

COMPARAÇÃO-DE ENSAIOS DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS COM SIMULADOR SOLAR E SOB ILUMINAÇÃO NATURAL

Fabiano Perin Gasparin – gasparin.fabiano@gmail.com

Arno Krenzinger – arno.krenzinger@ufrgs.br

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, PROMEC – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
Laboratório de Energia Solar, Av. Bento Gonçalves, 9500 Prédio 42.712, Porto Alegre, Brasil, Tel. 55(51)33086841

RESUMO: O emprego de simuladores solares para a caracterização de dispositivos fotovoltaicos pode produzir discrepâncias na comparação com resultados obtidos sob iluminação natural, principalmente em função da distribuição espectral da radiação e da rapidez utilizada para traçar a curva I-V, já que se utilizam amplamente simuladores com duração do flash da ordem de 2 a 20 ms. Neste trabalho foram caracterizados quatro módulos fotovoltaicos com o uso de um simulador solar pulsado e posteriormente sob iluminação natural, sendo dois módulos de silício cristalino e dois de silício amorfo. Para os módulos de silício cristalino os resultados são coerentes entre si, porém em módulos de silício amorfo multijunção as diferenças entre a corrente de curto-circuito e a potência máxima determinadas podem diferir em até 15 %. Outro fato é que em módulos com altos valores de capacitância os resultados podem sofrer desvios devido à rapidez com que a curva I-V é traçada.

Palavras-chave: Energia solar, Curva I-V, Módulo fotovoltaico, Simulador Solar Pulsado.

INTRODUÇÃO

No cenário mundial o uso da tecnologia solar fotovoltaica para geração de eletricidade apresenta crescimento expressivo, principalmente na última década. Neste contexto, constata-se a ampliação da produção e emprego de diferentes tecnologias de fabricação de módulos fotovoltaicos em contraponto à tecnologia do silício cristalino. Estas tecnologias, principalmente representadas por módulos de filmes finos, estão gradativamente obtendo uma parcela maior do mercado e ainda carecem de investigação aprofundada a respeito de seu comportamento elétrico e das peculiaridades relativas à sua caracterização elétrica. As características intrínsecas da energia solar fotovoltaica, como a intermitência na geração de eletricidade e os custos de instalação ainda elevados em comparação com as formas tradicionais de geração de energia elétrica, torna cada vez mais importante o conhecimento a respeito do comportamento desta tecnologia.

A caracterização elétrica dos módulos fotovoltaicos fornece os parâmetros elétricos indispensáveis para avaliar a qualidade e desempenho destes dispositivos quando estiverem operando na geração de eletricidade. Os parâmetros importantes para esta avaliação são obtidos a partir da curva I-V (corrente *versus* tensão) e compreendem a potência máxima (P_m), corrente de curto-circuito (I_{sc}), tensão de circuito aberto (V_{oc}), tensão de máxima potência (V_{mp}) e corrente de máxima potência (I_{mp}). Estes parâmetros normalmente são determinados nas condições de teste padrão (STC), ou seja, com irradiância solar de 1000 W/m^2 , temperatura da célula de $25 \text{ }^\circ\text{C}$ e distribuição espectral da radiação AM1,5 (massa de ar 1,5). Ao lado dos parâmetros previamente citados, há também o fator de forma (FF), que é calculado como $FF = P_m / (V_{oc} I_{sc})$ e a eficiência dos módulos, parâmetro dependente da área dos dispositivos. As células e módulos fotovoltaicos possuem outros parâmetros elétricos importantes, dentre eles o coeficiente de variação de V_{oc} com a temperatura (β), coeficiente de variação de I_{sc} com a temperatura (α), coeficiente de variação da potência máxima com a temperatura (γ), além da resistência série (R_s) e paralela (R_p).

Os dispositivos fotovoltaicos podem ser caracterizados sob iluminação natural (*outdoor*) ou com o uso de simuladores solares (*indoor*). A realização de ensaios sob iluminação natural possui algumas vantagens, dentre elas pode-se citar a ausência de uma fonte de luz artificial de custo elevado, a não limitação do tamanho das amostras, o fato de que a radiação incidente possui ótima estabilidade temporal e distribuição espacial homogênea (Durisch *et al*, 1996). Além disto, os testes podem ser realizados sob diferentes condições de radiação difusa e albedo e fundamentalmente a amostra é iluminada com o espectro solar real. Entretanto, as desvantagens inerentes em ensaios sob iluminação natural são na maioria dos casos impeditivas em medidas de larga escala. O tempo disponível de altos níveis de irradiância solar é limitado pela hora do dia, pela época do ano e principalmente pelas condições climáticas, podendo-se ainda citar que a translação dos resultados medidos para as condições padronizadas de teste é quase sempre necessária, já que o controle de temperatura do módulo sob iluminação natural é de difícil realização.

Embora os ensaios sob iluminação natural produzam resultados confiáveis, a dinâmica de um mercado em plena expansão dita que os módulos fotovoltaicos devam ser medidos utilizando-se simuladores solares. A conveniência do uso dos simuladores solares é evidente já que sua utilização não sofre das restrições sofridas em ensaios *outdoor*. Entretanto, os simuladores solares comerciais aproximam-se marginalmente da distribuição espectral da radiação solar e a distribuição espacial e a estabilidade temporal da radiação possuem não-uniformidades intrínsecas. A maioria dos simuladores solares são do tipo pulsado, com duração do *flash* tipicamente da ordem de 10 ms.

A comparação dos resultados entre medidas *outdoor* e *indoor* de módulos de tecnologias diferentes que o silício cristalino demanda pesquisa e desenvolvimento, pois podem ocorrer diferenças significativas entre os resultados. Virtuani et al (2008) realizaram comparações entre a performance de módulos de silício micro-amorfo (a-Si/ μ c-Si), encontrando coerência entre os resultados quando comparados com simuladores solares contínuos, e diferenças de até 3,8% entre medidas *outdoor* e *indoor* com o uso de um simulador solar pulsado. Esta diferença foi devida a medidas maiores na corrente de curto circuito, atribuído a incertezas na distribuição espectral do simulador solar utilizada para cálculos de descasamento espectral. Como relatado por Virtuani et al (2010) módulos fotovoltaicos de filmes finos multijunção medidos *indoor* podem apresentar diferenças na determinação da corrente de curto-circuito e potência máxima da ordem de 15 % em relação a medidas *outdoor* principalmente devido ao descasamento espectral entre a célula de referência utilizada e o módulo sob ensaio quando iluminado com a fonte artificial de luz

METODOLOGIA

A metodologia empregada neste trabalho consistiu basicamente na caracterização elétrica dos quatro módulos fotovoltaicos identificados na Tabela 1. Foram selecionados módulos comerciais de diferentes tecnologias de fabricação, sendo dois de silício cristalino, um monocristalino e outro multicristalino, e dois módulos de filmes finos de silício amorfo, sendo um de tripla junção e outro de dupla junção ou *tandem*.

As medidas com simulador solar foram realizadas nas dependências da PUC-RS, utilizando o simulador solar pulsado do fabricante BERGER Lichttechnik, com fonte de luz modelo PSS 8 e carga eletrônica modelo PSL 8. A duração do patamar estável do pulso de luz utilizado para traçar a curva I-V é de 10 ms. Posteriormente os mesmos módulos foram submetidos a ensaios sob iluminação natural, nas dependências do LABSOL – UFRGS onde foi utilizado o sistema traçador de curvas I-V e a metodologia descrita em Gasparin (2009). No intervalo de tempo decorrido entre as medidas *indoor* e as medidas *outdoor* os módulos foram conservados em ambiente fechado e protegidos da exposição à radiação.

Tecnologia	Potência [W]	Isc [A]	Voc [V]	FF	Área (m ²)
Silício monocristalino (c-Si)	50	3,22	21,6	0,72	0,445
Silício multicristalino (mc-Si)	54	3,31	21,7	0,75	0,417
Silício amorfo de tripla junção (a-Si - 3J)	32	2,40	23,8	0,56	0,523
Silício amorfo de dupla junção (a-Si - 2J)	45	0,78	101	0,57	0,866

Tabela 1 – Módulos Fotovoltaicos Investigados – Dados de Catálogo (Condições Padronizadas de Teste)

Nas medidas realizadas no simulador solar, as curvas I-V foram traçadas em ambas as direções de varredura da tensão de polarização, ou seja, a partir de I_{sc} até V_{oc} e vice-versa. Cada módulo foi medido seis vezes sendo três vezes em cada direção de varredura. Nas medidas sob iluminação natural foram traçadas 6 curvas I-V em um dia de céu limpo, sendo que cada curva foi traçada partindo de I_{sc} até V_{oc} em aproximadamente 200 ms. Esta duração permite evitar possíveis efeitos transientes resultantes de rapidez com que a varredura da tensão de polarização é realizada. Além disto, durante este intervalo de tempo garante-se a estabilidade temporal da radiação incidente e a variação de temperatura é desprezível durante o ensaio. Todas as medidas foram realizadas o mais próximo possível das condições padronizadas de teste a fim de que as correções fossem pequenas. Nas medidas *indoor* a temperatura de medida efetiva foi de $25\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ e irradiância média de $1000\text{ W/m}^2 \pm 20\text{ W/m}^2$. As medidas *outdoor* foram tomadas a $25\text{ °C} \pm 3\text{ °C}$ e com irradiância solar global entre 900 e 1050 W/m^2 .

O pulso completo do *flash* do simulador solar tem aproximadamente 12 ms de duração, sendo que 10 ms são de patamar estável onde é traçada a curva I-V. Para determinar o perfil completo do pulso do simulador solar foram realizadas medidas consecutivas do sinal de uma célula de referência em curto-circuito utilizando um multímetro Agilent 3498A. As medidas foram tomadas em intervalos de 20 μ s. A fim de sincronizar o início das medidas para determinação do perfil do pulso do *flash*, foi montado o circuito apresentado na Figura 1(a). Neste circuito, quando o fotodiodo é iluminado, o transistor entra em saturação e ativa uma entrada da porta de jogos do computador iniciando a rotina para tomar a sequência de medidas. A partir deste momento são medidos 700 pontos, totalizando 14 ms, obtendo-se assim o perfil completo do pulso. Foram realizadas diversas medidas do pulso, sendo que todas possuíam o perfil semelhante ao apresentado na Figura 1(b).

A não uniformidade temporal da irradiância durante o patamar utilizado para traçar a curva I-V é tipicamente de $\pm 2\%$ em relação à média, conforme informado pelo fabricante. A curva I-V é corrigida em função desta não uniformidade pelo programa de processamento do simulador solar.

O programa de gerenciamento do simulador solar fornece o conjunto de pontos da curva I-V efetivamente medidos, o conjunto de pontos corrigidos para as condições de teste padrão, além dos principais parâmetros elétricos determinados a partir da curva I-V. Os valores de irradiância medida pela célula de referência durante o patamar de irradiância no qual a curva I-V é traçada também estão disponíveis.

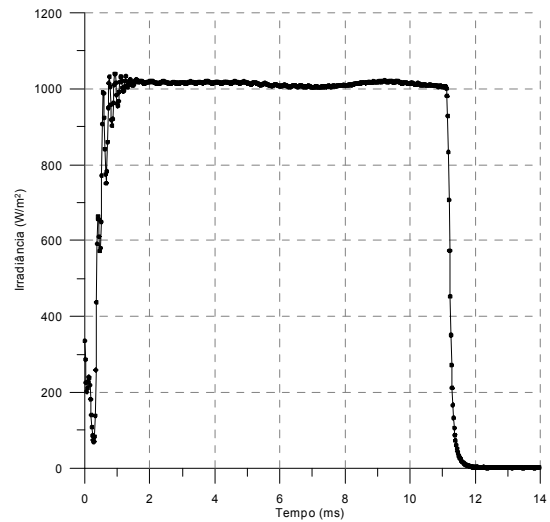
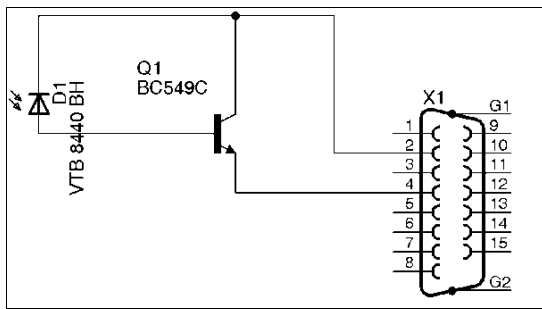


Figura 1 –(a) Circuito foto disparador para sincronismo do início da medida do flash do simulador solar. (b) Perfil de irradiância do flash do simulador solar.

RESULTADOS

Na Figura 2 são apresentadas as curvas I-V transladadas para as condições padronizadas de teste das medidas *indoor* e *outdoor* dos módulos de silício cristalino. Observa-se nestas curvas uma boa correspondência entre as medidas. É possível notar porém uma diferença na região de circuito aberto entre a medida *indoor* e *outdoor*. A partir dos valores dos coeficientes térmicos dos módulos, estima-se que a diferença encontrada na tensão de circuito aberto está associada a uma variação de temperatura da ordem de 2,5°C. Esta diferença deve-se em parte a uma pequena variação entre a calibração dos sensores de temperatura do simulador solar e do traçador do LABSOL, que é da ordem de 0,5°C. A variação encontrada na determinação de V_{oc} é atribuída ao fato de que quando o módulo fotovoltaico é exposto à radiação solar, há um gradiente de temperatura estimado entre 1,5 a 2°C entre a temperatura da junção e a temperatura do material de revestimento posterior do módulo. Um estudo compreensivo sobre este tema foi desenvolvido por Bühler et al (2010).

Nos ensaios com simulador solar, o módulo fotovoltaico é mantido em ambiente climatizado e escuro nos momentos precedentes à medida. Neste ambiente garante-se que a temperatura de todo o conjunto esteja em equilíbrio, não havendo portanto gradiente de temperatura entre a junção PN e o sensor fixado na parte posterior do módulo.

Nas medidas *outdoor* o controle de temperatura é difícil de ser realizado e como a curva foi traçada alguns instantes após o módulo ser exposto à radiação solar, a ocorrência deste gradiente de temperatura manifesta-se no deslocamento das curvas I-V e consequentemente influenciando principalmente a determinação de V_{oc} e P_m .

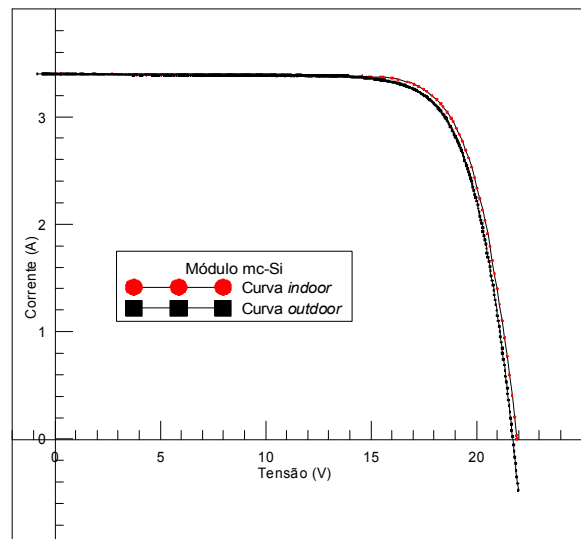
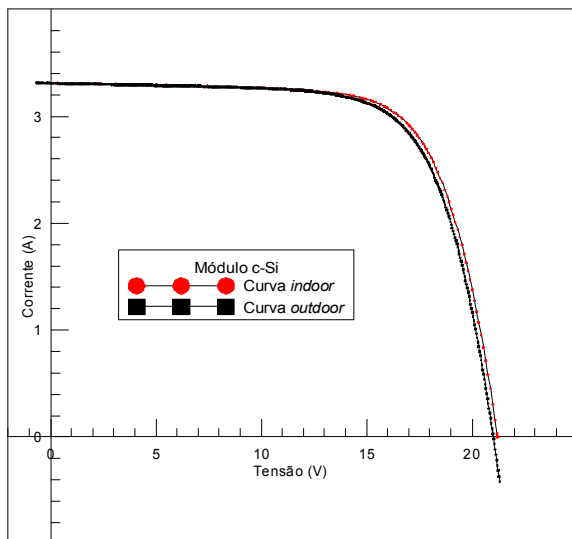


Figura 2 – Curvas I-V determinadas com simulador solar e sob iluminação natural. (a) Módulo de silício monocristalino. (b) Módulo de silício multicristalino.

Na Figura 3 são apresentadas as curvas I-V dos módulos de silício amorfo. Verifica-se uma apreciável redução da corrente de curto circuito medida quando o módulo é caracterizado com o simulador solar. A célula de referência utilizada em ambas as medidas era de silício cristalino. A partir destas medidas pode-se constatar o forte descasamento espectral entre a célula de referência de silício cristalino e o módulo sob ensaio quando iluminados pela fonte de luz do simulador solar. Salienta-se que pelas normas técnicas internacionais uma correção espectral é necessária, mas no presente trabalho esta correção não foi executada. Para efetuar esta correção seriam necessárias informações seguras sobre as respostas espectrais dos módulos de silício amorfo bem como a curva de distribuição espectral do simulador, e estas informações não estavam disponíveis. Por outro lado o interesse do presente trabalho é justamente mostrar o risco de utilizar os resultados medidos sem a devida correção, isto é, a correção iria mascarar parte das diferenças encontradas na comparação aqui realizada.

Diferentemente do resultado constatado com os módulos de silício cristalino, a diferença na determinação da tensão de circuito aberto entre as medidas *indoor* e *outdoor* não foi apreciável, sendo que a diferença encontrada está dentro da incerteza da determinação de temperatura. Pode-se concluir que nestes módulos de filmes finos ensaiados a medida da temperatura da face posterior do módulo está mais próxima da temperatura da junção quando os módulos estão expostos à radiação solar. Este fato pode ser explicado pela diferente estrutura dos módulos de filmes finos, onde no módulo de tripla junção as células são depositadas em um substrato flexível e no caso do módulo de dupla junção as células estão depositadas entre dois vidros.

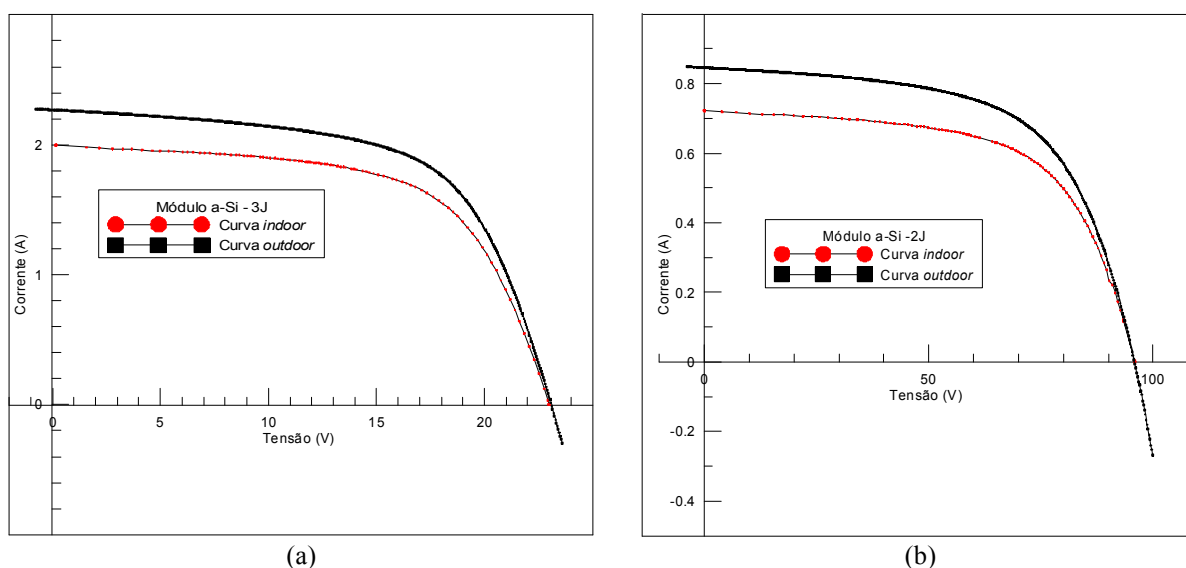


Figura 3 – Curvas I-V determinadas com simulador solar e sob iluminação natural. (a) módulo de silício amorfo tripla junção, (b) módulo de silício amorfo dupla junção.

Na Tabela 2 são apresentadas as médias dos valores absolutos obtidos para os parâmetros elétricos determinados com o simulador solar e sob iluminação natural para os módulos estudados neste trabalho. Nas medidas *indoor* foram tomadas seis curvas I-V, sendo três curvas com direção de varredura de I_{sc} para V_{oc} e três curvas na direção oposta. Sob iluminação natural foram tomadas seis curvas I-V para cada módulo.

	I_{sc} (A)		V_{oc} (V)		P_{mp} (W)		FF (%)	
	<i>Outdoor</i>	<i>Indoor</i>	<i>Outdoor</i>	<i>Indoor</i>	<i>Outdoor</i>	<i>Indoor</i>	<i>Outdoor</i>	<i>Indoor</i>
c-Si	3,311	3,310	21,048	21,218	48,839	49,707	70,09	70,78
m-Si	3,396	3,398	21,721	21,917	56,340	57,267	76,37	76,88
a-Si – 3J	2,309	2,016	23,051	22,995	32,383	28,158	60,85	60,75
a-Si – 2J	0,842	0,724	96,241	95,909	48,866	42,402	60,30	61,11

Tabela 2 – Resultados dos parâmetros elétricos determinados sob iluminação natural (*outdoor*) e com simulador solar (*indoor*) para 4 módulos fotovoltaicos de diferentes tecnologias.

Os parâmetros apresentados na Tabela 2 foram normalizados pelos valores medidos *outdoor* e são apresentados nas Figuras 4,5,6 e 7 juntamente com o desvio padrão encontrado nas 6 medidas realizadas para cada módulo. A Figura 4 apresenta os resultados para o módulo de silício monocristalino, onde se pode constatar a coerência dos resultados. A corrente de curto-circuito apresentou diferenças menores que 0,1%, fato que demonstra a calibração das células de referência. A diferença na determinação da tensão de circuito aberto e da potência máxima é coerente com uma diferença de temperatura da ordem de 2,5 °C, tendo em vista os valores dos coeficientes térmicos dos módulos, conforme exposto anteriormente.

O desvio padrão das medidas dos módulos de silício cristalino *indoor* é reduzido, já que há maior controle sobre as variáveis envolvidas. Os parâmetros determinados *outdoor* apresentam desvio padrão mais elevado devido às dificuldades em reproduzir as mesmas condições e controlar as variáveis em cada ensaio. Na Figura 5 são apresentados os resultados obtidos

para o módulo de silício multicristalino. Em termos gerais os resultados são similares aos encontrados para o módulo de silício monocristalino.

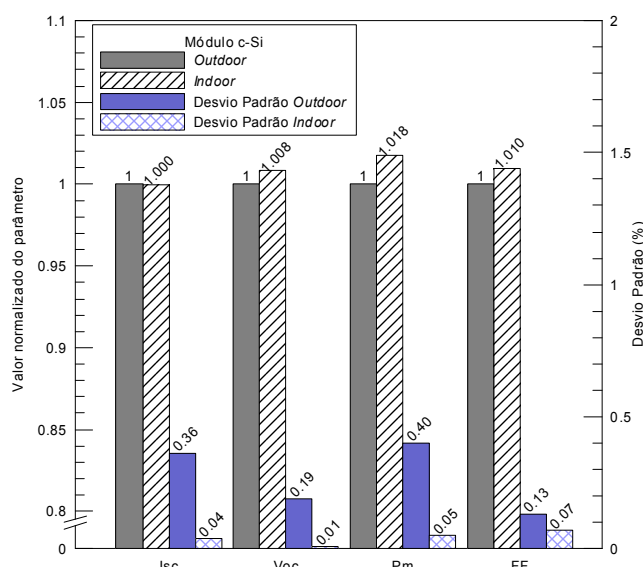


Figura 4 – Valores dos parâmetros elétricos normalizados determinados outdoor e indoor e desvio padrão relativo do módulo de silício monocristalino.

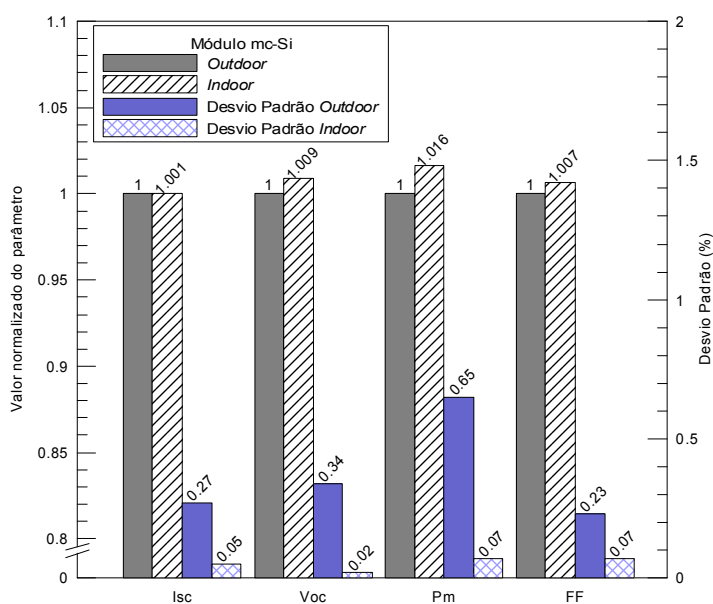


Figura 5 – Valores dos parâmetros elétricos normalizados determinados outdoor e indoor e desvio padrão relativo do módulo de silício multicristalino.

Na Figura 6 são apresentados os valores dos parâmetros normalizados do módulo de filme fino de silício amorfo de tripla junção. Para este módulo a corrente de curto-circuito medida *indoor* é aproximadamente 15% inferior daquela determinada *outdoor*. Este resultado é semelhante com aquele apresentado por Virtuani et al (2010), onde em um módulo semelhante é relatado que a I_{sc} medida *indoor* é aproximadamente 85% da I_{sc} determinada *outdoor*. Esta diferença foi atribuída ao descasamento espectral entre os módulos fotovoltaicos e a célula de referência utilizada no simulador solar. Pode-se concluir que a corrente de curto circuito do módulo multijunção fica limitada devido à distribuição espectral da radiação do simulador solar, sendo que uma das junções está limitando a corrente total.

A corrente de curto-circuito do módulo de silício amorfo de tripla junção apresentou alto desvio padrão quando medido *indoor* devido aos efeitos decorrentes da direção da varredura utilizada ao traçar a curva I-V. As médias foram feitas com as seis medidas, sendo que foram tomadas três em cada direção de varredura da tensão de polarização. As medidas *outdoor* foram tomadas em diferentes horas do dia, onde o espectro da radiação incidente também afetou os resultados. Este efeito aparece no desvio padrão das diversas medidas, sendo mais apreciável para os módulos de silício amorfo de tripla junção. A Figura 7 apresenta os resultados obtidos para o módulo de silício amorfo de dupla junção.

Para as medidas *outdoor* foi utilizada para medida de irradiância uma célula de silício cristalino, que sob o espectro solar real possui uma correlação elevada com a medida global de um piranômetro térmico, logo as diferenças devido a descasamento espectral são reduzidas sob iluminação natural.

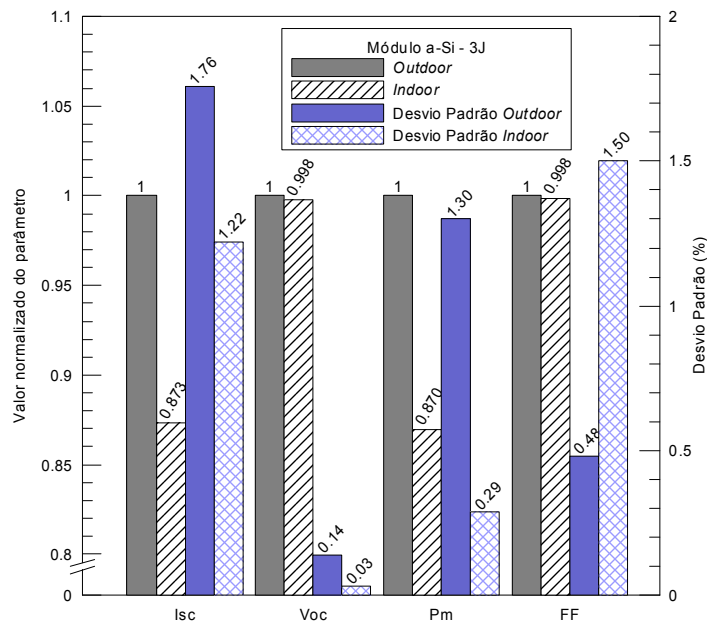


Figura 6 – Valores dos parâmetros elétricos normalizados determinados outdoor e indoor módulo de silício amorfo de tripla junção.

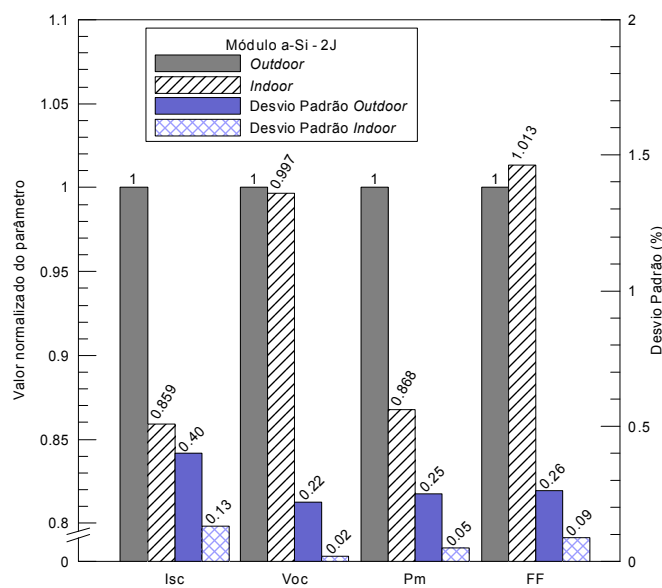


Figura 7 – Valores dos parâmetros elétricos normalizados determinados outdoor e indoor módulo de silício amorfo de dupla junção.

Efeitos da direção de varredura nas medidas dos módulos fotovoltaicos

A medida da curva I-V de módulos de silício cristalino não sofre influência apreciável devido à rapidez e a direção da tensão de polarização com que a curva I-V é traçada. Conforme relatado por Gasparin e Krenzinger (2010), para um módulo de silício amorfo de tripla junção idêntico ao utilizado neste trabalho, os efeitos da direção de varredura na determinação de I_{sc} e de P_m são da ordem de $\pm 0,5\%$, para durações de varredura de 10 ms.

As medidas com simulador solar foram feitas consecutivamente, sendo três na direção do curto-circuito para o circuito aberto e três na direção do circuito-aberto para o curto circuito. Entre as três medidas na mesma direção de varredura o desvio padrão dos parâmetros foi menor que 0,08%. Entretanto quando comparam-se as medidas realizadas nas diferentes direções de varredura é possível observar as diferenças relacionadas nas Tabela 3 e 4. Na Figura 8 são apresentados exemplos de curvas traçadas no simulador solar em ambas as direções de varredura, podendo-se observar que a corrente de curto-circuito é ligeiramente superior quando a curva é traçada do circuito-aberto ao curto-circuito.

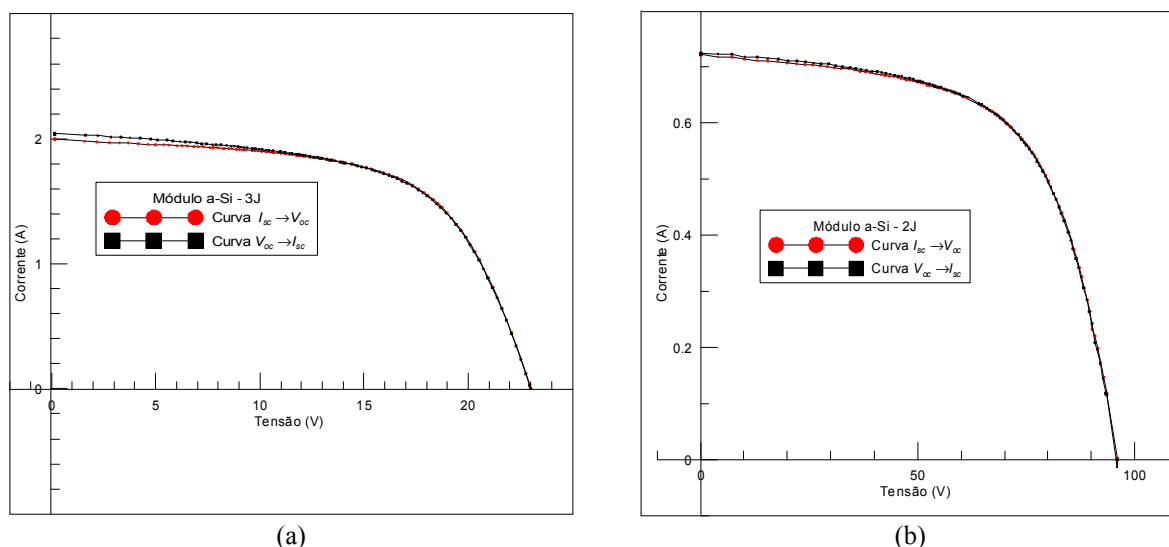


Figura 8 – Curvas I-V determinadas com simulador em ambas direções de varredura da tensão de polarização. (a) módulo de silício amorfo tripla junção, (b) módulo de silício amorfo tandem.

A Tabela 3 apresenta os resultados dos parâmetros medidos com o simulador solar em ambas as direções de varredura para o módulo de silício amorfo de tripla junção e na Tabela 4 são listados os resultados para o módulo de silício amorfo de dupla junção. Para o módulo de dupla junção as diferenças dos parâmetros em função da direção da varredura estão compreendidas no intervalo de incerteza das medidas individuais.

Parâmetro	I_{sc}		V_{oc}		P_{mp}		FF	
	$I_{sc} \rightarrow V_{oc}$	$V_{oc} \rightarrow I_{sc}$	$I_{sc} \rightarrow V_{oc}$	$V_{oc} \rightarrow I_{sc}$	$I_{sc} \rightarrow V_{oc}$	$V_{oc} \rightarrow I_{sc}$	$I_{sc} \rightarrow V_{oc}$	$V_{oc} \rightarrow I_{sc}$
Média de três medidas	1,994 A	2,039 A	23,000 V	22,990 V	28,233 W	28,084 W	61,57%	59,92%
Diferença em relação ao valor médio do parâmetro	-1,13%	1,12%	0,02%	-0,02%	0,26%	-0,27%	1,35%	-1,36%

Tabela 3 – Resultados dos valores medidos com simulador solar em ambas as direções de varredura para o módulo de silício amorfo de tripla junção.

Parâmetro	I_{sc}		V_{oc}		P_{mp}		FF	
	$I_{sc} \rightarrow V_{oc}$	$V_{oc} \rightarrow I_{sc}$	$I_{sc} \rightarrow V_{oc}$	$V_{oc} \rightarrow I_{sc}$	$I_{sc} \rightarrow V_{oc}$	$V_{oc} \rightarrow I_{sc}$	$I_{sc} \rightarrow V_{oc}$	$V_{oc} \rightarrow I_{sc}$
Média de três medidas	0,723 A	0,724 A	95,922 V	95,987 V	42,416 W	42,389 W	61,18%	61,03%
Diferença em relação ao valor médio do parâmetro	0,11%	-0,11%	0,01%	-0,01%	0,03%	-0,03%	0,13%	-0,13%

Tabela 4 – Resultados dos valores medidos com simulador solar em ambas as direções de varredura para o módulo de silício amorfo de dupla junção

A variação encontrada na determinação dos parâmetros elétricos decorrentes da rapidez e da direção da varredura de tensão utilizada para traçar a curva I-V diferem daqueles observados *outdoor*. Nos resultados encontrados por Virtuani et al. (2010) e Gasparin e Krenzinger (2010) observa-se que a potência máxima e o FF determinados *outdoor* são sobreestimados quando a curva é traçada de V_{oc} para I_{sc} com tempos de varredura inferiores a 10 ms. Este fato não foi observado nas medidas realizadas na condição *indoor*. Pode-se deduzir que a forte redução da corrente de curto-circuito na condição *indoor* afete seu comportamento de uma maneira diferente de quando as curvas I-V são traçadas na condição *outdoor* com tempos reduzidos de varredura.

CONCLUSÕES

Para os módulos de filmes finos ensaiados, verifica-se que na caracterização *indoor* não é apropriado utilizar a célula de silício monocristalino para medida da irradiância solar, embora o simulador utilizado seja classificado como classe AAA em sua distribuição espectral de acordo com a norma internacional IEC 60904-9 (2008). Nos módulos fotovoltaicos com multijunções pode haver uma junção que limita fortemente a corrente quando o módulo é exposto à distribuição espectral do

simulador solar. Com a luz simulada, as medidas de corrente de curto-circuito e potência máxima foram da ordem de 15 % inferiores à determinação sob iluminação natural para os módulos de silício amorfo de tripla junção.

Em medidas *outdoor*, em dias de céu limpo e em um intervalo próximo ao meio dia, pode-se utilizar uma célula de referência de silício cristalino para fazer ensaios de módulos fotovoltaicos de silício amorfo, mas sempre que possível é recomendável utilizar uma célula de referência com a mesma tecnologia do módulo. A tolerância para utilizar a célula de silício cristalino provém do fato de que a correlação da mesma com um piranômetro térmico sob iluminação natural é elevada nas condições citadas, principalmente porque o espectro da radiação solar natural também se assemelha muito ao espectro padrão.

Além dos efeitos de descasamento espectral, o tempo de 10 ms utilizado para traçar a curva I-V no simulador solar ocasiona uma pequena variação na determinação dos parâmetros, fato observado ao traçar a curva em ambos sentidos de varredura. Para os módulos de silício cristalino os resultados encontrados são perfeitamente coerentes entre as medidas *indoor* e *outdoor*.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e ao Instituto de Energias Renováveis e Eficiência Energética da Amazônia vinculado ao projeto INCT/MCT/CNPq pelo apoio financeiro na realização deste trabalho. Um especial agradecimento a Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, PUC-RS, e a equipe do NT-Solar pela possibilidade da realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Bühler, A.J., Gasparin F.P., Krenzinger A.,(2010) Análise da medida da temperatura de módulos fotovoltaicos em ensaios de caracterização elétrica, *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* ,pp. 04.09-04.16.
- Durisch, W., Urban, J., Smedstad, G. (1996). Characterisation of solar cells and modules under actual operating conditions. *Renewable Energy Volume 8, Issues 1-4, May-August 1996, Pages 359-366 Special Issue World Renewable Energy Congress Renewable Energy, Energy Efficiency and the Environment.*
- Gasparin, F.P., Krenzinger, A. (2009). Sistema Traçador de Curvas Características de Módulos Fotovoltaicos. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* ,pp. 04.61-04.68.
- Gasparin, F.P., Krenzinger, A. (2010), Influência da varredura de tensão na medida da curva característica de módulos fotovoltaicos de silício amorfo. III Congresso Brasileiro de Energia Solar - Belém, 21 a 24 de setembro de 2010.
- IEC 60904-9 (2008) International Electrotechnical Commission. Photovoltaic Devices. Part 9 – Solar simulator performance requirements.
- Virtuani, A., Pravettoni, M., & Müllejans, H. (2008). Comparison of Indoor and Outdoor Performance Measurements on Micromorph (a-Si/ μ c-Si) Thin Film Solar Modules. *Proceedings of 23rd EUPVSEC - European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, (pp. 2378-2382). Valencia, Spain.
- Virtuani, A., Müllejans, H., & Dunlop, E. (2010). Comparison of Indoor and Outdoor Performance Measurements of Recent Commercially Available Solar Modules. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. Volume 19 issue 1 (pp 11-20).

COMPARISON OF THE CHARACTERISTICS OF PHOTOVOLTAIC MODULES TESTED UNDER NATURAL AND SIMULATED SOLAR RADIATION

ABSTRACT

The use of solar simulators to characterize photovoltaic (PV) devices can lead to discrepancies between the indoor and outdoor measurements. This is mainly due to spectral mismatch and the speed which the I-V curve is traced, since usually pulsed solar simulators have a flash from 2 to 20 ms. In this paper four PV modules were measured indoors and outdoors, two of them were crystalline silicon and the other two were amorphous silicon. For crystalline modules the results are consistent; however, for multijunction thin film devices the short circuit current and maximum power can be up to 15 % different from the outdoor measurement. Another issue is that the IV curve is affected by the speed which the curve is traced, especially in modules with high capacitance.

Keywords: Solar Energy, I-V curve, Photovoltaic module, Pulsed solar simulator.