

ANÁLISE DO DESEMPENHO DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS ORGÂNICAS E INORGÂNICAS SOB DIFERENTES MASSAS DE AR UTILIZANDO SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Luciano Azevedo Neves (UFMG) - lucianonevesmec@gmail.com

Gabriel Carvalho Leite (UFMG) - gcarvalholeite@gmail.com

Kelvin Carvalho de Paula Vieira (UFMG) - kelvincarvalhopv@gmail.com

Roderick MacKenzie (Instituição - a informar) - roderick.mackenzie@nottingham.ac.uk

Matheus Pereira Porto (Instituição - a informar) - matheusporto@ufmg.br

Resumo:

O desempenho de células fotovoltaicas é fortemente afetado pelas variações na distribuição espectral da radiação solar incidente na superfície terrestre. Um dos fatores que provocam essa variação está relacionado com a espessura de atmosfera pela qual os raios solares atravessam até atingir o solo e é denominado massa de ar (AM - Air Mass). Este trabalho tem como objetivo apresentar uma metodologia para avaliar os efeitos da variação da massa de ar no desempenho de células fotovoltaicas, a partir de dados experimentais obtidos por meio de uma estação solarimétrica na Escola de Engenharia da UFMG. Para tal, utilizando um algoritmo de detecção de céu limpo e funções da biblioteca PVLIB, desenvolvida pelos laboratórios da Sandia (EUA), foi implementada uma rotina em MATLAB para selecionar dados de irradiância espectral, sob diferentes massas de ar, em períodos de céu limpo, de um dia de verão e outro de inverno. Posteriormente, um software de simulação numérica de dispositivos fotovoltaicos, intitulado gpvdm, foi utilizado para simular o desempenho de uma célula orgânica e de uma célula inorgânica de silício policristalino, sob condições de irradiação definidas pelos espectros selecionados. Os resultados da simulação revelam uma menor dependência espectral para a célula de silício, especialmente no dia de verão. Como exemplo, a máxima variação percentual da eficiência de conversão neste dia, observada entre as massas de ar AM1,5 e AM1, foi de 3,31% e 1,66% para as células orgânica e inorgânica, respectivamente. Além disso, os resultados apontam para uma divergência entre as eficiências obtidas sob iluminação do espectro para AM1,5 medido experimentalmente e sob iluminação do espectro normatizado AM1,5G. Para a localidade em questão, esta diferença, em termos percentuais, chegou até +8,2% para a célula orgânica no verão e -3,6% para a célula de silício no inverno.

Palavras-chave: *Massa de Ar, Eficiência de Conversão, Células Fotovoltaicas*

Área temática: *Radiação Solar*

Subárea temática: *Recursos Solares e Meteorologia da Radiação Solar*

ANÁLISE DO DESEMPENHO DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS ORGÂNICAS E INORGÂNICAS SOB DIFERENTES MASSAS DE AR UTILIZANDO SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Luciano Azevedo Neves – lucianonevesmec@gmail.com

Gabriel Carvalho Leite – gcarvalholeite@gmail.com

Kelvin Carvalho de Paula Vieira – kelvincarvalhopv@gmail.com

Laboratório de Termometria, LabTerm, Departamento de Engenharia Mecânica da UFMG

Roderick MacKenzie – roderick.mackenzie@nottingham.ac.uk

Faculty of Engineering, University of Nottingham

Matheus Pereira Porto – matheusporto@ufmg.br

Laboratório de Termometria, LabTerm, Departamento de Engenharia Mecânica da UFMG

1.1. Recursos solares e meteorologia da radiação solar

Resumo. O desempenho de células fotovoltaicas é fortemente afetado pelas variações na distribuição espectral da radiação solar incidente na superfície terrestre. Um dos fatores que provocam essa variação está relacionado com a espessura de atmosfera pela qual os raios solares atravessam até atingir o solo e é denominado massa de ar (AM – Air Mass). Este trabalho tem como objetivo apresentar uma metodologia para avaliar os efeitos da variação da massa de ar no desempenho de células fotovoltaicas, a partir de dados experimentais obtidos por meio de uma estação solarimétrica na Escola de Engenharia da UFMG. Para tal, utilizando um algoritmo de detecção de céu limpo e funções da biblioteca PVLIB, desenvolvida pelos laboratórios da Sandia (EUA), foi implementada uma rotina em MATLAB para selecionar dados de irradiância espectral, sob diferentes massas de ar, em períodos de céu limpo, de um dia de verão e outro de inverno. Posteriormente, um software de simulação numérica de dispositivos fotovoltaicos, intitulado *gpvdm*, foi utilizado para simular o desempenho de uma célula orgânica e de uma célula inorgânica de silício policristalino, sob condições de irradiação definidas pelos espectros selecionados. Os resultados da simulação revelam uma menor dependência espectral para a célula de silício, especialmente no dia de verão. Como exemplo, a máxima variação percentual da eficiência de conversão neste dia, observada entre as massas de ar AM1,5 e AM1, foi de 3,31% e 1,66% para as células orgânica e inorgânica, respectivamente. Além disso, os resultados apontam para uma divergência entre as eficiências obtidas sob iluminação do espectro para AM1,5 medido experimentalmente e sob iluminação do espectro normalizado AM1,5G. Para a localidade em questão, esta diferença, em termos percentuais, chegou até +8,2% para a célula orgânica no verão e -3,6% para a célula de silício no inverno.

Palavras-chave: Massa de Ar, Eficiência de Conversão, Células Fotovoltaicas.

1. INTRODUÇÃO

O desempenho de células fotovoltaicas está intimamente relacionado com as características da radiação solar incidente sobre suas superfícies. A intensidade da radiação, por exemplo, é um fator de suma importância na análise da disponibilidade de energia solar. Outro aspecto importante é a distribuição da energia em cada faixa de comprimento de onda, usualmente denominada distribuição espectral. Células fotovoltaicas aproveitam apenas uma faixa restrita do espectro da radiação solar para produzir eletricidade, devido a limitações intrínsecas às tecnologias (Alonso-Abella *et al.*, 2014). Como a distribuição espectral da radiação está condicionada à variabilidade de diversos parâmetros atmosféricos, a eficiência de conversão de energia solar em energia elétrica apresentada por essas células é diretamente impactada por estas variações.

As células fotovoltaicas são geralmente avaliadas em laboratório, sob condições-padrão de ensaio (STC – *Standard Test Conditions*), estabelecidas pela norma IEC 60904-3, que consistem em irradiância incidente de 1000 W/m², temperatura do módulo de 25 °C e distribuição espectral AM1,5G. O espectro AM1,5G, estabelecido pela norma ASTM G173-03, foi determinado a partir do modelo SMARTS (*Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine*), que estima irradiâncias espectrais globais incidentes em uma superfície inclinada de 37° utilizando dados históricos de radiação solar e parâmetros atmosféricos de várias regiões dos Estados Unidos. Embora seja necessário padronizar as condições ambientais para uniformizar a avaliação de desempenho de dispositivos fotovoltaicos, essa distribuição espectral pode variar dependendo da hora do dia, da localização geográfica e dos parâmetros atmosféricos locais em um determinado instante.

O termo AM da distribuição espectral, abreviatura em língua inglesa para massa de ar (*air mass*), refere-se, indiretamente, ao comprimento do caminho óptico ou espessura de atmosfera pela qual a luz solar atravessa até atingir a superfície terrestre. Este parâmetro depende do ângulo zenital, que varia com a localização, a hora do dia e o dia do ano

(Hulstron, 1989). Evidentemente, a variação da massa de ar, em consequência da variação do ângulo zenital, também tem efeitos na distribuição espectral da radiação solar. O aumento da massa de ar, por exemplo, produz uma atenuação não uniforme da energia ao longo do espectro, sendo mais intensa na região do ultravioleta e do visível do que na região do infravermelho (Iqbal, 1983). Este fenômeno é facilmente observável: ao amanhecer, o valor da massa de ar é mais alto, diminuindo ao longo do dia até o meio-dia solar, e tornando a aumentar até o entardecer. É o fato de haver mais energia na faixa do infravermelho para massas de ar mais elevadas que explica a coloração avermelhada do céu no início e fim do dia (Vignola, Michalsky e Stoffel, 2016).

A atenuação desigual da energia em diferentes faixas do espectro solar pode ser explicada pelos fenômenos de absorção e espalhamento dos raios solares devido a presença de gases e aerossóis na atmosfera. O espalhamento ocorre quando o feixe de radiação é espalhado em todas as direções ao interagir com partículas atmosféricas, separando a radiação global nas componentes direta e difusa (Iqbal, 1983). Tais componentes apresentam diferentes distribuições espectrais, sendo que a componente difusa possui uma maior concentração de energia na região do azul, ou seja, em menores comprimentos de onda (Duffie e Beckman, 2013). Já a absorção, pela própria definição, ocorre devido a capacidade de determinados componentes atmosféricos absorverem parcelas específicas da energia solar, em comprimentos de onda característicos. Portanto este fenômeno também provoca efeitos diferentes em cada região do espectro. O grau de espalhamento e absorção da radiação solar é determinado pelo número de partículas com as quais a radiação interage até atingir a superfície terrestre e pelas características físico-químicas das mesmas, como tamanho e estrutura molecular.

A proporção de radiação difusa e direta, associada ao fenômeno de espalhamento atmosférico, varia ao longo do dia de forma repentina conforme as mudanças na composição das nuvens no céu. Mas na ausência de nuvens e em condições atmosféricas estáveis, a massa de ar é o parâmetro determinante para a variação destas duas componentes em um mesmo dia, sendo esta variação facilmente visualizável nos diversos modelos de céu limpo já desenvolvidos (Antonanzas-Torres *et al.*, 2019). Nessa condição, em instantes próximos ao meio-dia solar, a radiação direta é em torno de 85% da global, naturalmente com os outros 15% de radiação difusa. Já quando o sol está próximo do horizonte, nos períodos do nascer e pôr do sol, a proporção de radiação difusa pode atingir valores de até 40% (Eke *et al.*, 2017).

Diante do fato de dispositivos fotovoltaicos apresentarem respostas condicionadas à distribuição espectral da radiação incidente e da variação da massa de ar ser o principal fator atmosférico a alterar tais distribuições em condições de céu limpo, propõe-se, neste trabalho, a utilização do software *gpvdm (General-Purpose Photovoltaic Device Model)* para simular o desempenho de células fotovoltaicas orgânicas e inorgânicas sob diferentes massas de ar. Para isso, foram selecionados um dia de céu limpo no verão e outro no inverno, usando, como parâmetros de entrada das simulações, dados experimentais de irradiância espectral coletados nestes dias através de uma estação solarimétrica localizada no terraço da Escola de Engenharia da UFMG, em Belo Horizonte, Brasil, e sob responsabilidade do Laboratório de Termometria (LabTerm), do Departamento de Engenharia Mecânica. Como o software *gpvdm* não permite a modificação do ângulo de incidência da radiação em relação ao plano da superfície da célula, é necessário considerar a incidência normal na simulação das diferentes massas de ar. Os resultados são, portanto, similares àqueles obtidos em simuladores solares tradicionais, porém não se restringindo a avaliar o desempenho de células fotovoltaicas somente sob o espectro normatizado AM1,5 e/ou sob uma quantidade limitada de outros espectros.

2. METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho consiste, basicamente, nas seguintes atividades: aquisição de dados radiométricos e meteorológicos na estação solarimétrica da Escola de Engenharia da UFMG, tratamento e seleção dos dados, determinação das massas de ar nos períodos selecionados, determinação dos parâmetros ópticos e eletrônicos das células fotovoltaicas para simulação e, por fim, a própria simulação numérica por meio do software *gpvdm*.

2.1 Aquisição dos dados radiométricos e meteorológicos

Na etapa de aquisição dos dados radiométricos e meteorológicos, os instrumentos da estação solarimétrica foram utilizados para mensurar parâmetros ambientais (temperatura e umidade relativa do ar, pressão atmosférica, etc.) e radiométricos (irradiâncias direta normal, difusa horizontal e global horizontal). Em especial, um espectrorradiômetro foi utilizado para medir a distribuição espectral da radiação solar incidente, ou irradiância espectral, local no plano horizontal. A estação está localizada na latitude 19°52'10.8" S e longitude 43°57'42.3" O, altitude de 835 m, em Belo Horizonte – MG, no terraço da Escola de Engenharia da UFMG, como pode ser vista na Fig. 1, e está em funcionamento desde março/2018.

Uma lista dos instrumentos com as suas características metrológicas e frequências de aquisição é apresentada na Tab. 1.

2.2 Tratamento e seleção dos dados

Realizadas as medições, prosseguiu-se às etapas de tratamento e seleção dos dados radiométricos e meteorológicos, coletados de janeiro a agosto de 2019, as quais foram implementadas por meio de rotinas em linguagem MATLAB. O objetivo final destas etapas era obter distribuições espectrais de radiação solar, em condições

de céu limpo, ao longo de dias representativos de verão e de inverno na cidade de Belo Horizonte, um dia para cada uma destas estações do ano.

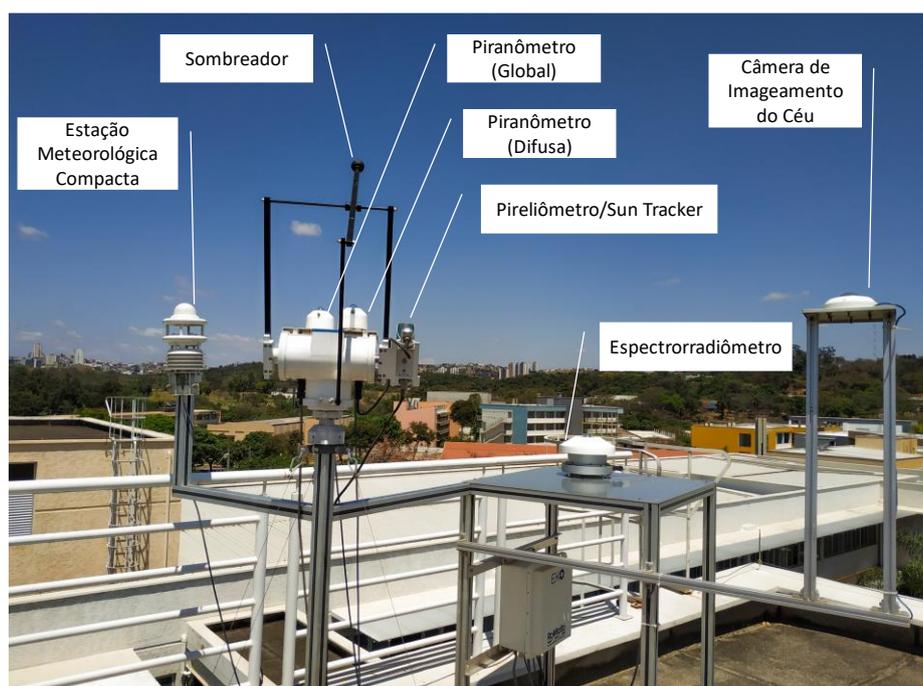


Figura 1 – Estação solarimétrica da Escola de Engenharia da UFMG com a respectiva instrumentação em destaque.

Tabela 1 – Instrumentos da estação solarimétrica com as respectivas especificações relevantes no âmbito deste trabalho.

Instrumento	Fabricante	Modelo	Incertezas	Frequência de aquisição
Pireliômetro	EKO Instruments	MS-57	0,63% Classe A ¹ (Primeira Classe ²)	1 Hz
Piranômetro (Difusa)	EKO Instruments	MS-80	0,66% Classe A ¹ (Padrão Secundário ²)	1 Hz
Piranômetro (Global)	EKO Instruments	MS-80	0,64% Classe A ¹ (Padrão Secundário ²)	1 Hz
Espectrorradiômetro	EKO Instruments	MS-700N	Intervalo de Medição: 350 – 1050 nm 350 – 450 nm: $\pm 10,88\%$ 450 – 900 nm: $\pm 4,13\%$ 900 – 1050 nm: $\pm 4,06\%$	1/60 Hz
Estação Meteorológica Compacta	Lufft	WS600-UMB	Temperatura: $\pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ Umidade Relativa: $\pm 2\%$ UR Pressão: $\pm 0,5\text{ hPa}$ Velocidade do Vento: $\pm 0,3\text{ m/s}$	1/60 Hz
Rastreador Solar (<i>Sun Tracker</i>)	EKO Instruments	STR-22G	Posicionamento Angular: $< 0,01^{\circ}$	-
Estrutura de Sombreamento Tipo Esfera		MB-12-1	-	-
Câmera <i>Fisheye</i> de Imageamento do Céu	VIVOTEK	FE9381-EHV	-	1/60 Hz

¹ ISO 9060:2018

² ISO 9060:1990

Tratamento. Na etapa de tratamento buscou-se sincronizar os dados, ajustando-os para uma taxa de amostragem em comum de 1 minuto. Dessa forma, para as medições realizadas por instrumentos cuja taxa de amostragem era 1 segundo (piranômetros e pireliômetro), foram selecionadas aquelas que haviam sido tomadas no segundo zero de cada minuto, uma vez que os demais instrumentos (espectrorradiômetro, estação meteorológica compacta e câmera *fisheye*) realizam suas medições apenas nestes momentos. Além disso, ajustou-se o horário de verão, de modo que todos os dados estivessem na hora local padrão (UTC-3).

Seleção. Na etapa de seleção dos dados foi utilizada uma rotina no software MATLAB baseada em funções da biblioteca PVLIB, desenvolvida pelos laboratórios da Sandia (EUA) – Sandia National Laboratories (2015) –, e no algoritmo de detecção de céu limpo de Reno e Hansen (2016). O uso dessa rotina permitiu, primeiramente, a seleção exclusiva de dados de irradiância espectral em períodos de céu limpo, eliminando aqueles com influência dos efeitos causados pela presença de nuvens. Isto foi feito através do já referido algoritmo de Reno e Hansen (2016), que utiliza de métodos estatísticos para avaliar a variação temporal dos valores de irradiância global horizontal ao longo de um dia, que podem ser mensurados por meio de um piranômetro, de modo a classificar estes valores como característicos de céu limpo ou não. Dessa forma, retirando-se dados com influência de nebulosidade, torna-se possível a análise da alteração nas irradiâncias espectrais, em curto prazo (dentro de um mesmo dia) e na faixa espectral de medição do espectrorradiômetro utilizado (350 – 1050 nm, região do visível e infravermelho próximo), como consequência apenas da variação da massa de ar. Outros parâmetros atmosféricos, como quantidade de água precipitável, concentração de gases (CO₂ e O₃, especialmente) e espessura óptica de aerossóis, podem ser desconsiderados neste espaço de tempo e intervalo do espectro (Litjens, 2013).

Essa rotina em MATLAB também foi implementada de modo a limitar a seleção dos dados para o período de 8h às 16h, em hora solar, por ser um intervalo do dia que compreende a maior parte da energia fornecida diariamente pelo Sol. Tal procedimento visa ainda evitar a utilização de ângulos de incidência mais elevados, quando próximo do nascer e pôr do sol, uma vez que nestas situações podem ocorrer grandes interferências na radiação solar incidente por conta de sombreamento do horizonte.

2.3 Determinação das massas de ar

Após a seleção dos dias 02/02/2019 (verão) e 07/07/2019 (inverno) para análise, utilizou-se novamente uma rotina em MATLAB, agora para determinar as massas de ar correspondentes a cada minuto de dados de irradiância espectral mensurados. Para isso, três funções da biblioteca PVLIB foram empregadas. Primeiramente, usou-se de uma função baseada no algoritmo de posição solar da NREL (EUA) – National Renewable Energy Laboratory –, desenvolvido por Reda e Andreas (2008) e denominado SPA (*Solar Position Algorithm*), para calcular os ângulos zenitais aparentes, que levam em consideração a refração atmosférica – neste caso, estes ângulos zenitais são equivalentes aos ângulos de incidência aparentes, uma vez que o espectrorradiômetro está instalado numa superfície horizontal. Em seguida, valeu-se de uma função que utiliza o modelo de Kasten e Young (1989) para determinação das massas de ar relativas, ou seja, para regiões ao nível do mar, a partir dos ângulos zenitais calculados. E, finalmente, usou-se de uma função que aplica uma correção nas massas de ar relativas de modo a contabilizar a pressão atmosférica (ou a altitude) local, determinando-se assim as massas de ar absolutas.

2.4 Simulação numérica no software gpvdm

O desempenho dos dispositivos fotovoltaicos foi avaliado a partir de simulações realizadas utilizando o software gpvdm. Esta é uma ferramenta de simulação optoeletrônica 1D/2D criada para entender o comportamento da maioria das células solares quando modificados diversos parâmetros das mesmas. O modelo nela implementado utiliza uma abordagem de diferenças finitas para descrever o movimento das cargas elétricas e considera as perdas energéticas devido à recombinação de elétrons livres com lacunas livres, e/ou de Shockley-Read-Hall, em que elétrons livres são aniquilados por defeitos da célula (Shockley e Read, 1952). A confiabilidade dos resultados das simulações no gpvdm já foi demonstrada em trabalho publicado por MacKenzie *et al.* (2012). Uma descrição mais detalhada de todo o modelo pode ser encontrada no manual de utilização do software (MacKenzie, 2019).

Neste trabalho, foram escolhidas duas tecnologias de células solares para simulação: uma célula inorgânica, de silício policristalino, e uma célula orgânica (OPV – *Organic Photovoltaics*). Os parâmetros de entrada da simulação são determinados pelos modelos físico, óptico e eletrônico das células fotovoltaicas. A radiação incidente, um destes parâmetros, pode ser modelada utilizando distribuições espectrais obtidas por meio de espectrorradiômetros. Isto de fato foi feito, o que permitiu simular o desempenho das células solares em condições reais de irradiação. Os outros parâmetros utilizados em cada um dos modelos estão descritos em seguida.

Modelo físico. A célula fotovoltaica é concebida em uma estrutura de camadas conjugadas, podendo ser organizada de diversas maneiras. Atribui-se para cada camada uma função diferente no processo de conversão de energia e no transporte de cargas através da célula, determinada pelos três tipos de camadas: ativa, tipo contato e tipo outros. A camada ativa representa a camada absorvedora de radiação, na qual as equações do modelo eletrônico são resolvidas. As camadas tipo contato, definidas nas duas extremidades do dispositivo fotovoltaico, determinam o potencial eletrostático do mesmo. Por fim, as camadas tipo outros apenas compõem o modelo óptico do dispositivo. A

estrutura física da célula inorgânica de silício policristalino foi obtida por meio de um modelo genérico encontrado na literatura (Honsberg e Bowden, 2019a). Já as propriedades físicas da célula OPV foram obtidas através de um modelo calibrado para a mistura P3HT:PCBM no próprio software gpvdm (Mackenzie *et al.*, 2012). A estrutura física das duas células fotovoltaicas pode ser visualizada na Fig. 2.

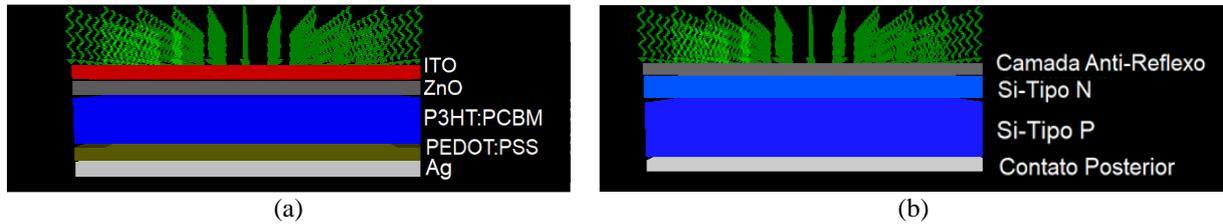


Figura 2 – Modelos físicos das células fotovoltaicas simuladas. (a) Célula orgânica com a mistura P3HT:PCBM como camada ativa. (b) Célula inorgânica de silício policristalino.

Modelo óptico. A quantidade de radiação disponível para conversão em energia elétrica na camada fotoativa foi calculada utilizando o método da matriz de transferência (Katsidis e Siapkis, 2002), que permite mensurar as perdas de energia por reflexão nas interfaces do dispositivo. Para isso, o modelo óptico é alimentado com as propriedades ópticas de cada camada, a saber, o índice de refração (n_λ) e o coeficiente de absorção (α_λ), ambos em função do comprimento de onda. O software possui um banco de dados contendo as propriedades ópticas de diversos materiais obtidas de diversas fontes da literatura.

Modelo eletrônico. A solução do modelo eletrônico compreende apenas a camada ativa do dispositivo, sendo as propriedades eletrônicas definidas apenas para o material desta camada. Ao informar ao modelo qual camada na simulação representa a camada ativa e quais são suas respectivas propriedades eletrônicas, os resultados obtidos na resolução do modelo óptico alimentam a entrada do modelo eletrônico. Os parâmetros eletrônicos da camada ativa da célula de silício foram obtidos em Honsberg e Bowden (2019b), Fonash (2012) e Khelifi *et al.* (2008), enquanto os da célula OPV foram encontrados em Mackenzie *et al.* (2012).

Definidos os parâmetros de entrada dos três modelos do software gpvdm, obteve-se, primeiramente, as respostas espectrais relativas de cada célula solar, utilizando para isso espectros aproximadamente monocromáticos centrados em diferentes comprimentos de onda. Tais respostas espectrais podem ser visualizadas na Fig. 3 e englobam toda a faixa de absorção destas células.

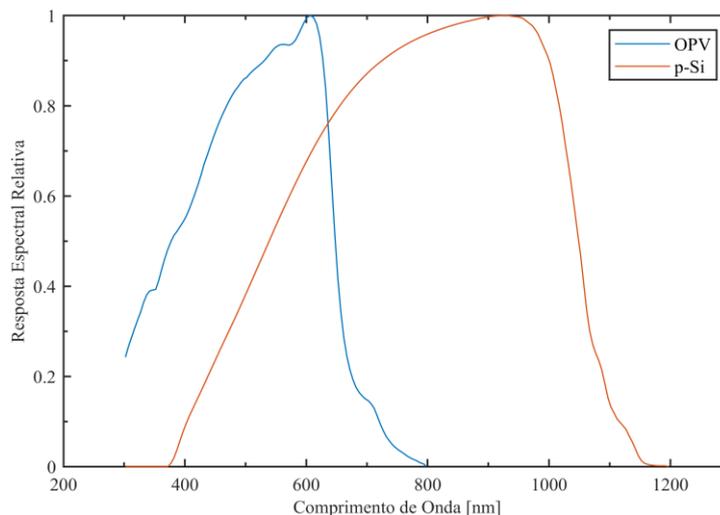


Figura 3 – Respostas espectrais relativas das duas células estudadas. A célula orgânica apresenta melhor aproveitamento de energia em menores comprimentos de onda, enquanto a célula inorgânica tem melhor desempenho na região do infravermelho próximo.

Em seguida, simulou-se o desempenho das duas tecnologias fotovoltaicas sob a iluminação dos diferentes espectros reais anteriormente selecionados, obtendo como resultados dados de eficiência de conversão, potência máxima, tensão de circuito aberto e corrente de curto-circuito, dentre outros, além das curvas I-V. Neste trabalho, porém, apenas a eficiência de conversão foi analisada, tomada como medida suficientemente representativa do desempenho das células.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As distribuições espectrais experimentais, mensuradas pelo espectrorradiômetro para os dois dias selecionados, são apresentadas na Fig. 4, juntamente com o espectro normalizado AM1,5G.

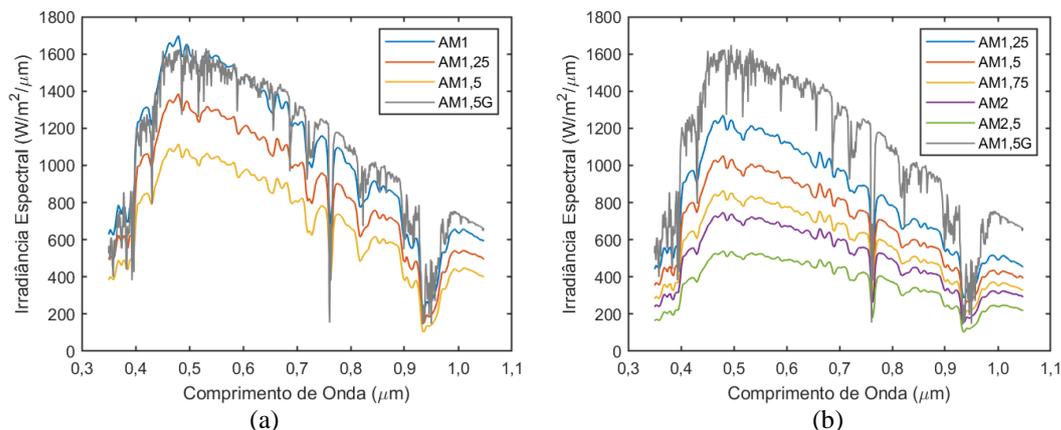


Figura 4 – Distribuições espectrais para os dias e massas de ar selecionados. O espectro AM1,5G, estabelecido pela norma ASTM G173-03, também pode ser visualizado.
(a) Dia de verão (02/02/2019). (b) Dia de inverno (07/07/2019).

Neste trabalho, como pode ser observado, os seguintes valores de massa de ar foram escolhidos para análise: AM1, AM1,25, AM1,5, AM1,75, AM2 e AM2,5. É importante notar, porém, que por conta da limitação imposta na seleção dos dados, que os restringiu para períodos das 8h às 16h, em hora solar, massas de ar maiores que AM1,5 não foram encontradas para o dia de verão. Além disso, uma vez que no inverno os ângulos zenitais não se aproximam de zero, ou seja, o sol tende a permanecer em alturas menos elevadas no céu, não foi possível encontrar um período com AM1 no dia de inverno.

As distribuições espectrais apresentadas na Fig. 4, inclusive a distribuição normalizada AM1,5G, foram utilizadas como dados de entrada no software gpvdm para a realização das simulações. Os outros parâmetros, mensurados pelos demais instrumentos da estação solarimétrica da Escola de Engenharia da UFMG ou calculados pela rotina em MATLAB, podem ser vistos na Tab. 2. As imagens da câmera *fisheye* para cada período selecionado, atestando a condição de céu limpo nos mesmos, estão dispostas na Fig. 5.

Tabela 2 – Dados radiométricos e meteorológicos mensurados ou calculados nos períodos selecionados dos dias de verão e inverno.

Condições Ambientais	Verão (02/02/2019)			Inverno (07/07/2019)				
	AM1,5	AM1,25	AM1	AM2,5	AM2	AM1,75	AM1,5	AM1,25
Hora Solar	08h29	09h13	10h16	08h19	08h56	09h19	10h00	11h34
Ângulo Zenital (°)	52,2	41,9	27,1	68,7	61,9	57,9	51,7	42,9
Irradiância Global Horizontal (W/m ²)	629,86	784,35	968,47	343,27	467,41	537,75	644,03	774,01
Irradiância Direta Normal (W/m ²)	880,72	910,50	952,25	765,20	834,73	864,06	900,99	923,18
Irradiância Difusa Horizontal (W/m ²)	69,24	77,88	82,03	47,93	54,58	55,95	57,93	63,74
Razão Difusa/Global (%)	10,99	9,93	8,47	13,96	11,68	10,40	8,98	8,23
Irradiância Integrada ¹ (W/m ²)	488,39	607,23	744,76	255,87	347,79	400,17	481,91	577,34
Temperatura Ambiente (°C)	25,3	26,5	28,3	13,2	14,0	14,7	15,7	17,4
Umidade Relativa (%)	56,5	54,6	50,3	61,8	48,7	54,4	55,9	61,8
Pressão Atmosférica (hPa)	925	925	925	929	929	930	930	929

¹ Irradiância obtida da integração da distribuição espectral, para o intervalo de medição do espectrorradiômetro.

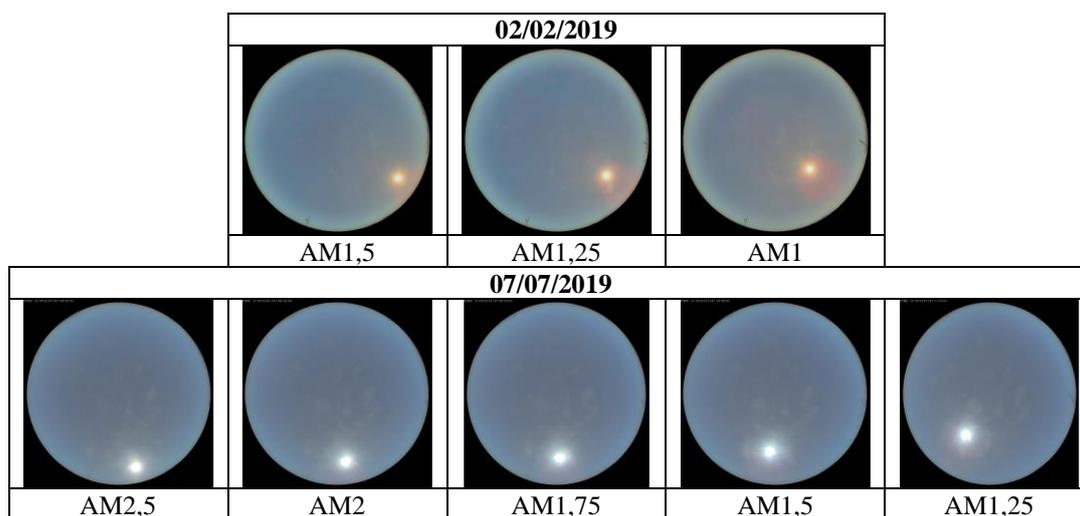


Figura 5 – Imagens da câmera *fisheye* para os dias de verão e inverno.

A ausência de nuvens nos instantes de obtenção dos dados para os dois dias selecionados indica que as variações observadas na distribuição espectral de fato se devem principalmente às alterações na massa de ar, ou em menor relevância, à possível inconstância de fatores atmosféricos não considerados neste trabalho, como a concentração de água, ozônio e outros elementos em suspensão na atmosfera. Em relação aos dados radiométricos e meteorológicos, apesar de se constatar uma alta variabilidade, há uma tendência de aumento da irradiância global e diminuição da irradiância difusa ao se aproximar do meio-dia solar, como era esperado.

Na Fig. 6 são apresentados os valores de eficiência de conversão obtidos por meio da simulação das respostas das células solares orgânica e inorgânica sob as diferentes massas de ar, para os dias 02/02/2019 e 07/07/2019. Como pode ser notado, para ambas as células e em ambos os dias, não existem variações significativas nas eficiências de conversão com as mudanças na massa de ar. Ademais, dificilmente os erros associados aos diversos cálculos numéricos realizados nas simulações, somados às incertezas de medição das irradiâncias espectrais apresentadas pelo espectrorradiômetro (Tab. 1), garantirão que eficiências que se diferem, em termos percentuais, por ordens de grandeza de 10^{-1} sejam estatisticamente diferentes. Isto é reforçado por trabalhos semelhantes encontrados na literatura, onde as incertezas envolvidas na avaliação de efeitos espectrais sobre o desempenho de diferentes tecnologias fotovoltaicas foram estimadas (Dirnberger *et al.*, 2015; Braga *et al.*, 2019).

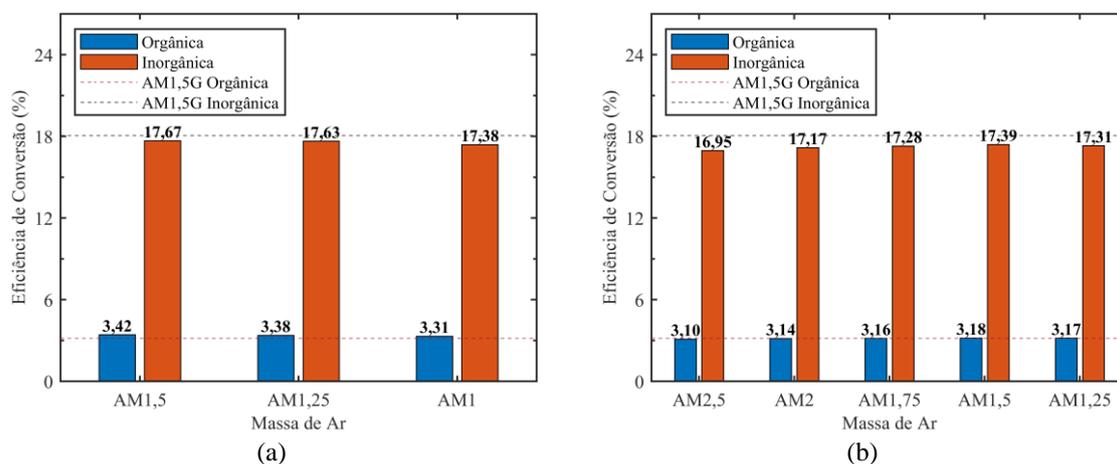


Figura 6 – Eficiências de conversão para as células orgânica (P3HT:PCBM como camada ativa) e inorgânica (silício policristalino) sob a iluminação de espectros medidos experimentalmente (barras) e sob o espectro normalizado AM1,5G (linhas tracejadas). (a) Dia 02/02/2019 (verão). (b) Dia 07/07/2019 (inverno).

Apesar dos valores obtidos para as eficiências aparentemente não indicarem uma grande influência da variação da massa de ar no desempenho das células estudadas, algumas tendências ainda podem ser observadas, principalmente se compararmos os resultados encontrados para as duas células. Assim, de modo a investigar as diferenças no comportamento dessas tecnologias fotovoltaicas com as mudanças na massa de ar, calculou-se a máxima variação percentual da eficiência de conversão para os dois dias analisados. A célula inorgânica apresentou uma máxima variação percentual de 1,66% no verão e de 2,64% no inverno, enquanto que para a célula orgânica obteve-se os valores de 3,31% e 2,73% nos respectivos períodos. Com isso, observa-se que a tecnologia inorgânica em questão apresenta

uma dependência espectral ligeiramente inferior à da tecnologia orgânica, ou seja, variações na distribuição espectral implicam em um menor impacto no desempenho da mesma. De fato, como pode ser visto na Fig. 3, a célula de silício policristalino possui uma curva de resposta espectral mais extensa, abrangendo uma maior quantidade de comprimentos de onda. Já a célula OPV (P3HT:PCBM) tem uma responsividade limitada a uma estreita faixa espectral, na região do visível, o que poderia explicar sua maior sensibilidade às variações no espectro solar.

Em razão da resposta espectral apresentada pela célula orgânica, mais estreita e concentrada em menores comprimentos de onda (visível – faixa do azul), em contraposição àquela apresentada pela célula inorgânica, mais extensa e com melhor aproveitamento de energia em maiores comprimentos de onda (visível – faixa do vermelho – e infravermelho próximo), esperava-se que com o aumento da massa de ar, dada uma maior atenuação nas regiões do visível e ultravioleta, a célula orgânica apresentasse maior impacto no seu desempenho. Todavia este efeito não foi observado. Tanto no dia de verão quanto no dia de inverno ambas as células apresentaram comportamento similar: aumento das eficiências de conversão com a diminuição da massa de ar de AM2,5 até AM1,5 (no inverno) e queda das eficiências de AM1,5 em diante (no inverno e no verão).

Uma das explicações para esse fenômeno está no fato do espectrorradiômetro utilizado coletar dados de irradiância espectral em um intervalo de comprimento de onda restrito, de 350 nm a 1050 nm. Como a faixa de absorção da célula de silício ultrapassa esse limite, chegando até 1200 nm, existe uma parcela de energia na região do infravermelho próximo que seria absorvida por esta célula, mas que, nesta análise, está sendo desconsiderada. Dessa forma, a célula inorgânica simulada é mais sensível às mudanças na distribuição espectral, pois apresenta uma resposta espectral efetiva menos abrangente do que aquela tipicamente apresentada por células de silício policristalino. Outra explicação está na existência de um efeito adicional, intrínseco às variações da massa de ar em condições de céu limpo: as alterações na razão das irradiâncias difusa/global, como pode ser observado na Tab. 2. De fato, como dito anteriormente, há uma tendência de distanciamento do espectro solar da região do infravermelho com a diminuição da massa de ar, e vice-versa, mas há também, associada a esta diminuição, uma tendência de aumento na componente direta da radiação solar, a qual possui uma maior concentração de energia na região do vermelho. Dessa maneira, é o fenômeno mais intenso que determinará para qual direção o espectro solar realmente se deslocará.

A partir dos gráficos apresentados na Fig. 6 também é possível analisar os desvios das eficiências de conversão sob condições reais de irradiação em relação àquelas obtidas sob iluminação do espectro normalizado AM1,5G. Verifica-se, por exemplo, que as eficiências apresentadas pela célula inorgânica estão sempre abaixo da eficiência nominal de 18,05%, enquanto àquelas da célula orgânica mostram-se flutuando acima e abaixo da eficiência nominal de 3,16%. Entretanto, de forma a facilitar essa análise, será utilizado o conceito de eficiência de conversão relativa, calculada pela divisão das eficiências obtidas para cada tecnologia de célula solar, como apresentadas na Fig. 6, pela respectiva eficiência obtida sob o espectro normalizado. Tais eficiências podem ser visualizadas na Fig. 7.

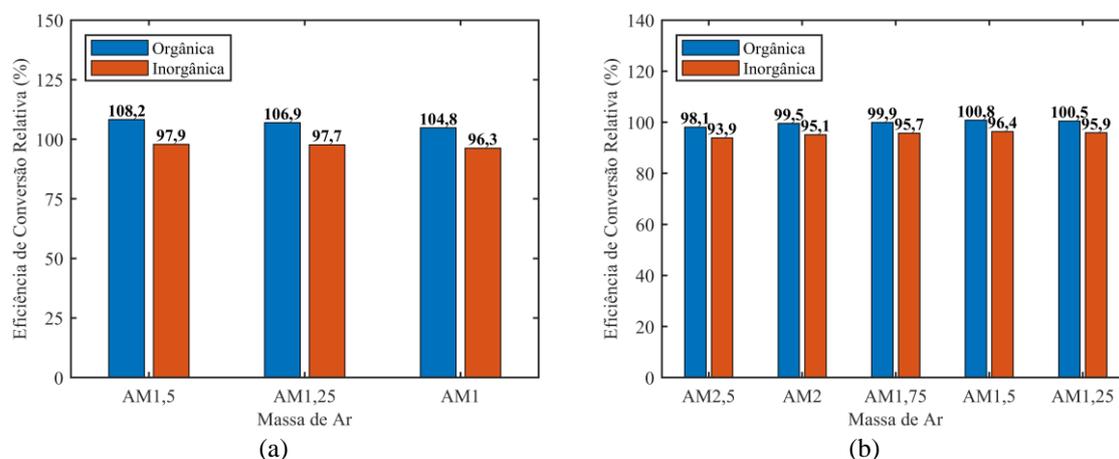


Figura 7 – Eficiências de conversão relativas. (a) Dia 02/02/2019 (verão). (b) Dia 07/07/2019 (inverno).

O conceito de eficiência de conversão relativa se assemelha ao conceito de fator espectral, amplamente utilizado na literatura para quantificar a influência das variações na distribuição espectral da radiação solar sobre o desempenho de tecnologias fotovoltaicas. Rodrigo *et al.* (2017) chegam a descrever estes conceitos como equivalentes, ao assumirem que a razão das correntes de curto-circuito real e nominal é proporcional à razão das potências máximas real e nominal. Dessa forma, será possível comparar os resultados encontrados neste trabalho com outros já publicados.

Como pode ser observado na Fig. 7, a célula orgânica simulada tem um comportamento sazonal, com altos ganhos espectrais no verão (eficiências reais acima da eficiência nominal) e perdas/ganhos espectrais reduzidos no inverno. Isto é mais evidente para a massa de ar AM1,5, para a qual esta tecnologia apresentou uma eficiência real 8,2% maior que àquela obtida sob iluminação do espectro normalizado AM1,5G no dia de verão, enquanto no dia de inverno este ganho foi de apenas 0,8%. Em contraposição, a célula inorgânica simulada apresenta perdas espectrais tanto no inverno quanto no verão, com eficiências de conversão relativas variando de 93,9% a 97,9%. Este resultado está de acordo com o que pode ser encontrado na literatura, pelo menos em termos qualitativos, na qual foram reportados valores de fator

espectral para células de silício policristalino em regiões do Brasil na ordem dos 98-100% (Fernández *et al.*, 2016; Braga *et al.*, 2019). Nestes trabalhos, porém, foram realizadas análises anuais, o que pode justificar as diferenças encontradas. Como discutido anteriormente, soma-se a isto o fato de uma parcela da resposta espectral da célula de silício estar sendo desconsiderada, por limitações do espectrorradiômetro utilizado, o que naturalmente sobre-estima as perdas espectrais apresentadas por esta tecnologia fotovoltaica.

4. CONCLUSÃO

Neste trabalho, analisou-se o impacto da variação da massa de ar no desempenho apresentado por duas tecnologias de células solares, uma orgânica (mistura P3HT:PCBM como camada ativa) e uma inorgânica (silício policristalino), em um dia de verão e outro de inverno, utilizando o software gpvdm para a simulação das respectivas eficiências de conversão em condições reais de irradiação. Os resultados mostraram que a célula orgânica é ligeiramente mais afetada pelas alterações na distribuição espectral em decorrência da mudança da massa de ar, tanto no verão como no inverno, quando comparada com a célula inorgânica. Isso é um indicativo de que células inorgânicas são mais estáveis em relação a variações na distribuição espectral, sob condições de céu limpo. Contudo, apesar das diferenças nas respostas espectrais das duas tecnologias, ambas apresentaram comportamento similar, de queda e aumento da eficiência, com as mudanças da massa de ar.

Outro aspecto importante identificado por este trabalho é a existência de uma divergência entre as eficiências obtidas sob iluminação do espectro normatizado AM1,5G e sob iluminação do espectro AM1,5 experimental, ocorrendo de forma mais evidente para a célula orgânica. Estas descobertas sugerem que a adoção de um espectro normatizado diferente do AM1,5G pode representar melhor as condições de irradiação às quais células fotovoltaicas são mais frequentemente submetidas, em regiões com características atmosféricas e geográficas similares às de Belo Horizonte.

Os métodos apresentados nesta pesquisa podem ser aplicados a outros tipos de células solares, utilizando dados meteorológicos e radiométricos de outras partes do mundo. Sendo assim, o uso da metodologia apresentada é útil para melhorar a compreensão de como as variações na distribuição espectral da radiação solar impactam a resposta de células fotovoltaicas, auxiliando na previsão do desempenho de diferentes tecnologias sob condições reais de irradiação. Esse método também se mostra como uma alternativa para o teste padrão de dispositivos fotovoltaicos, o qual geralmente é realizado em laboratório utilizando simuladores solares de alto custo e naturalmente requer a fabricação de protótipos para serem testados.

Em razão de limitações, o modelo óptico do software gpvdm não leva em consideração os efeitos direcionais da radiação e, portanto, assumiu-se um ângulo de incidência normal nas simulações para as diferentes massas de ar, ângulo para o qual as propriedades ópticas das camadas do dispositivo fotovoltaico, como refletância e absorptância, são definidas por padrão no gpvdm. Por isso, sugere-se que o modelo óptico do software seja aprimorado em versões futuras, permitindo também avaliar a influência do ângulo de incidência da radiação na resposta espectral de células solares.

Contudo, para tirar conclusões mais assertivas a respeito do impacto da distribuição espectral no desempenho de células fotovoltaicas, estudos devem ser feitos para períodos maiores de tempo, uma vez que mesmo em dias de céu limpo mudanças circunstanciais em parâmetros como quantidade de água precipitável e espessura óptica de aerossóis podem ocorrer, influenciando nos resultados.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). Os autores também agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFMG pelo auxílio no desenvolvimento deste trabalho e em especial à Nexa Resources pelo suporte financeiro.

REFERÊNCIAS

- Alonso-Abella, M., Chenlo F., Nofuentes, G., Torres-Ramírez, M., 2014. Analysis of spectral effects on the energy yield of different PV (photovoltaic) technologies: the case of four specific sites, *Energy*, vol. 67, pp. 435-443.
- American Society for Testing and Materials, 2012. ASTM G173-03: Standard tables for reference solar spectral irradiances: direct normal and hemispherical on 37° tilted surface, ASTM International.
- Antonanzas-Torres, F., Urraca, R., Polo, J., Perpiñán-Lamigueiro, O., Escobar, R., 2019. Clear sky solar irradiance models: a review of seventy models, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 107, pp. 374-387.
- 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, *Solar Energy*, v. 188, p. 976-988.
- 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, *Solar Energy*, v. 111, p. 82-96.
- Duffie, J. A., Beckman, W. A., 2013. *Solar Engineering of Thermal Processes*, John Wiley & Sons.

- Eke, R., Betts, T. R., Gottschalg, R., 2017. Spectral irradiance effects on the outdoor performance of photovoltaic modules, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 69, pp. 429-434.
- Fernández, E. F., Soria-Moya, A., Almonacid, F., Aguilera, J., 2016. Comparative assessment of the spectral impact on the energy yield of high concentrator and conventional photovoltaic technology, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, v. 147, p. 185-197.
- Fonash, S., 2012. *Solar Cell Device Physics*, Elsevier.
- Honsberg, C. B., Bowden, S. G., 2019a. Silicon Solar Cell Parameters, PVEducation. Disponível em: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/design-of-silicon-cells/silicon-solar-cell-parameters>. Acesso em: 1 nov. 2019.
- Honsberg, C. B., Bowden, S. G., 2019b. General Properties of Silicon, PVEducation. Disponível em: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/materials/general-properties-of-silicon>. Acesso em: 1 nov. 2019.
- Hulstron, R. L., 1989. *Solar Resources*, MIT Press.
- Iqbal, M., 1983. *An Introduction to Solar Radiation*, Academic Press.
- Kasten, F., Young, A., 1989. Revised optical air mass tables and approximation formula, *Applied Optics*, vol. 28, n. 22, pp. 4735-4738.
- Katsidis, C. C., Siapakas, D. I., 2002. General transfer-matrix method for optical multilayer systems with coherent, partially coherent, and incoherent interference, *Applied Optics*, vol. 41, n. 19, pp. 3978-3987.
- Khelifi, S., Verschraegen, J., Burgelman, A., Belghachi, A., 2008. Numerical simulation of the impurity photovoltaic effect in silicon solar cells, *Renewable Energy*, vol. 33, n. 2, pp. 293-298.
- Litjens, G. B. M. A., 2013. Investigation of spectral effects on photovoltaic technologies by modelling the solar spectral distribution, *Dissertação de Mestrado, Fraunhofer ISE, University of Utrecht, Alemanha*.
- MacKenzie, R. C. I., Shuttle, C. G., Chabiny, M. L., Nelson, J., 2012. Extracting microscopic device parameters from transient photocurrent measurements of P3HT:PCBM solar cells, *Advanced Energy Materials*, vol. 2, n. 6, pp. 662-669.
- MacKenzie, R. C. I., 2019. GpvdM User Manual, gpvdM – Nottingham University. Disponível em: <https://www.gpvdM.com/docs.html>. Acesso em: 1 set. 2019.
- Reda, I., Andreas, A., 2008. Solar position algorithm for solar radiation applications, NREL Report No. TP-560-34302.
- Reno, M. J., Hansen, C. W., 2016. Identification of periods of clear sky irradiance in time series of GHI measurements, *Renewable Energy*, vol. 90, pp. 520-531.
- 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, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, v. 163, p. 73-90.
- Sandia National Laboratories, 2015. PVLIB Toolbox for MATLAB, versão 1.4, PV Performance Modeling Collaborative (PVPMC). Disponível em: https://pvpmc.sandia.gov/applications/pv_lib-toolbox/. Acesso em: 23 ago. 2019.
- Shockley, W., Read, W. T., 1952. Statistics of the recombinations of holes and electrons, *Physical Review*, vol. 87, n. 5, p. 835.
- Vignola, F., Michalsky, J., Stoffel, T., 2016. *Solar and Infrared Radiation Measurements*, CRC press.

PERFORMANCE ANALYSIS OF ORGANIC AND INORGANIC PHOTOVOLTAIC CELLS UNDER DIFFERENT AIR MASSES USING NUMERICAL SIMULATION

Abstract. *The performance of photovoltaic cells is strongly affected by variations in the spectral distribution of solar radiation incident on the Earth's surface. One of the factors that cause this variation is related to the thickness of atmosphere through which the sun's rays have to cross until reach the ground and is called Air Mass (AM). This paper aims to present a methodology to evaluate the effects of changes in air mass on photovoltaic cells performance, utilizing experimental data obtained from a solar monitoring station at the UFMG School of Engineering. To this end, using a clear sky detection algorithm and PVLIB library functions, both developed by Sandia National Laboratories (USA), a MATLAB routine was implemented to select spectral irradiance data under different air masses during clear periods on a summer day and a winter day. Subsequently, the photovoltaic devices numerical simulation software called gpvdM was used to simulate the performance of an organic solar cell and an inorganic polycrystalline silicon solar cell under irradiation conditions defined by the selected spectra. Simulation results show a lower spectral dependence for the silicon cell, especially on the summer day. As an example, the maximum percentage changes in power conversion efficiency on this day, observed between air masses AM1.5 and AM1, were 3.31% and 1.66% for the organic and inorganic solar cells, respectively. The results also point to a divergence between the efficiencies obtained under experimentally measured AM1.5 spectrum illumination and under standardized AM1.5G spectrum illumination. For the locality in question, this difference, in percentage terms, reached up to +8.2% for the organic cell in the summer and -3.6% for the silicon cell in the winter.*

Key words: Air Mass, Power Conversion Efficiency, Photovoltaic Cells.