

COMPORTAMENTO DO FATOR DE FORMA DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS SOB CONDIÇÕES VARIÁVEIS DE IRRADIÂNCIA, TEMPERATURA E SOMBREAMENTO DE CÉLULAS.

G. A. Rampinelli, A. Krenzinger.

Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Laboratório de Energia Solar
Rua Sarmento Leite, 425 Porto Alegre, RS, Brasil. Tel. (51)33086841 – Fax 33086841
e-mail: giuliano.rampinelli@ufrgs.br e arno@mecanica.ufrgs.br

RESUMO: Este trabalho apresenta um estudo da influência da irradiância, da temperatura e do sombreamento de células fotovoltaicas no fator de forma de módulos em um dos arranjos de uma instalação fotovoltaica conectada à rede. A instalação é dividida em três arranjos de 1600 W_p. Os módulos da instalação apresentam potência nominal de 100 W_p e são do mesmo fabricante e modelo. A análise experimental mostra que na situação em que o arranjo está submetido a baixas irradiâncias e/ou polarizado em um ponto afastado do ponto de máxima potência, os módulos apresentam comportamentos diferentes. As tensões de seis módulos são menores que as tensões dos demais módulos que compõem o arranjo. Para irradiâncias maiores que 300 W/m² o comportamento das tensões dos módulos é similar. Utilizando um programa de simulação de curvas características de módulos e arranjos foi verificado que estas condições de operação afetam de maneira diferente o fator de forma dos módulos.

Palavras chaves: energia solar, sistema fotovoltaico conectado à rede, fator de forma.

INTRODUÇÃO

Os sistemas fotovoltaicos têm apresentado um crescimento acentuado e uma alternativa de energia competitiva em diversos países. De acordo com a *European Photovoltaic Industry Association* (EPIA, 2006) o crescimento do mercado de módulos nos últimos cinco anos foi, em média, de 40 % ao ano. Ainda conforme a EPIA (2006), estima-se que esse crescimento permanecerá até 2010, quando haverá uma estabilização do mercado, com crescimento de 26 %. Em 2000 a potência fotovoltaica instalada foi de 250 MW, enquanto que em 2006 o mercado fotovoltaico atingiu 2 GW (Mints e Tomlinson, 2007).

Em particular, os sistemas fotovoltaicos conectados à rede têm merecido destaque especial desde meados da década de 90 e constituem a aplicação da energia solar fotovoltaica que tem apresentado a maior taxa de crescimento anual no mundo. No ano de 2005, aproximadamente 60 % da potência total fotovoltaica instalada já era conectada à rede superando todas as demais aplicações terrestres da tecnologia fotovoltaica reunidas. Dados da *International Energy Agency* (IEA, 2006) indicam que desde 1997 o crescimento médio anual da potência fotovoltaica instalada conectada à rede tem sido superior a 30 % entre os seus países membros. Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede cresceram de 60 MW em 1999 para 1100 MW em 2005 (Maycock e Bradford, 2006). A instalação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede no Brasil é recente, sendo que as primeiras experiências datam de meados da década de 90.

FUNDAMENTAÇÃO

No Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) foi instalado um sistema fotovoltaico conectado à rede. A instalação é composta de três arranjos independentes formados por 16 módulos de células de silício monocristalino de potência nominal de 100 W_p. O sistema fotovoltaico entrou em operação em 2004 (Krenzinger et al, 2004) e está sendo monitorado e estudado continuamente (Dias, 2006; Rampinelli, 2007). Cada módulo da instalação fotovoltaica foi ensaiado e caracterizado individualmente pela equipe do laboratório (Krenzinger e Prieb, 2005).

A completa caracterização de uma célula ou de um módulo fotovoltaico passa pela determinação da curva característica que deve ser obtida obedecendo alguns critérios estabelecidos pelas normas técnicas. Parâmetros como corrente de curto-circuito, tensão de circuito aberto, tensão e corrente de máxima potência são obtidos a partir da curva característica. Os módulos fotovoltaicos podem ser classificados de acordo com o seu fator de forma que é expresso na Eq. 1

$$FF = \frac{I_{PMP} \times V_{PMP}}{I_{SC} \times V_{OC}} \quad (1)$$

onde, FF é o fator de forma, I_{PMP} é a corrente no ponto de máxima potência, V_{PMP} é a tensão no ponto de máxima potência, I_{SC} é a corrente de curto-circuito e V_{OC} é a tensão de circuito aberto.

A Tabela 1 apresenta os parâmetros, na condição padrão (1000 W/m², 25 °C, AM 1,5), dos módulos que compõem o arranjo.

Módulo	Isc(STD)	Voc(STD)	I _{max} (STD)	V _{max} (STD)	P _{max} (STD)	FF(STD)
ES1	3,16	41,91	2,89	33,24	96,0	0,72
ES2	3,18	42,23	2,88	33,91	97,7	0,73
ES3	3,20	41,95	2,89	33,53	96,8	0,72
ES4	3,19	42,13	2,89	33,61	97,2	0,72
ES5	3,25	42,24	2,86	33,87	97,0	0,70
ES6	3,23	42,09	2,86	33,82	96,9	0,71
ES7	3,23	42,05	2,88	33,59	96,6	0,71
ES8	3,17	42,30	2,90	33,15	96,0	0,72
EI1	3,18	41,87	2,80	33,57	94,2	0,70
EI2	3,13	41,93	2,83	33,25	94,3	0,72
EI3	3,14	41,70	2,85	33,20	94,5	0,72
EI4	3,20	41,98	2,86	33,09	94,7	0,70
EI5	3,19	41,05	2,82	32,68	92,2	0,70
EI6	3,15	41,56	2,86	33,19	95,0	0,72
EI7	3,13	42,07	2,86	33,87	96,8	0,73
EI8	3,16	41,95	2,86	33,22	94,9	0,72

Tabela 1: Parâmetros dos módulos que compõem o arranjo fotovoltaico.

Os principais fatores que influenciam na curva característica de uma célula, módulo ou arranjo são a irradiância e a temperatura. Além disso, possíveis sombreamentos de células podem afetar o fator de forma dos módulos. A finalidade do presente trabalho é a análise da influência desses fatores na curva característica e no fator de forma dos módulos que compõem um dos arranjos da instalação. Esse arranjo é constituído por dois painéis, um painel localizado na parte superior do prédio do laboratório e um segundo painel localizado na parte inferior, de 8 módulos conectados em paralelo.

ANÁLISE DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

Dados experimentais da instalação

A partir do monitoramento das tensões dos módulos de um arranjo ao longo de um ano de medidas, verificou-se que três módulos do painel superior e três módulos do painel inferior apresentam tensões menores que os demais módulos do arranjo sob condições de irradiâncias menores que, 200 W/m², que ocorrem principalmente no amanhecer, entardecer e em dias nublados. Esse comportamento é independente da declinação e azimute solar. Para irradiâncias maiores que, 200 W/m², o comportamento da tensão dos módulos é similar. A Figura 1 compara o comportamento de módulos do painel superior para um período correspondente ao amanhecer (a) e para um período correspondente ao entardecer (b). Os módulos ES5 e ES6 têm tensões inferiores às tensões dos outros módulos que compõem o painel. Este comportamento é devido a diferenças de qualidade entre os módulos, fato que será evidenciado com as curvas características apresentadas mais adiante neste trabalho. O módulo ES7, que não teve seu comportamento apresentado, também tem tensões similares aos módulos ES5 e ES6.

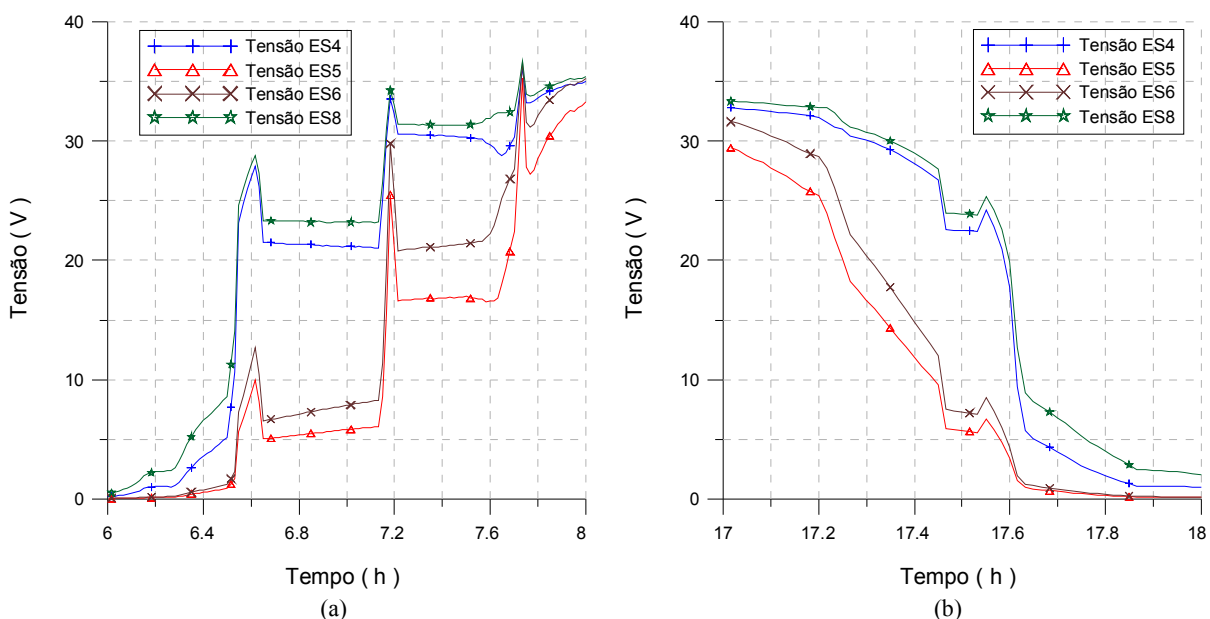


Figura 1: Comportamento da tensão de módulos do painel superior no amanhecer (a) e no entardecer (b).

De maneira similar, os módulos EI1 e EI5 apresentam tensões menores que as tensões dos demais módulos do painel em baixas irradiâncias. O módulo EI4, não apresentado, tem tensões similares a esses dois módulos. A Figura 2 compara o comportamento de alguns módulos do painel inferior sob condição de baixa irradiância no amanhecer (a) e no entardecer (b).

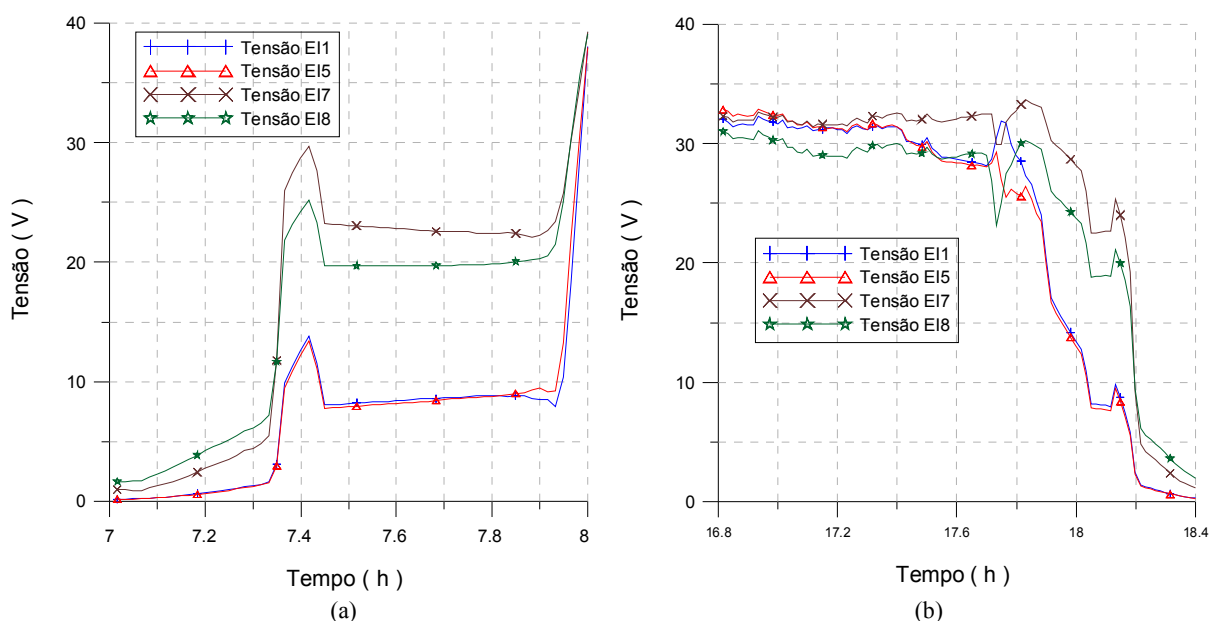


Figura 2: Comportamento da tensão de módulos do painel inferior no amanhecer (a) e no entardecer (b).

Assim como no amanhecer e no entardecer, em dias nublados ocorrem períodos de baixa irradiância. Em consequência, para períodos nublados, também há diferente comportamento entre as tensões dos módulos que compõem o arranjo. A Figura 3 compara o comportamento das tensões de módulos superiores (a) e de módulos inferiores (b) em um período nublado. A maior irradiância foi de 400 W/m^2 . No período entre 8 h e 10 h e entre 14 h e 18 h, a irradiância é inferior a 250 W/m^2 e a tensão dos módulos ES5, ES6, EI1 e EI5 é menor que a tensão dos módulos ES4 e EI2. Entre 10 h e 14 h, a irradiância é superior a 250 W/m^2 e a tensão dos módulos é similar.

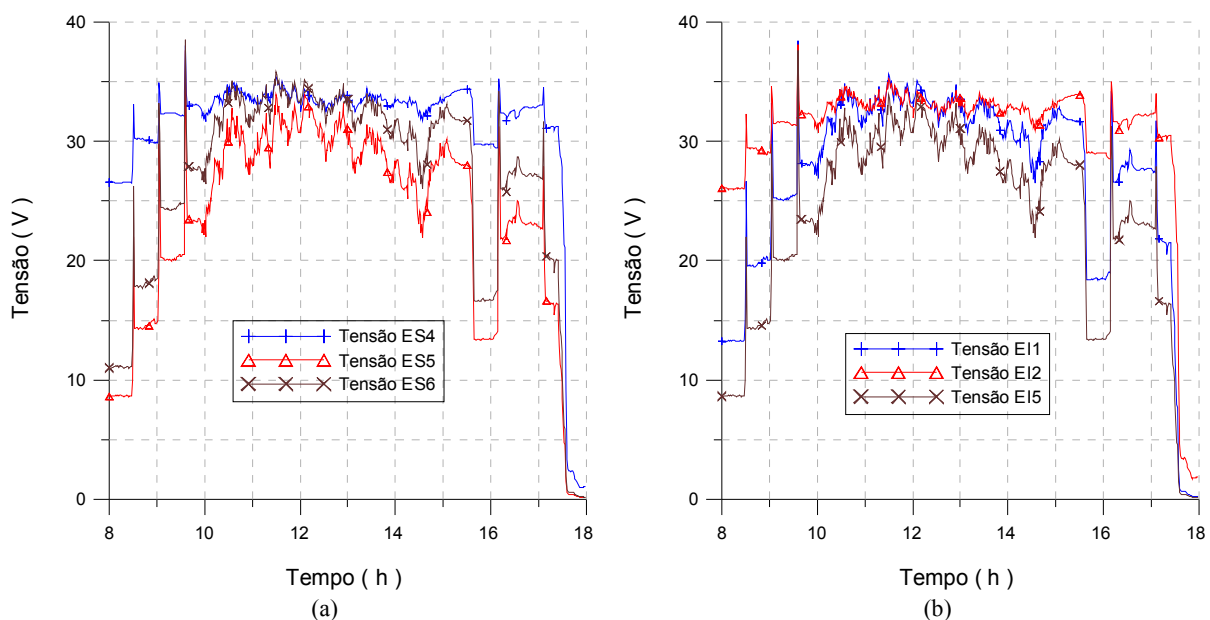


Figura 3: Comportamento da tensão de módulos do painel superior (a) e do painel inferior (b) em um período nublado.

Simulação computacional da instalação

Um programa de simulação desenvolvido no Laboratório de Energia Solar da UFRGS, denominado Crearray (Krenzinger, 2001) foi utilizado como ferramenta computacional. Este programa tem por objetivo analisar o comportamento de uma associação de módulos fotovoltaicos, considerando efeitos de temperatura, irradiância e possíveis diferenças entre os módulos que compõem a instalação. O programa fornece a curva característica da associação a partir das curvas características de cada módulo, as quais são obtidas através de um modelo matemático que trabalha com parâmetros obtidos nos catálogos fornecidos pelos fabricantes dos módulos ou curvas medidas.

A partir da introdução no programa dos parâmetros dos módulos do arranjo fotovoltaico em estudo ensaiados por Krenzinger e Prieb (2005), é possível simular o comportamento do mesmo sob diferentes condições de irradiância, temperatura e sombreamento de células.

Influência da irradiância no fator de forma dos módulos

Para a simulação da influência da irradiância no fator de forma dos módulos do arranjo da instalação, a temperatura dos módulos foi mantida constante no valor de 25 °C e a irradiância variou entre 100 W/m² e 1000 W/m². Para irradiâncias entre 100 W/m² e 400 W/m², os módulos ES5, ES6 e ES7 têm fatores de forma entre, aproximadamente 0,3 e 0,65. Para irradiâncias maiores que 500 W/m², o fator de forma desses módulos é de aproximadamente 0,7. Os módulos ES1 e ES8 têm fator de forma de 0,75 em baixa irradiância, aproximando-se de 0,7 para altas irradiâncias. Os módulos ES2, ES3 e ES4 têm fator de forma de 0,65 e 0,7 para baixas e altas irradiâncias, respectivamente. A Figura 4 compara o fator de forma dos módulos ES1, ES5, ES6 e ES8 (a) e o fator de forma dos módulos ES2, ES3, ES4 e ES7 (b) do painel superior do arranjo.

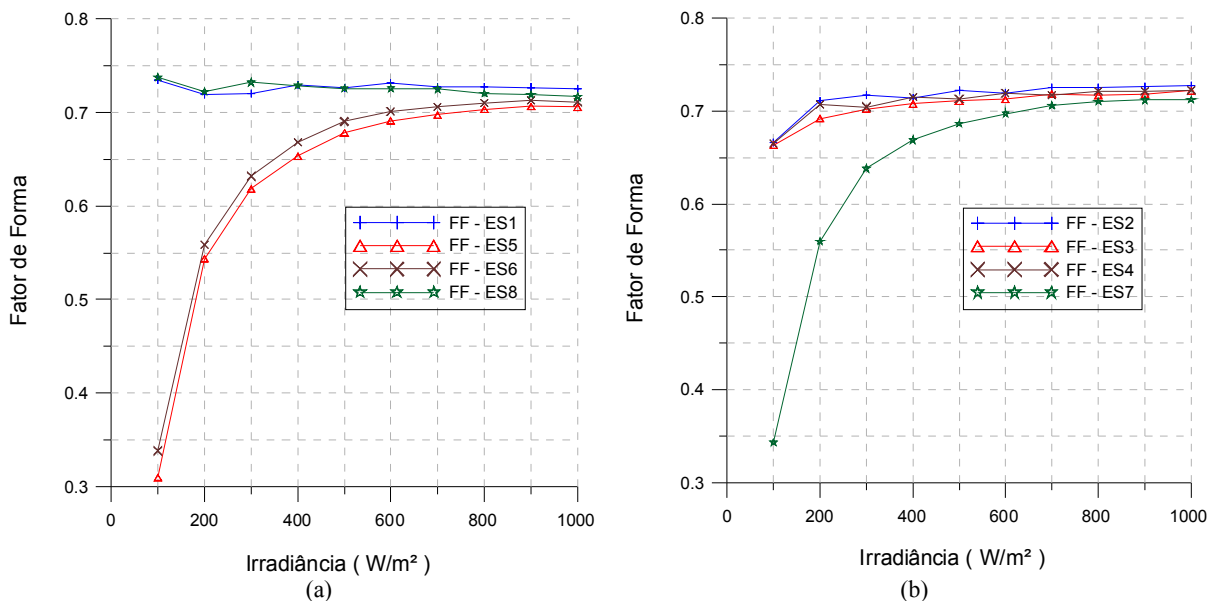


Figura 4: Fator de forma dos módulos do painel superior em função da irradiância.

As curvas características dos módulos ES5, ES6 e ES7 sob baixas irradiâncias afetam os fatores de forma dos mesmos. A Figura 5 compara as curvas características de módulos que, em baixas irradiâncias, apresentam diferentes fatores de forma.

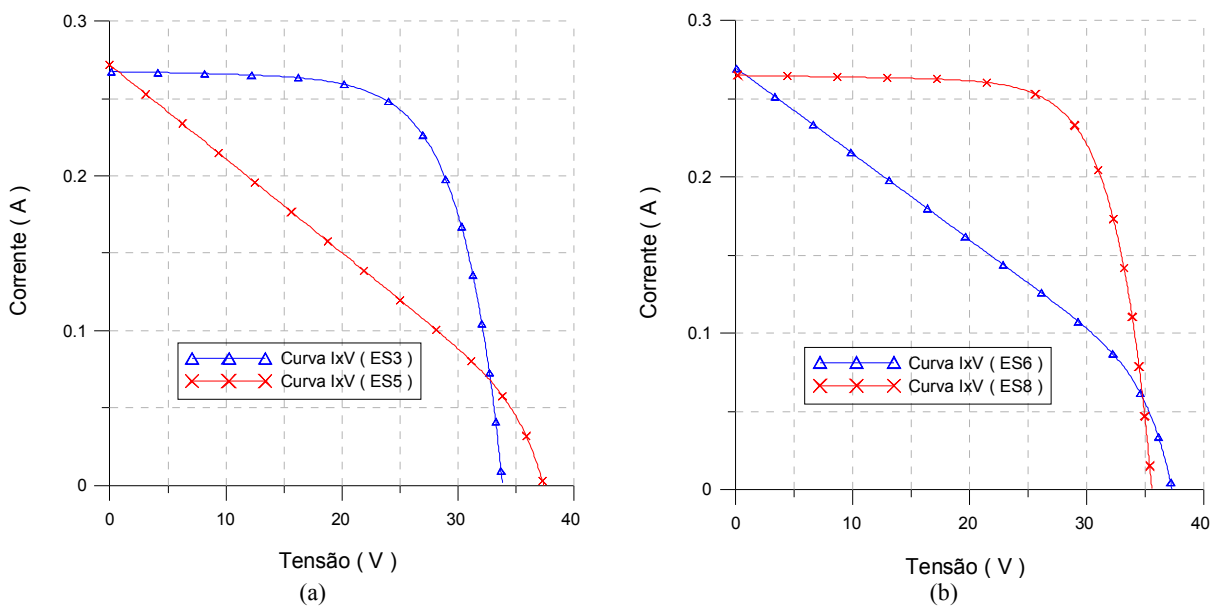


Figura 5: Curva característica dos módulos do painel superior sob baixa irradiância.

Os módulos EI1 e EI5 têm fator de forma variando entre 0,3 e 0,65 em baixas irradiâncias e aproximando-se de 0,7 para altas irradiâncias. O módulo EI4 tem fator de forma variando entre 0,65 (em irradiância de 100 W/m²) e 0,7 (em irradiância de

1000 W/m²). Os módulos EI2, EI3, EI6, EI7 e EI8 têm fator de forma de 0,7 para qualquer valor de irradiância. A Figura 6 compara o fator de forma dos módulos EI1, EI2, EI3 e EI4 (a) e o fator de forma dos módulos EI5, EI6, EI7 e EI8 (b) do painel inferior do arranjo.

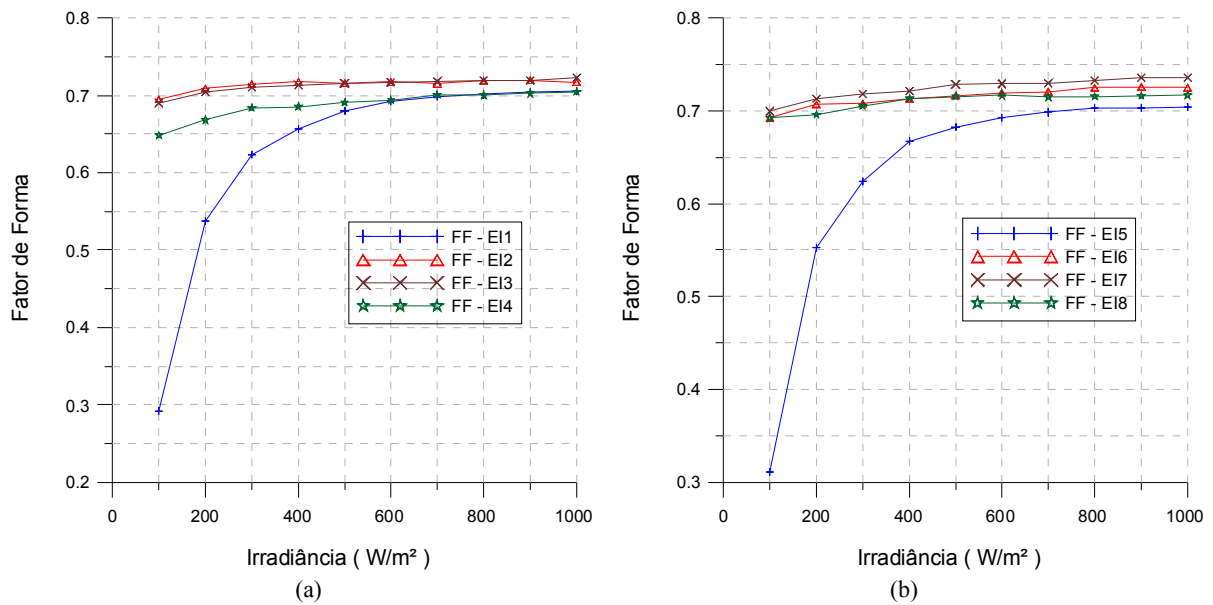


Figura 6: Fator de forma dos módulos do painel inferior em função da irradiância.

As curvas características dos módulos EI1, EI5 sob baixas irradiâncias afetam os fatores de forma dos mesmos. A Figura 7 compara as curvas características de módulos que, em baixas irradiâncias, apresentam diferentes fatores de forma.

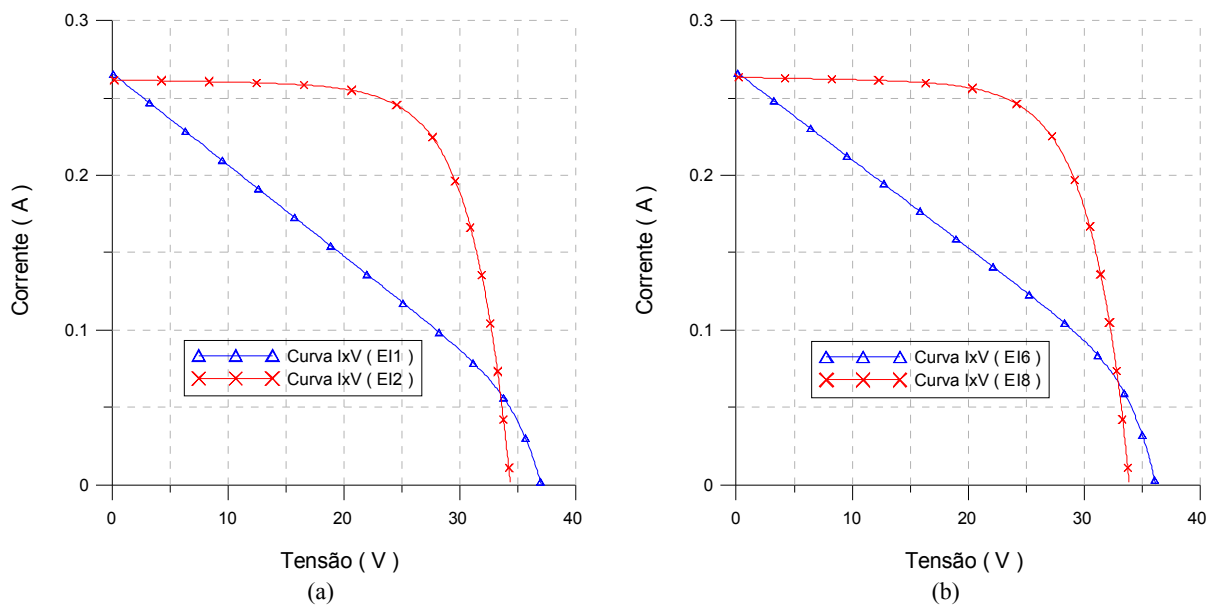


Figura 7: Curva característica dos módulos do painel inferior sob baixa irradiância.

Os módulos do sistema fotovoltaico em estudo foram caracterizados antes da sua instalação. Cada um dos módulos teve sua curva característica obtida sob condições de medidas controladas. A resistência paralela do módulo ES5 tem um valor baixo, enquanto a resistência série do mesmo é alta. Essa condição afeta de maneira acentuada o fator de forma do módulo, principalmente sob baixa irradiância. De maneira inversa, a resistência paralela do módulo ES8 é alta e a resistência série é baixa. Essa condição implica em um fator de forma maior para o módulo ES8.

Para a seqüência da simulação, foram escolhidos dois módulos, ES5 e ES8. O módulo ES5 foi escolhido por apresentar um baixo fator de forma sob baixa irradiância e o módulo ES8 por apresentar um fator de forma constante com a irradiância. A Figura 8 compara a curva característica do módulo ES5 sob condições de irradiâncias de 100 W/m², 200 W/m² e 300 W/m² (a) e a curva característica do módulo ES8 sob a mesma condição de irradiância (b).

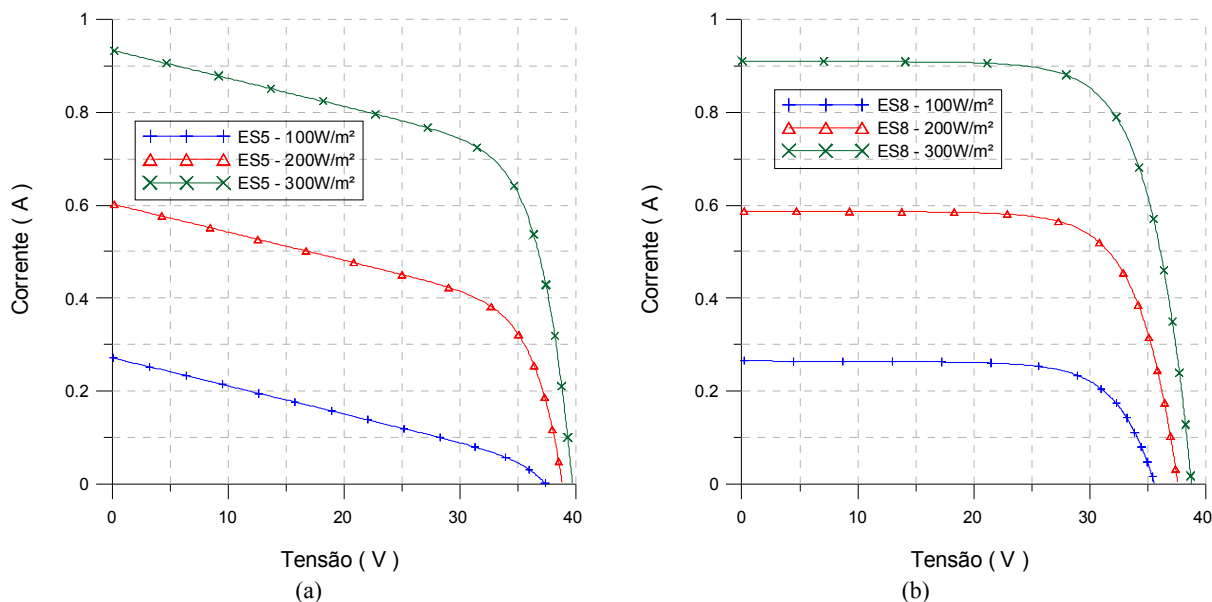


Figura 8: Curva característica dos módulos ES5 e ES8 sob baixa irradiância.

Para altas irradiâncias, os valores da resistência paralela e da resistência série dos módulos ES5 e ES8 afetam de maneira menos acentuada o fator de forma dos mesmos. Dessa maneira, as curvas características desses módulos são similares sob alta irradiância. A Figura 9 compara a curva característica do módulo ES5 sob condição de 800 W/m², 900 W/m² e 1000 W/m² (a) e a curva característica do módulo ES8 sob as mesmas condições de irradiância (b).

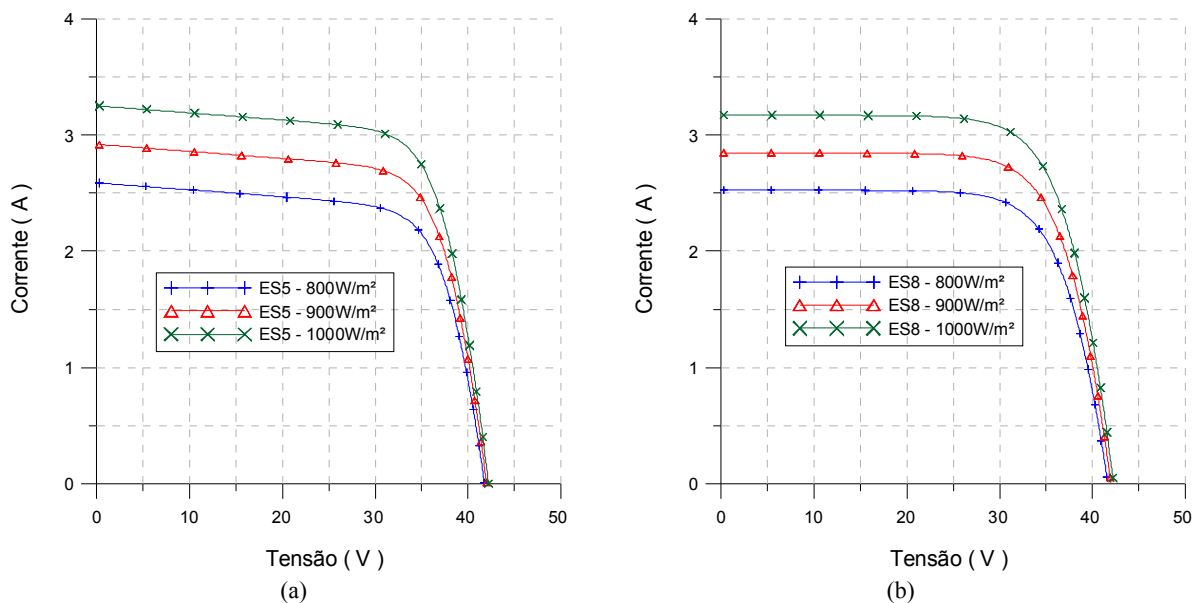


Figura 9: Curva característica dos módulos ES5 e ES8 sob alta irradiância.

Influência do sombreamento de células no fator de forma dos módulos

O sombreamento de células em módulos pode ocasionar diversos danos ao sistema. Um estudo sobre os efeitos dessa condição nos módulos do arranjo fotovoltaico pode ser verificado em Rampinelli e Krenzinger (2006). Para evitar danos ao sistema são utilizados dispositivos de proteção, como por exemplo, diodos de bloqueio e diodos de *bypass*. Os módulos da instalação em estudo neste trabalho são compostos por 72 células de silício monocristalino ligadas em série. O módulo tem três diodos de *bypass* e cada um está ligado em anti-paralelo com um grupo de 24 células. Quando um diodo de *bypass* está polarizado, a tensão de um módulo é reduzida em 1/3 do valor da tensão do módulo operando quando não há diodo de *bypass* polarizado. De maneira similar, quando dois diodos de *bypass* estão polarizados essa tensão é reduzida em 2/3. E se os três diodos de *bypass* estão polarizados a tensão do módulo fica reduzida à tensão reversa dos diodos de *bypass*.

Para a simulação dos efeitos de sombreamento de células em módulos do arranjo foi escolhido o módulo ES1 que apresenta um fator de forma, aproximadamente constante com a irradiância. A Figura 10 ilustra a curva característica do módulo ES1 sob condição de sombreamento de células. Em (a) uma curva representa uma situação em que 1/3 do módulo está submetido à uma irradiância e 2/3 do módulo está submetido a outra irradiância. A segunda curva representa uma situação em que cada 1/3 do módulo está submetido a uma irradiância diferente. Em (b) são apresentadas as duas curvas PxV que representam

essas mesmas situações em que o módulo está submetido. Para essas condições o fator de forma dos módulos é acentuadamente afetado.

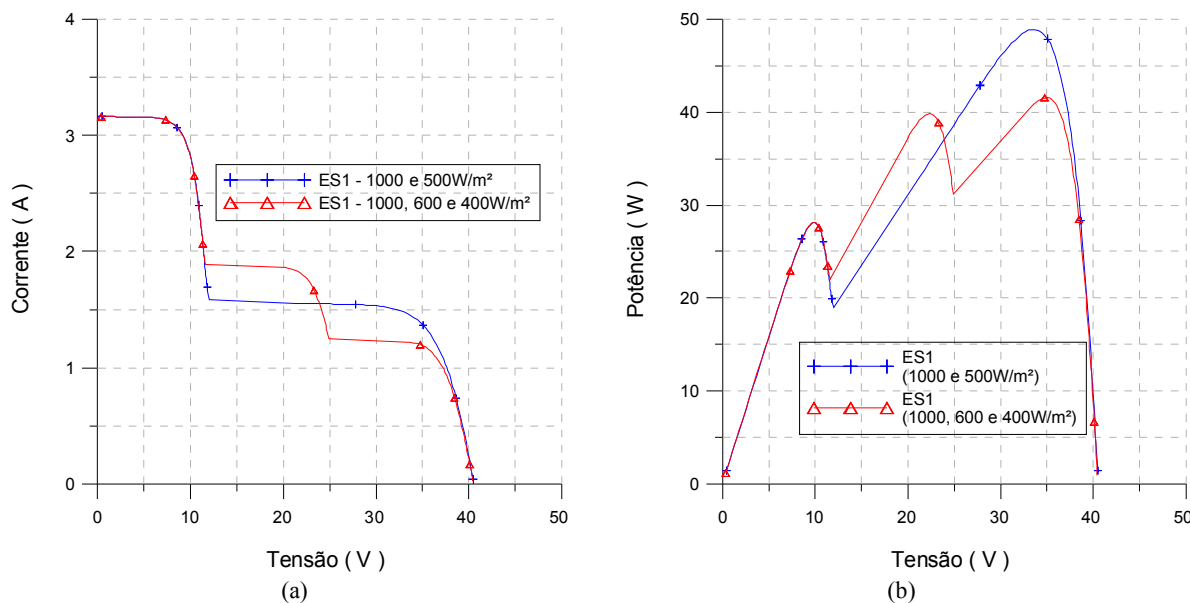


Figura 10: Curva característica ($I \times V$) e ($P \times V$) dos módulos sob sombreamento de células.

Influência da temperatura no fator de forma dos módulos

Para a simulação da influência da temperatura no fator de forma dos módulos do arranjo da instalação foram escolhidos os módulos ES5 e ES8. A temperatura dos módulos foi variada entre 15 °C e 55 °C para irradiâncias de 100 W/m², 400 W/m² e 1000 W/m². Para uma mesma irradiância, a temperatura de operação dos módulos afeta pouco o fator de forma dos módulos. A Figura 11 compara o comportamento do fator de forma com da temperatura do módulo ES5 (a) e do módulo ES8 (b) para irradiâncias de 100 W/m², 400 W/m² e 1000 W/m².

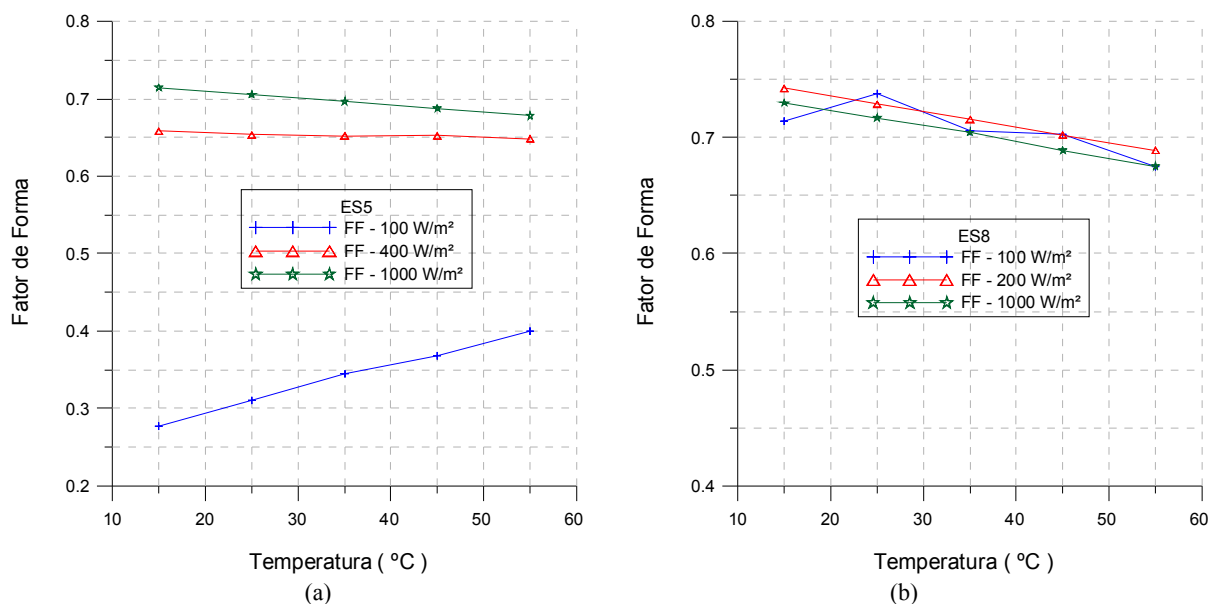


Figura 11: Fator de forma dos módulos ES5(a) e ES8(b).

Para uma mesma irradiância, o fator de forma do módulo ES8 diminui com o aumento da temperatura. Em baixa irradiância, o fator de forma do módulo ES5 aumenta com o aumento da temperatura. De maneira inversa, para alta irradiância, o fator de forma do módulo ES5 diminui com o aumento da temperatura.

CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um estudo da influência da irradiância, da temperatura e do sombreamento de células no fator de forma de módulos fotovoltaicos que compõem um dos arranjos de uma instalação fotovoltaica conectada à rede elétrica. Entre os módulos do arranjo em estudo, seis apresentaram tensões inferiores que os demais sob condições de baixa irradiância. Devido a diferenças de fabricação, as curvas características desses módulos sob essa condição afetam o fator de

forma dos mesmos. Esses módulos apresentam fator de forma 0,3 e 0,7 sob baixa e alta irradiância, respectivamente, enquanto que para os demais módulos o fator de forma dos módulos pode ser considerado constante, sendo aproximadamente 0,7. O fator de forma dos módulos é pouco afetado pela temperatura, sendo que, de maneira geral o fator de forma diminui com o aumento da temperatura. O sombreamento de células afeta a curva característica dos módulos e conseqüentemente o fator de forma dos mesmos.

AGRADECIMENTOS

O trabalho contou com o apoio da FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos), ELETROBRÁS (Centrais Elétricas Brasileiras), CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior).

REFERÊNCIAS

- Dias, J. B., 2006, Instalação Fotovoltaica Conectada à Rede: Estudo Experimental para Otimização do Fator de Dimensionamento. Tese de Doutorado, PROMEC/UFRGS, Porto Alegre, Brasil.
- EPIA – European Photovoltaic Industry Association. Annual Report, 2006.
- Hecktheuer, L. A., 2001, Análise de Associações de Módulos Fotovoltaicos. Tese de Doutorado, PROMEC/UFRGS, Porto Alegre, Brasil.
- Krenzinger, A., 2001. An Algorithm for PV Array Analysis. In: 17TH European Photovoltaic Solar Energy Conference, 2001, Munich. Proceedings of the 17TH EPVSEC. Florença, Itália: Mani Fotolito, 2001. p. 816-819.
- Krenzinger, A., Dias, J. B., Prieb, C. W. M., 2004, Sistema Fotovoltaico Conectado à rede o Sul do Brasil, XII Congresso Ibérico y VII Congresso Iberoamericano de Energia Solar, Vigo, Espanha. 1019-1024.
- Krenzinger, A., Prieb, C. W. M., 2005. Clasificación y Selección de Módulos Fotovoltaicos para una Central Conectada a la Red. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 9, pp 04.19-04.24.
- IEA – International Energy Agency. PVPS. Photovoltaic Power System Programme. Annual Report 2006.
- Maycock, P. Bradford, T. 2006. PV Market Update: Soaring demand continues despite predictions of slowdown. Renewable Energy World, volume 9, issue 4, july-august, 2006.
- Mints, P., Tomlinson, D., 2007. Shipping Forecast: Top Manufacturer Output Increases 41 % in 2006. Renewable Energy World Magazine, volume 10, issue 3.
- Rampinelli, G. A., Krenzinger, A., 2006. Efeito do Sombreamento em Células de uma Associação de Módulos Fotovoltaicos Conectados à Rede. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. V.10. p.17-24, 2006.
- Rampinelli, G. A., 2007. Análise da Distribuição de Tensões Elétricas em uma Associação de Módulos de um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede. Tese de Mestrado, PROMEC/UFRGS, Porto Alegre, Brasil.

ABSTRACT: This work presents an analysis of the influence of the irradiance, the temperature and of the cells shadowing in the fill factor of the photovoltaic modules. The grid-connected photovoltaic plant is 4800 W_p and was divided into three arrays. The modules of the installation are 100 W_p nominal power, from de same model and manufacturer. The experimental analysis shows that in the situation where the array is submitted to low irradiances and/or biased out of the maximum power point, the modules present different behaviors. The voltages of six modules are lower than the voltages of the other modules that compose the array. For irradiances over 300 W/m² the behavior of the voltages of the modules is similar. Using a computer program for simulation of characteristic curves of modules and arrays it was verified that these conditions affect the fill factor of the modules.

Keywords: solar energy, grid-connected photovoltaic plant, fill factor.