

MODELAGEM ESPECTRAL E AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS ESPECTRAIS NO DESEMPENHO DAS TECNOLOGIAS FOTOVOLTAICAS DE MC-SI E CDTE EM CLIMAS QUENTES E ENSOLARADOS

Marília Braga – mbraga.ufsc@gmail.com

Lucas Rafael do Nascimento – nascimento.ufsc@gmail.com

Ricardo Rüther – ricardo.ruther@ufsc.br

Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

Resumo. Este artigo apresenta uma análise dos impactos espectrais nas tecnologias mc-Si e CdTe em duas regiões distintas do Brasil: Florianópolis-SC (27   S, 48   W) no Sul e Assu-RN (5   S, 37   W) no Nordeste.   medida que usinas fotovoltaicas de grande porte estão sendo implantadas progressivamente no nordeste brasileiro, surge a necessidade de avalia  o dos efeitos dos espectros locais no desempenho de diferentes tecnologias fotovoltaicas. Considerando o alto custo de equipamentos de medi  o espectral adequados, este artigo propõe uma nova abordagem para a estimativa de impactos espectrais sem a necessidade de medi  es in loco. A metodologia proposta consiste no uso de dados de satélite adquiridos da plataforma Giovanni da NASA como entradas para o modelo de espectro SMARTS 2.9.5. Os resultados dos espectros medidos mostraram que, para os dois locais, a tecnologia de CdTe apresenta ganhos espectrais significativos: até 10% para Assu-RN (Nordeste) e 2% para Florianópolis-SC (Sul). Uma varia  o sazonal também pode ser observada para ambos os locais, com ganhos espectrais mais baixos para CdTe - e mais altos para mc-Si - próximos ao solstício de inverno do Hemisfério Sul, devido a valores mais elevados de massa de ar e menor teor de água precipitável na atmosfera. O método proposto usando dados de Giovanni e modelagem de espectros SMARTS produziu espectros muito semelhantes aos medidos para dias de céu limpo em ambos os locais, produzindo bons resultados para o cálculo de fatores espectrais para ambas as tecnologias avaliadas. Nos dias com maior fra  o difusa, os resultados não foram tão satisfatórios, de acordo com já era esperado.

Palavras-chave: Desempenho de Sistemas FV, Fatores Espectrais, Modelagem Espectral.

1. INTRODU  O

Impressionantes redu  es de preços dos módulos fotovoltaicos (FV) nos últimos anos (Kavlak et al., 2018) levaram ao aumento considerável de usinas fotovoltaicas de grande porte, especialmente em locais de climas quentes e ensolarados (Bolinger et al., 2015). Enquanto as tecnologias tradicionais de silício (c-Si, mono e multicristalino) dominam o cenário, com cerca de 97% do mercado mundial em 2018 (Mints, 2018), módulos FV de telureto de cádmio (CdTe) de grande área (2,5m²) e alta eficiência (18% na produ  o atual e perspectivas de 22%) (Bosio et al., 2018; NREL, 2018) foram recentemente introduzidos no mercado (First Solar, 2018). A tecnologia de CdTe apresenta alguns recursos interessantes para usinas fotovoltaicas de grande escala nos mesmos climas quentes e ensolarados em que estão sendo prometidos baixos preços para a energia solar. Enquanto para a tecnologia de silício multicristalino (mc-Si) os efeitos espectrais não desempenham um papel significativo, a resposta espectral mais estreita do CdTe é mais sensível ao conteúdo espectral da irradiância local (Tsuji et al., 2018). O menor coeficiente de temperatura e a resposta espectral mais azul fazem com que a tecnologia de CdTe apresente bons resultados em locais quentes, úmidos e de luz solar mais azul, condi  es predominantes nas regiões mais ensolaradas do mundo (Braga et al., 2019; Munshi et al., 2018).

Após irradiância, temperatura e sujeira, o conteúdo espectral da luz solar é uma das variáveis ambientais predominantes que afetam o desempenho dos dispositivos FV em campo, e a avalia  o das diferenças entre o espectro local e o padrão ASTM G173-03 - causadas principalmente por aerossóis, água precipitável e massa de ar - são uma questão não apenas de interesse científico, mas também de importância econ  mica.

Embora os efeitos da distribui  o espectral no desempenho de sistemas FV tenham sido extensivamente estudados, e haver evidências claras de sua importância nas previsões de energia e na análise de dados de sistemas FV (Dirnberger, 2015; Gottschalg et al., 2003; Lee et al., 2015; Nelson et al., 2013), ainda há uma limita  o muito grande na disponibilidade de dados espectrais históricos medidos, devido aos elevados custos de equipamentos e logística de coleta e processamento de dados da medi  o contínua do espectro solar.

Considerando a dificuldade de se obter dados espectrais medidos e históricos e a importância de levar em considera  o os efeitos espectrais nas previsões de energia de sistemas FV, este trabalho propõe uma metodologia que emprega dados atmosféricos de satélite combinados com massa de ar instantânea e média ponderada pela irradiância para gerar fatores espectrais instantâneos e médios, através do software SMARTS 2.9.5.

2. METODOLOGIA

2.1 Configuração experimental

Dados de medições espectrais contínuas utilizadas neste estudo foram obtidas na estação solarimétrica localizada no laboratório Fotovoltaica-UFSC (www.fotovoltaica.ufsc.br), na cidade de Florianópolis-SC, Brasil (27°S, 48°O). A estação solarimétrica é mostrada na Fig. 1 (a). As medições espectrais nesta estação são feitas usando um espectroradiômetro estacionário modelo EKO MS-711 (sensor número 8 na Fig. 1 (a)) com resolução de um minuto, e dentro da faixa de comprimento de onda de 300 a 1100 nm, conforme apresentado na Tab. 1. Os dados de irradiância para Florianópolis também foram adquiridos, usando um piranômetro Kipp & Zonen SMP22-V (sensor número 7 na Fig. 1 (a)), juntamente com a umidade relativa e a temperatura ambiente, que foram medidas usando um Vaisala HMP155A (sensor número 10b na Fig. 1 (a)). Medições espectrais pontuais também foram feitas em uma usina FV em Assu-RN, localizada no nordeste brasileiro (5°S, 37°O), utilizando um espectroradiômetro portátil EKO MS-720, como mostrado na Fig. 1 (b). Este dispositivo permite medições dentro da faixa de comprimento de onda de 350 a 1050 nm, conforme apresentado na Tab. 1.



Figura 1 - Estação solarimétrica localizada no laboratório de pesquisa Fotovoltaica-UFSC em Florianópolis-SC (27°S, 48°O), equipada com espectroradiômetro estacionário EKO MS-711 (a); e medições espectrais feitas com o espectroradiômetro portátil EKO MS-720 em Assu-RN (5°S, 37°O) (b).

Tabela 1 - Principais especificações dos espectroradiômetros utilizados na obtenção de dados espectrais para a análise.

CARACTERÍSTICA	MS-711	MS-720
Tipo	estacionário	portátil
Faixa de comprimento de onda	300 - 1100 nm	350 - 1050 nm
Resolução óptica FWHM	< 7 nm	< 10 nm
Precisão do comprimento de onda	+/- 0.2 nm	< 0.3 nm

2.2 Dados de satélite e de geometria solar

Para a aplicação do método proposto, os parâmetros ambientais foram obtidos a partir de dados publicamente disponíveis através da plataforma Giovanni, uma ferramenta que exibe dados dos satélites da NASA diretamente na internet (NASA, [s.d.]). O uso de dados de satélite para modelar o comportamento espectral e analisar os impactos espectrais em tecnologias FV foi proposto anteriormente por Haag (2012).

Os satélites utilizados neste estudo para a análise de longo prazo dos impactos espectrais em Florianópolis e os parâmetros e resoluções correspondentes obtidos de cada um deles podem ser encontrados na Tab. 2. Dados de água precipitável, AOD e ozônio foram baixados de setembro de 2017 a janeiro de 2018, para observar a variação dos parâmetros nesse período. A interpolação linear entre pontos de dados conhecidos foi usada para obter dados necessários para os dias em que eles estavam indisponíveis. Devido à falta de dados de dióxido de carbono para o período e o satélite selecionado, o período baixado para este parâmetro foi estendido e uma tendência mensal pode ser observada nos últimos sete anos; essa tendência foi usada para estimar os valores de CO₂ para o período avaliado. Deve-se notar que a água precipitável para este local variou de aproximadamente 0,5 cm a cerca de 2,2 cm no período avaliado. Os valores de AOD variaram de 0,07 a 0,43, e os valores de ozônio de 240 atm-cm a 380 atm-cm. Os valores de CO₂ aumentaram de 387 ppmv para 406 ppmv nos últimos sete anos, embora nenhuma mudança significativa tenha sido observada em janelas de curto período de tempo.

Para a localidade de Assu, foram obtidos dados de água precipitável para correlacionar o fator espectral calculado para medições no local com diferentes condições atmosféricas. As fontes utilizadas para obter dados para este site também são apresentadas na Tab. 2, juntamente com suas respectivas unidades, resoluções temporais e espaciais.

Tabela 2 - Fontes de dados da plataforma Giovanni da NASA utilizadas no estudo.

FONTE	MEDIDA	UNIDADE	RESOLUÇÃO TEMPORAL	RESOLUÇÃO ESPACIAL	LOCALIDADE
MODIS-Terra	profundidade óptica de aerossóis @ 550nm	-	diária	1°	Florianópolis
AIRS	fração molar de dióxido de carbono	ppmv	mensal	2° x 2.5°	Florianópolis
MODIS-Terra	vapor de água precipitável	cm	diária	1°	Florianópolis
OMI	coluna total de ozônio	DU	diária	0.25°	Florianópolis
MERRA-2	vapor de água precipitável	cm	horária	0.5° x 0.625°	Assu

Os dados relativos à massa de ar foram obtidos para as duas localidades utilizando a calculadora de posição solar (SOLPOS) do MIDC/NREL (NREL, [s.d.]). A calculadora SOLPOS calcula a posição e a intensidade solar a partir do horário e do local, de acordo com as entradas de latitude, longitude, fuso horário, pressão atmosférica e temperatura ambiente de bulbo seco, entre outras entradas opcionais. O usuário também deve inserir o período e a resolução temporal da saída e os parâmetros desejados a serem calculados. Os valores obtidos para a massa relativa de ar foram utilizados para modelagem de espectros no SMARTS.

2.3 Modelagem espectral

O SMARTS (*Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine*) é um código FORTRAN que visa modelar a distribuição espectral da irradiância solar em um determinado local e condições ambientais. O modelo permite que o usuário insira vários parâmetros, como massa de ar, água precipitável, AOD, entre muitos outros, para modelar as condições espectrais em um determinado local e tempo (Gueymard, 2006). O modelo SMARTS é frequentemente usado para modelar características espectrais, a fim de avaliar os impactos espectrais em um determinado sistema fotovoltaico (Haag e Krenzing, 2016; Stark e Theristis, 2015).

As entradas para o modelo SMARTS usadas no presente estudo para Florianópolis foram similares às do espectro padrão, porém, para água precipitável, coluna de ozônio, concentração de dióxido de carbono e AOD, foram utilizados dados de satélite de acordo com a Tab. 2. Como mencionado anteriormente, quando os dados estavam indisponíveis, foi feita uma interpolação ou extrapolação com os pontos de dados disponíveis para preencher lacunas.

2.4 Fator espectral

Existem vários índices para quantificar os efeitos de diferentes distribuições espectrais da luz solar nas tecnologias FV. Alguns desses índices caracterizam a distribuição espectral da própria luz, como a fração de azul (*Blue Fraction* - BF) e APE (energia média de fótons), enquanto outros visam relacionar uma determinada distribuição espectral com o espectro padrão e uma resposta espectral específica (fator espectral, fração útil, etc.) ou até correlacionar os impactos espectrais relativos entre dois dispositivos FV (fator de descasamento espectral) (Rodrigo et al., 2017).

O foco deste estudo é o fator espectral (*Spectral Factor* - SF), um coeficiente adimensional que quantifica as diferenças entre o espectro de referência ASTM G173-03 ($E_G^*(\lambda)$) e o espectro local ($E_G(\lambda)$), para uma resposta espectral FV específica ($SR(\lambda)$) (Rodrigo et al., 2017). Este índice foi escolhido porque quantifica os ganhos espectrais reais de uma tecnologia FV, independentemente do sensor de irradiância. A fórmula para o cálculo do fator espectral (SF) é mostrada na Eq. (1).

$$SF = \frac{\int E_G(\lambda)SR(\lambda)d\lambda}{\int E_G^*(\lambda)SR(\lambda)d\lambda} \cdot \frac{\int E_G^*(\lambda)d\lambda}{\int E_G(\lambda)d\lambda} \quad (1)$$

Visto que as variáveis mostradas da Eq. (1) são conjuntos de dados discretos com comprimentos de onda distintos, foi necessária uma interpolação entre pontos para ter todos os conjuntos de dados na mesma base de comprimentos de onda. A regra trapezoidal foi empregada no cálculo das integrais definidas.

Deve-se notar que, ao corrigir medições da curva IV ou outros parâmetros dependentes de irradiância, o fator de descasamento espectral (*Mismatch Factor* - MM) é um índice mais adequado, pois correlaciona a resposta espectral do sensor de referência e da tecnologia sendo avaliada, bem como o espectro de referência e medido (Rodrigo et al., 2017). Ao usar um sensor de irradiância de banda larga - como um piranômetro de termopilha - o fator de descasamento espectral (MM) é igual ao fator espectral (SF), considerando que a resposta espectral de tais sensores é uniforme em todos os comprimentos de onda. Devido aos custos mais altos dos sensores de irradiância de banda larga, eles raramente são usados para medições em campo, como medidas de curvas IV, sendo as células de referência de silício o tipo mais comum de sensor utilizado nessas situações.

As respostas espectrais utilizadas no cálculo do fator espectral são mostradas na Fig. 2 para mc-Si e CdTe em vermelho (curva mais larga, com desvio para o vermelho) e azul (curva mais estreita, com desvio para o azul), respectivamente. As respostas espectrais utilizadas neste estudo foram fornecidas por um fabricante de células de referência - para mc-Si - e um fabricante de módulos FV - para CdTe (First Solar, 2017).

Na Fig. 2, pode-se observar que a resposta espectral do mc-Si compreende comprimentos de onda de até 1200 nm, enquanto o CdTe tem uma resposta mais estreita, variando apenas entre 300 nm e 900 nm. A faixa de medição dos espectroradiômetros utilizados neste estudo vai até 1050 e 1100 nm, para o MS-720 e MS-711, respectivamente, abrangendo toda a faixa de resposta espectral do CdTe, mas apenas parte da resposta espectral do silício multicristalino, introduzindo incertezas na análise (Dirnberger et al., 2015).

A incerteza total associada ao cálculo do SF pode ser estimada usando a metodologia apresentada por Dirnberger e Reise (2015), onde foram encontradas incertezas que variam de 0,9% a 1,8%. Esta análise não será apresentada aqui, mas é importante entender as fontes de incerteza e que elas afetam o SF de maneira diferente para mc-Si e CdTe.

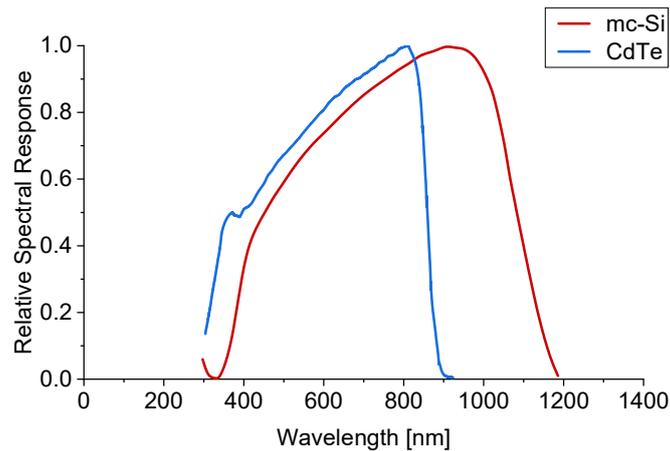


Figura 2 - Respostas espectrais para mc-Si (curva mais ampla, com desvio para o vermelho) e CdTe (curva mais estreita, com desvio para o azul).

2.5 Método proposto

O método proposto para estimar o fator espectral consiste em três etapas básicas:

1. Aquisição de valores de parâmetros ambientais para um local e hora específicos do banco de dados de satélites da NASA por meio da plataforma online Giovanni (NASA, [s.d.]);
2. Modelagem do espectro local usando o software SMARTS 2.9.5;
3. Cálculo do fator espectral (SF) para quantificar o impacto espectral do espectro modelado em uma tecnologia FV específica.

Este método permite o cálculo de impactos espectrais sem a necessidade de medições *in loco*. A partir dos espectros modelados pelo modelo SMARTS, o fator espectral é calculado para duas tecnologias fotovoltaicas: silício multicristalino (mc-Si) e telureto de cádmio (CdTe), usando as respostas espectrais mostradas na Fig. 2. Visto que a metodologia proposta envolve a modelagem de espectros, também pode ser aplicado no cálculo de outros índices espectrais, como o fator de descasamento (MM) e o APE (energia média de fótons).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Impactos espectrais para mc-Si e CdTe em duas regiões climáticas distintas do Brasil

Os impactos dos espectros medidos para duas regiões distintas do Brasil também foram calculados neste estudo usando a métrica de fator espectral apresentada anteriormente na Eq. (1). Os dados medidos foram obtidos conforme descrito na seção anterior. Florianópolis está localizada no litoral da região sul do Brasil e possui um clima subtropical quente e úmido (Cfa na classificação climática de Köppen-Geiger). Assu, por outro lado, está situado no nordeste do Brasil, a cerca de 60 km do litoral; seu clima é semiárido quente e seco (Bsh na classificação climática de Köppen-Geiger).

A Fig. 3 mostra os espectros medidos para Florianópolis (a) e Assu (b), juntamente com o espectro de referência ASTM G173-03 e o índice de fração azul (BF) calculado. Para comparar verdadeiramente as distribuições espectrais dos locais, os espectros foram normalizados para corresponder ao mesmo nível de irradiância que o espectro de referência para a faixa de comprimentos de onda medida. A fração de azul (BF) foi calculada conforme Rodrigo et al. (2017).

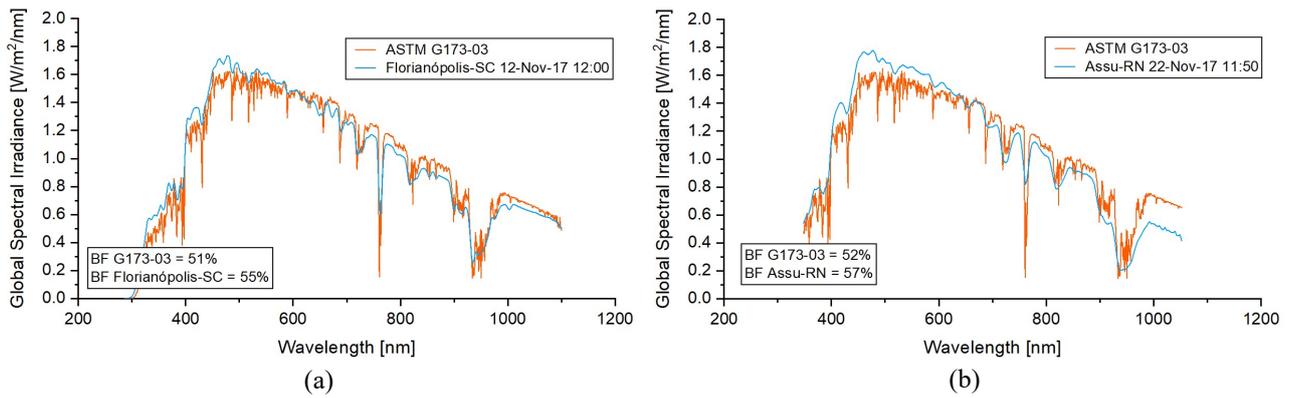


Figura 3 - Comparação entre o espectro de referência ASTM G173-03 e espectros medidos para Florianópolis-SC (27°S, 48°O) em 12 de novembro de 2017 às 12:00 (a) e para Assu-RN (5°S, 37°O) em 22 de novembro de 2017 (b). Espectros normalizados para corresponder à irradiância do espectro de referência nos comprimentos de onda medidos.

Por definição, a fração de azul do espectro G173-03 é de 52%, no entanto, apenas os comprimentos de onda dentro da faixa medida pelos espectrorradiômetros (ver Tab. 1) foram considerados para esta análise. A Fig. 3 mostra que ambos os locais apresentam espectros mais azuis do que a referência ASTM G173-03, o que significa que a tecnologia de CdTe tem uma vantagem espectral sobre mc-Si nessas regiões.

Os resultados do fator espectral para mc-Si e CdTe são mostrados na Fig. 4 (a) para Florianópolis. As medições espectrais para o cálculo desses SF foram realizadas em 28 de outubro de 2017 na estação solarimétrica do laboratório Fotovoltaica-UFSC, na base de um minuto e médias de 15 minutos foram utilizadas. Na Fig. 4 (b), os mesmos resultados são apresentados para 89 medições espectrais realizadas entre 21 de novembro e 15 de dezembro de 2017 em Assu. Os valores da massa de ar corrigidos para pressão também são mostrados para as duas localidades. Os valores de água precipitável (U_W) para Florianópolis foram estimados a partir das medições de umidade relativa e temperatura ambiente da estação solarimétrica mostrada na Fig. 1 (a) usando o método apresentado em First Solar ([s.d.]) e Gueymard (1994). Os valores de água precipitável para Assu foram obtidos na plataforma online Giovanni, usando o satélite MERRA-2 com dados de resolução horária (Tab. 2).

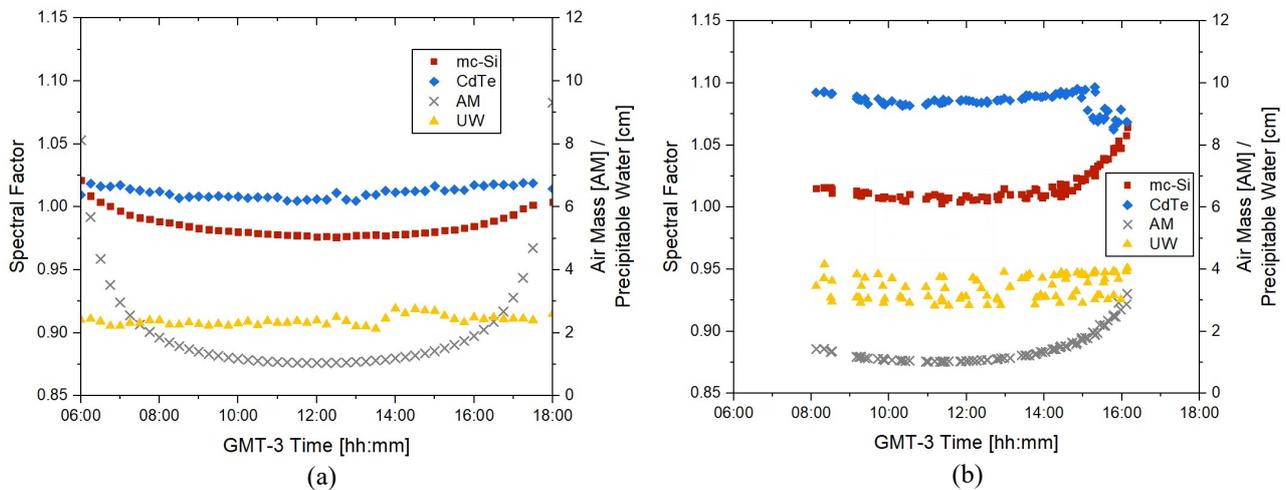


Figura 4 - Fator espectral para mc-Si (quadrados vermelhos) e CdTe (losangos azuis) calculados para um dia limpo (28 de outubro de 2017) em Florianópolis-SC (27°S, 48°O) (a) e para diversos dias limpos (novembro a dezembro de 2017) em Assu-RN (5°S, 37°O) (b), juntamente com valores de massa de ar (Xs cinza) e água precipitável (triângulos amarelos).

Essas análises permitem a observação de um padrão intradiário dos efeitos da distribuição espectral local no fator espectral para ambas as tecnologias FV. Além disso, os diversos valores de AM e teor de água precipitável ao longo dos dias analisados permitem a verificação de uma correlação entre a massa de ar e a água precipitável e o SF para mc-Si e CdTe.

Para Florianópolis (Fig. 4 (a)), é notável uma correlação entre SF e os valores da massa de ar para mc-Si, com essa tecnologia fotovoltaica atingindo valores de SF acima de 1 (representando ganhos) no início da manhã e no final da tarde (valores de massa de ar acima de 3) e valores de SF abaixo de 1 (representando perdas espectrais) durante a maior parte do dia. No geral, o SF para mc-Si variou de 0,98 a 1,00 em momentos com níveis de irradiância superiores a 200 W/m² no dia analisado e a média ponderada pela irradiância obtida para esta tecnologia foi de 0,98 (apenas medidas em que a

irradiância foi superior a 200 W/m^2 foram considerados). O teor médio de água precipitável para o dia analisado foi de 2,43 cm, bem acima dos 1,416 cm do espectro padrão. Em geral, os valores de SF para CdTe variaram de 1,00 a 1,02 em 28 de outubro de 2017 em Florianópolis, para os mesmos níveis de irradiância supracitados, e o SF médio filtrado e ponderado pela irradiância foi de 1,01.

As medições para Assu foram feitas em diferentes horários do dia, durante vários dias, e ordenadas de acordo com a hora local, para que uma tendência diária pudesse ser observada. Para água precipitável (triângulos amarelos), os valores variavam de dia para dia, e é por isso que há uma nuvem de pontos em vez de um conjunto de pontos contínuos de dados para essa variável. Para este local, pôde-se observar uma correlação mais forte entre a massa de ar e o SF para ambas as tecnologias. Para valores de massa de ar maiores que 2, há um aumento abrupto no SF para mc-Si e uma diminuição de aproximadamente 4% no SF para CdTe. Esses resultados corroboram resultados já publicados na literatura (Braga et al., 2019; Stark e Theristis, 2015) obtidos através dos espectros simulados a partir do ASTM G173-03 com vários valores de AM. Os valores de SF para mc-Si variaram de 1,00 a 1,06 durante o período avaliado, com média filtrada e ponderada por irradiância de 1,02. A média ponderada e filtrada por irradiância fica mais próxima de valores mínimos de SF para o mc-Si porque seus valores mais altos ocorreram durante o final do dia, quando há valores elevados de massa de ar, mas baixa irradiância. Para o CdTe, o SF variou de 1,06 a 1,10, com uma média ponderada pela irradiância de 1,09, mostrando que essa tecnologia possui grandes vantagens espectrais nessa região. Os altos valores de SF podem estar associados à pequena massa de ar média encontrada em regiões de baixa latitude e ao maior conteúdo de água precipitável da região, que teve média de 3,42 cm no período avaliado, quase 1 cm a mais que o valor médio do dia analisado em Florianópolis, que era 2,43 cm. É importante destacar que as duas regiões ainda apresentaram valores de água precipitáveis mais altos que o espectro padrão ASTM G173-03 (1.416 cm), tornando os espectros nessas regiões muito favoráveis à tecnologia de CdTe.

Também foi feita uma análise anual para Florianópolis com dados de 21 de outubro de 2017 a 30 de setembro de 2018. Os fatores espectrais foram calculados para cada dia individualmente no período analisado, a partir dos espectros medidos médios diários, filtrados e ponderados pela irradiância. Apenas os dias com mais de 500 minutos de dados válidos foram contabilizados. Os resultados diários para mc-Si e CdTe são mostrados na Fig. 5 como quadrados vermelhos e losangos azuis, respectivamente. A massa de ar filtrada e ponderada pela irradiância e a água precipitável também são mostradas como Xs cinzas e triângulos amarelos, respectivamente.

Na Fig. 5, uma variação sazonal pode ser observada para mc-Si, com o SF desta tecnologia apresentando valores mais elevados em torno do solstício de inverno do Hemisfério Sul (21 de junho), o que pode ser explicado pelo menor ângulo de altitude da trajetória do Sol nesta época e menor teor de água precipitável nos meses de inverno, resultando em espectros mais vermelhos. O oposto pode ser observado para CdTe na Fig. 5, que apresentou fatores espectrais mais baixos para os meses de inverno, devido ao fato dessa tecnologia ter uma resposta espectral mais azul.

O SF anual ponderado pela irradiação para mc-Si foi de 0,97, e 1,02 para CdTe, mostrando que o este último possui vantagem espectral sobre o primeiro na região. Os valores máximos de SF no período analisado foram de 0,99 e 1,03 para mc-Si e CdTe, respectivamente, enquanto os valores mínimos foram 0,94 e 1,00. A massa de ar média diária foi de 1,51, e variou entre 1,05 e 2,12. O teor de água precipitável médio diário foi de 3,42 cm, variando de 1,36 cm a 4,86 cm.

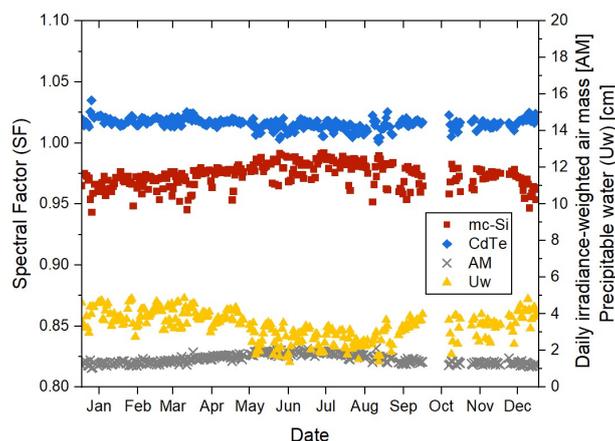


Figura 5 - Resultados diários de SF para mc-Si (quadrados vermelhos) e CdTe (losangos azuis) para Florianópolis-SC (27°S, 48°O). Também são exibidas a massa de ar (Xs cinza) e água precipitável (triângulos amarelos).

3.2 Método Giovanni+SMARTS

Uma aplicação importante da correção espectral é na análise de dados de sistemas FV, como estimar impactos espectrais na avaliação de PR (*Performance Ratio*) ou construir um perfil local de impactos espectrais para estimar ganhos/perdas ao prever o rendimento energético através da simulação de futuros sistemas FV.

No caso de cálculos diários de impacto espectral em sistemas FV utilizando o método proposto, um valor representativo de SF para o dia deve ser estimado. A primeira abordagem para encontrar esse valor representativo foi calcular valores individuais de SF por vários momentos de um dia de céu limpo e, em seguida, filtrar e calcular a média

desses valores usando uma média ponderada por irradiância. Para aplicar esse método, as medições espectrais realizadas com uma resolução de um minuto foram transformadas em médias de 15 minutos para um dia de céu limpo (28 de outubro de 2017) em Florianópolis (espectros mostrados na Fig. 6 (a)) e filtradas para irradiâncias abaixo de 200 W/m^2 (perfil de irradiância mostrado na Fig. 6 (b)). Consecutivamente, para cada medição espectral, foi calculado um SF para mc-Si e um para CdTe. A partir desses valores, foram obtidos dois SF médios ponderados pela irradiância, um para cada uma das tecnologias FV avaliadas. Esses resultados foram comparados aos obtidos no primeiro cálculo de um espectro médio ponderado por irradiância para o dia - também aplicando um filtro de 200 W/m^2 - e depois calculando os SFs para mc-Si e CdTe. Para ambas as tecnologias, o SF médio ponderado pela irradiância e o calculado pelo espectro médio ponderado pela irradiância foram idênticos, mostrando que ambas as abordagens alcançaram os mesmos resultados, o que significa que um espectro ponderado por irradiância pode ser usado para calcular um fator espectral representativo para um dia de céu limpo.

Considerando que os bancos de dados de satélite usados têm resolução diária, o único parâmetro variável ao longo do dia seria a massa de ar. Sendo assim, o espectro representativo do dia foi obtido através do cálculo da massa de ar média ponderada pela irradiância e uso deste valor como entrada para o SMARTS, juntamente com os parâmetros ambientais obtidos pela plataforma Giovanni. Nesta abordagem, os valores de massa de ar para irradiâncias inferiores a 200 W/m^2 foram filtrados para evitar problemas causados por grandes valores de massa de ar presentes no início e no final do dia. A Fig. 6 (a) apresenta o perfil de irradiância horizontal global (linha laranja) e massa de ar (Xs cinza) para um dia limpo em Florianópolis (28 de outubro de 2017), bem como a AM calculada filtrada e ponderada por irradiância de 1,39 (linha tracejada cinza). Para este dia específico, as irradiâncias abaixo de 200 W/m^2 representaram apenas 2,5% de toda a irradiação medida.

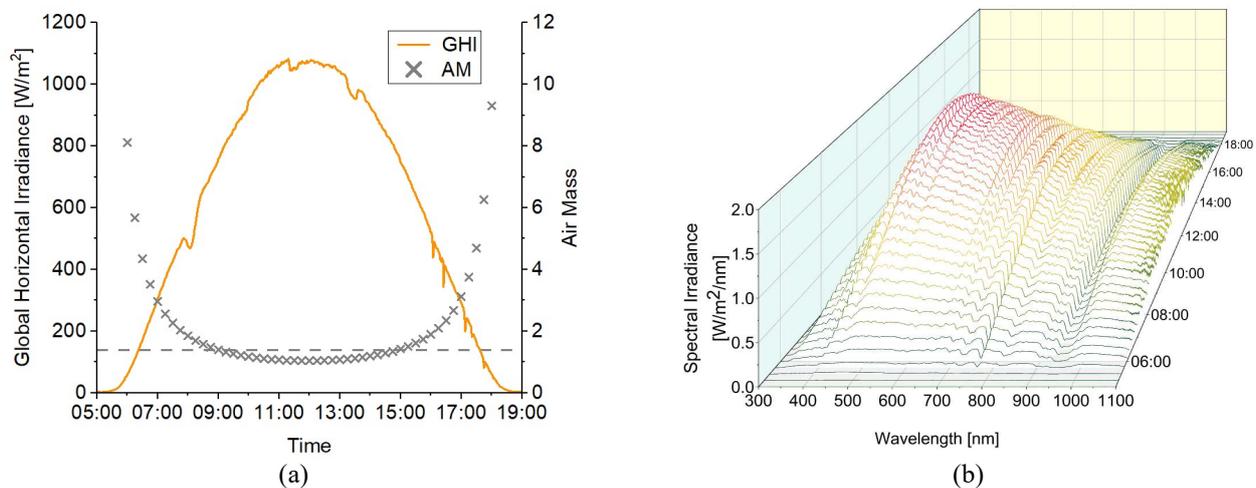


Figura 6 - Irradiância horizontal global medida (linha laranja), massa de ar correspondente (Xs cinza) e massa de ar média ponderada pela irradiância (linha tracejada cinza) (a) e distribuição espectral solar (b) para um dia limpo (28 de outubro de 2017) em Florianópolis-SC (27°S , 48°O).

Essa abordagem para encontrar o espectro representativo diário foi aplicada a 28 dias não consecutivos com frações de difusa variando de 10% a 95% para Florianópolis, entre 23 de outubro e 4 de dezembro de 2017. A Fig. 7 mostra a comparação entre espectros modelados e medidos para alguns dos dias analisados: (a) fração de difusa de 10%, AM média ponderada pela irradiância de 1,3; (b) 25%, AM 1,2; (c) 38%, AM 1,2; (d) 62%, AM 1,4; (e) 71%, AM 1,2; e (f) 91%, AM 1.2. Pode-se ver facilmente que os espectros modelados correspondem melhor aos espectros medidos para dias de baixa fração de difusa, o que era esperado, considerando que o SMARTS é um modelo para céu limpo.

O fator espectral foi então calculado a partir de espectros modelados para os dias acima mencionados. Estes resultados foram comparados com os obtidos a partir de espectros medidos. A Fig. 8 mostra, para mc-Si (a) e CdTe (b), o SF calculado a partir de dados medidos (quadrados vermelhos sólidos para mc-Si e losangos azuis sólidos para CdTe) e modelados (quadrados vermelhos vazados para mc-Si e losangos azuis vazados para CdTe), bem como o desvio absoluto entre SF calculado a partir de espectros modelados e medidos (linha vermelha sólida para mc-Si e linha azul sólida para CdTe). Também é apresentada uma linha de ajuste linear (linha vermelha pontilhada para mc-Si e linha azul pontilhada para CdTe), para que seja observada uma tendência para o desvio entre os espectros modelados e medidos. Os resultados são mostrados em função da fração de difusa diária.

Para mc-Si, o desvio entre SF calculado a partir de espectros modelados e medidos aumenta para dias com maior fração de difusa. Esse resultado era esperado, considerando que o SMARTS é um modelo para céu limpo e não pode modelar efetivamente espectros para dias com maior nebulosidade. A partir da Fig. 7, pode-se observar que os dias com maior fração difusa foram superestimados pelo modelo, principalmente na faixa de 400 a 800 nm, resultando em maiores desvios para o mc-Si. Para CdTe, o método proposto apresentou resultados ligeiramente melhores para frações difusas mais altas do que para dias claros. Isso pode ser devido ao fato de que a fração difusa não tem grande impacto na

modelagem da distribuição espectral para comprimentos de onda que têm maior impacto na resposta espectral dessa tecnologia FV, portanto, a fração de difusa teve pouca influência nos resultados para CdTe.

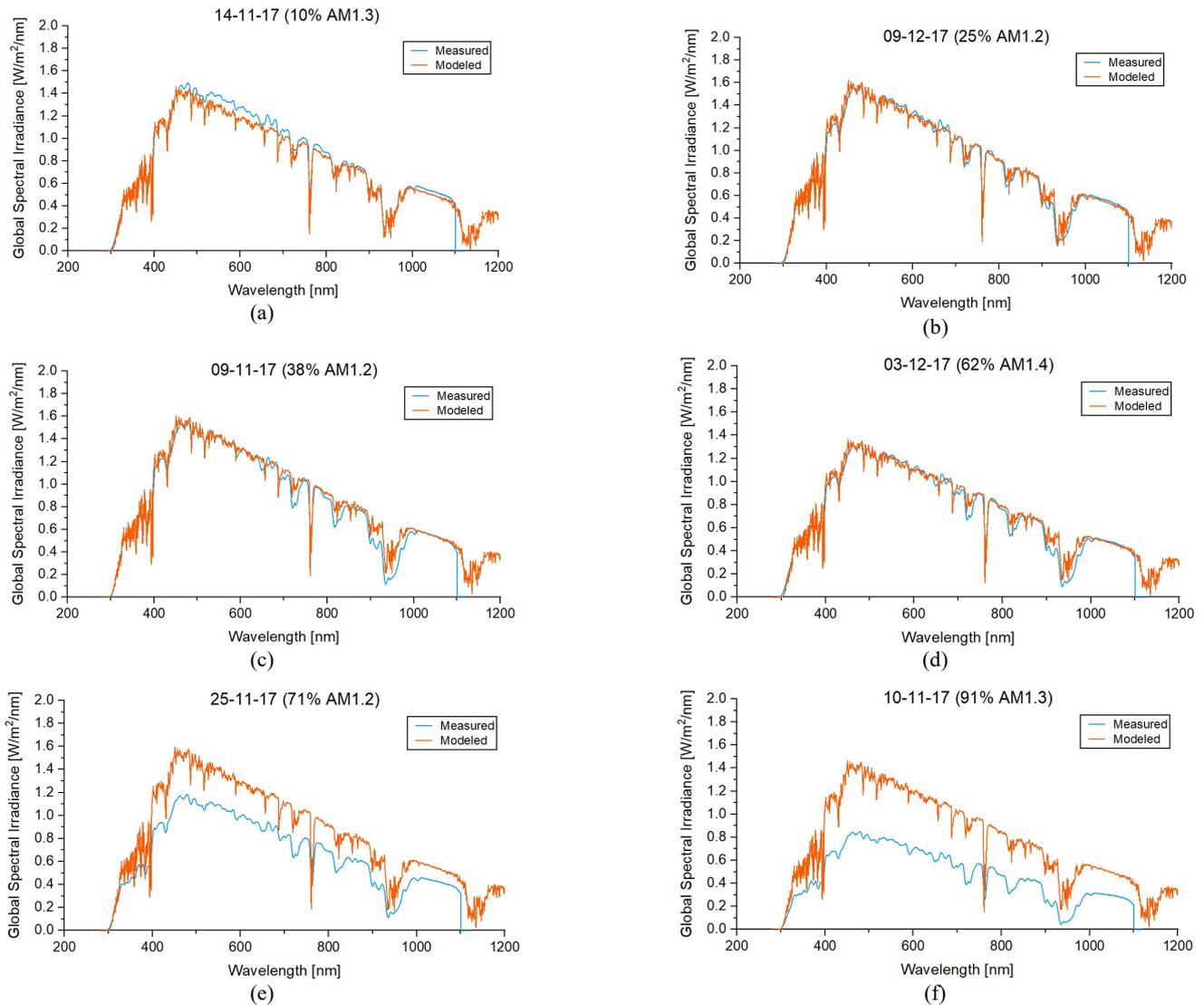


Figura 7 - Comparação entre espectro modelado (curva laranja) e medido (curva azul) para várias frações de difusa em Florianópolis-SC (27°S, 48°O).

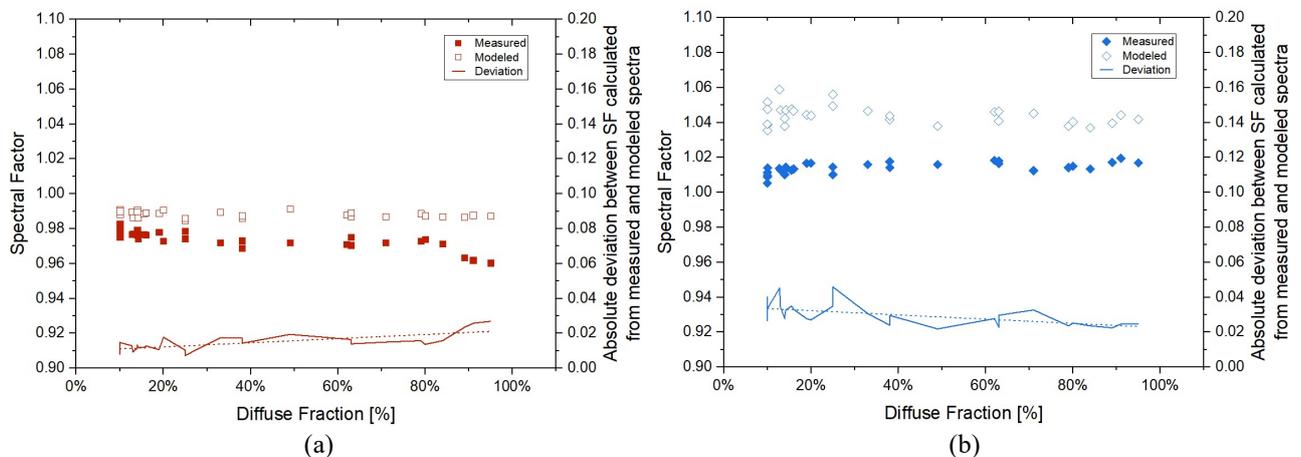


Figura 8 - Desvio absoluto entre SF calculado a partir de espectros medidos e a partir de espectros modelados conforme a metodologia proposta para Florianópolis-SC (27°S, 48°O) para mc-Si (a) e CdTe (b) em função da fração de difusa para os dias analisados (linhas sólidas). SF medido é mostrado em símbolos sólidos, resultados modelados são mostrados em símbolos vazados. Linhas pontilhadas representam o ajuste linear dos valores de desvio absoluto.

4. CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo avaliar alternativas para o cálculo do fator espectral para análise de desempenho e simulação de sistemas FV. Os impactos espectrais devem ser levados em consideração na análise dos dados e previsão de desempenho de sistemas FV, sobretudo para usinas FV de grande escala que participam de leilões de energia.

Os impactos espectrais medidos de duas localidades com climas distintos no Brasil (Florianópolis, no sul e Assu, no nordeste) foram avaliados para mc-Si e CdTe. Foi demonstrado que os dois locais apresentam grandes vantagens espectrais para a tecnologia de CdTe, com ganhos espectrais de até 2% para níveis de irradiância acima de 200 W/m² para Florianópolis e impressionantes 10% para Assu. Os ganhos espectrais para CdTe nesses locais podem ser atribuídos à pequena massa de ar óptica encontrada em regiões de baixa latitude e ao alto conteúdo de água precipitável presente na atmosfera, quando comparado ao espectro de referência (2,43 cm para Florianópolis e 3,42 cm para Assu, em comparação a 1.416 cm de ASTM G173-03). O SF filtrado e ponderado pela irradiância para a tecnologia de CdTe calculado para Assu durante o período avaliado (entre 21 de novembro e 15 de dezembro de 2017) foi de 1,09 e 1,01 para Florianópolis em 28 de outubro de 2017 (valores de SF para irradiâncias inferiores a 200 W/m² foram desconsiderados).

O silício multicristalino apresentou fatores espectrais que variaram de 0,98 a 1,00 para níveis de irradiância acima de 200 W/m² para Florianópolis, atingindo valores de SF acima de 1 (representando ganhos) apenas no início da manhã e no final da tarde (valores de massa de ar acima de 3, significando espectros mais vermelhos), e a média ponderada e filtrada pela irradiância obtida para essa tecnologia foi de 0,98. O SF mais baixo para mc-Si pode ser atribuído à distribuição espectral com desvio azul da região, causada pelo alto conteúdo de água precipitável e baixos valores de massa de ar. Para Assu, pode-se observar uma forte correlação entre massa de ar e SF para ambas as tecnologias. Para valores de massa de ar maiores que 2, há um aumento abrupto no SF para mc-Si, corroborando com resultados já publicados na literatura (Braga et al., 2019; Stark e Theristis, 2015). Os valores de SF para mc-Si variaram de 1,00 a 1,06 durante o período avaliado, com média filtrada e ponderada pela irradiância de 1,02.

Uma avaliação anual do site de Florianópolis compreendendo quase um ano completo de dados de resolução de um minuto entre 21 de outubro de 2017 e 30 de setembro de 2018 mostrou uma variação sazonal do SF para mc-Si e CdTe. Para mc-Si, os valores de SF aumentaram em torno do solstício de inverno (21 de junho), devido ao baixo ângulo de elevação da trajetória do Sol durante esse período, resultando em valores mais altos de AM e, portanto, em espectros mais vermelhos, resultando em vantagens espectrais para tecnologias FV à base de silício. Para CdTe, aconteceu o contrário, visto que essa tecnologia possui uma resposta espectral com desvio azul, causada por seu maior valor de *band gap* (1,5 eV versus 1,1 eV para silício). O menor teor de água precipitável durante os meses de inverno também é responsável por essas variações sazonais. O teor de água precipitável anual ponderado pela irradiância no período analisado foi de 3,42 cm, mais do que o dobro do valor usado para o espectro de referência ASTM G173-03 (1.416 cm), resultando em uma distribuição espectral muito mais azul para o local. O SF anual ponderado pela irradiância para mc-Si foi de 0,97 e 1,02 para CdTe, mostrando que este último tem uma vantagem espectral sobre o primeiro na região.

No geral, o método proposto usando dados de satélite da plataforma Giovanni da NASA, juntamente com a massa de ar e o modelo SMARTS, produziu bons resultados para avaliação de impacto espectral. Trabalhos adicionais devem ser realizados para simplificar o processo de computação e automatizar os cálculos, possibilitando que o método seja aplicado a um conjunto maior de dados. Uma comparação entre a metodologia proposta e os métodos diretos propostos anteriormente na literatura para a estimativa de impactos espectrais deve ser realizada nos próximos estudos. Além disso, é importante destacar que uma análise quantitativa da incerteza é recomendada para melhor avaliar os resultados obtidos através da metodologia proposta.

Agradecimentos

Os autores agradecem à ENGIE Brasil Energia pelo acesso ao site de Assu, bem como à Agência Nacional de Regulamentação Elétrica ANEEL, que possibilitou, por meio de seu programa de concessão de P&D, a aquisição de equipamentos essenciais para este estudo.

REFERÊNCIAS

- Bolinger, M., Weaver, S., Zuboy, J., 2015. Is \$50/MWh solar for real? Falling project prices and rising capacity factors drive utility-scale PV toward economic competitiveness. *Prog. Photovoltaics Res. Appl.* 23, 1847–1856. <https://doi.org/10.1002/pip.2630>
- Bosio, A., Rosa, G., Romeo, N., 2018. Past, present and future of the thin film CdTe/CdS solar cells. *Sol. Energy* 175, 31–43. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.01.018>
- Braga, M., do Nascimento, L.R., Rüther, R., 2019. Spectral modeling and spectral impacts on the performance of mc-Si and new generation CdTe photovoltaics in warm and sunny climates. *Sol. Energy* 188, 976–988. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.06.073>
- Dirnberger, D., 2015. Uncertainties in Energy Rating for Thin-film PV Modules. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3020.1687>
- Dirnberger, D., Müller, B., Reise, C., 2015. On the uncertainty of energetic impact on the yield of different PV

- technologies due to varying spectral irradiance. Sol. Energy. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.10.033>
- Dirnberger, D., Reise, C., 2015. On the uncertainty of energetic impact on the yield of different PV technologies due to varying spectral irradiance. Sol. Energy 111, 82–96. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.10.033>
- First Solar, 2018. First Solar Series 6TM Thin Film Modules - Next Generation Solar Energy.
- First Solar, 2017. PD-5-445 Rev 1.0: Module Characterization - Spectral Response of FS Series PV Modules.
- First Solar, [s.d.]. PlantPredict [WWW Document]. URL <https://plantpredict.com/algorithm/optical-losses/#precipitable-water-method> (acessado 11.13.18).
- Gottschalg, R., Infield, D.G., Kearney, M.J., 2003. Experimental study of variations of the solar spectrum of relevance to thin film solar cells. Sol. Energy Mater. Sol. Cells 79, 527–537. [https://doi.org/10.1016/S0927-0248\(03\)00106-5](https://doi.org/10.1016/S0927-0248(03)00106-5)
- Gueymard, C., 2006. SMARTS code (version 2.9.5). User's manual 50.
- Gueymard, C., 1994. Analysis of monthly average atmospheric precipitable water and turbidity in Canada and Northern United States. Sol. Energy 53, 57–71. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(94\)90606-8](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(94)90606-8)
- Haag, R., 2012. Estimativa da distribuição espectral da radiação solar sobre o território brasileiro através de análise multiinstrumental.
- Haag, R., Krenzinger, A., 2016. Espectro solar característico para a região do semiárido brasileiro, in: VI Congresso Brasileiro de Energia Solar.
- Kavlak, G., McNerney, J., Trancik, J.E., 2018. Evaluating the causes of cost reduction in photovoltaic modules. Energy Policy 123, 700–710. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.08.015>
- Lee, M., Ngan, L., Hayes, W., Panchula, A.F., 2015. Comparison of the effects of spectrum on cadmium telluride and monocrystalline silicon photovoltaic module performance, in: 42nd Photovoltaic Specialist Conference. IEEE, p. 1–4. <https://doi.org/10.1109/PVSC.2015.7356174>
- Mints, P., 2018. SPV Market Solar Flare Report 2018 - Issue 3.
- Munshi, A.H., Sasidharan, N., Pinkayan, S., Barth, K.L., Sampath, W.S., Ongsakul, W., 2018. Thin-film CdTe photovoltaics – The technology for utility scale sustainable energy generation. Sol. Energy 173, 511–516. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.07.090>
- NASA, [s.d.]. NASA Giovanni [WWW Document]. URL <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>
- Nelson, L., Frichtl, M., Panchula, A., 2013. Changes in cadmium telluride photovoltaic system performance due to spectrum. IEEE J. Photovoltaics 3, 488–493. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2012.2226868>
- NREL, 2018. Best Research-Cell Efficiencies [WWW Document]. URL <https://www.nrel.gov/pv/assets/pdfs/pv-efficiencies-07-17-2018.pdf> (acessado 12.5.18).
- NREL, [s.d.]. MIDC SOLPOS Calculator [WWW Document]. URL <https://midcdmz.nrel.gov/solpos/solpos.html> (acessado 11.19.18).
- Rodrigo, P.M., Fernández, E.F., Almonacid, F.M., Pérez-Higueras, P.J., 2017. Quantification of the spectral coupling of atmosphere and photovoltaic system performance: Indexes, methods and impact on energy harvesting. Sol. Energy Mater. Sol. Cells 163, 73–90. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2017.01.018>
- Stark, C., Theristis, M., 2015. The impact of atmospheric parameters on the spectral performance of multiple photovoltaic technologies. 2015 IEEE 42nd Photovolt. Spec. Conf. PVSC 2015. <https://doi.org/10.1109/PVSC.2015.7355836>
- Tsuji, M., Rahman, M.M., Hishikawa, Y., Nishioka, K., Minemoto, T., 2018. Uniqueness verification of solar spectrum obtained from three sites in Japan based on similar index of average photon energy. Sol. Energy 173, 89–96. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.07.039>

SPECTRAL MODELING AND SPECTRAL IMPACTS ON THE PERFORMANCE OF MC-SI AND CDTE PHOTOVOLTAICS IN WARM AND SUNNY CLIMATES

Abstract. *This paper presents an analysis of spectral impacts on mc-Si and new generation CdTe in two distinct regions of Brazil: Florianópolis-SC (27°S, 48°W) in the South, and Assu-RN (5°S, 37°W) in the Northeast. As utility-scale PV power plants are progressively being deployed in the Brazilian Northeast, the need for evaluation of the spectral effects of local blue-biased spectra on the energy yield of different PV technologies arises. Considering the high cost of adequate spectral measurement equipment, this paper proposes a new approach for the estimation of spectral impacts without the need for in loco measurements. The proposed methodology consists of the use of satellite data acquired from NASA's Giovanni platform as inputs for the SMARTS 2.9.5 spectra model. Results for measured spectra showed that, for both locations, CdTe has significant spectral gains: up to 10% for Assu-RN (Northeastern Brazil) and 2% for Florianópolis-SC (Southern Brazil). A seasonal variation could also be detected for both technologies, with lower spectral gains for CdTe - and higher for mc-Si - close to the Southern Hemisphere's winter solstice, due to higher air mass values and lower precipitable water content of the atmosphere. The proposed method using Giovanni data and SMARTS spectra modeling produced very similar spectra to those measured for clear days in the field at both sites, yielding good results for the calculation of spectral factors for both mc-Si and CdTe. For days with a higher diffuse fraction the results were not as satisfactory, as expected.*

Keywords: *PV Performance, Spectral Factor, Spectral Modeling.*