

ENSAIOS DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS DE DISTINTAS TECNOLOGIAS COM UTILIZAÇÃO DE SIMULADOR SOLAR

J. Peroza¹, G. A. Rampinelli¹, F. P. Gasparin², A. Krenzinger³

¹Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) R. Eng. Agrônomo Andrei Cristian Ferreira, s/n –
Trindade, Florianópolis - SC, 88040-900, Brasil

^{2,3}Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (UERGS) Rua 7 de Setembro, 1156 - Centro,
Porto Alegre - RS, 90010-191, Brasil

e-mail: josi_peroza@hotmail.com, giuliano.rampinelli@ufsc.br,
gasparin.fabiano@gmail.com, arno.krenzinger@ufrgs.br

Recibido 03/09/15; Aceptado 05/10/15.

RESUMO.- A energia solar fotovoltaica apresenta-se como uma alternativa promissora no que se refere ao uso de energias renováveis no mundo. O Brasil possui um imenso potencial para a utilização de energia solar, pois em todo o território brasileiro há disponibilidade de irradiação solar equivalente ou melhor que nos países do Sul da Europa, como Itália e Espanha, que possuem significativa capacidade instalada de sistemas de geração fotovoltaica. Embora essa energia ainda seja pouco explorada na extensão brasileira, esse cenário tende a mudar em razão da primeira contratação da energia solar fotovoltaica no Leilão de Energia de Reversa de 2014 – LER/2014. Em vista dessa perspectiva de introdução da energia solar fotovoltaica na matriz elétrica brasileira, neste trabalho foram realizadas caracterizações elétricas de módulos fotovoltaicos com simulador solar a fim de discutir as curvas características I-V de diferentes tecnologias fotovoltaicas. O simulador solar utilizado corresponde ao modelo PASAN SunSim 3c, com o qual foi possível a variação de irradiância. Dos dez módulos fotovoltaicos analisados, todos apresentaram um comportamento semelhante referente à influência da variação da irradiância. A eficiência e fator de forma de módulos com células de silício cristalino obtiveram maiores percentuais em relação aos modelos de tecnologia de filmes finos.

Palavras-chaves: Energia Solar, Sistemas Fotovoltaicos, Simulador Solar.

TESTS OF PHOTOVOLTAIC MODULES OF DIFFERENT TECHNOLOGIES WITH SOLAR SIMULATOR

ABSTRACT.- Photovoltaic solar energy presents itself as a promising alternative regarding the use of renewable energy in the world. Brazil has a huge potential for using solar energy, since the entire Brazilian territory has the incidence of solar radiation equivalent to or better than that in countries in southern Europe, such as Italy and Spain, which already have significant installed capacity of photovoltaic generation systems. However, this power is still little explored in Brazil. This scenario is likely to change because of the first signing of photovoltaic solar energy in Reserve Energy Auction 2014 - REA / 2014. Having in mind the future potential of photovoltaic solar energy, this paper aims to provide information on the electrical characterization of photovoltaic modules with a solar simulator in order to discuss the I-V curves from different photovoltaic technologies. The solar simulator used in this study corresponds to the SunSim 3c by Swiss manufacturer Pasan, which has the possibility to vary the irradiance. Ten photovoltaic modules were tested and all of them showed similar behavior regarding the influence of irradiance. The efficiency and fill factor of crystalline silicon technology modules are higher than the thin-film technology modules.

Keywords: Solar Energy, Photovoltaic Systems, Solar Simulator.

1. INTRODUÇÃO

A potência produzida pelo módulo ou gerador fotovoltaico e entregue à rede elétrica depende de muitos fatores, sendo que os dois mais importantes referem-se à radiação solar incidente no plano do módulo e a temperatura de operação das células que constituem os módulos. Outros aspectos adicionais estão associados às perdas na fiação, às diferenças entre as células individuais que constituem um módulo e às diferenças entre os módulos que constituem um gerador fotovoltaico. A curva característica corrente-tensão (I-V) descreve o comportamento elétrico nos

terminais do gerador fotovoltaico sob influência desses fatores (MACÊDO, 2006).

Considerando que uma célula fotovoltaica é um dispositivo semicondutor no qual existe uma junção PN, o comportamento da corrente elétrica em função da tensão elétrica é basicamente o mesmo de um diodo cuja junção está no escuro. Entretanto, a célula fotovoltaica tem sua aplicação justamente quando a junção está iluminada sendo que a radiação incidente na célula causa o deslocamento da curva I-V. (ANDRADE, 2008 apud GREEN, 1992).

A análise da curva I-V é de fundamental importância na caracterização de um gerador fotovoltaico, pois a partir dela é possível obter os principais parâmetros que determinam sua qualidade e desempenho. A curva I-V, como exemplificado, é a resultante da superposição da corrente fotogerada com a curva do diodo no escuro. A luz tem o efeito de deslocar a curva I-V para o quarto quadrante (quadrante de geração) (PRIEB, 2011). Entretanto, a curva I-V normalmente é rebatida para o primeiro quadrante quando se trata de células fotovoltaicas, a fim de convencionar a corrente elétrica gerada como positiva.

O desempenho de células e módulos fotovoltaicos normalmente é associado às condições de teste padrão (*Standart Test Conditions* –STC), ou seja, nível de irradiância de 1000 W/m² ou também conhecido como 1 sol, distribuição espectral correspondente a AM1,5 e temperatura de célula de 25°C. Estas condições de irradiância podem, em certa medida, representar as condições de operação em um dia típico de céu claro, entretanto, a temperatura considerada para a operação em campo frequentemente resulta em temperaturas próximas a 50°C. Uma temperatura definida em norma que se aproxima às condições de campo é a temperatura nominal de operação, normalmente conhecida pela sigla NOCT (*nominal operating cell temperature*). A diferença entre as temperaturas obtidas em campo e temperatura das condições padrão proporciona também uma diferença entre a potência entregue pelo módulo fotovoltaico e a potência nominal (MACÊDO, 2006).

Em qualquer fase de um projeto para aplicação de energia solar fotovoltaica, desde o dimensionamento técnico até estudos de viabilidade econômica é imprescindível o conhecimento do comportamento elétrico dos módulos e arranjos fotovoltaicos. Segundo a norma americana ASTM E1036 (1996), a medida do desempenho de um módulo ou arranjo fotovoltaico consiste em determinar pelo menos as seguintes características elétricas: corrente de curto-circuito (I_{sc}), tensão de circuito aberto (V_{oc}), potência máxima (P_m), tensão de máxima potência (V_{mp}) e corrente de máxima potência (I_{mp}). Estas características são determinadas mediante análise direta da curva característica I-V, sendo estes os dados que obrigatoriamente os fabricantes especificam nos módulos comerciais (GASPARIN, 2009). A norma brasileira NBR12136, a norma internacional IEC 891 (1987) e a norma americana E 1036-08 estabelecem a mesma condição padrão para a determinação da curva I-V (BUHLER, 2011).

Com as normas brasileiras referentes a caracterização de dispositivos fotovoltaicos, como a NBR12136/MB3477, sendo canceladas, aquele que pretende fazer testes de módulos e sistemas fotovoltaicos deve seguir a portaria INMETRO 004/2011. Esta portaria tem como objetivo estabelecer os critérios para o Programa de Avaliação da Conformidade para sistemas e equipamentos para energia fotovoltaica, através do mecanismo da Etiquetação, para utilização da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia – ENCE, atendendo aos requisitos do Programa Brasileiro de Etiquetação - PBE, visando à eficiência energética e adequado nível de segurança, a qual avalia os equipamentos nas condições nominais e extremas de funcionamento para garantir que os dispositivos fotovoltaicos tenham uma qualidade mínima assegurada.

No que se refere às normas e sequência dos procedimentos para ensaios dos módulos fotovoltaicos duas normativas internacionais são adotadas: a IEC 61215 – *Crystalline Silicon Terrestrial Photovoltaic (PV) Modules – Design Qualification and Type Approval* e IEC 61646 - *Thin-film terrestrial photovoltaic (PV) modules – Design qualification and type approval*.

Para a execução dos ensaios previstos pelo INMETRO, para cada modelo é necessária uma amostra de 2 módulos fotovoltaicos. Esses dois módulos serão submetidos aos seguintes testes: tratamento prévio com irradiação de 5 kWh/m², inspeção visual e determinação da potência máxima. A partir da conclusão desses testes um módulo será submetido ao ensaio de isolamento elétrica em condições de umidade e o outro será mantido como unidade de controle (INMETRO, 2011). O módulo fotovoltaico é considerado aprovado nos respectivos ensaios se não houver evidência visual de um defeito importante, e se a potência máxima estiver entre -5% e 10% da potência indicada na planilha de especificação técnica, PET, apresentada pelo fabricante/fornecedor (INMETRO, 2011).

Para a determinação da potência máxima deve-se seguir as normas IEC 61215 para dispositivos cristalinos e a IEC 61646 para filmes finos, que determinam o desempenho elétrico do módulo nas Condições Padrão de Teste. Estas permitem que seja usada luz solar ou um simulador classe A, em conformidade com os requisitos da norma IEC 904-3 e acrescenta-se que a característica corrente-tensão do módulo deverá ser determinada de acordo com a norma IEC 904-1. Quando necessário, pode-se fazer as correções de temperatura e irradiância, em conformidade com a norma IEC 891 (RAMOS, 2006).

Após os procedimentos de ensaios serem realizados, e se estes não apresentarem inconformidades, é possível classificar os módulos fotovoltaicos de acordo com a eficiência energética obtida a partir dos testes aplicados, independente da forma utilizada, seja com o uso de simulador solar ou com medição com luz solar natural. A Tabela 1 mostra os padrões para módulos de silício cristalino e a Tabela 2 relaciona a classe de eficiência energética de acordo com módulos de tecnologia de filmes finos, seguindo as normativas do INMETRO.

Tabela 1: Classificação de eficiência energética para módulos de silício cristalino. Fonte: INMETRO, 2011.

Classe de Eficiência Energética
A > 13,5%
13% < B ≤ 13,5%
12% < C ≤ 13%
11% < D ≤ 12%
E < 11%

Tabela 2: Classificação de eficiência energética para módulos de filmes finos. Fonte: INMETRO, 2011.

Classe de Eficiência Energética
A > 9,5%
7,5% < B ≤ 9,5%
6,5% < C ≤ 7,5%
5,0% < D ≤ 6,5%
E < 5,0%

2. METODOLOGIA

A caracterização dos módulos fotovoltaicos foi realizada através de um simulador solar (*indoor*). O intuito deste trabalho consiste em verificar os aspectos técnicos e parâmetros das curvas I-V de diferentes tecnologias fotovoltaicas a partir de ensaios com simulador solar, incluindo a variação de irradiância. Os testes foram realizados no Laboratório de Energia Solar (LABSOL) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), com equipamentos de medição e módulos fotovoltaicos de diferentes tecnologias. Vale ressaltar que os experimentos aqui citados não possuem como finalidade a caracterização de módulos fotovoltaicos para certificação do INMETRO, sendo que os testes, e consequentemente seus resultados, são puramente para fins de pesquisa científica.

O simulador solar é um equipamento que conta com lâmpadas especiais para emular as propriedades da radiação solar durante o ensaio da determinação da curva característica de dispositivos fotovoltaicos. A corrente e tensão do módulo sob teste, além da irradiância e da temperatura da célula são medidos e registrados através de um aparelho eletrônico específico (DALMAGRO e KRENZINGER, 2013). A Figura 1 apresenta os três tipos básicos de simuladores solares que são diferenciados de acordo com a tecnologia utilizada para a geração de luz.

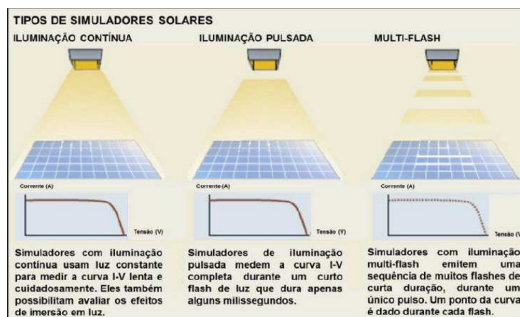


Fig. 1: Exemplos de simuladores solares. Fonte: DALMAGRO e KRENZINGER, 2013 apud PHOTON, 2008.

A norma ASTM E927-10 (*Standart Specification for Solar Simulation for Photovoltaic Testing*) fornece meios para classificar os simuladores solares utilizados em testes de equipamentos fotovoltaicos (células ou módulos solares) levando em consideração o casamento espectral com relação a uma irradiância espectral de referência, a não uniformidade espacial da irradiância e a instabilidade temporal de irradiância. Esta classificação é dividida em três classes (A, B, ou C) e um simulador pode ser classificado em múltiplas classes dependendo de suas características (GUIMARÃES et al., 2011). A Tabela 3 identifica as classes de simuladores solares segundo a norma ASTM.

Tabela 3: Classificação de simuladores solares de acordo com características específicas. Fonte: GUIMARÃES et al., 2011.

Classe	Casamento espectral para todos os intervalos	Não uniformidade espacial de irradiância	Instabilidade temporal de irradiância
A	0,75 a 1,25	3%	2%
B	0,6 a 1,4	5%	5%
C	0,4 a 2,0	10%	10%

Usualmente quanto mais próximo do espectro solar for o espectro do equipamento, mais caro é o simulador solar. Quanto à característica de não uniformidade espacial, é uma das mais difíceis de atender, pois a radiação solar natural é plenamente uniforme (DALMAGRO e KRENZINGER, 2013). Em vista das atribuições mencionadas sobre cada tipo e classe de simuladores solares coube ao LABSOL – UFRGS a escolha do modelo SunSim 3c, fabricado pela empresa suíça Pasan. Foram levados em conta aspectos como o custo, a área iluminada de 2,0 x 2,0 m, suficiente para a maioria dos módulos comerciais existentes, a duração do pulso de luz com 10 ms e, principalmente as características espectrais, espaciais e temporais, excedendo a classificação AAA da norma IEC 60904-9. Sua carga eletrônica de três quadrantes é capaz de polarizar módulos com correntes de até 30 A e tensões de até 300 V. A lâmpada de xenônio tem garantia de um mínimo de 10000 pulsos e uma vida típica entre 15000 e 20000 pulsos. O sistema de aquisição é capaz de coletar até 4000 pontos da curva I-V, a uma resolução de 12 bits (DALMAGRO e KRENZINGER, 2013).

Em um simulador solar o sistema de medição é composto por uma carga eletrônica e um conjunto de conversores analógico/digital que realizam a aquisição de variáveis. Os conversores recebem os sinais analógicos dos canais de entrada e transferem para o computador os respectivos valores digitais desses canais. Durante o flash, a carga eletrônica faz a varredura de tensão e o sistema de aquisição mede de forma simultânea os valores de corrente, tensão, irradiância e temperatura, podendo-se assim, determinar a curva I-V de módulos fotovoltaicos e consequentemente seu ponto de máxima potência (MOCELIN, 2014). As medições e a visualização dos resultados de ensaios realizados no simulador solar são controladas por um microcomputador conectado à carga eletrônica. Por meio do software de operação do simulador é possível transferir a curva característica medida para as condições padrão de teste (MOCELIN, 2014).

O simulador é utilizado com um túnel óptico de 6,5 m x 2,5 m x 2,5 m. O conjunto está abrigado em uma edificação com 75 m² construída especialmente para este fim nas instalações do LABSOL. O túnel é composto de paredes escuras de material com baixa refletância em todos os comprimentos de onda de interesse, inclusive no infravermelho próximo. Nesta câmara fica o suporte dos módulos, onde serão dispostos a célula de referência e o módulo sob teste, a uma distância específica da lâmpada de xenônio geradora do flash.

Para atender as condições padrões de teste impostas pelo INMETRO 004/2011, a temperatura da célula deve ser mantida em 25°C. A fim de atingir essa temperatura, há nesse prédio condicionadores de ar que controlam e mantêm constante a temperatura de acordo com o exigido. A célula de referência possui conectado um sensor de temperatura Pt1000 a fim de possibilitar a compensação da irradiância medida caso a temperatura da célula não esteja no padrão.

Com o uso do simulador solar SunSim 3c foi possível a realização de testes de caracterização de dez diferentes módulos fotovoltaicos, com diferentes tecnologias. Foram examinados módulos de primeira geração com células de silício cristalino e de segunda geração, com células de filmes finos. Por meio do simulador empregado também foi realizada a variação do parâmetro de irradiância solar, tendo

em vista que o simulador possui placas de atenuação da radiação que possibilitam o ajuste da irradiância, sendo que foram feitos ensaios com irradiâncias de 100, 200, 300, 400, 500, 700 e 1000 W/m².

3. ENSAIOS DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS EM SIMULADOR SOLAR

Foram realizados ensaios no simulador solar com dez módulos de diferentes tecnologias tendo como intuito a análise de características de desempenho como eficiência de conversão e fator de forma. Estes módulos fotovoltaicos foram selecionados de modo a propiciar uma melhor caracterização de distintas tecnologias fotovoltaicas e análise de funcionamento.

A Tabela 4 introduz uma denominação genérica dos fabricantes e apresenta as respectivas tecnologias fotovoltaicas dos módulos ensaiados, incluindo módulos de primeira e segunda geração. Cada módulo foi avaliado de forma individual, comparando-se características elétricas com diferentes irradiâncias incidentes e também em relação aos valores informados no catálogo do fornecedor. Em alguns modelos de módulos fotovoltaicos, nem a etiqueta do módulo nem o catálogo do fabricante fornecem certas informações, principalmente no que se refere à eficiência do módulo. Nesses casos, os valores apresentados foram obtidos pela Tabela do INMETRO de módulos fotovoltaicos para o consumidor (INMETRO, 2013).

Tabela 4: Módulos fotovoltaicos adotados para medição indoor com variação de irradiância. Fonte: do autor.

Fabricante	Tecnologia
Fabricante A	CIS
Fabricante B	Silício monocristalino
Fabricante C	Silício multicristalino
Fabricante D	tandem – silício amorfo e microcristalino
Fabricante E	Silício multicristalino
Fabricante F	CIGS
Fabricante G	Silício monocristalino
Fabricante H	Silício multicristalino
Fabricante I	Silício monocristalino
Fabricante J	CIGS

As irradiâncias selecionadas para operar nestes experimentos correspondem aos valores obtidos após a atenuação realizada pelos filtros, que são acessórios do equipamento. Esses filtros compreendem placas de material similar a uma tela, de modo a reduzir a irradiância de 1000 W/m², para valores de 700 W/m², 500 W/m², 400 W/m², 300 W/m², 200 W/m² e 100 W/m². Deste modo, o simulador possui 7 faixas de irradiância diferentes, as quais serão utilizadas nesse trabalho.

Quanto às outras características de teste padrão, temperatura e distribuição espectral da radiação, a temperatura é mantida constante em 25°C com o auxílio dos aparelhos de ar-condicionado no edifício que abriga o equipamento. A célula de referência possui um sensor de temperatura que indica o valor no momento da medição da curva I-V, e caso essa temperatura não seja de 25°C, o software do simulador corrige a irradiância medida e a curva I-V, mediante a informação de coeficientes térmicos adequados. Entretanto, é preferível que a temperatura não tenha uma discordância

muito grande, para assim diminuir a possibilidade de erros decorrentes da translação da curva I-V.

Em relação ao espectro, a fonte de radiação para a realização dos ensaios é constituída por uma lâmpada de xenônio com filtros espectralmente ajustados para reproduzir o espectro AM 1,5 global (MOCELIN, ZILLES, 2008). Para melhor apresentação e disposição dos resultados, aqui serão apresentadas as análises realizadas com os módulos dos Fabricantes F e I, que compreendem as duas gerações fotovoltaicas abrangidas nesse contexto.

Fabricante F.

O primeiro módulo fotovoltaico a ser posto em análise corresponde ao modelo representado pela Fabricante F, de tecnologia CIGS e potência nominal de 150 W, sendo que a fabricante não fornece em sua etiqueta a informação de eficiência deste modelo. Outras informações relacionadas a este dispositivo em questão podem ser visualizadas na Tabela 5, sendo que o valor de eficiência foi calculado utilizando a área do módulo.

Tabela 5: Informações do módulo fotovoltaico da Fabricante F. Fonte: do autor.

Fabricante	Fabricante F
Tecnologia	CIGS
Classificação	Filmes Finos
Área	1,228 m ²
Potência nominal (P _m)	150 W
Tensão de circuito aberto (V _{oc})	110 V
Corrente de curto circuito (I _{sc})	2,1 A
Tensão de máxima potência (V _{mp})	79 V
Corrente de máxima potência (I _{mp})	1,9A
Eficiência do módulo FV	12,2%

Com este módulo sofrendo a interferência de variação de irradiância, diferentes curvas I-V são obtidas, sendo que a Figura 2 demonstra as curvas obtidas.

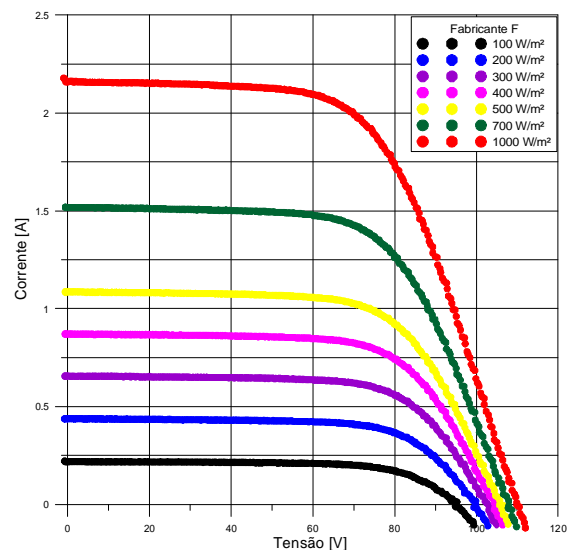


Fig. 2: Curvas I-V para diferentes valores de irradiância no módulo da Fabricante F. Fonte: do autor.

Este módulo representante de uma tecnologia de filmes finos possui baixos valores de corrente de curto circuito e altos valores de tensão de circuito aberto em comparação com a tecnologia cristalina. Entretanto, seu desempenho em relação a influência da irradiância ocorre na mesma forma. A Tabela 6 demonstra valores medidos dos parâmetros das curvas I-V, variando-se a irradiância.

Em relação ao fator de forma, é observável através da Tabela 6, que este parâmetro de desempenho diminui sua porcentagem com o acréscimo da irradiância incidente, possuindo seu maior valor em 68,4% com 100 W/m². Em contrapartida, o seu menor valor, 59,7%, é estabelecido com a irradiância de referência. Quanto a outro parâmetro de desempenho, a eficiência do módulo, este atinge uma estabilidade nas faixas intermediária de irradiância entre 300 e 500 W/m² com 12,4%. As menores eficiências encontradas referem-se aos extremos do experimento, sendo que com 1.000 W/m² atingiu-se 11,7% de eficiência. Em relação ao

indicado pelo catálogo do INMETRO, este módulo fotovoltaico possui eficiência de 12,2%, apresentando uma diferença de -0,5%, entretanto para ambos os valores citados, tal módulo ainda será caracterizado como Classe A, conforme indica a Tabela 2. O valor de 141,8 W foi obtido como potência nominal na condição de referência. Comparando ao anunciado pelo fabricante observa-se uma alteração percentual de -5,44% em relação a 150 W informado, ultrapassando em uma pequena diferença de 0,44% ao estipulado pelo INMETRO para módulos fotovoltaicos, que seria de -5% e +10%. Os módulos de tecnologia CIGS possuem uma característica metaestável cuja potência é incrementada após um período de exposição solar até atingir a estabilização. Esta diferença medida pode ser oriunda do fato que o módulo estava guardado em ambiente fechado antes da medida. Após a exposição solar, há a expectativa de um aumento de potência deste módulo.

Tabela 6: Características elétricas e de desempenho do módulo da Fabricante F sob a influência de diferentes irradiâncias. Fonte: do autor.

Irradiância [W/m ²]	Eficiência [%]	FF [%]	P _m [W]	V _{oc} [V]	V _{mp} [V]	I _{sc} [A]	I _{mp} [A]
100	11,8	68,4	14,261	95,210	74,151	0,219	0,192
200	12,2	67,7	29,663	100,007	76,661	0,438	0,387
300	12,4	67,0	45,120	102,646	77,325	0,656	0,584
400	12,4	65,9	59,900	104,416	77,212	0,871	0,776
500	12,3	64,7	74,432	105,895	77,141	1,087	0,965
700	12,1	62,6	102,630	107,839	76,349	1,519	1,344
1000	11,7	59,7	141,842	109,974	74,860	2,161	1,895

Fabricante I

Este módulo fotovoltaico em questão corresponde ao modelo da Fabricante I, de tecnologia monocristalino, com 60 células em série e potência nominal de 285 W. Outras informações relacionadas a este modelo são indicadas na Tabela 7 fornecidas pelo fabricante em questão.

Tabela 7: Informações do módulo fotovoltaico da Fabricante I. Fonte: do autor.

Fabricante	Fabricante I
Tecnologia	Monocristalino
Classificação	Silício Cristalino
Área	1,641 m ²
Número de células em série	60
Potência nominal (P _m)	285 W ± 3%
Tensão de circuito aberto (V _{oc})	38,5 V
Corrente de curto circuito (I _{sc})	9,5 A
Tensão de máxima potência (V _{mp})	31,7 V
Corrente de máxima potência (I _{mp})	9,14 A
Eficiência do módulo FV	17,7 %

Com o intuito de análise da extensão da irradiância sobre tal módulo, filtros de absorção de radiação foram utilizados no experimento, resultando diferentes curvas I-V que são apresentadas na Figura 3.

Os valores de tensão de circuito aberto encontram-se entre 35 V e 40 V, com efeito de elevação logarítmica com

aumento de irradiância. Em relação aos valores de corrente de curto circuito, estes valores variaram entre 1 A a 10 A, sofrendo aumento linear com aumento de irradiância. A Tabela 8 indica os valores dos parâmetros medidos para cada curva I-V apresentada na Figura 3.

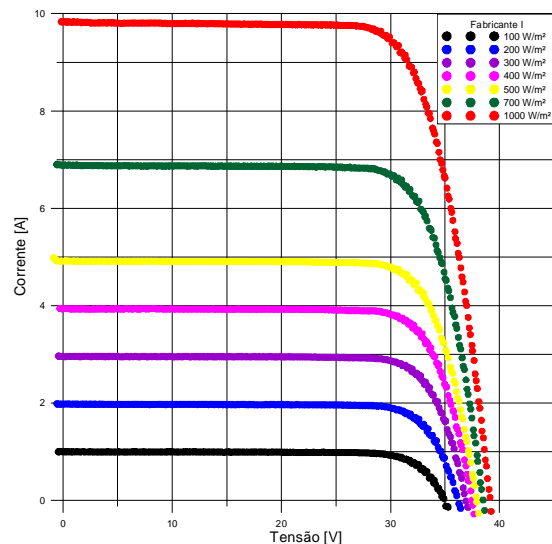


Fig. 3: Curvas I-V para diferentes valores de irradiância no módulo da Fabricante I. Fonte: do autor.

A eficiência do módulo fotovoltaico apresenta como comportamento uma equação de segundo grau, possuindo seus maiores valores com irradiâncias intermediárias, como

17,7% com 400 e 500 W/m² e os mínimos valores nos seus extremos com 17% em 100 W/m² e 17,4% com irradiância de referência, 1.000 W/m². Em relação ao mencionado na etiqueta, a eficiência na STD possui uma alteração de -0,3% o que não altera sua classificação na Classe A para módulos cristalinos, segundo informa a Tabela 1. O fator de forma diminui sua percentagem de acordo com o aumento proporcional de irradiância, atingindo seu ápice em 100

W/m² com 80,1% e seu valor mínimo com a irradiância padrão, 74,3%. De acordo com Pinho e Galdino (2014), o valor que mais se aproxima do esperado para módulos de tecnologia cristalina é com a menor irradiância, 80,1%, sendo que a faixa deste fator de desempenho limita-se entre 80,9% - 82,8%.

Tabela 8: Características elétricas e de desempenho do módulo da Fabricante I sob a influência de diferentes irradiâncias.
Fonte: do autor.

Irradiância [W/m ²]	Eficiência [%]	FF [%]	P _m [W]	V _{oc} [V]	V _{mp} [V]	I _{sc} [A]	I _{mp} [A]
100	17	80,1	27,903	34,909	29,596	0,998	0,943
200	17,4	79,9	57,189	36,211	30,432	1,977	1,879
300	17,6	79,4	86,794	36,930	30,859	2,958	2,813
400	17,7	78,7	116,075	37,497	31,032	3,934	3,740
500	17,7	78	145,342	37,913	31,125	4,917	4,670
700	17,6	76,6	202,903	38,504	31,150	6,884	6,514
1000	17,4	74,3	285,823	39,148	30,935	9,822	9,239

A máxima potência obtida fez referência ao número de 285,8 W possuindo uma leve alteração de +0,5% em relação ao indicado pelo fabricante, 285 W, podendo ser assim considerado um valor muito próximo do nominal para o cliente que adquirir tal produto.

4. ANÁLISE DE PARÂMETROS DE DESEMPENHO

A fim de melhor comparar a qualidade dos dez módulos fotovoltaicos analisados com a influência da variação de irradiância é feita a análise dos parâmetros de desempenho, como a eficiência do módulo e seu respectivo fator de forma. A Figura 4 apresenta os valores de eficiência encontrados para cada modelo testado em todos os filtros de irradiância utilizados.

Cabe lembrar que somente os pontos do Figura 4 foram obtidos experimentalmente. A curva de ligação serve apenas para auxiliar na visualização dos dados adquiridos, não sendo, deste modo, uma curva de ajuste.

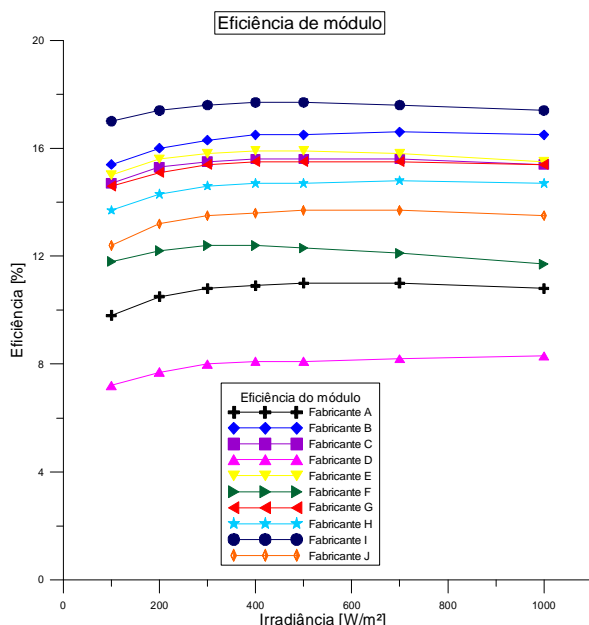


Fig. 4: Eficiência dos dez módulos analisados com a influência da irradiância. Fonte: do autor.

Os seis maiores percentuais de eficiência de módulo são obtidos com módulos fotovoltaicos de silício cristalino, sendo que o maior percentual foi alcançado com o modelo da Fabricante I cuja tecnologia corresponde a monocristalina. Os menores valores percentuais de eficiência são equivalentes a modelos de filmes finos, sendo o menos eficiente o módulo fotovoltaico da Fabricante D, de tecnologia silício amorfo e microcristalino.

A eficiência do módulo da marca Fabricante F aumenta seu valor com o aumento da irradiância incidente. Com exceção dos módulos das Fabricantes E e F, que possui como base quase um comportamento de uma equação de segundo grau, em que temos pontos máximos de eficiência e suas extremidades apresentam valores mínimos, o restante obteve um certo padrão de desenvolvimento de eficiência, aumentando com o valor de irradiância, atingindo uma estabilidade, sofrendo uma pequena alteração, quase imperceptível no último filtro de irradiância. Em relação ao outro fator de desempenho observado, relacionado ao fator de forma, a Figura 5 apresenta os resultados obtidos para os diferentes módulos com variação de irradiância, e assim como a Figura 4, a ligação entre os pontos só possui a finalidade de melhor observação dos dados adquiridos experimentalmente.

Como pode ser destacado na Figura 5, existem dois blocos em faixas diferentes de fator de forma, um corresponde aos módulos de tecnologia de silício cristalino (valores mais altos) e o outro corresponde à tecnologia de filmes finos (valores mais baixos).

Em relação ao bloco de tecnologia cristalina, com exceção do módulo fotovoltaico da Fabricante I, que decai o fator de forma de maneira mais acentuada com o aumento de irradiância, todos possuem comportamento semelhante, apresentam um leve pico em baixas irradiâncias e decaimento de modo mais ameno com o aumento da irradiância incidente.

Quanto ao bloco de filmes finos, os quatro modelos observados demonstram um padrão mais diversificado, em que os módulos das Fabricantes A e J elevam seu valor até um ponto máximo e deste diminuem gradualmente com o aumento de irradiância. Os modelos Fabricantes D e F decaem o fator de forma de acordo com o aumento de

irradiância, porém cada módulo com seu padrão, sendo que o modelo da Fabricante F decai mais acentuadamente e o módulo da Fabricante D diminui de forma mais atenuada.

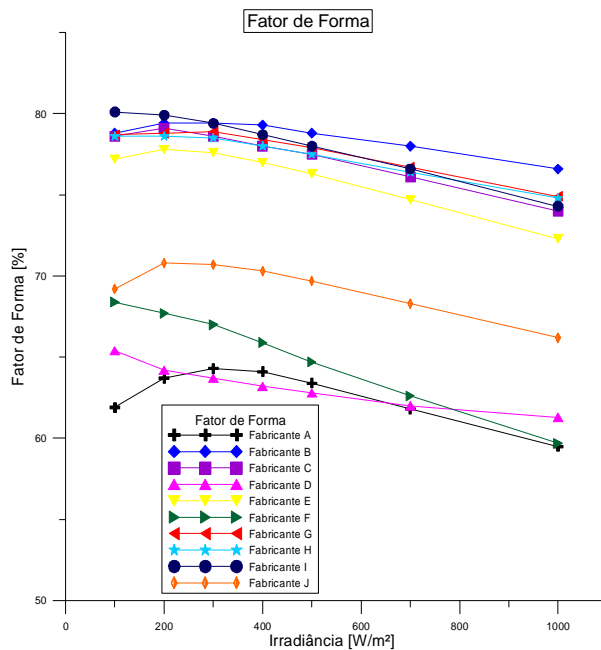


Fig. 5: Fator de forma dos dez módulos analisados com a influência da irradiância. Fonte: do autor.

5. CONCLUSÃO

Esse trabalho apresentou um estudo da influência da variação da irradiância no desempenho de módulos fotovoltaicos através de medidas com simulador solar. Referente aos dez módulos fotovoltaicos escolhidos para a análise da influência da irradiância através da medição *indoor* com o uso de simulador solar SunSim 3c, todos possuíram um padrão semelhante de comportamento, o que de fato já era esperado. A corrente de curto circuito cresce linearmente com o aumento da irradiância, enquanto que a tensão de circuito aberto aumenta de modo logarítmico. O que se pode observar foi a diferença dos valores desses dois parâmetros elétricos mencionados. A faixa de corrente de curto circuito para módulos fotovoltaicos de filmes finos é menor em comparação aos módulos de tecnologia cristalina, estabelecendo-se na faixa de 0,3 A a 4 A, enquanto para módulos cristalinos essa faixa atinge de 0,8 A a 9,5 A. Em relação a tensão de circuito aberto, os valores dos modelos de segunda geração apresentam números maiores, alcançando até 160 V, sendo que com módulos cristalinos esse valor não passa de 60 V.

Sobre outros dois outros parâmetros de desempenho analisados com medição *indoor* e irradiância variável, a eficiência dos módulos transcorreu de forma praticamente global para todos os módulos, com leves alterações e sem nenhum grande desvio de eficiência, não ultrapassando uma alteração maior que 3% para todos os filtros de irradiância utilizadas, sendo que módulos fotovoltaicos de tecnologia cristalina obtiveram maiores eficiência em comparação aos módulos de filmes finos. Esse mesmo padrão de valores de eficiências de acordo com as gerações de tecnologias fotovoltaicos foi observado também com o fator de forma. Neste experimento, ficou nítido a divisão dos valores de fatores de forma em dois blocos, em que módulos de silício

cristalino obtiveram maior percentagem de fator de forma em relação ao bloco de módulos de filmes finos. Outro aspecto de análise diz respeito ao fato de que todos os módulos observados, independente da tecnologia atuante, decaíram ou obtiveram uma leve estabilização em seu percentual de fator de forma em altas irradiâncias, acima de 500 W/m². Referente ao equipamento utilizado nestes ensaios, o simulador solar corresponde a um excelente e prático instrumento de experimentação tendo inúmeras vantagens de praticidade e reprodução de variáveis experimentais quando comparado a uma medição com iluminação natural.

REFERÊNCIAS

- ABNT – (2015). Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT Catálogo. Disponível em: <<http://www.abntcatalogo.com.br/>>. Acesso em: 09 junho .
- Andrade, A. Cabral de. (2008). Análise e simulação da distribuição de temperatura em módulos fotovoltaicos. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Bühler, A. J. (2011). Estudo de técnicas de determinação experimental e pós-processamento de curvas características de módulos fotovoltaicos. 195 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Dalmagro, P. S.; Krenzinger, A. (2013) Análise de Simuladores Solares para Ensaio de Módulos Fotovoltaicos. In: SALÃO UFRGS 2013: SIC - XXV SALÃO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UFRGS, 15, Poster, Porto Alegre.
- Gasparin, F. P. (2009). Desenvolvimento de um traçador de curvas características de módulos fotovoltaicos. Dissertação (Mestrado) - Programa Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Guimarães, P. L. O. et al. (2011). Avaliação da utilização de um simulador solar para calibração indoor de piranômetros. 6to. Congresso Brasileiro de Metrologia, Natal, 6p. 09.
- INMETRO. Instituto Nacional De Metrologia, Normalização E Qualidade Industrial. (2011). **INMETRO 004/2011**: Requisitos de avaliação da conformidade para sistemas e equipamentos para energia fotovoltaica (módulo, controlador de carga, inversor e bateria). Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. 49 p.
- INMETRO. Instituto Nacional De Metrologia, Normalização E Qualidade Industrial. (2013). Programa brasileiro de etiquetagem: Tabela de eficiência energética - Sistemas de Energia Fotovoltaica - Módulos. 01. 10 p.
- LABSOL. Instalações. (2015). Disponível em: <<http://www.solar.ufrgs.br/>>. Acesso em: 25 maio 2015.
- Macêdo, W. N. (2006). Análise do fator de dimensionamento do inversor aplicado a sistemas fotovoltaicos conectados à rede. 201 f. Tese (Doutorado) - Programa Pós-graduação em Energia, Universidade de São Paulo.
- Mocelin, A. R. (2014). Qualificação profissional e capacitação laboratorial em sistemas fotovoltaicos. 300 f. Tese (Doutorado) - Programa Pós-graduação em Energia, Universidade de São Paulo.