

DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS ESPECTRAIS DA RADIAÇÃO SOLAR NA SUPERFÍCIE TERRESTRE ATRAVÉS DE SATÉLITES

Rafael Haag – rahaag@unisinis.br

Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Departamento de Engenharia Elétrica

Arno Krenzinger – arno.krenzinger@ufrgs.br

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Laboratório de Energia Solar.

Resumo. Este trabalho apresenta uma metodologia para caracterizar a distribuição espectral da irradiância solar através de dados obtidos por instrumentos a bordo de satélites. Estas informações formam um banco de dados sobre parâmetros atmosféricos que alteram as características espectrais da irradiância solar. O modelo computacional de transferência radiativa na atmosfera SMARTS2 (Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine) adota este banco de dados como parâmetros de entrada e estima a intensidade e distribuição espectral da radiação solar sobre a superfície terrestre. Através da utilização dos instrumentos MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) a bordo dos satélites TERRA e AQUA e AIRS (Atmospheric Infrared Sounder) também instalado na plataforma AQUA, foram determinadas as concentrações e propriedades ópticas de aerossóis, quantidade de água precipitável, coluna de ozônio e dióxido de carbono sobre o território brasileiro. Instrumentos instalados no Laboratório de Energia Solar da UFRGS foram usadas para a validação das irradiâncias espectrais e de banda larga previstas pelo modelo computacional SMARTS2. Foram determinadas as características da distribuição espectral em Porto Alegre - RS, em uma base de dados decenal (2002-2011).

Palavras-chave: Radiação Solar, Irradiância Espectral, Parâmetros Atmosféricos, Sensoriamento Remoto, Satélites.

1. INTRODUÇÃO

O conhecimento sobre a intensidade e distribuição espectral da irradiância solar é extremamente importante para o correto dimensionamento de sistemas que utilizam a energia oriunda do Sol. Do mesmo modo, dados sobre as características dos diversos parâmetros atmosféricos e locais que alteram a distribuição espectral da radiação solar são vitais em inúmeras áreas da ciência e em incontáveis aplicações práticas.

Superfícies seletivas, como módulos fotovoltaicos possuem respostas espectrais distintas que variam em função da tecnologia utilizada na sua fabricação. Alguns módulos fotovoltaicos empregam a tecnologia de múltipla junção visando o aproveitamento da energia solar em uma ampla faixa espectral. Nestes módulos, associam-se em série normalmente duas ou três células de diferentes materiais sobrepostas. Sendo a corrente elétrica que circula nesta associação é idêntica para cada junção, logo a corrente total será definida pela célula de menor corrente. Como cada junção apresenta uma resposta espectral distinta, variações espectrais da radiação solar podem acarretar uma grande variação da eficiência de conversão de energia em relação às condições de calibração. Em trabalho recente, Marion, B. (2010), apresenta resultados que mostram variações de até 60% para módulos de tripla junção em razão de variações espectrais.

O espectro adotado como padrão para ensaios de dispositivos fotovoltaicos (ASTM G173-03) foi desenvolvido empregando-se o modelo de transferência radiativa SMARTS2 (Gueymard, 1995) e dados sobre parâmetros atmosféricos obtidos em cidades norte-americanas com média anual diária de irradiância solar direta maior que 6 kWh/m² e baixos valores de espessura óptica de aerossóis (AOD, do termo em inglês *Aerosol Optical Depth*). Sendo assim, os valores de irradiância preconizados pelo espectro ASTM G173-03 favorecem sistemas que empregam a componente direta da radiação solar. A Tab. 1 mostra os valores das concentrações dos principais constituintes atmosféricos considerados na elaboração do espectro de referência G173-03.

Tabela 1 - Concentrações dos principais constituintes atmosféricos empregados no modelo SMARTS2 para elaboração do espectro G173-03

AOD 500 nm	Água precipitável (cm)	Ozônio (atm-cm)	CO ₂ (ppm)
0,084	1,4164	0,3438	370

Pelo fato de serem avaliados geralmente sob um único espectro padrão de referência, o desempenho de dispositivos que empregam a energia solar em condições reais de uso pode variar devido às características espectrais diferentes da condição padrão. Quase sempre as características espectrais de uma determinada região não são conhecidas a priori. Além disto, um espectro específico adotado como padrão para avaliação de dispositivos que utilizam a energia do Sol, pode não ser o mais indicado para representar as características de uma região ou até mesmo país (Haag e Krenzinger, 2008a e Case, M. A. et al., 2008).

Da mesma forma que alteram a distribuição espectral da irradiância solar, alguns parâmetros atmosféricos, principalmente as nuvens, aerossóis e vapor de água, modificam a relação entre as componentes da irradiância solar, ou seja, a intensidade da componente direta, difusa e global de modo diferenciado. Este fato assume importância para sistemas que utilizam a irradiância direta para a conversão da energia solar, como exemplo sistemas que adotam concentração da radiação solar. Trabalhos preliminares (Haag, 2007 e Haag e Krenzinger, 2008b) apresentam algumas metodologias para determinação da distribuição espectral através de medidas realizadas por espectrorradiômetro e radiômetros seletivos em conjunto com modelos de transferência radiativa na atmosfera.

Tendo como base estes trabalhos, apresentamos uma metodologia de análise e caracterização da distribuição espectral da irradiância solar. Para isto, é empregado o modelo de transferência radiativa SMARTS2 que utiliza dados de entrada obtidos, principalmente, por instrumentos de medidas a bordo de plataformas espaciais.

2. METODOLOGIA

Atualmente existem inúmeras redes de instrumentos de alta qualidade destinados à obtenção de dados sobre radiação solar e análise de constituintes atmosféricos e seus dados são disponibilizados de forma quase instantânea. Similarmente, há uma vasta quantidade de satélites em órbita destinados à análise de um grande número de parâmetros atmosféricos. Estas plataformas espaciais além de fornecerem dados com precisão elevada, propiciam uma cobertura espacial e temporal suficiente para a aquisição destes parâmetros em escala global. Plataformas remotas de processamento prévio de dados, compostas por vários supercomputadores e grandes sistemas de armazenamento de dados (plataforma GIOVANNI da NASA, por exemplo), permitem a manipulação com grande rapidez de uma quantidade elevada de dados oriundos do sensoriamento a partir de satélites. Por fim, a velocidade de processamento dos computadores atuais permite executar rapidamente rotinas de alta demanda numérica que alguns anos atrás seriam impraticáveis em razão do tempo necessário para tal realização. Isto possibilita a execução de algoritmos para resolução de equações de transferência radiativa em uma grande escala temporal e espacial. Estes algoritmos para a resolução da Equação de Transferência Radiativa (ETR), apesar da sua enorme complexidade, atualmente estão consolidados, e fornecem dados com qualidade similar aos obtidos pelos melhores centros de referência em radiometria solar (Myers, D.R., 2003).

Neste artigo é mostrado um resumo dos resultados obtidos para a cidade de Porto Alegre, RS, em trabalho desenvolvido por Haag (2012), onde foi caracterizada a distribuição espectral da irradiância solar sobre o território brasileiro e verificado o impacto desta distribuição sobre sistemas fotovoltaicos de tecnologias distintas. Este trabalho foi executado através de uma análise de dados coletados por diferentes instrumentos e o modelo numérico de transferência radiativa na atmosfera SMARTS2 para atmosferas sem cobertura de nuvens. A Fig. 1 mostra um fluxograma que descreve de forma resumida a execução deste trabalho. Um maior aprofundamento sobre as várias etapas desta metodologia podem ser obtidas em Haag, 2012.

2.1 Instrumentação empregada

A metodologia empregada para aquisição de dados de inúmeros parâmetros atmosféricos, bem como para a validação dos resultados previstos, utiliza várias plataformas e instrumentos de medidas a bordo de satélites.

O sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) a bordo dos satélites TERRA e AQUA é empregado para assimilação dos dados sobre as características ópticas de aerossóis e quantidade de água precipitável. O instrumento AIRS, a bordo do satélite AQUA é empregado para a medida da concentração de ozônio e outros gases traço. Também estão sendo implementados processos de assimilação de dados fornecidos por outros sensores a bordo dos satélites Aura, CloudSat, PARASOL e CALIPSO que pertencem (juntamente com o AQUA) à constelação A-TRAIN ilustrada na Fig. 2. A disposição destes satélites pertencentes à constelação A-TRAIN, possibilita adquirir dados sobre parâmetros atmosféricos a partir de sensores distintos em uma mesma região do globo terrestre com intervalo temporal de poucos minutos.

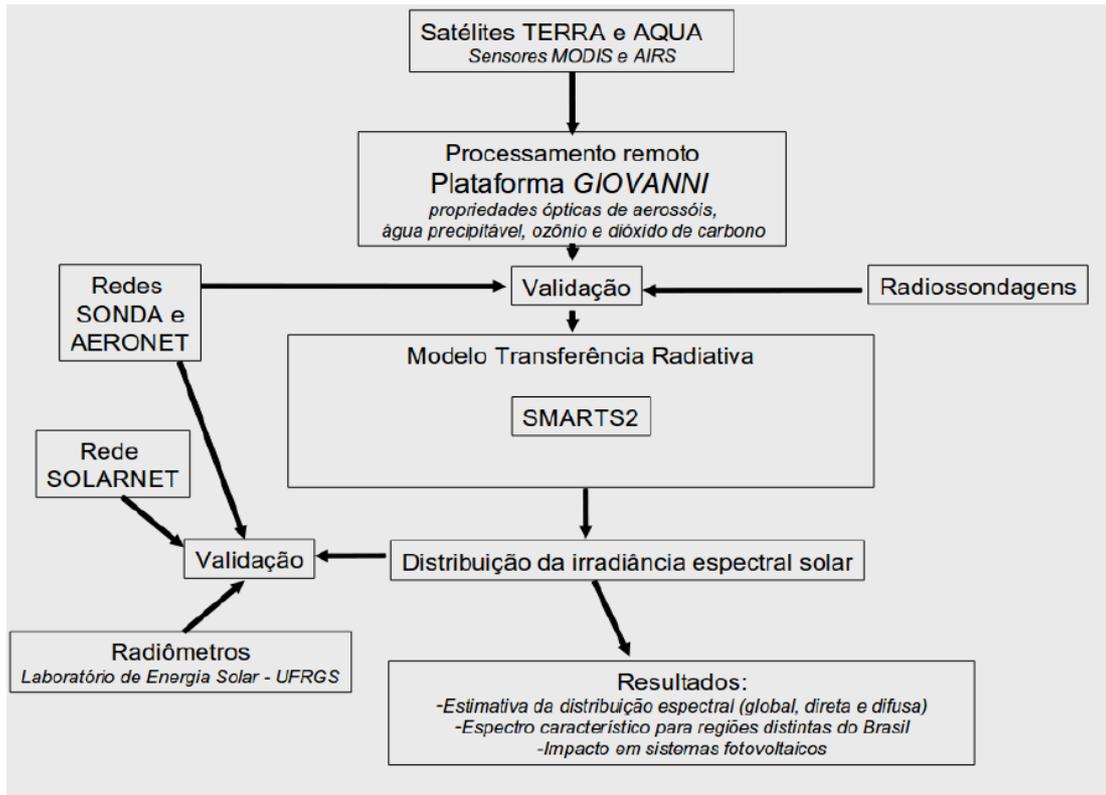


Figura 1 - Fluxograma resumido da metodologia empregada para obtenção da irradiância espectral

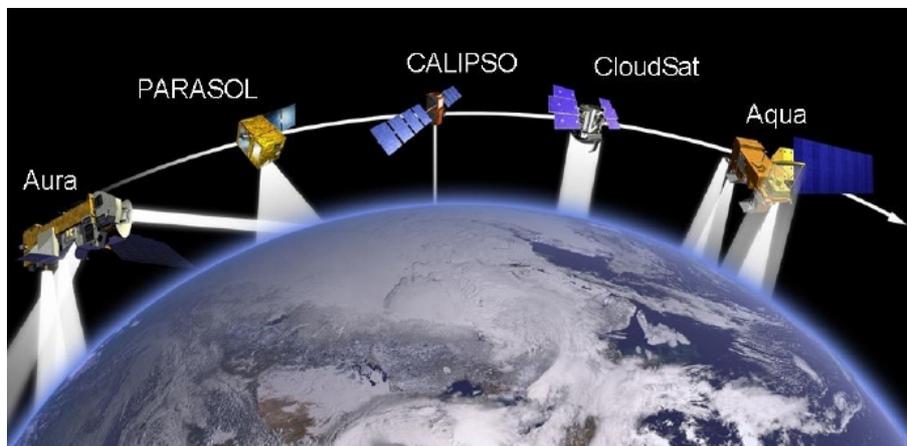


Figura 2 - Diagrama onde é visto a disposição dos satélites que fazem parte da constelação A-TRAIN. Fonte: NASA.

Informações obtidas através de radiossondas que são lançadas a cada 12 horas (12 e 24 horas UTC) foram utilizadas para a determinação da quantidade de água precipitável. Estes dados, medidos *in situ* com grande confiabilidade foram utilizados como base para a validação dos valores de água precipitável obtido por satélites. Em Haag (2012), foram analisadas informações fornecidas por 30 cidades distribuídas em praticamente todas as regiões do território brasileiro onde são realizados os lançamentos destas radiossondas.

A rede global de radiômetros situados em terra, denominada AERONET (*AErosol RobotiC NETwork*), foi utilizada para validação da caracterização óptica dos aerossóis e quantidade de água precipitável. Esta rede desenvolvida e mantida pela NASA (agência espacial americana) e CNES (agência espacial francesa) possui cerca de 800 estações automáticas espalhadas pelo planeta.

Outras duas redes de radiômetros terrestres, a SONDA e SolRad-Net, foram usadas para a validação das irradiâncias espectrais e de banda larga previstas pelo modelo computacional empregado.

Instrumentos instalados no Laboratório de Energia Solar da UFRGS, dentre eles piranômetros de banda larga, radiômetros espectrais e espectralradiômetros também foram usados na validação das estimativas de distribuição

espectral prevista pelo modelo de transferência radiativa. Um maior detalhamento sobre estes instrumentos e metodologia de validação dos resultados obtidos pelas plataformas a bordo de satélite pode ser encontrada em Haag (2012).

3. OBTENÇÃO E INTERCOMPARAÇÃO DOS PARÂMETROS ATMOSFÉRICOS

A seguir, descreve-se a metodologia empregada para a obtenção e intercomparação dos parâmetros atmosféricos adotados como dados de entrada para o modelo paramétrico SMARTS2 que estima a distribuição espectral da radiação solar. Os dados dos parâmetros atmosféricos obtidos a partir de plataformas espaciais são processados remotamente através do sistema GIOVANNI (acrônimo para *GES-DISC Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center Interactive Online Visualization ANd aNalysis Infrastructure*). Em Haag (2012), foram empregadas duas escalas espaciais distintas, denominadas de mesoescala e local. No padrão de mesoescala apresenta-se a distribuição dos parâmetros atmosféricos para todo o território brasileiro e em escala local foram definidas 4 cidades com características distintas na concentração e distribuição de aerossóis, vapor de água e ozônio e outros parâmetros utilizados no modelo de transferência radiativa. Neste trabalho, mostramos os resultados obtidos para a cidade de Porto Alegre.

Cabe ressaltar que o tempo de assimilação dos dados através da plataforma GIOVANNI é dependente de inúmeros fatores entre eles a base de informação empregada, maturidade do algoritmo usado, volume dos dados de entrada, localização do servidor principal, volume de usuários, entre outros. Cada instrumento a bordo das plataformas espaciais produz cerca de 1 TB de dados por dia. Atualmente a base de dados da plataforma GIOVANNI possui um valor superior a 10 PB (PetaByte = 10^{15} Byte). Na Fig. 3, temos um fluxograma simplificado mostrando as principais etapas do processo de análise de dados através da plataforma remota GIOVANNI.

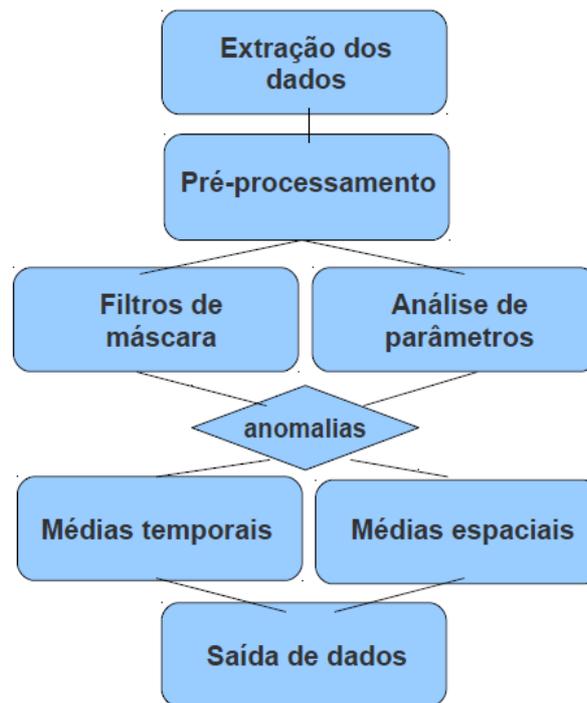


Figura 3 - Fluxograma simplificado mostrando as principais etapas durante a análise de dados através da plataforma GIOVANNI.

Inicialmente os parâmetros a serem analisados são transferidos da fonte de dados original (arquivos ou banco de dados) na etapa denominada de extração dos dados. Em seguida, estes dados são gerenciados e pré-processados. Após a etapa de pré-processamento, aplicam-se os filtros de máscaras, que variam de acordo com os dados a serem obtidos pelo usuário. Esta etapa é responsável, por exemplo, pela eliminação de dados que apresentem contaminação em razão da presença de nuvens em áreas maiores que 30% do pixel analisado. Alguns filtros de máscaras são manipulados e configurados apenas pelo grupo de análise da plataforma GIOVANNI, não sendo portanto configurável pelo usuário. Na etapa denominada de Análise de parâmetros, os dados, do sensor utilizado, em formato HDF (*Hierarchical Data Format*), são processados para extrair as informações solicitadas pelo usuário. Nesses arquivos há um total de 64 variáveis disponíveis, sendo que muitas delas são utilizadas apenas de forma diagnóstica, permitindo que o usuário possa avaliar a qualidade dos resultados. Parâmetros geométricos e de localização são fornecidos em variáveis armazenadas sob a forma de matrizes, tais como latitude, longitude, ângulo solar zenital, ângulo zenital do sensor, ângulo de espalhamento, etc. Os resultados desta etapa, também em formato HDF, possuem saída similares às estruturas de entrada, diferenciando-se apenas na dimensão da grade escolhida para análise. A próxima etapa de processamento

(anomalias) calcula as anomalias dos parâmetros selecionados. O algoritmo adotado pelo sistema GIOVANNI para a obtenção da anomalia média mensal dos dados analisados baseia-se na seguinte expressão:

$$Xa_i = X_i - Xm_i \quad (1)$$

onde, i representa o número do mês (1, 2, ..., 12), Xa_i indica a anomalia para o mês i , X_i são os dados originais para o mês i e Xm_i são os dados climatológicos para o mês selecionado. Após a etapa de verificação de anomalias, os dados passam pelo processo de estimativa da razão das médias temporais e espaciais sobre a grade analisada (Médias temporais e Médias espaciais). Nesta etapa, é empregado um algoritmo que busca obter valores médios dos parâmetros analisados em função da base temporal ou da dimensão da área solicitada pelo usuário. Normalmente, a análise de dados de uma determinada grade necessita de uma correção para o correto cômputo para uma média mensal ao longo de um ano dos valores adquiridos em períodos variáveis. Pode-se demonstrar isto na expressão abaixo:

$$\bar{v}_{(x,y,z,\dots)} = \frac{\sum_{t=1}^n v_{(x,y,z,\dots,t)}}{\sum_1^N t} \quad (2)$$

onde, t representa a ocorrência de aquisições de um determinado parâmetro e x ; y ; z outras variáveis que não sofrem alterações durante a estimativa da razão das médias dos valores de t . A última etapa de processamento dos dados na plataforma GIOVANNI consiste em apresentar os resultados no formato solicitado pelo usuário antes da extração dos dados. Por padrão, a plataforma GIOVANNI sempre disponibiliza os resultados em arquivos no formato HDF, NCD e ASCII, além de outros formatos que podem ser determinados pelo usuário (mapas, séries temporais, diagrama de Hovmoller, etc.).

3.1 Parâmetros atmosféricos para a cidade de Porto Alegre.

Porto Alegre possui um clima classificado como subtropical úmido (Cfa, segundo a escala de Köppen), tendo como característica marcante a grande variabilidade térmica ao longo do ano. A presença da grande massa de água do lago Guaíba contribui para elevar as taxas de umidade atmosférica e modificar as condições climáticas locais, com a formação de microclimas. As chuvas são bem distribuídas, com a média anual permanecendo em torno de 1300 mm. O mês mais chuvoso é setembro, com média de 132 mm, e o mais seco é novembro, com 79 mm. Janeiro e fevereiro têm a temperatura média mais alta do ano, chegando a 31°C, e junho e julho a mais baixa, com 9°C. A umidade relativa do ar média é de 76%.

A Fig. 4 apresenta a variação temporal para os valores médios mensais da espessura óptica de aerossóis e a distribuição mensal do valor de AOD com o respectivo desvio padrão médio para a cidade de Porto Alegre entre o período de janeiro de 2002 e dezembro de 2011. Estes dados foram medidos através do sensor MODIS-TERRA.

Na Fig. 4 pode-se observar que os valores médios de AOD (550 nm) em Porto Alegre situam-se abaixo de 0,13, no entanto, em eventos isolados, o valor médio diário para o AOD pode ser maior que 1. Isto ocorre principalmente durante os meses de agosto-setembro (época de maior intensidade das queimadas no centro-oeste e norte do país) quando a cidade recebe parte do material particulado que é transportado até o sul do Brasil.

O gráfico da Fig. 5 apresenta os valores médios mensais para o expoente de Ångström entre janeiro de 2002 e dezembro de 2011. Através dos valores mostrados na Fig. 5, constata-se que a maior parte dos aerossóis presentes na cidade de Porto Alegre é composta por uma população de partículas com raio efetivo da ordem de 1,4, ou seja, material particulado de pequena dimensão.

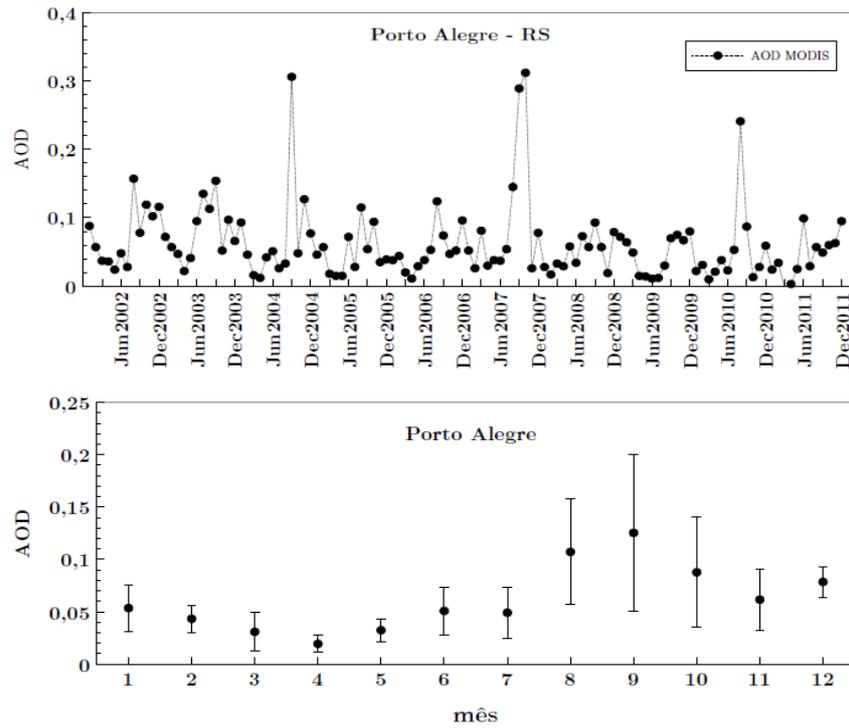


Figura 4 - Série temporal para os valores médios mensais da espessura óptica de aerossóis e valores médios com respectivos desvios padrão médio mensal na cidade de Porto Alegre entre janeiro de 2002 e dezembro de 2011.

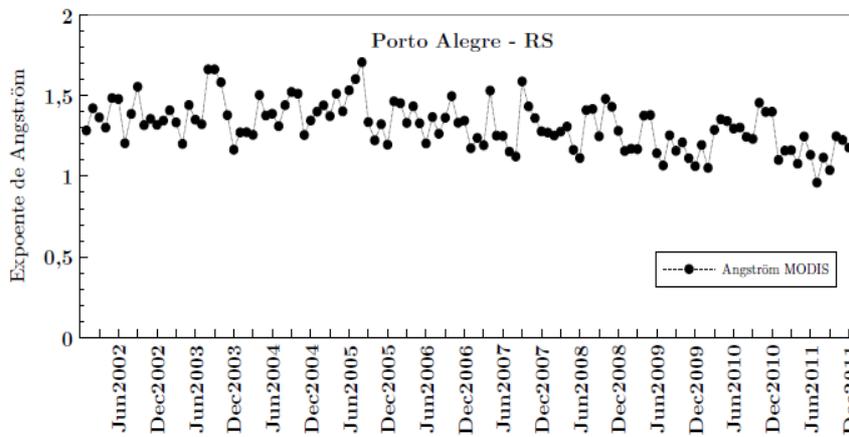


Figura 5 - Série temporal para os valores médios mensais do expoente de Angström na cidade de Porto Alegre entre janeiro de 2002 e dezembro de 2011.

A série temporal e a distribuição mensal para os valores médios de vapor de água na cidade de Porto Alegre são vistas na Fig. 6. É possível observar um perfil de distribuição anual que se repete no intervalo de aquisição dos dados (janeiro de 2002 até dezembro de 2011).

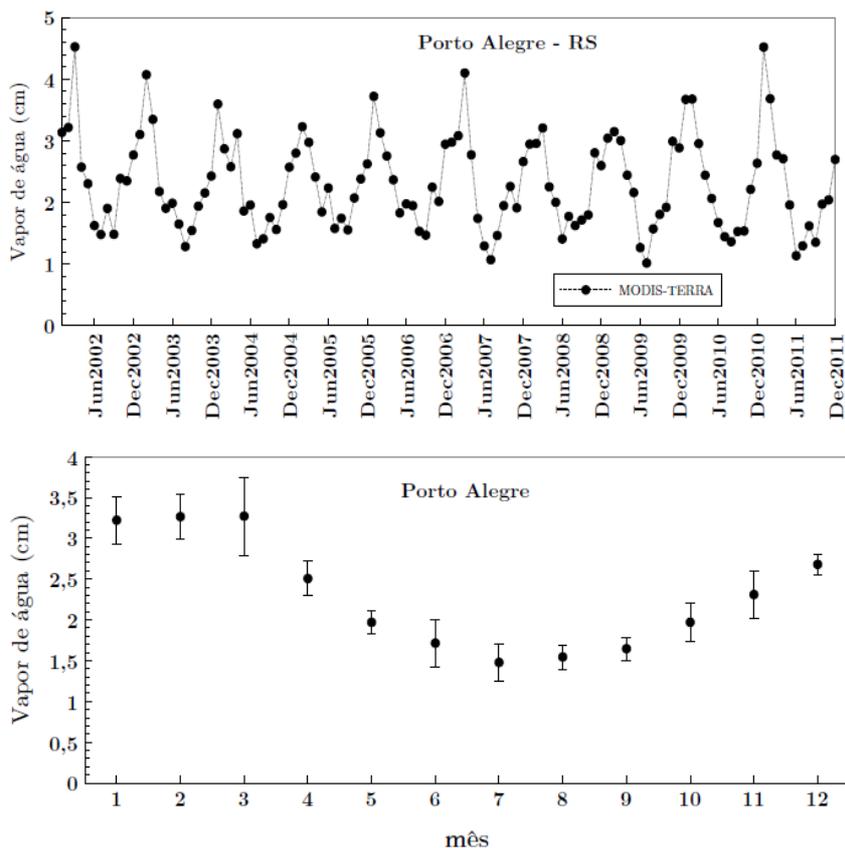


Figura 6 – Série temporal para os valores médios mensais do vapor de água e os valores médios mensais com respectivos desvios padrão médio na cidade de Porto Alegre entre janeiro de 2002 e dezembro de 2011.

Nos meses de junho-julho é observado um valor de vapor de água que se aproxima do estipulado pela norma ASTM G-173 (1,42 cm), mas nos demais meses, o valor médio é superior ao da norma americana.

A concentração de ozônio em Porto Alegre foi obtida através do sensor AIRS a bordo do satélite AQUA. A Fig. 7 mostra a série temporal para as médias mensais da coluna de ozônio entre janeiro de 2003 e dezembro de 2011.

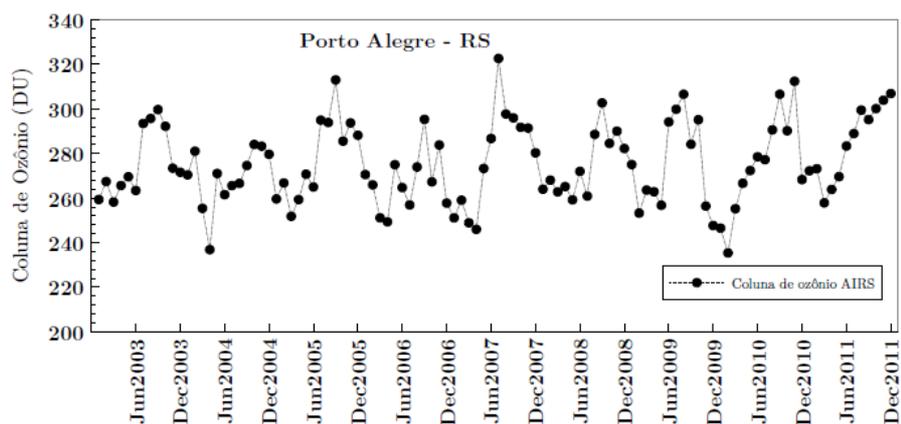


Figura 7 - Série temporal para a média mensal da coluna de ozônio obtida pelo sensor AIRS-AQUA entre janeiro de 2003 e dezembro de 2011.

4. VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS E ESPECTRO PADRÃO PARA PORTO ALEGRE

A Fig. 8 apresenta uma medida espectral da componente direta da irradiância solar obtida pelo espectrorradiômetro modelo EPP-2000 da empresa APOGEE entre 350 e 1000 nm no dia 22 de janeiro de 2009 às 13h43m (hora local) no Laboratório de Energia Solar da UFRGS em Porto Alegre, RS. A Linha contínua mostra a irradiância espectral estimada pelo código SMARTS2 através dos parâmetros atmosféricos obtidos pelo sensor MODIS para este dia específico. Nota-se uma boa correlação para quase toda a extensão espectral entre os dados medidos e os

previstos pelo modelo de transferência radiativa. Nos limites extremos da faixa de cobertura do espectrorradiômetro, observa-se uma maior dispersão entre os dados fornecidos pelo instrumento e os previstos pelo programa, isto ocorre em função da curva típica de sensibilidade do sensor utilizado neste espectrorradiômetro (arranjo de sensores de silício).

Durante aproximadamente 4 anos foram realizadas mais de uma centena de medidas espectrais para verificar a confiabilidade dos dados fornecidos pelo código de transferência radiativa SMARTS2 e os parâmetros atmosféricos adotados como entrada deste programa. Estas medidas espectrais obtidas em condições de céu claro mostraram uma elevada concordância (desvio padrão médio menor que 5%) com os valores previstos pelo modelo SMARTS2 e dados de entrada obtidos pelas plataformas espaciais (Haag, R. e Krenzinger, A. 2008a).

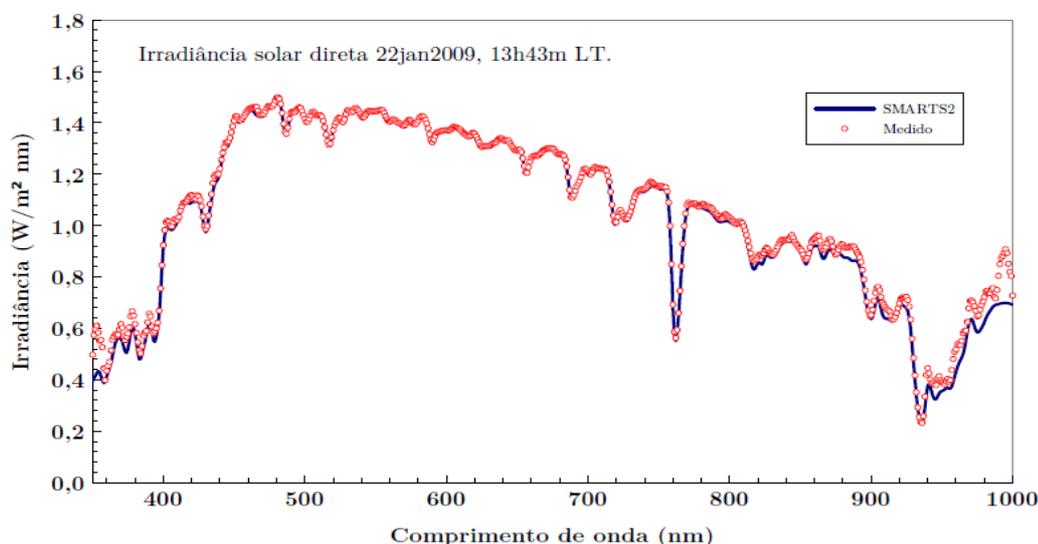


Figura 8 - Medida espectral da componente direta da radiação solar obtida em 22 de janeiro de 2009 às 13h43m (hora local) no Laboratório de Energia Solar da UFRGS em Porto Alegre através do espectrorradiômetro EPP2000 da APOGEE (pontos vermelhos). A linha azul representa os valores previstos pelo código de transferência radiativa SMARTS2.

A partir dos dados obtidos sobre as características dos principais parâmetros atmosféricos que alteram a distribuição espectral da radiação solar sobre a superfície terrestre, é possível estimar, através do uso da metodologia desenvolvida, um espectro típico para cada região analisada, e compará-lo ao espectro previsto pela norma ASTM G-173. Na Tab. 2, apresentam-se os valores médios anuais para as concentrações de ozônio, vapor de água, AOD e CO₂ com seus respectivos desvios-padrão para a cidade de Porto Alegre. Os valores previstos para estes parâmetros pela norma ASTM G-173 também são vistos na Tab. 2.

Tabela 2 - Parâmetros atmosféricos característicos para a cidade de Porto Alegre e da Norma ASTM G-173. O desvios-padrão (σ) para os valores de concentração de ozônio, vapor de água e AOD são apresentados entre parênteses.

Localidade	Ozônio (σ) (UD)	Vapor de água (σ) (cm)	AOD (σ)	CO ₂ (ppmv)
ASTM G-173	343,8	1,42	0,084	370
Porto Alegre, RS	275,4 (9,26)	2,30 (0,24)	0,061 (0,028)	384

Para a uma estimativa correta da distribuição espectral da radiação solar, além dos parâmetros atmosféricos, é necessário considerar as condições geométricas que dependem principalmente da latitude local. Neste aspecto, a geometria adotada pela norma ASTM G-173 (inclinação de referência para o módulo fotovoltaico de 37°) não é representativa para as condições encontradas no território brasileiro. A norma ASTM G-173 foi configurada para atender aos valores médios dos 48 estados contíguos americanos, assim, o valor estipulado para a latitude, e consequentemente a inclinação de referência é 37°. Em razão deste valor de latitude média a norma ASTM G-173 utiliza o valor de 1,5 para a massa de ar, pois este número representa o valor médio anual do ângulo zenital solar às 12 horas (horário local) no território americano.

No Brasil, a adoção de uma latitude média de 37° não é representativa, pois a extensão territorial do Brasil nem atinge este valor. Uma massa de ar com valor inferior a 1,5 representaria melhor as condições encontradas no território brasileiro. A Fig. 9 apresenta a variação do ângulo zenital solar a cada minuto ao longo de um ano para a cidade de Porto Alegre, RS (latitude - 30,0° e longitude 51,2°). O gráfico apresentado na Fig. 9 foi executado através de um algoritmo que estima a posição zenital e azimutal solar para o período entre os anos -2000 até 6000 com uma incerteza

de $\pm 0,0003^\circ$. Este algoritmo utiliza as equações propostas por Reda, I e Andreas, A. (2004). Através da Fig. 9, pode-se observar que o ângulo zenital médio anual, ao meio dia solar, em Porto Alegre é próximo de 30° , assim, a massa de ar representativa seria 1,15 para Porto Alegre.

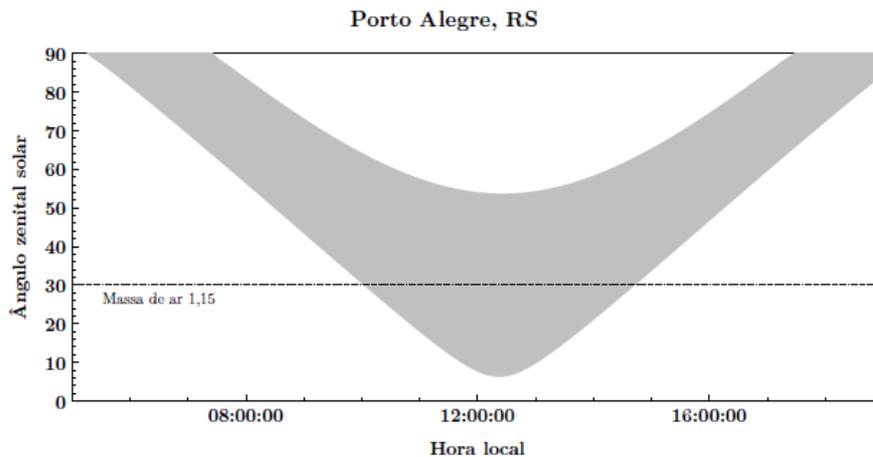


Figura 9 - Variação do ângulo zenital solar a cada minuto ao longo de um ano para a cidade de Porto Alegre, RS.

Empregando os dados climatológicos obtidos para os valores médios anuais de concentração de vapor de água, aerossóis, ozônio e dióxido de carbono, além das massas de ar e configurações geométricas representativas para a cidade de Porto Alegre, apresentamos a irradiância espectral global e comparamos com a distribuição prevista pela norma ASTM G-173. A Fig. 10 mostra a distribuição espectrais prevalente da irradiância solar para a cidades de Porto Alegre. Para uma melhor visualização, o gráfico de irradiância espectral é apresentado entre os comprimentos de onda de 280 até 2000 nm. Haag (2012), apresenta em detalhes os arquivos que foram gerados pelo código SMARTS2 contendo um resumo dos parâmetros de entrada e dados de saída, bem como as componentes direta, difusa e global das irradiâncias espectrais integradas no espectro.

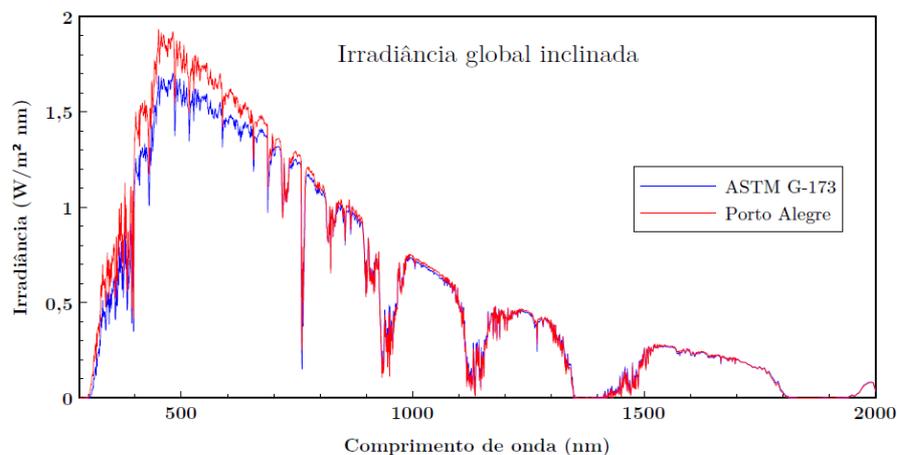


Figura 10 - Espectro característico para uma superfície voltada para o norte e com inclinação de 30° na cidade de Porto Alegre, RS (vermelho) e o espectro definido pela norma ASTM G-173 (azul).

A Fig. 10 revela em Porto Alegre uma distribuição espectral com intensidade de irradiância superior relação ao espectro padrão ASTM G-173 para comprimentos de onda menores que 800 nm. Para comprimentos de onda maiores que 900 nm, o espectro característico para a cidade de Porto Alegre possui intensidade inferior em relação à distribuição espectral estimada pela norma ASTM G-173. Estas variações de intensidades espectrais são decorrentes em função dos valores típicos para a massa de ar e concentração de água precipitável em Porto Alegre. Valores baixos de massa de ar implicam em uma irradiância solar global com maior intensidade em menores comprimentos.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho apresentamos uma metodologia para a determinação da irradiância espectral solar através de dados de parâmetros atmosféricos obtidos por meio de satélites. Os resultados fornecidos por esta técnica apresentam excelente concordância com medidas realizadas através de espectrorradiômetros calibrados na cidade de Porto Alegre, RS. Os principais parâmetros atmosféricos empregados como dados de entrada pelo código SMARTS2 foram obtidos a partir de plataformas espaciais e processados remotamente através do sistema GIOVANNI desenvolvido e mantido pela

agência espacial americana (NASA). Constatou-se que o espectro de referência proposto pela norma americana ASTM G-173 não é representativo para as características da distribuição espectral verificadas no território brasileiro. A configuração geométrica preconizada pela norma ASTM G-173 foi desenvolvida para representar as condições de irradiância espectral no território norte-americano, que possui uma latitude média de 37°, no entanto, o território brasileiro nem alcança latitudes com este valor. As concentrações de aerossóis, ozônio, vapor de água e dióxido de carbono previstas pela norma ASTM G-173 não representam com fidelidade as condições encontradas no território brasileiro.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao INCT/EREEA, CAPES e CNPq pelo apoio financeiro recebido para o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Case, M., Owusu, Y.; Chapman, H; Dargan, T; Ruscher, P., 2008. On the matter of proposed new low-latitude solar reference spectra”, *Renewable Energy*, vol. 33, 12, pp. 2645-2652.
- Gueymard, C. A., 1995. SMARTS2, A Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine: Algorithms and Performance Assessment, Report FSEC-PF-270-95 Florida Solar Energy Center/University of Central Florida, USA.
- Haag, R., 2007. Desenvolvimento de um radiômetro espectral e metodologia para caracterização do espectro solar, Dissertação de Mestrado em Engenharia - Escola de Engenharia, UFRGS, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica - PROMEC.
- Haag, R. e Krenzinger, A., 2008a. Análise da influência de parâmetros atmosféricos e locais na distribuição espectral da radiação solar. Congresso Brasileiro de Energia Solar, Florianópolis. Anais do II Congresso Brasileiro de Energia Solar.
- Haag R. e Krenzinger, A., 2008b, Validação de uma metodologia para determinação da irradiância espectral solar utilizando um radiômetro espectral, XIV Congresso Ibérico e IX Congresso Iberoamericano de Energia Solar, Vigo, Espanha.
- Haag, R., 2012. Estimativa da Distribuição Espectral da Radiação Solar sobre o Território Brasileiro Através de Análise Multiinstrumental, Tese de Doutorado, PROMEC, UFRGS, Porto Alegre.
- Marion, B., 2010. Preliminary Investigation of Methods for Correcting for Variations in Solar Spectrum under Clear Skies. Technical Report, NREL. Golden, CO, USA.
- Myers, D. R., 2003. Solar Radiation Modeling and Measurements for Renewable Energy Applications: Data and Model Quality. NREL/CP-560-33620
- Reda, I. e Andreas, A., 2004. Solar Position Algorithm for Solar Radiation Applications, *Solar Energy*, vol. 76, pp. 577-589.

DETERMINATION OF SPECTRAL CHARACTERISTICS OF SOLAR RADIATION ON EARTH'S SURFACE THROUGH SATELLITES

Abstract. *This paper presents a methodology to characterize the spectral distribution of solar irradiance through data obtained by instruments on board satellites. This information forms a database of atmospheric parameters that alter the spectral characteristics of solar irradiance. The computational model of radiative transfer in the atmosphere SMARTS2 (Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine) adopts this database as input parameters and estimates the intensity and spectral distribution of solar radiation on the earth's surface. Through the use of instruments MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) onboard the TERRA and AQUA satellites and AIRS (Atmospheric Infrared Sounder) also installed on the AQUA platform, we determined the concentrations and optical properties of aerosols, amount of precipitable water, ozone column and carbon dioxide over the Brazilian territory. Instruments installed in the Solar Energy Laboratory at UFRGS were used to validate the spectral irradiance and broadband provided by the computational model SMARTS2. We also determined the characteristics of spectral distribution in Porto Alegre - RS, based on a ten-year data (2002-2011).*

Key words: Solar Radiation, Irradiance Spectral, Atmospheric Parameters, Remote Sensing e Satellites