

ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO ESPECTRAL DA RADIAÇÃO SOLAR PARA PORTO ALEGRE

Carla Silva Dagostin – carladagostin@gmail.com

Arno Krenzinger – arno.krenzinger@ufrgs.br

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, PPGE3M, www.ufrgs.br/ppge3m

F1 Princípios – Termodinâmica, Mecânica dos Fluidos e Transferência de Calor

Resumo. Neste trabalho será abordada a caracterização mensal da distribuição espectral da irradiância solar sobre a região de Porto Alegre, através de dados obtidos por satélites e pela compilação dos dados de aproximadamente dez anos fornecidos pela secretaria de Minas e Energia do Rio Grande do Sul para o atlas solar de 2018. Para alcançar o objetivo será avaliado o valor médio do elemento AM (massa de ar) que impacta de forma significativa a distribuição espectral da radiação solar de uma região e em consequência disso, pode afetar o desempenho dos módulos fotovoltaicos. O modelo computacional de transferência radiativa na atmosfera SMART2 foi utilizado como padrão para gerar os espectros médios mensais na região de interesse para dias de céu limpo, visto que o software possui uma melhor confiabilidade nesses períodos, bem como para o espectro padrão ASTM G-173. Na comparação dos valores médios anuais, com um AM de 1,5 para ambos os casos, não houve uma variação significativa na distribuição espectral. Ao ser adotado para a região de Porto Alegre o valor médio efetivo de AM 1,3 entre os anos de 2000 até 2018 também se verificou pouco impacto na comparação com o espectro padrão. Além disso os gráficos representando os espectros efetivos mensais mostraram um pequeno aumento na radiação nos comprimentos de onda menores que 600nm e uma diminuição de radiação nos comprimentos maiores. Em geral, o objetivo do trabalho em encontrar distribuições espectrais efetivas para a região, baseado na AM média característica, trouxe muitas informações que podem ser úteis para aplicações fotovoltaicas.

Palavras-chave: Distribuição espectral da radiação solar, irradiação solar, energia solar fotovoltaica.

1. INTRODUÇÃO

Com o crescimento da população mundial e o desenvolvimento tecnológico, o aumento do consumo energético tornou-se inevitável e conseqüentemente o uso dos recursos naturais também. O modelo da matriz elétrica que vem sendo utilizado no Brasil tem pouca diversificação, o que já está melhorando com o crescimento do uso da energia eólica, mas deverá ser ampliado com o uso da tecnologia fotovoltaica na conversão da energia solar.

A energia solar fotovoltaica agrega inúmeros benefícios para o Brasil, dentre eles: geração de empregos, redução de impactos ambientais, redução de perdas na rede e alívio do sistema em horários de pico nos meses de verão. Ao levar em consideração os benefícios da utilização desse modelo, muitos estudos vêm sendo realizados no intuito de aproveitar ao máximo os recursos energéticos fornecidos pelo sol.

Com base neste contexto é importante saber o impacto mesmo que pequeno de cada fator que interfere na eficiência de conversão fotovoltaica. Há vários aspectos a serem considerados como: ângulo de incidência da radiação solar nos módulos, temperatura das células fotovoltaicas, a irradiância solar global entre outros, mas entre todos a “qualidade” da radiação solar definida pela sua distribuição espectral muitas vezes é ignorada. Para fins de poder comparar diferentes módulos ao determinar sua eficiência, definiu-se um espectro padrão para a radiação solar, pela ASTM (American Society for Testing and Materials), que consta na norma ASTM G173-03. Este espectro padrão, no entanto, não reflete a distribuição espectral mais significativa na conversão fotovoltaica (ou mesmo na conversão térmica da radiação solar) para qualquer lugar do mundo. Isto estimula a realização do presente trabalho: analisar qual a distribuição espectral que seria mais significativa para Porto Alegre.

Na Fig. 1, estão apresentados dados, fornecidos pelo laboratório NREL (*National Renewable energy Laboratory*), das respostas espectrais referentes a alguns modelos de módulos fotovoltaicos mais utilizados em relação ao espectro padrão e pode-se perceber que os painéis possuem uma resposta espectral diferente dependendo da tecnologia empregada na sua fabricação.

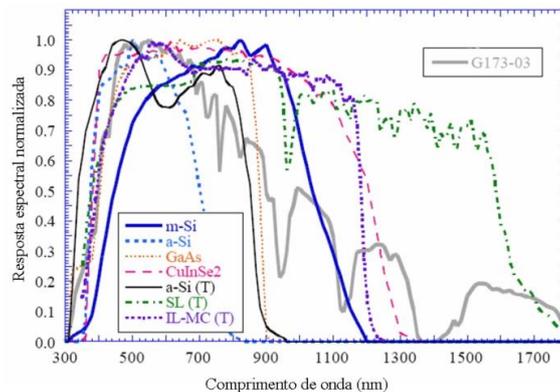


Figura 1. Resposta Espectral Normalizada para módulos de diferentes tecnologias x ASTM G173-03 em cinza
Fonte: Haag (2012).

Alguns módulos utilizam a tecnologia de múltipla junção, com o objetivo de aproveitar uma maior faixa espectral. Para a montagem dos mesmos, são feitas associações em série com células de diferentes materiais e desta forma, a corrente que circulará será a mesma para todos os componentes. Porém a corrente total será definida pelo elemento de menor corrente. Como cada célula possui uma resposta espectral própria, variações espectrais na radiação incidente podem ocasionar variações na eficiência dos módulos e que segundo Marion B (2010) pode chegar a quase 60%.

O espectro de referência G173 -03, foi gerado através do *software* SMART2 (SMART2, 2020) e para isso, foram utilizados alguns componentes atmosféricos característicos, além da latitude da região, conforme indicado na Tab.1. O valor de 1,5 para AM foi adotado, baseando-se em uma média do ângulo zenital (θ_z) para 12h local, escolhido como significativo para o território dos Estados Unidos da América. Contudo essas características são diferentes da região de Porto Alegre, e consequentemente a eficiência dos módulos que serão adotados na região podem variar. Desta forma, alguns elementos que influenciam no espectro precisam ser analisados individualmente para a região de interesse.

Tabela 1. Dados atmosféricos utilizados para gerar o espectro padrão pelo SMART2

	Ozônio (UD)	Vapor d'água (cm)	AOD (-)	CO ₂ (ppmv)	AM	Latitude média
ASTM G-173	343,8	1,42	0,084	370	1,5	37°

A Fig.2 mostra os dados atmosféricos utilizados para geração dos espectros com o SMART2, um dos elementos é a camada de ozônio ela absorve parte da radiação, na faixa do ultravioleta, evitando que cheguem à superfície. A resposta espectral das células fotovoltaicas mais comuns é muito baixa para esta faixa de radiação. Em seguida tem-se os aerossóis (AOD), partículas sólidas, como fumaça e poeira, que influenciam na distribuição espectral por meio de interações diretas, principalmente nos menores comprimentos de onda. Posteriormente vem o vapor d'água que possui uma variação temporal e espacial de grandes proporções e conforme podemos analisar na figura abaixo sua influência maior e na faixa de infravermelho do espectro. Finalmente a massa de ar (AM) que será o foco de interesse para este trabalho.

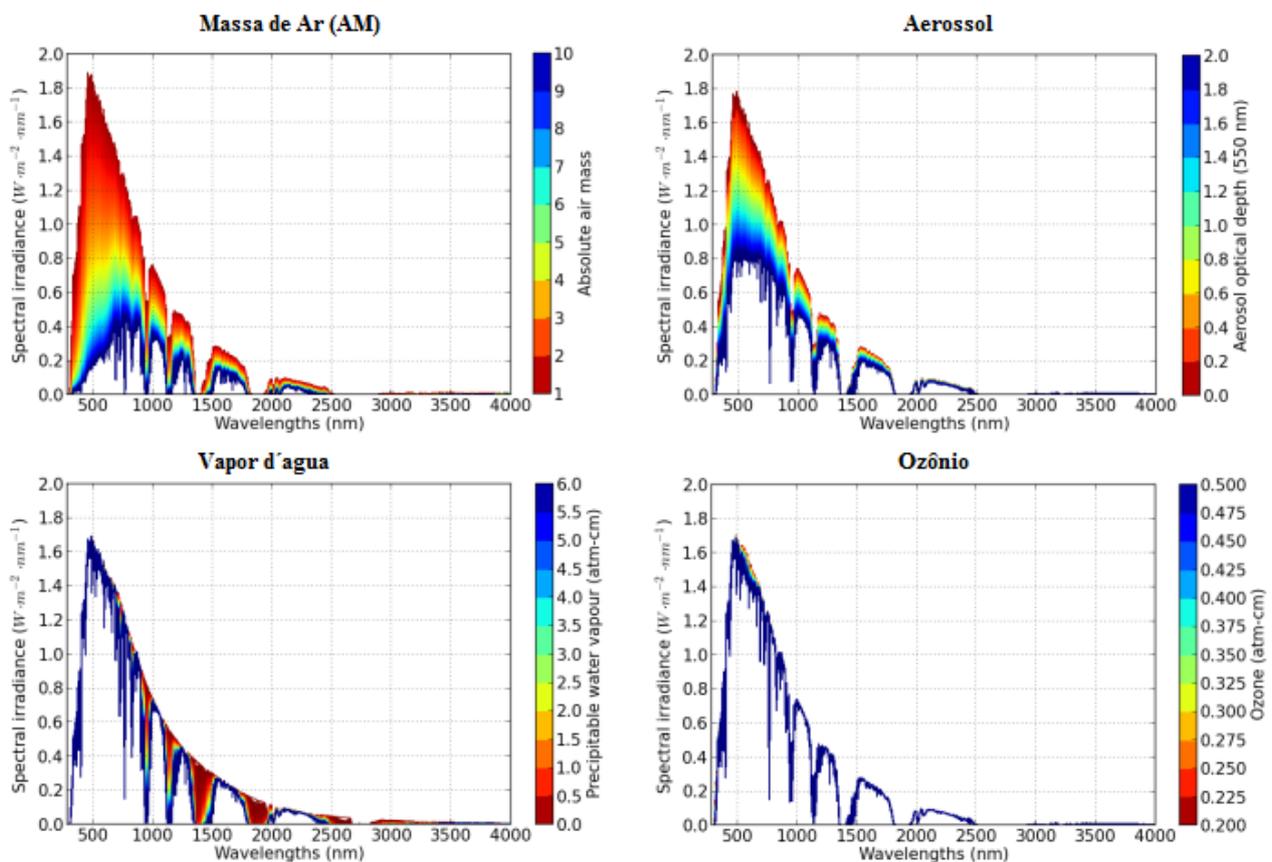


Figura 2: Exemplo da influência dos principais parâmetros atmosféricos no espectro solar.
 Fonte: *Investigation of Spectral Effects on Photovoltaic Technologies by Modelling the Solar Spectral Distribution*. (2013).

A massa de ar (AM) é a relação entre o caminho que a radiação percorreria na atmosfera se a incidência fosse da direção de zênite e o caminho real percorrido. Desta forma determina quanto a absorção atmosférica interfere no espectro e a intensidade da radiação que atinge a superfície. Como é a componente de maior influência no espectro solar, sua

variação ao longo do ano pode afetar significativamente a distribuição média e consequentemente a eficiência dos módulos fotovoltaicos. Ela depende basicamente do ângulo zenital, conforme a eq. 1,

$$AM = \frac{1}{\cos \theta_z} \quad (1)$$

onde, AM é a massa de ar, θ_z o ângulo de incidência do sol em uma superfície horizontal, também denominado de ângulo zenital. Ele varia conforme a posição do sol ao longo do dia e pode ser calculado através da eq. 2,

$$\cos \theta_z = \cos \delta \cos \varphi \cos \omega + \sin \delta \sin \varphi \sin \omega \quad (2)$$

onde φ representa a latitude do local, ω é o ângulo horário que representa o deslocamento do sol no sentido Leste-Oeste, e δ é a declinação solar, que representa o ângulo de inclinação do eixo de rotação da Terra em relação ao plano da órbita da Terra em torno do Sol.

Na Fig. 3 é mostrada a variação do fator de eficiência espectral para as diferentes junções da célula Azur e Kanela. Nessa figura, é verificado o que foi exemplificado na Fig. 2, onde foi possível se observar o quanto a massa de ar pode afetar a eficiência de um módulo. Neste caso, observa-se que conforme o valor de massa de ar varia, a eficiência também varia e em alguns casos podem cair a eficiência energética, contudo em outros pode aumentar. Pelo apresentado até o momento e pelo que já fora comentado anteriormente, uma avaliação mais precisa em relação à massa de ar se torna interessante e será o foco deste trabalho. De forma geral em um primeiro momento será realizada uma validação do método adotado, em seguida, serão apresentados os dados anuais em comparação com o espectro padrão e os gráficos mensais, de forma a visualizar o quanto variam em relação ao espectro atual adotado.

Para obter os resultados desejados, duas componentes foram fundamentais, a primeira foi o modelo computacional de transferência radioativa da atmosfera SMART2 (*Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine*), o qual sintetiza os dados sobre a distribuição espectral da radiação solar baseado em dados atmosféricos, e a segunda, foram os dados fornecidos pela secretaria de Minas e Energia do Rio Grande do Sul, (Back et al, 2018) que são resultados compilados e organizados de aproximadamente dez anos de medições realizadas pelo INMET (Instituto Nacional de Meteorologia).

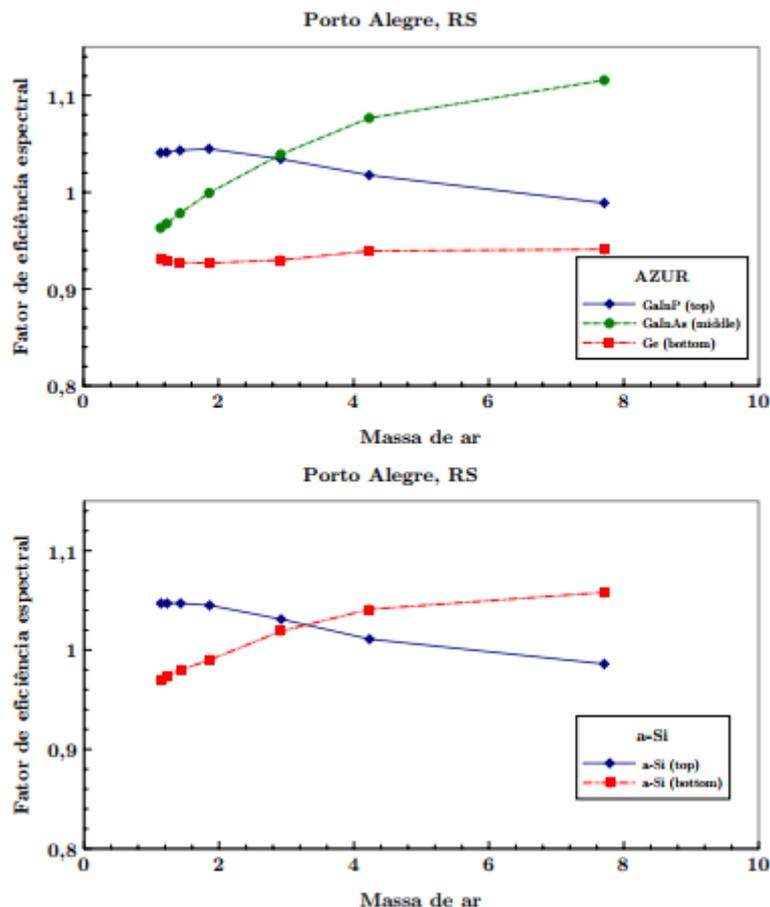


Figura 3: Variação do fator de eficiência espectral para as diferentes junções da célula Azur e Kaneka. Fonte: Haag. (2012).

2. METODOLOGIA E VALIDAÇÃO

Em um primeiro momento foram realizadas medições locais de hora em hora em alguns dias dos meses de fevereiro e março com a intenção de validar o software SMART2, visto que, o mesmo foi utilizado para gerar os espectros padrão da região de Porto Alegre. Para tal, foram utilizados um espectrorradiômetro (EPP 2000) que possui uma faixa espectral de 300 nm a 1000 nm e resolução de aproximadamente 4 nm e um piranômetro (MS-80), com uma sensibilidade de $11\mu\text{V}/\text{Wm}^2$ e faixa espectral de 280 nm a 3000 nm.

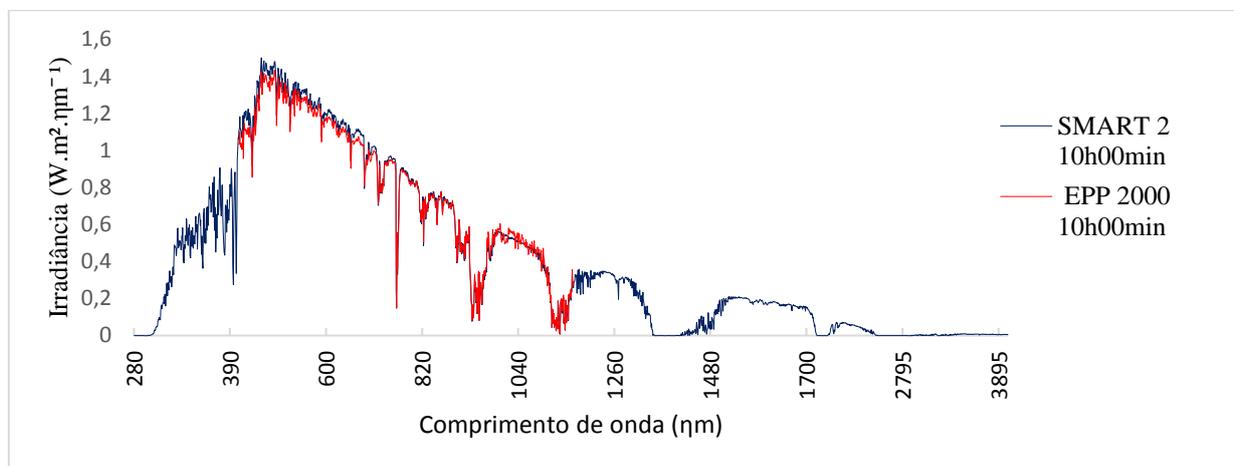


Figura 4: Comparativo entre software SMART2 x EPP 2000, no horário das 10h00min para o dia 21/02/2020

Das medidas adquiridas, foi utilizado um espectro para um dia de céu limpo no horário das 10:00h conforme observado na Fig.4, e como se pode observar, os espectros gerados pelo SMART2 e os dados encontrados com o espectrorradiômetro são muito semelhantes, apresentando variação máxima de 9% de $\text{W.m}^2.\text{nm}$ ao longo do espectro, o que apenas confirmou a confiabilidade da utilização do *software* para este trabalho.

Com a utilização do SMART2 validada, foram compilados os dados históricos, de 2000 a 2017, do INMET para a região, e foi feita uma análise da massa de ar em função da energia para um índice de limpidez horária $k_t > 0,6$ (Eq. 3) valor representativo para dias de céu limpo adotado para nesse trabalho.

$$k_t = \frac{I}{I_0} \quad (3)$$

onde I é a irradiação solar horária horizontal e I_0 é a irradiação extraterrestre horária.

Além dessas informações foram utilizadas como base o histórico de dados climáticos de Porto Alegre, dados esses, que foram utilizados para a alimentação do software SMART2, fornecidos obtidos pelos sensores OMI e MODIS (a bordo dos satélites AQUA E TERRA) disponíveis na plataforma Giovanni NASA (n.d), conforme a Tab.2 e os dados de Dióxido de Carbono que foram retirados do site ESRL (*Earth system Reseach Laboratory*)

Tabela 2. Dados fornecidos pelo site Nasa para entrada do SMART2, para a região de Porto alegre de coordenadas -51.3089,-30.293,-51.037,-29.9359

Componente	Sensor
Aerosol Absorption optical Depth 500nm (OMAERUVdv003)	OMI
Ozone Total Column (DOAS) (OMDOAO3e v003)	OMI
Ozone Total Column (TOMS IIKE) (OMTO3e v003)	OMI
Precipitable Water Vapor (IR Retrieval) Total Column: (MYD08_D3_V6.1)	MODIS-AQUA
Precipitable Water Vapor (IR Retrieval) Total Column: (MOD08_D3_V6.1)	MODIS-TERRA

3 RESULTADOS

Através da utilização do *software* SMART2, foram gerados, primeiramente, o espectro padrão ASTM G173-3 com os dados padrão, em seguida foi feito o levantamento dos dados para região de Porto Alegre, através da plataforma Giovanni NASA (n.d), do site ESRL (ESRL, 2020), e dos dados fornecidos pelo INMET. Com estes dados disponíveis e

sabendo que o local de interesse possui um clima subtropical úmido (Cfa, escala de Koppen) Cardia (2010), a 46 m do nível do mar e latitude de 30° foi possível gerar os espectros para Porto Alegre.

A Tab. 3 apresenta a compilação dos dados com desvio padrão obtidos através dos dados levantados no período de 2004 a 2020 gerados pela plataforma GIOVANNI NASA (n.d), citados na Tab. 1, em comparação com a norma ASTM G-173 e com os resultados obtidos por Haag (2012). O desvio padrão, é usado para mostrar o quanto uma variável se desvia da média e pode ser obtida pela Eq.4.

$$DP = \frac{\sum |X - \bar{X}|}{N} \quad (4)$$

onde, X são todos os elementos a serem analisados, \bar{X} é média dos elementos e N é o número de dados da população.

Tabela 3. Valores médios para as componentes e os desvios padrão (σ), que influenciam na distribuição espectral.

	Ozônio (σ) (UD)	Vapor d'água (σ) (cm)	AOD (σ) (-)	CO ₂ (σ) (ppmv)
ASTM G-173	343,8	1,42	0,084	370
Porto Alegre (2003 a 2011) (Haag 2012)	275,4(9,26)	2,30(0,24)	0,061(0,028)	384
Porto Alegre (2004 a 2020)	274,3(11,69)	2,39(0,6)	0,012 (0,0017)	356
Porto Alegre (2004 a 2020) x ASTM (%)	20,2	62,0	27,4	-3,8
(Haag 2012) x ASTM (%)	19,9	68,3	85,7	3,8

Pode-se observar que mesmo com uma alteração do período de aquisição de dados, os valores característicos para Porto Alegre possuem uma diferença em relação à norma, e outro ponto importante a ser analisado, é que em comparação aos dados obtidos por (Haag 2012) o valor médio de Ozônio e vapor d'água se mantiveram próximos com uma diferença de 04% e 3,9% respectivamente, o dióxido de carbono (CO₂) contudo, o valor de AOD, sofreu alteração significativa de aproximadamente 80% , demonstrando assim, que obter uma distribuição espectral baseada apenas na média anual pode mascarar, um pouco, o resultado e por isso a análise mensal se torna interessante.

Na Fig. 5 é mostra uma comparação de um espectro normalizado para Porto Alegre, com AM 1,5 e a norma ASTM G 173. Ao se observar a figura, percebe-se que a resposta espectral para a região de interesse se assemelha ao adotado como padrão, demonstrando assim que as diferenças nas condições atmosféricas apresentadas na Tab. 2 impactam no espectro, porém não de forma intensa. Em seguida para as análises em geral foram levadas em consideração todas as horas em que, além do kt ser inferior a 0,6, a massa de ar foi inferior a 1,7, valor este selecionado para que o valor médio de \overline{AM} esteja na mesma faixa do valor arbitrado pela ASTM. Com estes dados separados, o valor médio da massa de ar efetiva será dado pela Eq.5

$$\overline{AM} = \frac{\sum_{cond} AM \cdot E_{inj}}{\sum_{cond} E_{inj}} \quad (5)$$

onde *cond* indica que o somatório é sobre todas as horas em que as condições são cumpridas, por exemplo, todas as horas em que $kt < 0,6$ e $AM < 1,7$, E_{inj} é a energia que seria injetada na mesma hora por um sistema conectado à rede com módulos de silício policristalino. O valor de E_{inj} está disponível nas planilhas eletrônicas das séries históricas do Atlas Solar (Back et al., 2018). Ao realizar a média com esta ponderação energética, o valor encontrado se refere ao valor mais significativo para conversão fotovoltaica naquela faixa de condições citadas.

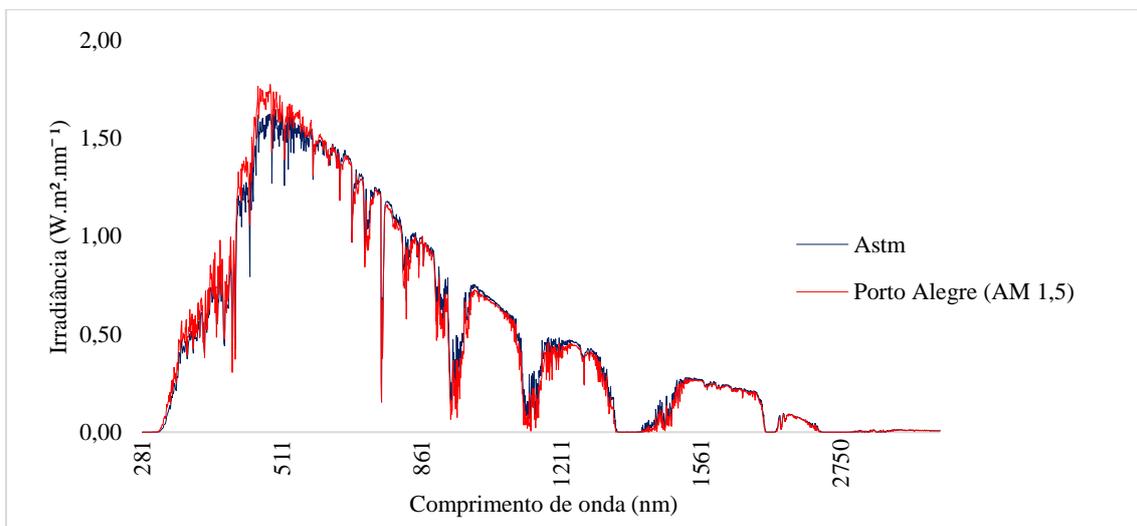


Figura 5: Comparativo entre o espectro padrão e de Porto Alegre para valores característicos, com AM igual a 1,5.

Na Fig. 6 é apresentada o espectro normalizado para Porto Alegre com uma massa de ar média de 1,3, dada pelos valores históricos fornecidos pelo INMET (SMERS,2018) em um período de 2000 a 2018.

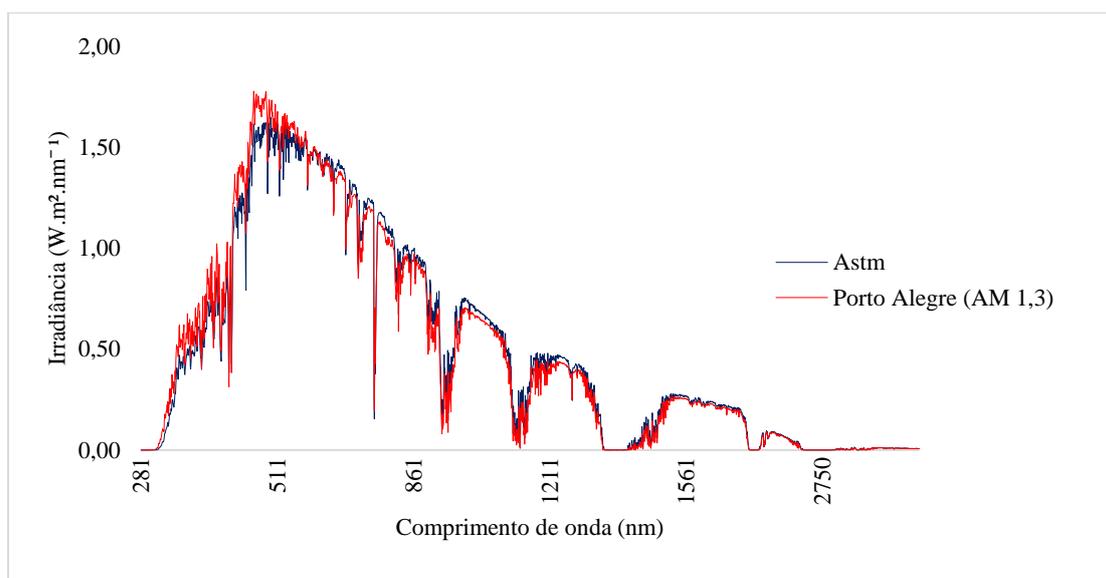


Figura 6: Comparativo entre o espectro padrão com AM de 1,5 e de Porto Alegre com massa média AM 1,3

Com as médias anuais realizadas, o próximo passo, será analisar as médias mensais de massa de ar, conforme exposto na Tab.4. Ao analisar a tabela gerada dos valores fornecidos do INMET, em um período aproximado de dez anos, nota-se que a frequência com que os valores abaixo de 1,7 aparecem é muito maior que as demais faixas, ou seja, essa faixa representa 60% dos dados em relação a 40% das demais faixas que por sua vez são menos representativas para irradiação solar. Além disso, outro fator importante a observar é o fato da frequência diminuir nos meses de junho e julho, que são meses com menos incidência de energia. Tendo em vista isso, ao focar na faixa de AM<1,7, os valores médios variam de 1,16 a 1,67 sendo que apenas a massa de ar de agosto está muito próxima do adotado pelo padrão, e nove dos doze meses apresentam AM médio abaixo de 1,5.

Tabela 4. Frequência e valores médios mensais de AM por faixa

AM	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	Média anual
Freq. <1,7	2128	1668	1710	1139	605	219	515	960	1194	1559	2041	2152	1377
Freq. >3	13	72	26	36	1	2	2	38	20	44	128	28	27
Freq. 1,7<AM<3,0	560	525	459	554	571	890	814	391	479	382	443	618	539,5
AM <1,7	1,17	1,19	1,29	1,40	1,57	1,67	1,62	1,47	1,31	1,23	1,16	1,17	1,30
AM >3	5,38	3,24	3,54	3,24	5,13	5,28	4,43	3,15	3,57	3,65	3,44	4,13	3,61
AM 1,7<AM<3,0	2,12	1,99	2,13	2,04	2,03	2,50	2,01	1,98	2,07	2,16	2,10	2,10	2,08

Sabendo que a faixa com \overline{AM} abaixo de 1,7 é a mais evidente para a região de Porto Alegre, e que o a AM afeta o espectro solar, a Tab. 5 demonstra o quanto em energia esses dados representam. Ao observar a tabela, a quantidade de energia acumulada na faixa de interesse, representa 78% da energia total para kt>0,6, e este por sua vez representa 64% da energia total dos dados avaliados, o que permite afirmar que as distribuições espectrais mensais são representativas.

Tabela 5. Valores de Energia mensal para cada faixa de AM com kt>0,6.

Einj20 [Wh/Wp]	Jan	Fev	Mar	Abril	Mai	junho	Julho	Agosto	Set.	Out.	Nov	dez
AM <1,7	1337,61	1085,86	1097,14	739,32	378,10	135,31	315,02	611,13	801,01	1030,85	1321,09	1362,96
AM >3	0,5347	12,12	4,55	9,37	0,20	0,42	0,47	10,46	3,98	6,45	16,62	2,12
1,7<AM<3,0	161,15	184,63	172,59	243,58	277,42	458,20	410,23	184,70	197,59	130,11	138,31	175,91

Por fim, as figuras 7,8 e 9 apresentam os resultados dos espectros mensais propostos em função da variação da massa de ar com os valores atmosféricos médios mensais, contudo, não estão sendo o foco deste trabalho. Inicialmente na Fig.7 estão os meses de janeiro, fevereiro, março e abril, meses mais quentes na região de Porto Alegre.

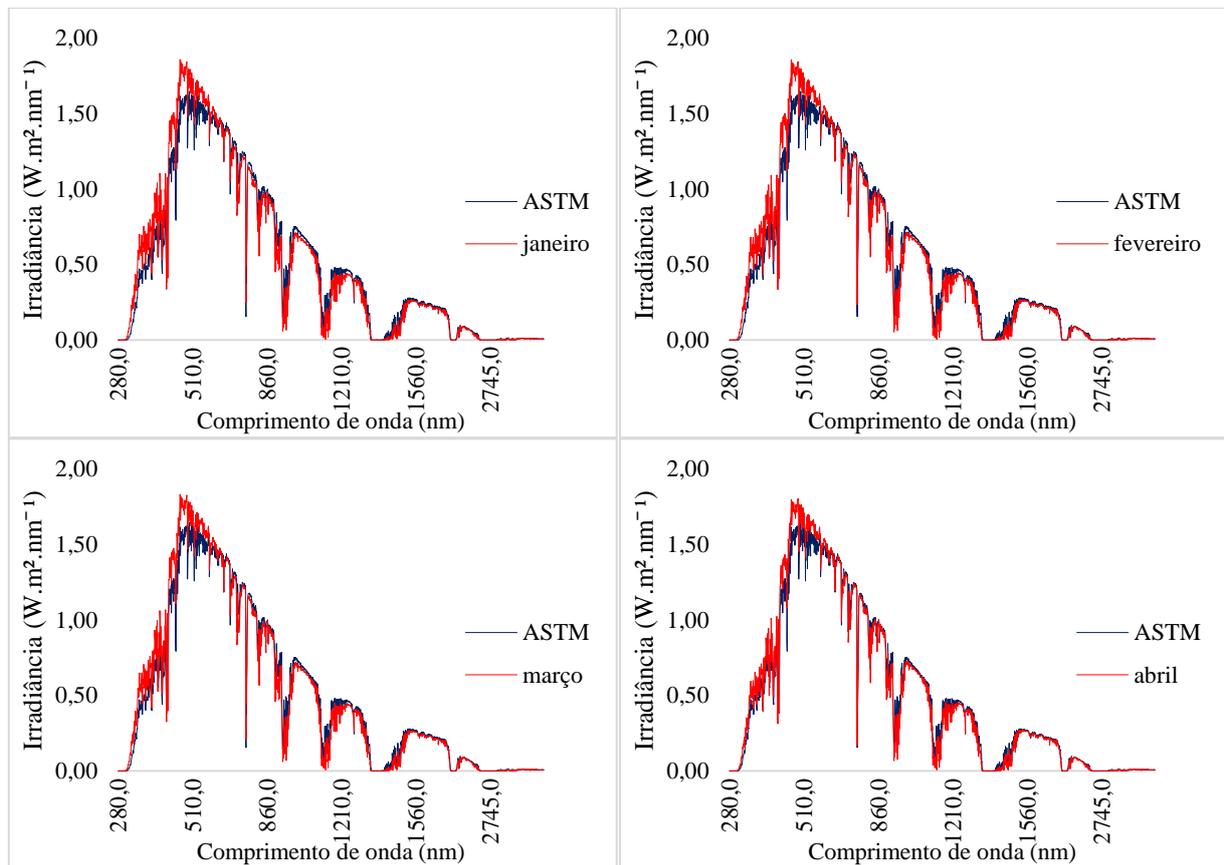


Figura 7: Resultados para o mês de janeiro, fevereiro, março e abril com seus respectivos AM médio x ASTM G-173.

Já a figura 8 mostra os valores para os meses de maio, junho, julho e agosto, período de inverno na região.

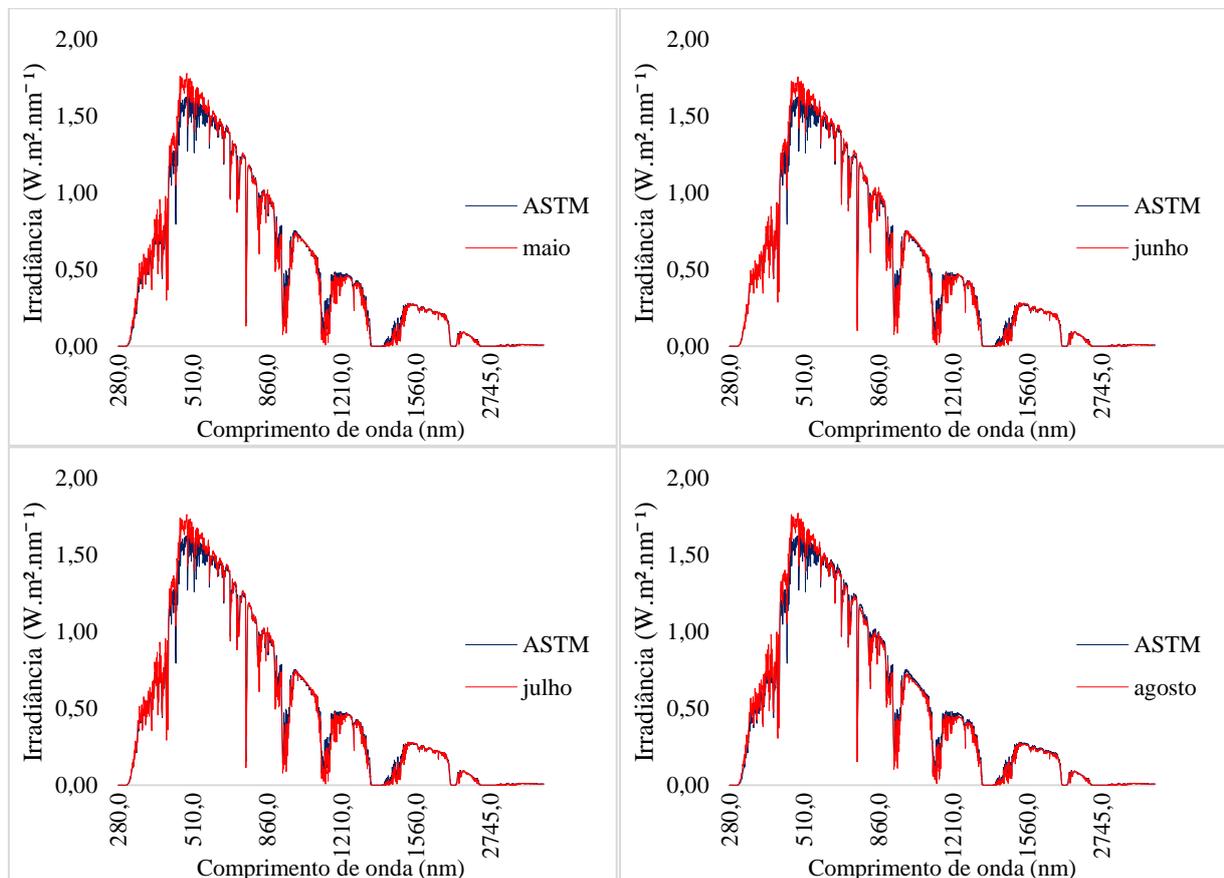


Figura 8: Resultados para o mês de maio, junho, julho, agosto com seus respectivos AM médio x ASTM G-173.

A Fig. 9, por sua vez, relaciona os meses de setembro, outubro, novembro e dezembro.

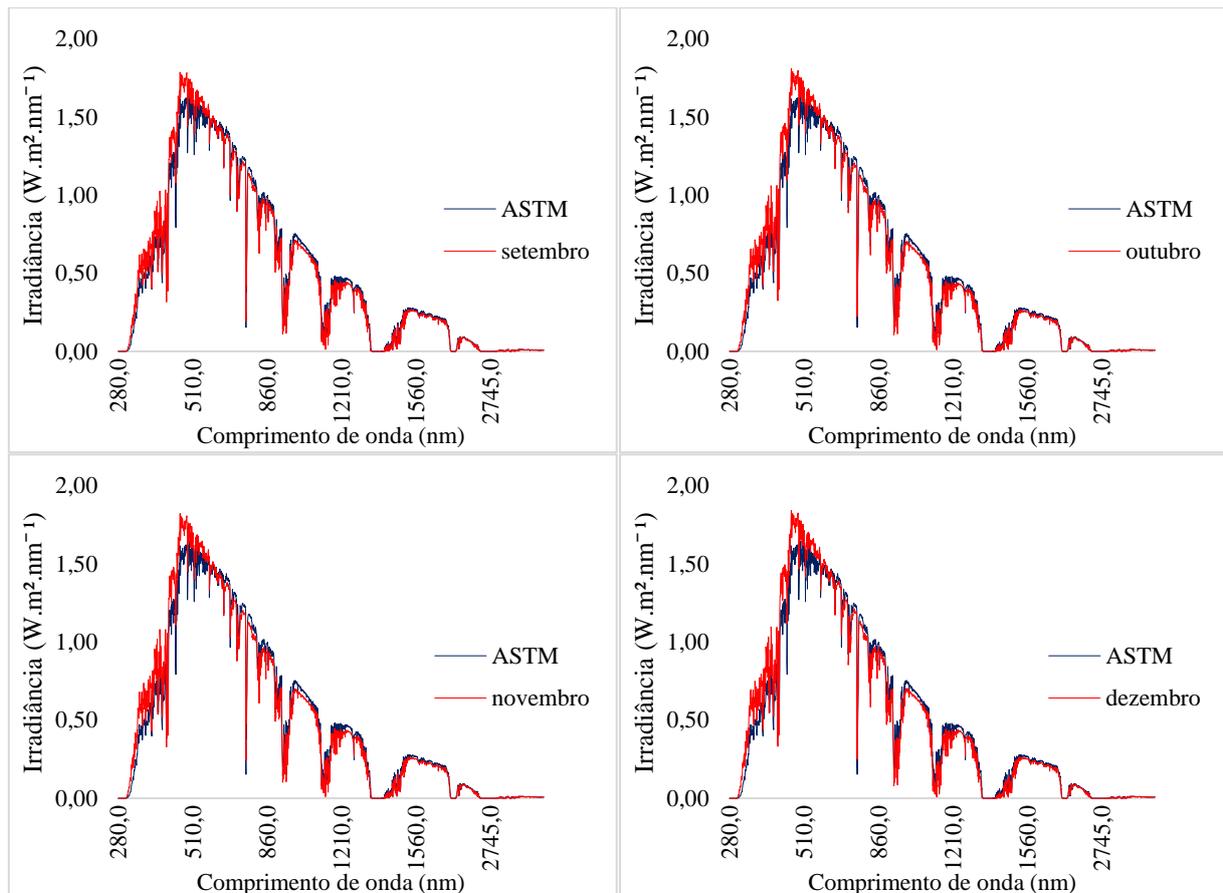


Figura 9: Resultados para o mês de setembro, outubro, novembro e dezembro com seus respectivos AM médio, comparado com a norma ASTM G-173.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Propôs-se encontrar os espectros efetivos mensais utilizando o software SMART2, para dias de céu limpo, visto que detêm a maior concentração de energia, e valores médios de massa de ar, com os demais dados característicos da região.

Para isso, foram analisados os impactos das demais características atmosféricas no espectro, e feita uma abordagem da influência da massa de ar nos módulos fotovoltaicos.

Verificou-se que mesmo com alteração do período de aquisição de dados os valores característicos para Porto Alegre possuem diferença em relação à norma e que ocorreram mudanças nas características atmosféricas em relação a anos anteriores, sendo que em um estudo prévio realizado por (Haag 2012) entre 2003 e 2011, ocorreu uma mudança do valor médio de Ozônio (O₃) e vapor d'água de 0,4% e 3,9% respectivamente, o dióxido de carbono (CO₂) contido, sofreu alteração significativa de aproximadamente 80%.

Como resultado foi obtido um espectro anual médio baseado na massa de ar de 1,5 que comparado com o valor médio característico da região, já demonstrou uma diferença em relação ao padrão. Em seguida foram gerados os espectros para cada mês do ano e comparados com o mesmo padrão.

Pode-se ver que em Porto Alegre há uma intensidade maior na região com comprimento de onda até 600nm, e uma redução no vermelho e infravermelho, ou seja, acima de 600 nm. Estes dados indicam uma diminuição discreta na produção de energia por módulos com resposta no infravermelho, como por exemplo as convencionais de silício cristalino.

Em uma próxima etapa, será feita a análise do impacto da variação destes espectros efetivos com as respostas espectrais de diferentes módulos. Esta metodologia poderá ser de grande ajuda para indicar diferenças entre a produtividade de módulos ao considerar a eficiência obtida pelo espectro padrão e a produtividade mais real que seria obtida utilizando os espectros efetivos.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio parcial da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, e do CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico.

5 REFERÊNCIAS

- Absolar. 2020. Infográfico. Disponível em: <http://www.absolar.org.br/infografico-absolar-.htm>
- 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>
- Back, C. A. ; Silva, F.J.L ; Catani, F. ; Lina, G.G. ; Coimbra, I. L. ; Amarante O. A. C. ; Andrade P. E. P. ; Freitas, R. M. ; Lima Neto, V. F. C. ; Silveira, E. J. T. ; Zamberlam, M. ; Moehlecke, A. ; Zanesco, I. ; Krenzinger, A. ; Prieb, C. W.M. ; Rossini, E. G. ; Gasparin, F. P. ; Haag, R. ; Aymani, J. ; Brower, M. ; Vidal, J. . Atlas Solar Rio Grande do Sul. 01. ed. Porto Alegre: SMERS, 2018. v. 01. 144p.
- Cardia V.C.,2010. Climatologia das Ondas de Calor de Porto Alegre - RS: 1961 a 2010. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- ESRL.2020.Trends in CO₂. Disponível em: https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/gl_trend.html
- Gueimard, C. A. 1. 1995. SMART2, *A Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine: Algorithms and Performance Assessment*. Solar Energy Center/ University of Central. Flórida, p. Report FSEC-PF-270-95.
- Haag, R. 2012. Estimativa da distribuição Espectral da radiação solar sobre o território brasileiro através da análise multi-instrumental. UFRGS. Porto Alegre
- Kaufman, Y. J. et al., 2000. *Will aerosol measurements from Terra and Aqua polar orbiting satellites represent the daily aerosol abundance and properties*. Geophysical Research Letters, v. 27, p. 3861-3864.
- Litjens, G. 2013 Investigation of Spectral Effects on Photovoltaic Technologies by Modelling the Solar Spectral Distribution. Freiburg.
- NASA, n.d. NASA Giovanni. Disponível em: <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>
- Nunes, 2016 G. M. Influência do Espectro da Radiação Solar em Módulos Fotovoltaicos. Inpe. São José dos Campos.
- Marion B. 2010. Preliminary Investigation of Methods for Correcting for Variations in Solar Spectrum under Clear Skies. *National Renewable Energy Laboratory*, Colorado.
- Portal Solar. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/energia-fotovoltaica.html>.
- Remer, L. A. et al.2 *The MODIS aerosol algorithm, products, and validation*. *Journal of The Atmospheri Sciences*, v. 62, n. CLAMS special Sction, p. 947-973, 2005.
- Secretaria de Minas e Energia do Rio Grande do Sul. Atlas Solar: Rio Grande do Sul. 2018. Porto Alegre: SMERS, 144p. (ISBN 978-85-67342-04-7)
- Santos, F.H, 2016 Rendimento de módulos fotovoltaicos sob condições específicas do espectro solar incidente na serra gaúcha, Caxias do Sul (RS).

ANALYSIS OF THE SPECTRAL DISTRIBUTION OF THE SOLAR RADIATION AT PORTO ALEGRE

Abstract. *In this work, the monthly characterization of the spectral distribution of the solar irradiance over the region of Porto Alegre will be approached, through data obtained by satellite and by the compilation of the data of approximately ten years provided by the Secretary of Mines and Energy of Rio Grande do Sul for the Solar atlas 2018. To achieve the objective, the average value of the AM element (air mass) will be evaluated, which significantly impacts the spectral distribution of solar radiation in a region and, as a result, may affect the performance of photovoltaic modules. The computational model of radiative transfer in the atmosphere SMART2 was used as a standard to generate the monthly average spectra in the region of interest for clear days, since the software has a better reliability in these periods, as well as, for the standard spectrum ASTM G-173. When comparing the annual mean values, with an AM of 1.5 for both cases, there was no significant variation in the spectral distribution. When the effective average value of AM 1.3 between 2000 and 2018 was adopted for the Porto Alegre region, there was also little impact in comparison with the standard spectrum. In addition, the graphs representing the effective monthly spectra showed a small increase in radiation at wavelengths less than 600nm and a decrease in radiation at longer wavelengths. In general, the objective of the work in finding effective spectral distributions for the region, based on the characteristic average AM, brought a lot of information that can be useful for photovoltaic applications.*

Keywords: Spectral distribution of solar radiation, solar irradiation, photovoltaic energy.