

IRRADIÂNCIA ESPECTRAL EM PETROLINA - BRASIL: CARACTERIZAÇÃO E VALIDAÇÃO DE SIMULAÇÕES.

Janis Joplim Bezerra Galdino – janis.joplim@ufpe.br

Olga de Castro Vilela - olga.vilela@ufpe.br

Naum Fraidenraich - naumfraiden2@gmail.com

Helmut Muniz - helmutmuniz@gmail.com

Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Energias Renováveis

Alex Coutinho Pereira - alexcp@chesf.gov.br

Eduardo Boudoux Jatoba - ejatoba@chesf.gov.br

Alcides Codeceira Neto - alcidesc@chesf.gov.br

José Bione de Melo Filho - jbionef@chesf.gov.br

Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (Chesf)

Resumo: *Medições de irradiância solar espectral trazem um maior detalhamento sobre o comportamento da radiação solar, sendo importantes na análise da geração fotovoltaica. Neste trabalho, foi realizada uma caracterização do espectro da irradiância global horizontal para a cidade de Petrolina, utilizando mais de 100 mil medições da irradiância espectral com alta resolução (1 nm) na faixa de comprimento de onda de 300 a 1700 nm, obtidas entre setembro de 2018 a julho de 2021. Foi analisado o impacto da massa de ar na intensidade e no formato da distribuição espectral da irradiância solar de céu claro. Além disso, foi obtida a proporção das componentes da radiação ultravioleta, luz visível e infravermelha do espectro local e como elas são afetadas com a massa de ar. Através dos espectros observados, foi possível também analisar o comportamento médio da distribuição espectral da irradiância sob efeito de cloud enhancement. Além da caracterização do espectro local, simulações da irradiância espectral obtidas com o software SMARTS2 foram validadas para momentos de céu claro. Foi observado que o erro do modelo SMARTS2 aumenta com a massa de ar e possui valores mais altos para a faixa de radiação ultravioleta. O valor da raiz do erro quadrático médio normalizado pela média das observações (nRMSE) para as simulações do SMARTS2 foi acima de 10 %, porém, ao considerar o valor de energia integrado total e seu impacto na energia absorvida pelas tecnologias fotovoltaicas de silício monocristalino, silício amorfo, telureto de cádmio e módulos formados pelo polímero orgânico P3HT:PCBM, o valor do nRMSE ficou em torno de 3 %.*

Palavras-chave: *Irradiância espectral, Energia fotovoltaica, SMARTS2.*

1. INTRODUÇÃO

A irradiância solar é formada por ondas eletromagnéticas distribuídas em comprimentos de onda (ou frequências), podendo ser classificada em 3 grandes faixas: i) radiação ultravioleta (UV; radiação de comprimento de onda abaixo de 400 nm); ii) luz visível (VIS; de comprimento de onda entre 400 e 780 nm); e iii) radiação infravermelha (IV; comprimento de onda acima de 780 nm). As propriedades dos materiais em relação à interação com a luz (reflexão, absorção e transmitância) variam de acordo com o comprimento de onda da radiação, por isso, para diversas áreas é fundamental conhecer a distribuição espectral da luz. O monitoramento do espectro solar tem aplicações, entre outras áreas, nos estudos das mudanças climáticas (Xu e Cui, 2021; Bornman et al. 2019), nos impactos da radiação na vida terrestre (Benelli et al., 2020; Miyauchi e Nakajima, 2016) e na ciência e tecnologia dos materiais.

A distribuição espectral da irradiância solar na superfície terrestre é afetada pela composição da atmosfera ao qual ela atravessa. Já que os gases em geral possuem uma resposta espectral para absorção de luz bastante seletiva, a partir do espectro solar, pode-se obter informações sobre a composição da atmosfera, como a concentração de NO_x, de CO₂, vapor de água, ozônio e aerossóis (Tatsiankou et al., 2016; Kaskaoutis et al., 2016; Gueymard, 2005).

Como dados medidos de espectro são bastante raros, modelos de simulação de espectro foram desenvolvidos. Os mais usuais utilizam uma abordagem física, através da resolução de equações de transferência radiativa da atmosfera, como os softwares SPCTRAL2 (Bird e Riordan, 1986) e SMARTS2 (Gueymard, 1995), que recebem parâmetros atmosféricos como entrada.

Em relação a geração de energia, as células fotovoltaicas são sensíveis à variação da distribuição espectral da irradiância solar. Como uma forma de padronizar a certificação dos módulos fotovoltaicos (FV), um espectro solar terrestre padrão ASTM G173-03 foi estabelecido. Ele representa o espectro médio anual de várias localidades dos Estados Unidos para radiação direta e global no plano inclinado a 37° e massa de ar 1,5 (ASTM G173-03, 2012). Apesar de ter boa representatividade, vários estudos mostram o impacto da diferença entre o espectro padrão e o local na geração de diferentes tecnologias fotovoltaicas em várias localidades (Rodziewicz et al., 2021; Lindsay et al., 2020; Dirnberger et al., 2015; Alonso-Abella et al., 2014). Polo et al. (2017) fizeram um mapeamento global do impacto anual do espectro na geração de energia FV para 124 cidades, contemplando 8 zonas climáticas distintas, através da simulação do espectro

local. Eles mostraram que o impacto anual na geração pode chegar a 10% para a tecnologia de silício amorfo (a-Si) e 3% para o cristalino (c-Si), com forte dependência das características climáticas locais.

Além do impacto na energia absorvida através do efeito fotovoltaico, a distribuição espectral também influencia em outra variável importante da geração de energia FV, a temperatura. Appelbaum e Maor (2020) utilizaram simulações do espectro para a modelagem da temperatura de operação de diferentes tecnologias de módulos FV.

Para todo o Brasil, principalmente o semiárido nordestino, região de destaque na geração centralizada de energia solar, há uma lacuna sobre a caracterização da irradiância espectral. Haag e Krenzinger (2016) calcularam o espectro solar característico para a cidade de Petrolina através de dados de satélite e o simulador SMARTS2 e constataram que há diferenças significativas entre o espectro local e padrão em certas faixas de comprimento de onda. Na cidade de Petrolina, localizada no semiárido de Pernambuco, está localizada a Plataforma Solar de Petrolina, formada por uma central solar fotovoltaica de 2,5 MW e uma estação solarimétrica, que possui um espectralradiômetro para medições frequentes e de boa qualidade do espectro solar. Nesse contexto, o presente trabalho irá caracterizar o espectro da irradiância global horizontal, a partir de uma base de dados de medições locais do espectro solar. Além da caracterização, será realizado também, através de dados observacionais, a comparação com simulações geradas a partir do software SMARTS2, analisando o impacto na geração de eletricidade para diferentes tecnologias fotovoltaicas. A simulação do espectro solar pode ser utilizada em ferramentas de previsão, operação e monitoramento da geração de energia em centrais solares.

2. METODOLOGIA

2.1 Origem dos dados

Neste trabalho, foram utilizados dados observacionais e de simulação atmosférica. Os dados observacionais são provenientes da estação solarimétrica da Plataforma Solar de Petrolina, localizada no estado de Pernambuco, Brasil, cujas coordenadas geográficas são latitude -9.39° , longitude -40.5° , altitude s.n.m. 387 metros. A estação solarimétrica conta com diversos sensores radiométricos e de variáveis meteorológicas, utilizados para monitorar as irradiâncias global e difusa no plano horizontal, irradiância direta, temperatura ambiente, pressão atmosférica, umidade relativa do ar e velocidade e direção do vento. As medições das irradiâncias global e difusa no plano horizontal e da irradiância direta foram realizadas com piranômetros térmicos EKO MS-80 e o pireliômetro EKO MS-57, respectivamente. Os sensores das irradiâncias direta e difusa estão acoplados com o sistema de rastreamento EKO STR-22G. Além disso, a estação solarimétrica possui os espectralradiômetros EKO MS-711 e MS-712 (Figura 1) que, combinados, fornecem medições de irradiância espectral global horizontal na faixa de 300 a 1700 nm, com resolução de 1 nm de comprimento de onda. A campanha de medições da estação solarimétrica se iniciou em setembro de 2018 e todas as variáveis têm resolução temporal de 1 minuto. Vale ressaltar que medições da irradiância global espectral com essa resolução e com alta frequência são bastantes raras. No total, foram utilizadas 104221 medições do espectro solar em Petrolina.



Figura 1 – Sensores de radiação solar da Plataforma Solar de Petrolina: a) Piranômetros e pireliômetro; b) espectralradiômetros.

Os dados dos parâmetros atmosféricos que foram empregados neste estudo são oriundos da plataforma CAMS (*Copernicus Atmosphere Monitoring Service*) do ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*). Os modelos da plataforma CAMS resolve as equações de transferência radiativa da atmosfera através do software *LibRadtran*, ferramenta amplamente utilizada em estudos atmosféricos e climáticos, obtendo os fluxos da irradiância na atmosfera. Porém para reduzir o custo computacional, a simulação da plataforma CAMS utiliza tabelas de pesquisa, obtidas a partir do *LibRadtran*, para várias condições climáticas, que são empregadas para obter a saída final através de interpolações para o local de interesse (Lefevre et al., 2013). Como entrada, a plataforma CAMS precisa apenas das

coordenadas geográficas e a altitude do local, o intervalo de tempo e a frequência desejados. A partir da plataforma CAMS é possível obter valores para as variáveis de profundidade óptica de aerossóis, concentração de ozônio e quantidade de vapor de água, fundamentais para a simulação do espectro solar. Ainda, uma de suas saídas é a irradiância global de céu claro, que será utilizada neste estudo para identificar momentos de céu claro através do cálculo do índice de céu claro.

2.2 Simulação do espectro solar

A simulação da irradiância espectral foi realizada através do *software* SMARTS2 (*Simple Model of Atmosphere Transfer Sunshine*), que tem como base a resolução de equações simplificadas de transferência radiativa da atmosfera, calculando a transmitância da luz para diferentes componentes da atmosfera (Gueymard, 1995). O SMARTS2 é um modelo amplamente difundido na literatura por ser gratuito, de fácil utilização e requerer pouco esforço computacional. Suas entradas consistem de parâmetros atmosféricos e informações sobre local e data. Na Tabela 1, encontram-se as principais variáveis de entrada utilizadas neste trabalho para a simulação do espectro com o SMARTS2 e sua origem.

Tabela 1 – Principais variáveis de entrada do SMARTS2 e sua origem.

PRINCIPAIS VARIÁVEIS DE ENTRADA DO SMARTS2	FONTE
Pressão atmosférica, temperatura ambiente, umidade relativa do ar e temperatura média do dia.	Estação solarimétrica da Plataforma Solar de Petrolina.
Quantidade de vapor de água, concentração de ozônio e profundidade óptica de aerossóis a 550 nm.	Plataforma CAMS.
Concentração de CO ₂ (381 ppmv).	Valor estimado em Haag (2012).
Concentração de gases (“ <i>light polluted</i> ”), irradiância espectral extraterrestre (índice 0), modelo de aerossóis (“ <i>S&F URBAN</i> ”), albedo (“ <i>Light soil</i> ”).	Modelos predefinidos na configuração interna do <i>software</i> SMARTS2.
Estação do ano, correção da distância Sol-Terra e ângulo zenital.	Calculados a partir da data com as equações da geometria solar.

A programação do SMARTS2, porém, permite apenas a simulação do espectro solar de céu claro, restringindo a análise da validação do modelo apenas a estes momentos. Por essa razão, foi necessário identificar os momentos de céu claro da série temporal através do cálculo do índice de céu claro (K_C), dado pela relação entre a irradiância global de céu claro e a irradiância global observada. Foram selecionados os espectros medidos para os momentos com K_C entre 0,90 e 1 para a validação das simulações do SMARTS2, resultando em 6567 medições.

Para obter a irradiância de céu claro, foi utilizado o modelo McClear da plataforma CAMS. Para garantir a confiabilidade da saída do modelo McClear, ele foi validado com os dados observacionais de irradiância global da estação solarimétrica da Plataforma Solar de Petrolina. Com essa finalidade, foram encontrados 69 dias de momentos de céu claro completo ou significativos entre setembro de 2018 a julho de 2021. Foi considerado como momento de céu claro significativo o período em que não houve interferência de nuvens por toda manhã ou tarde, ou seja, metade de um dia. Para identificar os momentos de céu claro foi desenvolvido um algoritmo baseado na variância entre dois pontos consecutivos. Este algoritmo estabelece um número mínimo de pontos em que a variância se manteve abaixo de um patamar limite por um período significativo de minutos consecutivos.

A validação dos modelos será realizada a partir dos seguintes parâmetros estatísticos: raiz do erro médio quadrático (RMSE), RMSE normalizado pela média da observação (nRMSE), correlação de Pearson (COR), razão dos desvios padrão (STDr), bias e o *skill score* de Taylor (SS4; Taylor, 2001), que faz uma ponderação entre o STDr e a COR, variando de 0 (pior desempenho) a 1 (melhor desempenho).

3. RESULTADOS

Os resultados estão divididos em três partes. A primeira (seção 3.1) diz respeito a avaliação dos dados de simulação atmosférica da plataforma CAMS em relação aos dados observacionais. A segunda parte, a seção 3.2, mostra a caracterização da irradiância espectral de Petrolina a partir dos dados observacionais. Por fim, a seção 3.3 aborda os resultados da simulação do espectro solar pelo *software* SMARTS2, comparando-a com as medições locais de irradiância espectral de Petrolina.

3.1 Validação dos dados da Plataforma CAMS

Primeiramente, o modelo de céu claro McClear foi avaliado para garantir confiabilidade na irradiância global de céu claro utilizada para calcular o K_C . A Tabela 2 mostra os estatísticos encontrados para o modelo da plataforma CAMS. Pode-se observar que o McClear conseguiu reproduzir bem os dias de céu claro, apresentando uma alta correção (muito próxima de 1) e SS4, além de erros baixos como indica o nRMSE de 3,23 %.

Tabela 2 – Estatísticos do modelo de céu claro da Plataforma CAMS.

COR	STDr	SS4	RMSE	nRMSE	Bias
0,999	1,003	0,998	22,1 W/m ²	3,23 %	15,9 W/m ²

A Figura 2 apresenta a irradiância global observada e simulada para alguns dias das medições. A partir dos gráficos da evolução diária da irradiância global, pode-se observar melhor as simulações. Confirma-se então que o modelo físico McClear se ajustou bem às medições, porém em alguns momentos superestimou levemente a irradiância global. Essa tendência também pode ser observada através do valor do bias positivo.

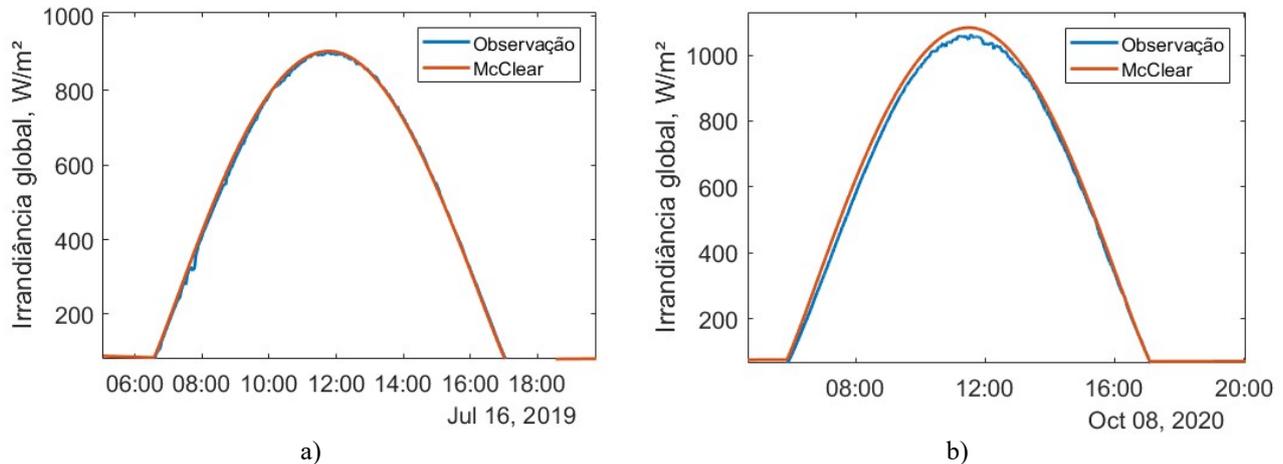


Figura 2 – Irradiância global medida e simulada para os dias: a) 16/07/2019; e b) 08/10/2020.

3.2 Caracterização do espectro de Petrolina

A massa de ar (AM – *Air Mass*) representa o caminho óptico que a luz deve percorrer do topo da atmosfera até a superfície terrestre. Quanto maior esse valor, maior será a quantidade de moléculas e partículas que irão interagir com a radiação, modificando o formato e diminuindo a intensidade do espectro da irradiância solar. Para uma atmosfera homogênea e não-refrativa, desprezando a curvatura da Terra, a massa óptica relativa do ar é dada pela Equação 1.

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

Onde θ_z representa o ângulo zenital.

A Figura 3 mostra os espectros médios da irradiância global para céu claro obtidos para 5 faixas de massa de ar: i) $AM < 1,2$; ii) $1,2 \leq AM < 1,5$; iii) $1,5 \leq AM < 2$; iv) $2 \leq AM < 3$; e v) $AM \geq 3$. -Para analisar o impacto da massa de ar no formato da distribuição espectral da irradiância solar, os espectros médios foram normalizados pelos seus respectivos valores máximos, é o que mostra a Figura 3-b. Como esperado, pode-se notar que quanto maior a massa de ar, menor será a intensidade da radiação, devido ao aumento da atenuação causada pelos componentes atmosféricos. Ao analisar o formato dos espectros médios, verifica-se que a partir do comprimento de onda máximo (entre 480 a 500 nm) há uma inversão: anterior a esse valor, quanto menor a massa de ar, maior a intensidade de energia; após o pico, a intensidade de energia aumenta com massa de ar. Isso indica que, para valores de massa de ar elevados, há um aumento na proporção de radiação IV. Por ser mais energética, a radiação UV sofre mais espalhamento e tende a ser mais facilmente absorvida (Iqbal, 1983), logo, quando a radiação solar percorre um caminho óptico maior (maior massa de ar), a faixa de radiação UV sofre ainda mais atenuações, reduzindo sua proporção da distribuição espectral total.

Considerando todos os espectros de irradiância global medidos, incluindo os momentos com cobertura de nuvens, foi analisado o percentual de cada componente da radiação solar, ultravioleta, luz visível e infravermelho. Ao todos foram 104222 espectros observados. A Figura 4 mostra um gráfico do tipo diagrama de caixa (*boxplot*) com o percentual de radiação UV, VIS e IV para todos os espectros medidos. As medianas encontradas para o percentual de radiação UV, VIS e IV são 6,3 %, 48,3 % e 45,1 %, respectivamente.

Como foi observado uma mudança no formato dos espectros com o aumento da massa de ar (Figura 3-b), foi realizada uma análise da proporção das faixas de radiação com a massa de ar. A Figura 5 mostra os valores médios para o percentual de cada faixa da radiação solar com a massa de ar. As médias foram obtidas dividindo os dados de acordo com a massa de ar para valores de 1 a 10, em intervalos de 1 unidade, ou seja, o primeiro ponto dos gráficos da Figura 5 representa a média do percentual de energia para espectros com valores de massa de ar entre 1 e 2 e assim por diante. Além disso, também foi calculado o valor do erro padrão da média para definir a barra de erro. A partir da Figura 4, pode-se notar que há uma redução nos percentuais de energia das radiações UV e VIS com aumento da massa de ar, e o oposto

ocorre com a proporção de energia de radiação IV, corroborando o que foi encontrado na Figura 3-b sobre a mudança no formato da distribuição espectral com a massa de ar.

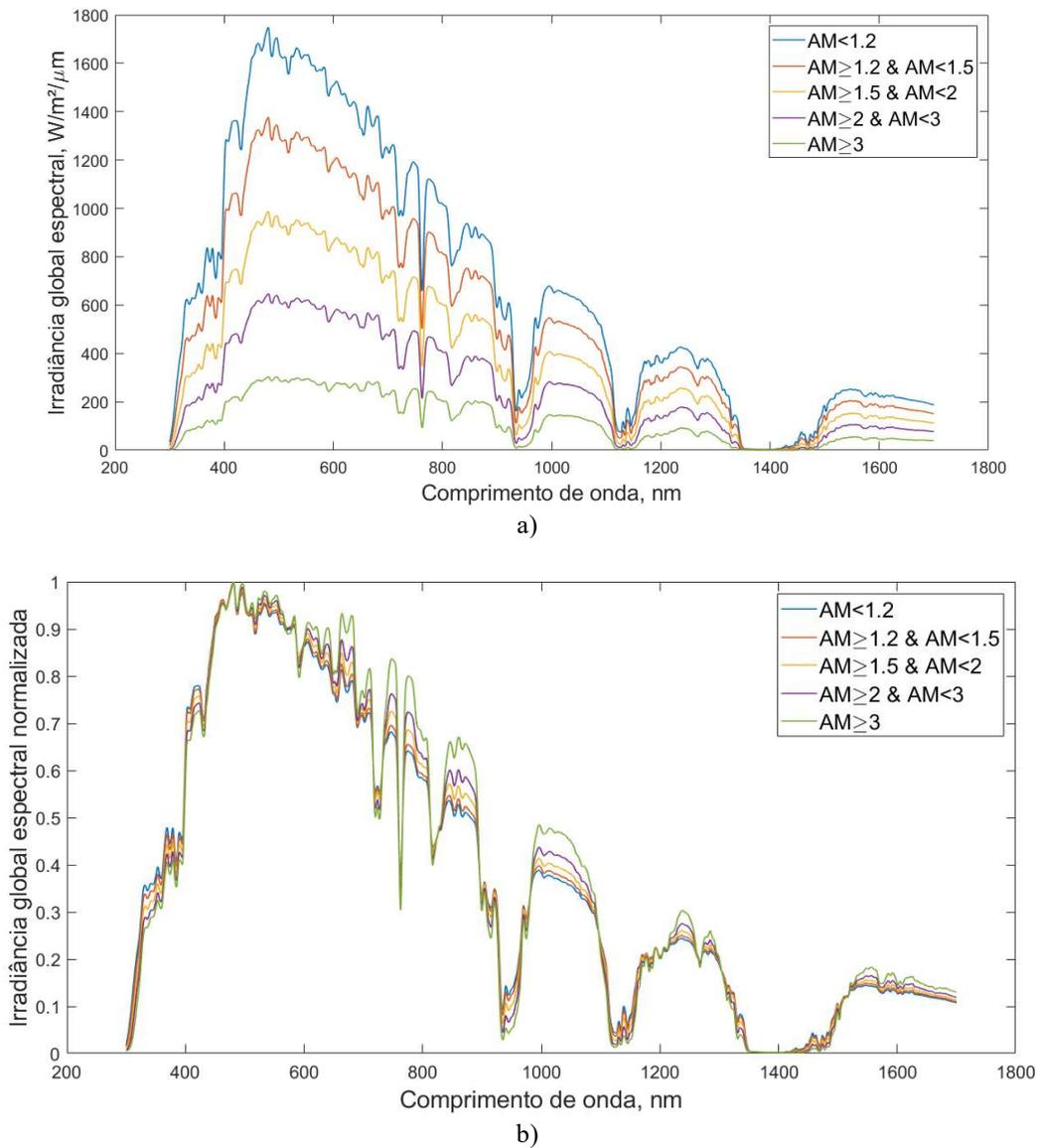


Figura 3 – a) Espectros médios da irradiância global para céu claro obtidos para 5 faixas de massa de ar: i) $AM < 1,2$; ii) $1,2 \leq AM < 1,5$; iii) $1,5 \leq AM < 2$; iv) $2 \leq AM < 3$; e v) $AM \geq 3$; e b) Espectros médios normalizados pelos seus respectivos valores máximos.

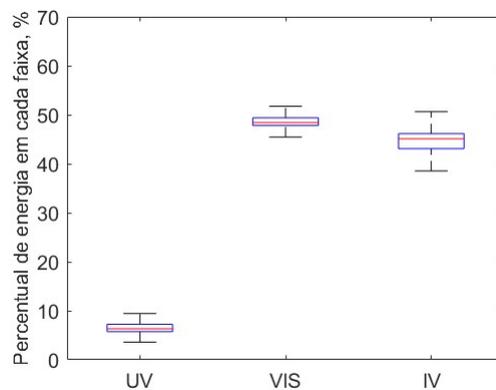


Figura 4 – Diagrama de caixa do percentual de energia em cada faixa da radiação solar (UV, VIS e IV) para os espectros medidos na Plataforma Solar de Petrolina.

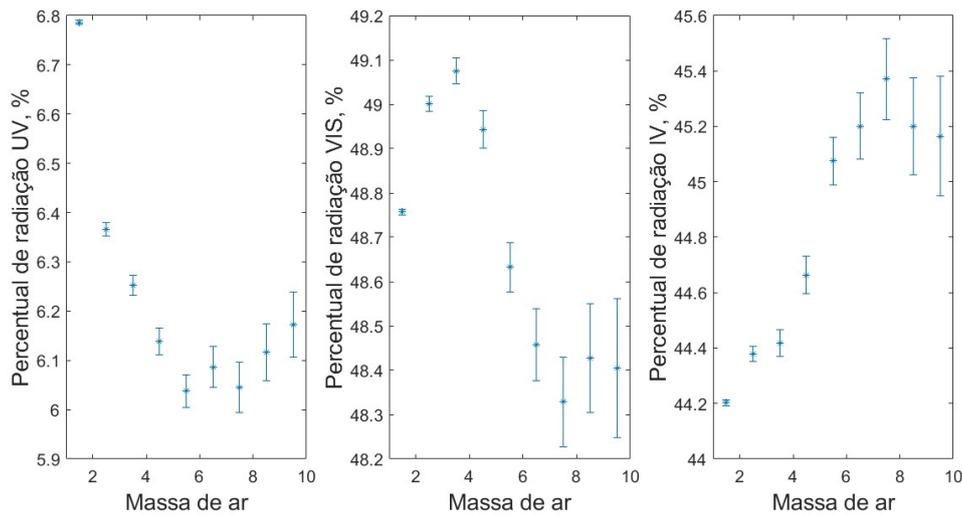


Figura 5 – Percentual médio de energia das radiações solar UV (gráfico à esquerda), VIS (gráfico central) e IV (gráfico à direita) com a massa de ar para os espectros medidos na Plataforma Solar de Petrolina.

Dentre os dados observacionais, foram encontrados momentos onde a irradiância global medida estava com um valor significativamente superior ao estimado pelo modelo de céu claro. Esses momentos de irradiância extrema podem ser considerados possíveis eventos de *cloud enhancement*, efeito de aumento na irradiância causado por nuvens. Dentre os dados analisados, a máxima irradiância global (obtida pela integral do espectro no comprimento de onda) encontrada foi de 1422 W/m². Para analisar o espectro da irradiância global sob condição de irradiância extrema, foram calculadas as distribuições espectrais médias para momentos em que o *Kc* foi superior a 1 (potenciais eventos de *cloud enhancement*) e para momentos de céu claro, para períodos em que a massa de ar fosse menor que 1,05 (ângulo de elevação solar alto). Além disso, o efeito do *cloud enhancement* no formato do espectro também foi avaliado normalizando os espectros médios pelos seus respectivos valores máximos. Os resultados podem ser vistos na Figura 6. Para essa faixa de massa de ar, a energia integrada dos espectros médios de céu claro e irradiância extrema foi de 1028 W/m² e 1149 W/m², respectivamente, e essa diferença na intensidade pode ser observada ao longo de toda a distribuição espectral.

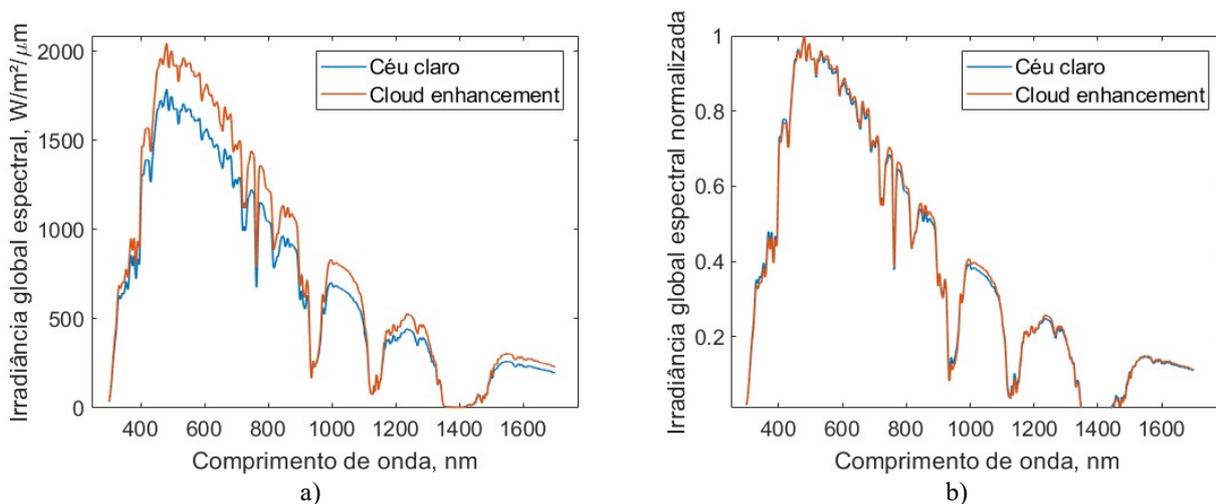


Figura 6 – a) Irradiância global espectral média para momentos de céu claro e de irradiância extrema (possíveis eventos de *cloud enhancement*) para massa de ar abaixo de 1,05. b) Os espectros médios normalizados pelos seus respectivos valores máximos.

Com relação ao formato do espectro, pode-se notar uma leve mudança na distribuição, com o espectro médio com *cloud enhancement* apresentando menor e maior intensidade na faixa de radiação UV e IV, respectivamente. Embora ainda não exista na literatura um conceito preciso sobre o efeito de *cloud enhancement*, alguns autores acreditam que ele ocorra através da superposição da irradiância direta com a difusa proveniente do espalhamento causado pelas nuvens (Gueymard, 2017). Esse tipo de espalhamento é regido pela teoria do espalhamento Mie, que é provocado por partículas de diâmetro similar ou maior que o comprimento de onda da luz, como as micro gotículas de água que formam as nuvens. Como o ângulo de espalhamento (ângulo formado pela direção da luz incidente e espalhada) para grandes partículas é pequeno, acredita-se que há uma grande superposição com a radiação direta, causando um valor de irradiância extrema

(Yordanov, 2015; Pecenek et al. 2016). O espalhamento Mie também atinge de forma significativa radiação de comprimento de onda maiores, como a radiação infravermelha (Iqbal, 1983), o que pode ser uma possível justificativa para o aumento da proporção de energia IV observado no espectro de *cloud enhancement*.

3.3 Simulação do SMARTS2

As simulações da irradiância global espectral no plano horizontal foram geradas para todos os momentos de céu claro ($0,9 \geq K_c \geq 1$) encontrados nos dados observacionais, dando um total de 6567 instantes. Como os espectros medidos possuem características distintas conforme a massa de ar (Figura 3), as simulações do SMARTS2 foram analisadas para diferentes faixas de massa de ar: i) $AM < 1,5$; ii) $1,5 \leq AM < 2$; e iii) $AM \geq 2$. Ainda, para cada intervalo de massa de ar, os estatísticos foram obtidos para as faixas da luz ultravioleta (UV), visível (VIS) e infravermelho (IV). A Tabela 3 mostra os resultados da comparação entre as simulações do SMARTS2 e as irradiâncias globais espectrais medidas na Plataforma Solar de Petrolina. Além disso, na Figura 7 é mostrado alguns espectros medidos com suas respectivas simulações.

Tabela 3 – Estatísticos do modelo SMARTS2 na simulação do espectro solar de Petrolina para momentos de céu claro para diferentes faixas de massa de ar.

Massa de ar: 1 – 1.5						
Faixa	COR	STDr	SS4	RMSE	nRMSE	Bias
UV	0,928	1,176	0,841	104,9 W/m ² /μm	19,81 %	16,1 W/m ² /μm
VIS	0,955	1,016	0,912	73,5 W/m ² /μm	5,44 %	17,8 W/m ² /μm
IV	0,993	0,998	0,986	37,1 W/m ² /μm	9,71 %	- 2,4 W/m ² /μm
Massa de ar: 1.5 – 2						
Faixa	COR	STDr	SS4	RMSE	nRMSE	Bias
UV	0,932	1,220	0,837	68,5 W/m ²	22,45 %	21,3 W/m ²
VIS	0,918	1,08	0,842	62,4 W/m ²	7,29 %	33,9 W/m ²
IV	0,991	1,023	0,981	28,4 W/m ²	11,61 %	3,0 W/m ²
Massa de ar > 2						
Faixa	COR	STDr	SS4	RMSE	nRMSE	Bias
UV	0,957	1,179	0,892	37,2 W/m ²	27,02 %	13,4 W/m ²
VIS	0,986	1,058	0,968	40,9 W/m ²	9,65 %	23,3 W/m ²
IV	0,990	1,040	0,979	18,6 W/m ²	15,06 %	3,4 W/m ²

Ao analisar a Tabela 3, nota-se que a simulação do SMARTS2 apresenta erros maiores na região UV do espectro solar, refletido no pior desempenho em todos os estatísticos. Além disso, observa-se uma tendência de superestimação do modelo em relação à observação. Visualmente, observa-se que a saída do SMARTS2 apresenta muitas flutuações, com grandes valores de erro absoluto em determinados comprimentos de onda, principalmente na região do UV e IV, influenciando nos valores dos estatísticos para essas regiões. O nRMSE para a simulação na região VIS é o mais baixo, porém na região do IV, todos os outros estatísticos possuem um desempenho melhor.

Outro ponto de destaque é que à medida que a massa de ar aumenta, o modelo vai apresentando piora em sua performance. Esse resultado já foi observado no trabalho de Utrillas et al. (1998). Com o aumento da massa de ar, a luz percorre um maior caminho na atmosfera até atingir a superfície terrestre, estando então sujeita a mais interferência dos componentes atmosféricos, tornando mais complexa a simulação.

No geral, considerando todos os valores de massa de ar e o espectro completo, as simulações do SMARTS2 tiveram um nRMSE de 10,15 %. Para mostrar o significado dessa diferença entre observação e simulação na energia disponível para geração fotovoltaica, foi calculado o nRMSE entre a irradiância integrada do espectro da medição e do modelo. Como cada tecnologia fotovoltaica possui uma resposta espectral distinta, a integração do espectro foi realizada considerando a eficiência quântica externa de 4 materiais: i) silício monocristalino (m-Si); ii) silício amorfo (a-Si); iii) módulo orgânico (OPV) formado pelo polímero P3HT:PCBM como camada ativa; e iv) telureto de cádmio (CdTe). Na Tabela 4, encontra-se os valores de nRMSE para a irradiância integrada total e considerando a EQE de cada tecnologia. O intervalo de integração utilizado está limitado a faixa de comprimento de onda dos dados observacionais, 300 a 1700 nm. A partir da Tabela 4, observa-se que, apesar do valor de nRMSE do SMARTS2 ser maior que 10 % em relação à irradiância espectral, isso reflete em valores baixos de erro no total de energia disponível para geração fotovoltaica considerando a condição de céu claro, sendo o maior impacto para a tecnologia OPV com 3,35 %. Isso pode indicar que o valor alto do erro considerando a distribuição espectral da irradiância pode estar ligado às flutuações da saída do modelo e que esse erro é atenuado quando se obtém a irradiância integrada. Uma alternativa que poderia reduzir o erro da simulação do SMARTS2 é a aplicação de um filtro para diminuir o “ruído” do modelo.

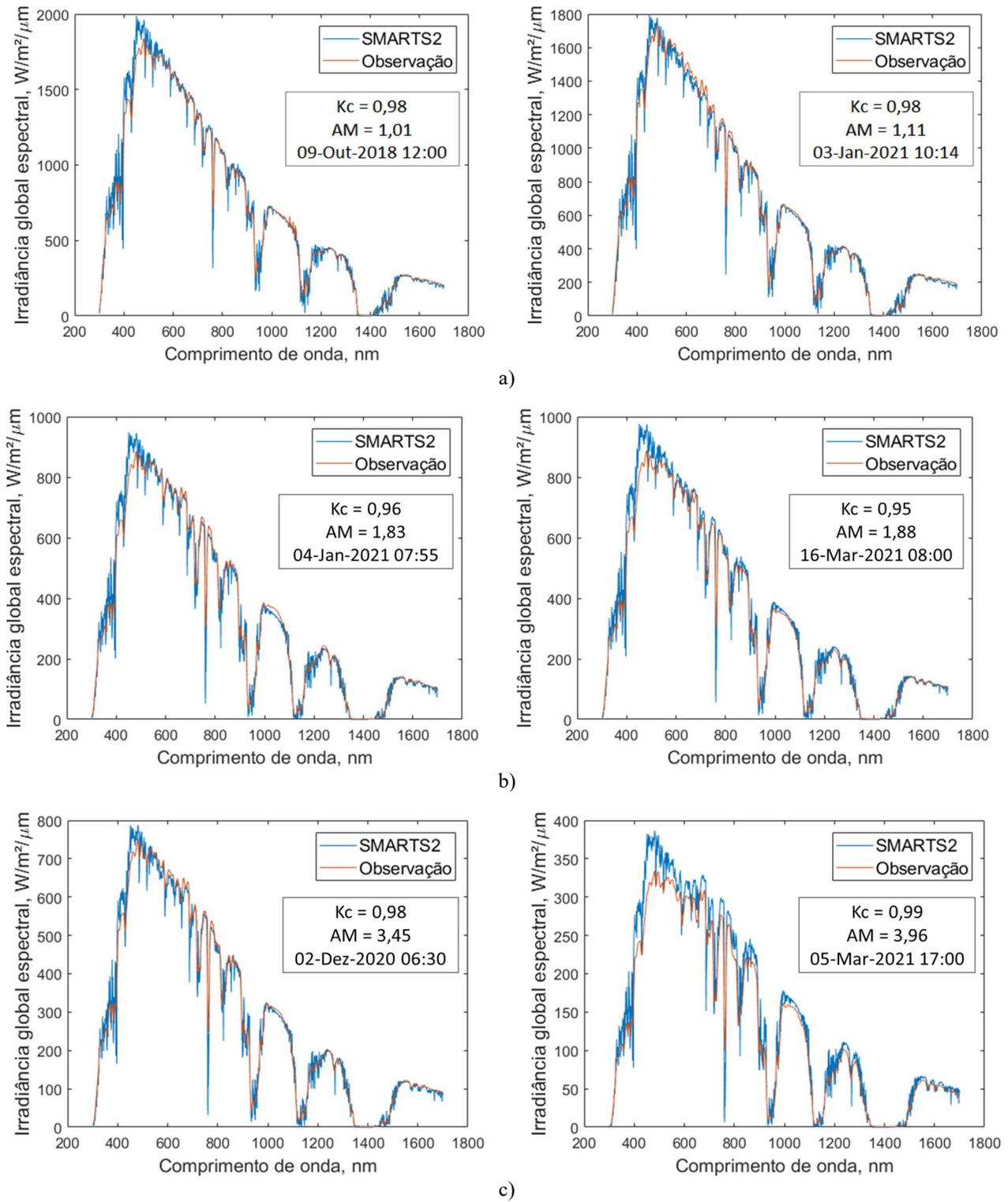


Figura 7 – Espectros medidos e observados para momentos de céu claro para as faixas de massa de ar: a) entre 1 e 1,5; b) entre 1,5 e 2; e c) acima de 2.

Tabela 4 – Valores de nRMSE da irradiância integrada total e considerando a EQE para as tecnologias fotovoltaicas de m-Si, a-Si, OPV e CdTe.

nRMSE – Irradiância integrada (%)				
Total	m-Si	a-Si	OPV	CdTe
2,39 %	2,52 %	3,05 %	3,35 %	2,66 %

4. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Neste trabalho, foi utilizada a base de dados da plataforma CAMS para obter a irradiância global de céu claro. Com esse objetivo, foi realizada uma validação desses dados com medições observacionais. Foi encontrado que os dados de irradiância global de céu claro da CAMS consegue reproduzir bem o comportamento da irradiância local, com um nRMSE de um pouco mais de 3 %.

A caracterização da irradiância espectral local de Petrolina se deu através da análise do espectro médio para diferentes faixas de massa de ar e da proporção de energia nas faixas de radiação UV, VIS e IV. Foi observado que o aumento da massa de ar, além de reduzir a intensidade de energia, também altera o formato do espectro, aumentando a proporção de energia IV. Essa mudança no formato do espectro também foi verificada para momentos onde o K_c foi maior que 1, indicando possíveis eventos de *cloud enhancement*. Esse resultado está de acordo com a teoria de que *cloud enhancement* é provocado pelo espalhamento Mie da radiação pelas nuvens.

O software SMARTS2 apresentou em geral bons resultados em relação a simulação da irradiância espectral para Petrolina, com alta correção (acima de 0,9). Os erros do modelo crescem com a massa de ar e são maiores para a faixa de radiação UV. Ao analisar ponto a ponto, o modelo atinge um erro acima de 10 %. O desempenho do modelo é prejudicado por sua saída possuir bastante flutuações, o que poderia ser melhorado através do uso de um filtro para redução de ruído. Apesar disso, a irradiância espectral simulada pelo SMARTS2 consegue reproduzir bem a energia integrada total e a energia absorvida por diferentes tecnologias FV. Neste trabalho, somente os espectros de céu claro foram utilizados na validação por ser a saída do SMARTS2. Pretende-se em trabalhos futuros aprofundar o estudo no espectro de céu nublado e parcialmente nublado.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL e da Companhia Hidro Elétrica do São Francisco – CHESF por meio do projeto 23076.009704/2020-56 no âmbito do Programa de P&D ANEEL, como também ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq pelo apoio aos bolsistas no âmbito do Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares -PROTEN.

REFERÊNCIAS

- Alonso-Abella, M., Chenlo, F., Nofuentes, G., Torres-Ramírez, M., 2014. Analysis of spectral effects on the energy yield of different PV (photovoltaic) technologies: The case of four specific sites. *Energy*, vol. 67, pp. 435-443.
- Appelbaum, J., Maor, T., 2020. Dependence of PV module temperature on incident time-dependent solar spectrum. *Applied Sciences*, vol. 10, n. 3, pp. 914.
- ASTM G173-03, 2012. Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances: Direct Normal and Hemispherical on 37° Tilted Surface. Disponível em: <<http://www.astm.org/Standards/G173.htm>>
- Benelli, A., Cevoli, C., Fabbri, A., 2020. In-field hyperspectral imaging: An overview on the ground-based applications in agriculture. *Journal of Agricultural Engineering*, vol. 51, n. 3, pp. 129-139.
- Bird, R. E., Riordan, C., 1986. Simple solar spectral model for direct and diffuse irradiance on horizontal and tilted planes at the earth's surface for cloudless atmospheres. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, vol. 25, n. 1, pp. 87-97.
- Bornman, J. F., Barnes, P. W., Robson, T. M., Robinson, S. A., Jansen, M. A., Ballaré, C. L., Flint, S. D., 2019. Linkages between stratospheric ozone, UV radiation and climate change and their implications for terrestrial ecosystems. *Photochemical & Photobiological Sciences*, vol. 18, n. 3, pp. 681-716.
- Dirnberger, D., Blackburn, G., Müller, B., Reise, C., 2015. On the impact of solar spectral irradiance on the yield of different PV technologies. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 132, pp. 431-442.
- Gueymard, C., 1995. SMARTS2: a simple model of the atmospheric radiative transfer of sunshine: algorithms and performance assessment. Cocoa, FL: Florida Solar Energy Center.
- Gueymard, C. A., 2005. Interdisciplinary applications of a versatile spectral solar irradiance model: A review. *Energy*, vol. 30, n. 9, pp. 1551-1576.
- Gueymard, C. A., 2017. Cloud and albedo enhancement impacts on solar irradiance using high-frequency measurements from thermopile and photodiode radiometers. Part 1: Impacts on global horizontal irradiance. *Solar Energy*, vol. 153, pp. 755-765.
- Haag, R., 2012. Estimativa da distribuição espectral da radiação solar sobre o território brasileiro através de análise multiinstrumental. Tese de doutorado pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
- Haag, R., Krenzinger, A., 2016. Espectro solar característico para a região do semiárido brasileiro. In VI Congresso Brasileiro de Energia Solar.
- Iqbal, M., 1983. An introduction to solar radiation. Elsevier.

- Kaskaoutis, D. G., Kambezidis, H. D., Dumka, U. C., Psiloglou, B. E., 2016. Dependence of the spectral diffuse-direct irradiance ratio on aerosol spectral distribution and single scattering albedo. *Atmospheric Research*, vol. 178, pp. 84-94.
- Lefevre, M., Oumbe, A., Blanc, P., Espinar, B., Gschwind, B., Qu, Z., et al., 2013. McClear: a new model estimating downwelling solar radiation at ground level in clear-sky conditions. *Atmospheric Measurement Techniques*, vol. 6, n. 9, pp. 2403-2418.
- Lindsay, N., Libois, Q., Badosa, J., Migan-Dubois, A., Bourdin, V., 2020. Errors in PV power modelling due to the lack of spectral and angular details of solar irradiance inputs. *Solar Energy*, vol. 197, pp. 266-278.
- Miyauchi, M., Nakajima, H., 2016. Determining an effective UV radiation exposure time for vitamin D synthesis in the skin without risk to health: simplified estimations from UV observations. *Photochemistry and photobiology*, vol. 92, n. 6, pp. 863-869.
- Pecenak, Z. K., Mejia, F. A., Kurtz, B., Evan, A., Kleissl, J., 2016. Simulating irradiance enhancement dependence on cloud optical depth and solar zenith angle. *Solar Energy*, vol. 136, pp. 675-681.
- Polo, J., Alonso-Abella, M., Ruiz-Arias, J. A., Balenzategui, J. L., 2017. Worldwide analysis of spectral factors for seven photovoltaic technologies. *Solar Energy*, vol. 142, pp. 194-203.
- Rodziewicz, T., Rajfur, M., Teneta, J., Świsłowski, P., Waclawek, M., 2021. Modelling and analysis of the influence of solar spectrum on the efficiency of photovoltaic modules. *Energy Reports*, vol. 7, pp. 565-574.
- Tatsiankou, V., Hinzer, K., Haysom, J., Schriemer, H., Emery, K., Beal, R., 2016. Design principles and field performance of a solar spectral irradiance meter. *Solar Energy*, vol. 133, pp. 94-102.
- Taylor, K. E., 2001. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 106, n. D7, pp. 7183-7192.
- Utrillas, M. P., Bosca, J. V., Martínez-Lozano, J. A., Cañada, J., Tena, F., Pinazo, J. M., 1998. A comparative study of SPCTRAL2 and SMARTS2 parameterised models based on spectral irradiance measurements at Valencia, Spain. *Solar Energy*, vol. 63, n. 3, pp. 161-171.
- Yordanov, G. H., 2015. A study of extreme overirradiance events for solar energy applications using NASA's I3RC Monte Carlo radiative transfer model. *Solar Energy*, vol. 122, pp. 954-965.
- Xu, Y., Cui, G., 2021. Influence of spectral characteristics of the Earth's surface radiation on the greenhouse effect: Principles and mechanisms. *Atmospheric Environment*, vol. 244, pp. 117908.

SPECTRAL IRRADIANCE IN PETROLINA – BRAZIL: CHARACTERIZATION AND MODEL VALIDATION

Abstract. *Spectral solar irradiance measurements provide greater detail on the behavior of solar radiation, being important in the analysis of photovoltaic generation. In this work, a characterization of the global horizontal irradiance spectrum for the city of Petrolina, located in the northeast of Brazil, was carried out, using more than 100 thousand spectral irradiance measurements with high resolution (1 nm) in the wavelength range from 300 to 1700 nm, from September 2018 to July 2021. The impact of air mass on the intensity and shape of the spectral distribution for clear-sky solar irradiance was analyzed. In addition, the fractions of the solar radiation components (ultraviolet, visible light, and infrared) of the local spectrum were obtained. Through the observed spectra, it was also possible to analyze the average behavior of the spectral distribution of irradiance under the effect of cloud enhancement. In addition to the characterization of the local spectrum, spectral irradiance simulations with the SMARTS2 software were validated for clear sky moments. It was observed that the SMARTS2 model error increases with the air mass and has higher values for the ultraviolet radiation range. The normalized root mean square error value (nRMSE) for the SMARTS2 simulations was above 10%, however, when considering the total integrated energy value and its impact on the energy absorbed by photovoltaic technologies, such as monocrystalline silicon, amorphous silicon, cadmium telluride and modules formed by the organic polymer P3HT: PCBM, the value of nRMSE was around 3%.*

Key words: *Spectral irradiance, Photovoltaic generation, SMARTS2.*