

AVALIAÇÃO DE MODELO SIMPLIFICADO DE PAINEL SOLAR COMO REFERÊNCIA PARA FONTE EMULADORA

NETALIANNE M. F. HERINGER, STEFANIE R. SCHWAB, DOMINGOS S. L. SIMONETTI

LEPAC - Laboratório de Eletrônica de Potência e Acionamento Elétrico

Departamento de Engenharia Elétrica

Universidade Federal do Espírito Santo -Ufes

Av. Fernando Ferrari, 514 – CEP 29075-910 – Vitória - Brasil

*E-mails: netalianne@gmail.com, stefanierecla@gmail.com,
domingos.simonetti@ufes.br*

Abstract— The increasing use of new energies such as photovoltaics has made important the studies and researches on the subject. However, photovoltaic panels have considerable dependence on climatic conditions, which sometimes introduce delays for testing topologies and MPPT techniques in the laboratory. In this situation, the development doesn't suffer delays when it's possible to emulate a panel behaviour using a power supply. This paper studies the validity of using a simplified mathematical model as a reference to a photovoltaic module emulator equipment. The equipment reproduces the behaviour of a solar panel for different weather conditions using a DC-DC Buck converter. From the model, based on the response of a generic first order system, a reference current representing the panel is obtained, that act in the converter switching control. The emulator is subjected to different amounts of radiation and temperature and the percentage deviations are raised in relation to the data sheet to evaluate their performance and the system behaviour, validating the proposed development. The emulator simulated has achieved the goal expected, once the percentage deviations showed are under the used tolerance range described for the data sheet.

Keywords— Emulator, photovoltaic panel, buck converter, solar energy, model.

Resumo— A grande utilização de novas energias como a energia fotovoltaica tem tornado crescente os estudos e pesquisas sobre o assunto. No entanto, painéis fotovoltaicos apresentam grande dependência de situações climáticas que por vezes produzem atrasos ao tentar validar topologias e técnicas MPPT em laboratório. Nesta situação, o desenvolvimento não sofre atrasos quando se consegue imitar com uma fonte de potência o comportamento do painel. Este trabalho estuda a validade de usar um modelo matemático simplificado como referência para um equipamento emulador de módulo fotovoltaico. O equipamento reproduz o comportamento de um painel solar para diferentes condições climáticas utilizando um conversor CC-CC Buck. Do modelo, baseado na resposta de um sistema genérico de primeira ordem, obtém-se uma corrente de referência representativa do painel, que atua no controle do chaveamento do conversor. O emulador é submetido a diferentes valores de radiação e temperatura e são levantados os desvios percentuais em relação aos dados obtidos de catálogo para avaliar seu desempenho e o comportamento do sistema, validando o desenvolvimento proposto. O emulador simulado conseguiu alcançar o objetivo esperado uma vez que todos os desvios percentuais mostrados se encontraram abaixo da faixa de tolerância descrita pelo fabricante do painel utilizado.

Palavras-chave— Emulador, painel fotovoltaico, conversor Buck, energia solar, modelo.

1 Introdução

O estudo de novas formas de geração de energia tem ganhado importância no meio acadêmico, visto a preocupação crescente da sociedade com o meio ambiente e a escassez de recursos não renováveis utilizados nas matrizes energéticas convencionais em diversos países do mundo.

Dentre as fontes alternativas de fontes de energia estudadas encontra-se a energia solar fotovoltaica que é no aspecto operacional menos poluente, não emite ruídos, de baixa manutenção e baixo impacto ambiental (de Souza, 2013). A forma de aproveitar este tipo de energia é por meio de módulos fotovoltaicos (PV-photovoltaic).

Os módulos PV's no entanto apresentam certas particularidades quanto ao seu funcionamento. A potência disponível gerada pelo arranjo depende estritamente da temperatura e da radiação incidente sobre o módulo, caracterizando seu funcionamento de forma não linear, o que torna necessário estudos de implementação de métodos de rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT).

É possível verificar que a aplicação dos módulos fotovoltaicos em acionamentos com conversores estáticos e outras fontes, a exigência de técnicas de aproveitamento máximo da potência fornecida, indicam a necessidade de testes exaustivos a serem realizados para um conjunto de módulos fotovoltaicos. Considerando ainda a dependência das condições climáticas, justifica-se a necessidade de uma ferramenta que possibilite flexibilidade e agilidade no desenvolvimento de projetos e testes envolvendo arranjos PV's.

Este trabalho tem como objetivo a simulação computacional de um equipamento que emule as características de um módulo fotovoltaico utilizando um conversor CC-CC Buck controlado a fim de obter a tensão e corrente característica de um módulo a partir das variáveis de entrada radiação e temperatura.

2 O emulador eletrônico de módulos fotovoltaicos

2.1 Descrição do emulador

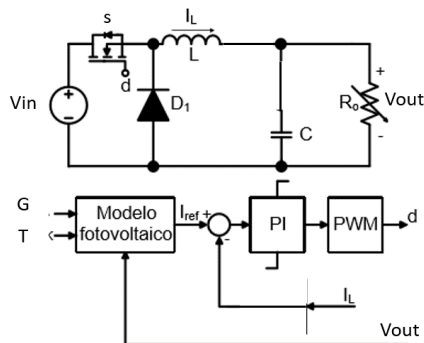


Figura 1 Esquema do emulador eletrônico de arranjos PV's.

A Figura 1 apresenta o esquemático do emulador simulado no trabalho por meio do software MATLAB®. O emulador é composto por um conversor CC-CC *buck*, controlado de forma a obter a relação de tensão e corrente desejada. O sinal de referência do controle vem de um modelo matemático que tem o objetivo de imitar as características do painel.

Com a informação da temperatura T e irradiância G a que o painel está submetido, e da tensão produzida na saída do conversor *buck*, o modelo calcula a corrente que o painel injeta na saída na condição apresentada. Tal valor de corrente é aplicado como referência para o laço de controle de corrente do *buck*.

O painel emulado para verificação é o Kyocera KC50T, que apresenta as características mostradas na Tabela 1.

Tabela 1. Características do Painel KC50T- Kyocera.

Parâmetro	Condição de Teste Padrão (Irradiância de 1000 W/m ² e Temperatura de 25°C)	Condição de Operação Nominal (Irradiância de 800 W/m ² e Temperatura de 47°C)
Máxima Potência - Pmax (W)	54	38
Tensão de MPPT (V)	17,4	15,3
Corrente de MPPT (A)	3,11	2,49
Tensão de circuito aberto - Voc (V)	21.7	19.7
Corrente de curto circuito - Isc (A)	3.31	2,67
Coefficiente de Temperatura de Voc- α (V/°C)	-8.21×10^{-2}	-
Coefficiente de Temperatura de Isc- β (A/°C)	1.33×10^{-3}	-

A Figura 2 apresenta as características elétricas extraídas do catálogo técnico do painel para diferentes situações de condições climáticas.

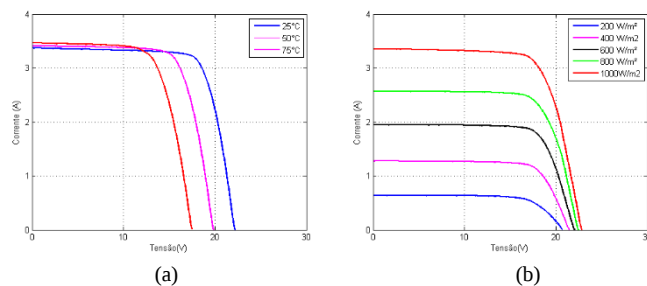


Figura 2. Influência das condições climáticas nas características elétricas do painel KC50T- Kyocera: (a) Variação da temperatura (b) Variação da irradiância.

2.2 Modelagem Matemática de uma célula fotovoltaica

Em (Neto, 2006) são mostrados alguns modelos representados como circuitos elétricos equivalentes utilizando resistências e diodos para modelar as características de uma célula fotovoltaica. Tais modelos são bem difundidos na literatura, no entanto seu equacionamento matemático é descrito por equações não-lineares que requerem métodos numéricos para serem solucionadas. Em (Costa, 2010) um modelo mais simples é proposto para modelagem de um PV e será utilizado neste trabalho. O modelo está apresentado a seguir.

Baseada numa resposta ao degrau de um sistema de primeira ordem, espelhando-se a curva característica do módulo fotovoltaico como mostrado na Figura 3, é possível obter a corrente do painel conforme a equação 1, cujas variáveis dependentes são a temperatura e a irradiância do módulo.

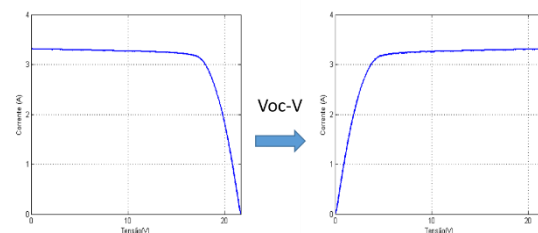


Figura 3. Espelhamento da curva característica de um módulo PV.

$$I(Gc, Tc) = Isc \left\{ 1 - \exp \left[\frac{Voc - V}{\tau} \right] \right\} \quad (1)$$

Onde:

Gc – Irradiância do módulo (W/m²)
 Tc – Temperatura do módulo (K)
 Isc – Corrente de curto circuito (A)
 Voc – Tensão de circuito aberto (V)
 V – Tensão do módulo (V)
 τ – Constante (V)

A corrente de curto circuito (Isc), a tensão de circuito aberto (Voc) e a constante (τ) são expressas pelas equações (2), (3) e (4) respectivamente.

$$I_{sc}(G_c, T_c) = \frac{G_c}{G_r} \{I_{scr} - \alpha [T_c - T_r]\} \quad (2)$$

$$V_{oc}(G_c, T_c) = V_{ocr} + \beta(T_c - T_r) + \ln\left(\frac{G_c}{G_r}\right) \quad (3)$$

$$\tau(G_c, T_c) = c_1 \frac{G_c}{G_r} + c_2 \frac{T_c}{T_r} + c_3 \frac{G_c T_c}{G_r T_r} + c_4 \quad (4)$$

Onde:

G_r – Irradiância de referência (1000 W/m²)

T_c – Temperatura de referência (278.15 K)

As constantes c_1 , c_2 , c_3 e c_4 na equação (4) variam de acordo com o modelo do painel, e podem ser determinadas pelas equações (5), (6) e (7) utilizando o conceito de pseudo inversa de uma matriz (Costa, 2010).

$$[\tau] = [GT] \cdot [C] \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \dots \\ \tau_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{G_{c1}}{G_r} & \frac{T_{c1}}{T_r} & \frac{G_{c1}}{G_r} \cdot \frac{T_{c1}}{T_r} & 1 \\ \frac{G_{c2}}{G_r} & \frac{T_{c2}}{T_r} & \frac{G_{c2}}{G_r} \cdot \frac{T_{c2}}{T_r} & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{G_{cn}}{G_r} & \frac{T_{cn}}{T_r} & \frac{G_{cn}}{G_r} \cdot \frac{T_{cn}}{T_r} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ c_4 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$[C] = \text{pseudoinverse}([GT]) \cdot [\tau] \quad (7)$$

Para o modelo de painel utilizado, as constantes podem ser calculadas e o resultado é $c_1=0,1$, $c_2=1,29$, $c_3=0,43$ e $c_4=0,05$.

2.4 Projeto do Conversor CC-CC Buck e do controlador PI

Para emular a corrente de referência gerada pelo modelo matemático apresentado utiliza-se um conversor CC-CC Buck. Diversos trabalhos propõem a utilização deste conversor como emulador eletrônico de arranjos PV. (Silva, Silva and Sampaio, 2014), (de Souza, 2013), (Vijayakumari, Devarajan and Devarajan, 2012), (Hayrettin, 2013).

Neste trabalho é emulado o comportamento de um painel modelo KC50T da Kyocera. O emulador é então alimentado por uma tensão de entrada de 40 V (V_{in}) e a tensão de saída de projeto (V_{out}) foi considerada a de circuito aberto do painel, 21,7V, com frequência de chaveamento (f_s) de 10KHz. A partir das equações (8) e (9) obteve-se os valores de indutância e capacitância do conversor respectivamente de 10mH e 500µF.

$$L = \frac{D(V_{in} - V_{out})}{f_s \Delta i_L} \quad (8)$$

$$C = \frac{\Delta i_L}{8 f_s \Delta V_C} \quad (9)$$

Onde:

Δi_L é a ondulação de corrente do indutor

ΔV_C é a ondulação de tensão do capacitor

A razão cíclica (D), para o conversor Buck operando no modo de condução contínua, é definida como a relação entre a tensão de saída V_{out} e a tensão de entrada V_{in} (Erickson and Maksimovic, 2001).

O conversor Buck é controlado por meio de um controlador PI (proporcional-integral) que atua de forma a minimizar o erro do sinal de corrente de referência gerado pelo modelo matemático e a corrente medida na saída do conversor. A Figura 4 apresenta o diagrama de blocos do controle onde os ganhos K_p e K_i foram projetados com valores de 10 e 0,15 respectivamente.

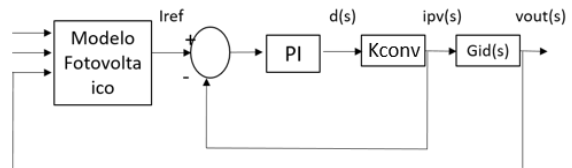


Figura 4. Esquemático do diagrama de controle do emulador.

A função de transferência do controlador (G_c) é dada pela equação (10) e por meio do modelo de pequenos sinais (Erickson and Maksimovic, 2001) é possível encontrar a função de transferência do conversor (G_{id}) expressa pela equação (11).

$$G_c = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (10)$$

$$G_{id} = V_{in} \frac{(1 + RCs)}{RLC s^2 + Ls + R} \quad (11)$$

Onde R é o valor da resistência equivalente da carga conectada na saída do emulador de modo a extrair a máxima potência. K_{conv} é o ganho do conversor buck, igual à tensão de entrada ($K_{conv}=V_{in}$).

3 Análise de Desempenho

Foram levantadas as curvas IV e PV emuladas e comparadas com as mesmas curvas extraídas do manual técnico do fabricante para diferentes condições de irradiância e temperatura. Foram realizadas as seguintes simulações:

- Simulação A: Irradiância de 1000W/m² e temperatura de 25°C.
- Simulação B: Irradiância de 800W/m² e temperatura de 25°C.

- Simulação C: Irradiância de 1000W/m^2 e temperatura de 50°C .

Para análise dos resultados foram levantados gráficos das curvas características de cada simulação. A Figura 5 apresenta as curvas IxV resultantes das simulações A, B e C comparando valores medidos na saída do emulador com os valores obtidos pelo catálogo do fabricante.

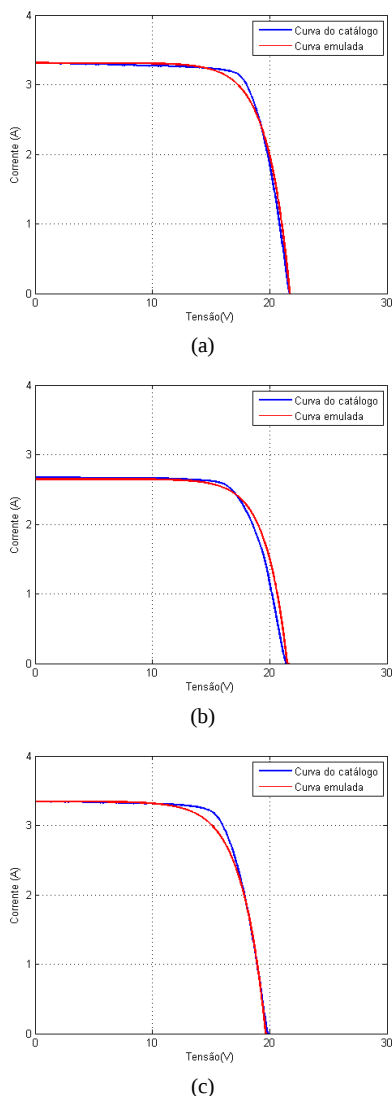


Figura 5. Curva IxV emulada comparada à extraída do catálogo técnico do fabricante para: (a) Simulação A; (b) Simulação B; (c) Simulação C.

O comportamento do emulador para pontos de radiação e temperatura diferentes é muito semelhante ao apresentado pelo catálogo do fabricante. Os pontos de corrente de curto circuito (I_{sc}) e tensão em aberto (V_{oc}) emulados muito se aproximam dos valores de referência apresentando um erro maior ao se aproximar de valores próximos ao ponto de máxima potência. Na Figura 6 é possível verificar a curva de potência do emulador comparada à referência do fabricante para as três simulações A, B e C.

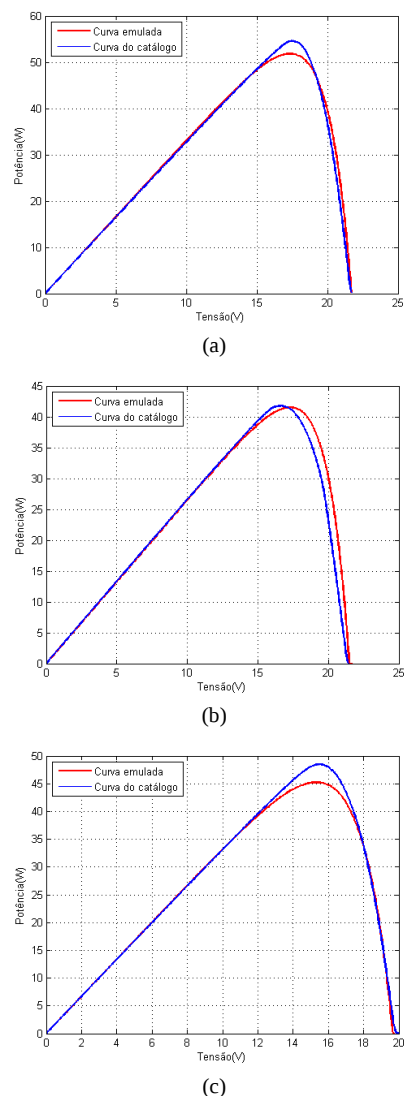
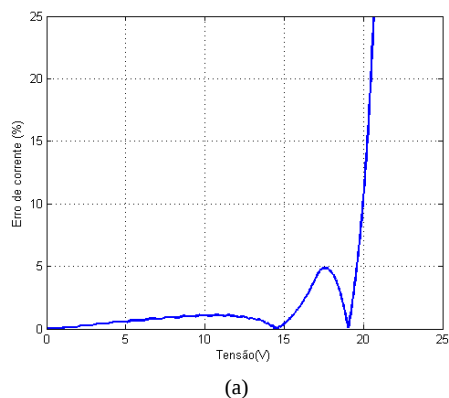


Figura 6. Curva PxV emulada comparada à extraída do catálogo técnico do fabricante para: (a) Simulação A; (b) Simulação B; (c) Simulação C.

A simulação B apresenta um erro maior comparado ao dado de catálogo com a variação da irradiância para 800W/m^2 . Este fato fica mais claro na Figura 7 onde são apresentadas as curvas de erro percentual da corrente em função da variação de tensão para as situações A, B e C da figura 5.



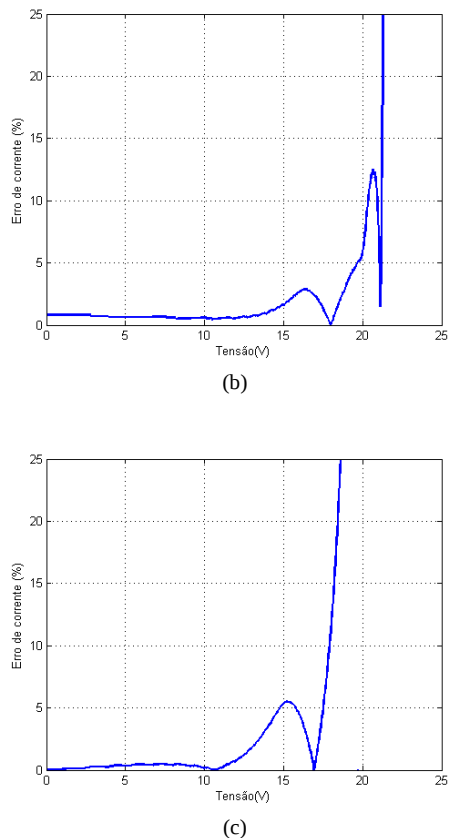


Figura 7. Curva de erro percentual em função da variação de tensão do painel para: (a) Simulação A; (b) Simulação B; (c) Simulação C.

O aumento do erro quando a tensão tende a V_{co} é devido ao baixo valor de corrente, próximo de zero, ou seja, uma pequena variação da corrente comparada com zero tende a gerar um valor alto de erro.

Para alguns parâmetros elétricos foram levantados os desvios percentuais para análise como: Corrente de curto (I_{cc}), Tensão de circuito aberto (V_{ca}), Potência máxima (P_m) e o Fator de forma (FF), dado pela equação (12).

$$FF = \frac{P_m}{I_{cc} V_{ca}} \quad (12)$$

A Tabela 2 apresenta estes parâmetros como resultados das simulações A, B e C, onde as colunas “C” referem-se aos dados do catálogo técnico e “E” aos dados experimentais. Na tabela 3 é calculado o desvio percentual de cada valor simulado.

Como apresentado em (Costa, 2010) a faixa de tolerância apresentada pelo fabricante do painel utilizado é de 15% de desvio percentual nos parâmetros elétricos do painel. É possível observar pelos resultados apresentados que todos os parâmetros para todas as simulações obtiveram desvio dentro da faixa de tolerância.

Tabela 2. Parâmetros elétricos obtidos da simulação A, B, C e do catálogo técnico do fabricante.

	Simulação A		Simulação B		Simulação C	
Dados	C	E	C	E	C	E
I_{cc} (A)	3,31	3,31	2,67	2,64	3,34	3,34
V_{ca} (V)	21,7	21,7	21,4	21,48	19,83	19,75
I de MPPT (A)	3,11	2,99	2,5	2,4	3,12	2,94
V de MPPT (V)	17,4	17,43	16,7	17,28	15,54	15,35
P_m (W)	54	52,26	41,8	41,52	48,48	45,24
FF	0,752	0,728	0,732	0,732	0,732	0,686

Tabela 3. Desvio percentual calculado a partir dos resultados da Tabela 2.

	Simulação A	Simulação B	Simulação C
I_{cc} (A)	0,00%	1,12%	0,00%
V_{ca} (V)	0,00%	0,37%	0,40%
Corrente de MPPT (A)	3,86%	4,00%	5,77%
Tensão MPPT (V)	0,17%	3,47%	1,22%
P_m (W)	3,22%	0,67%	6,68%
FF	3,22%	0,08%	6,31%

4 Conclusão

Este trabalho apresentou a simulação de um sistema capaz de emular as características de um arranjo fotovoltaico. O sistema foi avaliado considerando variações climáticas diferentes de radiação e temperatura e levantado desvios percentuais em relação às curvas e dados elétricos extraídos do catálogo técnico.

O emulador foi baseado na utilização de um conversor CC-CC *buck* que se mostrou adequado a esta utilização. O modelo matemático para gerar a corrente de referência de controle do conversor foi o Modelo de Primeira Ordem apresentado por (Costa, 2010). Tal modelagem atribui vantagem ao emulador, uma vez que conseguiu uma resposta satisfatória, sendo sua implementação mais simples e apresentando facilidade no cálculo dos parâmetros que outros modelos difundidos na literatura. Estas características diminuem tempo de cálculo e esforço computacional auxiliando e facilitando a implementação de métodos MPPT.

O emulador simulado conseguiu alcançar o objetivo esperado uma vez que todos os desvios percentuais mostrados se encontraram abaixo da faixa de tolerância descrita pelo fabricante do painel utilizado.

Agradecimentos

Os autores agradecem à CNPQ pelo apoio financeiro recebido por meio da concessão de bolsas de estudo pesquisa.

Referências Bibliográficas

- Costa, W.T.d. (2010) Modelagem, Estimação de Parâmetros e Método MPPT para Módulos Fotovoltaicos, Vitória: Tese de Doutorado.
- de Souza, R.L. (2013) Estudo de Projeto de um Simulador de Gerador Fotovoltaico, Belo Horizonte: Dissertação de Mestrado.
- Erickson, R.W. and Maksimovic, D. (2001) Fundamentals of Power Electronics, 11th edition, Colorado: Kluwer Academic Publishers.
- Hayrettin, C. (2013) 'Model of a photovoltaic panel emulator in MATLABSimulink', Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, vol. 21, pp. 301-308.
- Neto, L.d.V.B.M. (2006) Caracterização de geradores fotovoltaicos e desenvolvimento de seguidor de potência máxima para sistemas autônomos aplicados à eletrificação rural, Viçosa: Tese de Doutorado.
- Silva, J.A., Silva, S.A.O. and Sampaio, L.P. (2014) 'Emulador Eletrônico de Arranjos Fotovoltaicos Utilizando o Conversor Buck Controlado em Corrente', XI IEEE/IAS International Conference on Industry Applications - INDUSCON, pp. 1-1.
- Vijayakumari, A., Devarajan, A.T. and Devarajan, N. (2012) 'Design and development of a model-based hardware simulator for photovoltaic array', Electrical Power and Energy Systems, vol. 43, pp. 40-46.