance instruments. **Proc. SPIE**, 2007. v. 6677, p. 667709.
- KOPP, G. **Driving solar measurements**. São José dos Campos: LASP, 2014.
- KOPP, G. Magnitudes and timescales of total solar irradiance variability. **Journal of space weather and space climate**, 2016. v. 6, n. 27, p. A30.
- KOPP, G.; LAWRENCE, G. The total irradiance monitor (TIM): instrument design. **The solar radiation and climate experiment (SORCE): mission description and early results**, 2005. p. 91–109.
- MENEZES, R. T. De. **Desenvolvimento de instrumentação aplicada ao estudo da atividade solar**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2017.
- PARR, A. C.; DATLA, R. U.; GARDNER, J. **Optical radiometry**: Academic Press, 2005.
- VIEIRA, L. E. A. *et al.* Evolution of the solar irradiance during the Holocene. **IAAP**, 2011. v. 531, p. A6.
- WALTER, B. *et al.* The CLARA / NORSAT-1 solar absolute radiometer: instrument design, characterization and calibration. **Metrologia**, 2017. v. 54, n. 5, p. 674–682.

PRELIMINARY PROJECT OF AN ABSOLUTE RADIOMETER TO MEASURE TOTAL SOLAR IRRADIANCE

Abstract. *The total solar irradiance impacts the Earth's energy balance and climate. TSI measurements have been carried out continuously by instruments on board satellites during the last four solar cycles. However, these measurements are still challenging due to the sensor degradation and the long-term stability of the electronics. Here we describe the preliminary efforts to design an absolute radiometer based on the principle of electrical substitution under development at the National Institute for Space Research (INPE).*

Palavras-chave: *Absolute radiometer, Total solar irradiance, Absorbing cavity*