

# INFLUÊNCIA DO ESPECTRO SOLAR EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS SOB CÉU LIMPO, CÉU PARCIALMENTE NUBLADO E CÉU NUBLADO

**Guilherme Neves** – guilherme.neves@inpe.br

**Waldeir Vilela** – waldeir.vilela@inpe.br

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Laboratório Associado de Sensores e Materiais

**Enio Pereira** – enio.pereira@inpe.br

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Centro de Ciências do Sistema Terrestre

**Luiz Angelo Berni** – luiz.berni@inpe.br

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Laboratório Associado de Sensores e Materiais

**Resumo.** Os módulos fotovoltaicos são avaliados de acordo com as condições padrões de teste (cuja irradiância deve ser de  $1000 \text{ W/m}^2$ , a temperatura do módulo de  $25^\circ\text{C}$  e o espectro da radiação deve ser o descrito pelas normas IEC, ASTM ou ABNT). Porém tais condições raramente ocorrem em campo ao mesmo tempo, de modo que os parâmetros de engenharia obtidos em laboratório dificilmente acontecerão durante o funcionamento dos módulos fotovoltaicos. Levando em consideração que os efeitos causados pelas variações espectrais ainda não são muito bem compreendidas e com o intuito de compreender melhor a influência que tais variações ocasionadas pelos diferentes tipos de cobertura de céu podem causar nos módulos fotovoltaicos de silício amorfo (a-Si) e monocristalino (m-Si), foi realizado um estudo em campo descrito neste trabalho. Para tanto, dois sistemas de coletas de dados foram instalados no campus do INPE em Cachoeira Paulista – SP: um para coleta dos espectros da radiação solar e outro para monitoramento dos módulos fotovoltaicos. Dos dados gerados por estes sistemas, somente os coletados às 12:00 horas entre os meses de agosto de 2015 e janeiro de 2016 foram utilizados neste trabalho, tendo sido eles classificados em dados de céu limpo, parcialmente nublado ou nublado de acordo com o índice de limpidez calculado com dados fornecidos pela rede SONDA. De acordo com os resultados das análises dos dados, dias nublados apresentam espectros com maiores valores de energia média dos fótons e melhor aproveitamento pelos módulos de a-Si e m-Si quando comparados com o espectros descritos nas normas. Também foi possível observar que o módulo de m-Si sofreu menor influência das variações espectrais do que o módulo de a-Si devido ao efeito chamado de “efeito de compensação”.

**Palavras-chave:** Espectro Solar, Energia Solar, Módulos Fotovoltaicos

## 1. INTRODUÇÃO

Para que possam ser comercializados e utilizados, os módulos fotovoltaicos são avaliados sob condições padrões de teste conhecidas como STC (do inglês *Standard Test Conditions*), onde seus parâmetros de engenharia são medidos sob uma irradiância de  $1000 \text{ W/m}^2$ , temperatura de célula fotovoltaica de  $25^\circ\text{C}$  e espectro da radiação solar global sob condição de Massa Ar 1,5 (chamado de espectro AM 1.5 G) de acordo com o padrão IEC 60904-3, ASTM G173-03 ou ABNT NBR 10899. Apesar de padronizar o método de medição e permitir que resultados obtidos em diferentes laboratórios para quaisquer tecnologias possam ser comparados, as condições do STC não são representativas para as que ocorrem em campo. Por exemplo, Minemoto, Nagae e Takamura (2007), dentre outras coisas, mostrou em seu trabalho que, em um intervalo de coleta de dados ambientais em campo entre agosto de 2003 e julho de 2006 na cidade japonesa de Kusatsu, somente 0,8890% de todas as condições satisfizeram simultaneamente às condições de irradiância, espectro da radiação solar e temperatura de célula especificadas nas STC.

Em campo os parâmetros como irradiância, ângulo de incidência, espectro ou temperatura variam ao longo do tempo devido à vários processos físicos que ocorrem entre a radiação solar, os módulos fotovoltaicos e a atmosfera. Por isso os parâmetros que influenciam na geração de energia nos módulos fotovoltaicos acabam sendo muito diferentes dos adotados pelo STC. Assim, devido à estas diferenças, é de se esperar que a avaliação de eficiência conduzida em laboratório sob as condições propostas pelo STC dificilmente ocorrerão em campo (Ishii *et al.*, 2013; Dirnberger *et al.*, 2015; Neves, 2016).

A fim de compreender melhor o funcionamento dos módulos fotovoltaicos fora das condições padrão, vários estudos foram e continuam sendo realizados em vários países, focando principalmente compreender melhor os efeitos de vários parâmetros atmosféricos no funcionamento dos módulos fotovoltaicos em campo. Como explicado no trabalho de Dirnberger *et al.* (2015), muitos destes estudos colaboraram para que a influência causada pela variação da irradiância e da temperatura no desempenho dos módulos se tornasse bem conhecidas. Já as influências causadas pelas variações espectrais da radiação solar ainda carecem de mais estudos, apesar dos vários trabalhos já conduzidos nesta área. No trabalho de Ishii *et al.* (2013), por exemplo, estudou-se os efeitos causados pelos espectros da radiação solar sob as condições de céu limpo e céu nublado em módulos fotovoltaicos baseados no silício (policristalino, amorfo e de dupla junção a-Si:H/ $\mu\text{c-Si:H}$ ) e baseado na tecnologia CIGS em nove cidades japonesas. De acordo com os resultados

encontrados, todos módulos apresentaram melhores aproveitamentos do espectro da radiação solar sob céu nublado, sendo que o módulo de silício amorfo e o a-Si:H/ $\mu$ c-Si:H se mostraram mais influenciáveis pelas variações de espectro sob céu limpo.

No trabalho de Nofuentes *et al.*, (2014) também estudou-se os efeitos dos espectros em módulos fotovoltaicos de silício amorfo e monocristalino na cidade de Jaen (Espanha). De acordo com os resultados, o espectro foi melhor aproveitado pelos módulos de silício amorfo e monocristalino em situações onde o mesmo possuía um maior percentual de fótons mais energéticos. Sendo que ganhos mais pronunciados foram obtidos para o módulo de silício amorfo. Um outro exemplo é o trabalho de Minemoto, Nagae e Takamura. (2007), que estudou o impacto causado por parâmetros ambientais (como o espectro solar e a temperatura) em módulos de silício amorfo e policristalino na cidade de Kusatsu (Japão) e verificou-se que módulos de a-Si são mais afetados pelas variações espectrais do que pelas variações de temperatura, diferentemente de módulos de m-Si, que se mostraram mais sensíveis às mudanças de temperatura do que às de espectro. De acordo com Dirnberger *et al.* (2015), os resultados obtidos pelos vários estudos não são fáceis de serem comparados devido à diversos fatores, como o fato de terem sido realizados em regiões com perfis atmosféricos diferentes, utilizarem parâmetros para avaliação do desempenho dos módulos e análise dos espectros da radiação solar, etc. Porém em todos eles mostram que as influências espectrais dependem da latitude e longitude do local, do clima, intervenções humanas no local, etc., sendo que a intensidade de tais influências dependem da Resposta Espectral do módulo fotovoltaico.

No Brasil, Haag e Krezinger (2010) mostraram através de simulações que o espectro padrão sugerido pela norma americana ASTM G173-03 pode não ser representativas para cidades brasileiras e para a maioria dos países da América do Sul. Isso é devido aos diferentes padrões climatológicos apresentados por estas regiões, que levam à valores diferentes de espessura óptica de aerossóis, coluna de água precipitável, etc. Assim, os espectros sul-americanos apresentariam maiores diferenças na região do ultravioleta devido à aerossóis provenientes de queimadas e na região do infravermelho devido às diferentes concentrações de vapor d'água na atmosfera.

Tendo em vista que os espectros solares encontrados em campo no Brasil são diferentes do especificado pelas normas e que os impactos causados pelas variações deste parâmetro nos módulos fotovoltaicos ainda não são bem conhecidos, este trabalho tem como objetivo investigar a influência de espectros coletados sob céu claro, parcialmente nublado e nublado na cidade brasileira de Cachoeira Paulista, que é uma cidade com clima muito representativo do sudeste brasileiro, em módulos fotovoltaicos da tecnologia de silício amorfo e monocristalino.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1 Medição do espectro da radiação solar

Foram desenvolvidos dois sistemas de medições que foram instalados no Laboratório de Instrumentação Meteorológica – LIM/INPE em Cachoeira Paulista – SP (latitude: 22° 34' S e longitude: 45° 00' W): o Sistema de Aquisição de Espectros (SAE) e o Sistema de Aquisição Fotovoltaico (SAF). O primeiro foi desenvolvido para coletar os espectros da radiação solar, enquanto que o segundo tem por função monitorar o desempenho de alguns módulos fotovoltaicos. Para ilustrar tais sistemas, um esquema de ambos com todos seus equipamentos pode ser visto na Fig. 1.

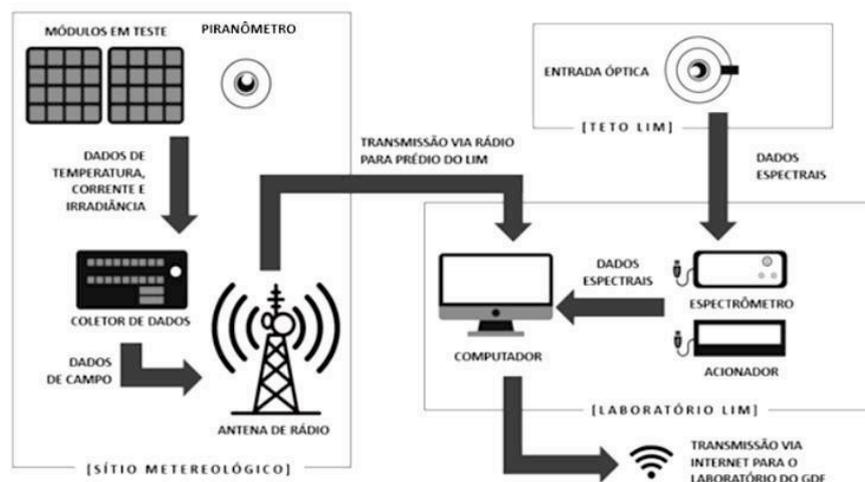


Figura 1 – Esquema do sistema de coleta de dados montado em Cachoeira Paulista.

O Sistema de Aquisição de Espectro (SAE) encontra-se em operação no LIM desde 2015 e é constituído por uma interface óptica desenvolvida especialmente para ser utilizada neste trabalho, um cabo de fibra óptica (comprimento de 25 m e número de abertura de 0,22), um espectroradiômetro (modelo CCD 2048 fabricada pela GetSpec e faixa de operação entre 200 nm e 1100 nm), um acionador eletrônico desenvolvido com a plataforma livre Arduino UNO2 e um microcomputador. Nesse sistema, a radiação solar passa pela interface óptica, que está instalada no topo do prédio do

LIM no plano horizontal e é enviada através do cabo de fibra óptica para o espectroradiômetro, situado dentro do laboratório. Os dados de espectros são coletados, processados e armazenados no microcomputador sempre que o acionador envia um sinal automaticamente em um dos horários pré-determinado (de hora em hora, das 8:00 as 18:00). Na Fig. 2 é possível observar uma foto da interface óptica.



Figura 2 – Interface Óptica desenvolvida em laboratório para a coleta dos dados espectrais.

O Sistema de Aquisição Fotovoltaico (SAF) está instalado em um sítio de medições meteorológicas em frente ao prédio do LIM. Ele é constituído por um coletor de dados CR1000 da Campbell, termopares tipo K, resistores Shunt para medições de corrente de curto-circuito dos módulos, rádios transmissor e receptor para comunicação de dados, um piranômetro modelo CM11 da Kipp & Zonen instalado no mesmo plano que os módulos, um computador e módulos fotovoltaicos de silício amorfo e monocristalino montados no plano inclinado no ângulo da latitude local. Na Tab. 1 são apresentadas as características elétricas dos módulos utilizados, medidas no Simulador Solar do Instituto de Energia e Ambiente (IEE) da Universidade de São Paulo em conjunto com os coeficientes térmicos da corrente de curto circuito, que foram informadas pelo fabricante. No SAF, a aquisição de dados é automática e ocorre de minuto a minuto, onde são coletados os valores da corrente de curto-circuito ( $I_{sc}$ ) e da temperatura dos módulos, além da irradiância solar global no plano inclinado. Os dados são coletados e enviados para o microcomputador. A Fig. 3 mostra uma foto dos dois módulos estudados neste trabalho.

Tabela 1 – Características elétricas dos módulos de a-Si e m-Si para as condições de irradiância 1000  $W/m^2$ , temperatura de célula 25 °C e espectro AM 1,5G. Os valores de coeficiente térmico da corrente de curto circuito foram informadas pelos fabricantes.

	a-Si	m-Si
Fabricante	Heizmann	Siemens
Modelo	KSMM106	SM10
$I_{sc}$ (A)	0,159	0,715
$V_{oc}$ (V)	24,0	19,9
$I_{mp}$ (A)	0,125	0,659
$V_{mp}$ (V)	17,6	15,4
$P_{MAX}$ (Wp)	2,21	10,1
FF	0,578	0,713
$\alpha$ (%/°C)	0,083	0,17

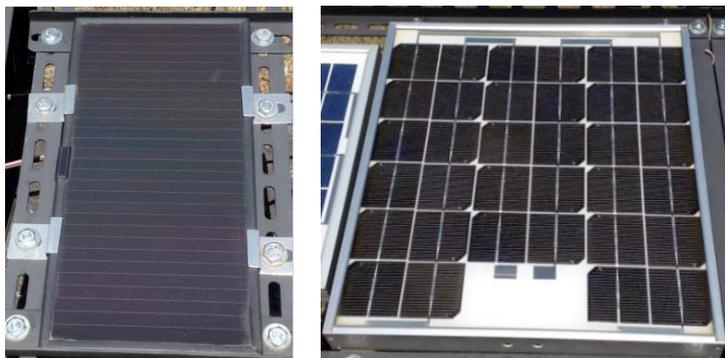


Figura 3 – Módulos estudados de a-Si à esquerda e m-Si à direita

## 2.2 Seleção dos dados coletados

Neste trabalho, somente os dados medidos no horário das 12:00 horas no período entre agosto de 2015 e janeiro de 2016 foram utilizados. Para que pudessem ser analisados, os dados coletados foram agrupados de acordo com a condição na qual o céu se encontrava durante o momento de sua aquisição em três categorias, em dados de céu limpo, parcialmente nublado e nublado. Tal condição foi estimada utilizando como indicador o Índice de Limpidez ( $K_t$ ), definido pela Eq. (1) abaixo.

$$K_t = \frac{H}{H_0} \quad (1)$$

Sendo  $H$  a irradiância global na horizontal medida no local ( $W/m^2$ ) e  $H_0$  a irradiância no topo da atmosfera ( $W/m^2$ ). O  $K_t$  indica a atenuação da irradiância solar que chega à superfície terrestre causada por elementos atmosféricos como nuvens, poluição, poeira, etc., e pode ser utilizado para indicar o grau de nebulosidade para um determinado local em um determinado horário (Iqbal, 1983; Silva, 2011). Segundo Ricieri (1998) citado por Silva (2011), no caso da cidade de Botucatu-SP, valores de  $K_t$  menores que 0,3 estariam relacionados à condição de céu nublado,  $K_t$  entre 0,3 e 0,65 estariam relacionados à condição de céu parcialmente nublados e valores de  $K_t$  maiores que 0,65 estariam relacionados à condição de céu limpo. O valor do  $K_t$  foi calculado utilizando-se dados de irradiância global fornecidos pelo projeto SONDA – Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais da estação localizada em Cachoeira Paulista na área próxima ao experimento de avaliação dos módulos e aquisição de espectros.

## 2.3 Análise dos espectros solares

Os espectros da radiação solar e as suas variações foram estudados através de um fator conhecido como Energia Média dos Fótons ou EMF (do inglês *Average Photon Energy* ou *APE*). Este parâmetro é definido pela Eq. (2) abaixo e determina a energia média dos fótons de um determinado espectro da radiação solar, indicando a coloração do espectro (Jardine *et al.*, 2002). Para os casos onde o espectro solar possui um valor de EMF menor, é dito que o mesmo possui um tom avermelhado por ser mais rico na região do Infravermelho, enquanto que nos casos dos espectros com maiores valores de EMF, eles são mais ricos na região do Visível ou Ultravioleta e por isso ditos possuem uma coloração azulada (Nofuentes *et al.*, 2014; Dirnberger *et al.*, 2015).

$$EMF = \frac{\int_b^a H(\lambda) d\lambda}{q \int_b^a \phi(\lambda) d\lambda} \quad (2)$$

Sendo  $H(\lambda)$  o valor da irradiância espectral ( $W/m^2 \text{ nm}$ ),  $q$  a carga do elétron (C),  $\Phi(\lambda)$  o fluxo de fótons ( $n^\circ$  fótons/ $m^2 \text{ s nm}$ ) e 'a' e 'b' o intervalo de comprimento de onda do espectro analisado (em nm). Neste trabalho, o EMF foi calculado no intervalo entre 350 nm e 950 nm.

## 2.4 Análise dos efeitos espectrais nos módulos fotovoltaicos

Para estudar a influência do espectro solar no funcionamento dos módulos fotovoltaicos escolhidos, utilizou-se o Fator Espectral Corrigido (FEC), que é um parâmetro baseado no Fator Espectral (do inglês *Spectral Factor* ou *SF*), também conhecido como Fator de Descasamento Espectral (do inglês *Spectral Mismatch Factor* ou *MM*). O SF (ou MM) está definido nas normas ASTM E973 e IEC 60904-7 e indica os impactos espectrais causados nos módulos, sendo tais impactos, os ganhos ou perdas de energia que os módulos experimentam devido à fração da irradiância que é absorvida por eles em campo relacionada à irradiância total incidente, comparado com seus funcionamentos sob o espectro padrão (Nofuentes *et al.*, 2014; Dirnberger *et al.*, 2015; Neves, 2016). O FE pode ser calculado através da Eq. (3) (Alonso-Abella *et al.*, 2014).

$$FE = \left( \frac{I_{SCCAMPO}}{H_{CAMPO}} \right) \cdot \left( \frac{I_{SCSTC}}{H_{STC}} \right)^{-1} \quad (3)$$

Sendo que  $I_{SCcampo}$  é a corrente de curto circuito dos módulos medida em campo (A),  $H_{campo}$  a irradiância medida em campo ( $W/m^2$ ),  $I_{SCstc}$  é a corrente de curto circuito dos módulos medida em laboratório sob as condições do STC (A) e  $H_{stc}$  é a irradiância especificada no STC ( $1000 W/m^2$ ).

No caso da FEC, a Eq. (3) foi modificada de acordo com as instruções da norma IEC 60891 para corrigir o valor das correntes medidas dos módulos em campo para o valor de 25°C conforme descrito pela Eq. (4). Com isso pôde-se

avaliar somente os efeitos causados pelas variações dos espectros nos módulos fotovoltaicos. Assim, para os casos onde o FEC apresenta valor maior que a unidade, ocorre os chamados ganhos espectrais, ou seja, os módulos se beneficiam mais do espectro em campo do que quando comparado com o padrão. Para os casos onde o FEC é menor que a unidade ocorre as perdas espectrais, onde os módulos se beneficiam menos do espectro incidente quando comparado com o espectro padrão (Neves, 2016).

$$FEC = \left( \frac{I_{SCCAMPO}}{H_{CAMPO}} \right) \cdot \left( \frac{I_{SCSTC}}{H_{STC}} \right)^{-1} \cdot \left[ \frac{1}{(1 + \alpha (T_{CAMPO} - T_{STC}))} \right] \quad (4)$$

Onde  $\alpha$  é o coeficiente térmico da corrente de curto circuito ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ),  $T_{campo}$  é a temperatura dos módulos em campo ( $^{\circ}\text{C}$ ) e  $T_{stc}$  a temperatura dos módulos em laboratório ( $25^{\circ}\text{C}$ ).

### 3. RESULTADOS

A variação da Energia Média dos Fótons com o valor de Índice de Limpeza para Cachoeira Paulista é apresentado na Figura 4. De acordo com estes resultados, dias nublados (dias cujo  $Kt < 0,3$ ) apresentam espectros com maiores energias médias do que dias com céu claro ( $Kt > 0,65$ ) ou céu parcialmente nublados ( $0,3 < Kt < 0,65$ ). Considerando que o vapor d'água presente nas nuvens absorve radiação em vários intervalos de comprimento de onda na região do Infravermelho (IV), o que ocorre em dias nublados é que os fótons desta região espectral são absorvidos em grande quantidade pela grande massa de vapor d'água presente nas nuvens (Iqbal, 1983). Como os fótons do Infravermelho são menos energéticos, na média, a energia dos fótons destes espectros aumenta. Em dias de céu claro, onde a concentração de vapor d'água na atmosfera é muito menor, a absorção da radiação no Infravermelho não ocorre com tanta intensidade e por consequência a EMF é menor. Já para dias parcialmente nublados, como observado, os resultados ficam no meio termo devido à provavelmente à presença parcial de nuvens.

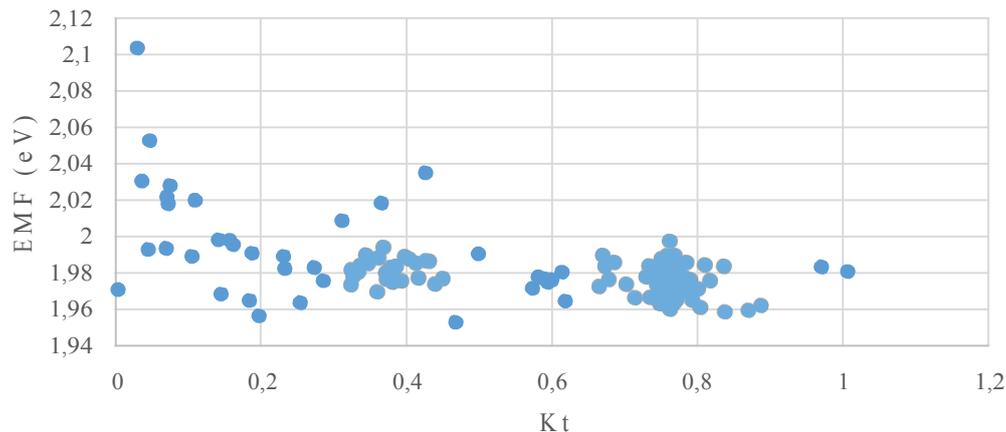


Figura 4 – Relação entre a EMF e o Kt para a localização de Cachoeira Paulista - SP.

Além do vapor d'água, outro efeito atmosférico também pode ter colaborado para que a EMF seja maior sob as condições de céu nublado. Como proposto por Seckmeyer, Erb e Albold (1996) e explicado fisicamente por Kylling, Albold e Seckmeyer (1997), a transmitância das nuvens é seletiva espectralmente e maior para menores comprimentos de onda, permitindo que mais fótons com maiores estados energéticos possam chegar à superfície, interferindo para a média da energia dos fótons de um determinado espectro.

A influência das variações de espectros nos módulos fotovoltaicos de silício amorfo e silício monocristalino podem ser vistas na Figura 5. Nela, analisando a relação entre o FEC e o Kt para o módulo de a-Si, pode-se perceber primeiramente que em todas as condições de céu houveram ganhos espectrais para este tipo de tecnologia. Isto indica que o espectro solar incidente em Cachoeira Paulista – SP foi melhor aproveitado por este módulo do que o espectro padrão utilizado para qualificá-lo em laboratório. Também é possível observar que sob as condições de céu nublado, a tendência do FEC foi de aumentar, ocorrendo sob estas condições maiores ganhos espectrais do que sob céu limpo ou sob céu parcialmente nublado.

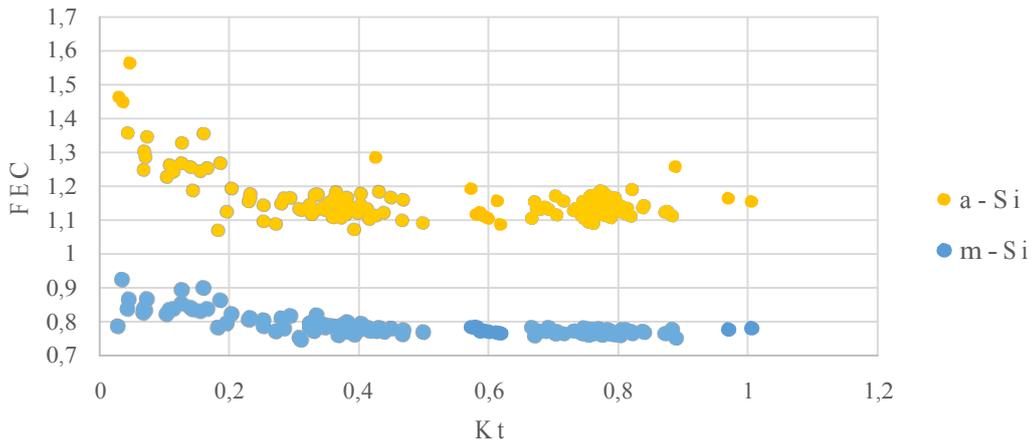


Figura 5 – Relação entre o FEC do módulo de a-Si e o Kt.

Na Figura 5 também é possível ver a relação do FEC com o Kt para o módulo de m-Si. Diferentemente do que ocorreu no caso do a-Si, a grande maioria dos valores de FEC ficou abaixo da unidade em todas as condições de céu. Isto mostra que o espectro padrão foi melhor aproveitado por este módulo do que os espectros encontrados em Cachoeira Paulista. Em contrapartida, assim como ocorreu para o módulo de a-Si, sob as condições de céu nublado também ocorreram os maiores valores de FEC, indicando que, para estes dois módulos, a radiação solar predominantemente difusa é mais favorável para seu desempenho.

Para compreender as influências espectrais nos módulos estudados, os valores de FEC dos módulos de a-Si e m-Si ao longo dos seis meses de coleta de dados foram analisados e seguem nas Figuras 6 e 7 respectivamente discriminados pela condição do céu. Como pode ser observado, os valores de FEC para ambos os módulos são maiores para céu nublado, enquanto que para os dados de céu parcialmente nublado e limpo não há muitas diferenças de valores.

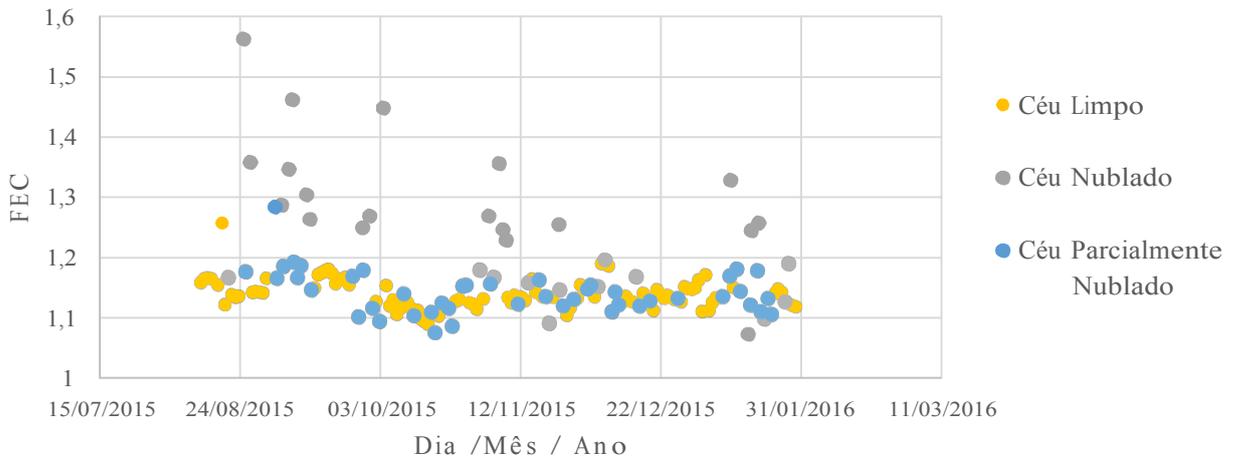


Figura 6 – Variação do FEC para o módulo de a-Si ao longo do tempo.

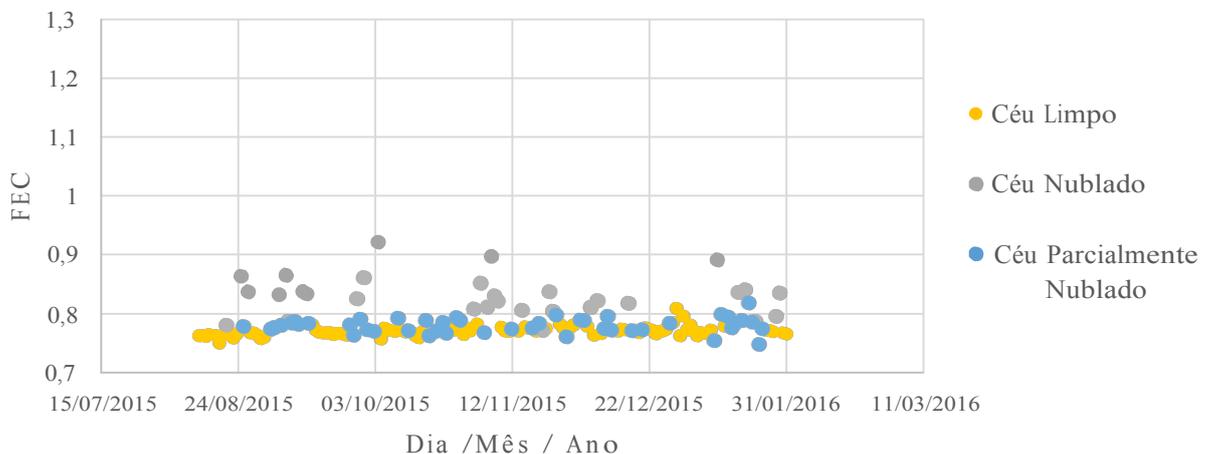


Figura 7 – Variação do FEC para o módulo de m-Si ao longo do tempo.

Analisando o desvio dos dados obtidos somente sob céu limpo para ambos os módulos obteve-se um desvio padrão de aproximadamente 0,07 para o a-Si e de aproximadamente 0,03 para o m-Si. Considerando que nesta situação efeitos causados por elementos atmosféricos como os aerossóis, variação da massa ar, etc., nos espectros não são mascarados pelos efeitos das nuvens, isto indica em um primeiro momento que o módulo de silício amorfo se mostrou mais suscetível à tais variações espectrais do que o de silício monocristalino. Isto é resultado do chamado “efeito de compensação”, que ocorre somente para o módulo de m-Si. De acordo com Ishii *et al.* (2013), as variações ocasionadas nos espectros com maiores intensidades no ultravioleta e visível pelo espalhamento Rayleigh são contrabalanceadas pelas variações ocasionadas pela ação do vapor d’água na região do Infravermelho e, pelo fato de os módulos de m-Si possuírem uma Resposta Espectral capaz de absorver radiação nestas três regiões (entre aproximadamente 200 nm e 1100 nm), as variações espectrais ocorridas em dias de céu limpo implicam em pequenos ganhos ou perdas espectrais para estes módulos. Este efeito não ocorre no caso dos módulos de a-Si devido ao seu intervalo de Resposta Espectral mais estreito (entre aproximadamente 300 nm e 800 nm), que é capaz de absorver as regiões afetadas somente pelo espalhamento Rayleigh, levando à maiores variações nos valores de FEC.

#### 4. CONCLUSÕES

De acordo com os estudos realizados, dias nublados apresentam espectros solares com maiores valores de EMF quando comparados com dias de céu limpo ou céu parcialmente nublado. Esta diferença se deve à dois fatores: ao vapor d’água das nuvens que absorve radiação nos comprimentos de onda do Infravermelho e à transmitância das nuvens, que é maior na região de menores comprimentos de onda. Estes dois fenômenos, juntos, fazem com que um maior percentual de fótons de maiores energias estejam presentes nos espectros da radiação solar na média, mais fótons mais energéticos esteja presente nos espectros da radiação solar, elevando os valores de EMF sob tais condições.

Quanto às influências espectrais nos módulos fotovoltaicos, no caso do módulo de a-Si, houveram ganhos espectrais em todas as condições de céu, mostrando que este módulo aproveitou melhor os espectros solares em campo do que o espectro padrão. No caso do módulo de m-Si ocorreu o oposto, mostrando que o espectro padrão foi melhor aproveitado por ele do que os obtidos em campo. Em ambos os módulos, maiores FEC foram obtidos sob condições de céu nublado, indicando que para os módulos estudados, espectros solares de maiores EMF e compostos predominantemente pela radiação difusa podem ser melhor aproveitados por eles.

Com relação aos espectros solares obtidos em céu claro, observa-se que suas variações mostraram maior influência nos ganhos ou perdas espectrais no caso do módulo de a-Si quando comparado com o módulo de m-Si. Isto se deve provavelmente ao “efeito de compensação” que ocorre no módulo de m-Si por apresentar uma Resposta Espectral que se estende em um intervalo maior de comprimento de onda que a do a-Si, podendo as variações que ocorrem no espectro ocasionadas pelo espalhamento Rayleigh serem compensadas pelos efeitos do vapor d’água.

#### *Agradecimentos*

Os autores agradecem ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo auxílio à pesquisa realizada, aos integrantes do Laboratório de Instrumentação Meteorológica (LIM) pelos auxílios com o sistemas de coleta de dados, ao projeto SONDA pelos dados cedidos e ao Instituto de Energia e Ambiente (IEE) da Universidade de São Paulo pela caracterização elétrica dos módulos fotovoltaicos utilizados neste trabalho. Este trabalho é uma contribuição do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia para Mudanças Climáticas (INCT-MC) financiado pela FAPESP 2014/50848-9, CNPq 465501/2014-1, e CAPES/FAPS Nº 16/2014.

#### REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira De Normas Técnicas (ABNT), (2006). NBR 10899 Conversão Fotovoltaica de Energia Solar. Rio de Janeiro.
- 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.
- American Society for Testing and Materials (ASTM), (2015). E973 Standard Test Method for Determination of the Spectral Mismatch Parameter Between a Photovoltaic Device and a Photovoltaic Reference Cell. Estados Unidos da América.
- American Society for Testing and Materials (ASTM), (2012). G173-03 Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances: Direct Normal and Hemispherical on 37° Tilted Surface. Estados Unidos da América.
- 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.
- Haag, R., Krenzinger, A., 2010. Estimativa da distribuição espectral da irradiância solar para distintas regiões da América do sul, *Avanços em Energias Renováveis e Meio Ambiente*, vol. 20.

- International Electrotechnical Commission (IEC), (2008). IEC 60904-3 Photovoltaic devices - Part 3: Measurement principles for terrestrial photovoltaic (PV) solar devices with reference spectral irradiance data. Estados Unidos da América.
- International Electrotechnical Commission (IEC), (2009). IEC 60891 Procedures for temperature and irradiance corrections to measured I-V characteristics. Estados Unidos da América.
- Iqbal, M., 1983. An introduction to solar radiation, Elsevier.
- Ishii, T., Otani, K., Takashima, T., Xue, Y., 2013. Solar spectral influence on the performance of photovoltaic (PV) modules under fine weather and cloudy weather conditions, Progress in Photovoltaics: Research and Applications, vol. 21, n. 4, pp. 481-489.
- Jardine, C. N., Betts, T. R., Gottschalg, R., Infield, D. G., Lane, K., 2002. Influence of spectral effects on the performance of multijunction amorphous silicon cells. In: Proc. Photovoltaic in Europe Conference.
- Kylling, A.; Albold, A.; Seckmeyer, G., 1997. Transmittance of a cloud is wavelength dependent in the UV range: Physical interpretation. Geophysical Research Letters, vol. 24, n. 4, pp. 397-400.
- Minemoto, T., Nagae, S., Takamura, H., 2007. Impact of spectral irradiance distribution and temperature on the outdoor performance of amorphous Si photovoltaic modules, Solar energy materials and solar cells, vol. 91, n. 10, pp. 919923.
- Neves, G., 2016. Influência do espectro da radiação solar em módulos fotovoltaicos, Dissertação de Mestrado, INPE, São José dos Campos.
- Nofuentes, G., García-Domingo, B., Muñoz, J. V., Chenlo, F., 2014. Analysis of the dependence of the spectral factor of some PV technologies on the solar spectrum distribution, Applied energy, vol. 113, pp. 302-309.
- Ricieri, R. P., 1998. Modelos de estimativa e avaliação dos métodos de medida da radiação solar difusa, Tese (Doutorado em Energia na Agricultura), Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu.
- Seckmeyer, G.; Erb, R.; Albold, A., 1996. Transmittance of a cloud is wavelength dependent in the UV range. Geophysical Research Letters, vol. 23, n. 20, pp. 2753-2755.
- Silva, V. A. M., 2011. Influência da cobertura do céu na estimativa da radiação solar utilizando modelo digital de elevação, Monografia (Especialização em Física Ambiental), UFMT, Cuiabá.

#### **SOLAR SPECTRAL INFLUENCE ON PHOTOVOLTAIC MODULES UNDER CLEAN WEATHER, PARTLY CLEAR AND CLOUDY WEATHER**

**Abstract.** *The photovoltaic modules are rated according to the Standard Test Conditions (which consist in a irradiance of 1000 W/m<sup>2</sup>, module temperature of 25 °C and a spectrum described by the IEC, ASTM or ABNT standards). However, such conditions rarely occur in the field at the same time, so the efficiency obtained in laboratory hardly occur during the lifetime of the pv modules. Taking into account that the effects caused by the spectral variations are still not very well understood, and with the purpose of obtain a better understanding of the influence that such variations cause in the amorphous silicon (a-Si) and monocrystalline silicon (m-Si) pv modules, the study described in this work was carried out. Two data acquisition systems were developed and installed at the campus of Brazilian's National Institute of Space Researches (INPE) in Cachoeira Paulista - SP: a system that collect the solar radiation spectra and another system that collect datas of the pv modules. Only datas generated by these systems collected at 12:00 a.m. between august 2015 and january 2016 were used in this work and were classified as data of clean weather, partly clear weather or cloudy weather according to the clearness index calculated using data provided by the SONDA network. According to the results, cloudy weather presents spectra with higher values of average photon energy and better utilization by the modules of a-Si and m-Si when compared with the spectrum described by the standards. It was also possible to observe that the m-Si module had less influence of the spectral variations than the a-Si module due to the so-called "offset effect".*

**Key words:** Solar Energy, Solar Spectrum, Photovoltaic Modules