

IRRADIÂNCIA SOLAR TÍPICA NA REGIÃO AMAZÔNICA E SEU IMPACTO EM DISPOSITIVOS FOTOVOLTAICOS DE DIFERENTES TECNOLOGIAS

Rafael Haag – rafael.haag@ufrgs.br
Arno Krenzinger – arno.krenzinger@ufrgs.br
Labsol, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Resumo. O presente trabalho busca obter as características espectrais típicas da irradiância solar na região amazônica. São utilizados dados fornecidos por satélites e radiossondas para obter informações sobre a concentração e distribuição da água precipitável, aerossóis e ozônio sobre a região amazônica. Estes são os principais parâmetros atmosféricos que alteram a intensidade e distribuição espectral da irradiância solar em uma atmosfera sem nuvens. Foi empregado o modelo computacional de transferência radiativa na atmosfera SMARTS2 (Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine) para estimar o comportamento da irradiância solar espectral e total entre 280 – 4000 nm. É apresentada uma análise sobre o impacto da diferença entre a irradiância espectral recomendada pela norma ASTM G173-03 e a representativa para a região amazônica em dispositivos fotovoltaicos de distintas tecnologias.

Palavras-chave: Espectro de referência, Irradiância espectral, Região amazônica, Atenuação atmosférica, Sensoriamento remoto.

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. Superfícies seletivas, como módulos fotovoltaicos possuem respostas espectrais distintas que variam em função da tecnologia utilizada na sua fabricação. A Fig. 1 apresenta o comportamento espectral para sete módulos fotovoltaicos de distintas tecnologias e o espectro padrão americano G173-03 proposto pela ASTM (*American Society for Testing and Materials*) e também adotado como referência pela comunidade européia. Estas curvas foram obtidas pelo laboratório NREL (*National Renewable Energy Laboratory*) e representam a eficiência espectral normalizada. O espectro padrão G173-03 foi desenvolvido empregando-se o modelo de transferência radiativa SMARTS2 e dados sobre parâmetros atmosféricos obtidos em cidades norte-americanas com média anual diária de irradiância solar direta maior que 6 kWh/m² e baixa concentração de aerossóis, como é visto na Tab. 1. Sendo assim, os valores de irradiância preconizados pelo espectro G173-03 favorecem sistemas que empregam a componente direta da radiação solar.

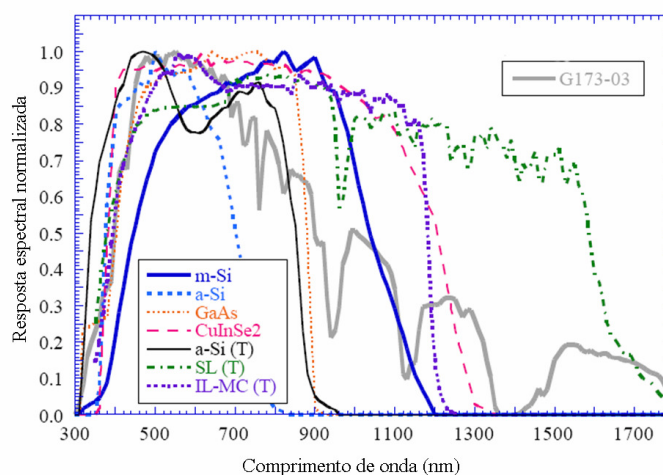


Figura 1 - Resposta espectral normalizada para sete módulos fotovoltaicos de diferentes tecnologias e o espectro padrão G173-03 proposto pela ASTM em cinza. Fonte: Adaptado de Gueymard, (2007).

Tabela 1 – Média anual da radiação direta e AOD em cidades norte-americanas escolhidas para a elaboração do espectro padrão G173-03.

Localidade	Radiação direta (kWh/m^2)	AOD em 500 nm
Dagget, CA	7,5	0,087
Las Vegas, NV	7,1	0,105
Tucson, AZ	7,0	0,099
Phoenix, AZ	6,8	0,142
Prescott, AZ	6,8	0,074
Alamosa, CO	6,8	0,029
Albuquerque, NM	6,7	0,074
Tonopah, NV	6,7	0,082
El Paso, TX	6,7	0,118
Flagstaff, AZ	6,4	0,074
Reno, NV	6,2	0,091
Cedar City, UT	6,2	0,074
Pueblo, CO	6,1	0,074
Tucumcari, NM	6,1	0,099
Ely, NV	6,0	0,050
Média Regional	6,61	0,085

A Tab.2 mostra os valores das concentrações dos principais constituintes atmosféricos considerados na elaboração do espectro de referência G173-03.

Tabela 2 - Concentração dos principais constituintes atmosféricos empregados no 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 destes dispositivos 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, 2008 e Case, et al., 2008). Um módulo fotovoltaico de determinada tecnologia pode apresentar um melhor desempenho em relação a outro de diferente tecnologia em um local com pouca umidade e baixa concentração de aerossóis por exemplo, mas em um clima tropical e com valores altos de AOD este mesmo módulo pode ser inferior ao outro (Gueymard, 2007). Araki e Yamaguchi (2003), através de medidas realizadas na cidade de Nagoya, Japão, relatam diferenças que podem chegar até 12% na produção anual de energia em módulos fotovoltaicos de tripla junção devido à diferença espectral observada e a calculada pelo espectro de referência. Gottschalg et al. (2003) mostram que a variação espectral da irradiância solar pode alterar entre +6% até -9% a eficiência de módulos fotovoltaicos de filmes finos (a-Si).

Neste trabalho são apresentados os resultados para a obtenção dos principais parâmetros atmosféricos que alteram a distribuição da irradiância solar na região amazônica e seu impacto em diferentes dispositivos fotovoltaicos.

2. ESPECTRO CARACTERÍSTICO NA AMAZÔNIA

A região amazônica possui uma área de aproximadamente 6,3 milhões de quilômetros quadrados que estão distribuídos entre o Brasil (cerca 80% da área total), Bolívia, Colômbia, Equador e Peru. A região amazônica situada entre 5°N e 10°S recebe no topo da atmosfera cerca de 38,4 MJ/m^2 dia em fevereiro e 31,9 MJ/m^2 dia em junho. Devido às características climáticas, principalmente os altos valores de fração de cobertura de nuvens e suas espessuras ópticas, a região amazônica recebe uma média de 15 MJ/m^2 dia ao longo do ano. Os meses de setembro e outubro apresentam as maiores taxas de irradiância solar e os mínimos estão compreendidos entre dezembro a fevereiro. A região norte do Brasil, por não estar interligada à rede de distribuição nacional, possui quase a totalidade da sua geração de eletricidade baseada em centrais alimentadas por geradores a diesel. Principalmente em função da sua grande extensão territorial e dispersão dos pontos de consumo, esta região apresenta grande potencial para a inserção de energia fotovoltaica

(Martins et al., 2008). No entanto, a grande variabilidade de alguns parâmetros atmosféricos (cobertura de nuvens, vapor de água, aerossóis, etc.) aumenta as incertezas no correto dimensionamento do potencial solar nesta região. Para tentar obter um espectro de distribuição da irradiância solar de céu limpo típico para a região amazônica, foi realizada uma análise estatística para a concentração de água precipitável, espessura de aerossóis e ozônio. Os perfis de distribuição vertical destes constituintes também foram analisados. O trabalho de Haag e Krenzinger (2010) descreve com maiores detalhes a metodologia empregada para a obtenção destes dados climatológicos.

2.1 Coluna de água precipitável

A concentração de vapor de água contido na atmosfera pode ser obtida através de inúmeras técnicas como radiossondagem, radiômetros em superfície, medida de atraso zenital em sinais GPS, sensoriamento remoto por satélites entre outras. Para a análise de grande escala espacial da concentração do vapor de água (ou água precipitável) foram processados dados fornecidos por diferentes instrumentos e plataformas, entre eles o sistema global de re-análise da NASA denominado MERRA (*Modern Era Retrospective-analysis for Research and Applications*). Os valores médios para a concentração de água precipitável no período 1980 – 2010 sobre a grade definida entre as latitudes 12°N e 20°S e longitudes 44°W e 82°W são mostrados na Fig. 2.

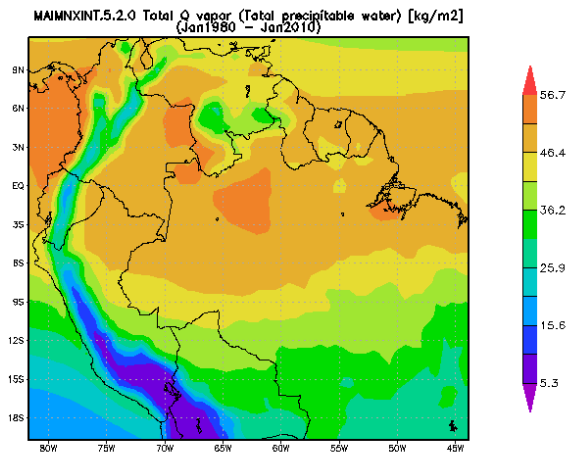


Figura 2 – Valores médios para a coluna de água precipitável para o período 1980 – 2010.

A análise dos valores da coluna de água precipitável para a cidade de Manaus, AM durante o período entre 2000 e 2010, obtidos por radiossondagem e a partir dos dados de sensoriamento remoto fornecidos pelo instrumento MODIS a bordo do satélite TERRA também é apresentada. A Fig. 3 mostra as médias mensais durante o período para o valor da coluna de água precipitável. Estes valores foram obtidos a partir da análise de aproximadamente 6000 lançamentos de radiossondas e cerca de 3000 passagens do satélite TERRA sobre a região de estudo. A Fig. 4 revela a distribuição de frequência dos valores de água precipitável obtidos pelas radiossondas.

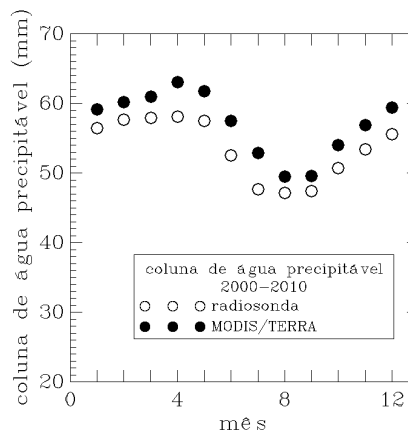


Figura 3 – Média mensal para o período 2000 – 2010 da coluna de água precipitável obtida por radiossondagem e pelo sensor MODIS a bordo do satélite TERRA.

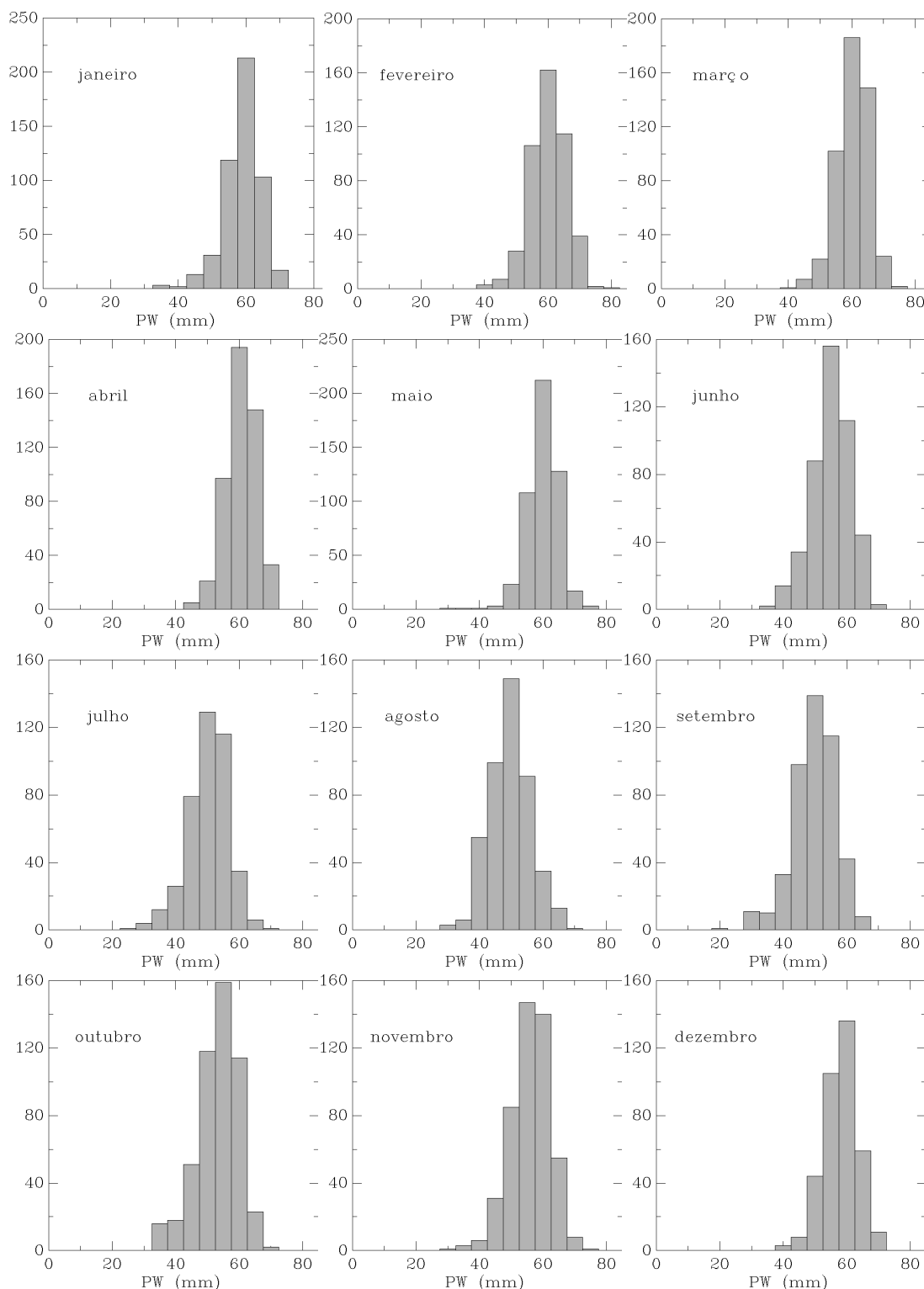


Figura 4 – Distribuição de frequência dos valores para a coluna de água precipitável obtidos a partir de dados de radiossondagem durante 2000 – 2010 para a cidade de Manaus, AM.

2.2 Aerossóis

Durante o período de seca que compreende os meses entre agosto e novembro, a região amazônica apresenta uma elevada concentração de partículas de aerossóis provenientes das queimadas que abrangem grande parte da região norte, centro-oeste e sudeste do Brasil. Além de reduzir a quantidade total de radiação solar que incide na superfície terrestre, a distribuição espectral também é alterada pela presença do material particulado. A Fig. 5 apresenta uma imagem fornecida pelo sensor MODIS a bordo do satélite AQUA onde aparecem vários focos de queimadas e a pluma de aerossóis que é espalhada por grande parte da América latina. Valores médios para a espessura óptica de aerossóis

(abreviada por AOD¹) superiores a 1 ocorrem em uma grande área da região amazônica e parte da América durante o período de queimadas, como é mostrado no mapa da Fig.5. A Fig. 6 apresenta os valores médios de AOD durante o período 2003-2009 para a região limitada entre latitudes 5°N e 15°S e longitudes 45°W e 80°W. Estes valores foram processados a partir de dados fornecidos pelo sensor MODIS instalado nos satélites TERRA e AQUA. Na Fig. 7 estão apresentados os valores médios mensais e o desvio padrão para o AOD em 550 nm obtidos pelo sensor MODIS nas plataformas espaciais TERRA e AQUA. Observa-se o aumento do AOD durante agosto-outubro em função das queimadas na região norte e centro-oeste do Brasil.

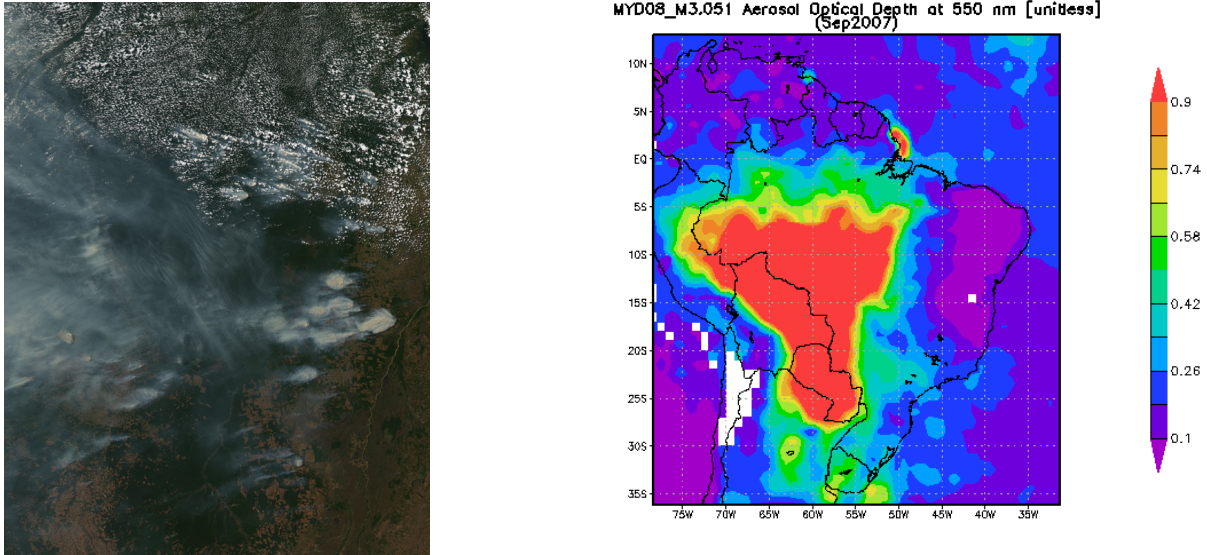


Figura 5 – Imagem no visível à esquerda de uma região com várias focos de queimadas e o espalhamento desta pluma por uma vasta região. A espessura média de aerossóis no mês de setembro de 2007 obtida pelo sensor MODIS a bordo do satélite AQUA é vista à direita e revela um elevado valor de AOD.

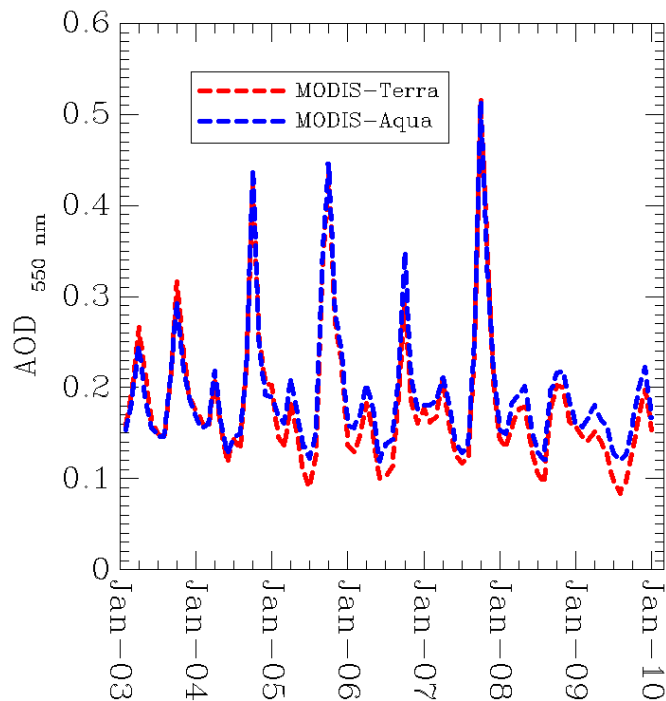


Figura 6 – Série temporal para o valor médio mensal para a espessura óptica de aerossóis sobre a região amazônica no período 2003-2009 obtidos pelos sensores MODIS a bordo dos satélites TERRA e AQUA.

¹ Os autores optaram por manter a abreviatura AOD (*Aerosol Optical Depth*) para a espessura óptica de aerossóis.

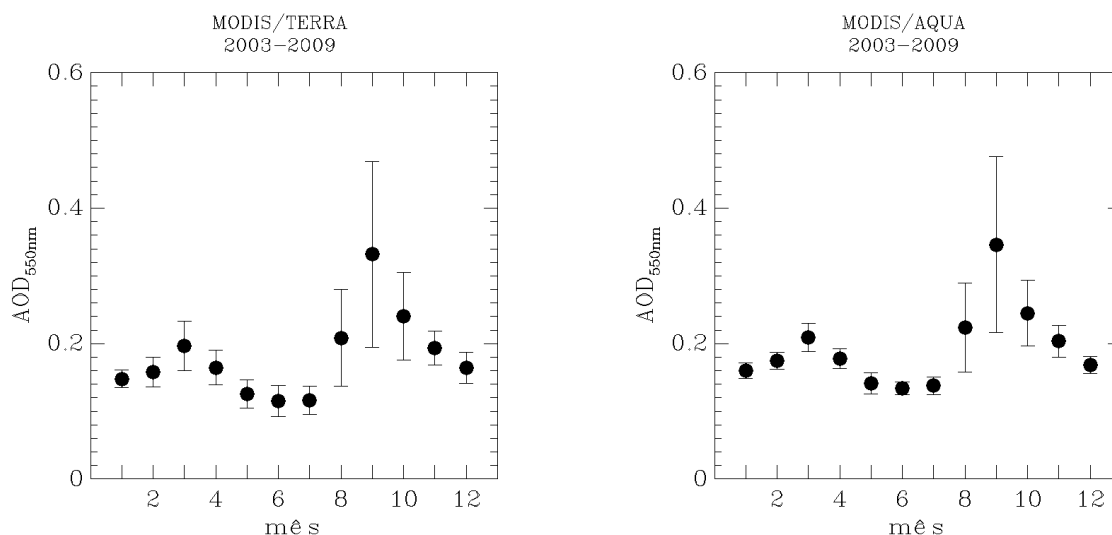


Figura 7 – Valor médio mensal e respectivo desvio padrão para a espessura óptica de aerossóis sobre a região amazônica no período 2003-2009 obtidos pelos sensores MODIS a bordo dos satélites TERRA e AQUA.

2.3 Ozônio

O conteúdo de ozônio na atmosfera foi estimado a partir de dados obtidos pelo instrumento OMI (*Ozone Monitoring Instrument*) que está instalado no satélite AURA da NASA. Este instrumento possui três radiômetros, sendo um na faixa do visível (350 – 500 nm) e dois no segmento ultravioleta (UV-1, 270 – 314 nm e UV-2, 306 – 380 nm), com resolução espectral entre 0,45 – 1 nm (*FWHM*). Os valores diários para o período 2005-2007 são vistos na Fig. 8. Nota-se uma maior concentração na concentração da coluna total de ozônio durante a primavera e redução no período do outono. Os valores mostrados na Fig. 8 estão dados em UD (unidades Dobson), sendo que 1 UD equivale a 0,001 atm-cm.

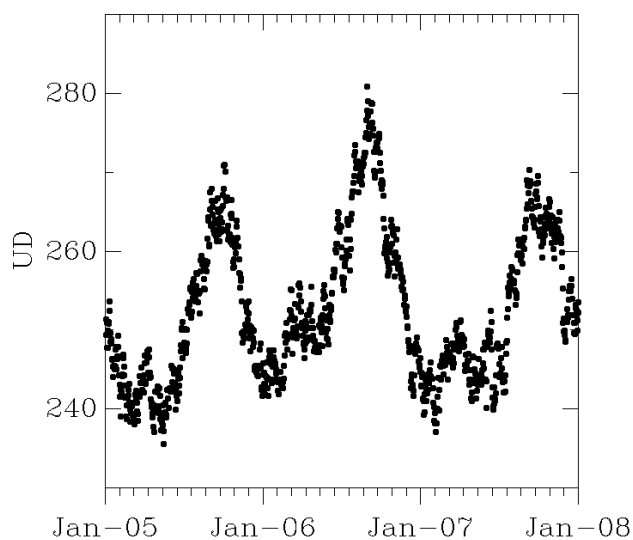


Figura 8 – Coluna de ozônio sobre a região amazônica durante o período 2005-2007. Estes valores foram obtidos com a sensor OMI a bordo do satélite AURA.

3 IRRADIÂNCIA SOLAR TOTAL E ESPECTRAL TÍPICA.

A partir do levantamento das características dos principais parâmetros atmosféricos é possível estimar a irradiância solar na superfície e sua distribuição espectral. Para isto, foi utilizado o modelo de transferência radiativa SMARTS2 para cálculo da irradiância solar total (entre 280 e 4000 nm) nas condições definidas pela norma ASTM G173-03 e as representativas para a média anual na região analisada. A Tab. 3 apresenta os valores médios anuais e características dos principais componentes atmosféricos adotados como padrão para representar as condições típicas da região amazônica e os de referência pela norma ASTM G173-03.

Tabela 3 – Valores dos principais constituintes atmosféricos empregados como representativos para a média anual na região amazônica e os adotados no modelo padrão ASTM G173-03.

	AOD		Coef. Ångström		Água precipitável (cm)	Ozônio (atm-cm)	CO ₂
	500 nm	550 nm	α	β			
Amazônia	0,230	0,200	1,14	0,09	5,00	0,250	370
ASTM G173-03	0,084	0,074	1,12	0,03	1,42	0,344	370

A Fig. 9 mostra os resultados para as componentes direta normal e global horizontal e as respectivas diferenças percentuais para uma atmosfera sem presença de nuvens. Foi utilizado o perfil atmosférico tropical para representar a distribuição vertical dos principais parâmetros atmosféricos. Os resultados foram estimados para o dia 15 de março e massa de ar 1,5. A radiação solar no topo da atmosfera no dia de análise possui valor aproximado de 1364 W/m². As irradiâncias espectrais para as componentes global horizontal e direta normal foram estimadas pelo mesmo modelo de transferência radiativa e são apresentadas na Fig. 10. As diferenças percentuais entre as duas irradiâncias são mostradas na Fig. 11.

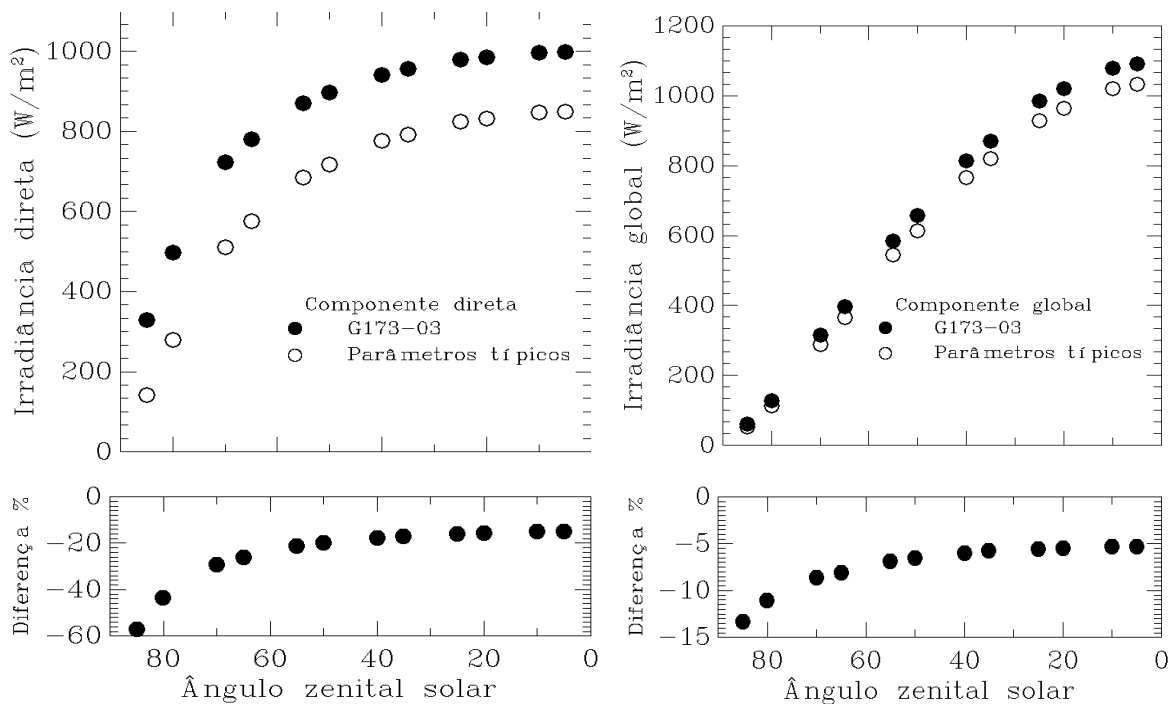


Figura 9 – Comparação entre as componentes direta normal e global horizontal da irradiância solar. Foram empregados os parâmetros atmosféricos sugeridos pela norma ASTM G173-03 e os representativos para a média anual na região amazônica.

3.1 Fator de eficiência espectral

Uma análise prévia sobre a influência da distribuição espectral no desempenho de superfícies seletivas, pode ser realizada através da comparação das irradiâncias espectrais típicas de uma região em relação ao espectro padrão de referência. Pode-se ainda comparar o desempenho de sistemas de diferentes tecnologias sob estas condições realizando a convolução a partir das respostas espectrais destes sistemas. Empregando um programa computacional para solução da equação de transferência radiativa (ETR) na atmosfera é possível verificar a resposta destes sistemas através da discretização espectral e após esta etapa um fator de eficiência espectral, $F_{e\lambda}$, pode ser definido, como é visto na Eq. 1.

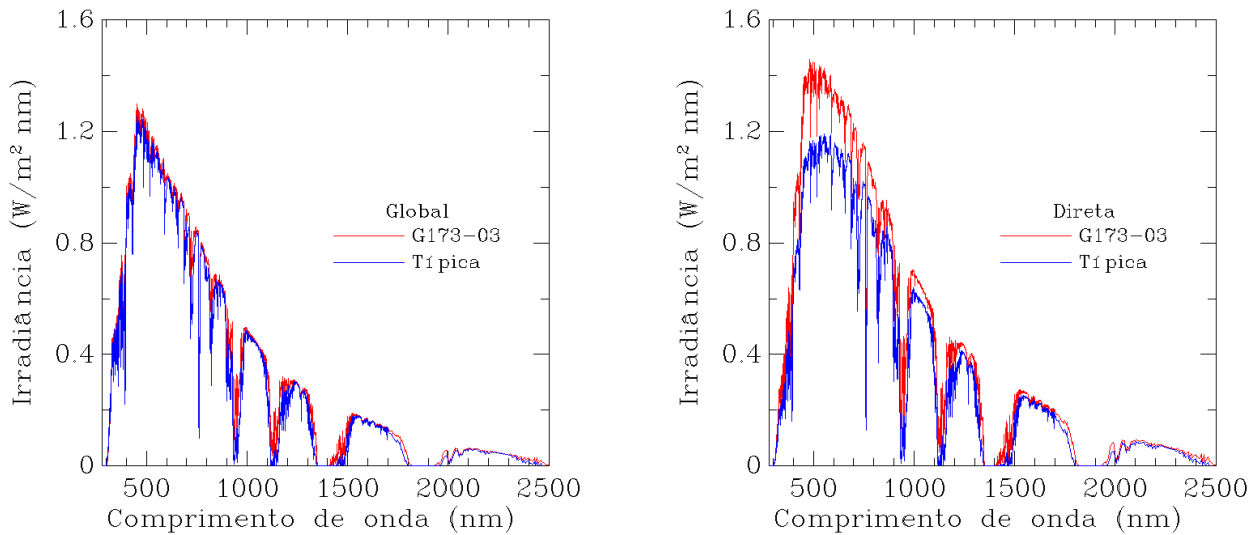


Figura 10 – Distribuição espectral da irradiância solar global horizontal e direta normal simulada com o código SMARTS2. Foram utilizados os parâmetros atmosféricos adotados pela norma ASTM G173-03 e os representativos para a região amazônica.

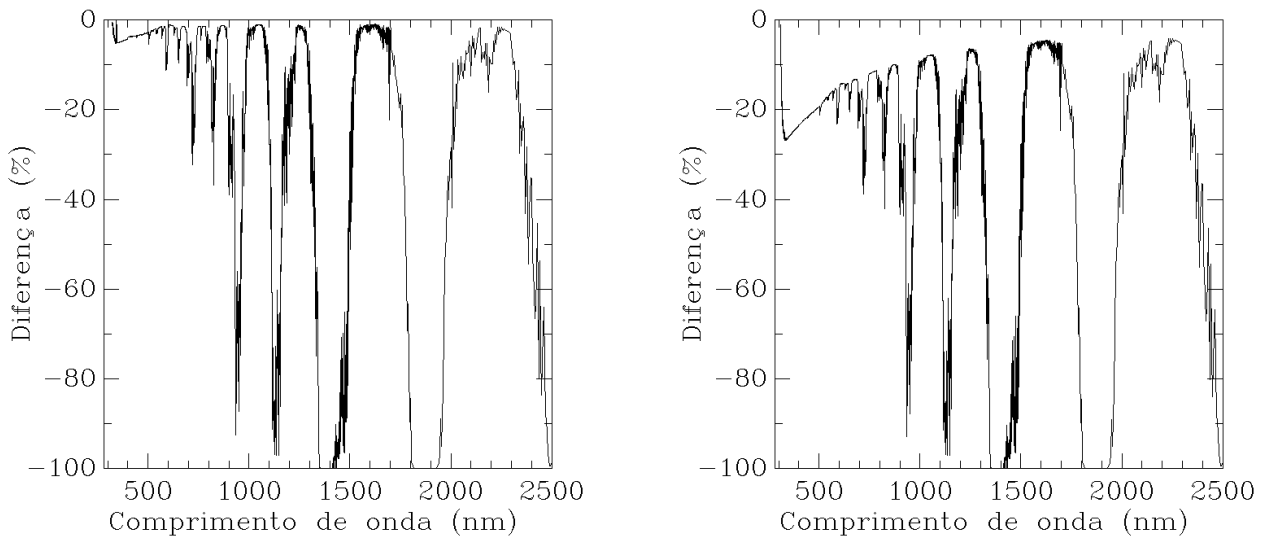


Figura 11 – Diferença percentual para a irradiância global horizontal (esquerda) e direta normal (direita) apresentadas na Fig. 10.

$$F_{e\lambda} = \frac{\left(\frac{E_s}{\int_{\lambda_i}^{\lambda_f} S_{r\lambda} \cdot E_{s\lambda} d\lambda} \right)}{\left(\frac{E_a}{\int_{\lambda_i}^{\lambda_f} S_{r\lambda} \cdot E_{a\lambda} d\lambda} \right)}, \quad (1)$$

Este fator de eficiência espectral relata o desempenho de um determinado dispositivo (módulo fotovoltaico, coletor térmico, vidro seletivo etc.) sob uma condição qualquer de irradiância espectral em relação à condição de referência (espectro padrão, por exemplo) onde E_a e E_s representam os valores integrados das irradiâncias na condição

real e padrão, respectivamente. $S_{r\lambda}$ é a resposta espectral do dispositivo. As funções $E_{a\lambda}$ e $E_{s\lambda}$ fornecem os valores espectrais discretizados para a irradiância real e do espectro padrão nos limites espectrais escolhidos, respectivamente.

A Fig. 12 apresenta os valores de $F_{e\lambda}$ para quatro tipos de células fotovoltaicas. Estes fatores foram calculados para as irradiâncias globais típicas simuladas e respostas espectrais mostradas na Fig. 1. Observa-se que células de silício amorfo (a-Si) possuem um acréscimo de aproximadamente 6%. Também pode ser observado um acréscimo de 3% para as células de tecnologias GaAs.

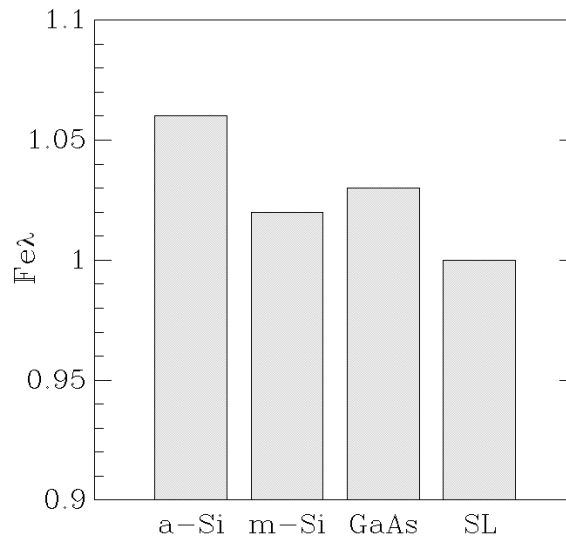


Figura 12 - Fator de eficiência espectral para células fotovoltaicas de diferentes tecnologias para a irradiância global estimada.

É importante ressaltar que os valores de $F_{e\lambda}$ mostrados foram estimados apenas para uma única massa de ar (AM 1,5). Valores de $F_{e\lambda}$ integrados no período de diário, mensal e anual podem apresentar diferenças e serão analisados futuramente.

3. CONCLUSÕES

Foi apresentada uma análise sobre a concentração dos principais parâmetros atmosféricos que alteram a intensidade e distribuição espectral da irradiância solar na região amazônica. Também foram mostrados resultados sobre o impacto de diferentes distribuições espectrais da irradiância solar em dispositivos fotovoltaicos de distintas tecnologias. Dispositivos fotovoltaicos de silício amorfo e arseneto de gálio apresentam a maior dependência espectral. Na atmosfera típica adotada para representar as condições médias anuais na região de estudo, dispositivos de silício amorfo mostram eficiência superior (6%) em relação às medidas realizadas nas condições estipuladas pela norma ASTM G173-03.

Agradecimentos

Este trabalho foi parcialmente financiado com recursos do CNPq pertencentes ao edital MCT/CNPq 27/2007 e também contou com recursos do Instituto de Energias Renováveis e Eficiência Energética da Amazônia vinculado ao projeto INCT/MCT/CNPq. Grande parte das análises e dados utilizados neste trabalho foi produzida com o sistema *GIOVANNI*, desenvolvido e mantido pela NASA GES DISC e os autores agradecem a disponibilidade desta plataforma.

REFERÊNCIAS

- Araki, K. e Yamaguchi, M. 2003. Influences of spectrum change to 3-junction concentrator cells, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, vol. 75, pp. 707-714.
- Case, M. A.; Owusu, Y. A.; Chapman, H.; Dargan, T.; Ruscher, P. 2008. On the matter of proposed new low-latitude solar reference spectra. *Renewable Energy*, vol. 33, pp. 2645-2652.
- Gottschalg, R.; Infield, D. G.; Kearney, M. J. 2003. Experimental study of variations of the solar spectrum of relevance to thin film solar cells. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, vol. 79, pp. 527 – 537.

- Gueymard, C. A. 2007. Latitude and climate dependent optimal siting and spectral effects of concentrating PV technologies: preliminary analysis. Workshop on Concentrating Photovoltaic Optics and Power. Marburg, Alemanha.
- Haag, R. e Krenzinger, A. 2008. 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., Krenzinger, A. 2010. Estimativa da distribuição espectral da radiação solar no Brasil utilizando modelos de transferência radiativa e análise multiinstrumental: satélite, radiômetros em superfície e radiossondagem. Trabalho aceito para publicação no III Congresso Brasileiro de Energia Solar, Belém, PA.
- Martins, F. R.; Pereira, E. B.; Abreu, S. L.; Colle, S. 2008. Solar energy scenarios in Brazil. Part two: Photovoltaics Applications. Energy Policy, vol. 36, pp. 2865-2877.

TYPICAL SOLAR IRRADIANCE IN THE AMAZONIAN REGION AND HIS IMPACT IN PHOTOVOLTAIC DEVICES OF DIFFERENT TECHNOLOGIES

Abstract. *The purpose of this work is to obtain the solar irradiance spectral characteristics in the Amazonian region. There are used data supplied by satellites and radiosondes to obtain informations on the concentration and distribution of the precipitable water, aerosols and ozone on the Amazonian region. These are the main atmospheric parameters that modify the intensity and spectral distribution of the solar irradiance in a cloudless sky. The computational model SMARTS2 (Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine) was employed to appreciate the behaviour of the solar spectral and total irradiance between 280 – 4000 nm. An analysis is presented on the impact of the difference between the spectral irradiance recommended by the standard ASTM G173-03 and the representative one for the Amazonian region in photovoltaic devices of different technologies.*

Key words: *Reference spectra, Spectral irradiance, Amazon region, Meteorological attenuation, Remote sensing.*