

**GESEP – Gerência de Especialistas em Sistemas Elétricos de Potência**



**Título:**

COMPARAÇÃO ENTRE TOPOLOGIAS DE PAINEL SOLAR ARTIFICIAL PARA TESTE DE INVERSORES FOTOVOLTAICOS.

**Autores:**

Wesley Venancio Ribeiro, Heverton Augusto Pereira, Shirleny Pedrosa Freitas, Victor Flores Mendes, Allan Cupertino

**Publicado em:**

VII Congresso Brasileiro de Energia Solar

**Data da Publicação:**

2018

**Citação para a versão publicada:**

W. V. Ribeiro, H. A. Pereira, S. P. Freitas, V. F. Mendes, A. Cupertino, " Comparação entre topologias de painel solar artificial para teste de inversores fotovoltaicos," VII Congresso Brasileiro de Energia Solar (CBENS), Gramado, 2018, pp. 1-10.

# COMPARAÇÃO ENTRE TOPOLOGIAS DE PAINEL SOLAR ARTIFICIAL PARA TESTE DE INVERSORES FOTOVOLTAICOS

**Wesley Venancio Ribeiro** – wv.ribeiro92@gmail.com

**Heverton Augusto Pereira** – heverton.pereira@ufv.br

Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Elétrica

**Shirleny Pedrosa Freitas** – shirlenypfreitas@gmail.com

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas, Departamento de Engenharia Elétrica

**Allan Fagner Cupertino** – allan.cupertino@yahoo.com.br

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Departamento de Engenharia de Materiais

**Victor Flores Mendes** – victormendes@cpdee.ufmg.br

Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Elétrica

**Resumo.** Nos últimos anos, o esgotamento contínuo dos recursos energéticos convencionais e o custo instável dos combustíveis têm motivado pesquisas sobre fontes renováveis de geração de energia. A energia solar, sendo o principal entre todos os outros recursos de energia renovável, evoluiu como um substituto confiável para a geração de energia convencional. Um elemento fundamental para sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica é o conversor eletrônico, conhecido popularmente como inversor. Este componente tem como principal função injetar toda a potência gerada pelos painéis fotovoltaicos (PV) na rede elétrica. No entanto, para que possam ser comercializados, os conversores eletrônicos devem ser testados, certificados de acordo com as normas vigentes e receber o selo de conformidade do Inmetro. No processo de certificação é utilizado um equipamento conhecido como emulador de módulos fotovoltaicos (Solar Array Simulator – SAS). Ao contrário de outras fontes, a pesquisa em tempo real em sistemas PV é uma tarefa específica, uma vez que requer o uso desse painel solar artificial (emulador) que tem a função de replicar com precisão as características não-lineares de um arranjo fotovoltaico. Pesquisadores desenvolveram emuladores de diferentes tipos utilizando diversas configurações. Neste contexto, este artigo tem como objetivo principal apresentar diferentes topologias de painéis fotovoltaicos artificiais de modo a compará-las sob as mesmas condições de teste. Além disso, este trabalho fornece uma análise de cada emulador enfatizando a precisão, sensibilidade a diferentes condições ambientais e alcance da máxima potência. Este estudo foi realizado utilizando-se o software PLECS para realizar a simulação de um arranjo de 8 kW.

**Palavras-chave:** Sistemas Fotovoltaicos, Painel Solar Artificial, Emulador Fotovoltaico, Teste de Inversores Fotovoltaicos.

## 1. INTRODUÇÃO

A instalação de usinas de energia solar fotovoltaica (PV) aumentou consideravelmente em todo o mundo nas últimas décadas. A potência instalada e comissionada em sistemas fotovoltaicos foi de 76,6 GW em 2015, mostrando um crescimento de 50% em comparação aos 50,6 GW comissionados em 2016 (EPIA, 2016). A capacidade acumulada de energia solar instalada aumentou 29% ao ano ao mesmo tempo em que os preços dos sistemas fotovoltaicos diminuíram em cerca de 75% em menos de 10 anos (EPIA, 2016). No entanto, com o progresso das energias renováveis, incluindo as fontes fotovoltaicas, a preocupação com a qualidade da energia da rede elétrica também cresce, principalmente devido ao uso de conversores baseados em componentes eletrônicos.

O sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica é composto por um gerador solar e, geralmente, de um conversor eletrônico com modulação baseada na técnica PWM (do inglês Pulse-Width Modulation). Este dispositivo é responsável por conectar os painéis solar fotovoltaicos à rede. Este equipamento possui chaves eletrônicas para a conversão da energia elétrica gerada em corrente contínua (c.c.) para corrente alternada (c.a.), que é utilizada na rede elétrica (TEODORESCU, LISERRE e RODRIGUEZ, 2011). O conversor eletrônico também é responsável pelo gerenciamento da energia entregue à rede e, geralmente, pelo seguimento do ponto de máxima potência (estratégia de controle utilizada para maximizar a potência fornecida pelo gerador fotovoltaico em função das condições de operação).

Esses conversores eletrônicos, conhecidos como inversores PV, devem ser testados e certificados de acordo com os padrões de cada país antes de serem comercializados (Camino Villacorta et al, 2012). No Brasil, os inversores para sistemas fotovoltaicos devem ser certificados e receber o selo de conformidade do Inmetro, ou seja, estarem adequados as normas vigentes para seu funcionamento. A portaria n° 004, de 4 de janeiro de 2011, modificada pela Portaria n° 357, de 01 de agosto de 2014, regulamenta os testes de certificação.

As normas dos procedimentos para ensaios dos inversores c.c./c.a. para sistemas fotovoltaicos conectados à rede foram definidas com base nos requerimentos mínimos a serem exigidos destes equipamentos. Estes requerimentos e procedimentos estão indicados nas normas ABNT NBR 16149:2013, ABNT NBR 16150:2013 e ABNT NBR IEC 62116:2012. Os padrões atualmente utilizados baseiam-se nas normas do International Electrotechnical Commission

(IEC), onde é possível encontrar as diretrizes para a realização de testes de eficiência de inversores, assim como as definições dos instrumentos de medições, suas faixas de incerteza e precisão necessárias.

Atualmente, poucos laboratórios brasileiros têm autorização para fazer a calibração e/ou certificação de equipamentos utilizados em sistemas fotovoltaicos. A princípio, o teste de inversores envolve a operação destes conectados a painéis fotovoltaicos sob diversas condições de irradiância solar e temperatura. No entanto, esse procedimento é pouco prático pois depende das condições meteorológicas do local do teste. Desta forma, para o teste do conversor é necessária a utilização de um equipamento que emule as características de um arranjo de painéis fotovoltaicos de modo que as diferentes condições sejam apenas um comando escolhido pelo operador. Este procedimento de teste torna a certificação muito mais barata e flexível. Tal equipamento deve ser capaz de emular o comportamento do arranjo fotovoltaico para diversas condições climáticas (níveis de irradiância solar e temperatura), além de condições de sombreamento total ou parcial.

Diversos trabalhos na literatura propõem simuladores de painéis com topologias e estruturas de controle diversas. De fato, a maioria das propostas de simuladores encontradas na literatura baseia-se em um estágio de retificação (geralmente a diodos) seguido de um conversor c.c./c.c. Resultados apresentados por (Liu, et al., 2009) ilustram a utilização de retificadores PWM trifásicos como fonte de tensão, controlado em corrente. Isto permite uma maior precisão e flexibilidade do equipamento já que um controle em malha fechada é utilizado. Nesta situação para cada valor de tensão imposta nos terminais do simulador, a referência de corrente é recalculada em função da própria tensão e dos valores de irradiância e temperatura do ensaio. O cálculo da referência de corrente pode ser complexo devido ao comportamento não linear do painel solar.

Assim, diversas propostas de painéis solares artificiais são apresentadas na literatura, dentre as quais pode-se citar o método analógico (Ollila, 1995), o método das tabelas (Matsukawa, et al., 2003), o método analítico (Gonzales, 2010), o método híbrido (Bun, 2011) e métodos baseados em redes neurais artificiais (Piao, 2013), (Piazza, 2010).

Estruturas baseadas em retificadores a diodos em cascata com um conversor c.c./c.c. buck apresentam limitações em termo operacional e de flexibilidade. Tendo em vista este problema, Cupertino et al. 2015 propôs uma topologia de emulador de módulos fotovoltaicos baseada em um retificador PWM em cascata com um conversor c.c./c.c. buck bidirecional em corrente.

Neste trabalho são apresentadas as modelagens de três topologias de painéis solares artificiais. Essas topologias são ligadas a um inversor PV de 10 kW e são submetidas a testes com as mesmas condições de irradiância e temperatura. Um problema pouco relatado nas topologias de emuladores baseadas em conversores c.c./c.c. está relacionado com a corrente de saída do emulador. De fato, devido a variação da capacitância do inversor sob teste, pode existir um elevado *ripple* de corrente de saída que pode prejudicar o seguimento de máxima potência do painel artificial. Assim, os modelos de painel artificial propostos serão comparados a fim de encontrar o modelo que melhor atenua esses *ripples* além de seguir a referência dada por um modelo de painel real.

As contribuições deste trabalho são:

- Comparação de diferentes topologias de painéis solares artificiais;
- Análise de três topologias de emuladores de painéis fotovoltaicos ligadas a um inversor fotovoltaico;
- Avaliação dos emuladores baseados na precisão, sensibilidade à diferentes condições ambientais e resposta transitória.

## 2. TOPOLOGIA DOS PAINÉIS SOLARES ARTIFICIAIS (SAS)

Considerando a grande importância dos emuladores de arranjos fotovoltaicos, vários autores propuseram diferentes topologias de painéis solares artificiais para imitar da melhor forma possível o comportamento de um arranjo PV real. A Fig. 1 mostra o sistema fotovoltaico ligado à rede. As grandezas fornecidas pelo painel são a corrente ( $i_{pv}$ ) e a tensão ( $v_{pv}$ ). Nas próximas subseções desse tópico são apresentadas três modelos de painéis. O primeiro é um modelo matemático que servirá como referência para os outros dois usados para comparação neste artigo.

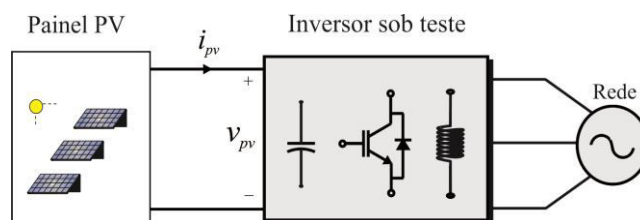
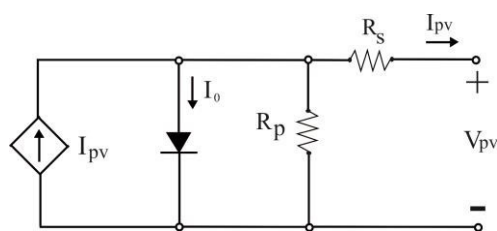


Figura 1 – Sistema fotovoltaico.

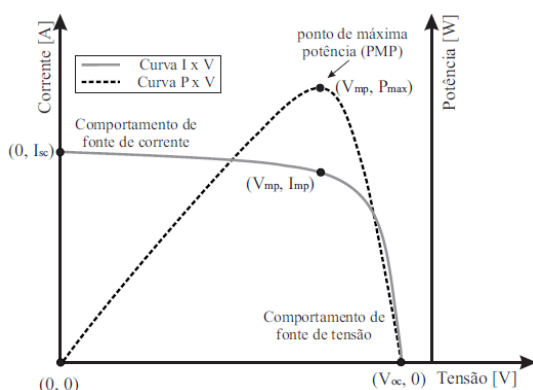
### 2.1 Modelo do Painel Solar

Um dos possíveis circuitos elétricos equivalentes de um módulo fotovoltaico é apresentado na Fig. 2 (a). O painel solar pode ser modelado por uma fonte de corrente em paralelo com um diodo (RAUSCHENBACH, 1980). Normalmente são acrescentadas duas resistências:  $R_s$ , que representa a resistência elétrica entre os contatos elétricos da

célula e  $R_p$ , que modela a corrente de fuga do Diodo (PRIYAKA, LAN, & SINGH, 2007), (LASNIER & ANG, 1990). O comportamento elétrico é apresentado na Fig. 2 (b), onde o ponto de circuito aberto do módulo é determinado por  $(V_{oc}, 0)$ , o ponto de curto circuito é  $(0, I_{sc})$  e o ponto de máxima potência é  $(V_{mp}, I_{mp})$ .



(a)



(b)

Figura 1 - Circuito elétrico equivalente de um módulo fotovoltaico (a) e seu comportamento elétrico (b).

A Tabela 1 apresenta os principais parâmetros fornecidos pelos fabricantes de módulos fotovoltaicos em suas folhas de dados. Os valores das resistências em série e paralelo e a constante de idealidade do diodo devem ser ajustadas com base em alguma metodologia. Este trabalho utiliza o algoritmo proposto por Villalva, Gazoli & Filho 2009 para ajustar os valores das resistências  $R_s$  e  $R_p$ . A Tab. 2 apresenta os dados do painel utilizado e a Tab. 3 apresenta os parâmetros ajustados para o modelo.

Tabela 1 – Parâmetros fornecidos nas folhas de dados dos fabricantes.

<i>Parâmetros</i>	<i>Unidade</i>	<i>Símbolo</i>
Tensão de circuito aberto*	V	$V_{ocn}$
Corrente de curto circuito*	A	$I_{scn}$
Tensão de máxima potência*	V	$V_{mp}$
Corrente de máxima potência*	A	$I_{mp}$
Potência Máxima*	W	$P_{max}$
Coeficiente da corrente de curto circuito*	A/K	$K_i$
Coeficiente da tensão de circuito aberto*	V/K	$K_v$

Tabela 2 - Parâmetros fornecidos na folha de dados do painel.

<i>Parâmetros*</i>	<i>Unidade</i>	<i>Valor</i>
$V_{ocn}$	V	37,5
$I_{scn}$	A	8,5
$V_{mp}$	V	31,29
$I_{mp}$	A	7,99
$P_{max}$	W	250
$K_i$	A/K	0,0043
$K_v$	V/K	-0,313

\*(Condições padrão:  $G_n = 1000$ ,  $T_n = 25^\circ\text{C}$ )

Tabela 3 - Parâmetros ajustados a partir do algoritmo proposto por (Villalva, Gazoli, & Filho, 2009).

Parâmetros*	Unidade	Valor
$R_s$	$\Omega$	0,1739
$R_p$	$\Omega$	379,0233
$m$	-	1

\*(Condições padrão:  $G_n = 1000$ ,  $T_n = 25^\circ\text{C}$ )

A equação da curva característica  $i$  x  $v$  é:

$$i_{pv} = I_{pv} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{v_{pv} + R_s i_{pv}}{v_t a}\right) - 1 \right] - \frac{v_{pv} + R_s i_{pv}}{R_p}, \quad (1)$$

onde  $I_{pv}$  e  $I_0$  são as correntes fotovoltaicas e de saturação da matriz,  $V_t = N_{skT}/q$  é a tensão térmica com o número de células  $N_s$  conectadas em série,  $k$  é a constante de Boltzmann,  $q$  é a carga de elétrons e  $T$  é a temperatura das células fotovoltaicas.  $R_s$  é a resistência de série equivalente,  $R_p$  é a resistência de derivação equivalente e  $a$  é a constante do diodo.

## 2.2 Painel artificial baseado no circuito de Thevenin

Esta é a topologia de painel artificial mais simples baseada na associação de resistências em série com uma fonte de tensão c.c. ajustável. Na Fig. 3 está ilustrada a curva característica não linear  $i$  x  $v$  com a característica linear do painel artificial com base no circuito de Thévenin.

O circuito da Fig. 4 é válido no ponto de linearização ( $V$ ,  $I$ ) e é uma boa aproximação da matriz PV para análise de sinais nas proximidades deste ponto. A Tab. 4 mostra alguns valores de fonte de tensão e resistência para diferentes valores de temperatura e irradiância. Então, tem-se:

$$V_{eq} = 2V_{MPPT}, \quad (2)$$

$$R_{eq} = \frac{V_{MPPT}}{I_{MPPT}}, \quad (3)$$

onde  $V_{MPPT}$  e  $I_{MPPT}$  são a tensão e a corrente impostas pelo conversor. Assim, com os dados do conversor em mãos é possível encontrar a resistência e tensão equivalente para a montagem desse modelo.

Tabela 4 – Valores de fonte de tensão e resistência para diferentes valores de temperatura e irradiância.

Temp (°C)	Irrad (W/m <sup>2</sup> )	$V_{mppt}$ (V)	$I_{mppt}$ (A)	$R_{painel}$ ( $\Omega$ )	$V_{fonte}$ (V)	$P_{mppt}$ (W)
25	200	949,93	1,54	616,40	1899,86	1463,94
	600	991,06	4,77	207,92	1982,12	4723,89
	1000	1000,71	8,00	125,12	2001,42	8003,68
45	1000	805,69	7,94	101,47	1611,38	6397,18

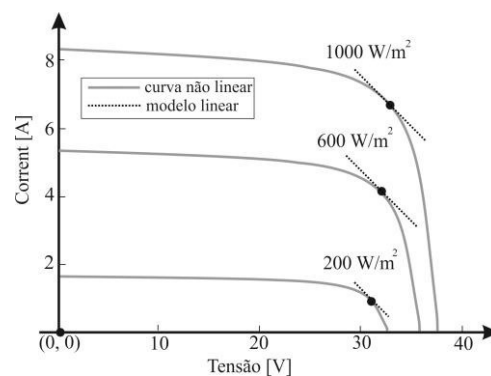


Figura 3 - Curva característica não linear  $i$  x  $v$ .

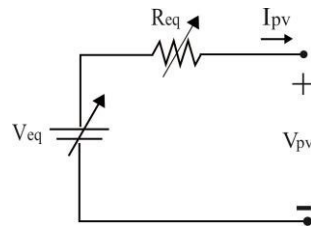


Figura 4 - Modelo do painel artificial baseado no circuito de Thevenin.

### 2.3 Painel artificial baseado no conversor buck

Este modelo proposto por Cupertino et al. 2015 é baseado no conversor c.c./c.c. buck. Neste artigo a parte retificadora PWM foi simplificada por uma fonte c.c. O controle do estágio c.c./c.c. apresenta dois modos:

- O primeiro é o modo de controle de circuito aberto. É responsável por controlar a tensão de saída do simulador quando este está a vazio. Nesta situação, a tensão de referência é a tensão de circuito aberto do gerador PV a ser emulado;
- O segundo é o modo de controle do simulador de painel solar. Com base na tensão imposta pelo conversor sob teste, a referência de corrente passa a ser calculada a partir da curva  $I \times V$  do arranjo a ser simulado.

A estratégia do estágio c.c./c.c. de controle é mostrado na Fig. 5. Neste diagrama de blocos é possível ver os dois modos de operação. O modo de controle de circuito aberto baseia-se num controlador proporcional-integral (PI). O modo de controle do simulador de painel solar é baseado em uma *look-up table* da curva  $I \times V$ . Este método consiste nas seguintes etapas: para dados valores de irradiância solar  $G$  e temperatura  $T_c$ , uma tabela com valores da curva  $I \times V$  é escolhido. É realizada uma interpolação linear com o valor medido de tensão e os valores da tabela. Este processo resulta no valor de referência de corrente do indutor (Matsukawa, et al., 2003).

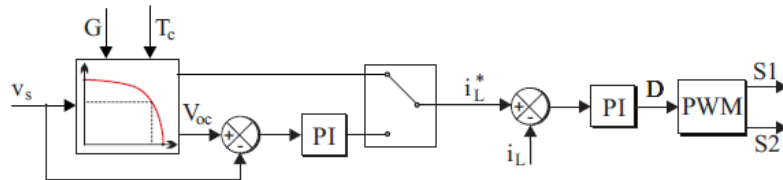


Figura 5 - Estrutura de controle do conversor simulador.

Na modelagem do conversor c.c./c.c., foram considerados que as chaves do conversor operam em complementaridade e que temos uma fonte contínua na entrada. Assumindo estas simplificações, o circuito equivalente do estágio c.c./c.c. é apresentado na Fig. 6. O controlador de corrente é utilizado em ambos os modos de controle do simulador fotovoltaico usando o controlador PI. Um controlador PI também é utilizado no circuito de regulação de voltagem e ajustado pelo método de alocação de polos. O ajuste dos controladores é realizado de acordo com a metodologia proposta por Cupertino et al. 2015. A implementação digital do controle usa um tempo de amostra igual à frequência de comutação.

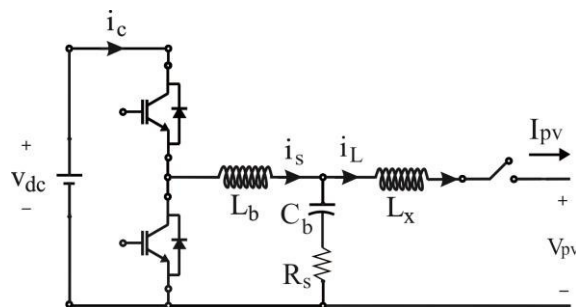


Figura 6 – Modelo do Painel artificial baseado no conversor buck.

## 3. METODOLOGIA

Para testar os modelos apresentados, as simulações foram realizadas em ambiente MATLAB/Simulink R2015 e Plecs, foi utilizado o painel solar da marca Komaes de 250 Wp, sendo assim simulado um arranjo de 1 *string* de 32 painéis. Tal arranjo resulta em uma tensão de circuito aberto de 1200 V e uma corrente de curto circuito de 8,5 A. Os

dados das curvas desse arranjo foram inseridos em uma *look-up table* que é utilizada no controle de corrente do emulador.

No primeiro teste foi utilizado um perfil de variação de irradiância. Inicialmente a irradiância começou em 1000 W/m<sup>2</sup> até 2 s, caindo para 600 W/m<sup>2</sup> e por fim em 5 s para 200 W/m<sup>2</sup>, mantendo a temperatura constante em 25°C. Em um segundo momento submeteu-se as topologias a uma variação de temperatura, inicialmente com 25°C, até 2 s, depois passando para 45°C, com irradiância constante de 1000 W/m<sup>2</sup>.

Para o teste em simulação, foi considerado um inversor fotovoltaico sob teste de 10 kW. A Fig. 7 (a) e (b) apresenta o inversor e sua estrutura de controle descrita por PEREIRA 2015. Para garantir que o sistema fotovoltaico estará fornecendo a máxima potência para cada nível de irradiância e temperatura, a tensão de referência da malha externa de controle é obtida através de um algoritmo para detecção do ponto de máxima potência (MPPT). O algoritmo utilizado trata de uma otimização do método perturba e observa, conhecido por dP-P&O MPPT, que garante uma boa relação entre velocidade de resposta e precisão durante a detecção sob rápidas mudanças no nível de irradiância solar (Sera, Teodorescu, Hantschel, & Knoll, 2008). O MPPT fornece a referência ( $V_{pv}^*$ ) para o controle da malha externa. Mais detalhes da modelagem desse inversor podem ser encontrados em PEREIRA 2015.

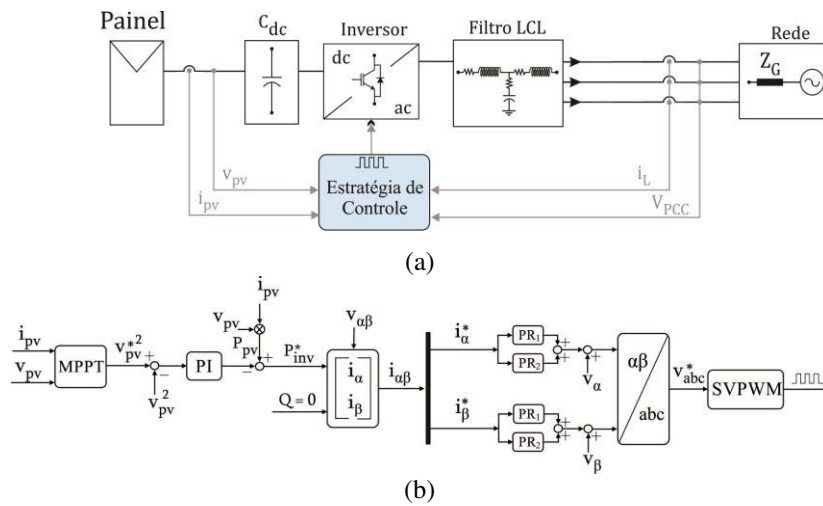
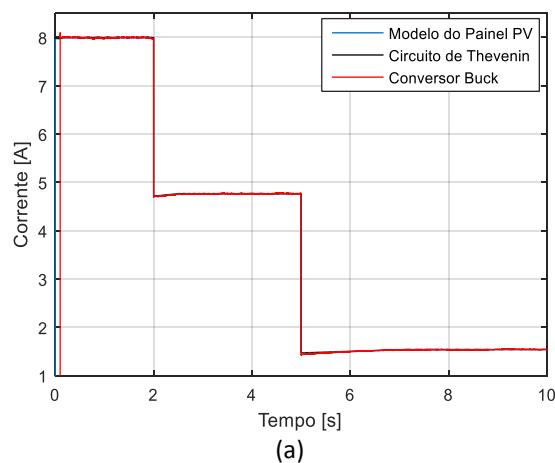


Figura 7 – (a) Sistema fotovoltaico conectado à rede trifásica; (b) estratégia de controle.

#### 4. RESULTADOS

Esta sessão apresenta os resultados da simulação computacional do modelo matemático do painel PV e das duas topologias de painel artificial estudadas, operando nas condições climáticas descritas anteriormente.

Na Fig. 8 (a), pode-se perceber o desempenho da tensão dos três modelos de painéis submetidos a variação de irradiância (1000/600/200 W/m<sup>2</sup>). Nota-se que o comportamento não muda, porém na Fig. 8 (b) observa-se que a topologia de conversor Buck apresenta um pouco mais de oscilações, ou seja, neste caso a dinâmica do MPPT do inversor em teste é mais afetada, proporcionando uma topologia com *ripples* na corrente de saída maior que as demais. Como a potência é dada por corrente multiplicada pela tensão, os *ripples* da corrente pouco refletem na Fig 8 (c). Assim temos um desempenho muito semelhante para as três topologias em questão de potência entregue.



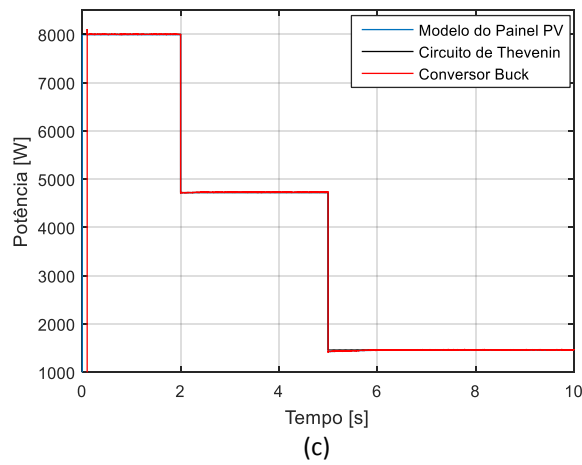
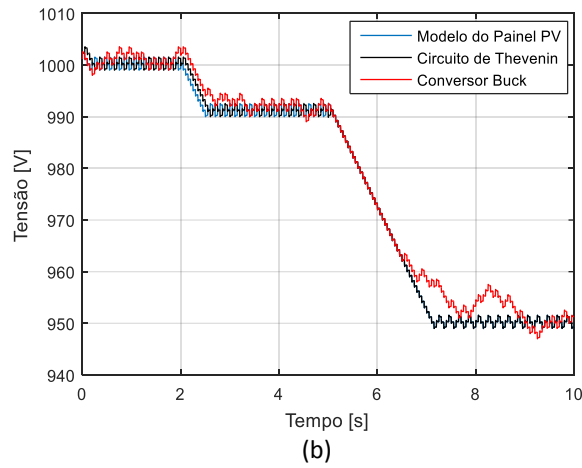
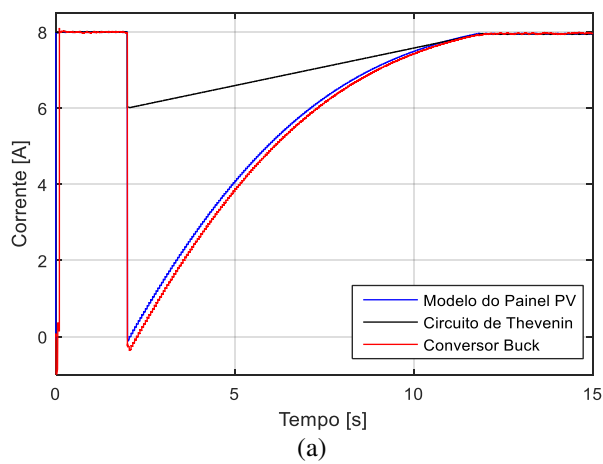


Figura 8 - Variáveis elétricas dos Painel Artificial durante uma variação de irradiância e temperatura constante (25°C). (a) Corrente de saída do SAS. (b) Tensão de saída SAS. (c) Potência de saída SAS.

A Fig. 9 mostra a performance dos modelos quando submetidos a variação de temperatura. As Fig. 9 (a), (b) e (c) representam a tensão, corrente e potência, respectivamente. Devido ao modelo linearizado do painel baseado no circuito de Thévenin, a tensão de saída reflete esse modelo linear. Sua saída não segue com precisão o modelo de um painel fotovoltaico, e assim mostra uma menor sensibilidade a mudança de temperatura que o painel baseado no conversor buck. No entanto, o tempo para estabilização é o mesmo para os três modelos.





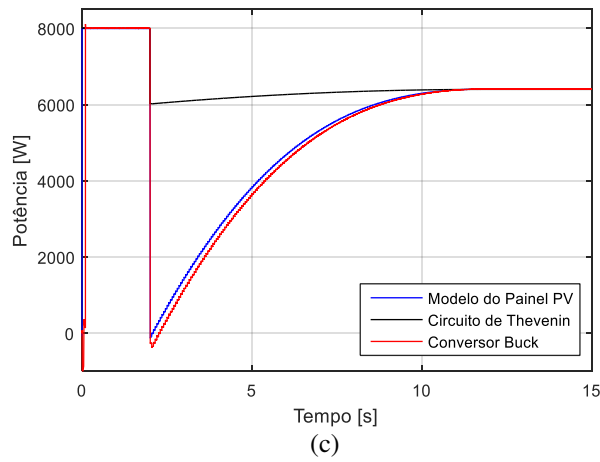
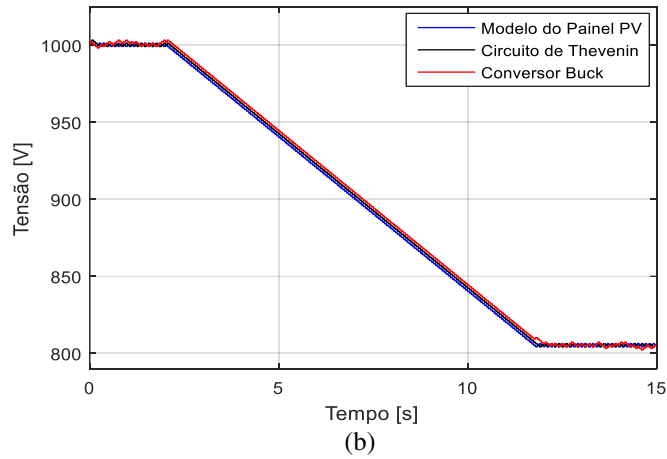
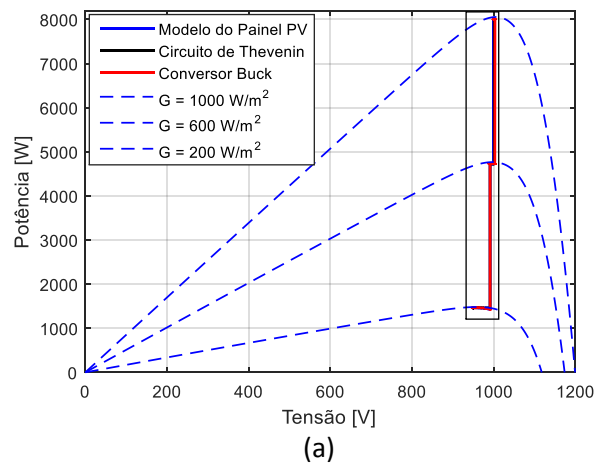


Figura 9 - Variáveis elétricas dos painéis artificiais, durante uma variação de temperatura e irradiância constante ( $1000 \text{ W/m}^2$ ). (a) Corrente de saída. (b) Tensão de saída. (c) Potência de saída.

A Fig. 10 mostra a dinâmica para os três tipos de painéis artificiais no plano  $P \times V$ . Observa-se que em termos de desempenho os três são muito semelhantes, os modelos se diferenciam um pouco na transição do primeiro estágio, quando a irradiância é igual a  $1000 \text{ W/m}^2$  para o segundo, quando a irradiância é  $600 \text{ W/m}^2$ . Porém, todos apresentam uma boa aproximação ao ponto de potência máxima.



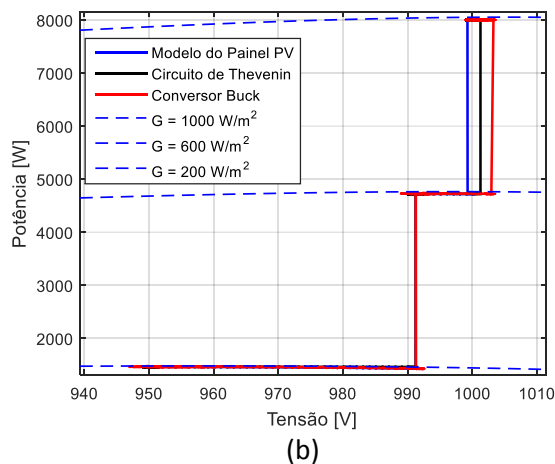


Figura 10 - (a) Trajetórias dos SAS durante o teste de um conversor fotovoltaico no plano P x V. (b) Detalhe do rastreamento do ponto de potência máxima.

Essa última análise mostra a resposta transitória dos três modelos propostos uma vez que eles são capazes de alcançar o ponto de máxima potência.

## 5. CONCLUSÃO

Neste trabalho foram apresentados três modelos de arranjos fotovoltaicos, sendo o primeiro o modelo a ser seguido e os outros dois modelos de painéis artificiais. O trabalho buscou contribuir mostrando duas topologias alternativa que solucionassem o problema dos *ripples* e que apresentasse maior sensibilidade a mudanças meteorológicas. Os modelos foram apresentados, assim como os resultados das simulações.

Observou-se que a topologia baseada no conversor buck apresenta mais *ripples* do que a baseada no circuito de Thévenin. Por outro lado, o painel fotovoltaico baseado no circuito de Thévenin não seguiu perfeitamente o modelo de painel PV na variação de temperatura, mostrando menos sensibilidade a efeitos de temperatura. Ambos os modelos apresentaram vantagens operacionais sendo capaz de emular as características do arranjo fotovoltaico. As trajetórias obtidas no plano P x V mostraram também a capacidade do inversor de rastrear o ponto de máxima potência do emulador.

Outro ponto positivo para o circuito de Thévenin é a topologia simples se comparada ao modelo baseado no conversor buck. Entretanto, esse modelo pode possuir uma baixa eficiência na prática devido a presença do resistor na saída do painel artificial. Trabalhos futuros em cima desse tema poderão incluir uma análise de custo, perdas e vida útil.

### Agradecimentos

Este trabalho está sendo desenvolvido com auxílio financeiro das agências de fomento FAPEMIG, CAPES e CNPQ.

## REFERÊNCIAS

- Bun, L., Raison, B., Rostaing, G., Bacha, S., Rumeau, A. e Labonne, A. (2011). Development of a real time photovoltaic simulator in normal and abnormal operations, IECON 2011 - 37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, pp. 867–872.
- Camino-Villacorta, M., Egido-Aguilera, M. A., e Díaz, P. (2012). Test procedures for maximum power point tracking charge controllers characterization. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 20(3), 310–320.
- CUPERTINO, ALLAN FAGNER, PEREIRA, Heverton Augusto, MENDES, Victor Flores (2017). Modeling, Design and Control of a Solar Array Simulator Based on Two-Stage Converters. *JOURNAL OF CONTROL, AUTOMATION AND ELECTRICAL SYSTEMS*, v. 28, p. 585-596.
- EPIA 2016. “Global Market Outlook for Solar Power / 2016 - 2020,” p. 40, 2016.
- Gonzales S. (2010). Pv array simulator development and validation. - Photovoltaic Specialists Conference (PVSC).
- Liu H, He M. e You X. (2009). Investigation of photovoltaic array simulators based on different kinds of PWM rectifiers, International Conference on Communications Circuits and Systems, p.737-741.
- Matsukawa H [et al.] (2003), Dynamic evaluation of maximum power point tracking operation with PV array simulator, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, vols. 75, pp. 537-546.
- Ollila J. (1995). A medium power PV-array simulator with a robust control strategy. Conference on Control Applications. p. 40-45.

- Pereira, H. A., Domingos, R. M., Xavier, L. S., Cupertino, A. F., Mendes, V. F. e Paulino, J. O. S. (2015). Adaptive saturation for a multifunctional three-phase photovoltaic inverter, European Conference on Power Electronics and Applications, pp. 1-10.
- Piao Z. G. (2013). A study on the pv simulator using equivalent circuit model and look-up table hybrid method, International Conference on Electrical Machines and Systems p. 2128-2131.
- Piazza M. D. (2010). Analytical versus neural real-time simulation of a photovoltaic generator based on a dc-dc converter, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 46, n.6, p. 2501-2510.
- PVPS, I. (2002). International Guideline for the Certification of Photovoltaic System Components and Grid-Connected systems, 1 ed. IEA.
- Sera, D., Teodorescu, R., Hantschel, J., e Knoll, M. (2008). Optimized maximum power point tracker for fast changing environmental conditions. IEEE Transactions on Industrial Eletronics, pp. 2629 - 2637.
- Teodorescu, R., Liserre, M., e Rodriguez, P. (2011). Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems. Chichester, U.K.: John Wiley-IEEE.
- Villalva, M. G., Gazoli, J. R. e Ruppert Filho, E. (2009). Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays, Transactions on Power Electronics. Power Electronics, IEEE Transactions, v.24, n. 5, p. 1198-1208.

## COMPARISON BETWEEN SOLAR ARRAY SIMULATOR TOPOLOGIES FOR TESTING PHOTOVOLTAIC INVERTERS

**Abstract.** *In recent years, continuous depletion of conventional energy resources and the unstable fuel price have motivated research into alternative sources for power generation. Solar power is the primary among all other renewable energy resources, and it has evolved as a reliable substitute for conventional power generation. A key element in the control of photovoltaic systems connected to the grid is the photovoltaic converter popularly known as inverter. This component has as main function to inject all the power generated by the photovoltaic panels (PV) on grid. However, in order to be marketed, the PV inverter must be tested, certified according to current standards and receive the Inmetro seal of compliance. In the certification process, an equipment known as Solar Array Simulator (SAS) is used. Real-time research in PV systems is a hard task since it requires the use of this SAS that has the function of accurately replicating the non-linear characteristics of a photovoltaic cell. Researchers have developed simulators of different types using various configurations. In this context, this paper has as main objective to present different topologies of SAS in order to compare them under the same test conditions. In addition, this work provides an analysis of each technique emphasizing accuracy, sensitivity to different environmental conditions and efficiency.*

**Key words:** *Solar Array Simulator, Photovoltaic Inverters Test, Solar Energy.*