

INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA MEDIDA DE IRRADIÂNCIA SOLAR COM CÉLULAS DE REFERÊNCIA DE SILÍCIO CRISTALINO

Fabiano Perin Gasparin – gasparin.fabiano@gmail.com

Alexandre José Bühler – purpleblind@yahoo.com.br

César Wilhelm Massen Prieb – cprieb@ufrgs.br

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, PROMEC – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Resumo. A medida da irradiância solar, de forma confiável e precisa, é fundamental para a qualificação das características elétricas de dispositivos fotovoltaicos. A utilização de células fotovoltaicas de referência com mesma tecnologia que o dispositivo a ser medido é muito conveniente, principalmente pela compatibilidade na resposta espectral e pelas propriedades óticas semelhantes. Por outro lado, a corrente de curto-circuito de uma célula fotovoltaica (parâmetro diretamente relacionado à intensidade da irradiância solar) também é influenciada pela temperatura por um coeficiente térmico que pode apresentar valores entre $0,02\%^{\circ}\text{C}^{-1}$ e $0,1\%^{\circ}\text{C}^{-1}$ para células de silício cristalino. Embora essa influência seja pequena, ela pode ser suficiente para provocar erros na ordem de até 2% na medida da irradiância, dependendo da diferença entre a temperatura na qual a célula foi calibrada e a temperatura na qual ela estiver na ocasião do ensaio. Neste trabalho propõe-se uma metodologia para a determinação do coeficiente de variação da corrente de curto-circuito com a temperatura (α) de células de referência. Os coeficientes encontrados para duas células de referência foram aplicados para a correção da corrente de curto-circuito com a temperatura, avaliando assim o erro na medida da irradiância devido à utilização destas células em uma temperatura diferente da temperatura de calibração.

Palavras-chave: Energia solar, Célula fotovoltaica, Irradiância solar.

1. INTRODUÇÃO

A medida da irradiância solar é fundamental na caracterização de dispositivos fotovoltaicos e normalmente é aquela que possui a maior incerteza absoluta associada à sua determinação experimental (tipicamente superior a 2%). Para a medida de irradiância solar é possível a utilização de uma célula de referência de silício cristalino, o que apresenta importantes vantagens quando utilizada para a caracterização de dispositivos fotovoltaicos, tais como:

- Não apresenta problema de descasamento espectral, desde que o dispositivo a ser caracterizado seja da mesma tecnologia que a célula de referência.
- Possui um tempo de resposta extremamente rápido (da ordem de microssegundos), capaz de responder a possíveis variações instantâneas da irradiância solar ao longo da medida de uma curva I - V (corrente *versus* tensão) de um módulo fotovoltaico.

A medida da irradiância solar com células de referência de silício é feita valendo-se do fato de que a corrente de curto-circuito (I_{SC}) é diretamente proporcional à irradiância solar incidente. A corrente de curto-circuito das células de referência é normalmente medida por meio da queda de tensão em um resistor *shunt* conectado em paralelo aos terminais de saída da célula. De acordo com a norma internacional IEC 60904-2 (2007), o valor da resistência *shunt* deve ser escolhido de forma a assegurar que o dispositivo de referência opere suficientemente perto da condição de curto-circuito. Para tanto, a norma estabelece que a queda de tensão no resistor não deve ser maior do que 3% da tensão de circuito aberto (V_{OC}) da célula, que tipicamente é da ordem de 0,6 V para uma temperatura de célula de 25°C.

Para a utilização de células de silício como instrumentos de medida de irradiância solar, além da corrente de curto-circuito, outro parâmetro também considerado é a variação da corrente de curto-circuito com a temperatura, representada por um coeficiente térmico denominado α . A fotocorrente gerada na célula aumenta ligeiramente com a temperatura, devido em parte ao aumento do comprimento de difusão dos portadores minoritários de carga e em parte devido ao estreitamento da banda proibida, que desloca o limiar de absorção para fótons de menor energia (Lorenzo, 2006). A diminuição da energia do *gap* do material com o aumento da temperatura pode ser vista como um aumento da energia dos portadores de carga do material. Desta forma, fótons de menor energia passam a ser capazes de criar pares elétrons-lacunas. Isto pode ser representado por um deslocamento da curva de resposta espectral do silício para a região de menor energia do espectro solar, ou seja, de maior comprimento onda. Um valor típico encontrado na literatura para este coeficiente em células de silício cristalino é de $0,06\% \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$. Embora este coeficiente possa ser desprezado em inúmeras aplicações energéticas, ele é importante no momento de medir irradiância solar em ensaios para caracterização das características fotoelétricas de módulos fotovoltaicos. A fim de exemplificação, se a célula de referência for calibrada em uma temperatura de 25°C, que é a temperatura padrão para testes de caracterização de dispositivos

fotovoltaicos e, em outro momento, esta célula estiver sendo usada para medir irradiância solar, em um ensaio de caracterização de um dispositivo fotovoltaico, estando a uma temperatura de 60 °C, o erro pode ser da ordem de 2% considerando um valor de α típico de $0,6\% \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

O objetivo principal deste trabalho é determinar os coeficientes de variação da corrente de curto-circuito com a temperatura de duas células de silício monocristalino (m-Si) encapsuladas. O procedimento é realizado utilizando a radiação solar e, portanto é apresentada uma técnica para determinar este coeficiente levando em conta as variáveis que ocorrem durante o ensaio sob iluminação natural. A partir da determinação dos coeficientes α , é efetuada uma correção no valor da irradiância medida levando em conta o efeito provocado pela temperatura na corrente de curto-circuito das células de referência.

2. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Para determinar o coeficiente de variação da corrente de curto-circuito com a temperatura (α), é necessário medir a corrente de curto-circuito, sob a mesma irradiância solar, mas sob diferentes temperaturas de célula. Esta tarefa é facilitada quando realizada com o uso de simuladores solares, onde é possível tanto o controle da temperatura como da irradiância incidente. Entretanto, na metodologia adotada neste trabalho foi utilizado o Sol como fonte luminosa, onde a própria radiação solar aquece a célula ao mesmo tempo em que se mede a corrente de curto-circuito.

Durante o procedimento de medida sob iluminação natural, a irradiância solar pode apresentar pequenas variações de intensidade no intervalo de tempo necessário para atingir o objetivo proposto, mesmo em dias de céu extremamente limpo. Como a variação da corrente de curto-circuito com a temperatura apresenta um valor tipicamente menor que $0,1\% \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, ao passo que as flutuações de irradiância solar podem atingir facilmente 5% em um intervalo de tempo de alguns minutos, estas duas variáveis precisam ser isoladas para tornar possível a determinação do coeficiente α .

Com o objetivo de isolar o efeito das duas variáveis envolvidas na variação da corrente de curto-circuito, é necessária a utilização de um sensor como referência para a medida de irradiância que não apresente variação do sinal de saída com a temperatura. Uma possibilidade é a utilização de um piranômetro térmico que possui compensação de temperatura. Entretanto, este sensor apresenta um tempo de resposta muito grande para ser utilizado com este objetivo, tipicamente de 1 segundo de acordo com as especificações do fabricante, (Eppley, 2010). Além disto, a diferença na construção e no princípio de funcionamento faz com que o efeito da temperatura na corrente de curto-circuito da célula de silício não possa ser isolado com a precisão necessária. Uma possibilidade viável para utilização como medida de referência da irradiância solar é medir a corrente de curto-circuito de uma célula de silício cuja temperatura se mantenha constante ou com uma variação pequena durante o ensaio. Esta célula deve ser montada no mesmo plano da célula em teste e estar sujeita às mesmas condições de irradiância.

A fim de isolar as demais variáveis que possam se sobrepor ao efeito de α , foi utilizada para a elaboração deste trabalho uma célula de mesma tecnologia, com resposta espectral e temporal similares à das células sob teste. Esta célula possui ainda uma constituição idêntica à das células ensaiadas de forma a evitar efeitos devido ao ângulo de incidência da radiação solar, que poderiam ser diferentes entre a célula utilizada como referência e a célula em teste.

O Laboratório de Energia Solar da UFRGS dispõe de uma célula de referência compensada modelo Si – 10 TC-K, (Ingenieurbüro Mencke & Tegtmeyer, 2010). Esta célula fornece um sinal de saída correspondente a irradiância solar que é compensado devido ao efeito da temperatura na corrente de curto-circuito da célula. Esta compensação é feita por um circuito eletrônico que é alimentado com uma tensão em corrente contínua. Esta célula fornece um sinal de saída de zero a 10 V, proporcional à irradiância solar incidente.

O coeficiente α pode ser determinado com a utilização de uma célula de referência qualquer, desde que a mesma se mantenha em regime estacionário enquanto as células nas quais se pretende determinar α se mantenham em regime transiente. Para demonstrar que a técnica de determinação do coeficiente α pode ser realizada com uma célula de referência qualquer, foi utilizada neste trabalho, além da célula compensada, outra célula de m-Si, denominada PS004 como referência na medida da irradiância. A temperatura da célula PS004 foi monitorada durante todos os ensaios para determinação de α , de forma a assegurar que esta temperatura não apresentasse variação significativa durante os ensaios. Utilizando estas duas células como referência é possível comparar os resultados obtidos na determinação de α , e assim verificar a confiabilidade no método proposto para a determinação deste coeficiente.

Embora a medida da irradiância solar por meio de uma célula de referência possua uma incerteza implícita decorrente da calibração, que certamente é maior que o efeito provocado pelo coeficiente α , isto não impede o seu uso em ensaios com a finalidade da determinação do coeficiente α . Como o objetivo principal do ensaio é isolar o efeito da temperatura e da irradiância solar na variação de I_{SC} , a incerteza no valor absoluto da irradiância solar não afeta os resultados, uma vez que as medidas são todas relativas a uma mesma referência.

Para a realização deste trabalho, foram testadas duas células distintas que estão relacionadas na Tab. 1.

Tabela 1 – Células de referência utilizadas para a determinação do coeficiente de variação da corrente de curto-circuito com a temperatura.

Fabricante / Modelo	Tecnologia	I_{SC} (1000 W/m ²) a 25°C
Isofotón	Si-m	3,27 A
BP solar	Si-m - Saturno	4,85 A

Dentre as variáveis medidas para a elaboração deste trabalho estão: o sinal de um piranômetro térmico Eppley PSP, para determinação da irradiância global, o sinal da célula compensada, a corrente de curto-circuito da célula PS004, a corrente de curto-circuito das duas células em teste, a temperatura das células em teste e a temperatura da célula PS004. As temperaturas foram medidas por meio de sensores Pt100 fixados na parte posterior das células e conectados a 4 fios ao instrumento de medida.

Na Fig. 1 são apresentadas as células utilizadas para a realização deste trabalho, juntamente com o piranômetro Eppley PSP. O conjunto de instrumentos foi montado no mesmo plano, inclinado a 34 ° em relação ao zênite e voltado para direção norte. Este ângulo é aproximadamente o ângulo de zênite ao meio dia solar na cidade de Porto Alegre – RS nos dias em que as medidas foram realizadas. O conjunto de instrumentos foi montado neste ângulo para garantir uma pequena variação de irradiância ao longo dos ensaios, uma vez que estes se realizaram sempre próximos do meio-dia solar.

Pode-se observar que um dos dispositivos utilizados é constituído por duas células com as mesmas características e encapsuladas em uma única moldura. Trata-se da célula de referência BP Solar, onde uma das células está conectada ao resistor *shunt* para medida da corrente de curto-circuito e a outra está em circuito aberto. A tensão de circuito aberto pode ser medida e, por meio desta, a temperatura equivalente da célula pode ser determinada utilizando o procedimento proposto pela IEC 60904-5, (1996). Esta é uma alternativa para a medida indireta da temperatura da célula de referência.



Figura 1 – Sensores de irradiância solar utilizados neste trabalho. Da esquerda para a direita: célula BP Solar, célula Isotón, célula compensada (acima), célula PS004 (abaixo) e piranômetro PSP Eppley.

Todos os dados experimentais utilizados neste trabalho foram medidos por meio de uma unidade de aquisição de dados modelo Agilent 39470A, (Agilent Technologies, 1999) cujos sinais estão relacionados na Tab. 2.

Tabela 2 – Sinais medidos

Canal	Sinal	Escala	Resolução
#1	Piranômetro Eppley	100 mV DC	5 ½ dígitos
#2	Célula compensada	10 V DC	5 ½ dígitos
#3	Célula isofoton (I_{SC})	100 mV DC	6 ½ dígitos
#4	Célula BP solar (I_{SC})	100 mV DC	6 ½ dígitos
#5	Célula BP solar (V_{OC})	1 V DC	5 ½ dígitos
#6	Célula de referência P004 (I_{SC})	100 mV DC	5 ½ dígitos
#7	Temperatura da célula Isotón	RTD 4 fios (°C)	0,1 °C
#8	Temperatura da célula PS004	RTD 4 fios (°C)	0,1 °C
#9	Temperatura da célula BP solar	RTD 4 fios (°C)	0,1 °C

As medidas foram realizadas por meio do seguinte procedimento:

- Deixam-se expostos à radiação solar as células utilizadas como referência e o piranômetro, a fim de atingirem uma temperatura de estabilização. Antes do ensaio as células sob teste ficam protegidas da radiação solar.
- As células sob teste, inicialmente à temperatura ambiente são então expostas à radiação solar em um horário próximo do meio-dia solar, a fim de que a irradiância não varie significativamente ao longo do ensaio.

- A corrente de curto-circuito e a temperatura das células sob teste são medidas enquanto permanecem em aquecimento.
- As medidas destes sensores são tomadas, em dias de céu limpo, em intervalos regulares de 10 s. Em cada varredura, a diferença máxima de tempo entre a primeira e a última medida dos sensores de irradiância foi de 0,6 s, decorrente da multiplexação na medida dos sinais.
- Os dados medidos são exportados e trabalhados em uma planilha eletrônica de cálculos.

As correntes de curto-circuito das células em teste são corrigidas para uma mesma condição de irradiância solar de acordo com a Eq. 1, sendo utilizada como referência duas células distintas, a célula compensada e a célula PS004. A célula compensada possui uma constante de calibração de $0.972 \text{ V W}^{-1} \text{ m}^{-2}$, calibrada de maneira independente junto ao Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, centro de pesquisa e desenvolvimento do governo da Espanha. A constante de calibração da célula PS004 é de $30,12 \text{ } \mu\text{V W}^{-1} \text{ m}^{-2}$, definida em termos da queda de tensão em um resistor *shunt* conectado em paralelo com a célula.

$$I_{SC2} = I_{SC1} \times \frac{1000}{G_1} \quad (1)$$

onde:

I_{SC2} : corrente de curto-circuito da célula em teste corrigida para 1000 W/m^2 .

I_{SC1} : corrente de curto-circuito medida na célula em teste, [A].

G_1 : irradiância solar medida pela célula utilizada como referência, [W/m^2].

A partir das medidas de corrente trasladadas para a mesma condição de irradiância, é possível observar a variação da corrente de curto-circuito em função somente da temperatura e assim por meio de uma regressão linear são determinados os coeficientes α das células em teste.

O tempo necessário para as células em teste atingirem a estabilização de temperatura foi de aproximadamente 15 minutos, uma vez em processo de aquecimento e tendo partido de uma temperatura ambiente em torno de 25°C . Durante este tempo, a irradiância solar média foi de 980 W/m^2 com uma variação de 2%. A Fig. 2 ilustra o comportamento da temperatura das duas células em teste e da temperatura da célula PS004, além do comportamento da irradiância solar durante o intervalo de tempo de um dos ensaios realizados.

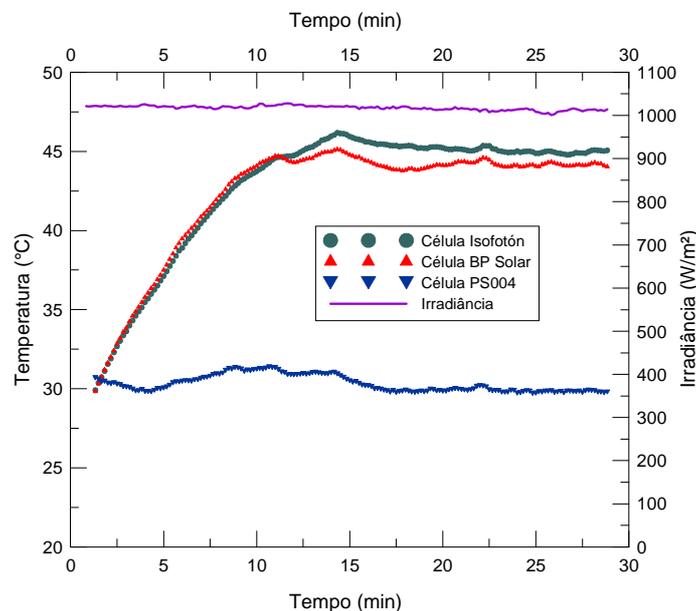


Figura 2 – Comportamento da temperatura e da irradiância solar ao longo de um dos ensaios para a determinação de α .

Uma vez determinado o coeficiente α , a irradiância solar é corrigida devido à temperatura da célula por meio da Eq. 2. (IEC 60904-10, 1999)

$$G_0 = \frac{G_{ref} \times I_{SC1}}{I_{ref}} \times [1 - \alpha(T_m - T_{ref})] \quad (2)$$

onde:

G_0 : irradiância corrigida, $[W/m^2]$.

G_{ref} : irradiância de referência, $[W/m^2]$.

I_{ref} : corrente de curto-circuito de referência, $[A]$.

α : coeficiente de variação da corrente de curto-circuito com a temperatura, $[^{\circ}C^{-1}]$.

T_m : temperatura medida, $[^{\circ}C]$.

T_{ref} : temperatura de referência, na qual a célula de referência foi calibrada $[^{\circ}C]$.

3. RESULTADOS OBTIDOS

Os valores das correntes de curto-circuito das células em análise, bem como suas temperaturas, foram medidos em três ocasiões distintas. A Fig. 3 apresenta os gráficos de um dos ensaios onde foi obtida a variação da corrente de curto-circuito com a temperatura das células em teste. Tanto na Fig. 3(a), quanto na Fig. 3(b) estão representadas duas curvas distintas de variação de I_{SC} com a temperatura. Cada uma destas curvas é referente aos valores medidos de I_{SC} e posteriormente corrigidos para a variação de irradiância, por meio da Eq. (1), utilizando tanto a célula compensada quanto à célula PS004 como referência na medida de irradiância. No gráfico da Fig. 3(a) observa-se o comportamento linear e o alto coeficiente de correlação obtido para a célula BP solar e na Fig. 3(b) o resultado apresentado é relativo à célula Isofotón.

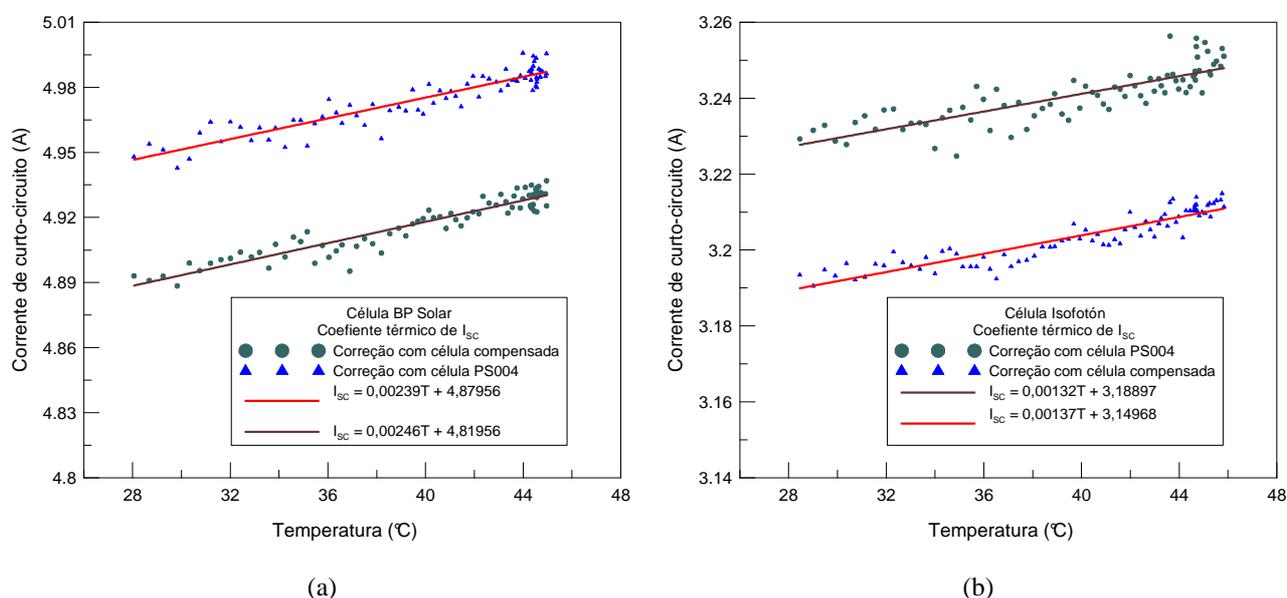


Figura 3 – Variação de I_{SC} com a temperatura utilizando duas células de referência distintas para translação de I_{SC} a um valor de referência, (a) célula BP Solar, (b) célula Isofotón.

Para cada ensaio foram obtidos dois conjuntos de dados, relativos às duas células de referência utilizadas para transladar os valores de I_{SC} das células em teste. O valor de α foi obtido pela média das seis medidas resultantes e seus valores são apresentados na Tab. 3.

Tabela 3 – Valores medidos de α utilizando tanto a célula compensada, quanto a célula PS004 como referência para correção da corrente de curto-circuito com a irradiância.

Correção da irradiância:	Medida:	α (% $I_{SC}^{\circ}C^{-1}$):BP Solar	α (% $I_{SC}^{\circ}C^{-1}$):Isfotón
Célula compensada	#1	0,053	0,033
	#2	0,050	0,039
	#3	0,057	0,031
Célula PS004	#1	0,056	0,035
	#2	0,050	0,034
	#3	0,049	0,030
	Média	0,053	0,033

Além da determinação do coeficiente α , a partir dos dados medidos, foi possível obter uma constante de calibração, por meio de uma relação linear passando pelo ponto (0,0), das correntes de curto-circuito das células em teste em função da irradiância solar medida com o piranômetro. A Fig. 4 apresenta valores medidos da corrente de

curto-circuito da célula BP Solar em função da irradiância solar medida pelo piranômetro. Por meio dos dados apresentados na Fig. 4 foi possível determinar uma constante de calibração para a célula BP Solar. Estes dados foram obtidos com a célula a uma temperatura média de 45 °C em um horário próximo do meio-dia solar. Na Fig. 5 são apresentados os dados relativos à calibração da célula Isotofón, também em função do piranômetro.

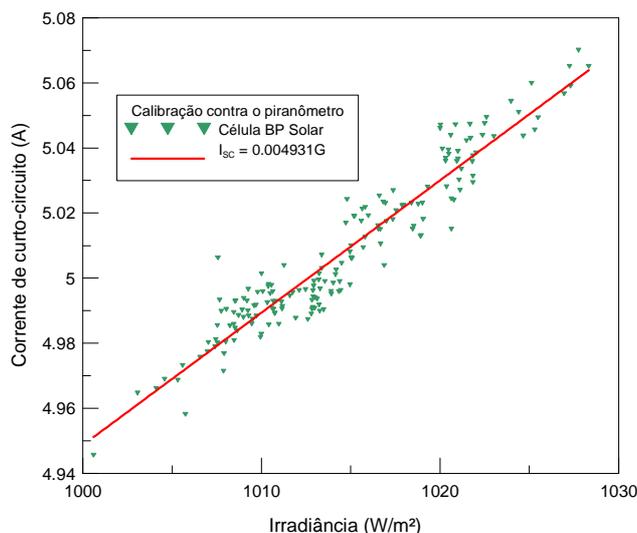


Figura 4 – Calibração da célula BP Solar, temperatura média da célula de 45°C, com relação a um piranômetro térmico da marca Eppley.

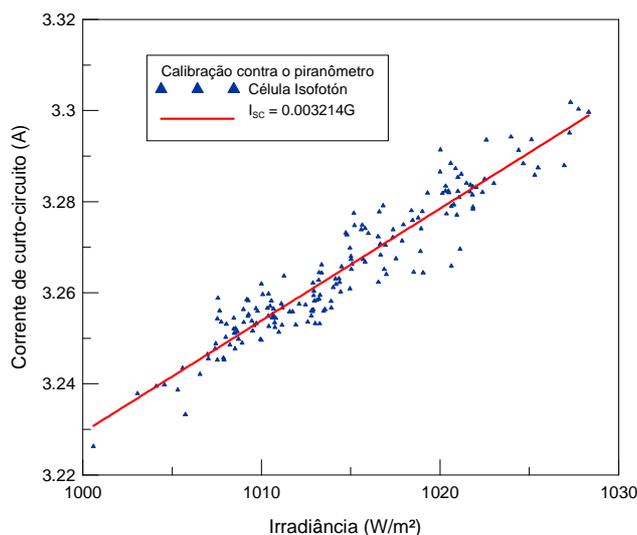


Figura 5 – Calibração da célula Isotofón, temperatura média da célula de 45°C, com relação a um piranômetro térmico da marca Eppley.

Dispondo da constante de calibração das duas células, e de posse do valor de α em percentual da corrente de curto-circuito já é possível estimar o erro na determinação da irradiância solar devido à variação da corrente de curto-circuito com a temperatura. Dessa forma, a fim de ilustrar graficamente esta diferença e também para ilustrar que a metodologia experimental aplicada é eficiente foi realizado o seguinte procedimento:

- Cada valor de I_{SC} medido na célula é convertido em um valor de irradiância corrigido, utilizando a Eq. (2) e comparado com o valor de irradiância proveniente dos demais instrumentos de referência.
- É representado graficamente a diferença percentual entre os valores de irradiância medidos nos instrumentos de referência (piranômetro, célula PS004 e célula compensada) e a célula em teste com e sem a correção de temperatura feita com a Eq. (2).

A Fig. 6 apresenta a diferença entre a irradiância medida por meio do piranômetro e por meio da célula BP Solar com e sem correção de temperatura ao longo de um ensaio de aquecimento da mesma com aproximadamente

30 minutos. No mesmo gráfico é representada a temperatura da célula ao longo do ensaio. Como é possível observar, essa diferença pode chegar a 1% do valor de referência da irradiância. Esta incerteza normalmente é considerada baixa em medidas de radiação solar, porém é um erro mensurável e que pode ser minimizado, principalmente na caracterização de dispositivos fotovoltaicos. Como pode também ser observado na Fig. 6 esta diferença se reduz para uma dispersão em torno da referência quando a temperatura da célula atinge sua temperatura de calibração ou quando o valor de irradiância medido pela célula em teste é corrigido com a temperatura.

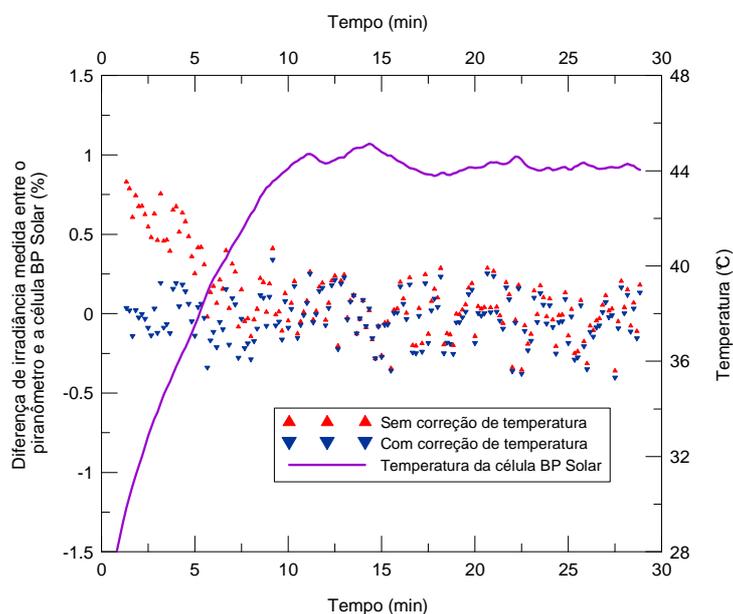


Figura 6 – Diferença percentual entre a irradiância medida pelo piranômetro e pela célula BP Solar ao longo do aquecimento da mesma, com e sem correção de temperatura.

Na Fig. 7 é apresentado um gráfico semelhante ao da Fig. 6, durante o aquecimento da célula BP solar, porém o instrumento de referência utilizado é a célula compensada. Verifica-se que a diferença entre elas se reduz quando é aplicada a correção por temperatura, e que se mantém constante em torno de zero.

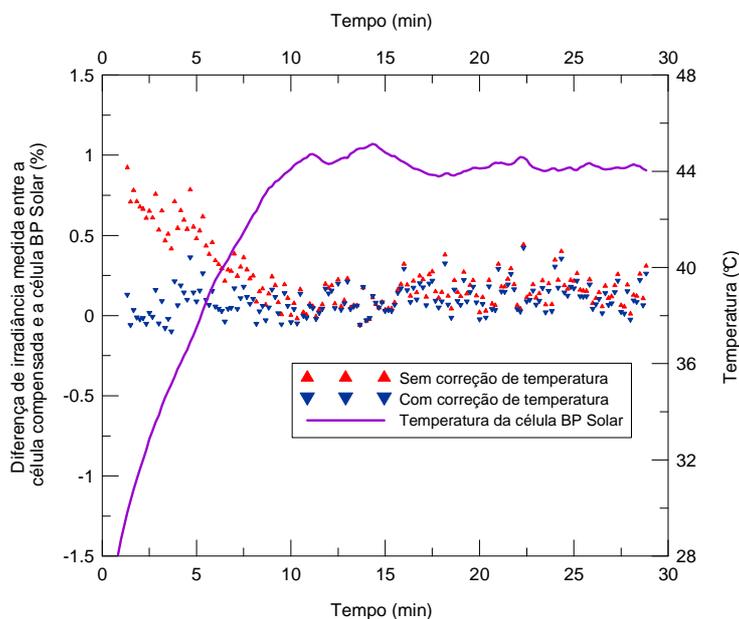


Figura 7 – Diferença percentual entre a irradiância medida pela célula compensada e pela célula BP Solar ao longo do aquecimento da mesma, com e sem correção de temperatura.

Na Fig. 8 os dados representados estão corrigidos pelo valor da célula de referência PS004. Após a temperatura da célula BP Solar se aproximar de sua temperatura de calibração a diferença entre os valores medidos de irradiância proveniente desta célula e da célula PS004 estabiliza-se em torno de -1%. Esta diferença é proveniente de diferentes

calibrações, tratando-se apenas de um deslocamento, uma vez que a constante medida para a célula PS004 utilizada foi obtida independentemente, e com outro instrumento de referência.

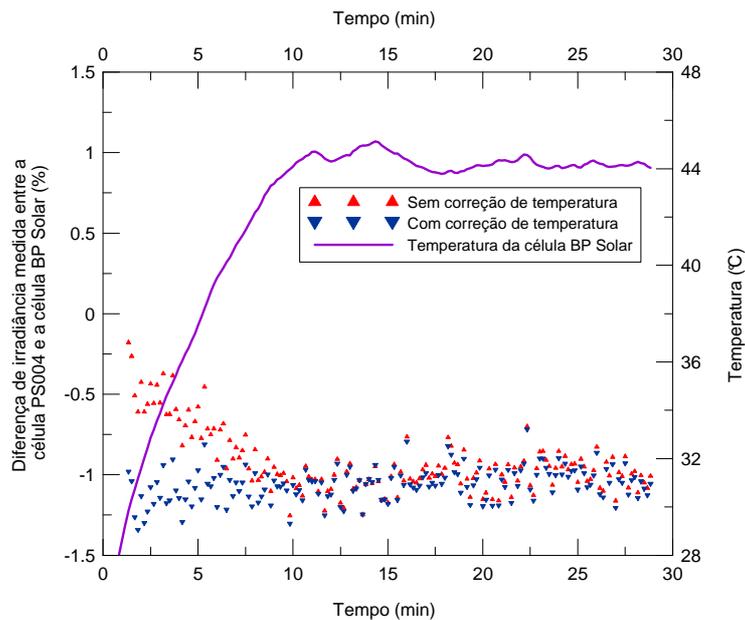


Figura 8 – Diferença percentual entre a irradiação medida pela célula PS004 e pela célula BP Solar ao longo do aquecimento da mesma, com e sem correção de temperatura.

Como se pode observar através das Figs. 6 a 8, o erro médio na medida de irradiação da célula BP Solar foi da ordem de 1% nos pontos medidos com a maior diferença de temperatura em relação à temperatura de calibração das células. Considerando que a temperatura de calibração foi de 45°C e a temperatura da célula, no início das medidas era da ordem de 28°C, o erro na medida de irradiação pela célula BP Solar chegou a 1% para uma diferença de 17°C. Entretanto, este erro pode chegar facilmente a 2% se a diferença entre a temperatura na qual a célula estiver operando e a temperatura na qual ela foi calibrada for maior. Observa-se também que o erro na medida da irradiação pela célula BP Solar cai rapidamente à medida que a diferença entre a temperatura da célula e a temperatura de calibração diminui.

A incerteza associada à medição da irradiação solar com uma célula de silício é tipicamente superior a 2%, isto considerando seu processo de calibração e os instrumentos de medida utilizados para tal processo. Aplicando o método de Kline e McClintock para o cálculo da incerteza total na medida da irradiação, incluindo um erro de 2% imposto pela temperatura, encontra-se um valor de 2,83%. O acréscimo de 0,83% na incerteza da medida da irradiação, devido somente a temperatura, pode ser facilmente corrigido uma vez que se conheça o valor de α da célula de referência.

Na aplicação da metodologia proposta para a determinação do coeficiente α é importante que as células em teste estejam protegidas da ação do vento, principalmente se possuírem baixa capacidade térmica. Isto evita que células com pouca inércia térmica, tenham sua temperatura facilmente afetada pela ação do vento, proporcionando dessa forma medidas com grande dispersão a ponto de poder inviabilizar um resultado confiável.

É conveniente ressaltar que a temperatura efetivamente medida com um sensor anexado na parte posterior da célula é a temperatura do material de encapsulamento. Esta temperatura é diferente da temperatura real da célula. Entretanto, se forem tomados para análise os pontos em que a taxa de variação da temperatura da célula ao longo do aquecimento seja constante, considera-se que a variação seja constante também na célula.

4. CONCLUSÕES

Foi aplicado um método de determinação da variação da corrente de curto-circuito com a temperatura para células de referência de silício cristalino em teste sob iluminação natural. Embora a influência do coeficiente α seja pequena, é possível sua medida sob iluminação natural apesar das variáveis envolvidas e dos cuidados experimentais necessários.

Este método mostrou-se confiável fornecendo pontos medidos com baixa dispersão. Foram determinados os coeficientes α para duas células e estimado o erro associado à medida de irradiação devido à utilização destas células em uma temperatura diferente da temperatura de calibração. Para a célula BP Solar foi encontrado um erro da ordem de 1% na medida da irradiação considerando uma diferença de 17°C entre a temperatura da célula e a temperatura de calibração da mesma.

Como pode ser estimado genericamente com um valor típico de α , a temperatura pode influenciar em até 2% no valor da irradiação solar dentro do intervalo de temperatura entre 25°C e 60°C. Considerando uma incerteza na medida da irradiação de 2%, o erro devido somente à temperatura pode afetar em até 0,83% na incerteza total da irradiação.

Esta correção é importante em ensaios de caracterização elétrica de dispositivos fotovoltaicos onde se buscam resultados bastante precisos. Para medidas de campo, entretanto, a utilização do valor de calibração a uma temperatura média de operação será suficiente para estimar a radiação solar. Em medidas de campo ao longo do tempo há outros fatores como variação espectral e efeitos do ângulo de incidência que possuem uma contribuição significativa na determinação da irradiância solar com células de silício.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), ao Instituto de Energias Renováveis e Eficiência Energética da Amazônia vinculado ao projeto INCT/MCT/CNPq e à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo apoio financeiro na realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Agilent Technologies, 1999. Agilent 34970A – Data Acquisition / Switch Unit user's guide.
- Eppley, 2010. Especificações técnicas do piranômetro modelo PSP, disponível em <http://www.epley.com>, acesso 10 de abril de 2010.
- IEC 60904-1 (International Electrotechnical Commission), 2007. Photovoltaic Devices. Part 1: Measurement of photovoltaic current-voltage characteristics.
- IEC 60904-2 (International Electrotechnical Commission), 2007. Photovoltaic Devices. Part 2: Requirements for reference solar devices.
- IEC 60904-5 (International Electrotechnical Commission), 1996. Photovoltaic Devices. Part 5: Determination of the equivalent cell temperature (ECT) of photovoltaic (PV) devices by the open-circuit method.
- IEC 60904-10 (International Electrotechnical Commission), 1999. Photovoltaic Devices. Part 8: Methods of linearity measurement.
- Ingenieurbüro Mencke & Tegtmeyer, 2010. Silicon Irradiance Sensor user's manual.
- Lorenzo, E., 2006. Electricidade Solar Fotovoltaica - Volumen II: Radiación Solar y Dispositivos Fotovoltaicos. Sevilla: PROGENSA.

INFLUENCE OF THE TEMPERATURE ON THE MEASUREMENT OF THE SOLAR IRRADIANCE WITH SILICON CRISTALLINE REFERENCE CELLS

Abstract. *The accurate quantification of solar irradiance is paramount for the qualification of photovoltaic devices. The usage of reference cells of same technology as the device under test is very convenient, mostly due to the spectral matching and similar optical characteristics. On the other hand, the short circuit current of a photovoltaic device (which is directly related to the irradiance) is also influenced by a thermal coefficient. This thermal coefficient can be typically from $0,02\%^{\circ}\text{C}^{-1}$ up to $0,1\%^{\circ}\text{C}^{-1}$ for silicon photovoltaic cells. Although this effect is rather small, it can be significant enough to result in errors of up to about 2% in extreme cases, depending on the difference in the actual temperature and the temperature in which the cell was calibrated. This paper presents a methodology for determining the short circuit thermal coefficient of reference cells. The coefficients of two reference cells were determined and applied to the measured values. The results with and without correction were compared.*

Keywords: *Solar Energy, Photovoltaic Cell, Solar Irradiance.*