

ANÁLISE DO ESPECTRO DA RADIAÇÃO SOLAR NA CIDADE DE NATAL-RN

Samira de Azevedo Santos Emiliavaca – samira.emiliavaca@gmail.com

Alan Rodrigues de Sousa

Instituto SENAI de Inovação em Energias Renováveis – ISI-ER

Resumo. Este artigo apresenta o efeito da distribuição espectral da radiação solar no desempenho de três tecnologias de células fotovoltaicas distintas, silício amorfo (a-Si), silício monocristalino (m-Si) e policristalino (p-Si) para as condições climáticas da cidade de Natal. As medições que foram realizadas no Laboratório de Energia Solar do Instituto SENAI de Inovação em Energias Renováveis ISI-ER mostraram que no período analisado o espectro da radiação solar apresenta mais componentes na região do azul, ou seja, apresenta um valor do índice APE maior do que o mesmo índice para o espectro padrão AM1.5G. Esse resultado mostra que os módulos com a capacidade de absorver componentes do espectro de alta frequência apresentam um desempenho melhor na localidade. Ademais, a distribuição espectral da radiação durante eventos de sobreirradiância também é analisada e dependendo das condições da atmosfera, esses eventos podem ter características do espectro deslocadas para o vermelho ou azul.

Palavras-chave: Radiação espectral, Sistemas fotovoltaicos, Sobreirradiância.

1. INTRODUÇÃO

A transição energética é um dos grandes desafios do mundo moderno que buscar reduzir, substancialmente, as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) e, por conseguinte, diminuir os impactos causados pelo aquecimento global. Esse contexto, incentivou a busca por fontes de energia com baixa emissão de poluentes e a adoção de uma economia de baixo carbono. Assim, os sistemas fotovoltaicos, que se originaram para aplicações espaciais, ganharam cada vez mais espaço no mundo moderno. Os sistemas fotovoltaicos consistem na geração de energia elétrica por meio de materiais semicondutores que convertem diretamente a energia solar em eletricidade por efeito fotovoltaico (Sirisampha e Ketjoy, 2012).

O desempenho dos módulos fotovoltaicos é muito influenciado pelas condições externas, ou seja, irradiância incidente, temperatura e distribuição espectral da irradiância (De Sousa, De Oliveira e Emiliavaca, 2022). Tais fatores, são dependentes dos parâmetros atmosféricos e geográficos que, em muitos casos, são bem diferentes da condição padrão de teste STC (do termo inglês, Stand Test Conditions), ou seja, uma irradiância de 1000 W/m², um espectro AM1.5 G e a temperatura do módulo a 25 ° C, como definido na IEC 60904-1:2020. As condições descritas na norma IEC 60904-1:2020 possibilita a comparação entre diferentes módulos fotovoltaicos, além de avaliar quanto eficiente será um projeto fotovoltaico em uma determinada região em função do módulo utilizado.

No Brasil, a energia solar fotovoltaica está em constante expansão em virtude do excelente recurso disponível em todas as regiões do país, com valores de irradiação solar superiores aos da maioria dos países da união europeia, nos quais a energia solar é amplamente disseminada (Pereira *et al.*, 2017). Juntamente com esse fato, a queda no preço dos módulos e as regulamentações normativas por parte da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) fez com que a energia solar fotovoltaica no Brasil ultrapassasse a marca de 24 GW de potência instalada e represente 5,39 % da matriz energética Brasileira (ANEEL, 2023). Na região nordeste do Brasil, se destaca ao possuir um os melhores valores do recurso solar. O estado do Rio Grande do Norte, em especial, é um dos estados que figuram com um dos maiores percentuais de irradiação em seu território, variando entre 4,75 a 6,25 kWh/m²/dia (Pereira *et al.*, 2017).

A radiação que chega na superfície terrestre emitida pelo sol, exhibe uma distribuição espectral semelhante à de um corpo negro a 5800 K, que ao penetrar a atmosfera terrestre sofre os efeitos de difração e se comporta como a teoria de espalhamento de Rayleigh (Belusso e Cainelli, 2015). Ainda, devido a presença de gases, gotas de água, poeira e partículas de aerossóis, a irradiância sofre alterações na sua intensidade e distribuição espectral (Haag e Krenzinger, 2010). Esses efeitos causados pela atmosfera têm vários impactos na radiação solar e implicam diretamente na potência gerada pelos módulos fotovoltaicos, além de introduzir uma componente difusa na radiação solar (Honsberg e Bowden, 2015). Na sua maioria, esses efeitos causam atenuação na irradiância que chega na superfície terrestre. Contudo, a correlação positiva de diferentes fatores ambientais pode produzir valores de irradiância da ordem ou até maiores do que a Constante Solar (Isc) durante curtos períodos de tempo (Piacentini *et al.*, 2011). Tal efeito, é conhecido como sobreirradiância na qual a irradiância que atinge a superfície da terra, alcança valores extremamente altos. Na literatura, ainda não existe um consenso sobre a formação do evento, mas o que se sabe é que existem um incremento na irradiância difusa, elevando a intensidade da radiação na superfície (Luoma *et al.*, 2012).

O evento de sobreirradiância está ganhando destaque nos últimos anos por causa dos efeitos negativos nos sistemas fotovoltaicos, ocasionando sobrecarga no inversor, queima de fusíveis e desligamento dos circuitos de proteção (Scarabelot, Rampinelli e Rambo, 2021). No Brasil, em especial, diversos trabalhos apresentam localidades onde a

irradiância atinge valores extremos, como é o caso de um registro na cidade de Florianópolis, no estado de Santa Catarina, na qual a irradiância atingiu o valor de $1845,5 \text{ W/m}^2$ (Martins, Mantelli e R  ther, 2022). Em outras pesquisas, foram relatados altos índices da irradiância no Brasil (Almeida, Zilles e Lorenzo, 2014; de Andrade e Tiba, 2016; do Nascimento *et al.*, 2019). Contudo, poucos estudos registraram a distribui o espectral da irradiância solar durante esses eventos no Brasil.

O estudo realizado por Galdino *et al.* (2022) verificou a mudança do espectro da irradiância durante eventos de cloud enhancement na cidade de Petrolina, no estado de Pernambuco, sendo esse resultado de acordo com a teoria que os eventos de cloud enhancement são provocados pelo espalhamento Mie da radia o pelas nuvens. Porém, cabe destacar, que os eventos de cloud enhancement não são necessariamente eventos de sobreirradiância, sendo atribuído como evento de sobreirradiância quando a irradiância na superfície supera a irradiância extraterrestre.

Os módulos fotovoltaicos exibem uma resposta quase que linear   irradiância solar, contudo os módulos são sensíveis   varia o do espectro eletromagnético, como   o caso dos módulos de filme finos, que possuem uma resposta espectralmente limitada quando comparada as tecnologias de silício cristalino (Nofuentes *et al.*, 2014). Desta forma, analisar a distribui o espectral da irradiância durante os eventos de sobreirradiância   importante para avaliar quais tecnologias são mais afetadas por esses eventos. Neste contexto, o objetivo deste artigo   analisar a distribui o espectral dos eventos de sobreirradiância ocorridos na cidade de Natal, no estado do Rio Grande do Norte, e avaliar o desempenho de 3 diferentes células fotovoltaicas de referência submetidas   espectros solares de características distintas através da utiliza o do  ndice APE (*Average Photon Energy*) e indicar qual dos materiais de fabrica o das células que permite obter um melhor desempenho quando o espectro solar   rico em componentes de alta e de baixa frequência.

2. METODOLOGIA

2.1 Dados utilizados

O estudo foi realizado utilizando dados da irradiância espectral ($G(\lambda)$) medidos na esta o solarimétrica pertencente ao Instituto SENAI de Inova o em Energias Renováveis (ISI-ER). Os dados do espectro foram coletados por um espectrorradiômetro estacionário, modelo MS711 da EKO Instruments capaz de realizar a medi o do espectro na faixa de 300 a 1100 nm, com o intervalo de 1 minuto entre uma medi o e outra. O espectrorradiômetro foi instalado na cidade de Natal, na latitude $-5,824989^\circ$ e na longitude $-35,22674^\circ$ com sua altitude em rela o ao nível do mar de 50 m, conforme   ilustrado na Fig. 1a. De forma a complementar os dados medidos pelo espectrorradiômetro, foi utilizado os dados medidos pela esta o solarimétrica do ISI-ER, instalada   5 metros do espectrorradiômetro. A esta o solarimétrica conta com diversos sensores, utilizados para monitorar as irradiâncias global e difusa no plano horizontal, irradiância direta, irradiância refletida, irradiância de ondas longas descendentes, temperatura e umidade relativa do ar, velocidade e dire o do vento, pressão atmosférica e pluviometria. As medi es da irradiância global horizontal (GHI do inglês, Global Horizontal Irradiance) e irradiância difusa horizontal (DHI, do inglês Diffuse Horizontal Irradiance) são realizadas por piranômetros térmicos CMP22 da Kipp e Zonen e a irradiância direta normal (DNI, do inglês Direct Normal Irradiance) pelo pireliômetro CHP1 da Kipp e Zonen. Na Fig. 1b   ilustrada a esta o solarimétrica com todos os equipamentos instalados.



(a)



(b)

Figura 1 – (a) Vista do espectrorradiômetro MS711 e (b) da esta o solarimétrica do ISI-ER.

Para a avalia o do comportamento de eventos de sobreirradiância através de dados espectrais foram utilizados dados de cinco eventos registrados pela esta o solarimétrica do ISI-ER que ocorreram nos dias e foram observados nos dias 20 de fevereiro de 2022, 25 de março de 2022, 25 de outubro de 2022, 15 de novembro de 2022 e 18 de janeiro de 2023. Enquanto que para a avalia o do desempenho dos diferentes sistemas fotovoltaicos, utilizou-se o período de 01 a 31 de julho de 2021. A irradiância espectral (G) foi varrida a cada 1 minuto durante o intervalo de tempo compreendido

das 8h00 às 15h00, garantindo assim que o ângulo de elevação do sol fosse maior que 20°. Dados de irradiância global horizontal (GHI) coletados na estação meteorológica do ISI-ER no mesmo período também foram utilizados.

2.2 Resposta espectral

Para realizar a análise do espectro solar na eficiência de conversão de uma célula fotovoltaica, além dos dados de irradiância global horizontal e da temperatura do ar, é necessário também informações sobre a resposta espectral SR (do inglês, Spectral Response) da célula testada.

Segundo (Ghitas, 2012) a resposta espectral pode ser definida como:

$$SR(\lambda) = \frac{J_L(\lambda)}{G(\lambda)}, \quad (1)$$

onde $J_L(\lambda)$ representa a densidade de corrente gerada pela luz para um comprimento de onda específico e $G(\lambda)$ é a irradiância espectral da luz incidente medida em W/m²/nm. No entanto, em células solares ou módulos fotovoltaicos de última geração, a resposta espectral é definida como a corrente de curto-circuito, $I_{SC}(\lambda)$, resultante de um único comprimento de onda de luz normalizado pela corrente máxima possível.

$$SR(\lambda) = \frac{I_{SC}(\lambda)}{q \cdot A \cdot f(\lambda)}, \quad (2)$$

na qual, q é a carga do elétron $1,6 \times 10^{-19}$ C, A é a área de superfície do dispositivo PV e $f(\lambda)$ é o fluxo de fótons incidente.

2.3 Caracterização do espectro

A caracterização do espectro é fundamental para avaliar os impactos das componentes espectrais da irradiância em materiais fotovoltaicos (Nofuentes *et al.*, 2014). Nesse sentido, foi criado o conceito de Massa de Ar (AM) (do inglês, Air Mass) que é um conceito de como a absorção na atmosfera afeta o conteúdo espectral e a intensidade da radiação solar que atinge a superfície da Terra (Eke *et al.*, 2017). Assim, para padronizar a avaliação do desempenho de módulos fotovoltaicos, foi utilizado o espectro solar padrão AM1.5, que representa o espectro médio de várias localidades dos Estados Unidos. Contudo, pelo fato de os módulos fotovoltaicos serem avaliados sob um único espectro padrão de referência, o desempenho das células em condições reais de uso pode variar devido às características espectrais da região. Dessa forma, para analisar o desempenho de módulos submetidos a uma distribuição espectral diferente, são comumente usados, termos adimensionais para caracterizar a distribuição espectral, como o fator de incompatibilidade espectral, a fração útil e a energia média do fóton (APE) (do inglês, Average Photon Energy). Nesse sentido, a caracterização da distribuição espectral da irradiância em Natal foi realizada analisando o espectro em dias de céu claro em diferentes estações do ano. Para quantificar a distribuição espectral é utilizada o índice APE.

O índice APE é um valor definido pela razão entre a irradiância total do espectro sobre a densidade de fluxo de fótons (Eke *et al.*, 2017). O APE representa um número único que caracteriza a forma do espectro, de modo que quanto maior for o valor do APE, maior é o conteúdo azul do espectro solar. Segundo (Norton, Amillo e Galleano, 2015) o APE pode ser calculado na unidade elétron-volt (eV) como:

$$APE = \frac{\int_{\lambda_a}^{\lambda_b} G(\lambda) d\lambda}{q_e \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} \varphi(\lambda) d\lambda}, \quad (3)$$

na qual q_e é a carga do elétron, $\varphi(\lambda)$ é a densidade de fluxo espectral de fótons, λ_a e λ_b são os limites do comprimento de onda de absorção do dispositivo de medição. Ao delimitar os limites de comprimento de onda, o APE é referido como um intervalo de integração finito, logo o APE pode assumir diferentes valores dependendo da integração realizada. A título de comparação, segundo (Eke *et al.*, 2017), o valor do espectro para a faixa de 300-1700 nm é de 1,62 eV, já o valor da APE para o espectro padrão AM 1.5 na faixa de 300-1100 nm é 1,85 eV. Neste estudo é adotado o valor de 1,85 eV para o espectro AM 1.5, uma vez que, compreende exatamente a faixa de leitura do espectrorradiômetro utilizado no estudo.

2.4 Caracterização do evento de sobreirradiância

Os eventos de sobreirradiância são caracterizados quando a irradiância medida na superfície atinge valores superiores ao da irradiância que chega no topo da atmosfera (I_{oh}). Desta forma, para medir os eventos de sobreirradiância, foram traçadas curvas I_{oh} a partir da seguinte equação:

$$I_{oh} = I_{SC} \cdot \varepsilon_o \cdot \cos\theta_z, \quad (4)$$

onde I_{SC} é a constante solar igual a 1367 W/m^2 , ε_o é a excentricidade da órbita da Terra e $\cos\theta_z$ é o cosseno do ângulo zenital. A partir dos valores de I_{oh} , verificou-se quais valores de GHI medidos superaram os valores de I_{oh} e tais valores foram considerados eventos de sobreirradiância. Contudo, os valores de sobreirradiância podem ser muito menores do que a irradiância (1000 W/m^2) não apresentando relevância ou problemas potenciais para o desempenho operacional das usinas fotovoltaicas (do Nascimento *et al.*, 2019). Dessa forma, este trabalho analisa os eventos superiores a 1000 W/m^2 .

O tipo e a fração de cobertura de nuvens são considerados moduladores da ocorrência de eventos de sobreirradiância. Andrade e Tiba (2016) mostraram que a presença de nuvens do tipo cumulus aumenta a possibilidade de ocorrência de valores extremos de irradiância devido aos reflexos nas bordas das nuvens e também aos diversos espalhamentos que ocorrem na superfície das nuvens (Costa *et al.*, 2021). Na Fig. 2 é possível observar que o evento de sobreirradiância é condicionado a dias com presença de nebulosidade (Fig. 2a), mas não quando essa nebulosidade é total (Fig. 2b) ou em dias de céu claro (Fig. 2c).

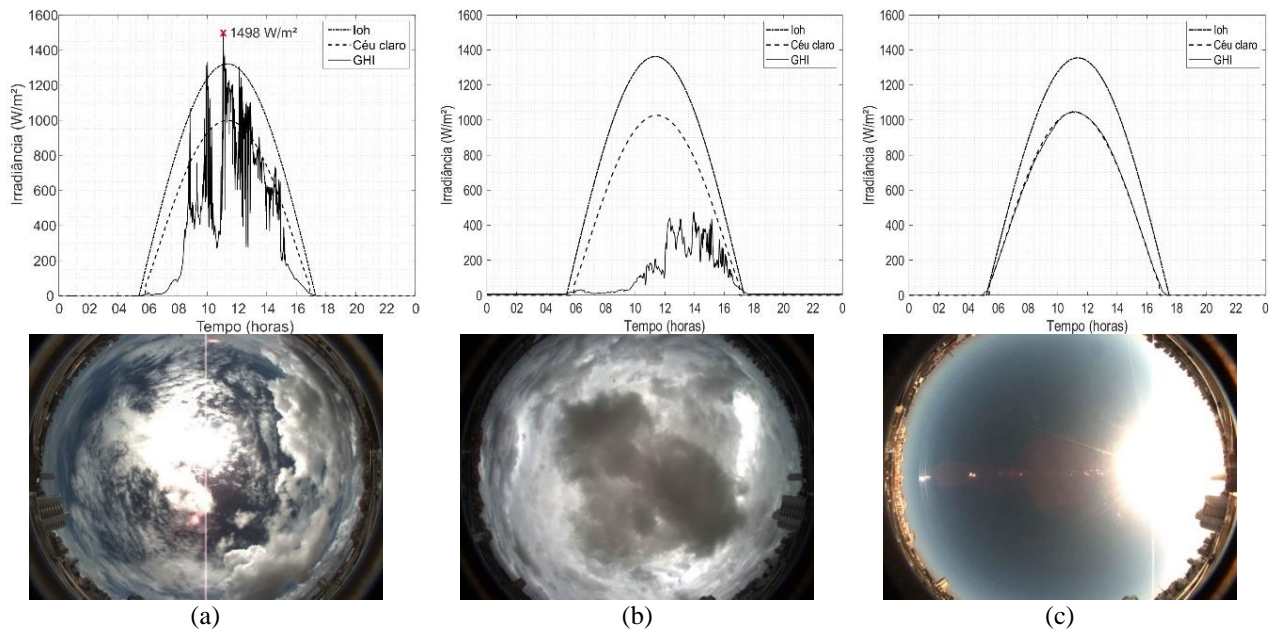


Figura 2 –Perfis de irradiâncias e imagens da câmera allsky (a) para um evento de sobreirradiância (b) para um dia nublado e (c) para um dia de céu claro registrados na estação solarimétrica do ISI-ER.

2.5 A campanha experimental

Para realizar a estimativa da geração de energia por cada uma das células de referência foi dimensionado um sistema fotovoltaico de 10 kWp de potência para cada tipo de célula utilizada conforme as metodologias de (Sauthier, 2019) (Cubas; Pindado; Victoria, 2014). Os dados medidos com a GHI abaixo de 300 W/m^2 foram desconsiderados, pois a eficiência do sistema cai significativamente para esses valores de irradiância. Em seguida, foi utilizado o índice APE para quantificar a contribuição do espectro no desempenho dos dispositivos fotovoltaicos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A resposta espectral das 3 células de referência analisadas é apresentada na Fig. 3, na qual, é possível observar que a tecnologia de Silício amorfo (a-Si) possui uma faixa de resposta espectral de 300 a 700 nm, sendo bem inferior a faixa de resposta das células de Silício poli (p-Si) e mono (m-Si) cristalinas que vão de 300 a 1050 nm e de 300 a 1100 nm respectivamente. Essa diferença na resposta espectral deve-se ao fato do semiconductor feito de a-Si possuir um *gap* maior que os semicondutores de silício poli e mono cristalinos. Isso, faz com que fótons de baixa energia não consigam excitar os elétrons da camada de valência do material, limitando sua resposta espectral e por consequência, sua eficiência. A resposta espectral de um dispositivo fotovoltaico descreve a sua capacidade em converter a radiação incidente em corrente elétrica em função do comprimento de onda e é conceitualmente semelhante à eficiência quântica (Ferreira *et al.*, 2012). Sendo que, a eficiência quântica fornece o número de elétrons produzidos pela célula solar em comparação com o número de fótons incidentes no dispositivo, enquanto a resposta espectral é definida como a razão entre a densidade de corrente fotogerada pelo dispositivo dependente do comprimento de onda na condição de curto-circuito e a irradiância incidente em função do comprimento de onda (Guitas, 2012). Essa resposta é determinada principalmente pelo intervalo de banda dos materiais usados na fabricação, que define o limite superior do comprimento de onda da resposta espectral. Mais

especificamente, a SR depende do *gap* do material da célula fotovoltaica, da espessura da célula e dos mecanismos de transporte do portador no dispositivo.

Na Fig. 4 é ilustrado o gráfico da densidade de corrente produzida pelas três tecnologias de células fotovoltaicas, que é o resultado da multiplicação entre a irradiância espectral e a resposta espectral das células, na qual, é possível identificar que a célula de a-Si é a que possui a menor capacidade de absorção de G e conseqüentemente, produz uma menor densidade de corrente. Isto é justificado por sua resposta espectral limitada, quando comparada com as células de m-Si e p-Si.

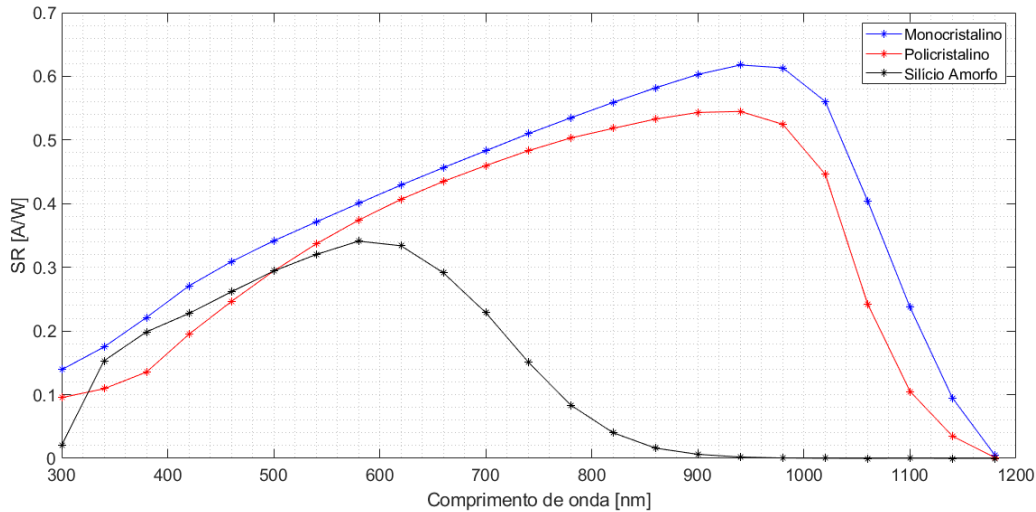


Figura 3 - Respostas espectrais das células de referências.

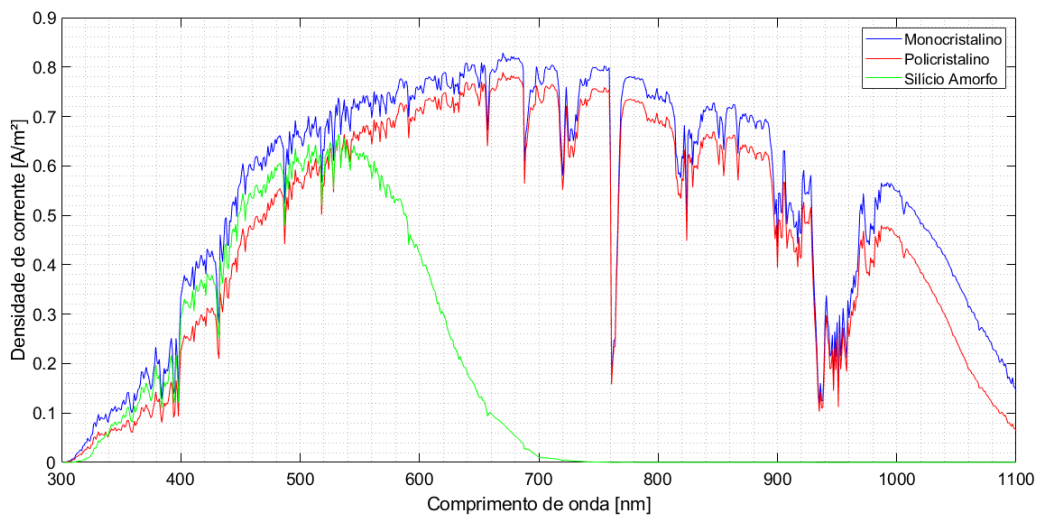


Figura 4 - Comparação entre o espectro solar absorvido pelas três células fotovoltaicas.

A produção de energia gerada pelo sistema fotovoltaico de cada uma das células é mostrada na Tab. 1, na qual foi possível identificar que existe diferenças entre a produção de energia a partir de sistemas fotovoltaicos dimensionados com base apenas em dados GHI e em sistemas fotovoltaicos que utilizaram adicionalmente os dados de G medidos pelo espectrorradiômetro. Os valores do índice APE calculados para a região no período analisado, na qual pode-se observar na Tab. 2 que o valor médio do APE foi de 1,912 eV para a faixa de 300-1100 nm, valor este superior ao do espectro padrão AM1.5G que é 1,85 eV para a mesma faixa. Isto significa, que o espectro analisado é rico em componentes de alta frequência, no caso a luz solar tem mais conteúdo azul do que vermelho, favorecendo assim, módulos com a SR mais próximas do azul, como é o caso das células de a-Si. Também da Tab. 2, é possível inferir que o dia 08 de julho, obteve o maior valor do APE quando comparado com os outros dias analisados, isso pode ser explicado, devido à grande quantidade de precipitação, que ocasiona uma maior presença de água na atmosfera. Como a água absorve a região vermelha do espectro, o índice APE é deslocado para a região do azul. Por outro lado, o dia 24 de julho obteve o menor índice APE, indicando que nesse dia a presença de partículas de água foi inferior.

Também, os resultados da Tab. 1 podem ser comparados com os resultados do estudo desenvolvido por (Braga, do Nascimento e Rütther, 2019). No qual, mostra que para duas localidades distintas do Brasil, uma na região Sul, na cidade de Florianópolis e outra na região Nordeste, na cidade de Assú, os módulos de Telureto de cádmio possuem ganhos

espectrais na ordem de 2 e 10%, respectivamente. O resultado de (Braga, do Nascimento e Rütther, 2019), complementa o resultado desse estudo, por apresentar valores próximos de ganhos espectrais em módulos de filme fino, no caso Telureto de cádmio e silício amorfo, na região nordeste do Brasil, sendo mais específico, para duas cidades do estado do Rio Grande do Norte.

Tabela 1 - Valores da produção estimada de energia para um sistema de 10 kWp de diferentes tecnologias de células.

Material da célula fotovoltaica	Simulado com os valores da radiação [kWh]	Simulado com os valores da radiação espectral [kWh]	Diferença [%]
Monocristalino	1264,8	1247,6	-1,36
Policristalino	1264,8	1242,9	-1,73
Silício Amorfo	1264,8	1391,9	10,05

Tabela 2 - Valores do APE para o espectro radiação solar médio diário do período analisado.

Dia	APE	Dia	APE	Dia	APE
1 de julho	1,919	12 de julho	1,916	23 de julho	1,908
2 de julho	1,907	13 de julho	1,911	24 de julho	1,904
3 de julho	1,906	14 de julho	1,922	25 de julho	1,906
4 de julho	1,913	15 de julho	1,915	26 de julho	1,910
5 de julho	1,920	16 de julho	1,913	27 de julho	1,918
6 de julho	1,911	17 de julho	1,930	28 de julho	1,911
7 de julho	1,908	18 de julho	1,918	29 de julho	1,909
8 de julho	1,937	19 de julho	1,913	30 de julho	1,906
9 de julho	1,912	20 de julho	1,905	31 de julho	1,910
10 de julho	1,913	21 de julho	1,911		
11 de julho	1,908	22 de julho	1,908	Média	1,913

Uma comparação entre o espectro AM 1.5G e o espectro da radiação solar em um dia de céu claro na cidade de Natal é apresentada na Fig. 5. Observa-se que na localidade, as intensidades da radiação espectral na região violeta são notavelmente maiores em comparação com o espectro AM1.5. Esse fenômeno pode ser confirmado ao calcular o APE para ambos os espectros, onde é evidenciado que o espectro da radiação durante um dia de céu claro na região possui um valor de 1,899 eV, valor este superior ao espectro padrão AM1.5 de 1,85 eV. Essa diferença no espectro solar pode ter implicações importantes no desempenho dos sistemas fotovoltaicos. Os módulos fotovoltaicos são seletivos espectralmente, ou seja, eles possuem uma resposta diferente para cada comprimento de onda. Assim, em locais com o APE maior que o valor do espectro padrão, a tendência dos módulos, com a resposta espectral mais próxima do azul, como as células de a-Si e CdTe, apresentarem um desempenho superior ao esperado quando submetido ao espectro padrão.

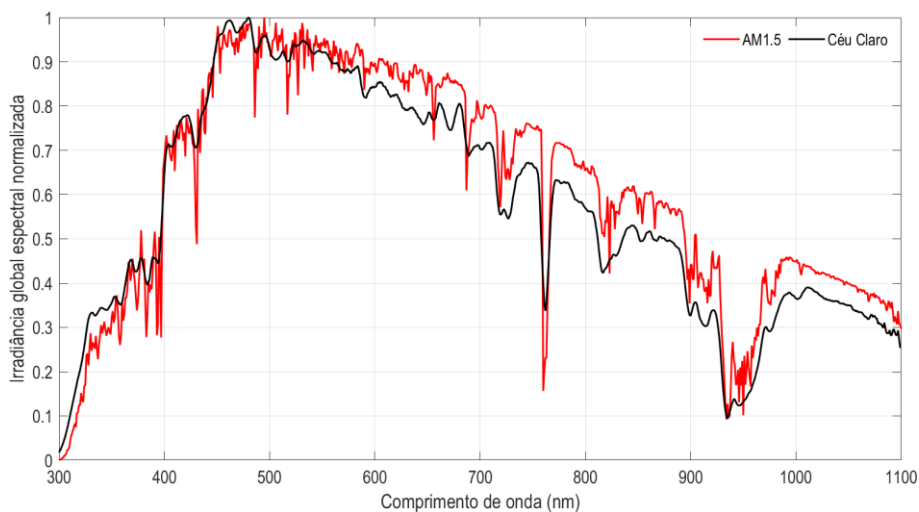


Figura 5 - Comparação da distribuição espectral da irradiância de céu claro com o espectro padrão AM 1.5.

Na Tab. 3 são apresentados cinco dias onde ocorreram eventos de sobreirradiância e foram observados nos dias 20 de fevereiro de 2022, 25 de março de 2022, 25 de outubro de 2022, 15 de novembro de 2022 e 18 de janeiro de 2023. São mostrados os valores de sobreirradiância medidos no plano horizontal. O maior valor registrado pelo piranômetros foi observado no dia 15 de novembro com 1482 W/m², enquanto que no espectrorradiômetro o valor registrado foi de 1368 W/m². Esses valores correspondem a mais de 8,4 % e 0,8 % acima da irradiância extraterrestre esperada e cerca de 28,3 e 22,2% a mais do que o máximo de céu claro esperado para Natal respectivamente.

Tabela 3 – Eventos de sobreirradiância medidos pelo espectrorradiômetro e pelo piranômetro.

Data	hora	GHI (W/m ²) – Espectrorradiômetro	GHI (W/m ²) – Piranômetro	Irradiância extraterrestre (W/m ²)	Irradiância de Céu Claro (W/m ²)
20/02/2022	11:37	1254	1454	1386	1044
25/03/2022	12:31	1283	1473	1298	984
25/10/2022	10:07	1249	1372	1309	1024
15/11/2022	11:07	1368	1482	1357	1062
18/01/2023	10:37	1299	1382	1345	1010

Nas Fig. 5 é ilustrada a comparação entre as faixas dos espectros medidos durante um evento de sobreirradiância em comparação ao espectro padrão AM 1.5 e em relação ao céu claro, respectivamente. Nela é possível observar que o espectro normalizado da localidade possui maiores intensidades na região de altas frequências, ou seja, a composição da irradiância possui maior intensidade para baixos comprimentos de onda. Já para altos comprimento de onda, região do infravermelho, o espectro de Natal apresenta intensidade inferiores ao do espectro padrão. Ao calcular o índice APE, ilustrada na Tab. 4, é comprovado esse fato, na qual pode-se observar que todos os espectros medidos na localidade apresentaram um índice APE maior que o calculado para o espectro padrão de 1.85 eV.

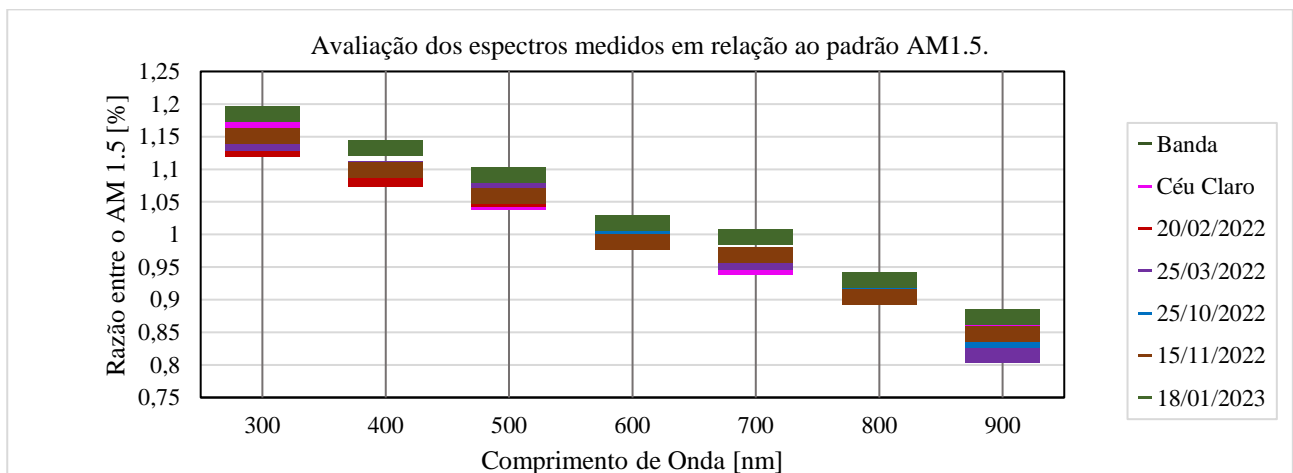


Figura 5 - Comparação entre as faixas dos espectros medidos com o espectro padrão AM1.5.

Tabela 4 - índice APE para os espectros dos eventos de sobreirradiância.

	AM 1.5	Céu Claro	20/02/2022	25/03/2022	25/10/2022	15/11/2022	18/01/2023
APE	1,850	1,899	1,894	1,900	1,901	1,900	1,911
Diferença em relação ao dia de céu claro	-0,049	0,000	-0,006	0,001	0,002	0,001	0,012

Na fig. 4, as distribuições espectrais correspondentes aos cinco dias mencionados são mostradas e as comparações entre o espectro solar referente a cada evento de sobreirradiância com o espectro de céu claro são observadas. Verifica-se que na banda UV (300 nm – 400 nm) o espectro do evento de sobreirradiância é maior que o espectro de céu claro. Entre 400 nm a 450 nm eles são semelhantes, e de 450 nm a 1100 nm, o espectro dos eventos de sobreirradiância é maior que o espectro de céu claro, exceto para as bandas de absorção de oxigênio (760 nm) e vapor de água (940 nm). Verifica-se também que a diferença entre o espectro dos eventos de sobreirradiância é mais pronunciado nas regiões do visível (VIS) e do infravermelho próximo (NIR) (500 nm até 1100nm). Resultados similares foram observados por Jara *et al.*, (2020) ao comparar o espectro de eventos de sobreirradiância com o espectro padrão e o espectro de céu claro.

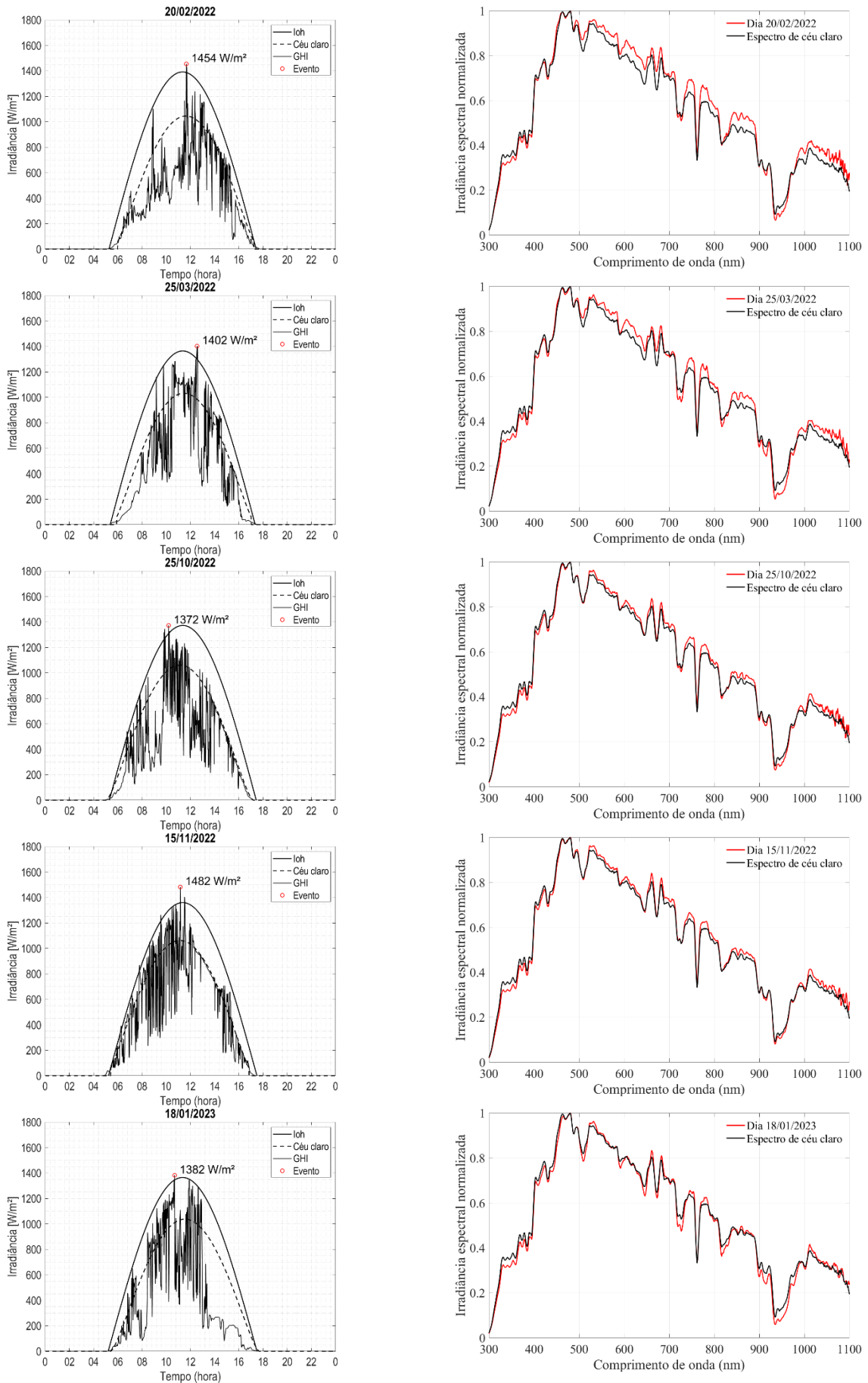


Figura 4 – Registros de ocorrência de sobreirradiação e distribuição espectral da irradiância durante os eventos de sobreirradiação comparada com a distribuição espectral da irradiância de céu claro nos dias 20/02/2022, 25/03/2022, 25/10/2022, 15/11/2022 e 18/01/2023 na cidade de Natal-RN.

4. CONCLUSÃO

Foi constatado que na cidade de Natal, o espectro da irradiância é rico em componentes na região azul, ou seja, um valor do índice APE alto, o que favorece as células com melhor absorção na região de altas frequências ou células com a resposta espectral limitada, como é o caso das células de silício amorfo, que possuem uma resposta espectral na faixa de 300 a 700 nm. Desta forma, foi avaliado que para esse tipo de célula fotovoltaica, a região estudada apresenta um impacto positivo, ou seja, os sistemas fotovoltaicos com células de silício amorfo apresentam um ganho de 10% em comparação com outras tecnologias de células como, a mono e poli cristalinas.

Também, foi possível avaliar que a prospecção do recurso solar utilizando apenas radiômetros exigidos pela EPEDEE-RE-065/2013 ocasiona diferenças da energia estimada e energia real produzida pelos sistemas fotovoltaicos, pois cada localidade possui um espectro solar distinto, que favorece certas tecnologias de módulos e outras não. Dessa forma, é importante avaliar a distribuição espectral de cada localidade na qual irá instalar um sistema fotovoltaico, principalmente na prospecção do recurso para grandes usinas, afim de escolher a tecnologia de módulo mais adaptada para a região.

Por fim verificou-se que as informações do espectrorradiômetro permitem uma análise detalhada de eventos de sobreirradiância em relação as bandas espectrais. Verificou-se que o espectro durante o evento é maior que o espectro de céu claro principalmente nas bandas UV (300 nm) a infravermelho próximo (1100 nm). Estudos adicionais estão sendo feitos para melhor compreender este fenômeno.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Instituto SENAI de Inovação em Energias Renováveis - ISI-ER pelo apoio no desenvolvimento deste trabalho, e à CTG Brasil pelo aporte financeiro atual no âmbito do projeto ANEEL PD-10381-0620/2022.

REFERÊNCIAS

- Almeida, Marcelo Pinho; Zilles, Roberto; Lorenzo, Eduardo. Extreme overirradiance events in São Paulo, Brazil. *Solar Energy*, v. 110, p. 168-173, 2014.
- ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), 2023. Matriz energética brasileira. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiNjc4OGYyYjQtYWM2ZC00YjllLWJlYmEtYzdkNTQ1MTc1NjM2IiwidCI6IjQwZD>
- Belusso, A.; Cainelli, G. P., 2015. Análise do Espectro de Radiação Solar e Sua Importância no Correto Dimensionamento de Tecnologias para Conversão Fotovoltaica de Energia.
- Braga, Marília; Do Nascimento, Lucas Rafael; Rüther, Ricardo. Spectral modeling and spectral impacts on the performance of mc-Si and new generation CdTe photovoltaics in warm and sunny climates. *Solar Energy*, v. 188, p. 976-988, 2019.
- Costa, Moisés Elias Nascimento Rufino da *et al.*, 2021. Análise Da Ocorrência De Eventos De Sobreirradiância Em Natal-Rn, Brasil. In: Congresso Brasileiro De Meteorologia, 10 p. 1-3.
- de Andrade, R. C., & Tiba, C. (2016). Extreme global solar irradiance due to cloud enhancement in northeastern Brazil. *Renewable energy*, 86, 1433-1441.
- De Sousa, Alan Rodrigues; De Oliveira Lira, André Luiz; Emiliavaca, Samira de Azevedo Santos. CONTRIBUIÇÕES NO ALGORITMO DE RASTREAMENTO DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA EM LOCAIS COM GRANDE VARIAÇÃO DE IRRADIÂNCIA. In: Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS. 2022. p. 1-8.
- do Nascimento, L.R., de Souza Viana, T., Campos, R.A., Rüther, R., 2019. Extreme solar overirradiance events: Occurrence and impacts on utility-scale photovoltaic power plants in Brazil. *Sol. Energy* 186, 370–381. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.05.008>
- Eke, R.; Betts, T. R. *et al.* Spectral irradiance effects on the outdoor performance of photovoltaic modules. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 69, p. 429–434, 2017.
- Galdino, Janis Joplim Bezerra *et al.*, 2022. Irradiância Espectral Em Petrolina-Brasil: Caracterização E Validação De Simulações. *Revista Brasileira de Energia Solar*, v. 13, n. 1, p. 20-29.
- Haag, R.; Krenzinger, A. Análise da influência de parâmetros atmosféricos e locais na distribuição espectral da radiação solar. *Revista Brasileira de Energia Solar*, v. 1, n. 1, 2010.
- Honsberg, C.; Bowden, S. Atmospheric Effects. *pveducation*, 2015. Disponível em: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/atmospheric-effects>. Acesso em: 06 abri. 2021.
- Zamalloa Jara, M.A., Berg, H., Conde, L.A., Sevillano-Bendezu, M.A., Carhuavilca, A.M., Grieseler, R., Tofflinger, J.A., 2021. Extreme Overirradiance events and their spectral distribution in Lima, Peru. *J. Phys. Conf. Ser.* 1841. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1841/1/012006>
- Luoma, Jennifer; Kleissl, Jan; Murray, Keenan., 2012. Optimal inverter sizing considering cloud enhancement. *Solar energy*, v. 86, n. 1, p. 421-429.

- Martins, G.L., Mantelli, S.L., Rütther, R., 2022. Evaluating the performance of radiometers for solar overirradiance events. *Sol. Energy* 231, 47–56. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.11.050>
- Nofuentes, G. *et al.* Analysis of the dependence of the spectral factor of some pv technologies on the solar spectrum distribution. *Applied energy*, Elsevier, v. 113, p. 302–309, 2014.
- Norton, M.; Amillo, A. G.; Galleano, R. Comparison of solar spectral irradiance measurements using the average photon energy parameter. *Solar Energy*, Elsevier, v. 120, p.337–344, 2015.
- Pereira, E. B. *et al.* Atlas brasileiro de energia solar. São José dos Campos: Inpe, v. 1, 2017.
- PiacentiniIA, Rubén D. *et al.*, 2021 Extreme total solar irradiance due to cloud enhancement at sea level of the NE Atlantic coast of Brazil. *Renewable Energy*, v. 36, n. 1, p. 409-412.
- Toreti Scarabelot, Letícia; Arns Rampinelli, Giuliano; Rambo, Carlos Renato. Overirradiance effect on the electrical performance of photovoltaic systems of different inverter sizing factors. *Solar Energy*, v. 225, p. 561-568, 2021.
- Sirisamphanwong, C.; Ketjoy, N., 2012. Impact of spectral irradiance distribution on the outdoor performance of photovoltaic system under thai climatic conditions. *Renewable Energy*, Elsevier, v. 38, n. 1, p. 69–74.

SOLAR RADIATION SPECTRUM ANALYSIS IN THE CITY OF NATAL-RN

Abstract. *This article presents the effect of the spectral distribution of solar radiation on the performance of three different photovoltaic cell technologies, amorphous silicon (a-Si), monocrystalline silicon (m-Si) and polycrystalline silicon (p-Si) for the climatic conditions of the city of Christmas. The measurements that were carried out at the Solar Energy Laboratory of the SENAI Institute for Innovation in Renewable Energies ISI-ER showed that in the period analyzed the spectrum of solar radiation presents more components in the blue region, that is, it presents a higher APE index value than the same index for the AM1.5G standard spectrum. This result shows that modules with the ability to absorb high-frequency spectrum components perform better locally. Furthermore, the spectral distribution of radiation during over-irradiance events is also analyzed and depending on atmospheric conditions, these events may have spectral characteristics shifted towards red or blue.*

Keywords: *Spectral radiation, Photovoltaic systems, Overirradiance.*