

CARACTERIZAÇÃO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS UTILIZANDO SIMULADOR SOLAR E ILUMINAÇÃO NATURAL

Josiane Peroza – josi_peroza@hotmail.com

Giuliano Arns Rampinelli – giuliano.rampinelli@ufsc.br
Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

Fabiano Perin Gasparin – gasparin.fabiano@gmail.com
Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (UERGS)

Resumo. O Brasil está passando por um processo de regulamentação e incentivos de diversas naturezas que deve permitir uma inserção gradual da energia solar fotovoltaica na matriz elétrica. A caracterização elétrica é um processo importante de avaliação do desempenho do dispositivo fotovoltaico. Este trabalho apresenta ensaios de módulos fotovoltaicos de diferentes tecnologias a partir de dois métodos distintos. O primeiro método utiliza um simulador solar modelo PASAN SunSim 3c para determinação das curvas I-V enquanto que no segundo método, medição outdoor, os ensaios são realizados com radiação solar natural. Por fim foi gerada a curva I-V a partir de um modelo computacional com a aplicação do software Crearray e utilizando informações de catálogo. Cinco módulos fotovoltaicos de diferentes potências e tecnologias foram analisados. As maiores divergências de valores de desempenho e na curva I-V dos módulos fotovoltaicos foram observadas para modelos de filmes finos. Para amostras de módulos de silício cristalino a maior diferença refere-se aos valores de corrente, tanto de curto circuito, quanto de corrente no ponto de máxima potência.

Palavras-chave: Medição indoor, Medição outdoor, Simulação computacional.

1. INTRODUÇÃO

A caracterização é um processo importante de avaliação do desempenho elétrico do dispositivo fotovoltaico, sendo a determinação da curva I-V o ensaio de maior relevância. O desempenho do módulo ou gerador fotovoltaico depende de muitos fatores, sendo que os mais importantes são a 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 e devido às diferenças entre as células individuais que constituem um módulo e entre os módulos que constituem um gerador fotovoltaico. A curva I-V descreve o comportamento elétrico nos terminais do gerador fotovoltaico sob influência desses fatores (MACÊDO, 2006).

O desempenho de células e módulos fotovoltaicos são usualmente apresentados nas condições de teste chamadas de condições padrões (*Standart Test Conditions* –STC), ou seja, nível de irradiância de 1000 W/m², também conhecido como 1 sol, distribuição espectral correspondente a AM=1,5 e temperatura de célula de 25 °C. Estas condições podem, em certa instância, representar as condições de irradiância em um dia típico de céu claro. Porém, a temperatura considerada para a operação em campo frequentemente resulta em temperaturas mais elevadas, próximas a 50 °C. 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). Segundo a norma americana ASTM E1036 (1996), a medida da performance 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_{mp} e tensão de máxima potência V_{mp} . Estas características são determinadas mediante análise direta da curva características I-V. Estes são os dados que obrigatoriamente os fabricantes especificam nos módulos comerciais (GASPARIN, 2009).

No Brasil, todos os módulos comercializados devem apresentar a etiqueta do INMETRO afixada na sua superfície posterior contendo informações técnicas (PINHO; GALDINO, 2014). A portaria do INMETRO 004/2011 estabelece os critérios para o Programa de Avaliação da Conformidade para sistemas e equipamentos para energia fotovoltaica, através do mecanismo da Etiquetagem, para utilização da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia – ENCE, atendendo aos requisitos do Programa Brasileiro de Etiquetagem - 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. Após os procedimentos de ensaios serem realizados, e se estes apresentarem não conformidades 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 (INMETRO, 2011).

2. METODOLOGIA

Para a caracterização dos módulos fotovoltaicos, dois métodos de medida foram utilizados: um diz respeito ao uso de simulador solar (*indoor*) e o segundo método detalha a caracterização com iluminação natural (*outdoor*). Em uma outra abordagem, foi realizada a sintetização das curvas I-V dos módulos fotovoltaicos através de simulação com o uso

do software *Crearray*. Os dados de entrada do software foram registros de catálogos dos fabricantes dos módulos fotovoltaicos.

O simulador solar consiste em um aparato digital que conta com lâmpadas especiais para emular as propriedades da radiação solar durante o ensaio de 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, KRENZINGER, 2013 e PEROZA, et. al. 2015). 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 levando em consideração o casamento espectral com relação a uma irradiância espectral de referência, a não uniformidade espacial 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 Tab. 1 identifica as classes de simuladores solares segundo a norma ASTM.

Tabela 1 – Classificação de simuladores de acordo com características específicas. Fonte: GUIMARÃES et al., 2011.

Classificação	Casamento espectral para todos os intervalos	Não uniformidade espacial de irradiância	Instabilidade temporal de irradiância
Classe A	0,75 a 1,25	3%	2%
Classe B	0,6 a 1,4	5%	5%
Classe 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 muito uniforme (DALMAGRO, KRENZINGER, 2013). O simulador do LABSOL é o modelo SunSim 3c, fabricado pela empresa suíça Pasan que tem área iluminada de 2,0 x 2,0 m, suficiente para a maioria dos módulos comerciais existentes, duração do pulso de luz de 10 ms e, principalmente apresenta 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. O sistema de aquisição é capaz de coletar até 4000 pontos da curva I-V, a uma resolução de 12 bits (DALMAGRO, KRENZINGER, 2013 e PEROZA, et. al. 2015). 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 dois condicionadores de ar que controlam e mantêm constante a temperatura. 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.

A caracterização com iluminação natural só é possível ser realizada em momentos de céu limpo, dificultando a obtenção de uma curva característica I-V nas condições padrões de teste. Para a medição *outdoor* utilizou-se um traçador de curvas I-V disponibilizado pelo LABSOL – UFRGS, cuja polarização é por meio de carga eletrônica, empregando uma fonte bipolar de quatro quadrantes marca KEPCO modelo BOP 100-10MG. No equipamento utilizado, o tempo de duração de rampa é calculado a partir do número de pontos e do tempo de duração de cada medida, que é programada com valor inicial e final. Enquanto é feita a varredura de tensão, os pares I-V devem ser medidos de maneira sincronizada com a rampa de tensão. São utilizados dois multímetros digitais Agilent 3458A para essas medidas. Também, a fim de garantir que a irradiância não varie durante a medida da curva I-V, a varredura é realizada em um intervalo de tempo pequeno, da ordem de décimos de segundo, pois nesse período a variação não ultrapassa 1 % em dias de céu limpo e a temperatura não varia durante a medida. A temperatura do módulo é medida por meio de um sensor Pt100 conectado a 4 fios a um instrumento de medida (GASPARIN, 2011).

Trabalhar com medição *outdoor* requer se submeter às condições naturais de temperatura ambiente e irradiância solar. Em relação à condição padrão de teste a irradiância especificada é de 1000 W/m² e a temperatura de célula 25 °C. Em dias ensolarados sem nuvens, consegue-se uma irradiância padrão nos horários finais da manhã e iniciais da tarde. Em compensação, a obtenção de uma curva característica na temperatura padrão de 25 °C consiste em uma tarefa muitas vezes difícil de realizar, principalmente no verão, onde mesmo no sul do Brasil, é comum dias com temperatura ambiente maiores do que 30 °C (BÜHLER, 2011). Em vista disso, a fim de controlar a temperatura do módulo de teste, a temperatura da edificação foi mantida em 25 °C por meio de dois aparelhos de ar-condicionado e os módulos eram retirados da sala e instalados rapidamente no suporte externo. Em certos momentos de avaliação não foi possível alcançar a exata condição padrão de teste e nesta situação, foram utilizados métodos de ajustes e translação de curvas conforme as equações apresentadas em BÜHLER (2011).

O programa *Crearray* é um software desenvolvido pelo LABSOL – UFRGS que possui múltiplas finalidades. O programa realiza a análise do comportamento de arranjos de módulos fotovoltaicos sofrendo diferentes estímulos ou combinações, sendo possível alterar padrões de irradiância, proporcionando condições de sombreamento, como também a variação da temperatura. Outra de suas funções é a simulação de um módulo fotovoltaico ou de um arranjo fotovoltaico. É importante destacar que os dados de entrada do software são as informações dos catálogos dos fabricantes dos módulos fotovoltaicos e estas apresentam divergência em relação aos dados obtidos a partir dos ensaios com simulador solar ou iluminação natural.

3. COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS DE CARACTERIZAÇÃO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Para a determinação da curva I-V a partir dos diferentes métodos foram ensaiados 5 módulos fotovoltaicos de distintas tecnologias e potências. A Tab. 2 apresenta as principais características dos módulos fotovoltaicos de teste, inclusive com as condições reais de irradiância e temperatura de célula na medição com iluminação natural. As curvas I-V obtidas na medição *outdoor* foram transladadas para as condições padrão de medida. É importante destacar que não foram realizadas medidas de correção espectral e as diferenças observadas, principalmente nos módulos de filmes finos podem decorrer deste fato. Para um estudo aprofundado devem ser realizadas medidas de correção espectral.

Tabela 2 – Módulos fotovoltaicos escolhidos para comparação entre simulação *indoor*, *outdoor* e computacional e condições reais de ensaio com iluminação natural.

Fabricante	Tecnologia	Potência	Irradiância (W/m ²)	Temperatura (°C)
Fabricante 1	CIS	130 W	1071	27
Fabricante 2	Amorfo e microcristalino	121 W	1048	33
Fabricante 3	CIGS	150 W	1020	25
Fabricante 4	Multicristalino	235 W	1081	30
Fabricante 5	Monocristalino	285 W	880	30

A Fig. 1 apresenta as curvas I-V obtidas através de medição *indoor*, *outdoor*, e computacional do módulo fotovoltaico do Fabricante 1 enquanto que a Fig. 2 apresenta as curvas I-V, a partir dos 3 métodos, do módulo fotovoltaico do Fabricante 2.

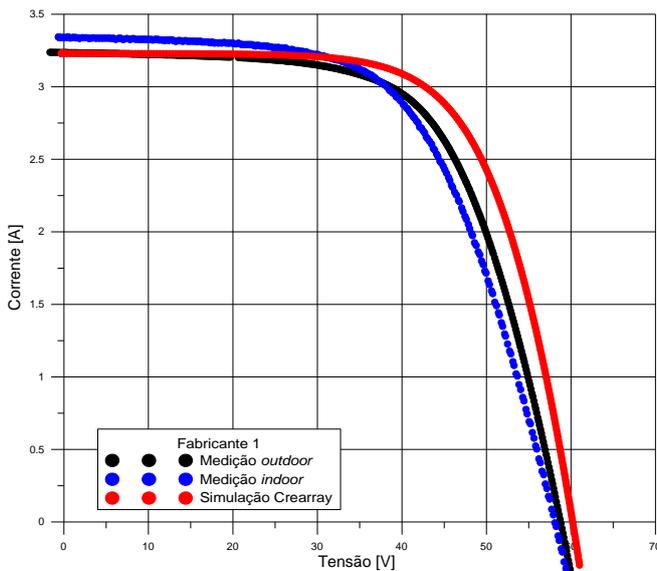


Figura 1 – Curvas I-V através de medição *indoor*, *outdoor* e computacional do módulo do Fabricante 1.

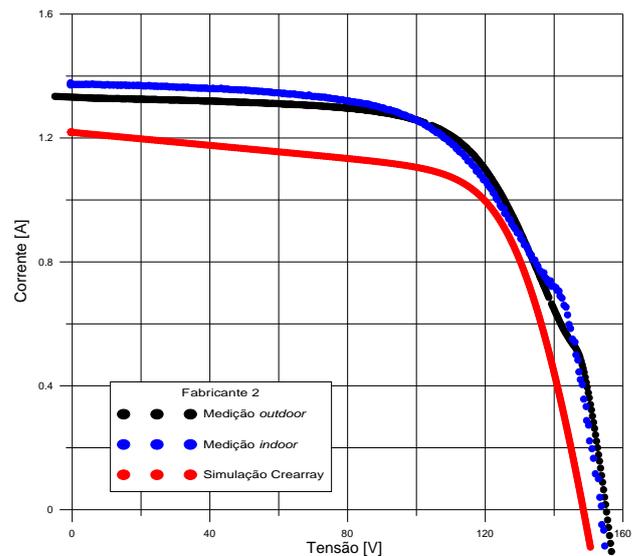


Figura 2 – Curvas I-V através de medição *indoor*, *outdoor* e computacional do módulo do Fabricante 2.

A Tab. 3 apresenta as principais características elétricas do módulo fotovoltaico do fabricante 1 a partir das medições *indoor* e *outdoor* e das informações de catálogo. Os valores de tensão, corrente, potência, eficiência e fator de forma são apresentados. A potência do ponto de máxima potência variou entre 115,7 W e 129,9 W enquanto que a eficiência variou entre 10,8% e 11,9%.

As diferenças em parte podem ser atribuídas ao fator de descasamento espectral decorrente da utilização de uma célula de silício cristalino para medida da irradiância solar, sendo que o módulo fotovoltaico ensaiado apresenta outra tecnologia. A diferença na forma da curva a partir da região de máxima potência é decorrente de efeitos transientes e capacitivos que os módulos possuem e que se refletem na curva I-V medida no simulador em 10 ms. Detalhes de efeitos transientes em diversas tecnologias são discutidos em Gasparin (2012).

Tabela 3 – Características elétricas e de desempenho do módulo do Fabricante 1 através da medição *indoor*, medição *outdoor* e informações do catálogo da Fabricante.

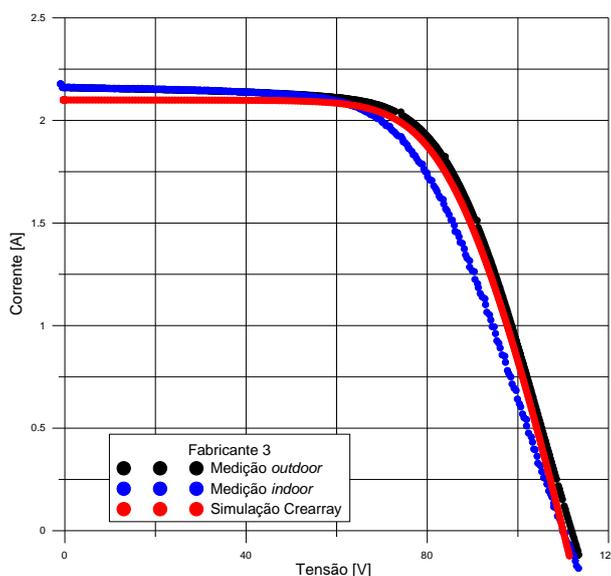
	Medição <i>indoor</i>	Medição <i>outdoor</i>	Informação catálogo
P _{máx} [W]	115,7	120,1	130 + 4%
Eficiência do módulo [%]	10,8	11,0	11,4
Fator de forma [%]	59,5	63,2	66,9
V _{oc} [V]	58,2	58,8	60,2
V _{mp} [V]	40,5	42,7	45,3
I _{sc} [A]	3,3	3,2	3,2
I _{mp} [A]	2,9	2,8	2,9

A Tab. 4 apresenta as principais características elétricas do módulo fotovoltaico do Fabricante 2 a partir das medições *indoor* e *outdoor* e das informações de catálogo. Os valores de tensão, corrente, potência, eficiência e fator de forma são apresentados. Em relação às medidas experimentais, bem como no módulo do Fabricante 1, este modelo do Fabricante 2 apresenta uma maior potência na medição *outdoor* do que em relação a medição *indoor*. Conforme relatado no catálogo disposto pelo Fabricante a potência esperada corresponde a 121 W \pm 5%, porém de acordo com as medições efetuadas, os valores de potência máxima ultrapassam este desvio percentual de \pm 5%, com +7,2% na medição *indoor* e +10,6% na medição *outdoor*.

Tabela 4 – Características elétricas e de desempenho do módulo do Fabricante 2 através da medição *indoor*, medição *outdoor* e informações do catálogo da Fabricante.

	Medição <i>indoor</i>	Medição <i>outdoor</i>	Informação catálogo
P _{máx} [W]	129,7	133,8	121 \pm 5%
Eficiência do módulo [%]	8,3	8,5	7,6
Fator de forma [%]	61,3	65,1	65,3
V _{oc} [V]	153,7	155,1	148,5
V _{mp} [V]	111,4	114,2	115,8
I _{sc} [A]	1,4	1,3	1,2
I _{mp} [A]	1,2	1,2	1,0

O módulo fotovoltaico do Fabricante 3 tem tecnologia CIGS com potência máxima equivalente a 150 W. As curvas características I-V adquiridas a partir de testes de simulação solar, com iluminação natural e utilização do software *Crearray* estão dispostas na Fig. 3.

Figura 3 – Curvas I-V através de medição *indoor*, *outdoor* e computacional do módulo fotovoltaico do Fabricante 3.

Analisando a Fig. 3, fica visível que o funcionamento inicial das duas curvas obtidas experimentalmente é análogo, onde as duas curvas características se sobrepõem com correntes de curto circuitos idênticos, informações que estão dispostas na Tab. 5. Quando essas curvas I-V atingem patamar de máxima potência, as curvas passam a apresentar diferenças, finalizando com um valor semelhante de tensão de circuito aberto. Este fato novamente ocorre, pois, a curva I-V *indoor* foi medida em 10 ms, e este tipo de módulo apresentou a curva I-V afetada pela varredura rápida realizada na medida. Este efeito ocasiona uma potência medida menor quando a rampa de tensão de polarização parte da corrente de curto-circuito para a tensão de circuito aberto. Outra observação é referente a curva I-V obtida por programação, esta possui comportamento similar as duas curvas experimentais, principalmente com a curva I-V da medição *outdoor*, sendo que esta curva se aproxima mais do resultado esperado pelo fabricante.

De acordo com a Tab. 5, a maior variação entre valores obtidos de medição *indoor* e medição *outdoor* refere-se ao valor obtido de potência máxima, com uma diferença de 12 W entre as duas medições. Em comparação ao valor informado no catálogo, as duas medições apresentam comportamento muito distinto, sendo que na medição *indoor* o valor de potência máxima foi menor com um desvio de -5,44% enquanto que a medição *outdoor* apresentou maior valor de potência máxima com um desvio de +2,59%.

Tabela 5 – Características elétricas e de desempenho do módulo da Fabricante 3 através da medição *indoor*, medição *outdoor* e informações do catálogo da fabricante.

	Medição <i>indoor</i>	Medição <i>outdoor</i>	Informação catálogo
P _{máx} [W]	141,8	153,9	150,0
Eficiência do módulo [%]	11,7	12,5	12,2
Fator de forma [%]	59,7	63,7	65,0
V _{oc} [V]	110,0	111,9	110,0
V _{mp} [V]	74,9	79,9	79,0
I _{sc} [A]	2,2	2,2	2,1
I _{mp} [A]	1,9	1,9	1,9

A Fig. 4 apresenta as curvas I-V obtidas através de medição *indoor*, *outdoor*, e computacional do módulo fotovoltaico do Fabricante 4 enquanto que a Fig. 5 apresenta as curvas I-V, a partir dos 3 métodos, do módulo fotovoltaico do Fabricante 5.

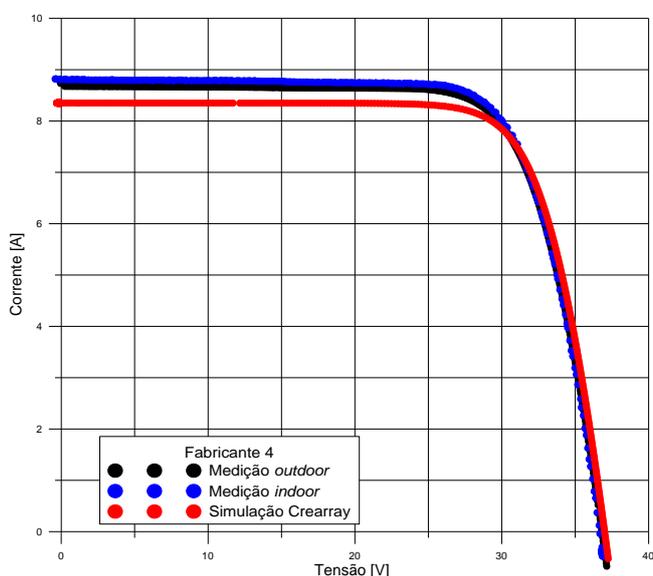


Figura 4 – Curvas características I-V através de medição *indoor*, *outdoor* e computacional do módulo fotovoltaico da Fabricante 4.

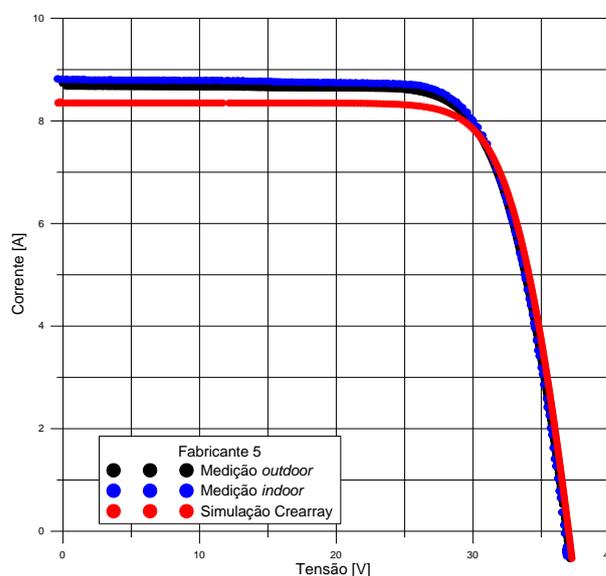


Figura 5 – Curvas características I-V através de medição *indoor*, *outdoor* e computacional do módulo fotovoltaico da Fabricante 5.

É nítido através da Fig. 4 que o funcionamento do módulo de Fabricante 4 é praticamente o mesmo para a medição *indoor* e a medição *outdoor*. As duas curvas se sobrepõem em quase todo percurso, possuindo uma pequena diferença visível no início da curva característica I-V. Os valores de tensão de circuito aberto das medições e simulação são muito similares, sendo que o funcionamento da curva I-V obtida pelo programa de simulação possui um desvio claro na corrente decorrente das diferenças entre a corrente medida e a corrente declarada pelo fabricante., sendo que após esse

ponto a caracterização do módulo é muito similar nos três métodos aplicados. Como o descasamento espectral dos módulos de silício cristalino é muito pequeno e estes não apresentam efeitos na curva I-V decorrentes da rapidez de varredura, as curvas *indoor* e *outdoor* são praticamente idênticas, a não ser pelas incertezas de medidas. Maiores informações sobre o desempenho do módulo são apresentadas na Tab. 6.

Tabela 6 – Características elétricas e de desempenho do módulo da Fabricante 4 através da medição *indoor*, medição *outdoor* e informações do catálogo da fabricante.

	Medição <i>indoor</i>	Medição <i>outdoor</i>	Informação catálogo
P _{máx} [W]	241,6	238,3	235 ± 3%
Eficiência do módulo [%]	14,7	14,2	14,0
Fator de forma [%]	74,8	74,6	76,2
V _{oc} [V]	36,7	36,8	37,0
V _{mp} [V]	29,3	29,3	30,0
I _{sc} [A]	8,8	8,7	8,3
I _{mp} [A]	8,2	8,1	7,8

De acordo com o informado no catálogo referente ao valor de potência máxima, os valores encontrados nas medições realizadas estão dentro do desvio proposto, com +2,8% em relação a medição *indoor*, +1,39% sobre a medição *outdoor* e +0,17% da simulação computacional. A eficiência do módulo segue o mesmo padrão da potência máxima, com valores maiores do que o proposto pelo fabricante, sendo a maior diferença de +0,7% para a medição *indoor* e o informado no catálogo, sendo que de acordo com a Tab. 1, este módulo classifica-se como Classe A para módulos de tecnologia cristalina. Em relação à outra característica de desempenho analisada, fator de forma, as percentagens obtidas pelas medições experimentais encontram-se ligeiramente abaixo do especificado no catálogo, com variação de -1,875% em relação a medição *indoor* e -2,16% em comparação a medição *outdoor*.

Os valores dos parâmetros elétricos só comprovam o que a Fig. 4 identificou, que as curvas características I-V experimentais estão sobrepostas, com mínimas variações dos parâmetros de corrente e tensão do módulo, não ultrapassando mais que a casa decimal. A diferença das curvas I-V experimentais com a simulação computacional refere-se principalmente aos parâmetros de corrente, que possuem maiores divergências de valores.

O mesmo comportamento funcional do módulo da Fabricante 4 é representado na Fig. 5 para o módulo fotovoltaico da Fabricante 5. A padronização do seguimento da curvas I-V das medições experimentais é nítida, possuindo valores muito similares com pequena variação em relação a corrente de curto circuito, podendo-se concluir que os valores de tensão de circuito aberto se sobrepõem, e o perfil da curva característica I-V permanece similar ao longo do trajeto de obtenção da curva. Em comparação a curva I-V computacional, esta possui um início divergente decorrente da diferença entre a corrente medida e a informada pelo fabricante, porém após atingir o ponto de máxima potência descreve a mesma trajetória das outras duas curvas amostradas. A Tab. 7 apresenta características do módulo da Fabricante 5.

Tabela 7 – Características elétricas e de desempenho do módulo da Fabricante 5 através da medição *indoor*, medição *outdoor* e informações do catálogo do fabricante.

	Medição <i>indoor</i>	Medição <i>outdoor</i>	Informação catálogo
P _{máx} [W]	285,8	284,6	285 ± 3%
Eficiência do módulo [%]	17,4	17,3	17,7
Fator de forma [%]	74,3	74,5	79,2
V _{oc} [V]	39,1	39,3	38,5
V _{mp} [V]	30,9	31,2	31,7
I _{sc} [A]	9,8	9,7	9,5
I _{mp} [A]	9,2	9,1	8,9

Os valores de potência máxima obtidos se enquadram dentro do desvio proposto pelo fabricante de 285 W ± 3%, sendo que para a medição *indoor* a variação correspondente é de +0,3% e para a medição *outdoor* a variação correspondente é -0,15%.

Em consequência da semelhança de valores de potência máxima obtidos, o padrão segue o mesmo para a eficiência do módulo. Quanto ao fator de forma, os valores obtidos com os métodos citados estão abaixo do indicado no catálogo, não ultrapassando a diferença de 5%. Os parâmetros elétricos tal como observados na Fig. 5 são muito similares, uma vez que de maneira semelhante ao ocorrido no módulo multicristalino, não há descasamento espectral e

influência no tempo de varredura. A principal diferença se deve à medida de corrente elétrica, que em geral é a principal fonte de incerteza uma vez que depende da calibração da célula de referência que possui em geral incerteza de no mínimo 2%. A Tab. 7 comprova a similaridade dos dados, principalmente quanto à tensão de circuito aberto com uma diferença de apenas 0,123 V entre as medições experimentais (*indoor* e *outdoor*). Como para o módulo da Fabricante 4, este módulo possui maiores diferenças de valores quanto as correntes, tanto de curto circuito quanto a corrente no ponto de máxima potência.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse trabalho apresentou um estudo sobre diferentes formas de caracterização de módulos fotovoltaicos abordando simulação *indoor*, *outdoor* e computacional, sendo possível a análise e comparação de parâmetros de desempenho e características elétricas.

Para a adequada caracterização de um módulo fotovoltaico primeiramente é necessário seguir as condições padrão de teste, irradiância de 1000 W/m², temperatura de célula de 25 °C e distribuição espectral AM 1,5. Para comparar os dados adquiridos nas três medições, cinco módulos foram escolhidos de forma a representar diferentes tecnologias fotovoltaicas, incluindo o fato de que os dados obtidos devem estar na mesma base para ser uma comparação concreta. Para isso métodos de translação de dados foram utilizados na simulação *outdoor*.

Ambos os meios de medição experimental (*indoor* e *outdoor*) da curva características I-V dos módulos fotovoltaicos apresentam suas vantagens e desvantagens. Quanto à medida *indoor*, o custo com o simulador solar é elevado, este equipamento possui um alto valor de investimento, porém fácil manipulação de parâmetros como irradiância, em que com filtros atenuadores pode-se fazer a variação desejada, sem contar o controle da temperatura, que pode ser executado de forma simples com auxílio de condicionadores de ar. Porém, o simulador solar não possui o espectro de iluminação que o Sol apresenta, pois aquele contém em sua lâmpada apenas uma faixa desse espectro. É impossível negar que no uso da iluminação solar natural as características espectrais e de uniformidade são superiores ao simulador solar, sendo que com a medida *outdoor* os custos são mais atrativos, dispensando equipamento de alto custo como o simulador e podendo fazer uso de equipamentos mais simples e mais baratos. Entretanto, uma medição *outdoor* depende de um dia bem ensolarado, sem nuvens, um controle de temperatura mais árduo, pois com a iluminação solar atuando, os módulos esquentam rapidamente. Fazer uma medida com iluminação natural requer mais tempo e maior controle dos parâmetros de teste, o que induz a um trabalho mais dispendioso.

Nesse contexto comparativo, a análise computacional pelo software Crearray é utilizada de forma a demonstrar o ideal funcionamento do módulo fotovoltaico nas condições padrões de teste e assim servir como base comparativa para as medições experimentais. Em relação aos valores obtidos *indoor* e *outdoor*, pode-se observar que o funcionamento para ambas as simulações adotadas é muito semelhante, sendo que para os dois módulos fotovoltaicos de silício cristalino, as curvas características I-V praticamente se sobrepueram. Em relação aos módulos fotovoltaicos de tecnologia de filmes finos esse comportamento também se apresenta como similar, porém com maiores desvios dos parâmetros elétricos e de desempenho, decorrentes principalmente do descasamento espectral e do tempo de varredura curto que pode influenciar a medida da curva I-V de determinadas tecnologias. O que de fato conclui-se de tal comparação entre uma medida realizada através de um simulador solar e outra com uma medição com iluminação natural refere-se ao pequeno desvio dos dados que podem ser obtidos, porém apresentando um comportamento similar. Ou seja, o simulador solar corresponde a um bom e prático instrumento de experimentação que apresenta inúmeras facilidades em relação à iluminação natural, principalmente quando o módulo a ser comparado diz respeito à tecnologia de silício cristalino.

Quanto a curva I-V obtida pela simulação computacional, esta possui uma divergência de valores nos parâmetros de corrente para os dois módulos de silício cristalino, sendo que após o ponto de máxima potência as três curvas medidas seguem o mesmo percurso com valores muito similares. Referente aos módulos de tecnologia de filmes finos a curva I-V apresenta-se um pouco mais deslocada em comparação as curvas experimentais, sendo a maior divergência encontrada com a Fabricante 2 de tecnologia amorfo.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal do Rio Grande do Sul pela disponibilidade das instalações e equipamentos para realização dos ensaios de caracterização.

REFERÊNCIAS

- BÜHLER, Alexandre José. Estudo de técnicas de determinação experimental e pós-processamento de curvas características de módulos fotovoltaicos. 2011. 195 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.
- DALMAGRO, Paola Superti; KREZINGER, Arno. Análise de Simuladores Solares para Ensaios de Módulos Fotovoltaicos. In: SALÃO UFRGS 2013: SIC - XXV SALÃO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UFRGS, 15, Poster, Porto Alegre, 2013.

- EPE. Empresa de Pesquisa Energética. Leilão de Energia de Reserva 2014. Disponível em: < <http://www.epe.gov.br/>>. Acesso em: 28 maio 2015.
- GASPARIN, Fabiano Perin. Desenvolvimento de um traçador de curvas características de módulos fotovoltaicos. 2009. 71 f. Dissertação (Mestrado) - Programa Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.
- GASPARIN, Fabiano Perin. Análise de efeitos transientes na caracterização elétrica de módulos fotovoltaicos. 2012. 171 f. Tese (Doutorado) - Programa Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.
- GUIMARÃES, Patrícia L. O. et al. Avaliação da utilização de um simulador solar para calibração *indoor* de piranômetros. 6º Congresso Brasileiro de Metrologia, Natal, 6p. 09, set. 2011.
- INMETRO. Instituto Nacional De Metrologia, Normalização E Qualidade Industrial. 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, 2011. 49 p.
- INMETRO. Instituto Nacional De Metrologia, Normalização E Qualidade Industrial. PROGRAMA BRASILEIRO DE ETIQUETAGEM: Tabela de eficiência energética - Sistemas de Energia Fotovoltaica - Módulos. 01 ed. 2013. 10 p.
- LABSOL. Instalações. 2015. Disponível em: <<http://www.solar.ufrgs.br/>>. Acesso em: 25 maio 2015.
- MACÊDO, Wilson Negrão. Análise do fator de dimensionamento do inversor aplicado a sistemas fotovoltaicos conectados à rede. 2006. 201 f. Tese (Doutorado) - Programa Pós-graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
- MARTINAZZO, Claodomir Antonio. Modelos de estimativa de radiação solar para elaboração de mapas solarimétricos. 2004. 210 f. Dissertação (Mestrado) - Programa Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.
- PEROZA, J.; RAMPINELLI, G. A.; GASPARIN, F. P.; KREZINGER, A. Ensaios de Módulos Fotovoltaicos de Distintas Tecnologias com Utilização de Simulador Solar. In: XXXVIII Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente y II Congreso Latinoamericano de Simulación de Edificios, 2015, San Rafael. Acta de XXXVIII Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente, 2015. v. 3. p. 04.63-04.71.
- PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antonio (Org.). Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Rio de Janeiro: Cepel, 2014.

INDOOR AND OUTDOOR CHARACTERIZATION OF PHOTOVOLTAIC MODULES

Abstract. *Brazil is going through a process that involves a regulatory framework and incentives that will lead to the gradual insertion of the photovoltaic solar energy in the electric mix. The electrical characterization is fundamental to evaluate the photovoltaic device's performance. This study presents the results of tests in photovoltaic modules of several technologies performed in two different ways. The first one is an indoor characterization using a solar simulator model PASAN SunSim 3c to trace the I-V curves whereas the second one is an outdoor characterization using solar radiation and an I-V tracer. Each I-V curve was generated by the software Crearray, a computer modeling program based on the single diode model to simulate I-V curves. Five photovoltaic modules with different power and technology were analyzed. There were higher differences in the I-V curves comparing the indoor, outdoor and simulated ones for thin films devices. The I-V curves for crystalline silicon photovoltaic modules were quite identical in all methods, except for short circuit and maximum power currents, mainly due to measurement uncertainties.*

Key words: *Indoor Measurement, Outdoor Measurement, Computational Simulation.*