

ANÁLISE DA VARIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS DE DIFERENTES TECNOLOGIAS EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA E IRRADIÂNCIA

Alexandre José Bühler – purpleblind@yahoo.com.br

Arno Krenzinger – arno.krenzinger@ufrgs.br

Labsol - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Engenharia Mecânica

Faustino Chenlo Romero – faustino.chenlo@ciemat.es

Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas – Madrid, España

Resumo. A eficiência de conversão de um módulo fotovoltaico é um dado fundamental para prever quanta energia este é capaz de fornecer em uma determinada condição de operação. A informação da eficiência de um módulo pode ser encontrada em seu catálogo de características elétricas, entretanto na maioria das vezes este dado é informado somente para a condição padrão. Considerando que a eficiência varia com a temperatura e com a irradiância, é importante conhecer de que forma isto ocorre, tanto para módulos de silício cristalino, que ainda dominam amplamente o mercado, como para tecnologias de filmes finos que vem aumentando gradativamente o seu papel no cenário mundial. Obtendo funções matemáticas que representem a variação da eficiência em função da temperatura e da irradiância é possível prever com maior exatidão a energia que o dispositivo fotovoltaico será capaz de fornecer sob as mais diversas condições de operação. Este trabalho apresenta um ensaio realizado com seis módulos fotovoltaicos de diferentes tecnologias, sob condições de iluminação natural, para a determinação da variação da eficiência de conversão elétrica com respeito à temperatura e irradiância.

Palavras-chave: Energia Solar Fotovoltaica, Módulos Fotovoltaicos, Eficiência de Conversão, Filmes Finos.

1. INTRODUÇÃO

A importância da energia solar fotovoltaica no mundo tem crescido muito nos últimos anos. Isto se deve em parte pela necessidade de implementação de fontes de energia renováveis na matriz energética de muitos países. O crescimento do uso de sistemas fotovoltaicos ocorreu principalmente na Europa, onde a Espanha e a Alemanha constituem fortes exemplos. A cada ano novas centrais de conversão de energia elétrica fotovoltaica são instaladas, com potências tipicamente superiores a 1MW. Atualmente a maior central de conversão do mundo se encontra na Espanha, na cidade de Olmedilla, com uma potência instalada de 60 MW (Pvresources, 2010). Neste cenário, se torna cada vez mais importante conhecer como a eficiência de conversão dos dispositivos fotovoltaicos varia de acordo com as condições de operação, tanto para módulos de silício cristalino, que ainda dominam amplamente o mercado, quanto para tecnologias de filmes finos que vem aumentando gradativamente o seu papel no cenário mundial. Através da análise da variação da eficiência é possível prever com maior exatidão a energia que pode ser convertida por um dado sistema ao longo do tempo, e com isso estimar o custo real da energia elétrica proveniente da conversão fotovoltaica.

Modelos descrevendo a variação da eficiência de acordo com as condições de operação podem ser encontrados em Durisch et. al., (2007) e Topic et. al., (2006) entre outros. Em Huld et al., (2009) é proposto um modelo para determinação do valor instantâneo da eficiência, levando em conta a temperatura do módulo e a irradiância incidente. Em um trabalho publicado por Durisch et. al., (1996) são apresentados dois modelos distintos para a representação da variação da eficiência com a irradiância. Entretanto cada modelo é aplicado para um módulo diferente não sendo realizada uma comparação entre estes modelos buscando avaliar qual é o mais indicado para aplicação em módulos de diferentes tecnologias. Neste trabalho ambos os modelos sugeridos por Durisch et. al., (1996) foram aplicados para sete módulos de diferentes configurações e tecnologias buscando avaliar qual representa de forma mais fiel a variação da eficiência de conversão com a irradiância. Foram também medidas curvas com diferentes temperaturas, mas com valores muito próximos de irradiância. Estas curvas foram posteriormente corrigidas para a condição de 1000 W/m², buscando assim avaliar a variação da eficiência com respeito à temperatura.

2. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Para determinar qual a eficiência de um módulo fotovoltaico é necessário saber a irradiância que incide sobre a superfície do mesmo e qual a potência que o módulo é capaz de fornecer para esta energia a uma dada temperatura. Matematicamente a definição de eficiência é dada pela Eq. 1.

$$\eta = \frac{P_M}{AG} \quad (1)$$

onde η é a eficiência do módulo, P_M é a máxima potência que o módulo é capaz de fornecer para uma dada condição de temperatura e irradiância, A é a área do módulo e G é a irradiância global incidente no plano do mesmo.

Para a determinação da eficiência dos módulos ensaiados neste trabalho a técnica adotada foi a de medir uma curva característica de corrente por tensão (I - V) e através desta determinar o seu ponto de máxima potência. Todas as curvas utilizadas para a elaboração deste trabalho foram medidas junto ao Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT), centro de ensaios e estudos em energia solar fotovoltaica do governo da Espanha. Todas as curvas foram medidas com iluminação natural, com uma resolução de 4½ dígitos para a corrente e para a tensão e com uma resolução de 0,1°C para a temperatura, medida por meio de um sensor termopar tipo J fixado na parte traseira dos módulos. Cada curva I - V foi medida com um total de 130 pontos em um tempo total de varredura da ordem de 2 segundos.

Para a medida da irradiância global incidente foi utilizada uma célula de referência de tecnologia de silício monocristalino, modelo Si-10TC-K. Esta célula possui um circuito interno, que alimentado com uma tensão entre 12V e 28V assegura que a corrente de curto-circuito medida nos terminais da célula não apresente variação com a temperatura. Isto é importante para a determinação do coeficiente de variação da corrente de curto-circuito com a temperatura do módulo. Caso o sensor de irradiância apresentasse uma variação com a temperatura seria necessário medir sua temperatura para aplicar uma posterior correção dos valores medidos. A determinação do coeficiente de variação da corrente de curto-circuito com a temperatura do módulo foi necessária neste trabalho para a correção das curvas medidas em diferentes irradiâncias para a temperatura de 25°C. A incerteza associada à medida de irradiância desta célula, que foi calibrada junto ao CIEMAT, é inferior a 2%.

A Fig. 1 apresenta o equipamento utilizado para a medida das curvas I - V , a Fig. 2 apresenta uma vista frontal de um módulo em ensaio e a Fig. 3 apresenta uma vista lateral do módulo em ensaio onde se pode observar uma estrutura metálica para apoio dos módulos que permite tanto a variação do ângulo azimutal como do ângulo zenital.

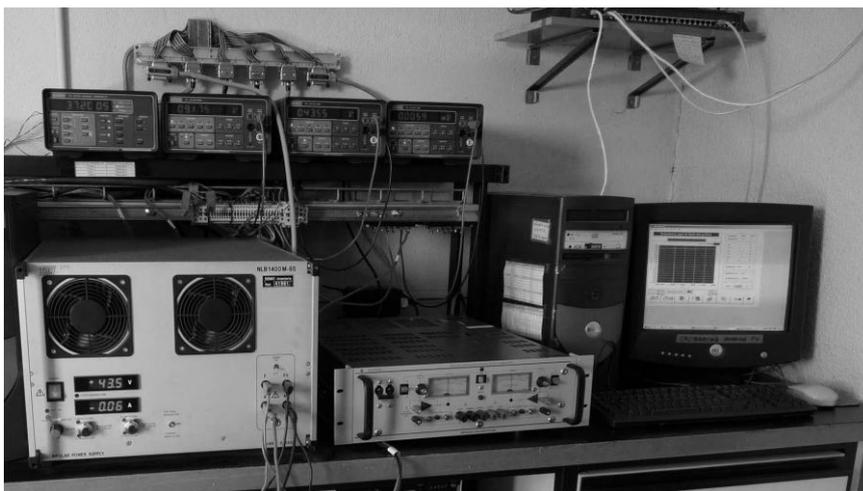


Figura 1 – Equipamento de medida utilizado para a determinação de curvas I - V .



Figura 2 – Vista frontal de um módulo fotovoltaico em ensaio.

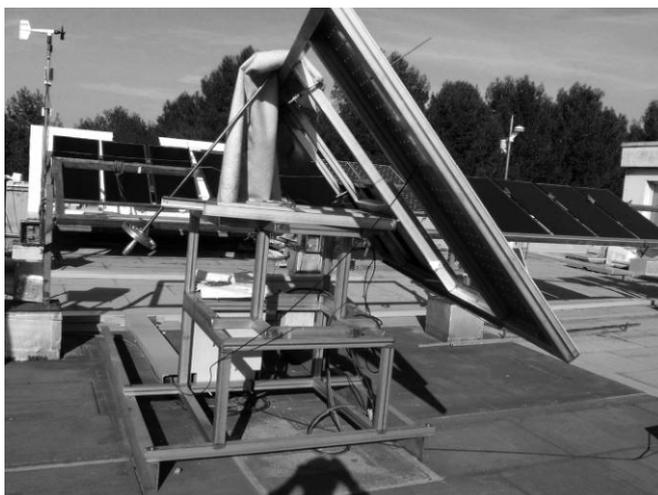


Figura 3 – Vista lateral de um módulo fotovoltaico em ensaio.

A metodologia adotada para a determinação da variação da eficiência de módulos fotovoltaicos com a temperatura é descrita a seguir:

- a) É anexado um sensor de temperatura na parte traseira do módulo, junto a uma célula central.
- b) A célula de referência é posicionada no mesmo plano do módulo, buscando um ângulo inferior a 5 graus entre a normal à superfície do módulo e os raios solares;
- c) O módulo é mantido coberto por um material opaco de forma que a sua temperatura estabilize em um valor próximo da temperatura ambiente. O ensaio é realizado em um horário próximo do meio-dia solar, o que proporciona um valor de irradiância superior a 800 W/m^2 . Cabe ressaltar que todas as curvas medidas para a realização deste trabalho foram medidas no inverno e por isto em alguns casos não foi possível medir curvas com valores de irradiância próximos de 1000 W/m^2 .
- d) O módulo é descoberto e uma curva $I-V$ é medida.
- e) A partir do momento em que o módulo é exposto a irradiância, sua temperatura aumenta gradativamente. Dessa forma, a cada intervalo de mais ou menos 2°C uma nova curva é medida. São medidas curvas $I-V$ até que a temperatura do módulo entre em regime estacionário.
- f) Durante o tempo de aquisição de uma curva $I-V$ (aproximadamente 2 segundos), a irradiância pode sofrer uma variação considerável a ponto de interferir nos resultados, portanto, para a elaboração deste trabalho foi tolerada uma máxima variação de 10 W/m^2 ao longo da aquisição de uma curva $I-V$.
- g) O tempo necessário para um módulo atingir o regime estacionário, uma vez em processo de aquecimento pela luz solar, depende de vários fatores, como do tipo de material presente na parte frontal do módulo (vidro ou polímero), da temperatura ambiente e da radiação incidente. Desta forma, podem-se medir curvas com uma diferença considerável entre os valores médios de irradiância. Para evitar isto, durante o processo de aquecimento o módulo pode ser reorientado para proporcionar um valor menor ou maior de irradiância incidente, de forma que a máxima diferença entre os valores médios de irradiância de todas as curvas medidas não seja superior a um determinado valor, que para este trabalho foi estipulado em 50 W/m^2 .
- h) Após medidas, as curvas são transladadas para uma condição de 1000 W/m^2 por meio do método de translação geométrica descrito em Bühler e Krenzinger, (2008).
- i) Por fim são calculadas as eficiências de conversão do modulo relativas a cada temperatura medida.

Para a determinação da variação da eficiência de módulos fotovoltaicos com a irradiância, é necessário medir curvas $I-V$ com valores de irradiância distintos, porém com mesmo valor de temperatura, que neste trabalho foi estipulada em 25°C . Para tanto, a metodologia adotada consistiu nas seguintes etapas:

- a) O módulo é posicionado de forma que o ângulo entre a normal à sua superfície e os raios solares seja menor do que 5° .
- b) A temperatura do módulo é monitorada, por meio de um sensor fixado na sua parte traseira, até que atinja um valor próximo de 25°C . É assumido que a temperatura ambiente esteja abaixo de 25°C , caso contrário esta metodologia de ensaio só pode ser aplicada em uma câmara climatizada, tal qual descrita em Bühler et. al., (2009).
- c) Uma curva $I-V$ é medida, sendo esta curva relativa ao maior valor de irradiância para o ensaio.
- d) O ângulo entre a normal e os raios solares é ligeiramente alterado, de forma que a irradiância incidente assuma um novo valor e uma nova curva $I-V$ possa ser medida.
- e) O ângulo entre a normal e os raios solares é sucessivamente alterado e para cada novo valor uma nova curva $I-V$ é medida até que a irradiância incidente sobre o módulo seja totalmente devida a parcela difusa. Este será o menor valor de irradiância do ensaio.

- f) À medida que as curvas com diferentes valores de irradiância vão sendo medidas, a temperatura do módulo varia. Portanto, a orientação do módulo é modificada sempre que existir a necessidade de aquecer ou resfriar o módulo, de forma que todas as curvas I-V possam ser medidas com uma temperatura de $25^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$.
- g) Após medidas, todas as curvas são transladadas para a temperatura de 25°C , novamente utilizando o método de translação geométrico.
- h) Por fim são calculadas as eficiências de conversão do módulo relativas a cada irradiância medida.

3. RESULTADOS OBTIDOS

Para este trabalho foram ensaiados seis módulos, cujas características de catálogo são fornecidas na Tab. 1.

Entre os módulos ensaiados destaca-se o modelo SPR-300-WHT-I da empresa SunPower por possuir a segunda maior eficiência encontrada em módulos comerciais atualmente disponível no mercado. Até o presente momento, o módulo de maior eficiência é o de modelo SPR-315E-WHT-D, também da empresa SunPower, com 19,3% de eficiência. Estes módulos possuem contatos metálicos localizados na parte posterior do módulo, o que aumenta a área útil para absorção de luz. A sigla HIT que descreve a tecnologia do módulo da empresa Sanyo, apresentada na Tab. 1, significa *Heterojunction with Intrinsic Thin layer*. Trata-se de uma lâmina de silício monocristalino envolta por duas lâminas ultrafinas de silício amorfo.

Tabela 1 – Módulos ensaiados e dados de catálogo relativos à condição padrão de ensaio.

Fabricante	Modelo	Tecnologia	I _{SC} (A)	V _{OC} (V)	P _M (W)
Shell Solar	Eclipse 80C	CIS	2,68	46,60	80
Siliken	SLK60P6	p-Si	7,38	36,90	200
Solarex	MST-43LV	a-Si/a-SiGe	3,30	22,70	43
Sun Power	SPR-300-WHT-I	m-Si	5,87	64,00	300
Sanyo	HIP-200NHE1	HIT	5,50	49,60	200
Würth Solar	WSG000175E	CIS	2,40	43,10	75

Em todos os módulos analisados a variação da eficiência com a temperatura pode ser expressa por uma relação linear em acordo com o que é encontrado na literatura. Para a representação matemática da variação da eficiência com a irradiância, foram testados dois modelos matemáticos sugeridos por Durisch et. al., (1996). Estes modelos são apresentados nas Eqs (2) e (3).

$$\eta = aG + b\sqrt{G} + c\sqrt[3]{G} + d\sqrt[4]{G} + e\sqrt[5]{G} \tag{2}$$

$$\eta = aG + \frac{bG}{c + G} \tag{3}$$

onde *a*, *b*, *c*, *d*, e *e* são coeficientes de ajuste.

As Figs. 4 a 9 apresentam a variação da eficiência com a temperatura e com a irradiância para os seis módulos ensaiados.

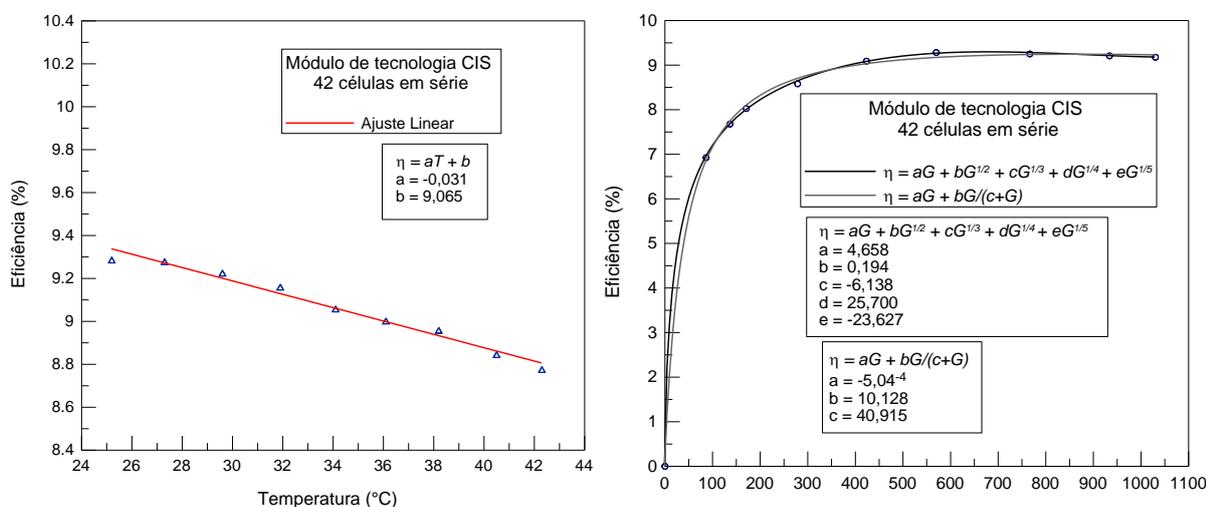


Figura 4 - Variação da eficiência de conversão de um módulo de tecnologia CIS (42 células em série e 2 em paralelo) com relação à a) temperatura e b) irradiância.

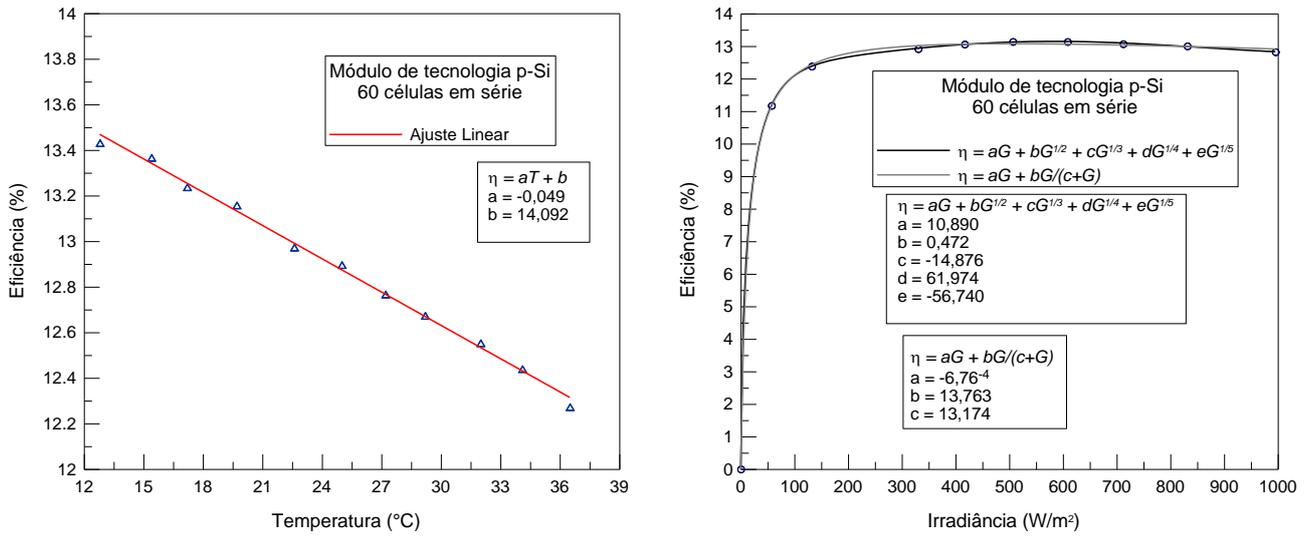


Figura 5 - Variação da eficiência de conversão de um módulo de silício policristalino (60 células em série) com relação à a) temperatura e b) irradiância.

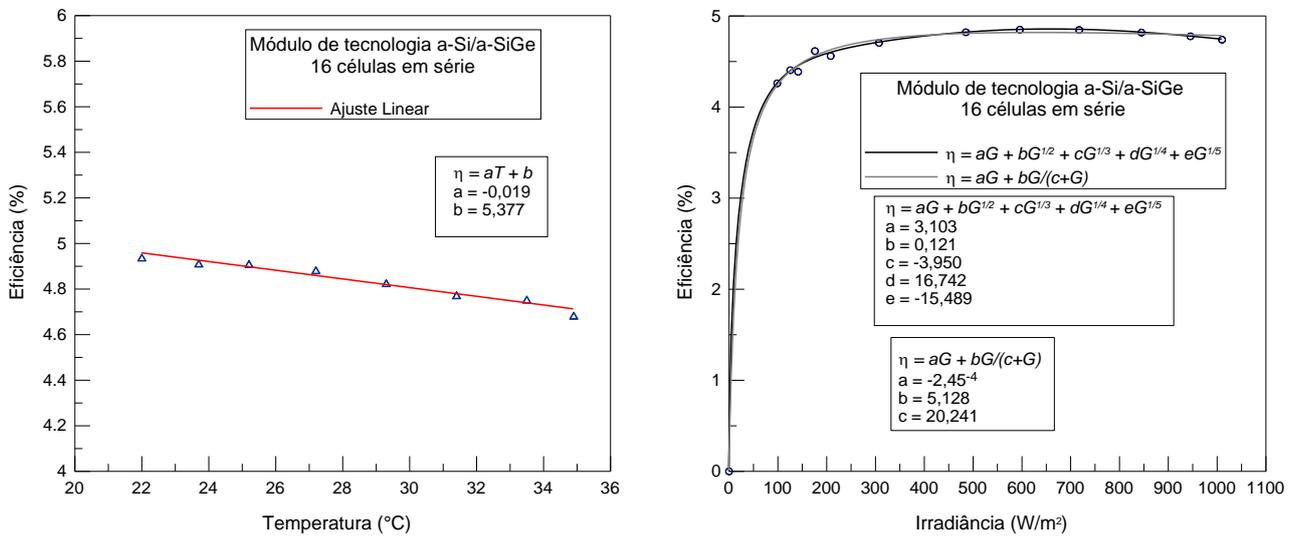


Figura 6 - Variação da eficiência de conversão de um módulo de silício amorfo de dupla união (16 células em série e 4 em paralelo) com relação à a) temperatura e b) irradiância.

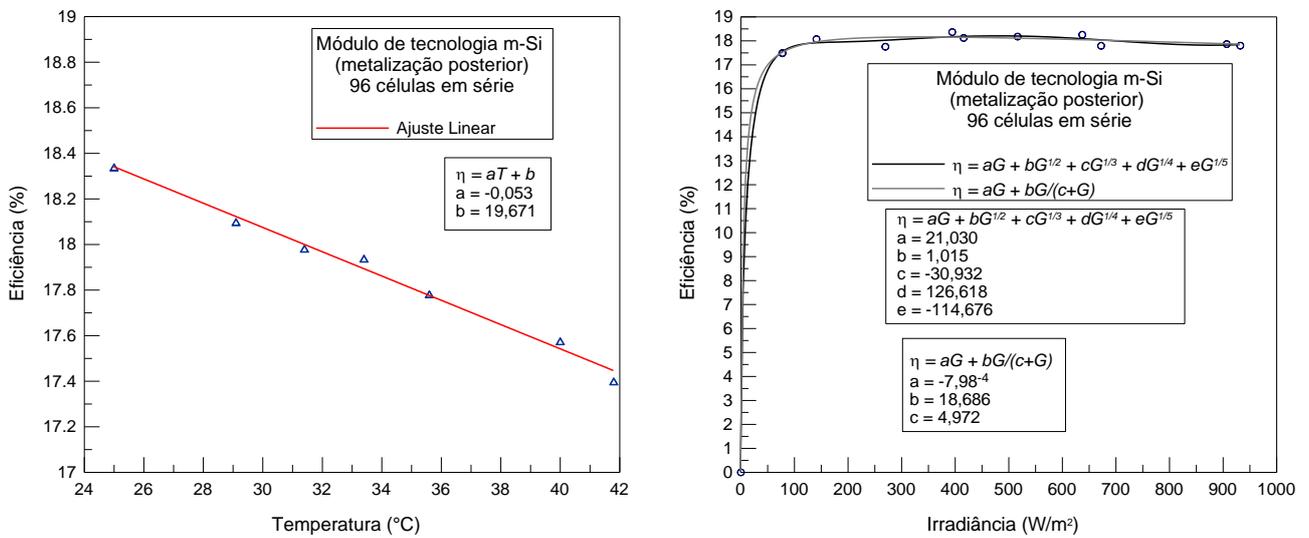


Figura 7 - Variação da eficiência de conversão de um módulo de silício monocristalino de alta eficiência (96 células em série com metalização posterior) com relação à a) temperatura e b) irradiância.

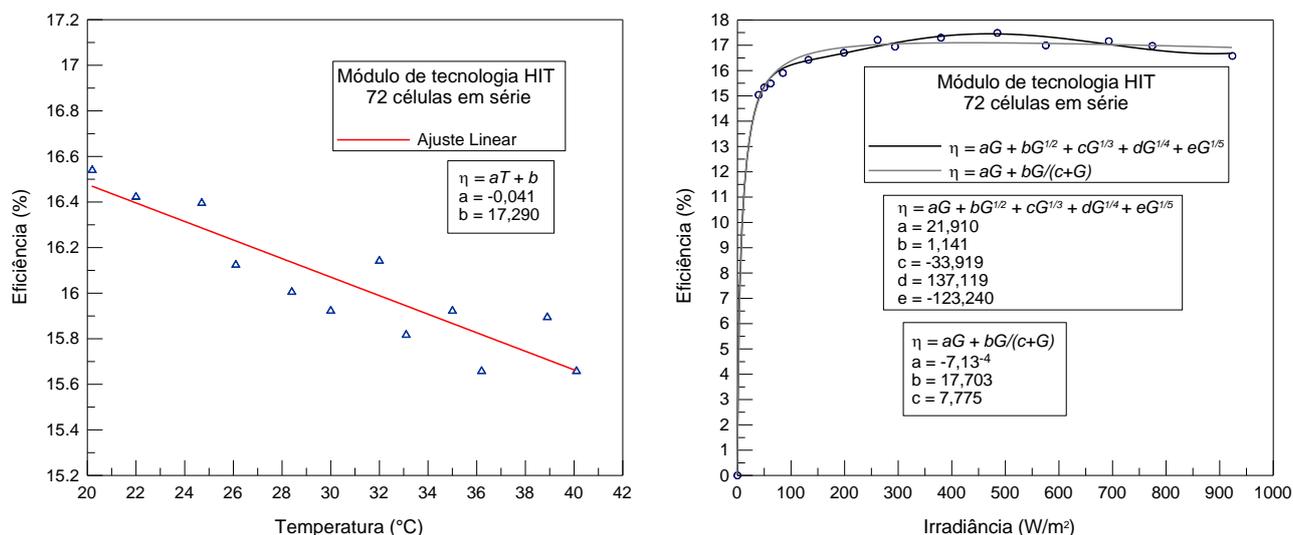


Figura 8 - Variação da eficiência de conversão de um módulo de tecnologia HIT (silício monocristalino envolto por duas camadas de silício amorfo com 72 células em série) com relação à a) temperatura e b) irradiância.

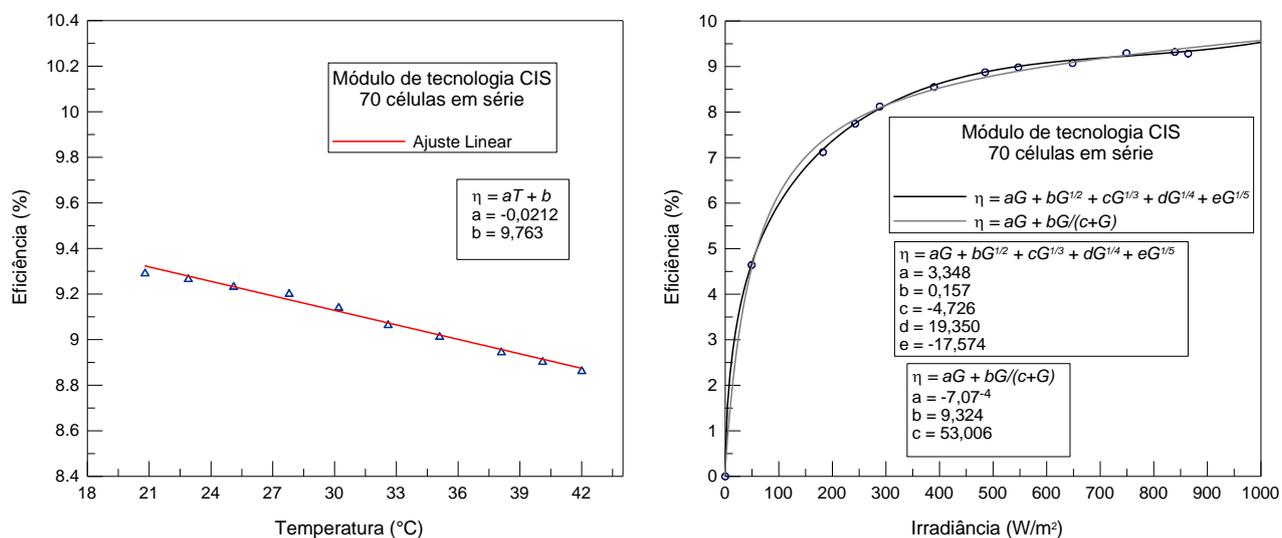


Figura 9 - Variação da eficiência de conversão de um módulo de tecnologia CIS (70 células em série) com relação à a) temperatura e b) irradiância.

Através das Figs. 4(a) a 9(a) é possível observar que todas as curvas de variação da eficiência com a temperatura, apresentaram baixo desvio em relação a uma tendência linear. Todos os módulos ensaiados apresentaram uma diminuição da eficiência com o aumento da temperatura, sendo o módulo de silício monocristalino SPR-300-WHT-I o que apresentou o maior coeficiente. O módulo de silício amorfo de dupla união, modelo MST-43LV, foi o que apresentou a menor variação da eficiência com respeito à temperatura, quase três vezes menos do que o módulo SPR-300-WHT-I.

A Tab. 2 apresenta os resultados obtidos para a variação da eficiência com a temperatura ($\partial\eta/\partial T$) de cada um dos seis módulos medidos. São também apresentados os valores de eficiência relativos à temperatura de 50°C, que é uma temperatura próxima da que módulos expostos a luz solar tipicamente atingem no Brasil em média ao longo do ano. Eficiências de conversão para esta condição de operação fornecem uma idéia mais realista da energia convertida ao longo do tempo para um dado sistema fotovoltaico.

Nas Figs. 4(b) a 9(b), referentes à variação da eficiência com a irradiância, pode-se observar uma baixa dispersão dos pontos medidos em relação aos modelos matemáticos aplicados. Pode-se concluir que ambos os modelos aplicados descrevem bem o comportamento da eficiência com respeito à irradiância, de forma que a utilização de um ou outro proporcionaria resultados similares se aplicados em programas de simulação. A única diferença significativa é que o modelo descrito pela Eq. (3) é matematicamente mais simples e, portanto, apresenta maior facilidade na determinação de seus coeficientes. Isto ocorre porque para o processo de determinação dos coeficientes de ajuste, este modelo é menos dependente dos valores iniciais atribuídos a estes coeficientes.

Tabela 2 – Coeficiente de variação da eficiência com a temperatura para os módulos medidos, eficiência de catálogo e valores determinados de eficiência para a condição padrão e para a condição de 50°C e 1000W/m².

Módulo	$\frac{\partial \eta}{\partial T}$ (%/°C)	η (condição padrão) (%)	η (1000W/m ² , 50°C) (%)	η (catálogo) (%)
Eclipse 80C	-0,031	8,29	7,51	9,30
SLK60P6	-0,049	12,87	11,64	13,25
MST-43LV	-0,019	4,90	4,43	4,96
SPR-300-WHT-I	-0,053	18,35	17,02	18,38
HIP-200NHE1	-0,041	16,26	15,24	15,96
WSG000175E	-0,021	9,23	8,70	10,29

4. CONCLUSÕES

A variação da eficiência com a temperatura de todos os módulos analisados pode ser representada por uma função linear, fornecendo assim um bom grau de representação. Todos os módulos apresentaram uma diminuição da eficiência com o aumento da temperatura, sendo o módulo de silício monocristalino SPR-300-WHT-I o que apresentou o maior coeficiente, da ordem de -0,05%/°C. O menor coeficiente encontrado foi para o módulo de silício amorfo de dupla união, com um valor quase três vezes menor do que o do módulo SPR-300-WHT-I.

Foi encontrada uma diferença máxima superior a 10% entre a eficiência medida e a informada pelo fabricante (condição padrão) para os dois módulos de tecnologia CIS. Nos demais casos a diferença média foi da ordem de 1,2%.

Ambas as funções matemáticas aplicadas para a representação da variação da eficiência com a irradiância forneceram bons resultados, sendo que a diferença mais significativa entre essas funções foi o fato de uma delas apresentar maior facilidade no processo de determinação dos coeficientes de ajuste.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e o uso das instalações e equipamentos do Centro de Investigaciones, Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT).

7. REFERÊNCIAS

- Bühler, A. J. e Krenzinger, A., 2008. Comparação entre diferentes métodos de translação de curvas *I-V* de módulos fotovoltaicos, In: Congresso Brasileiro de Energia Solar e III Conferencia Latinoamericana de la ISES, 2008, Florianópolis. Anais do II CBENS & III ISES-CLA. Recife : ABENS.
- Bühler, A. J. ; Gasparin, F. P. ; Rampinelli, G. A. and Krenzinger, A., 2009. Development of a climatic chamber for photovoltaic modules testing, In: 20th International Congress of Mechanical Engineering, 2009, Gramado - RS.
- Durisch, W., Urban, J. and Smestad, G., 1996. Characterisation of solar cells and modules under actual operating conditions, WREC-IV World Renewable Energy Congress N°4, Denver, Colorado, vol. 8, n° 1-4, pp. 359-366.
- Durisch, W., Bitnar, B., Mayor, J-C., Kiess, H., Lam, K-H. and Klose, J., 2007. Efficiency model for photovoltaic modules and demonstration of its application to energy yield estimation, Solar energy materials and solar cells, vol. 91, n°1, pp. 79-84.
- Topic, M., Brecl, K. and Sites, J., 2006. Effective efficiency of PV modules under field conditions, Progress in Photovoltaics: Research and Applications, vol. 15, Issue 1, pp. 19-26.
- Huld T., Gottschalg R., Beyer H. G., Topić M., 2009. Mapping the performance of PV modules of different types. Proceedings of the 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 21-25 September 2009, Hamburg, Germany.
- Pvresources, 2010. Disponível no endereço eletrônico www.pvresources.com, capturado em 20 de março de 2010.

Abstract. *The value of photovoltaic module efficiency is fundamental to esteem the amount of energy that can be converted in a specific operating condition. The efficiency can be found in the electrical datasheet of a photovoltaic module, however in the most of the cases this value is provided only for the standard test condition. Take into account that the efficiency varies with the temperature and irradiance, it is very important to know the way it occurs. It is important not only for crystalline silicon modules, witch still represent the dominant part of the PV trade, but also for thin film technologies which are continuously increasing their role in the international market. By fitting mathematic functions that represent the variation of efficiency with temperature and irradiance, it is possible to calculate the energy that the device will be able to provide under different operating conditions. This work presents experimental tests using six different modules of different technologies, under natural illumination, for the determination of the efficiency variation with temperature and irradiance.*

Keywords: *Photovoltaic solar energy, Photovoltaic Modules, efficiency of conversion, Thin Films.*