

Conceitos básicos de radiômetros de substituição elétrica para medidas da Irradiância Solar Total

Basic concepts of electrical substitution radiometer for Total Solar Irradiance measurements

Franciele Carlesso^{*1}, Jenny Marcela Rodríguez Gómez¹, Luis Eduardo Antunes Vieira¹, Graziela da Silva Savonov¹, Luiz Angelo Berni¹, Lucas Lopes Costa¹

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Avenida dos Astronautas, 1758, São José dos Campos, SP, Brasil

Recebido em 30 de Julho, 2018. Revisado em 18 de Outubro, 2018. Aceito em 31 de Outubro, 2018.

A irradiância solar total (TSI) é definida como a energia emitida pelo Sol por unidade de área e recebida pela Terra. Durante muitos anos essa energia foi considerada constante, no entanto, hoje se sabe que há variações em diferentes escalas de tempo. A medição do valor absoluto da TSI precisar ser realizada em ambiente extraterrestre devido à influência da atmosfera na irradiância solar que atinge a superfície da Terra. Sendo a TSI uma variável imprescindível para quantificar a influência solar nas mudanças climáticas da Terra, a obtenção de medidas com a precisão e estabilidade necessária têm se demonstrado um grande desafio tecnológico. Nesse artigo é descrito o princípio de funcionamento e as particularidades dos radiômetros de substituição elétrica utilizados para medir a TSI no espaço.

Palavras-chave: radiômetro de substituição elétrica, irradiância solar total, cavidade absorvedora

Total solar irradiance (TSI) is the solar energy per unit area received by the Earth. For many years, this energy was considered constant. However, it is known there are variations in different time scales. The TSI absolute value needs to be performed in an extraterrestrial environment due the Earth's atmosphere influence these measurements. The TSI is an important variable to quantify the solar influence on Earth's climate. For this purpose, high precision and stability measurements are necessary. These kind of measurements has proven to be a major technological challenge. This paper describes the operation mode and some characteristics of the electrical substitution radiometer (ESR) used to measure TSI in the space.

Keywords: electrical substitution radiometer, total solar irradiance, absorbing cavity

1. Introdução

O Sol influencia diretamente a Terra, ou seja, está relacionado com a manutenção de temperaturas que permitam a vida no planeta [1]. A emissão solar ou irradiância solar total que chega ao topo da atmosfera da Terra é de $\sim 1361 \text{ W/m}^2$, fornecendo um valor global médio de 340 W/m^2 . A energia solar é um parâmetro determinante no balanço energético da Terra e qualquer variação pode afetar o clima em longas escalas de tempo.

As mudanças climáticas têm sido objeto de estudo e discussão pela comunidade científica e também é uma das grandes preocupações mundiais. Um dos fatores essenciais é o entendimento da magnitude da influência das fontes antropogênicas (aquelas derivadas de atividades humanas) e naturais (derivadas dos oceanos, vulcões e de origem astronômica como o Sol, raios cósmicos e radiação da supernova) no sistema climático [2]. Uma das formas de diferenciar as fontes é através do estudo da influência do Sol sobre o clima da Terra utilizando os dados de irradiância solar total ou TSI (do inglês *Total Solar Irra-*

diance) fora da atmosfera terrestre. Medidas contínuas da TSI estão disponíveis desde o final da década de 70, mas para o entendimento definitivo da influência do Sol sobre o clima da Terra é necessário séries da TSI em escalas de tempo de milênios, as quais podem ser expandidas através de modelos de reconstrução da TSI [3, 4]. Além disso, a análise da TSI desde a era pré-industrial, quando o efeito dos gases estufa produzidos pelo homem podia ser desprezado [4], permite analisar a influência da emissão solar no clima.

Nos últimos 40 anos as medidas da TSI foram realizadas por mais de doze instrumentos a bordo de satélites em diferentes missões. Os valores das observações realizadas por diferentes instrumentos estavam convergindo, 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 outros instrumentos. Os estudos das mudanças a longo prazo na TSI requerem que as medições sejam realizadas continuamente, pois o tempo de operação dos radiômetros dificilmente é superior a um ciclo solar (~ 11 anos). Além disso as variações na ordem de 0,1% ao longo do ciclo

*Endereço de correspondência: fccarlesso@gmail.com.

solar requerem à utilização de radiômetros de precisão absoluta e estabilidade.

Os instrumentos para a medida da TSI em ambiente espacial são baseados em radiômetros de substituição elétrica. As medições dessa categoria de radiômetros dependem de uma cavidade absorvedora de radiação solar. A cavidade é o elemento sensor do radiômetro e é considerado o componente principal, pois associa elementos óticos e eletrônicos para gerar um sinal que representa a radiação. Desde o início do monitoramento da TSI, utiliza-se o mesmo princípio físico dos radiômetros, no entanto, houve uma evolução tecnológica no projeto dos instrumentos. Esse trabalho fornece uma visão geral dos radiômetros absolutos utilizados para medidas da TSI em ambiente espacial e aborda o princípio de funcionamento utilizado.

2. Irradiância Solar Total (TSI)

A radiação solar é o fluxo de energia emitida pelo Sol e transmitida sob a forma de radiação eletromagnética. A Irradiância Solar Total é definida como a potência total da energia proveniente do Sol por unidade de área a 1 UA (distância entre o Sol e a Terra conhecida como Unidade Astronômica). No entanto, a energia solar que atinge a superfície Terrestre é atenuada pela atmosfera. Ou seja, quando a radiação solar entra atmosfera da Terra, uma parcela da energia incidente é absorvida ou espalhada pelas moléculas do ar, nuvens e aerossóis (Figura 1). Somente a parcela que não é absorvida, refletida ou espalhada atinge a superfície e é denominada como radiação direta [6].

O monitoramento dos fatores de influência no balanço de energia da Terra é fundamental para entendermos as mudanças climáticas. No que diz respeito à TSI, a medida da irradiância solar incidente precisa ser reali-

zada fora do sistema atmosférico da Terra devido aos processos envolvidos na interação entre a energia radiativa solar e a atmosfera. Na Figura 2 percebe-se que a intensidade da radiação eletromagnética sofre atenuação devido à interferência da atmosfera, conforme representado pela linha cheia mais escura. Assim, possibilitando a determinação da influência dos processos humanos (efeito estufa e emissões de CO₂, por exemplo) no clima e sua variabilidade.

Apesar da radiação solar ser a principal fonte de energia da Terra, o clima também é influenciado pelo efeito estufa, emissões de vulcões [8, 9], raios cósmicos [10] e energia radiante da supernova [11]. Além disso, mudanças

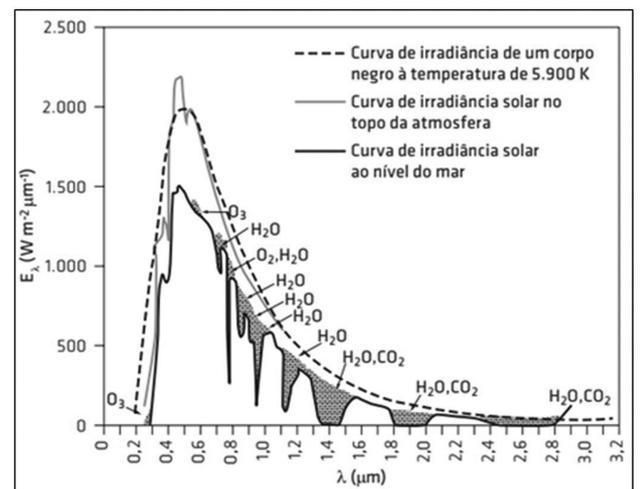


Figura 2: Intensidade do fluxo radiante emitido pelo Sol. Comparação do espectro solar medido fora da atmosfera terrestre, irradiância solar padrão ao nível do mar, espectro de um corpo negro a 5.900K e identificação de regiões espectrais que ocorrem absorção molecular [7].

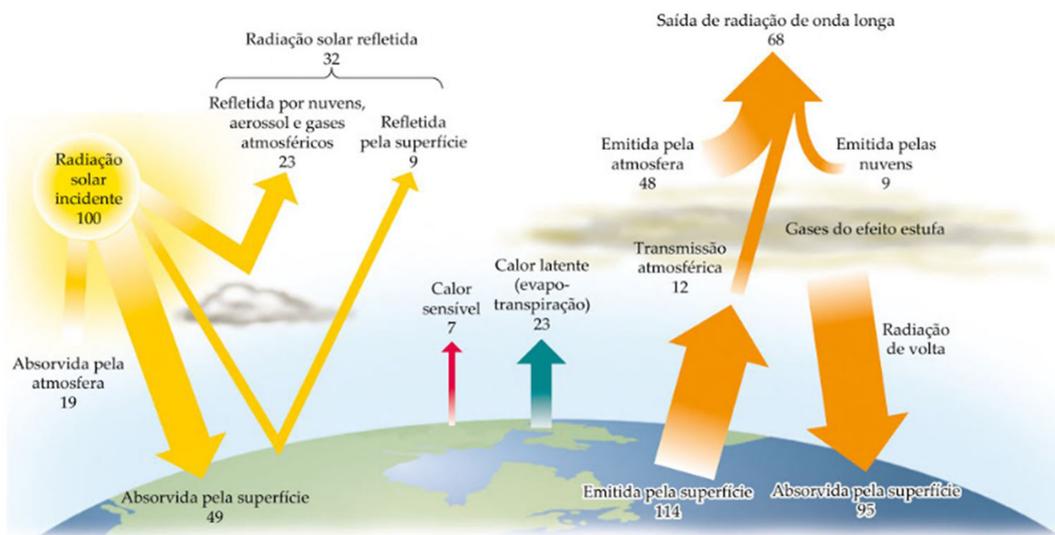


Figura 1: Diagrama esquemático do balanço energético global média da Terra [5].

de longo prazo na órbita da Terra modulam a irradiância solar que atinge o topo da atmosfera. As variações nas inclinações orbitais também podem causar pequenas diferenças na TSI [12]. A variação de 0,1% observada entre o máximo e o mínimo de 11 anos deve-se principalmente a fenômenos magnéticos que ocorrem na atmosfera solar. Esses fenômenos magnéticos estão presentes na fotosfera (manchas solares, fáculas, grânulos e super grânulos), na cromosfera (filamentos, plages e proeminências) e na coroa (linhas de campo magnético, buracos coronais, *streamers* e *plumes*). Uma descrição física da irradiância solar pode ser encontrada em [2]. O detalhamento dos instrumentos utilizados no monitoramento da irradiância solar em ambiente espacial é apresentado a seguir.

3. Radiômetros

A radiometria é um conjunto de conceitos, terminologias, relações matemáticas, medidas instrumentais e unidades elaborados para descrever e medir as relações e interações da radiação eletromagnética com a matéria em termos da sua potência, polarização, conteúdo espectral e outros parâmetros relevantes para uma determinada fonte ou configuração do detector. O instrumento utilizado nas medições de fluxo radiante (potência) da radiação eletromagnética é chamado radiômetro. Um radiômetro responde a um estímulo ou sinal de radiação, alguns detectores utilizam o monitoramento do aquecimento quando o calor é absorvido por uma superfície. O calor absorvido também pode ser convertido, por exemplo, em movimentos mecânicos ou em energia elétrica [13].

O entendimento do Sol e da sua energia são uma preocupação da humanidade desde as primeiras civilizações no aspecto religioso e simbólico e também impulsionou a revolução científica com renascentistas como Nicholas Copernicus e Galileo Galilei. Cientistas estiveram comprometidos com a medição da luz desde os primeiros esforços e instrumentos descritos por P. Bouguer em 1729 e J. H. Lambert in 1760. A exploração em outras regiões espectrais começou com a descoberta da região do infravermelho por W. Herschel e a região ultravioleta por J. W. Ritter [14]. A energia do Sol também foi investigada pelo francês Alexandre-Edmond Becquerel, que descobriu o efeito fotovoltaico em 1839, e por Claude Pouillet, que em 1837 estimou a constante solar em 1228 Wm^{-2} .

O primeiro radiômetro Solar, também conhecido como moinho de luz, idealizado pelo físico inglês William Crookes no ano de 1873, consistia em uma série de hélices (no vácuo) que rodavam quando expostas à radiação [15]. O interesse, no entendimento da radiação eletromagnética, resultou no estudo de novos tipos de radiômetros para medir a radiação em regiões do espectro, inclusive, no desenvolvimento de radiômetros de substituição elétrica (ESR, do inglês *electrical substitution radiometer*). Todos esses experimentos e instrumentos permitiram fazer grandes avanços nas medidas da irradiância solar. A seguir

será descrito os radiômetros amplamente utilizados para medir a irradiância solar.

3.1. Radiômetros Absolutos

As medidas absolutas são baseadas nas unidades básicas do SI: metro, quilograma, kelvin, ampère, segundo, mol e candela. Uma medida relativa não está, necessariamente, atrelada a uma dessas unidades e são geralmente obtidas como a razão de duas medidas. Por exemplo, a determinação da refletância de um material é a determinação da razão entre a potência radiante incidente e refletida [16]. Um radiômetro absoluto é um instrumento que pode detectar e quantificar o nível de radiação incidente usando alguma relação com outro fenômeno físico mensurável nas unidades do SI [17].

Outra denominação comumente utilizada é Radiômetro de Substituição Elétrica, pois relaciona o efeito do aquecimento devido à potência ótica com a quantidade de aquecimento através de uma corrente elétrica (potência elétrica). Essa técnica é usada para medir potência radiante por unidade de área (irradiância) de um feixe incidente em um elemento absorvedor. Este tipo de instrumento opera utilizando um elemento absorvedor como detector térmico que pode ser apenas um disco metálico [17], no entanto, os instrumentos operando, até o momento, a bordo de satélites usam cavidades absorvedoras para aprisionar de forma mais eficiente a radiação incidente [18, 19].

3.2. Princípio de funcionamento

Os instrumentos embarcados em satélites para medir a TSI são os radiômetros de substituição elétrica, os quais são constituídos de um detector térmico com superfície interna de alta absorção de radiação e um aquecedor elétrico em contato com a superfície na região próxima à aquecida pela radiação solar, ver Figura 3. A cavidade absorvedora de radiação solar é parte primordial nesse tipo de radiômetro, pois associa elementos óticos e eletrônicos para gerar um sinal que representa a radiação monitorada. A potência radiante é então relacionada com a área de uma abertura de precisão, localizada na entrada do instrumento, para determinação da irradiância solar total. De uma forma geral as cavidades absorvedoras de radiação solar possuem a estrutura mecânica de prata, devido à alta condutividade térmica, superfície externa coberta com uma camada de ouro, para evitar as perdas radiativas para o meio e o interior da cavidade coberto com um material preto e altamente absorvedor. A geometria das cavidades é otimizada para cada instrumento considerando principalmente o material absorvedor empregado.

Um radiômetro típico apresenta o elemento absorvedor ligado, através de um link de calor, com baixa condutividade, a um dissipador de calor mantido a uma temperatura constante. Quando não há incidência de radiação solar no elemento sensor de referência (obtu-

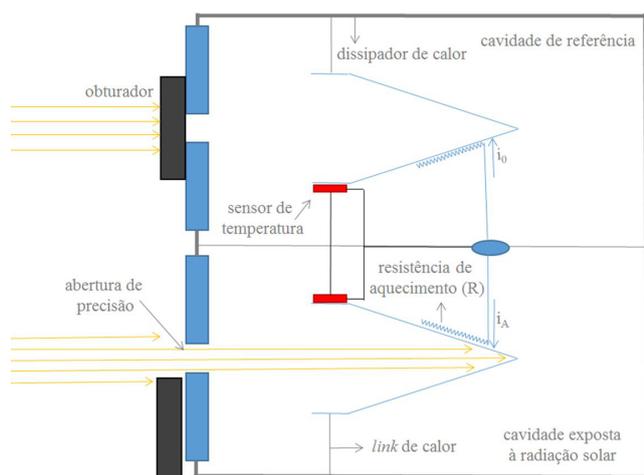


Figura 3: Diagrama esquemático de um radiômetro de cavidade ativa. Fonte: Autores.

rador fechado), uma corrente elétrica (i_0) que passa através de um aquecedor resistivo fixado na cavidade, mantém a temperatura da cavidade em um certo valor T . Quando o elemento sensor é exposto à radiação solar, através da abertura do obturador, parte da radiação será absorvida (a porção absorvida depende da geometria e das propriedades da cavidade absorvedora) conduzindo a um aumento de temperatura da cavidade. Dessa forma, a corrente (i_A) pode ser ajustada (diminuída) para manter a temperatura fixa em T . Assim, a queda de corrente é mensurada e, desprezando as correções devido às perdas, a equivalência de temperatura implica que a potência ótica é igual a potência elétrica [17]. A determinação da potência ótica é relativamente simples, no entanto, a verificação das incertezas envolvidas e aplicação das correções são primordiais para obtenção de medidas válidas. Na prática os instrumentos utilizam de duas a quatro cavidades para permitir a avaliação da degradação da camada absorvedora em ambiente espacial [20; 21].

As cavidades são equilibradas termicamente em pares, dessa forma ambas são mantidas à temperatura T (aquecidas eletricamente), e uma é exposta a radiação enquanto a outra continua sendo aquecida apenas eletricamente (cavidade de referência). Assim, pode-se avaliar a diferença de potência elétrica, na cavidade exposta, para manter a temperatura T , e na cavidade de referência considerando as calibrações de absorção da cavidade para definir o fluxo de energia incidente [18]. Em um radiômetro ideal, a área aquecida pela irradiância incidente e a radiação refletida internamente na cavidade seria a mesma área aquecida eletricamente. No entanto, existe uma não equivalência entre essas áreas, ou seja, em instrumentos reais não significa que a conversão de ambas as formas de energia ocorre com a mesma eficiência ou distribuição de temperatura. Além disso, dependendo do tipo de detector usado, a variável mensurada poderia ser uma mudança em um ou mais parâmetros físicos, por exemplo, temperatura, tensão ou corrente [16].

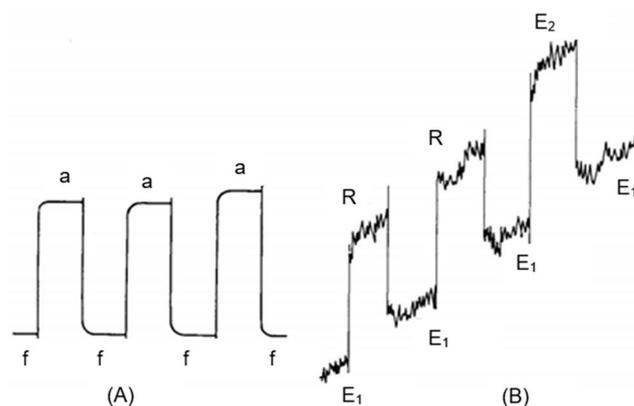


Figura 4: Saída do detector com o obturador aberto (a) e fechado (f) de um radiômetro absoluto (A) e diferencial (*offset*) em resposta ao aquecimento devido a uma potência elétrica de valor conhecido (E_1) e a potência radiante desconhecida (R), adaptado de [22].

Na prática os radiômetros absolutos podem operar de vários modos. Pode-se, por exemplo, monitorar o sinal de saída do detector para uma sequência de exposições da cavidade à radiação solar e depois relacionar com o sinal obtido no aquecimento da referência (Figura 4 A). Alternativamente, pode-se determinar o nível de potência com o mesmo procedimento e, em uma segunda sequência de exposições, registrar o sinal de saída do detector enquanto alterna entre a potência radiante desconhecida (R) e energia elétrica (E_1) de valor previamente determinado (Figura 4 B), ou seja, é a medida da diferença entre uma potência conhecida e uma potência desconhecida. Já o modo de operação ativo consiste em uma série de medições com o obturador alternadamente aberto e fechado. No entanto, um sistema é usado para manter a mesma saída do detector para ambas as posições do obturador (aberta e fechada). Isso é obtido por meio do ajuste da quantidade de energia elétrica fornecida ao elemento detector de tal maneira que a temperatura do detector permaneça constante. A quantidade de energia radiante incidente é então deduzida da diferença entre os níveis de energia elétrica com o obturador aberto e fechado [22].

Os radiômetros clássicos operam de modo que no final de cada fase, a potência elétrica é lida e a irradiância (S) avaliada de acordo com a equação 1:

$$S = \frac{C}{A} (P_{\text{fechado}} - P_{\text{aberto}}) \quad (1)$$

Em que A representa a área da abertura de precisão, C o fator total de correções determinado na caracterização e $P_{\text{aberto}} / P_{\text{fechado}}$ é a potência com o obturador aberto e fechado, respectivamente. Essa operação depende de uma constante de tempo, a qual é melhorada com a eletrônica do sistema. Nos radiômetros clássicos, que utilizam o modo de operação ativo, essas medições não ocorrem apenas no início e final de operação, mas sim algumas

vezes para que as características do sistema possam ser verificadas [20].

Diferentemente, o instrumento TIM utiliza um modo de detecção em fase (*phase-sensitive*) na frequência do obturador, ou seja, é realizada a análise da potência elétrica aplicada, em fase com o obturador, fornecendo a potência radiante incidente. Esse método permite a redução do ruído na medida [18]. O princípio do radiômetro TIM é o mesmo dos radiômetros clássicos: a energia elétrica é sempre ajustada de modo que a diferença de temperatura permaneça constante. A potência elétrica é derivada de uma fonte de tensão constante com modulação por largura de pulso. No entanto, a avaliação do sinal em fase é mais complexa, pois os componentes de entrada variam e são representados por funções que correlacionam a frequência do obturador e a potência elétrica aplicada [23]. O detalhamento da operação do TIM pode ser encontrado em [18] e [24].

4. Histórico das Medidas da TSI

As medidas da (TSI) obtidas por instrumentos a bordo de satélites foram feitas desde o final da década de 70. A Figura 5 mostra os instrumentos utilizados nas medidas. Em 1978 o instrumento *Hickey-Frieden* (HF) iniciou as medidas no experimento ERB (*Earth Radiation Budget*) a bordo do satélite Nimbus-7 [26]. A série ACRIM (*Active Cavity Radiometer for Irradiance Monitoring*) iniciou em fevereiro de 1980 com o instrumento ACRIM I a bordo do satélite SMM (*Solar Maximum Mission Satellite*) [27]. O ACRIM foi o primeiro experimento projetado e totalmente dedicado ao monitoramento da TSI. Em 1991 iniciaram-se as medidas através do ACRIM II a bordo do satélite UARS (*Upper Atmosphere Research Satellite*) [28]. No entanto, houve um intervalo de dois anos entre os instrumentos ACRIM I e ACRIM II. Durante esse período as medidas de TSI foram realizadas através do ERB e o ERBS (*Earth Radiation Budget Satellite*), no entanto, observam-se valores diferentes dos obtidos pela série ACRIM.

Além das variações temporais da TSI, o experimento ERBE (*Earth Radiation Budget Experiment*) foi planejado para estudar as variações espaciais. Para isso o experimento utilizou diferentes plataformas, ERBS (*Earth Radiation Budget Satellite*), NOAA-9 e NOAA-10 (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) [29]. Os instrumentos, lançados na década de 80, apresentaram projetos similares ao ACRIM-I [30].

O experimento VIRGO (*Variability of solar Irradiance and Gravity*) embarcado a bordo do satélite SOHO (*Solar and Heliospheric Observatory*), lançado em 1995, consiste de dois diferentes radiômetros para monitorar a TSI: o DIARAD (*Differential Absolute Radiometer*) e o PMO6-V [31]. Os dois instrumentos utilizam o mesmo princípio de funcionamento e a principal diferença entre eles é a geometria e o material absorvedor da cavidade.

O Satélite ACRIMSAT (*Active Cavity Radiometer Irradiance Monitor Satellite*) foi lançado em 1999 com o ACRIM 3, terceiro instrumento da série do experimento para monitorar a TSI. O ACRIM III englobava uma combinação otimizada das melhores características dos instrumentos ACRIM I e ACRIM II com uma nova eletrônica e projeto [32].

Em 2003 foi lançado o instrumento TIM (*Total Irradiance Monitor*), parte do experimento SORCE (*Solar Radiation and Climate Experiment*). Os dados obtidos foram corrigidos de acordo com a degradação, emissão térmica de fundo, posição e velocidade do instrumento [25]. Os resultados da TSI a 1 UA foram inferiores aos medidos previamente apresentando valores em torno de $4,7 \text{ W/m}^2$ menores que os do VIRGO e $5,1 \text{ W/m}^2$ menores que as do ACRIM III, valores que excedem as incertezas dos instrumentos [33]. Em 2005 um workshop foi realizado para identificar as possíveis razões das diferenças observadas e concluiu-se que a menor parcela de 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 área de abertura e da cavidade [34]. Como resultado do workshop Kopp [25] iniciou a montagem de um laboratório para calibração absoluta dos instrumentos em solo, o TRF (*Total Solar Irradiance Radiometer Facility*) em Boulder, Colorado, USA. O laboratório é utilizado hoje para comparar radiômetros em solo utilizando um radiômetro criogênico com escalas de medições e incertezas rastreáveis através do NIST (*National Institute of Standards and Technology*) [25]. Em 2013, o instrumento TIM foi lançado novamente no experimento *Total Solar Irradiance Calibration Transfer Experiment* (TCTE).

O instrumento PREMOS iniciou as medidas em 2010 a bordo do satélite PICARD e o radiômetro foi o primeiro caracterizado no TRF para entender as discrepâncias medidas entre os instrumentos. Os valores das medidas da TSI estão de acordo com os valores mensurados pelo TIM/SORCE [35]. O radiômetro CLARA (*Compact Lightweight Absolute Radiometer*) construído pelo *Physikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos e World Radiation Center* (PMOD / WRC) foi lançado em julho de 2017 com o objetivo de contribuir com a continuidade das medidas da irradiância solar total no espaço. A Figura 6 mostra as medidas disponibilizadas dos principais instrumentos para medir a TSI até o momento. A continuidade e sobreposição desses registros têm sido essencial, já que as compensações entre diferentes instrumentos geralmente excedem a incerteza declarada do instrumento [37]. A correção e combinação dos registros da TSI só é possível devido à sobreposição temporal dos instrumentos.

5. Projetos dos Instrumentos

As medidas da TSI realizadas pelos diferentes instrumentos a bordo de satélites são baseadas no mesmo princípio

de funcionamento. No entanto, a configuração e tecnologia diverge a fim de encontrar novas soluções para questões como precisão na medida da área de abertura, difração, luz espúria e efeitos térmicos. Além disto, a cavidade absorvedora de radiação solar é parte imprescindível nestes modelos de instrumentos, consequentemente, muitos estudos são realizados para buscar diferentes geometrias e materiais absorvedores, que apresentem maior absorção e menor degradação em ambiente espacial.

O experimento ERB dispunha de 10 canais de fluxo solar e 12 canais de fluxo terrestre. Os principais resultados foram obtidos utilizando um canal conhecido como 10C [38]. A cavidade utilizada é um cone invertido dentro de um cilindro com o interior pintado com uma tinta preta especular Z302. A distribuição do aquecimento da cavidade é realizada para buscar a mesma região aquecida pela radiação, dessa forma o resistor é enrolado majori-

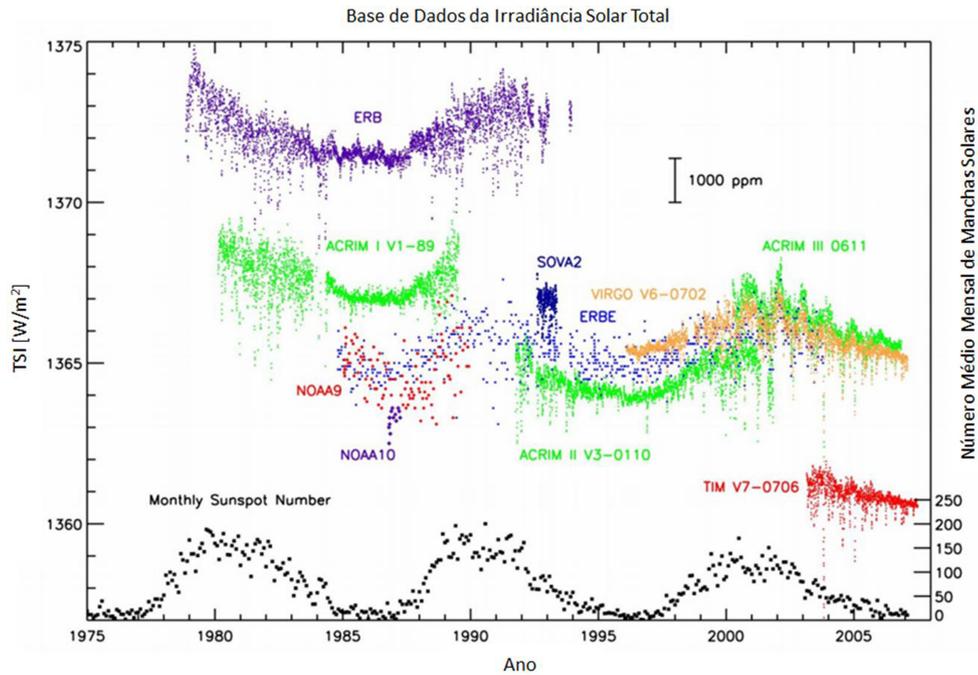


Figura 5: Medidas contínuas da TSI de aproximadamente 30 anos, adaptada de [25].

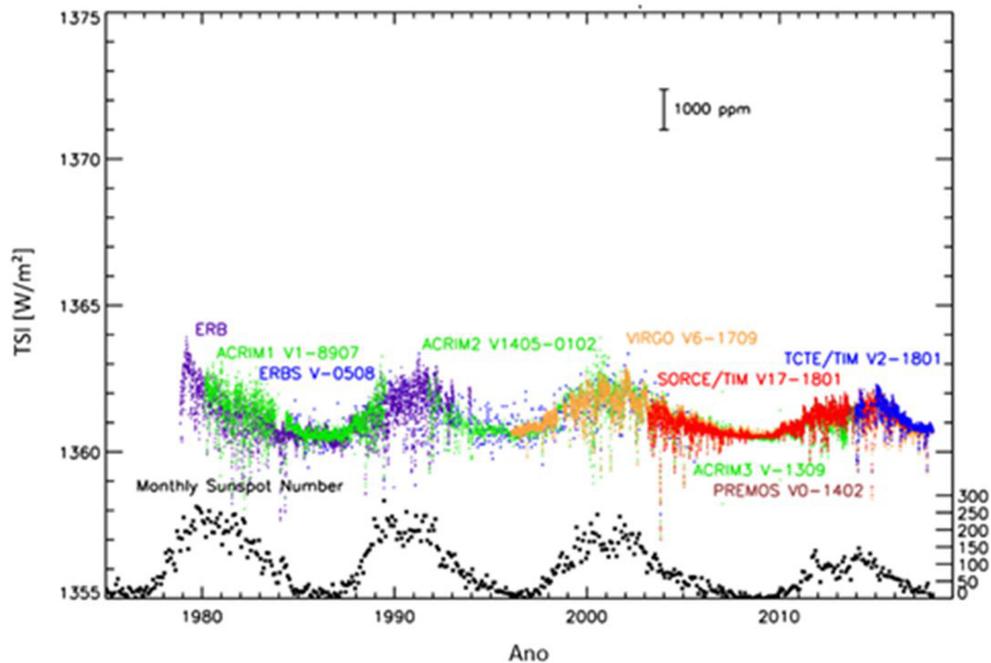


Figura 6: Sobreposição temporal das medidas da TSI fornecidas por diferentes instrumentos, adaptada de [36].

tariamente no cone (94 %) e também no cilindro (6 %) [39].

A série ACRIM possuem três sensores denominados *Active Cavity Radiometer* (ACR). As medidas foram realizadas empregando a versão ACR-IV, no ACRIM I e a versão ACR-V, no ACRIM II e III. A versão IV utilizou duas cavidades cônicas termicamente conectadas ao dissipador de calor. As cavidades são de prata pura eletrodepositada e o interior é pintado com uma tinta preta especular com a espessura mínima requerida para uma cobertura uniforme. A cavidade projetada com ângulo de 30° permite seis interações internas da luz com as paredes da cavidade para um ângulo de incidência axial [40]. A versão ACR-V é similar, e também apresenta ângulo de 30° com o interior pintado com uma tinta especular epóxi preta, mas foi adicionado um tubo longo no topo da cavidade com curvatura de 90° para minimizar o menisco formado na extremidade do cone durante o processo de pintura [41].

O experimento VIRGO operou com dois instrumentos de projetos diferentes. O instrumento PMO6 utilizou um cone invertido com ângulo de 60° e interior com uma tinta preta especular. Diferentemente, a cavidade do DIARAD é formada por um cilindro com fundo plano e utiliza pintura preta difusa. O DIARAD foi o primeiro instrumento a empregar um arranjo de cavidades lado a lado para utilizá-las de forma alternada durante as medidas [20].

As cavidades utilizadas no TIM são cônicas e constituídas de prata eletrodepositada e foi o primeiro instrumento a ter o seu interior revestido de uma camada de níquel-fósforo altamente absorvedora e com uma excelente condutividade térmica para o substrato de prata do cone. As cavidades possuem um fio resistor na parede externa, encapsulado com epóxi, para fornecer calor próximo à região aquecida pela radiação solar. Sobre o epóxi é depositado cromo e cobre para fornecer uma base e ouro com a finalidade de reduzir as perdas radiativas para o meio [18].

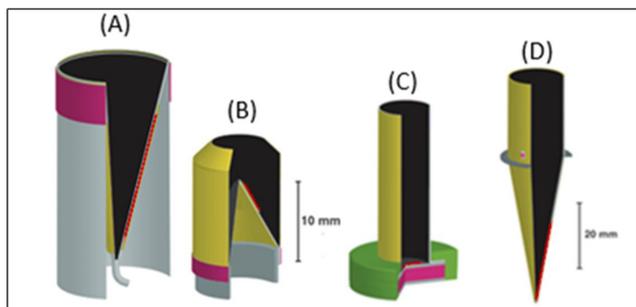


Figura 7: Geometria das cavidades absorvedoras. A localização dos aquecedores elétricos é representada pela cor vermelha e os sensores de temperatura pela cor rosa. Modelo de cavidade do (A) ACRIM-III, (B) PMO6V, (C) e DIARAD (D) TIM, adaptada [20].

As diferenças de geometria, construção e material interno (Figura 7) influenciam diretamente na incerteza dos valores de absortância das cavidades de cada instrumento. O instrumento TIM demonstrou menor degradação do revestimento de Ni-P em órbita, quando comparado com as tradicionais pinturas pretas, apresentando valores em torno de 70% inferior em relação à degradação do ACRIM III [34]. As diferenças entre os instrumentos não se limitam às cavidades e, provavelmente, a principal mudança do TIM é a localização da abertura de precisão (Figura 8). No TIM (Figura 9) a abertura é localizada na frente do instrumento permitindo a entrada apenas da radiação a ser medida. Os demais instrumentos apresentavam uma larga abertura na frente e a abertura de precisão internamente próxima a cavidade [42]. Esta configuração permite a entrada de 2 a 3 vezes mais radiação no instrumento podendo ocasionalmente espalhar-se também na cavidade e conseqüentemente ocasionar sinais erroneamente mais elevados. Mais detalhes sobre as diferenças dos instrumentos e como influencia nas medidas realizadas podem ser encontrado em [34].

Os dados de TSI obtidos com o instrumento TIM levaram a comunidade científica a uma revisão de todos os aspectos construtivos, das características óticas, desempenho e calibração envolvidos na construção de radiômetros absolutos. O TIM pode ser considerado um marco importante no monitoramento da TSI durante os dois últimos ciclos solares [23].

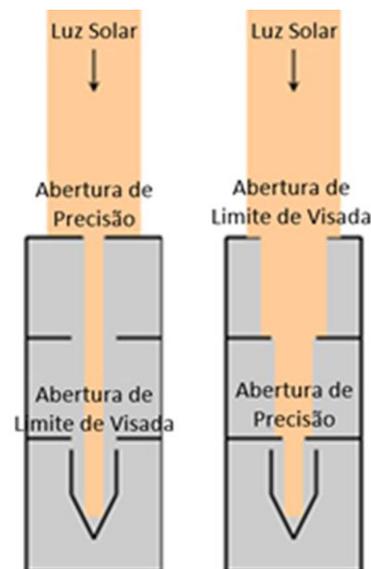


Figura 8: Configuração do TIM (A) e dos demais instrumentos (B). A abertura de precisão localizada na entrada do instrumento permite apenas a entrada da radiação a ser medida. Uma grande abertura na frente do instrumento permite a entrada de 2 a 3 vezes mais radiação solar que se pretenda medir, adaptada de [42].

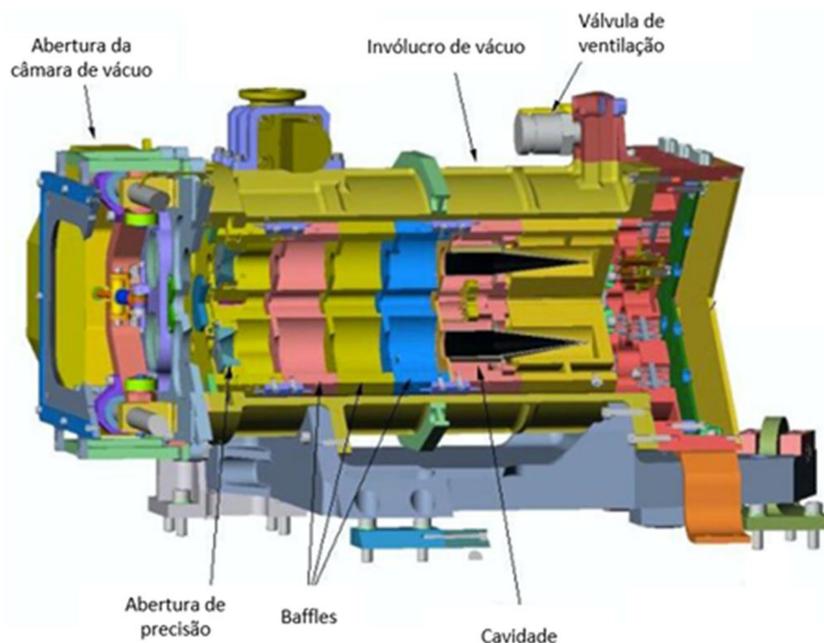


Figura 9: Configuração do instrumento TIM, adaptada de [43].

5.1. Fontes de Erro

Os radiômetros absolutos necessitam de correções devido a alguns efeitos, por isso, a especificação das incertezas é imprescindível. As incertezas mapeadas nos instrumentos englobam a dimensão da abertura de precisão, difração, reflectância da cavidade, não-equivalência, efeitos térmicos, dispersão da luz, ganho do servo, correções para distância de 1 UA, efeito Doppler, apontamento, repetibilidade e degradação em órbita.

Um dos fatores de maior influência nas medições no espaço está relacionado com a degradação do material absorvedor devido ao tempo de exposição à radiação solar. Esse fator pode ser corrigido através da comparação da cavidade comumente exposta com uma cavidade menos exposta. Além disso, a aplicação de Ni-P enegrecido, no instrumento TIM, como material absorvedor tem demonstrado em órbita uma menor degradação quando comparado com as tradicionais pinturas pretas aplicadas pelos radiômetros clássicos [44].

O objetivo do Laboratório TRF (*Total Solar Irradiance Radiometer Facility*) foi justamente centralizar toda a calibração de todos os instrumentos em solo permitindo a avaliação e entendimentos das diferenças observadas durante as medidas em ambiente espacial [25]. O TRF compara os radiômetros para mensurar a TSI diretamente com um radiômetro criogênico. O modo de operação de um radiômetro criogênico é semelhante aos radiômetros de cavidade ativa (ESR). Diferenciando-se principalmente na temperatura de operação, enquanto o ESR opera em ~ 300 K, os radiômetros criogênicos operam em temperaturas próximas a ~ 10 K [42].

6. Discussões

O estudo da irradiância solar total constitui uma ferramenta importante no estudo das relações de energia solar com o clima da Terra. Assim como o estudo das variações da dinâmica do Sol durante o ciclo solar. O clima da Terra é um sistema complexo e suas oscilações dependem de um conjunto de fatores sendo a radiação solar um deles. O entendimento e a quantificação de todos esses fatores ainda hoje causam divergências na comunidade científica. Desde 1978, a TSI tem sido monitorada continuamente e observaram-se variações em diferentes escalas de tempo. Essas variações são de $\sim 0,1$ % em fase com o ciclo solar de 11 anos. Os valores de TSI estão disponíveis apenas para os últimos 4 ciclos solares e ainda hoje são a única entrada solar para muitos modelos de clima. Por muitos anos o valor médio da TSI foi considerado de $1365,4 \pm 1,3$ Wm^{-2} . Atualmente, o valor de $1361,0 \pm 0,5$ Wm^{-2} é aceito devido à utilização de instrumentos mais desenvolvidos tecnologicamente. O menor valor da TSI está sendo usado na análise meteorológica em projetos como ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*) [45]. Apesar das modelagens climáticas terem avançado nos últimos anos os resultados das simulações são principalmente determinados pelo conjunto de parâmetros de entrada e de suas incertezas. A irradiância solar é reconstruída e os resultados são utilizados para simular as respostas climáticas à variação solar em escalas centenárias. A reconstrução utilizando modelos como CHRONOS, SATIRE e NRLSSI2 considera períodos desde 1620 até 2015 [46]. Para as longas escalas de tempo, a precisão dos valores e as incertezas são definitivas nos resultados obtidos. Assim, as medias da TSI e a detecção de sua variabilidade requerem radiômetros com

alta precisão e estabilidade. Quantificar essas pequenas variações é um grande desafio motivado pelo desejo de entender a variabilidade solar e a importância da TSI no balanço energético da Terra. O monitoramento contínuo e o aprimoramento tecnológico permitem observações dessas variações. Por isso, todas as particularidades de um projeto de um radiômetro absoluto e de seu elemento detector devem ser avaliadas, pois, dependem de muitos fatores. Entre as considerações encontram-se a caracterização das cavidades, quantificação das incertezas envolvidas, além do nível de potência e irradiância em que o radiômetro absoluto operará.

A disseminação dos conceitos e princípios de funcionamento de radiômetros absolutos usados para medir a Irradiância Solar Total em ambiente espacial, muitas vezes é pouco explorada de forma descomplicada. Nesse artigo apresentamos uma visão simples dos conceitos físicos envolvidos nas medidas da radiação solar e a evolução dos instrumentos com o intuito de constituir-se uma ferramenta didática no ensino da física e nas suas aplicações na vida diária. Além disso, busca-se incentivar nacionalmente o interesse no desenvolvimento desse nicho de instrumentação que ainda é um grande desafio para a comunidade internacional.

Agradecimentos

Ao CNPq e ao INPE pela concessão das bolsas do Programa de Capacitação Institucional (300384/2018-1 e 300596/2017-0).

Referências

- [1] S.K. Solanki, N.A. Krivova e J.D. Haigh, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* **51**, 311 (2013).
- [2] J.M. Rodríguez Gómez, F. Carlesso, L.E. Vieira e L. Silva, *Revista brasileira de ensino física*, **40**, e3312 (2018).
- [3] K.L. Yeo, W.T. Ball, N.A. Krivova, S.K. Solanki, Y.C. Unruh e J. Morrill, *Journal of Geophysical Research (Space Physics)* **120**, 6055 (2015).
- [4] L.E.A. Vieira, S.K. Solanki, N.A. Krivova e I. Usoski, *Astronomy & Astrophysics* **531**, A6 (2011).
- [5] M.L. Cain, B.D. Bowman e S.D. Hacker, *Ecologia* (Artmed Editora, Porto Alegre 2018), p. 691.
- [6] V. Badescu, *Modeling Solar Radiation at the Earth's Surface: Recent Advances* (Springer Science & Business Media, Bucharest, 2008), 517 p.
- [7] F.J. Pozzoni, C.T. Pinto, R.A. Lamparelli, J.Z. Junior e M.A.H. Antunes, *Calibração de sensores orbitais* (Oficina de Textos, São Paulo, 2015), p. 96.
- [8] J. Hansen, M. Sato, R. Ruedy, L. Nazarenko, A. Lacis, G.A. Schmidt, G. Russell, I. Aleinov, M. Bauer, S. Bauer *et al.*, *Journal of geophysical research: atmospheres* **110**, D18104 (2005).
- [9] M.P. McCormick, L.W. Thomason e C.R. Trepte, *Nature* **373**, 399 (1995).
- [10] N.J. Shaviv, *Physical review letters* **89**, 051102 (2002).
- [11] H. Svensmark, *Monthly notices of the royal astronomical society* **423**, 1234 (2012).
- [12] L.E.A. Vieira, A. Norton, T.D. Wit, M. Kretzschmar, G.A. Schmidt e M.C.M. Cheung, *Geophysical research letters* **39**, 16104 (2012).
- [13] W.A. Vilela, *Estudo, desenvolvimento e caracterização de radiômetros para medidas da radiação solar*. Tese de Doutorado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos (2010).
- [14] F. Grum e R.J. Becherer, *Optical radiation measurements* (Academic Press, New York, 1979), v. 1, p. 347.
- [15] S. Chen, K. Xu e C. Lee, *Phys. Fluids* **24**, 11 (2012).
- [16] M. Bass, *Radiometry and photometry. Handbook of optics: volume II - design, fabrication, and testing; sources and detectors; radiometry and photometry* (McGraw Hill Professional, New York, 2010), p. 1264.
- [17] C. Parr, R.U. Datla e J. Gardner, *Optical radiometry* (Academic Press, Cambridge, 2005), p. 586.
- [18] G. Kopp e G. Lawrence, *Solar Physics* **230**, 91 (2005).
- [19] B. Walter, P. Levesque, G. Kopp, B. Andersen, I. Beck, W. Finsterle, M. Gyo, K. Heuerman, S. Koller, N. Mingard *et al.*, *Metrologia* **54**, 674 (2017).
- [20] C. Fröhlich, in: *Observing Photons in Space: A Guide to Experimental Space Astronomy*, editado por M.C.E. Huber, A. Pauluhn, J.L. Culhane, J.G. Timothy, K. Wilhelm e A. Zehnder (Springer, New York, 2013), 701 p.
- [21] K. Heuerman, D. Harber, A. Ebbets, G. Kopp e L. Logan, *Earth Observing Systems XI* **6296**, 62961H (2006).
- [22] F. Hengstberger, *Absolute Radiometry: Electrically Calibrated Thermal Detectors of Optical Radiation* (Academic Press, San Diego, 1989), p. 266.
- [23] F. Carlesso, *Desenvolvimento de elemento sensor para medida da irradiância solar total*. Tese de Doutorado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos (2018).
- [24] G.M. Lawrence, G. Rottman, J. Harder e T. Woods, *Metrologia* **37**, 407 (2000).
- [25] G. Kopp, K. Heuerman, D. Harber e G. Drake, *Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers* **6677**, 67709 (2007)
- [26] H. Kyle, D. Hoyt e J. Hickey, *Solar Physics* **152**, 1 (1994).
- [27] R.C. Willson, *Solar physics* **74**, 271 (1981).
- [28] C.H. Jackman e A.R. Douglass, *Advances in space research* **31**, 9 (2003).
- [29] A. Mecherikunne, H. Kyle, R. Lee, in: *Climate impact of solar variability* (NASA, Greenbelt, 1990) p. 309.
- [30] B.R. Barkstrom, *Bulletin of the american meteorological society* **65**, 1170 (1984).
- [31] C. Fröhlich, D.A. Crommelynck, C. Wehrli, M. Anklin, S. Dewitte, A. Fichot, W. Finsterle, A. Jiménez, A. Chevalier e H. Roth, *Solar physics* **175**, 267 (1997).
- [32] R.C. Willson, *The Earth Observer* **13**, 14 (2001).
- [33] G. Kopp, G. Lawrence e G. Rottman, *Solar Physics* **230**, 129 (2005).
- [34] J.J. Butler, B.C. Johnson, J.P. Rice, E.L. Shirley e R.A. Barnes, *Journal of research of the national institute of standards and technology* **113**, 187 (2008).
- [35] W. Schmutz, A. Fehlmann e W. Finsterle, in *American Institute of Physics (AIP) Conference* (Davos Dorf, Switzerland, 2013).
- [36] G. Kopp, *Current SORCE & TCTE data plots*, disponível em http://spot.colorado.edu/~kopp/TSI/#current_plots, acessado em 20/01/2018.

- [37] G. Kopp, D. Harber e K. Heuerman, in: *AGU Fall Meeting* (American Geophysical Union, San Francisco, 2011).
- [38] J.R. Hickey, B.M. Alton, H.L. Kyle e D. Hoyt, *Space science reviews* **48**, 321 (1988).
- [39] H. Kyle, D.V. Hoyt, J.R. Hickey, R.H. Maschhoff e B.J. Vallette, *Nimbus-7 earth radiation budget calibration history. Part 1: the solar channels* (NASA, Washington, 1993), 74 p.
- [40] R.C. Willson, *Applied Optics* **18**, 179 (1979).
- [41] R.C. Willson, *Applied Optics* **19**, 3256 (1980).
- [42] G. Kopp, A. Fehlmann, W. Finsterle, D. Harber, K. Heuerman e R. Willson, *Metrologia* **49**, S29 (2012).
- [43] G. Kopp, G. Lawrence e G. Rottman, *SPIE Proc.* **5171**, 5171-4 (2004).
- [44] G. Kopp, *Journal of Space Weather and Space Climate* **4**, A14 (2014).
- [45] I. Ermolli, K. Matthes, T. Dudok de Wit, N.A. Krivova, K. Tourpali, M. Weber, Y.C. Unruh, L. Gray, U. Langematz, P. Pilewskie *et al.*, *Atmospheric Chemistry & Physics* **13**, 3945 (2013).
- [46] T. Egorova, W. Schmutz, E. Rozanov, A.I. Shapiro, I. Usoskin, J. Beer, R.V. Tagirov e T. Peter, *ArXiv:1804.00287* (2018).