

ANÁLISES DE EFEITOS EXTERNOS SOBRE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS TAIS COMO ASSOCIAÇÃO E SOMBREAMENTO POR MEIO DO ATP

Leonardo Rosenthal Caetano Silva¹, Geraldo Caixeta Guimarães², Raul Vitor Arantes Monteiro³.

^{1,2,3}Núcleo de Dinâmica de Sistemas Elétricos, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG.

¹leonardo.rosenthal@hotmail.com, ²gcaixeta@ufu.br, ³rauldvm@terra.com.br.

Resumo - Este artigo apresenta o estudo computacional dos efeitos externos da associação de células e módulos fotovoltaicos, incluindo o efeito de sombreamento, utilizando o software *Alternative Transients Program* (ATP). Os resultados obtidos são comparados com as citações literais e as informações provenientes dos fabricantes, validando, assim, o modelo computacional utilizado.

Palavras-Chave - Associação de módulos e células fotovoltaicas, ATP, efeitos externos, energia fotovoltaica, geração distribuída, sombreamento.

ANALYSIS OF EXTERNAL EFFECTS ON PHOTOVOLTAIC SYSTEMS SUCH AS ASSOCIATION AND SHADOWING VIA ATP

Abstract - This paper presents the computational study of external effects regarded to the association of photovoltaic cells and modules, including shadowing effects, using the software *Alternative Transients Program* (ATP). The results are compared to literal quotations and that information provided by the manufacturers, thus validating the computer model used.

Keywords – Association of photovoltaic modules and cells, ATP, distributed generation, external effects, photovoltaic energy, shadowing.

I. INTRODUÇÃO

A quantidade de energia produzida por um sistema fotovoltaico depende da forma como são associados seus módulos e dos fatores externos de temperatura e irradiação.

Independentemente da ligação desse tipo de produção de energia elétrica com cargas, primeiramente, é necessário estudar as condições climáticas para a sua instalação e definir o padrão associativo do sistema. Locais com baixa irradiação ou altas temperaturas não oferecem bons rendimentos aos sistemas, enquanto que o contrário contribui para o bom funcionamento [1] [2].

No Brasil, as regiões Nordeste, Centro-Oeste e Norte possuem o maior potencial de aproveitamento da energia solar. Mesmo as regiões menos privilegiadas possuem taxas

de irradiação melhores do que as da Alemanha ou outros países europeus que se utilizam largamente a energia solar fotovoltaica.

Mesmo com altos índices favoráveis à instalação de sistemas fotovoltaicos na maioria do território nacional ao longo do ano, ainda é baixo o investimento nessa área, ficando o mercado de produção de energia elétrica ainda focado em outros meios.

Os informes gerais da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) de Maio de 2015 mostram que a produção fotovoltaica participa de 0,01% da demanda geral de energia do Brasil, gerando uma potência de 15.179 kW. Os empreendimentos na área prometem mais 338.488 kW, mas nenhuma nova usina está em construção no momento [3].

Países em condições naturais mais desfavoráveis estão mais avançados na exploração dessa fonte, como Alemanha, Itália e Espanha, que apresentam consumos altíssimos [4].

A resolução 482/2012 publicada pela ANEEL, em abril de 2012, deve estimular a produção de energia elétrica no Brasil por meio da produção fotovoltaica. Ela define um sistema de compensação, de modo que o produtor independente pode gerar durante o dia para a concessionária e abater do preço a pagar quando precisar de energia a noite.

Um ponto vantajoso é que o pequeno gerador fica alheio às variações do preço da energia elétrica, já que o preço da concessionária varia e inflaciona, ao passo que a produção fotovoltaica se mantém na média e o investimento é fixo. O mini ou micro gerador tem custos apenas na instalação e o investimento se paga, em média, entre 8 e 12 anos, podendo diminuir com a variação de preço da concessionária.

Mesmo com grandes vantagens na geração solar fotovoltaica, o rendimento dos módulos comerciais ainda é baixo, estando em torno de 13 a 17% e a conexão com a rede depende de técnicas de busca do ponto de máxima potência em conversores, encarecendo e exigindo mão de obra especializada na instalação.

Este artigo tem como objetivo apresentar como os efeitos externos de irradiação e temperatura afetam sistemas fotovoltaicos, além de descrever as associações em que esse tipo de sistema pode ser montado, utilizando-se de fatos literários, dados disponibilizados por fabricantes e resultados obtidos por modelo computacional.



XIII CEEL - ISSN 2178-8308
12 a 16 de Outubro de 2015
Universidade Federal de Uberlândia - UFU
Uberlândia - Minas Gerais - Brasil

II. O FUNCIONAMENTO DA CÉLULA FOTOVOLTAICA

A. A célula fotovoltaica

A célula fotovoltaica é produzida por materiais semicondutores e, como tal, consiste de uma junção *p-n*. O material superior à junção deve ser translúcido a fim de permitir que os fótons sejam absorvidos pelo material [2]. A estrutura de uma célula fotovoltaica é apresentada na Figura 1 [2].

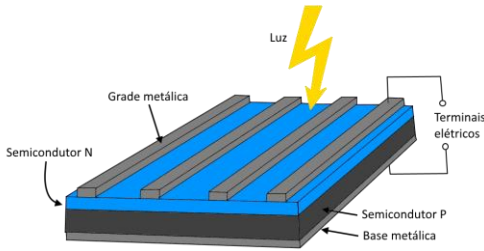


Fig. 1. Estrutura de uma célula fotovoltaica [2].

O circuito equivalente da célula fotovoltaica segue a equação (1) e é mostrado na Figura 2[1]. Nota-se que o símbolo de transformador da figura 2 é utilizado aqui e por outros autores [1] para indicar que há a transformação de energia solar para elétrica de forma direta.

$$I_{cell} = I_{ph} - I_o \left[e^{\frac{q}{kT}(V_{load} + I_{cell}R_s)} - 1 \right] - \frac{V_{load} + I_{cell}R_s}{R_p} \quad (1)$$

Onde:

- I_{ph} Corrente fotogerada, em Ampères (A).
- I_D Corrente no semicondutor, em Ampères (A).
- V_D Tensão no semicondutor, em Volts (V).
- R_s Resistência série da célula, em Ohms (Ω).
- R_p Resistência paralela da célula, em Ohms (Ω).
- k Constante de Boltzmann ($1,38065 \cdot 10^{-23}$), em Joule por Kelvin (J/K)
- q Magnitude da carga do elétron ($1,60217 \cdot 10^{-19}$), em Coulomb (C)
- T Temperatura absoluta na célula, em Kelvin (K)
- I_{cell} Corrente de saída da célula, em Ampères (A).
- V_{Load} Tensão na carga, em Volts (V).

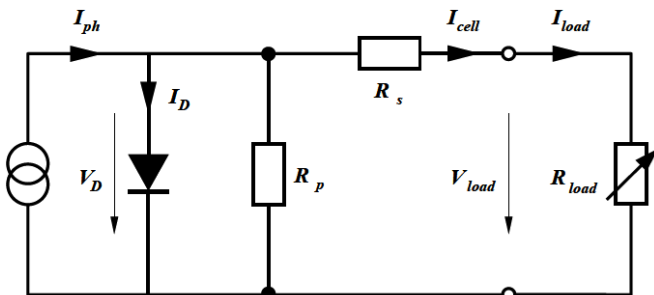


Fig. 2. Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica [1].

A célula fotovoltaica, então, tem a saída de corrente pela tensão mostrada pela Figura 3 [5] para diversas mudanças de carga. Nota-se que para um circuito aberto a tensão é máxima, enquanto para um curto-circuito a corrente é máxima.

A potência segue uma elevação à medida que a tensão aumenta e a corrente se mantém próxima de seu valor de curto-circuito. Com a queda da corrente, a tensão continua aumentando, a curva de potência encontra um ponto máximo de operação (*Maximum Power Point – MPP*) e decresce até o circuito aberto [1][5].

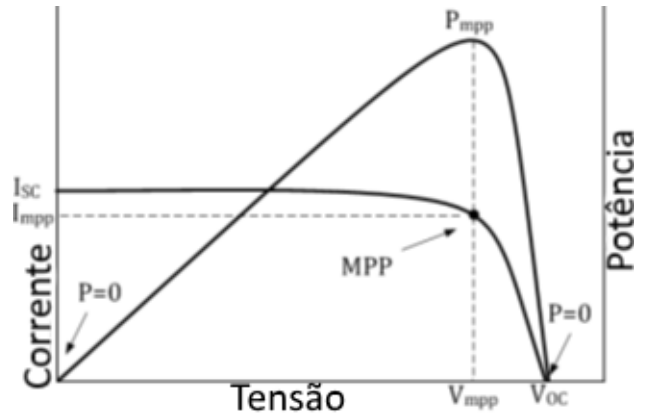


Fig.3. Curva corrente por tensão de um módulo fotovoltaico [5].

B. O efeito da irradiação na célula fotovoltaica

A corrente emitida por uma célula fotovoltaica é diretamente relacionada à irradiação solar em sua superfície. A corrente de curto-circuito é linearmente proporcional a esta irradiação. [1]

Já a tensão de circuito aberto se refere à tensão através do diodo interno da junção *p-n* quando a fotocorrente gerada passa por ele. A dependência da tensão de circuito aberto à irradiação corresponde à dependência que a tensão da junção *p-n* tem com a fotocorrente, de forma que quando a irradiação é baixa – sendo também a fotocorrente gerada – a tensão de circuito aberto é baixa. [1]

A Figura 4 ilustra como é o formato da curva de corrente por tensão em diversas irradiações.

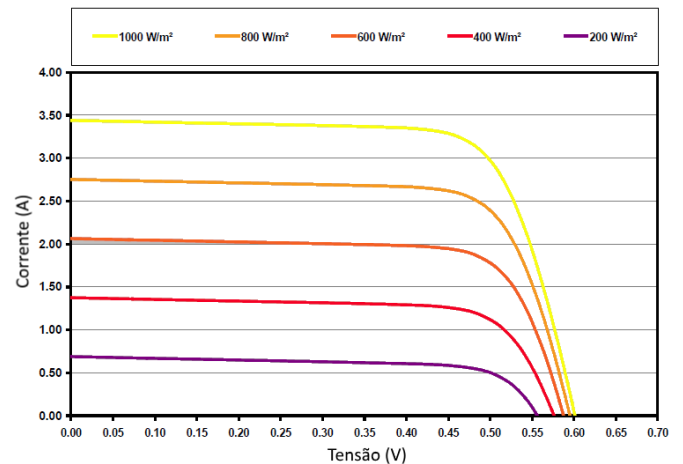


Fig. 4. Curva corrente por tensão de uma célula fotovoltaica com diferentes irradiações[1].

C. O efeito da temperatura na célula fotovoltaica

Em semicondutores a largura de banda de energia diminui com o aumento da temperatura. Em maiores temperaturas, mais fótons têm energia suficiente para criar pares $p-n$ na célula fotovoltaica. Como consequência da crescente difusão dos portadores minoritários, na corrente de curto-circuito, é observado um ligeiro aumento, porém o efeito é muito pequeno, sendo de apenas 0,07% de aumento por *Kelvin* [1].

A tensão de circuito aberto é fortemente dependente da temperatura, caindo 0,4% por *Kelvin* e a potência caindo de 0,4 a 0,5% por *Kelvin* [1].

A temperatura deve ser considerada em projeto, já que a instalação de módulos em locais exteriores pode levar a um aumento de 40 *Kelvin* acima da temperatura ambiente. A Figura 5 apresenta o efeito da temperatura em uma célula fotovoltaica.

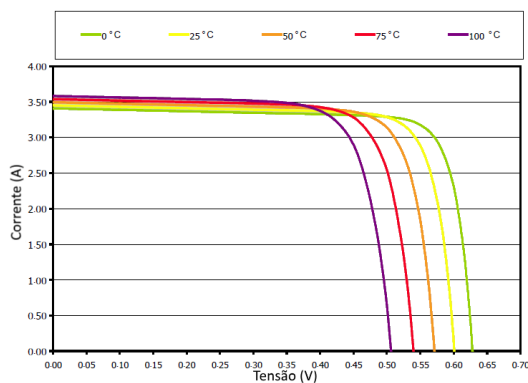


Fig.5. Curva de corrente por tensão de uma célula fotovoltaica com diferentes temperaturas[1].

III. DE CÉLULAS A ARRANJOS

Células fotovoltaicas quase nunca são utilizadas individualmente. Células de mesmas características são agrupadas para formar arranjos com potências variando de alguns watts até megawatts.

A. Associação paralela de células fotovoltaicas

Para sistemas que requerem correntes mais altas, são utilizadas células em paralelo. Com a tensão na célula individual sendo a mesma, a corrente é somada no ponto de conexão. A Figura 6 mostra a associação em paralelo de células fotovoltaicas.

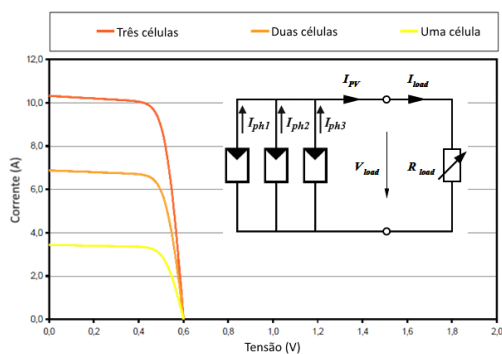


Fig. 6. Curva de corrente por tensão em célula fotovoltaica paralelas [1].

O desempenho do sistema quando há sombreamento parcial ou total de uma das células é assegurado, já que a célula sombreada não afetará as outras, visto que a tensão é a mesma e a corrente total é a soma das correntes individuais.

A desvantagem da associação em paralelo é que para uma corrente maior é necessário o uso de condutores mais grossos, além de a baixa tensão acarretar perdas maiores.

B. Associação série de célula fotovoltaica sem diodos de by-pass

A associação de célula fotovoltaica em série torna a corrente de todo o arranjo a mesma e as tensões individuais são somadas ponto a ponto. A Figura 7 apresenta a associação em série e o seu comportamento na curva de corrente por tensão.

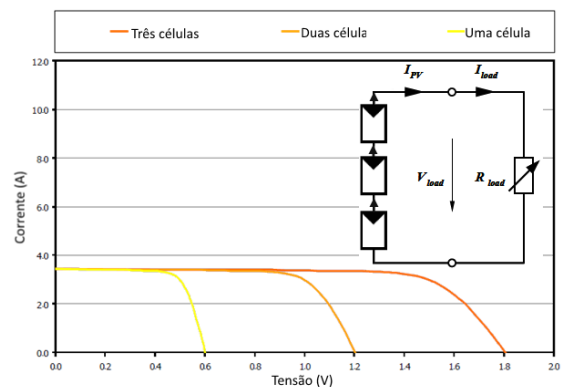


Fig. 7. Curva de corrente por tensão em células fotovoltaicas em série [1].

No caso de sombreamento total, o sistema fica comprometido, já que se uma das células deixa de funcionar, todo o sistema fica sem corrente.

A solução neste caso é a aplicação de diodos de *by-pass* (do inglês, evitar), desviando o caminho da corrente das células com defeito ou sombreadas

C. Associação série de células fotovoltaicas com diodos de by-pass

O diodo de *by-pass* em antiparalelo em cada célula permite o curso da corrente por todas as células, mesmo que apresentem sombreamento, como visto na Figura 8.

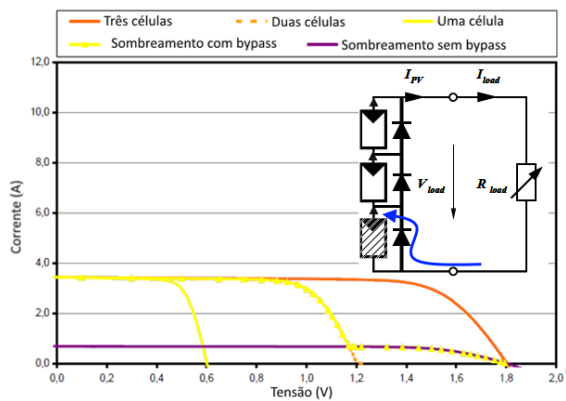


Fig. 8. Curva de corrente por tensão em células fotovoltaicas em série com diodo de *by-pass*[1].

IV. IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL

O sistema estudado pode ser visto na Figura 9, consistindo de um módulo fotovoltaico conectado a uma carga em rampa e com as entradas de temperatura e irradiação.

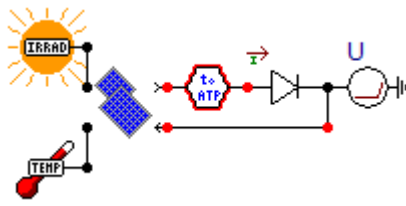


Fig. 9. Sistema estudado.

O modelo da célula fotovoltaica utilizado é o de Rauschembach [6] e a linguagem utilizada para sua concepção foi a MODELS, incluída no próprio ATP (*Alternative Transients Program*). A tomada de corrente acontece no diodo na saída do módulo e a tomada de tensão na fonte em rampa que está representada como carga, evitando tomadas ponto-a-ponto.

O módulo fotovoltaico que será submetido a testes é o módulo CSUN 270-60M da *China Sunergy*. Os dados elétricos do módulo estão contidos na tabela I.

Tabela I - Parâmetros do módulo fotovoltaico utilizado [7]

Modelo	CSUN (QSAR) 270-60M
Máxima potência (W)	270
Tolerância	3%
$V_{circuito\ aberto\ (oc)}$ (V)	38,3
$I_{curto-circuito\ (sc)}$ (A)	9,07
$V_{máxima\ potência\ (mpp)}$ (V)	31,2
$I_{máxima\ potência\ (mpp)}$ (A)	8,65
Eficiência	16,63%

V. SIMULAÇÃO E RESULTADOS

A. O efeito da irradiação no módulo

A simulação no programa ATP de diferentes irradiações para o módulo apresentado resulta na Figura 10, onde seu valor nominal é representado na curva de 1000 W/m².

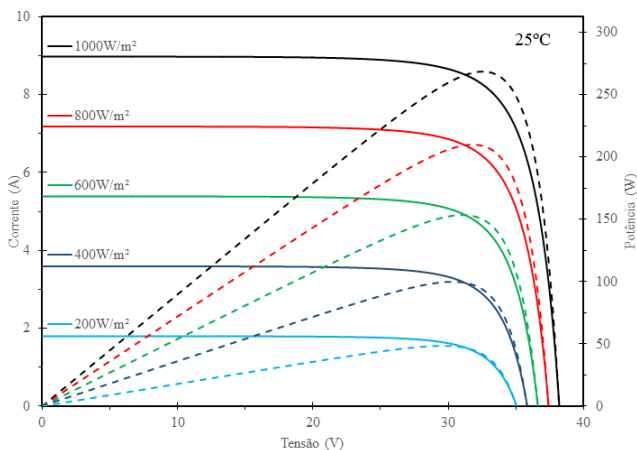


Fig.10. Corrente e potência por tensão para diferentes irradiações, pela simulação.

A Figura 11 serve de comparação com a realidade da simulação computacional e é provida do manual do fabricante do módulo. Nota-se a semelhança com o resultado da simulação computacional, sendo observada a linearidade da corrente de curto-circuito com a irradiação apresentada.

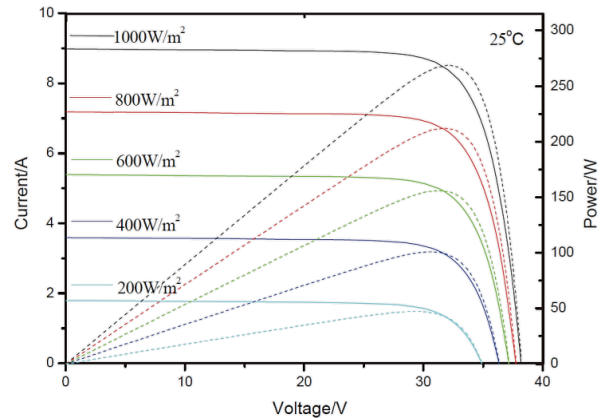


Fig. 11. Corrente e potência por tensão em diferentes níveis de irradiação, dado do fabricante. [7]

B. O efeito da temperatura no módulo

A simulação no programa ATP de diferentes temperaturas para o módulo resulta na Figura 12, onde seu valor nominal é representado na curva de 25 °C, ou 298,15 Kelvin.

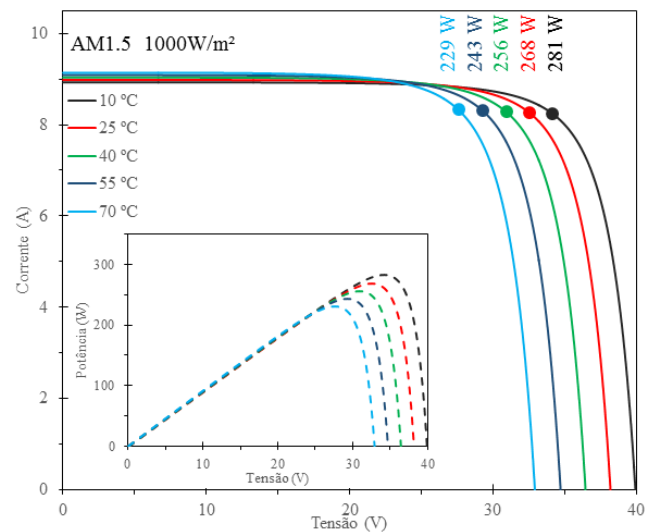


Fig. 12. Corrente e potência por tensão para diferentes temperaturas, pela simulação.

Da mesma forma que foi validado o modelo computacional para diferentes irradiações, a Figura 13 foi obtida do manual do fabricante, sendo comparadas as semelhanças com a Figura 12. Desta vez o fabricante disponibiliza pontos de máxima potência nas curvas, sendo possível uma análise mais concreta.

O comportamento do módulo simulado está correto, ainda que com pequenas diferenças nos joelhos das curvas. O maior desvio está na curva de 70 °C, onde são encontrados 8 watts a mais na simulação computacional, ou 3% de erro. Os efeitos na tensão de circuito aberto são percebidos corretamente.

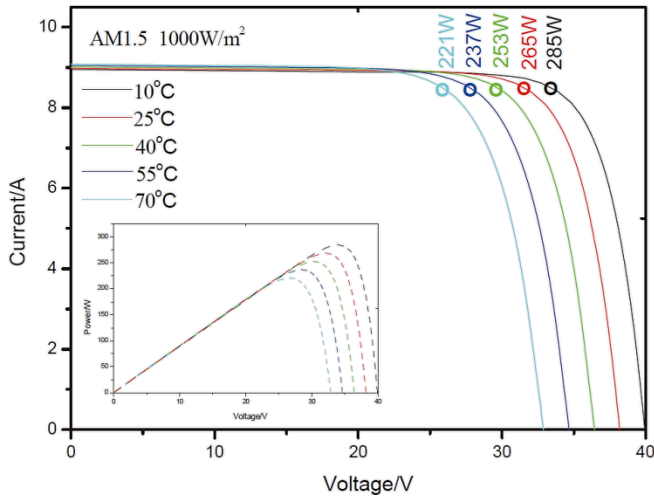


Fig. 13. Corrente e potência por tensão em diferentes níveis de temperatura, dado do fabricante. [7]

C. Associação em paralelo de módulos

Na associação paralela de módulos, como visto na Figura 12, a corrente de curto-circuito é aumentada proporcionalmente. O que acontece neste caso é a soma das correntes dos módulos, já que estão ligados nos mesmos pontos os terminais dos módulos. Neste caso a irradiação e a temperatura foram mantidas, já que o comportamento não seria diverso dos casos já apresentados.

Com o aumento de células em paralelo há apenas a soma das correntes, portanto a simulações desse tipo são semelhantes. A potência aumenta proporcionalmente com o aumento de módulos no mesmo arranjo paralelo. E caso um dos módulos estivesse com defeito, o sistema de n módulos funcionaria como se estivessem em paralelo $n-1$ módulos.

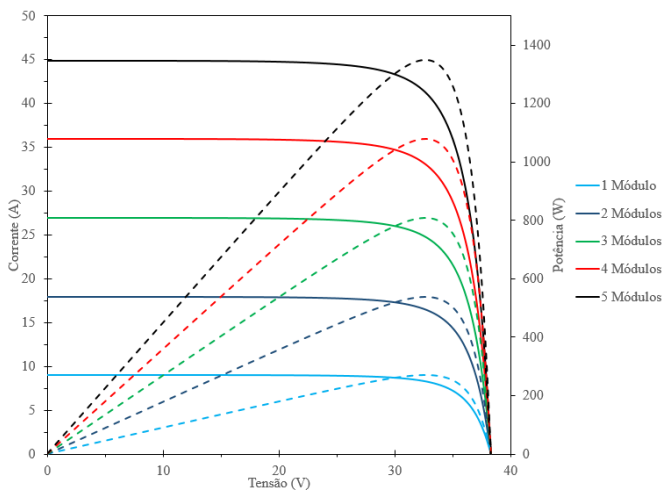


Fig. 12. Corrente e potência por tensão para associações em paralelo, pela simulação.

D. Associação em série de módulos

Na associação em série, como explanada na seção III deste artigo, existe o problema de a corrente ser interrompida, no caso de um sombreamento completo, ou limitada, quando o sombreamento for parcial.

A figura 13 mostra a simulação de cinco módulos em série.

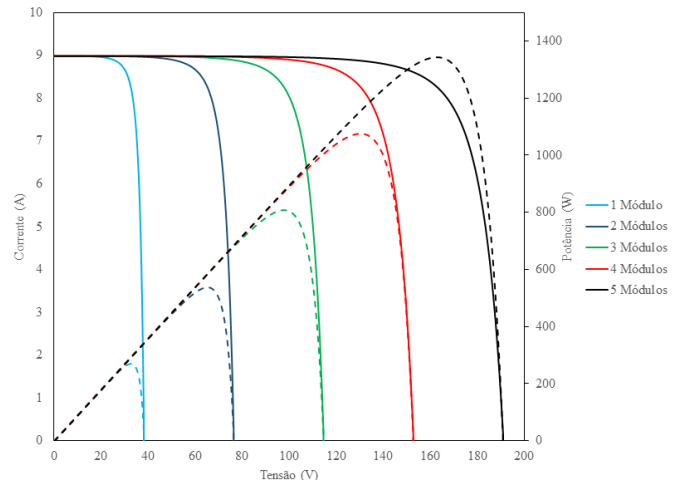


Fig. 13. Corrente e potência por tensão para associações em série, pela simulação.

Quando todos os módulos têm os mesmos níveis de irradiação e temperatura, o funcionamento ocorre como na figura anterior, mas a utilização dos módulos em ambientes externos faz com que esse desempenho não seja possível a todo instante de tempo.

Um sombreamento de um módulo acarreta o mesmo problema de limitação de corrente que é imposto à célula unitária. Como a utilização externa implica em variações na irradiação de cada módulo, deve-se ter em mente que podem ocorrer sombreamentos nos módulos, como na figura 14.



Fig. 14. Sombreamento parcial de um sistema de módulos.

A figura 15 mostra a utilização serial de três módulos sendo que um está com um sombreamento parcial de 80% (20% de aproveitamento de irradiação) e no sistema não há a utilização de diodos de *by-pass*.

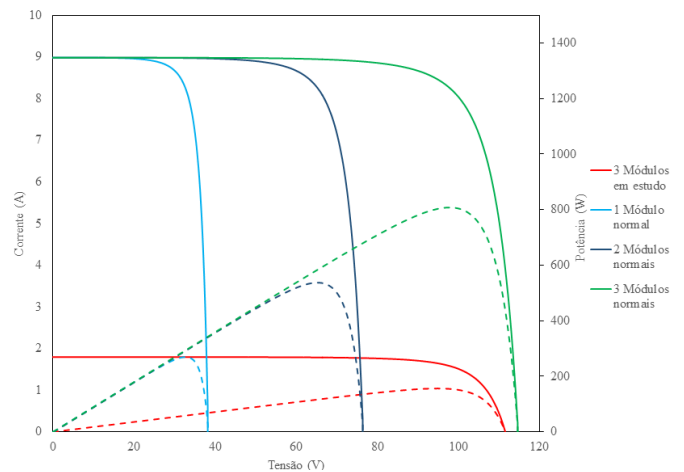


Fig. 15. Corrente e potência por tensão para associações em série sem diodo de *by-pass*, pela simulação.

Vê-se de imediato que a corrente do conjunto cai a 20%, mesmo que apenas uma célula esteja sombreada. Como nas células individuais, os módulos em série também têm a mesma propriedade com a corrente limitada à mais baixa da série.

Com a utilização de diodos de *by-pass* em cada conexão a capacidade de produção do circuito aumenta drasticamente, já que ainda acontece a soma das tensões e as correntes se mantêm altas até a utilização do último módulo.

A figura 16 exhibe os mesmos três módulos em série, mas agora com a utilização de diodos de *by-pass* em cada conexão, com o objetivo de aumentar a corrente de curto do sistema.

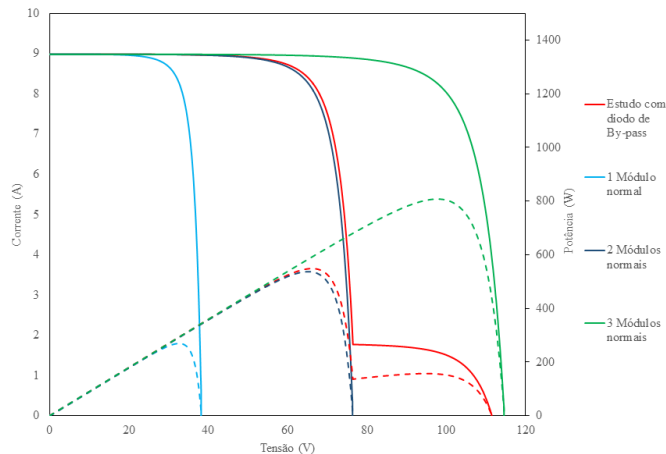


Fig. 16. Corrente e potência por tensão para associações em série com diodo de *by-pass*, pela simulação.

A utilização de diodos de *by-pass* consegue fazer com que a potência do sistema se mantenha alta até a necessidade de utilização do terceiro módulo. O sistema se comporta como com dois módulos e, ao decair, utiliza alguma potência restante disponível do terceiro para cargas que exigem tensões altas.

Vê-se a diferença entre os dois modelos, enquanto um, sem o diodo, desenvolvia uma potência máxima de 156 watts, a utilização do *by-pass* elevou a potência máxima para 547 watts. A corrente de curto-circuito, que estava em 1,79 ampères, agora fica em 8,98 ampères. Já a tensão continua a mesma para os dois modelos, confirmando o apresentado na seção III.

VI. CONCLUSÕES

O funcionamento da célula fotovoltaica foi descrito e a aplicação das propriedades em módulos comerciais foi estudada, podendo ser observados os comportamentos sob diversas condições externas e de associação.

O software ATP é suficiente para ensaios fotovoltaicos e se apresenta como uma ótima opção didática e profissional, gerando resultados próximos e confiáveis das situações apresentadas na literatura.

O grau de proximidade do modelo computacional com os dados do fabricante é grande, confirmando que o modelo proposto por Rauschembach é válido e muito próximo da realidade, podendo ser aplicado em projetos de implantação e estudos de caso.

Outra constatação é a necessidade de utilização de diodos de *by-pass* em antiparalelo com cada módulo, de forma a evitar a limitação de corrente no sistema e trazer melhor rendimento ao projeto.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte financeiro da CAPES e também o apoio fornecido pela Universidade Federal de Uberlândia.

REFERÊNCIAS

- [1] KININGER, Franz. Photovoltaic Systems Technology. Kassel: Universität Kassel, 2003. 151 p.
- [2] VILLALVA, Marcelo Gradella, GAZOLI, Jonas Rafael. **Energia Solar Fotovoltaica – Conceitos e Aplicações**. Editora Érica. 2015. ISBN: 978-85-365-0416-2.
- [3] ANEEL. Informações Gerais Banco de Informações de Geração (13/05/2015). Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em: Mai. 2015.
- [4] OS 10 países que mais usam energia solar no mundo. Exame.com, 2012. Disponível em: <<http://exame.abril.com.br/economia/noticias/os-10-paises-que-mais-usam-energia-solar-no-mundo>>. Acesso em: Mai. 2015.
- [5] BREZA, Paraskevi. Modelling and simulation of a PV generator for applications on distributed generation systems. 2013. 108f. Dissertação (mestre em ciências) – Faculty of Applied Sciences, Delft University of Technology, Holanda, 2013.
- [6] RAUSCHEMBACH, Hans S. **Solar Cell Array Design Handbook– The Principles and Techology of Photovoltaic Energy Conversion**. Van Nostrand Reinhold Company, 1980. ISBN: 978-94-011-7917-1. Pp. 30-241.
- [7] CSUN. **CSUN 260-60M-BB**. 2012. Manual do produto. Disponível em <<http://www.chinasunergy.com>>. Acesso em Mai. 2015.