

ESPECTRO SOLAR CARACTERÍSTICO PARA A REGIÃO DO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

Rafael Haag – rafael-haag@uergs.edu.br

Universidade Estadual do Rio Grande do Sul – Ciências Exatas e Engenharias

Arno Krenzinger – arno.krenzinger@ufrgs.br

Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Laboratório de Energia Solar

Resumo. Este trabalho analisa a distribuição espectral da radiação solar global na superfície terrestre na cidade de Petrolina, PE, (9° 23' S, 40° 30' W), cidade localizada no centro da região semiárida brasileira e que apresenta uma das maiores médias anuais de insolação solar do país. O espectro solar típico para a cidade de Petrolina foi obtido por meio do modelo computacional de transferência radiativa na atmosfera SMARTS2. 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 em uma base de dados decenal (2002-2011). A distribuição espectral característica para a região do semiárido foi comparada com o espectro de referência ASTM G173-03 e constata-se uma irradiância superior para comprimentos de onda menores que 800 nm e menor intensidade nas regiões de absorção do vapor de água.

Palavras-chave: Radiação solar, Espectro solar, Espectro de referência ASTM G173-03.

1. INTRODUÇÃO

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. Marion (2010), apresenta resultados que mostram variações de até 60% para módulos de tripla junção em razão de variações espectrais. Haag (2012), também mostra que a eficiência de módulos fotovoltaicos de segunda geração apresenta uma forte dependência com as características espectrais da radiação solar no local de operação.

O espectro adotado mundialmente como padrão para ensaios de dispositivos fotovoltaicos (ASTM G173-03, 2012) foi desenvolvido empregando-se o modelo de transferência radiativa SMARTS2 (*Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine*), Gueymard (1995), e utiliza dados sobre parâmetros atmosféricos obtidos em cidades norte-americanas situadas na costa Oeste e 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 são representativos para cidades com clima árido e desértico. Além disto, os parâmetros geométricos adotados (inclinação do módulo de 37° e massa de ar 1,5) representam os valores médios para os 48 estados contíguos americanos. No Brasil, por exemplo, nenhuma cidade atinge a latitude 37°.

Neste trabalho utilizamos os mesmos referências adotados na elaboração do espectro ASTM G173-03 para obter a distribuição espectral solar representativa para a cidade de Petrolina no estado de Pernambuco, situada na região semiárida brasileira (Fig. 1) e que apresenta taxas médias anuais de irradiação solar global horizontal acima de 6 kWh/m². Foram analisados os valores médios anuais (média decenal entre janeiro de 2002 até dezembro de 2011) para os principais parâmetros atmosféricos que alteram as características espectrais da radiação solar na superfície e utilizamos os valores de inclinação e massa de ar compatíveis com a região analisada.

2. METODOLOGIA

Este trabalho segue a metodologia apresentada por Haag (2012) e Haag e Krenzinger (2014). Nestes trabalhos foi caracterizada a distribuição espectral da irradiância solar sobre o território brasileiro e verificado o impacto desta distribuição sobre sistemas fotovoltaicos de tecnologias distintas.

A metodologia empregada pode ser dividida em duas etapas: coleta e análise dos parâmetros atmosféricos e execução do modelo numérico de transferência radiativa na atmosfera SMARTS2 para atmosferas sem cobertura de nuvens.

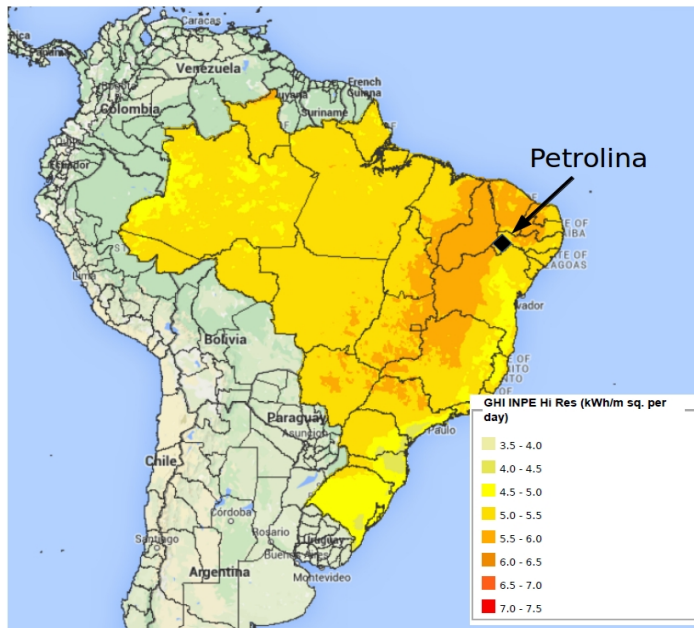


Figura 1 - Localização da cidade de Petrolina na região nordeste do Brasil.

A Fig. 2 revela 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.

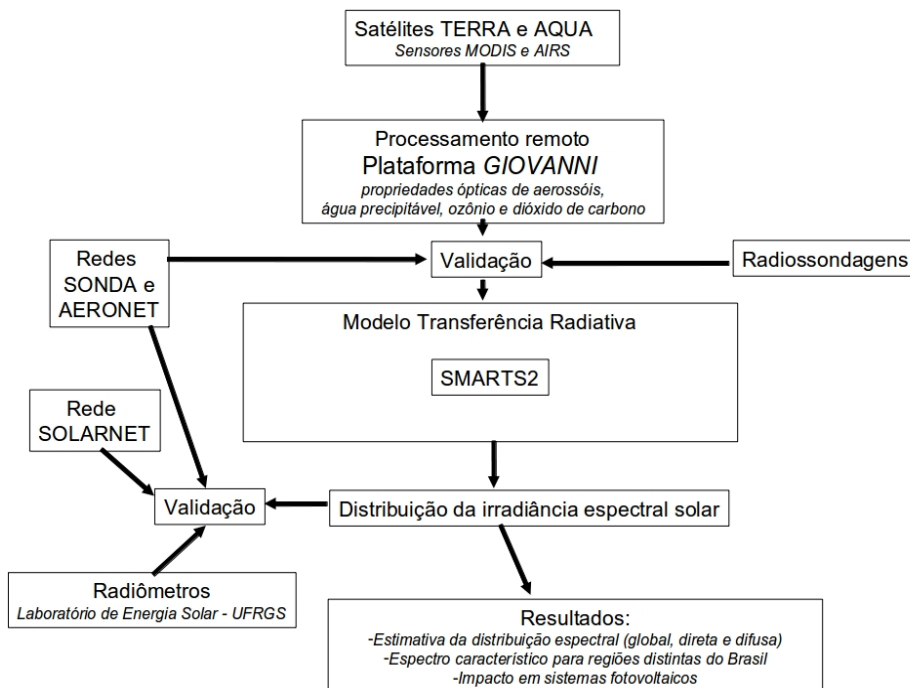


Figura 2 - Fluxograma resumido da metodologia empregada para obtenção da irradiância espectral na superfície terrestre.

Atualmente existem inúmeras redes de instrumentos de alta qualidade (redes AERONET e SONDA, por exemplo) destinados à obtenção de dados sobre radiação solar e seus resultados 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, permitem a manipulação com grande rapidez de uma quantidade elevada de dados oriundos do sensoriamento a partir de satélites. O sensor MODIS 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.

2.1 Obtenção e análise dos parâmetros atmosféricos

Os dados sobre os 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*). Na Fig. 3, temos um fluxograma simplificado mostrando as principais etapas do processo de análise de dados através da plataforma remota 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. 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.

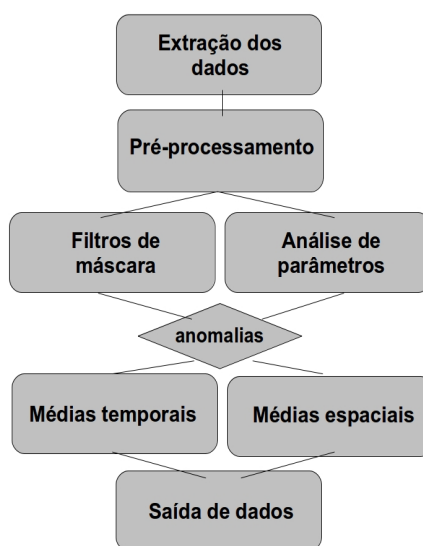


Figura 3 - Fluxograma simplificado mostrando as principais etapas durante a análise de dados através da plataforma GIOVANNI.

3. PARÂMETROS ATMOSFÉRICOS TÍPICOS PARA A CIDADE DE PETROLINA

Petrolina, no estado de Pernambuco, possui características climáticas tropicais e semiáridas, tipo BshW, segundo a classificação de Köppen, seco e quente, caracterizado pela escassez e irregularidade das precipitações e forte evaporação em consequência das altas temperaturas. Petrolina, encontra-se em uma região que apresenta as mais elevadas taxas de insolação do Brasil com média diária anual próxima de 8 horas/dia.

A Fig. 4 mostra a série temporal e as médias mensais com os respectivos desvios padrão para a espessura óptica de aerossóis entre janeiro de 2002 e dezembro de 2011 obtidas pelo sensor MODIS-TERRA. Nota-se a baixa concentração de material particulado entre maio e agosto. Nos demais meses, o valor médio de AOD é inferior ao adotado pela norma ASTM G173-03. Os valores médios mensais para o expoente de Ångström na cidade de Petrolina entre janeiro de 2002 e dezembro de 2011 são visualizados na Fig. 5. A Fig. 5 mostra que a concentração de partículas de aerossóis em Petrolina é composta por material de pequena dimensão.

A distribuição da quantidade de vapor de água em petrolina e seu perfil mensal médio entre o período decenal de análise estão mostrados na Fig. 6. Nota-se uma distribuição regular ao longo do ano com baixos valores de desvios-padrão. Para nenhum mês do ano Petrolina apresenta uma média mensal de concentração de vapor de água similar ao previsto na norma ASTM G173-03.

Na Fig. 7 tem-se a série temporal para a concentração de ozônio em Petrolina. Estes valores também foram obtidos através do sensor MODIS-TERRA entre o período decenal de análise.

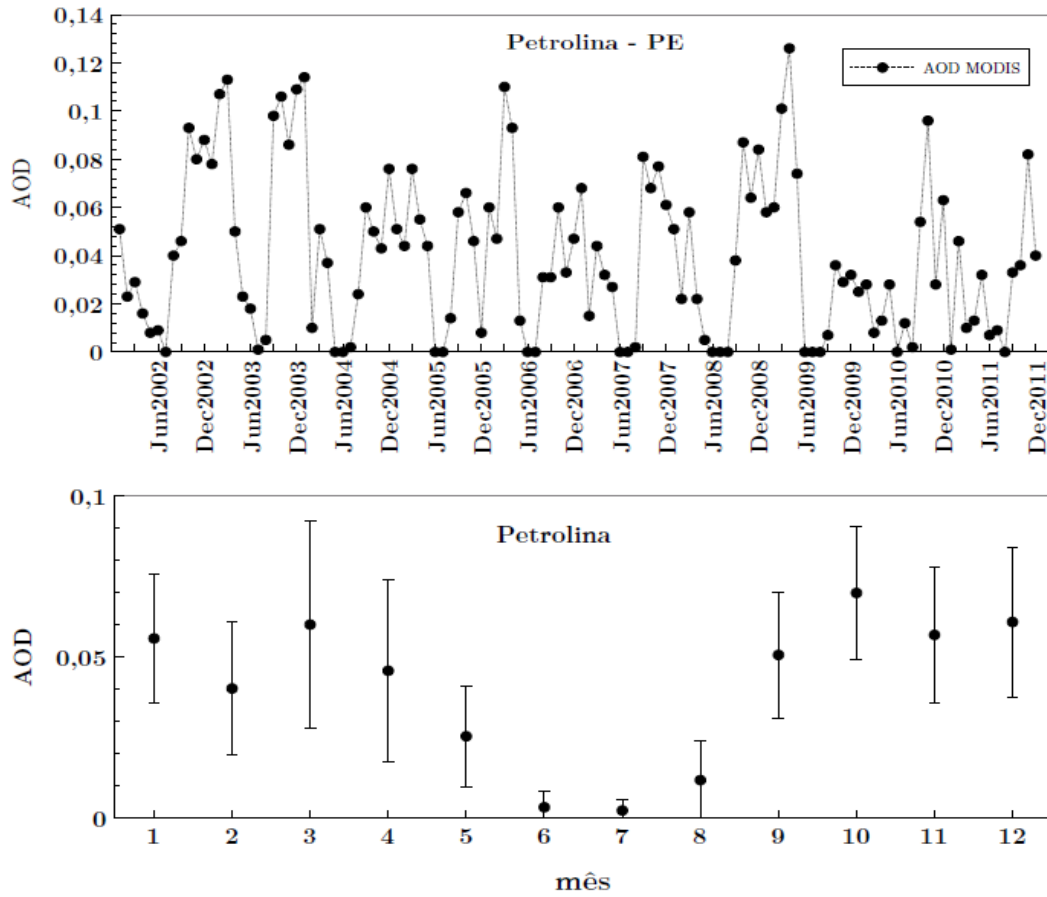


Figura 4 - Série temporal para os valores médios mensais da espessura óptica de aerossóis e valores médios com respectivos desvios padrão médio mensal na cidade de Petrolina entre janeiro de 2002 e dezembro de 2011.

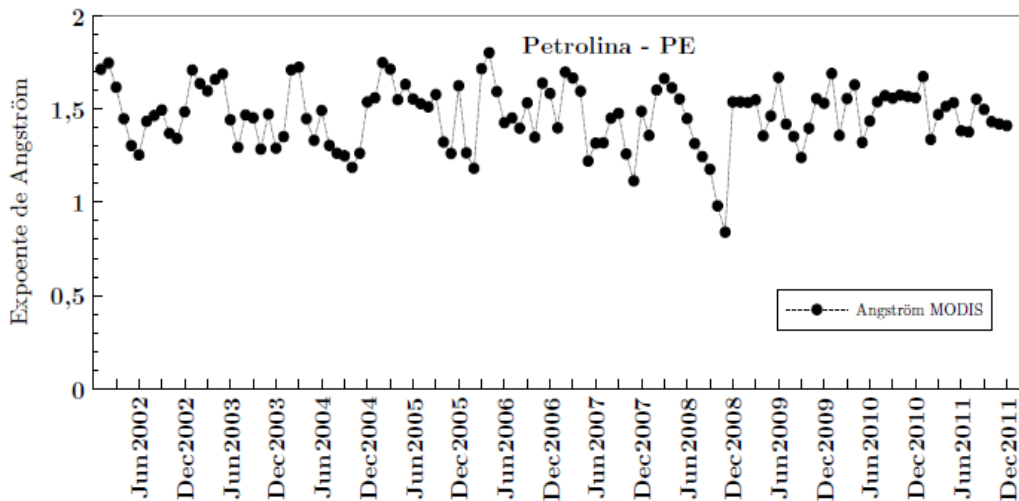


Figura 5 - Série temporal para os valores médios mensais do expoente de Ångström na cidade de Petrolina entre janeiro de 2002 e dezembro de 2011.

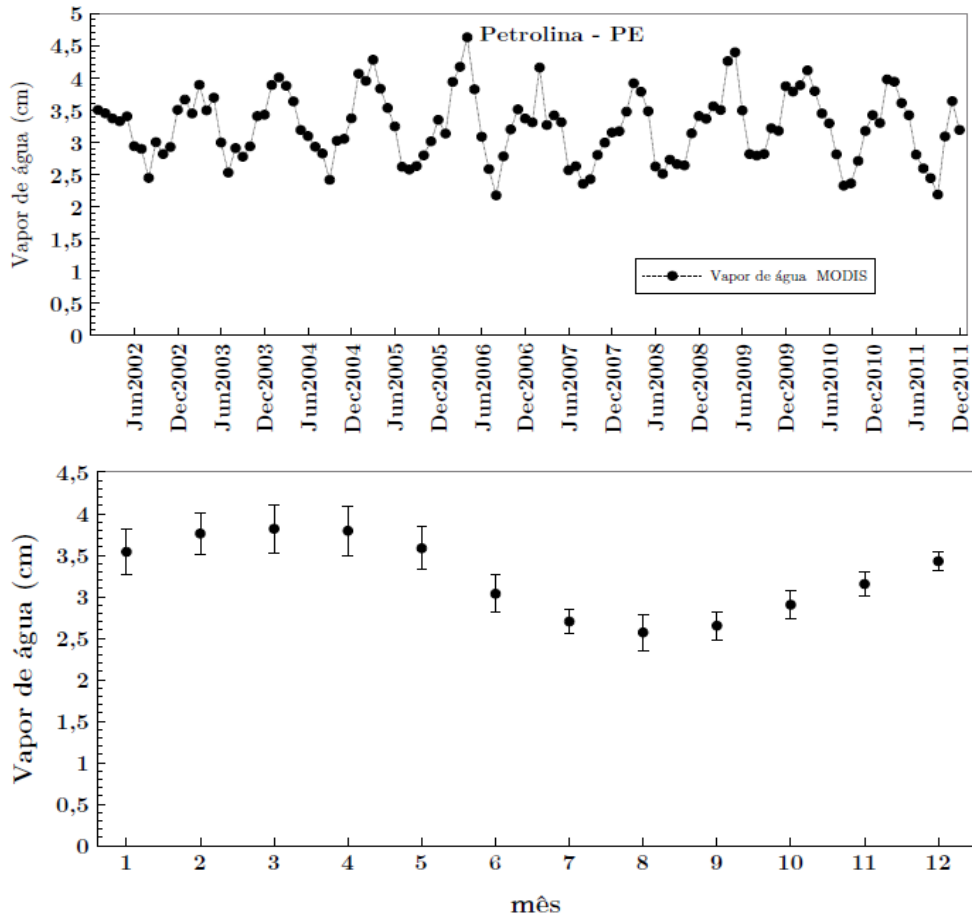


Figura 6 - Série temporal para os valores médios mensais do vapor de água e os valores médios mensais com respectivos desvios-padrão médio na cidade de Petrolina no período de janeiro de 2002 até dezembro de 2011.

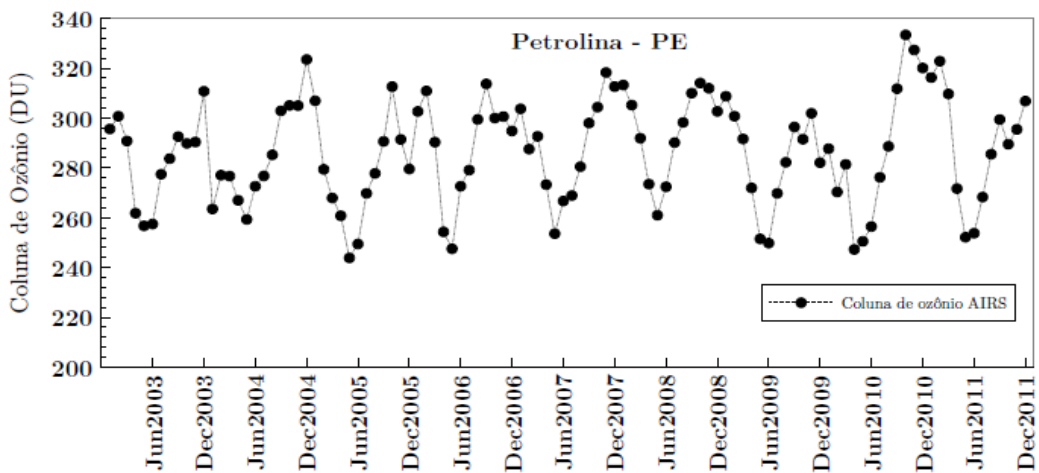


Figura 7 - Série temporal para a média mensal da coluna de ozônio obtida pelo sensor AIRS-AQUA entre janeiro de 2003 e dezembro de 2011.

A partir dos dados obtidos sobre as características dos principais parâmetros atmosféricos é possível estimar, através do uso de códigos de transferência radiativa na atmosfera, um espectro típico para a região analisada, e compará-lo ao espectro previsto pela norma ASTM G173-03. Na Tab. 1, apresentam-se os valores médios anuais para as concentrações de ozônio, vapor de água, AOD e CO₂ com seus respectivos desvios-padrão na cidade de Petrolina juntamente com os valores adotados pela norma ASTM G 173-03.

Além dos parâmetros atmosféricos a Tab. 1 mostra a massa de ar e ângulo de inclinação característicos para a cidade de Petrolina e os descritos na norma.

Tabela 1 - Parâmetros atmosféricos e locais característicos para Petrolina e os existentes na norma ASTM G173-03. O desvio-padrão (σ) para os valores medidos da concentração de ozônio, vapor de água e AOD são apresentados entre parênteses.

Parâmetros	Ozônio (σ) (UD)	Vapor de água (σ) (cm)	AOD (σ)	CO ₂ (ppmv)	Massa de ar	Ângulo de inclinação (°)
ASTM G173-03	343,8	1,42	0,084	370	1,5	37
Petrolina	286,5 (8,8)	3,24 (0,2)	0,040 (0,018)	381	1,04	10

Nota: UD, unidade dobson; AOD, Aerosol Optical Depth; ppmv, partes por milhão volumétrica.

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 G173-03 (inclinação de referência para o módulo fotovoltaico de 37°) não é representativa para as condições encontradas no território brasileiro. A norma ASTM G173-03 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 G173-03 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. A Fig. 8 (acima) mostra a variação do ângulo zenital solar ao longo de um ano para a cidade de Golden, no estado americano do Colorado (latitude 39,7° e longitude 105,2°).

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. 8 apresenta a variação do ângulo zenital solar a cada minuto ao longo de um ano para a cidades de Petrolina, PE. Os gráficos apresentados na Fig. 8 foram executados 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. 8, pode-se observar que o ângulo zenital médio anual, ao meio dia solar, em Petrolina é 16°, assim, a massa de ar representativa para Petrolina é aproximadamente unitária ($AM = 1$).

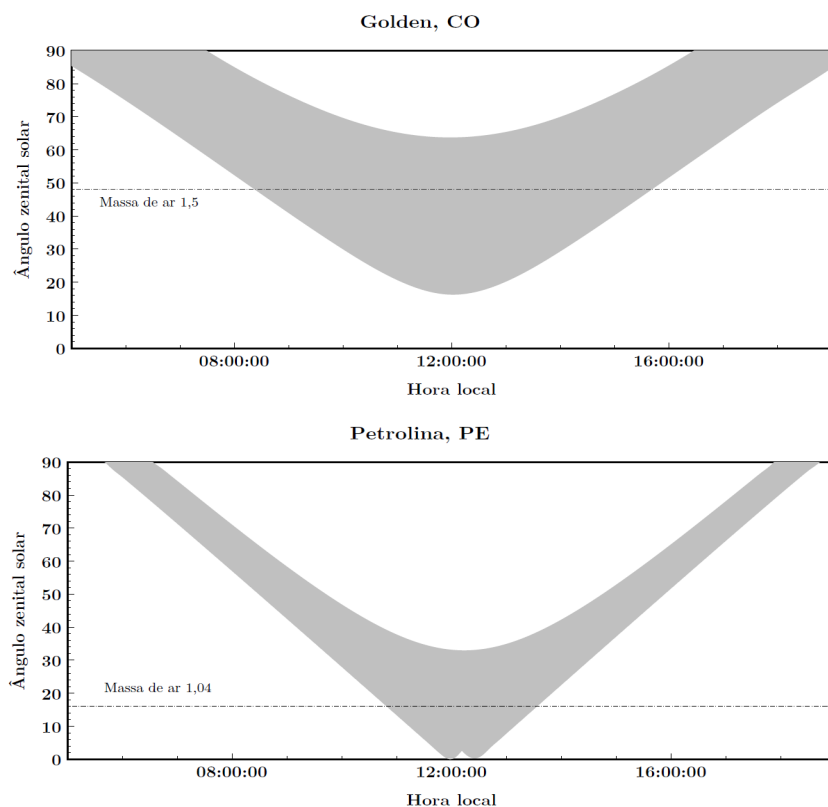


Figura 8: Variação do ângulo zenital solar a cada minuto ao longo de um ano para a cidade de Golden, CO e Petrolina, PE.

4. ESPECTRO CARACTERÍSTICO PARA A CIDADE DE PETROLINA E REGIÃO DO SEMIÁRIDO

Empregando os dados climatológicos e configurações geométricas representativas para a cidade de Petrolina, foi estimada a irradiância espectral global e comparada com a distribuição prevista pela norma ASTM G173-03. A Fig. 9 mostra a distribuição espectral prevalente da irradiância solar para uma superfície inclinada em 10° na direção Norte. Para uma melhor visualização, os gráficos de irradiância espectral são apresentados entre os comprimentos de onda de 280 até 2000 nm.

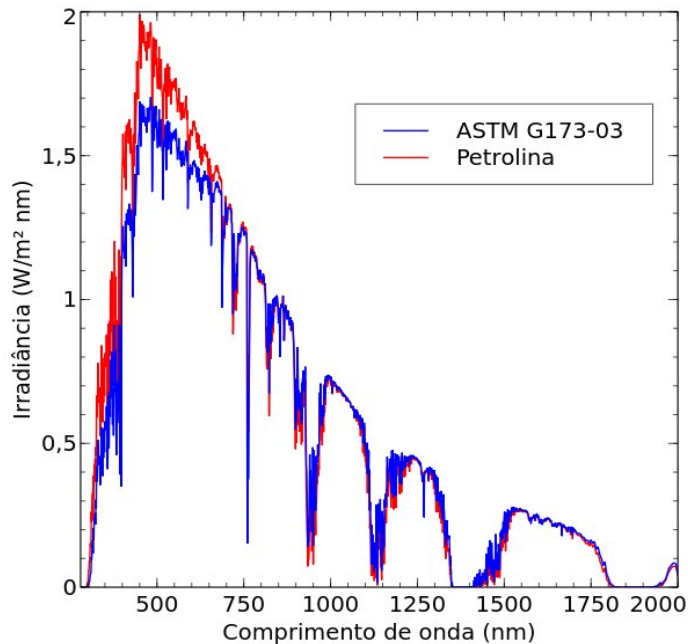


Figura 9 – Espectro característico para uma superfície voltada para o norte e com inclinação de 10° na cidade de Petrolina, PE (vermelho) e o espectro definido pela norma ASTM G173-03 (azul).

A Fig. 9 revela em Petrolina uma distribuição espectral com intensidade de irradiância superior relação ao espectro padrão ASTM G173-03 para comprimentos de onda menores que 800 nm. Valores baixos de massa de ar implicam na irradiância solar global com maior intensidade em menores comprimentos de onda. Para comprimentos de onda maiores que 900 nm, o espectro característico possui intensidade inferior em relação à distribuição espectral estimada pela norma ASTM G173-03 em função da alta concentração de vapor de água. Estas variações de intensidades espectrais são decorrentes em função dos valores típicos para a massa de ar e concentração de água precipitável em Petrolina. A Fig. 10 mostra as diferenças percentuais entre os espectros visualizados na Fig. 9 em relação à distribuição espectral prevista pela norma ASTM G173-03.

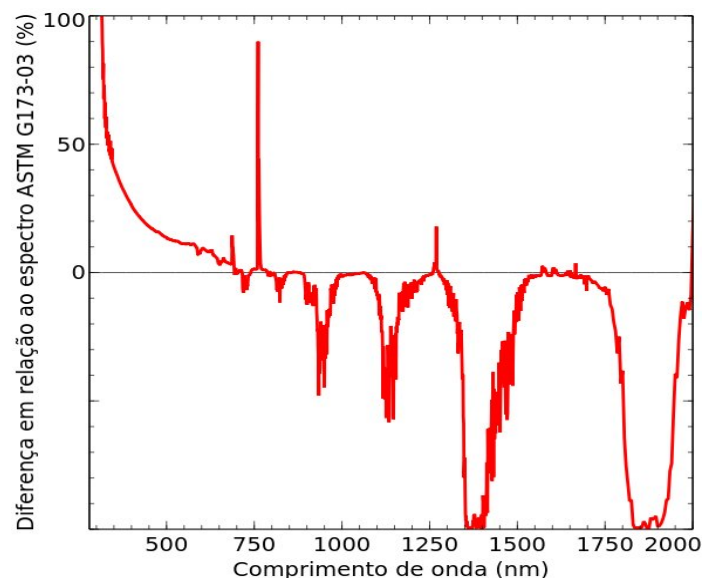


Figura 10 - Diferenças percentuais entre o espectro característico para Petrolina e o previsto pela norma ASTM G173-03.

5. CONCLUSÕES

Constatou-se que o espectro de referência proposto pela norma americana ASTM G173-03 não é representativo para as características da distribuição espectral verificadas no semiárido, especificamente na cidade de Petrolina, PE.

A configuração geométrica preconizada pela norma ASTM G173-03 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 não representam com fidelidade as condições encontradas na região analisada. Foi verificado que as características ópticas e as distribuições da espessura óptica de aerossóis apresentam uma grande variação mensal, sendo que no período compreendido entre maio e agosto constata-se uma baixa concentração de material particulado na atmosfera. Nos demais meses a espessura óptica de aerossóis também permanece baixa em relação à norma ASTM G173-03. A quantidade mensal média para a concentração de vapor de água supera em duas vezes o utilizado na norma ASTM G173-03 e acarreta uma acentuada redução da irradiância solar nas zonas de absorção deste constituinte atmosférico. Do mesmo modo, constata-se uma diferença de concentrações para outros parâmetros atmosféricos em relação à norma (ozônio, e CO₂, por exemplo).

A partir dos resultados obtidos observa-se que a distribuição espectral na região do semiárido brasileiro apresenta valores de irradiância superiores à norma ASTM G173-03 para comprimentos de onda menores que 800 nm e inferiores nas regiões de absorção do vapor d'água.

Agradecimentos

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

REFERÊNCIAS

- ASTM G173-03, 2012. Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances: Direct Normal and Hemispherical on 37° Tilted Surface, <http://www.astm.org/Standards/G173.htm>.
- 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., 2012. Estimativa da Distribuição Espectral da Radiação Solar sobre o Território Brasileiro Através de Análise Multiinstrumental, Tese de Doutorado, PROMEC, UFRGS, Porto Alegre. Disponível em <http://ftp.solar.ufrgs.br/teses/haag.pdf>
- Haag, R. e Krenzinger, A., 2014. Determinação das características espectrais da radiação solar na superfície terrestre através de satélites. Anais do V Congresso Brasileiro de Energia Solar. Recife, PE.
- Marion, B., 2010. Preliminary Investigation of Methods for Correcting for Variations in Solar Spectrum under Clear Skies. Technical Report, NREL. Golden, CO, USA.
- Reda, I. e Andreas, A., 2004. Solar Position Algorithm for Solar Radiation Applications, Solar Energy, vol. 76, pp. 577-589.

TYPICAL SOLAR SPECTRUM FOR BRAZILIAN SEMI-ARID REGION

Abstract. *This paper analyzes the spectral distribution of solar radiation on the earth's surface in the city of Petrolina, PE, (9 23'S, 40 ° 30'W), located in the center of the Brazilian semiarid region, which has the highest average annual insolation of Brazil. The typical solar spectrum to the city of Petrolina was obtained through computer model of radiative transfer in the atmosphere SMARTS2. By using the MODIS instrument (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) aboard the Terra and AQUA satellites and AIRS (Atmospheric Infrared Sounder) also installed in the AQUA platform. They determined the concentrations and optical properties of aerosols amount of precipitable water column ozone and carbon dioxide in a ten-year database (2002-2011). The spectral distribution characteristic for semiarid region was compared with the reference spectrum ASTM G173-03, and notes to a higher irradiance for wavelengths shorter than 800 nm and less intensity in the regions of absorption of water vapor.*

Key words: *Solar radiation, Solar spectrum, ASTM G173-03 Reference Solar Spectral Irradiances,*