

# EFEITOS DA ESTABILIZAÇÃO POR *LIGHT SOAKING* E DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES TÉRMICOS PARA DIVERSAS IRRADIÂNCIAS DE UM MÓDULO FOTOVOLTAICO CIGS

Felipe Detzel Kipper – felipe\_kipper@hotmail.com  
Fabiano Perin Gasparin - fabiano.gasparin@ufrgs.br  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS

**Resumo.** A conversão fotovoltaica da radiação solar é uma fonte intermitente de energia e depende de diversos fatores, tais como disponibilidade de radiação, inclinação do painel fotovoltaico, eficiência de conversão da célula, temperatura de operação da célula, entre outros. Os módulos fotovoltaicos possuem coeficientes térmicos que representam o comportamento de alguns parâmetros em função da temperatura. Em geral, tais coeficientes são considerados constantes ao longo da faixa de irradiâncias usuais de operação, o que acarreta uma imprecisão na modelagem do dispositivo. Neste trabalho, é feita uma investigação a fim de determinar o comportamento dos parâmetros: corrente de curto-circuito ( $I_{sc}$ ), tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ) e potência máxima ( $P_{mp}$ ) em função da temperatura e da irradiância de um módulo fotovoltaico de filme fino de tecnologia CIGS, além de verificar o efeito da estabilização por light soaking nos parâmetros. Foram feitos ensaios de medida da curva  $I$ - $V$  de um exemplar de módulo fotovoltaico CIGS em uma série de irradiâncias e em cinco temperaturas, e a partir destas curvas foram extraídos os parâmetros:  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$  e  $P_{mp}$ , que foram utilizados para calcular os coeficientes térmicos dos módulos fotovoltaicos em diversas irradiâncias. A variação de  $I_{sc}$  com a temperatura é utilizada para determinação do coeficiente térmico  $\alpha$ . Já a variação de  $V_{oc}$  com a temperatura é usada para determinar o coeficiente térmico  $\beta$ . E, por fim, a variação de  $P_{mp}$  com a temperatura é utilizada para determinar o coeficiente térmico  $\gamma$ . Foi constatado que a variação dos coeficientes térmicos do módulo CIGS com a irradiância se mostrou similar ao apresentado por módulos de silício cristalino, justificando uma abordagem e investigação mais aprofundada no futuro.

**Palavras-chave:** Energia Solar, Módulo CIS, Coeficientes Térmicos

## 1. INTRODUÇÃO

A energia elétrica é um produto cada vez mais importante na sociedade contemporânea, permitindo a expansão da economia, criando empregos, avanço tecnológico e a produção de alimentos em larga escala. Seu consumo é crescente em países desenvolvidos e também nos em desenvolvimento.

Atualmente, a matriz elétrica global se baseia em combustíveis fósseis, que tem disponibilidade limitada e se tornam cada vez mais escassos à medida que são explorados. Além disso, há a necessidade de investimento nas energias renováveis para redução da emissão dos chamados Gases do Efeito Estufa (GEE), que são responsáveis por aumentar a temperatura média no planeta.

No Brasil, grande parcela da matriz elétrica é composta por fontes renováveis, uma vez que a fonte hídrica é responsável por, aproximadamente, 60% da produção de energia elétrica no país. Entretanto, como a fonte hídrica é dependente do período de chuvas, é imprescindível que haja uma maior diversificação da matriz para que outras fontes possam atuar de forma complementar às hídricas. Atualmente, o país depende bastante das usinas termoeletricas que são acionadas para atender a demanda de energia, porém, essa fonte possui um elevado custo de produção de energia, que acaba tornando a fatura de energia mais cara, além de contribuir para a maior emissão de GEE.

Sendo assim, a energia solar fotovoltaica, que é a conversão direta da radiação solar em energia elétrica por meio do efeito fotovoltaico, surge como uma opção viável, uma vez que é uma fonte renovável, limpa, abundante, confiável e que vem se expandindo globalmente. Um sistema fotovoltaico é uma fonte intermitente de energia que depende de diversos fatores, tais como a disponibilidade de radiação solar, inclinação do módulo fotovoltaico, acúmulo de partículas na superfície dos módulos, eficiência de conversão das células fotovoltaicas e inversor e também da temperatura de operação das células FV.

Os módulos FV possuem coeficientes térmicos que representam a variação de diversos parâmetros com a temperatura, sendo necessários para a simulação do sistema FV em diversas condições de operação. Em geral, os coeficientes são determinados com irradiância ( $G$ ) de 1000 W/m<sup>2</sup> e espectro AM 1,5 e são considerados constantes ao longo da faixa de irradiâncias de operação dos módulos, conforme demonstrado no trabalho de Whitaker *et al.*, (1992). Entender o funcionamento dos dispositivos FV em diversas temperaturas é fundamental, já que a operação normal se dá em uma ampla faixa de temperaturas, enquanto que as especificações dos módulos informadas no catálogo são obtidas a 25 °C.

Skoplaki and Palyvos, (2009) realizaram uma revisão dos modelos térmicos para o desempenho de módulos fotovoltaicos de silício cristalino e não verificaram a variação do coeficiente de variação de  $V_{oc}$  com a temperatura ( $\beta$ )

com a irradiância. Entretanto, já foi relatado por alguns autores a variação dos coeficientes térmicos em função da irradiância. Dash e Gupta, (2015) apresentaram medidas de coeficientes térmicos de variadas tecnologias em diferentes níveis de irradiância, concluindo que há sim variação dos coeficientes ao longo da faixa de irradiâncias, porém não propuseram uma relação matemática que modele essa variação.

Kipper *et al.*, (2018) demonstraram, por meio de medidas experimentais, que o coeficiente térmico  $\beta$  apresenta caráter logarítmico, com o módulo do valor do coeficiente aumentando em baixas irradiâncias, indicando que a sensibilidade à temperatura é maior em baixas irradiâncias. A investigação experimental deste fenômeno contribui para melhor compreensão do conhecimento relacionado ao comportamento dos módulos fotovoltaicos em uma ampla faixa de temperaturas e irradiâncias.

É possível determinar os coeficientes de temperatura de maneira genérica a partir da Eq. (1), no qual a variação do parâmetro em análise, neste caso um parâmetro  $Z$ , é normalizado pelo valor do parâmetro em uma temperatura padrão (Emery *et al.*, 1996).

$$CT \left( \frac{1}{^{\circ}\text{C}} \right) = \frac{1}{Z(T_n)} \frac{\partial Z}{\partial T} \quad (1)$$

Utilizando notação convencional é possível calcular o coeficiente de variação de  $I_{sc}$  com a temperatura ( $T$ ), denominado  $\alpha$ , por meio da Eq. (2).

$$\alpha = \frac{1}{I_{sc}(T_n)} \cdot \frac{\partial I_{sc}}{\partial T} \quad (2)$$

onde  $T_n$  é a temperatura de normalização e deve ser de 25 °C, que é a temperatura para testes de dispositivos fotovoltaicos.

Para o  $V_{oc}$ , o coeficiente de variação com a temperatura é calculado a partir da Eq. (3). A redução de  $V_{oc}$  com o aumento da temperatura resulta na alteração da curva I-V característica do módulo fotovoltaico, implicando na redução da potência entregue pelo dispositivo quando há aumento da temperatura de operação.

$$\beta = \frac{1}{V_{oc}(T_n)} \cdot \frac{\partial V_{oc}}{\partial T} \quad (3)$$

No trabalho experimental apresentado por Cotfas *et al.*, (2018) uma variação de  $\beta$  com a irradiância solar é apresentada, porém as medidas foram realizadas até 400 W/m<sup>2</sup>. Neste caso, a função logarítmica não era clara e uma função linear foi melhor ajustada aos valores experimentais.

Para calcular a variação da potência máxima ( $P_{mp}$ ) com a temperatura é utilizada a Eq. (4).

$$\gamma = \frac{1}{P_{mp}(T_n)} \cdot \frac{\partial P_{mp}}{\partial T} \quad (4)$$

O conhecimento dos coeficientes térmicos permite o estudo do comportamento do módulo fotovoltaico em diferentes temperaturas. Valores típicos de  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  encontrados na literatura para o silício cristalino são, respectivamente, 0,05%  $I_{sc}$  °C<sup>-1</sup> e -0,33%  $V_{oc}$  °C<sup>-1</sup> e -0,45%  $P_{mp}$  °C<sup>-1</sup> ou em valores absolutos  $\beta$  é da ordem de -2,2 mV/°C para uma célula fotovoltaica (Friesen *et al.*, 2010).

A Fig. 1 apresenta as curvas característica I-V medidas a 25 °C, 45 °C e 65 °C de um módulo de silício cristalino, e ilustra a influência do parâmetro nas curvas, nas quais percebe-se o deslocamento da curva I-V, reduzindo o valor da tensão de circuito aberto à medida que há aumento da temperatura de operação do módulo fotovoltaico. As curvas foram medidas sob a mesma irradiância.

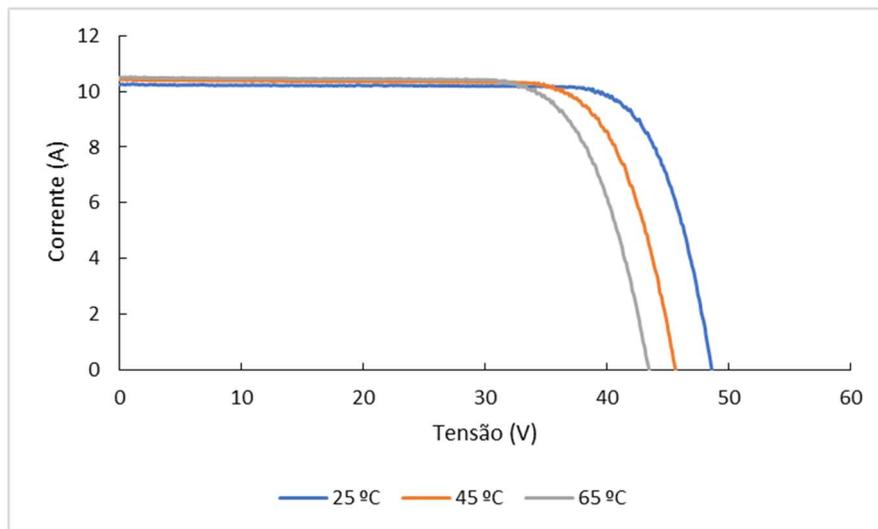


Figura 1 - Curva I-V de um módulo fotovoltaico de 144 células (*halfcell*) em diversas temperaturas.

Entretanto, na literatura não foram encontrados trabalhos que investiguem a variação dos coeficientes térmicos em função da irradiância de módulos fotovoltaicos de filmes finos. Portanto, este trabalho tem como objetivo investigar o comportamento dos parâmetros  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$  e  $P_{mp}$  de um módulo de filme fino do tipo CIGS e determinar como se dá o comportamento destes parâmetros com relação à variação da temperatura e da irradiância de modo a identificar se esta variação é similar à apresentada pelos módulos de silício cristalino. Além disto, é analisado o efeito da estabilização do módulo nos parâmetros estudados.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1 Efeitos metaestáveis em módulos de filmes finos

Certos módulos de filmes finos, entre eles CdTe e CIGS, apresentam aumento na eficiência de conversão quando expostos à radiação solar que perdura por determinado período após a interrupção da exposição. Esse aumento é devido a ocorrência de efeitos metaestáveis. Segundo Bühler *et al.*, (2014), a metaestabilidade possui uma taxa logarítmica de aumento da potência até que atinja seu valor máximo e decai exponencialmente para o tempo de relaxamento.

Esses efeitos influenciam os parâmetros de corrente-tensão e podem resultar em desempenho artificialmente elevado ou baixo. Em alguns casos, os efeitos podem estar próximos da precisão da medição, e em outros casos podem ser inexistentes. Entretanto, o desempenho do módulo pode variar mais de 10% de um valor medido inicialmente no escuro e após estabilizado. Tanto o  $V_{oc}$  como  $FF$  podem ser afetados por esses efeitos transitórios e, de modo geral, pode ser obtido um incremento no valor medido inicialmente no escuro entre as temperaturas de 25 e 80 °C, variando o tempo de estabilização entre as tecnologias (desde algumas horas até a semanas).

A ocorrência dos efeitos metaestáveis nos CIGS é um fenômeno complexo. Entretanto, há teorias que sugerem que esse fenômeno ocorre devido à deriva de portadores sob polarização ou também por variações nas propriedades dos elementos que atuam como doadores e receptores dependendo das características da luz absorvida (Titton *et al.*, 2016).

Segundo artigo publicado por Sasala e Sites, (1993) a tecnologia CIS apresentou incremento reversível na potência de até 5% graças aos efeitos metaestáveis. Também foi constatado no mesmo estudo que o aumento da temperatura implica na redução do tempo para a ocorrência do efeito.

### 2.2 Extração dos parâmetros

Neste trabalho, os parâmetros  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$  e  $P_{mp}$  foram extraídos pelo método analítico proposto por Chan *et al.*, (1984) diretamente da curva I-V experimental dos módulos, embora somente foram utilizados os parâmetros diretamente derivados da curva I-V, sendo que a resistência em paralelo, resistência em série, fator de idealidade, corrente fotogerada e corrente de saturação reversa não foram avaliados. Foi selecionado um módulo CIGS disponível no LABSOL para ensaios cujas características são apresentadas na Tab. 1.

Material da célula	Número de células	Potência (W)	Eficiência (%)	Voc (V)	Voc por célula	Isc (A)
CIGS	106	130	12,1	60,2	0,567	3,23

As curvas I-V foram medidas em simulador solar LAPSS (*Large Area Pulsed Solar Simulator*) PASAN Sunsim IIC, com flash de 10 ms. A precisão elétrica é de pelo menos de 0,2% e a colimação de luz é inferior a 15°. As curvas I-V foram medidas numa faixa entre 100 e 1000 W/m<sup>2</sup>, a intervalos de 100 W/m<sup>2</sup> a cada nova medida. A variação da irradiância é obtida com a inserção de máscaras que bloqueiam parte da radiação que emerge das lâmpadas de flash. Os

módulos fotovoltaicos foram instalados em uma câmara termostática, desenvolvida no próprio LABSOL (Gasparin *et al.*, 2020) para providenciar o aquecimento dos mesmos com a temperatura controlada. A câmara fica instalada no interior do túnel do simulador solar, como é ilustrado na Fig. 2. Para que as medidas sejam feitas é necessário abrir a porta da câmara termostática momentaneamente para o acionamento do flash do simulador solar. Logo após, as portas são fechadas novamente para manter o equilíbrio da temperatura.

Os ensaios foram feitos nas temperaturas médias de 25 °C, 35 °C, 45 °C, 55 °C e 65 °C. Assim, obteve-se uma matriz de curvas que contém 50 curvas I-V para o módulo ensaiado, permitindo que o cálculo dos coeficientes térmicos para cada nível de irradiância.

Neste trabalho, os coeficientes térmicos foram determinados de maneira *indoor*, ou seja, utilizando um simulador solar. Este método tem a vantagem de ser independente das condições climáticas e o controle das variáveis é facilitado devido ao ambiente ser controlado. Com o auxílio de uma câmara termostática é possível ajustar a temperatura do módulo até o valor desejado, de modo que a temperatura seja uniforme ao longo de toda sua extensão, reduzindo as incertezas das medidas.



Figura 2 - Câmara de aquecimento aberta sendo à esquerda sem módulo e à direita com módulo de silício cristalino inserido.

Para que se determine os coeficientes térmicos dos módulos fotovoltaicos é necessário extrair os parâmetros  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$  e  $P_{mp}$  das curvas I-V medidas em diferentes temperaturas. Os parâmetros são plotados em função da temperatura e uma linha de regressão linear é utilizada para a obtenção dos coeficientes de variação para cada um dos parâmetros.

### 2.3 Estabilização do módulo

Para estabilizar o módulo de filme fino foi feita a polarização direta deste, aplicando aproximadamente 90% de  $I_{mp}$  do mesmo, que é igual a 2,87 A e deixando-o sob radiação em um simulador solar classe C para exposição contínua de módulos FV desenvolvido no LABSOL por um período de 14 horas.

O simulador para exposição solar foi desenvolvido utilizando lâmpadas de vapor metálico como uma alternativa interessante e de custo razoavelmente baixo para estabilizar módulos de filmes finos. Foi construída uma câmara de exposição sob iluminação artificial com aproximadamente 800 W/m<sup>2</sup> de irradiância. É necessária a adequação do espectro de saída do simulador ao de referência da distribuição espectral da radiação solar no espectro visível AM 1,5G, conforme definido na norma IEC 60904-3. Foi alcançada a concordância espectral e uniformidade espacial da irradiância Classe C e para estabilidade temporal Classe A, como definida na norma internacional IEC 60904-9, 2007 (Costa, 2018).

Após o período de estabilização o módulo foi retirado do simulador de exposição solar e foi direcionado para os ensaios de obtenção dos parâmetros  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$  e  $P_{mp}$ . O módulo foi mantido polarizado com injeção da aproximadamente 90% de  $I_{mp}$  entre as medidas para que se mantivesse a estabilização do mesmo. Na Fig. 3 é apresentado o simulador de exposição durante a condução de um ensaio.



Figura 3 - Módulo fotovoltaico inserido no simulador de exposição solar.

### 3. RESULTADOS OBTIDOS

#### 3.1 Estabilização e determinação do coeficiente térmico $\alpha$

A Fig. 4 apresenta uma comparação entre os parâmetros obtidos no escuro e após a estabilização do módulo, conforme indicado na seção anterior, a fim de verificar os impactos de uma estabilização nos parâmetros elétricos do módulo de filme fino ensaiado. Foram analisadas as variações de  $I_{sc}$  e  $I_{mp}$  em função da irradiância nas temperaturas entre 25 °C e 65 °C.

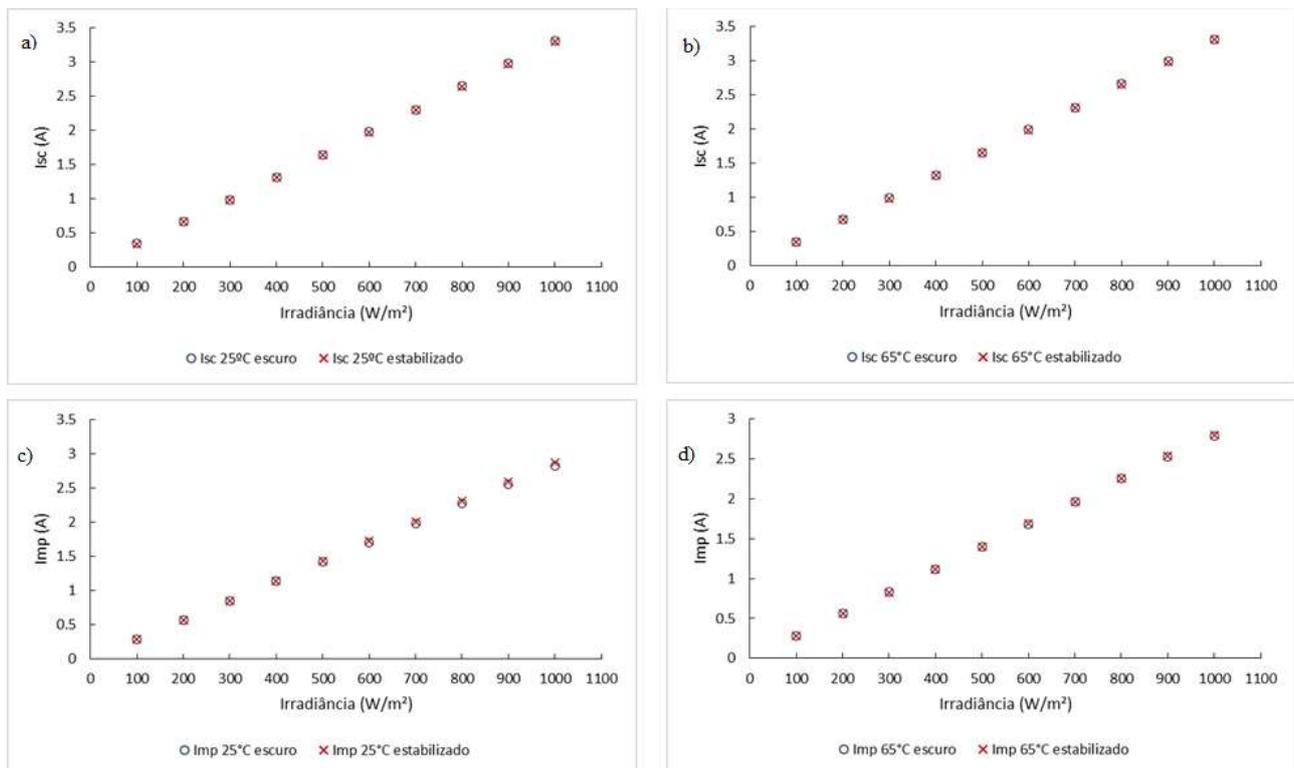


Figura 4 - Variação de  $I_{sc}$  com a irradiância na temperatura de 25 °C (a) e na temperatura de 65 °C (b) e variação de  $I_{mp}$  com a irradiância na temperatura de 25 °C (c) e na temperatura de 65 °C (d).

Como pode ser observado nos gráficos da Fig. 4, não foram verificadas diferenças consideráveis entre os parâmetros com o módulo armazenado no escuro e após a estabilização, sugerindo que o processo de estabilização não tem grande influência sobre a corrente do módulo.

A variação de  $I_{sc}$  com a temperatura é a definição do coeficiente térmico  $\alpha$ , e sua determinação depende de precisão instrumental adequada, já que para o módulo ensaiado o  $I_{sc}$  é da ordem 0,5 A para irradiância de 100 W/m. Os valores dos coeficientes  $\alpha$  calculados entre as irradiâncias de 100 e 1000 W/m<sup>2</sup> foram determinados entre temperaturas de 25 e 65 °C. Na Fig. 5 é apresentada a variação de  $\alpha$  em função da irradiância do módulo fotovoltaico apresentado na Tab. 1 em duas condições, com o módulo guardado por um longo período sem exposição à radiação solar e com o módulo após um período de estabilização.

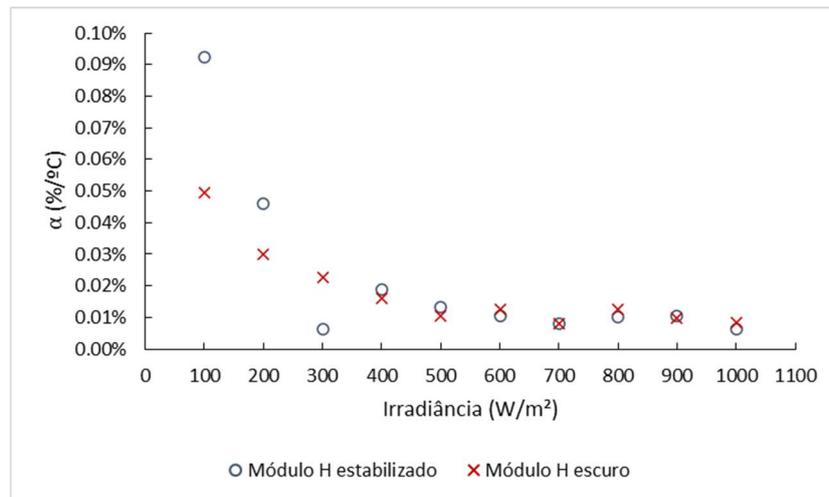


Figura 5 - Variação de  $\alpha$  com a irradiância do módulo nas condições de estabilizado com 14 horas de exposição a 800 W/m<sup>2</sup> e sem estabilização prévia após período no escuro.

O módulo apresentou uma pequena variação a partir de irradiâncias inferiores a 400 W/m<sup>2</sup>. Entretanto não foi feita uma abordagem para modelar esse comportamento já que a variação é pequena e há apenas dados de um módulo. Apesar disso, uma abordagem pode ser realizada em trabalhos futuros a partir de um grupo maior de medidas em diferentes exemplares. Os resultados obtidos foram compatíveis ao comportamento apresentado pelos módulos de silício cristalino e é feita a hipótese que a abordagem para o estudo dos coeficientes térmicos possa ser análoga entre os módulos de filme fino e silício cristalino.

### 3.2 Estabilização e determinação do coeficiente térmico $\beta$

Para que se determine o coeficiente térmico  $\beta$  é utilizada a variação do parâmetro tensão de circuito aberto com a temperatura. A Fig. 6 apresenta a variação da tensão de circuito aberto e da tensão de máxima potência com a irradiância nas temperaturas de 25 °C e 65 °C, a fim de se ilustrar o comportamento dos parâmetros após a estabilização.

Observa-se uma pequena variação de  $V_{oc}$  em baixas irradiâncias, com o módulo no escuro apresentando valores ligeiramente superiores que o módulo estabilizado na temperatura de 25 °C. Na temperatura de 65°C essa diferença não foi observada. Ainda assim, observa-se que os valores de  $V_{oc}$  para ambas situações é muito próximo, entretanto, o valor de  $V_{oc}$  a 65 °C é consideravelmente menor quando comparado com o mesmo parâmetro obtido na temperatura de 25 °C, como era esperado devido ao efeito causado pelo aumento da temperatura no parâmetro.

Analisando a variação de  $V_{mp}$  em função da irradiância se observou uma melhora considerável no parâmetro após a estabilização do módulo, que pode ser um fator que explique o aumento de  $P_{mp}$  quando o módulo é estabilizado. O aumento deste parâmetro também sugere uma melhora no  $FF$  do módulo fotovoltaico.

Na Fig. 7 é apresentada a variação de  $\beta$  em função da irradiância para o módulo no escuro e estabilizado para verificar a efetividade do processo de estabilização.

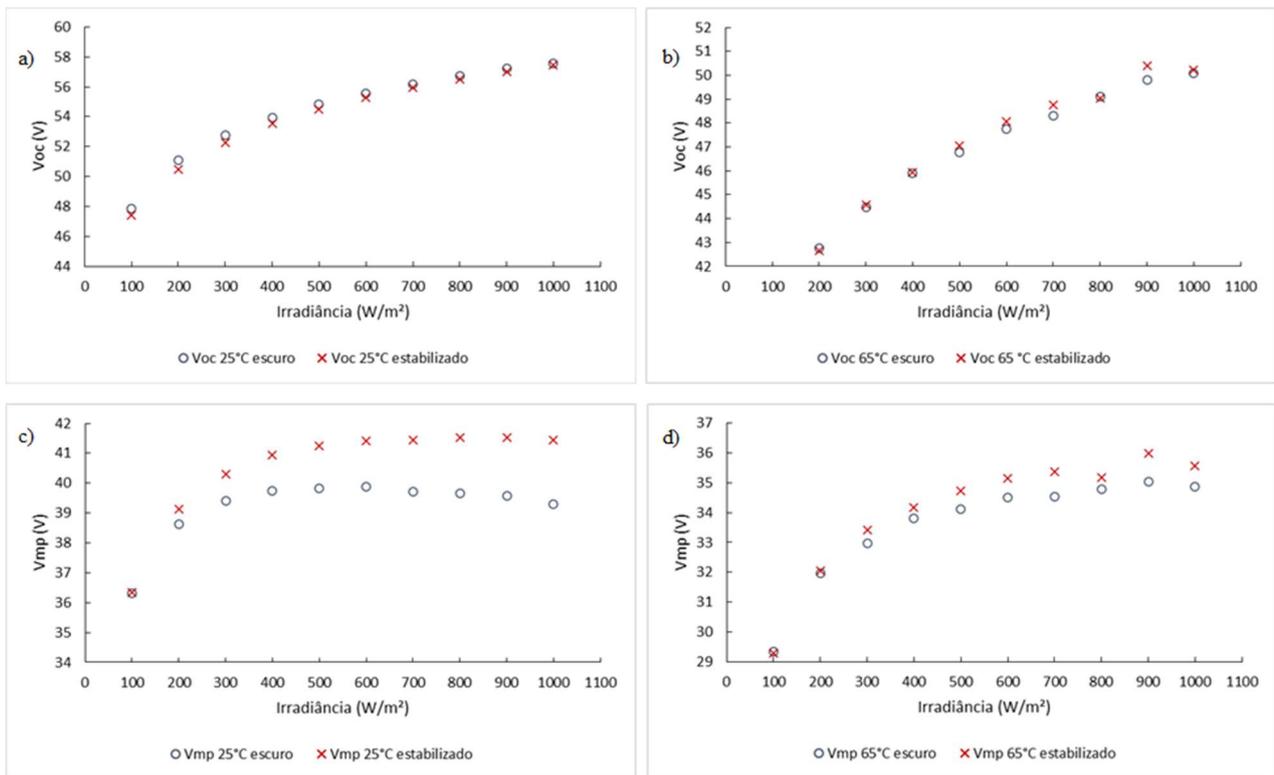


Figura 6 - Variação de  $V_{oc}$  com a irradiância na temperatura de 25 °C (a) e na temperatura de 65 °C (b) e variação de  $V_{mp}$  com a irradiância na temperatura de 25 °C (c) e na temperatura de 65 °C (d).

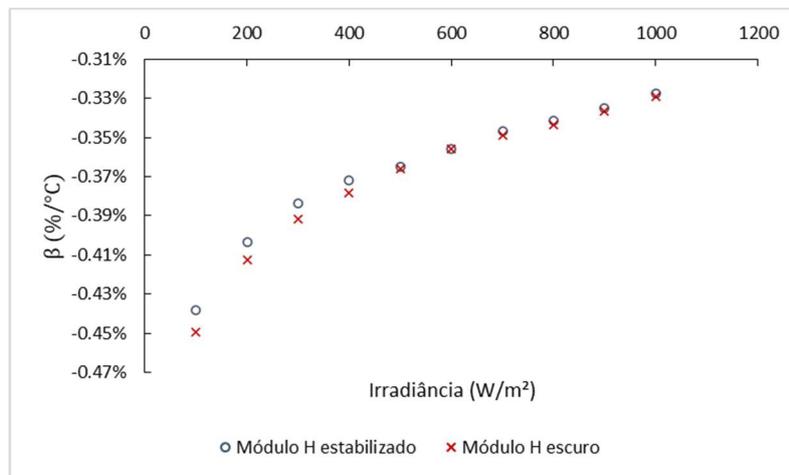


Figura 7 - Variação de  $\beta$  com a irradiância do módulo ensaiado nas condições de estabilizado com 14 horas de exposição a 800 W/m<sup>2</sup> e sem estabilização prévia após período no escuro.

Observa-se uma pequena variação entre os valores de  $\beta$  com o módulo estabilizado e no escuro. É possível que esse resultado seja explicado pelo aumento da tensão de circuito aberto que se obtém após a estabilização do módulo, já que houve uma leve melhora do  $V_{oc}$  após estabilização do módulo.

### 3.3 Estabilização e determinação do coeficiente térmico $\gamma$

A variação de  $P_{mp}$  com a temperatura é a definição do coeficiente térmico  $\gamma$ . A Fig. 8 apresenta a variação de  $P_{mp}$  com a irradiância nas temperaturas de 25 °C e a 65 °C ao longo da faixa de irradiâncias do módulo apresentado na Tab. 1.

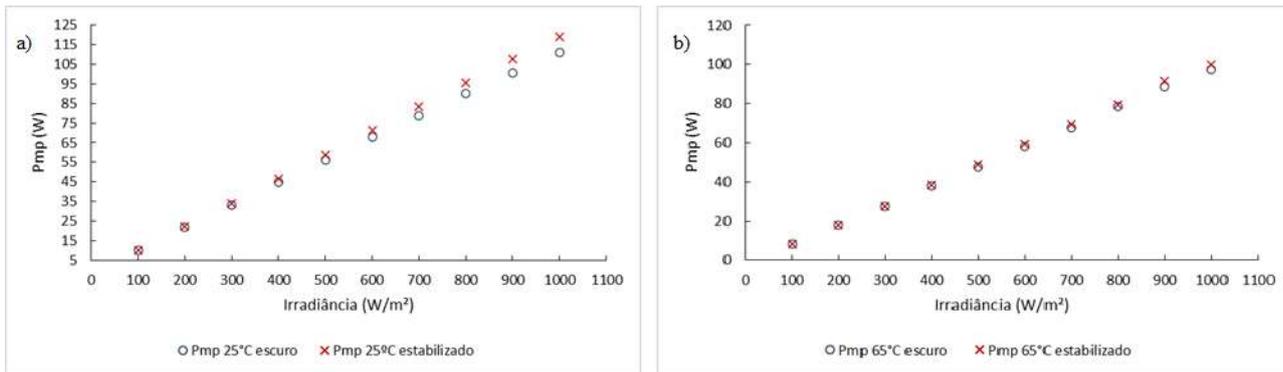


Figura 8 - Variação de  $P_{mp}$  com a irradiância na temperatura de 25 °C (a) e na temperatura de 65 °C (b) para o módulo armazenado no escuro e após estabilização.

Como esperado, há redução de  $P_{mp}$  com o aumento da temperatura já que o aumento da corrente fotogerada é insuficiente para compensar a redução da tensão causado pelo aumento da temperatura, resultando na redução da potência do dispositivo com o incremento da temperatura.

Na Fig. 9 é apresentada a variação de  $\gamma$  em função da irradiância para o módulo no escuro e estabilizado para verificar a efetividade do processo de estabilização.

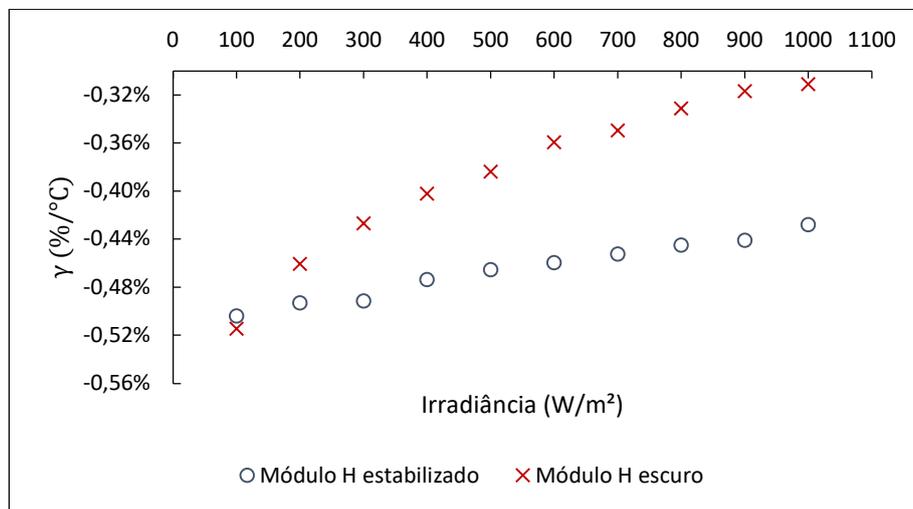


Figura 9 - Variação de  $\gamma$  com a irradiância do módulo nas condições de estabilizado com 14 horas de exposição a 800 W/m<sup>2</sup> e sem estabilização prévia após período no escuro

A diferença entre os valores de  $\gamma$  foi bastante considerável, sendo que o  $\gamma$  do módulo estabilizado apresentou valores maiores que o módulo no escuro, em geral. Essa grande diferença entre os valores de  $\gamma$  acabou apresentando um comportamento oposto ao imaginado, uma vez que se esperava que após a estabilização do módulo houvesse uma melhoria nos parâmetros do módulo.

### 3.4 Determinação do $FF$

A fim de se constatar a efetividade do processo de estabilização do módulo fotovoltaico, a Fig. 10 traz uma comparação entre  $FF$  do módulo no escuro e estabilizado nas temperaturas de 25 °C e 65°C.

Observa-se um aumento significativo do parâmetro  $FF$ , na temperatura de 25 °C após o processo de estabilização do módulo, como era esperado visto o aumento de  $V_{mp}$  apresentado após a estabilização do módulo fotovoltaico. Assim como no caso com a temperatura de 25 °C, o  $FF$  na temperatura de 65°C também apresentou aumento, ou seja, a curva I-V adquire uma forma mais quadrada. Esse aumento não foi tão pronunciado devido ao aumento da temperatura que afeta os parâmetros do curva I-V.

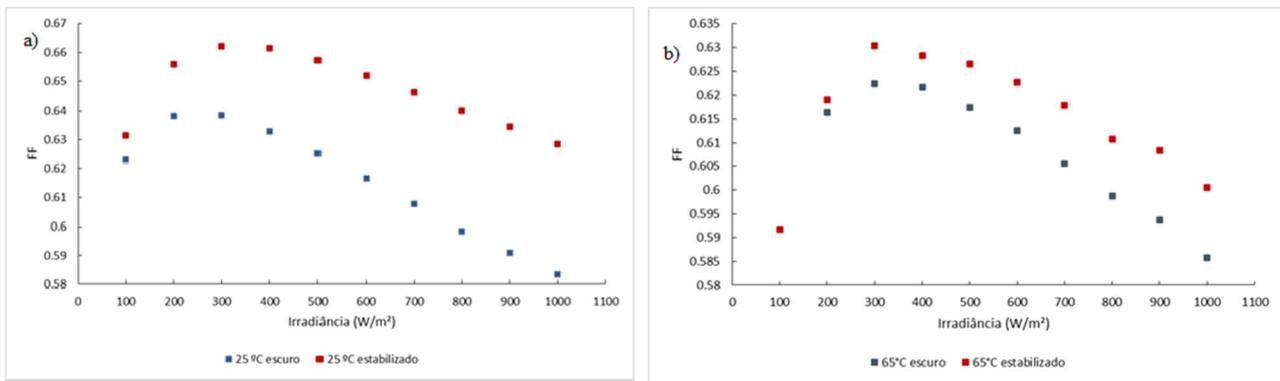


Figura 10 - Variação de  $FF$  ao longo da faixa de irradiâncias na temperatura de 25 °C do módulo (a) e na temperatura de 65 °C (b), para o módulo armazenado no escuro e após estabilização.

### 3.5 Determinação da eficiência

Seguindo a análise da estabilização do módulo, é apresentado na Fig. 11 a comparação da variação da eficiência em função da irradiância na temperatura de 25 °C e 65 °C entre os dois estados do módulo fotovoltaico.

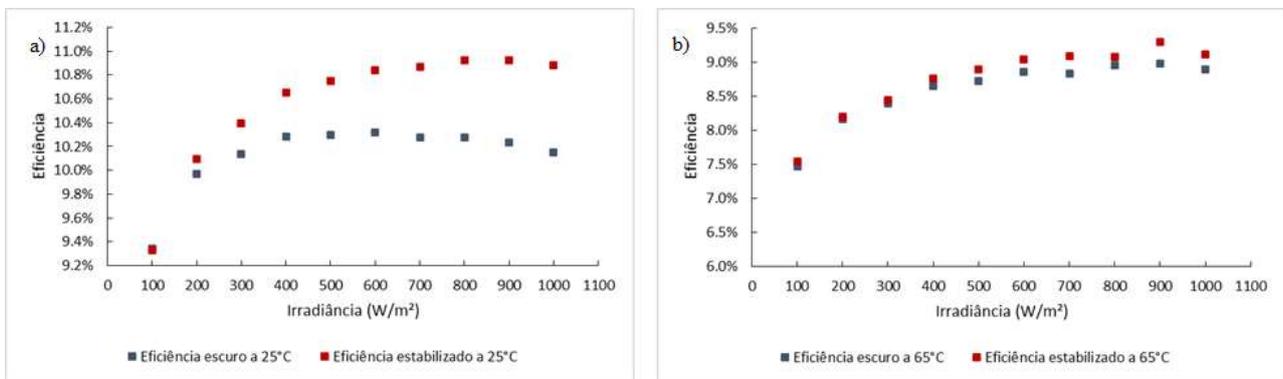


Figura 11- Variação da eficiência ao longo da faixa de irradiâncias na temperatura de 25 °C do módulo (a) e na temperatura de 65 °C (b).

Pode-se observar que há um aumento da eficiência do módulo estabilizado em irradiâncias mais altas, principalmente a partir de 400 W/m². Este comportamento pode ser explicado pelo aumento de  $FF$  que é verificado com a estabilização do módulo fotovoltaico, resultando em maiores valores de  $Pmp$ , aumentando a eficiência sensivelmente.

Também foi constatado uma melhora na eficiência do módulo na temperatura de 65 °C após a estabilização. Pode-se atribuir esse pequeno aumento ao  $FF$ , que também apresentou melhora quando estabilizado. Entretanto, essa melhoria da eficiência que foi verificada é relativamente pequena e pode-se atribuir esse fator ao aumento da temperatura que impacta negativamente no  $Voc$  do módulo, que acaba reduzindo fortemente a potência do módulo. O aumento da temperatura também, aparentemente, causa atenuação do incremento de eficiência decorrente do processo de estabilização.

## 4. CONCLUSÃO

Foi feita a análise dos coeficientes térmicos para um módulo de tecnologia de filmes finos do tipo CIGS a fim de investigar o comportamento da variação dos coeficientes em função da irradiância, para verificar se o comportamento seria análogo ao apresentado pelos módulos de silício cristalino. Como apenas um módulo foi analisado, não foi feita uma abordagem para modelar a variação dos coeficientes térmicos em função da irradiância, entretanto, foi observado que o comportamento destes parâmetros tem o mesmo caráter apresentado pelos módulos de silício cristalino.

É necessário incluir mais módulos de tecnologia filme fino na análise dos coeficientes térmicos para obtenção de uma equação fidedigna no caso de modelagem do comportamento, uma vez que se constatou que o comportamento dos coeficientes se dá de maneira similar à tecnologia de silício cristalino e poderia ser inserida em programas computacionais a fim de melhorar a qualidade da simulação de desempenho de sistemas fotovoltaicos.

Esta investigação preliminar em um módulo CIGS permitiu avaliar as variações dos parâmetros em função de uma estabilização por *light soaking* e o comportamento dos coeficientes térmicos com a irradiância antes e após a estabilização.

## Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao grupo de pesquisa do LABSOL-UFRGS pelo apoio no desenvolvimento deste trabalho e principalmente ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo fomento à pesquisa.

## REFERÊNCIAS

- Bühler, A. J. *et al.* Uma Análise Sobre Efeitos Metaestáveis Em Módulos Fotovoltaicos CI(G)S Por Exposição À Luz Solar. [s. l.], v. V, n. 1, p. 27–33, 2014.
- Chan, D. S. H. *et al.* A comparative study of extraction methods for solar cell model parameters. [s. l.], v. 29, n. 3, p. 329–337, 1984.
- Costa, E. R. Desenvolvimento de simulador solar contínuo para teste de estabilização de módulos fotovoltaicos. 2018. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), [s. l.], 2018.
- Cotfas, D. T.; Cotfas, P. A.; Machidon, O. M. Study of temperature coefficients for parameters of photovoltaic cells. International Journal of Photoenergy, [s. l.], v. 2018, 2018.
- Dash, P. K.; Gupta, N. C. Variation of Temperature Coefficient of Different Technology Photovoltaic Modules with respect to Irradiance. International Journal of Current Engineering and Technology, [s. l.], v. 55, n. 11, p. 2277–4106, 2015. Disponível em: <<http://inpressco.com/category/ijcet>>.
- Dupré, O.; Vaillon, R.; Green, M. A. Physics of the temperature coefficients of solar cells. Solar Energy Materials and Solar Cells, [s. l.], v. 140, p. 92–100, 2015.
- Emery, K. *et al.* Temperature dependence of photovoltaic cells, modules, and systems. Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference, [s. l.], p. 1275–1278, 1996.
- Friesen, G.; Pavanello, D.; Virtuani, A. Overview of Temperature Coefficients of Different Thin Film Photovoltaic Technologies. 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition / 5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 6-10 September 2010, Valencia, Spain, [s. l.], n. JANUARY, p. 4248–4252, 2010. Disponível em: <<http://www.eupvsec-proceedings.com/proceedings?paper=9122>>
- Gasparin, F. P.; Kipper, F. D.; Krenzinger, A. Câmara termostática para determinação de coeficientes térmicos de módulos fotovoltaicos com simulador solar. VIII CBENS - Congresso Brasileiro de Energia Solar, [s. l.], 2020.
- Kipper, F. D.; Gasparin, F. P.; Krenzinger, A. Análise da variação dos coeficientes térmicos de módulos fotovoltaicos com a irradiância. VII CBENS - Congresso Brasileiro de Energia Solar, [s. l.], 2018.
- Ruschel, C. S. *et al.* Assessment of PV modules shunt resistance dependence on solar irradiance. Solar Energy, [s. l.], v. 133, p. 35–43, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2016.03.047>>
- Sasala, R. A.; Sites, J. R. Time dependent voltage in CuInSe<sub>2</sub> and CdTe solar cells. Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference, [s. l.], n. 1, p. 543–568, 1993.
- Skoplaki, E.; Palyvos, J. A. On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations. Solar Energy, [s. l.], v. 83, n. 5, p. 614–624, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2008.10.008>>
- Titton, M. G.; de Bona, J. C.; Bühler, Alexandre José. Módulos fotovoltaicos CI(G)S: Análise da tecnologia. Asades, [s. l.], v. 3, n. June, p. 04.11-04.20, 2016.
- Whitaker, C. M. *et al.* Effects of irradiance and other factors on PV temperature coefficients. Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference, [s. l.], v. 1, p. 608–613, 1992.

## EFFECTS OF LIGHT SOAKING STABILIZATION AND DETERMINATION OF THERMAL COEFFICIENTS FOR DIFFERENT IRRADIANCES FROM A CIGS PHOTOVOLTAIC MODULE

**Abstract.** *The photovoltaic conversion of solar radiation is an intermittent source of energy and depends on several factors, such as radiation availability, photovoltaic panel inclination, cell conversion efficiency, cell operating temperature, among others. Photovoltaic modules have thermal coefficients that represent the behavior of some parameters as a function of temperature. In general, such coefficients are considered constant over the usual operating irradiance range, which results in imprecision in the modeling of the device. In this work, an investigation is carried out in order to determine the behavior of the parameters: short-circuit current ( $I_{sc}$ ), open circuit voltage ( $V_{oc}$ ) and maximum power ( $P_{mp}$ ) as a function of temperature and irradiance of a photovoltaic module. thin film of CIGS technology, in addition to verifying the effect of light soaking stabilization on the parameters. Tests were carried out to measure the curve IV of a CIGS photovoltaic module in a series of irradiances and at five temperatures, and from these curves the parameters:  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$  and  $P_{mp}$  were extracted, which were used to calculate the thermal coefficients of the photovoltaic modules in different irradiances. The variation of  $I_{sc}$  with temperature is used to determine the thermal coefficient  $\alpha$ . The variation of  $V_{oc}$  with temperature is used to determine the thermal coefficient  $\beta$ . And finally, the variation of  $P_{mp}$  with temperature is used to determine the thermal coefficient  $\gamma$ . It was found that the variation of thermal coefficients of the CIGS module with irradiance was similar to that presented by crystalline silicon modules, justifying a more in-depth approach and investigation in the future.*

**Key words:** Solar Energy, CIS Module, Thermal Coefficient