

# EMULADOR PV BASEADO EM UM CONVERSOR CC-CC BUCK-BOOST DE QUATRO INTERRUPTORES

LEANDRO L. O. CARRALERO\*, GABRIEL SANTA BARBARA\*, FABIANO F. COSTA\*,  
ANDRÉ P. N. TAHIM\*

*\*Universidade Federal da Bahia  
Escola Politécnica - Departamento de Engenharia Elétrica  
Rua Aristides Novis Nº 02, 4º andar,  
Salvador, Bahia, Brasil*

Emails: leandro.oro@ufba.br, gabrielsbss@hotmail.com, fabiano.costa@ufba.br,  
atahim@ufba.br

**Abstract**— Currently, there is a growing need to develop and evaluate power converters that integrates photovoltaic (PV) systems to the electric grid. Developing these converters using photovoltaic devices exposed to environmental conditions that may vary abruptly consists of a complex task. Thus, it becomes difficult to evaluate developing converters in all operating points for different climatic conditions. One solution is the use of emulators of PV panels that provide controlled output independent of external conditions. This work proposes a low-cost PV emulator using a four-switch buck-boost (FSBB) dc-dc converter. As the voltage/current output can be controlled in a dc-dc converter, an algorithm that emulates the I-V curve at the converter's terminals based on the estimated load connected to it is developed. From this value, a linear approximation of the I-V curve is used in association with the Newton method to obtain the voltage reference. The voltage reference value dictates the FSBB operation mode (buck, boost, buck-boost) through a control differential or hysteresis, and the PI controllers of the proposed cascade control system are used to track it. Finally, simulation results of the proposed PV emulator working in different operation modes are reported to validate the effectiveness of the approach to change climatic conditions.

**Keywords**— PV emulator, FSBB converter, I-V curve.

**Resumo**— Atualmente, existe uma necessidade crescente de desenvolver e avaliar conversores de energia que integram sistemas fotovoltaicos (PV) à rede elétrica. Desenvolver tais conversores utilizando painéis fotovoltaicos expostos a condições ambientais que podem variar abruptamente consiste em uma tarefa complexa. Assim, torna-se difícil avaliar o desenvolvimento de conversores em todos os pontos de operação para diferentes condições climáticas. Uma solução é o uso de emuladores de painéis PV que fornecem saída controlada independente das condições externas. Este trabalho propõe um emulador PV de baixo custo baseado em um conversor CC-CC buck-boost de quatro interruptores (FSBB). Como a saída de tensão/corrente pode ser controlada em um conversor CC-CC, foi desenvolvido um algoritmo que emula a curva I-V nos terminais do conversor com base na carga estimada conectada. A partir desse valor, uma aproximação linear da curva I-V é utilizada em associação com o método de Newton para obter a referência de tensão. O valor de referência de tensão determina o modo de operação do FSBB (buck, boost, buck-boost) através de um diferencial de controle ou histerese e os controladores PI do sistema de controle em cascata proposto são usados para rastrear-lo. Finalmente, os resultados de simulação do emulador PV proposto em diferentes modos de operação são relatados para validar a eficácia da abordagem para mudança nas condições climáticas.

**Palavras-chave**— Emulador PV, conversor FSBB, curva I-V.

## 1 Introdução

Nos últimos anos, o uso de sistemas fotovoltaicos aumentou significativamente em todo o mundo (Sampaio e Gonzalez, 2017). Investimentos foram aplicados na pesquisa de conversores de energia que integram os sistemas fotovoltaicos e a rede para melhorar a eficiência e a confiabilidade de tais sistemas. Assim, há uma necessidade crescente de avaliar conversores de energia e a estabilidade de sistemas com geração distribuída. O principal problema surge durante o desenvolvimento e a avaliação do desempenho dos conversores de energia fotovoltaica devido à grande variabilidade das condições climáticas, uma vez que a temperatura e a irradiação não são controladas e podem variar, algumas vezes abruptamente. Portanto, é necessário um meio de avaliar o sistema sem a influência dessas variações a qualquer momento e de forma controlada. Uma ferramenta útil para re-

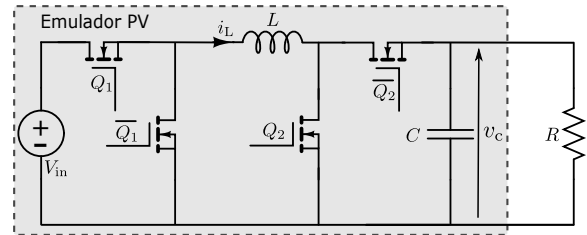


Figura 1: Emulador PV baseado no conversor four-switch buck-boost (FSBB).

solver esse problema consiste em emuladores fotovoltaicos (PV), que imitam as características elétricas de um painel PV em diferentes condições climáticas em um ambiente de laboratório.

Várias abordagens para projetar emuladores PV são encontradas na literatura: células solares de referência de baixa potência (Armstrong et al., 2005); fontes de alimentação CC com re-

sistências variáveis (Mukerjee e Dasgupta, 2007); e os conversores comutados CC-CC (Trapp et al., 2011) (Lu e Nguyen, 2012) (Cordeiro et al., 2015), os mais utilizados atualmente. Alguns deles não são flexíveis para emular diferentes tipos de módulos ou configuração de matriz fotovoltaica, enquanto alguns, apesar da flexibilidade, são caros e impedem o uso em pequenos projetos. Portanto, propõe-se um emulador PV que permita um alto desempenho e a possibilidade de adaptação a diferentes valores de tensão na entrada e na saída a um baixo custo.

O objetivo principal do trabalho é emular um painel PV através de um conversor síncrono dc-dc, reproduzindo nos terminais de saída as características elétricas de um PV. Para isso, um circuito formado por um conversor FSBB que pode-se comportar como buck, boost ou buck-boost (FSBB), conforme representado na Figura 1. A topologia possui um par de comutadores síncronos, onde  $Q_1$  e  $Q_2$  são os comutadores ativos e  $\overline{Q}_1$  e  $\overline{Q}_2$  são os retificadores síncronos (Ren et al., 2009). Esta topologia permite que a tensão de saída funcione em uma gama mais ampla do que outros tipos de conversores não isolados. Além disso, esta configuração é adequada para aplicações em que o ponto de operação varia em uma ampla gama de tensões e correntes (variação de carga), como a curva característica I-V de painéis fotovoltaicos.

As demais seções deste trabalho estão organizadas da seguinte forma: A Seção II descreve o modelo matemático do conversor FSBB; O projeto e controle do emulador PV proposto são apresentados na Seção III; A Seção IV é dedicada à análise de resultados de simulação; e os comentários finais estão na Seção V.

## 2 Modelagem Matemática

### 2.1 Modelo do conversor

Na pesquisa de Orellana et al. 2010, se obtiveram as equações em espaço de estados da topologia FSBB da Fig. 1,

$$\begin{bmatrix} \dot{v}_C \\ \dot{i}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{RC} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_C \\ i_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix} v_{in} D_1 + \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{C} \\ -\frac{1}{L} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_C \\ i_L \end{bmatrix} (1 - D_2), \quad (1)$$

onde  $v_{in}$  e  $v_c$  são as tensões de entrada e saída, respectivamente. A corrente do indutor  $L$  é representada por  $i_L$ ,  $C$  é o valor do capacitor e  $R$  é a carga resistiva.

O conversor FSBB tem duas razões cíclicas a serem controladas,  $D_1$  para  $Q_1$  e  $D_2$  para  $Q_2$ , resultando em dois graus de liberdade. Os interruptores  $\overline{Q}_1$  e  $\overline{Q}_2$  são síncronos e complementares de  $Q_1$  e  $Q_2$ , respectivamente. O ponto de equilíbrio de (1), tensão de saída e corrente do indutor

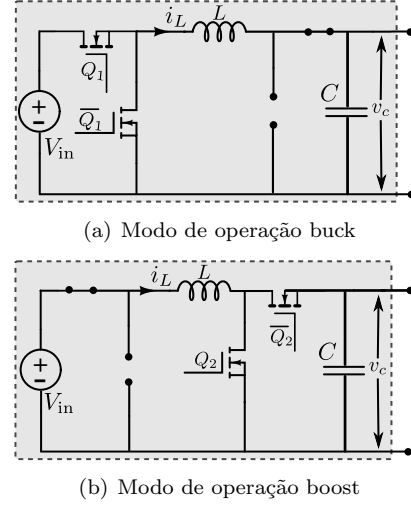


Figura 2: Modos de operação do FSBB: (a) buck; (b) boost.

é dado por:

$$(v_{C_{eq}}, i_{L_{eq}}) = \left( V_{in} \frac{D_1}{1 - D_2}, \quad \frac{V_{in}}{R} \frac{D_1}{(1 - D_2)^2} \right). \quad (2)$$

Note-se que se  $D_2 = 0$  ( $Q_2$  desligado e  $\overline{Q}_2$  ligado), o conversor FSBB se comporta como um conversor buck, mostrado na Fig. 2(a), e se  $D_1 = 1$  ( $Q_1$  ligado e  $\overline{Q}_1$  desligado), este conversor se comporta como um conversor boost, ilustrado na Fig. 2(b). Outra possibilidade é quando  $D_1$  e  $D_2$  são iguais ( $D_1 = D_2$ ). Em tal condição, o conversor funciona como um conversor buck-boost, como mostrado na Figura 1.

Aplicando a transformação de Laplace em cada modo de operação no sistema (1), podem-se obter as funções de transferência, para cada modo de operação, que relacionam a razão cíclica com a tensão de saída e a corrente do indutor, apresentadas nas seguintes equações. Essas funções de transferência são usadas para projetar três controladores para o conversor FSBB, um para cada modo de operação.

Modelo de conversor FSBB no modo de operação buck:

$$\frac{V_C(s)}{D(s)} = \frac{V_{in}}{LCs^2 + \frac{L}{R}s + 1} \quad (3)$$

$$\frac{I_L(s)}{D(s)} = \frac{\frac{V_{in}}{R}(1 + RCs)}{LCs^2 + \frac{L}{R}s + 1} \quad (4)$$

Modelo de conversor FSBB no modo de operação boost:

$$\frac{V_C(s)}{D(s)} = \frac{\frac{V_{in}}{(1 - D_2)^2} \left[ 1 - \frac{L}{R(1 - D_2)^2 s} \right]}{\frac{LC}{(1 - D_2)^2} s^2 + \frac{L}{R(1 - D_2)^2} s + 1} \quad (5)$$

$$\frac{I_L(s)}{D(s)} = \frac{\frac{V_{in}}{R(1-D_2)^3} [2 + RCs]}{\frac{LC}{(1-D_2)^2} s^2 + \frac{L}{R(1-D_2)^2} s + 1} \quad (6)$$

Modelo de conversor FSBB no modo de operação buck-boost (Nesta situação  $D_1 = D_2 = D$ ):

$$\frac{V_C(s)}{D(s)} = \frac{\frac{V_{in}}{(1-D)^2} \left[ 1 - \frac{LD}{R(1-D)^2} s \right]}{\frac{LC}{(1-D)^2} s^2 + \frac{L}{R(1-D)^2} s + 1} \quad (7)$$

$$\frac{I_L(s)}{D(s)} = \frac{\frac{V_{in}}{R(1-D)^3} [(1+D) + RCs]}{\frac{LC}{(1-D)^2} s^2 + \frac{L}{R(1-D)^2} s + 1} \quad (8)$$

## 2.2 Curvas características do painel PV

A representação típica da característica de saída de um painel PV é chamada curva corrente-tensão (I-V), ilustrada na Figura 3. Em Ortiz-Rivera e Peng (2005) se apresenta uma revisão que aborda como modelar a curva característica I-V dos painéis fotovoltaicos. Além disso, os autores propõem um modelo de equação I-V que é usado neste trabalho como a curva de referência I-V que o emulador deve reproduzir

$$I(V) = \alpha I_{sc} \tau_i \left[ 1 - e^{\frac{V}{b(\alpha\gamma + 1 - \gamma)(V_{oc} + \tau_v)} - \frac{1}{\beta}} \right], \quad (9)$$

onde,  $I_{sc}$  é a corrente de curto-circuito,  $V_{oc}$  é a tensão de circuito aberto,  $\alpha$  representa a porcentagem efetiva de irradiação,  $\gamma$  é o fator de sombreamento,  $\tau_i$  é a taxa de mudança do  $I_{sc}$  de acordo com a temperatura ( $A/^\circ C$ ),  $\tau_v$  é a taxa de variação de  $V_{oc}$  de acordo com a temperatura ( $V/^\circ C$ ) e  $\beta$  é uma constante que pode ser calculada a partir da folha de dados do painel.

Além disso, a partir da curva I-V é possível obter duas curvas importantes adicionais: curva P-V (relaciona a potência de saída com a tensão); e a curva R-V (relaciona a carga de saída com a tensão). A curva R-V pode ser obtida medindo a corrente e a tensão nos terminais de saída do conversor e aplicando a Lei de Ohm:

$$R(V) = \frac{V}{I(V)}. \quad (10)$$

Para cada valor de resistência existe um único par I-V para uma condição climática fixa. Portanto, estimando o valor de carga de saída conectado ao conversor, é possível controlar a tensão de saída do conversor para impor o correspondente par I-V na saída. Uma vez que as curvas I-V e R-V são equações complexas e exigem um esforço computacional intolerável para processadores incorporados, a curva R-V é aproximada por linhas, denominado método de aproximação linear

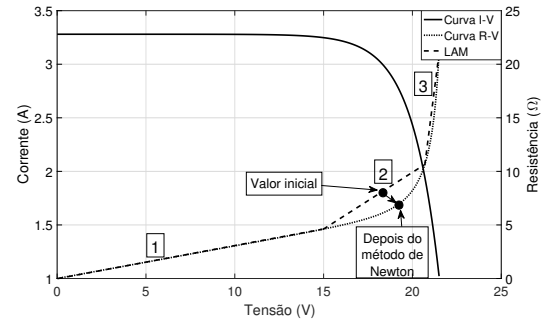


Figura 3: Curvas I-V e R-V com o método de aproximação linear (LAM).

(LAM) (Lu e Nguyen, 2012), representado na Figura 3. Estas linhas são o primeiro passo para obter o valor de referência de tensão usado pelos controladores para emular um painel PV.

## 3 Projeto do Emulador

### 3.1 Algoritmo de controle

As curvas I-V ou R-V originais são complexas para obter em um sistema incorporado. Assim, o LAM é usado para reduzir a complexidade computacional. Primeiro, usando (10), 3 linhas são calculadas *offline* e incorporadas no microcontrolador, conforme descrito na Figura 3. A tensão e a corrente de saída são medidas nos terminais do conversor para estimar o valor da carga ( $R$ ). A linha correspondente a este valor  $R$  é usada para obter uma estimativa inicial da referência de tensão de saída ( $V_{shoot}$ ), (veja Figura 3). Esta estimativa inicial, que é muito próxima da verdadeira raiz, é alimentado no método de Newton para reduzir o erro. Apenas três iterações são necessá-

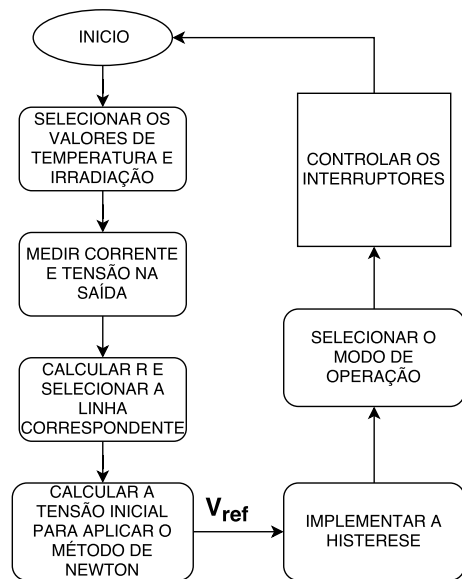


Figura 4: Fluxograma do algoritmo de controle do emulador PV.

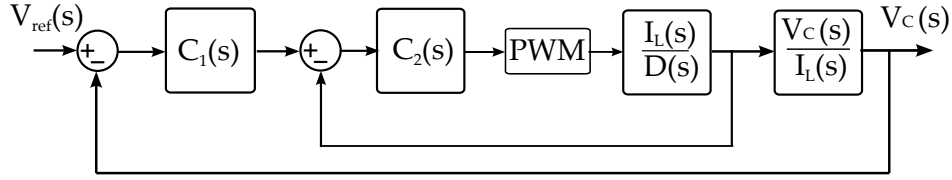


Figura 5: Sistema de controle em cascata para regular o conversor FSBB para cada modo de operação.

Tabela 1: Controladores PI - 3 modos de operação.

Modo de Operação	Ponto de Operação		Malha externa		Malha Interna	
	V(V)	R (Ω)	K <sub>p</sub>	T <sub>i</sub>	K <sub>p</sub>	T <sub>i</sub>
BUCK	6	1.83	3.03	0.0017	0.412	0.0035
BUCK-BOOST	12	3.66	3.65	0.0023	0.2085	0.0069
BOOST	18	5.9	3.33	0.0028	0.2085	0.0112

rias para encontrar um valor de tensão próximo à curva original para usar como referência. Finalmente, sabendo o valor de referência de tensão que deve ser imposto nos terminais de saída, o modo de operação é selecionado através de um método, chamado aqui de histerese, e o controle correspondente atua nos comutadores. Este algoritmo é apresentado através do fluxograma na Figura 4.

### 3.2 Projeto do Circuito de Potência

No projeto do circuito de potência, indutores e capacitores precisam ser dimensionados para garantir um modo de condução contínua (CCM) e o ripple (V) da tensão de saída não exceda 5% na frequência de comutação (20 kHz). Utilizando (11) e (12) (Bacha et al., 2014), com um fator de segurança maior do dobro do valor inicial, são obtidos os valores mínimos para cada modo de operação do conversor (variando a razão cíclica em cada modo de operação e usando diferentes valores de resistência das curvas R-V):  $L = 400 \mu H$  e  $C = 1 mF$ .

$$L_{min} \geq 2 \max \left[ \frac{(1 - D_1)R}{2f}, \frac{D_2(1 - D_2)^2 R}{2f} \right] \quad (11)$$

$$C_{min} \geq 2 \max \left[ \frac{1 - D_1}{8L\Delta V f^2}, \frac{D_2}{R\Delta V f} \right] \quad (12)$$

### 3.3 Sistema de Controle

Nesta fase, um controle em cascata é projetado para regular a tensão de saída usando uma malha interna de corrente e outra externa de tensão, como ilustrado na Figura 5. Seis controladores diferentes são sintonizados, dois para cada modo de operação do conversor FSBB. Vale a pena dizer que o tempo de resposta da malha interna deve ser mais rápido que a externa para que o controle em cascata seja bem sucedido. Utilizando (3)–(8) é possível obter a função de transferência que relaciona a tensão de saída com a

corrente do indutor, dividindo as duas funções de transferência que relacionam ambas com a razão cíclica.

Os controladores PI,  $C_1(s)$  e  $C_2(s)$ , são sintonizados usando os métodos da resposta em frequência e lugar das raízes. Os controladores foram projetados para cada modo de operação usando os mesmos requisitos. Para a malha externa, o tempo de estabelecimento é de 1 ms utilizando o critério do 5 %. Logo, a malha interna deve ser capaz de filtrar a resposta do sistema na frequência de comutação, de modo que a frequência de cruzamento usada é de 2 kHz. Os valores dos parâmetros do controlador  $K_p$  e  $T_i$  obtidos são representados na Tabela 1.

## 4 Resultados Obtidos

Neste trabalho, o módulo solar YL55P-17b, fabricado pela Yingli Solar, é utilizado como referência. Os parâmetros elétricos deste painel PV nas Condições Padrão de Teste (STC) são apresentados na Tabela 2. Utilizando (9), (10), dados da Tabela 2 e o software Matlab R2016a, as curvas I-V e R-V foram obtidas para valores diferentes das condições climáticas.

Para este trabalho foram selecionadas sete curvas R-V distintas, três mantendo fixa a irradiação em 1000 W/m<sup>2</sup> e variando a temperatura de 10 °C para 50 °C até 75 °C, outras três mantendo fixa a temperatura em 25 °C variando a irradiação de 250 W/m<sup>2</sup> para 500 W/m<sup>2</sup> até 750 W/m<sup>2</sup> e a

Tabela 2: Parâmetros elétricos do painel YL055P.

Yingli YL055P 17b	
Potência Máxima (P <sub>max</sub> )	55 W
Tensão na P <sub>max</sub> (V <sub>mppt</sub> )	17.83 V
Corrente na P <sub>max</sub> (I <sub>mppt</sub> )	3.08 A
Tensão de Circuito Aberto (V <sub>oc</sub> )	22.07 V
Corrente de Curto Circuito (I <sub>sc</sub> )	3.28 A
Coeficiente de T para I <sub>sc</sub> (T <sub>CI</sub> )	60 mA/°C
Coeficiente de T para V <sub>oc</sub> (T <sub>CV</sub> )	-330 mV/°C

curva R-V padrão ( $G = 1000 \text{ W/m}^2$  e  $T = 25^\circ\text{C}$ ). Após a obtenção destas curvas, o método LAM foi aplicado para cada uma delas e foram obtidas 3 linhas para cada curva R-V. Estas linhas encontradas conseguem aproximar as curvas selecionadas, a fim de utilizar esta aproximação por retas em combinação com o método de Newton para encontrar um valor da tensão de referência que define o modo de operação do conversor FSBB e o controle de seus interruptores.

Para definir os modos de operação do conversor FSBB foi selecionada a curva I-V padrão ( $G = 1000 \text{ W/m}^2$  e  $T = 25^\circ\text{C}$ ). Após obter os valores desta curva, ilustrada na Figura 6, foram realizadas diferentes definições. Uma definição determinou que a tensão de alimentação ( $V_{in}$ ) seja de 12 V, um valor semelhante à metade da tensão de circuito-aberto do painel YL055P, além de ser um valor comumente fornecido por fontes de alimentação em laboratórios. Logo, a partir de  $V_{in}$  e valores de tensão da curva I-V padrão, foram definidos os três modos de operação do conversor FSBB utilizando o método da histerese, como ilustrado na Figura 6. Os três intervalos de operação onde o conversor opera como *buck*, *buck – boost* e *boost* foram selecionados (*buck* se  $V_{ref} \leq 9\text{V}$ , *buck-boost* se  $V_{ref}$  entre 9 V e 15 V e *boost* se  $V_{ref} \geq 15\text{V}$ ), onde o valor de histerese ( $h$ ) foi definido como 1 V, suficiente para evitar comutações sucessivas entre estes modos.

Para verificar o algoritmo proposto, dois testes foram simulados onde, a partir de uma temperatura fixa, a irradiação é variada (ilustrado na Figura. 7), e outro onde a temperatura variou usando a irradiação máxima (ver Figura. 9). Em ambos casos a carga fixa na saída é  $10 \Omega$ , portanto a reta que define os três pontos para cada figura tem como coeficiente angular o inverso deste valor. Além disso, o tempo para emulação escolhido foi de 0,1 s para simular mudanças abruptas nas condições climáticas. Para desenvolver o primeiro teste, foi utilizada a temperatura padrão de  $25^\circ\text{C}$  e variou-se a irradiação de acordo à Tabela 3, comparando o modelo analítico com os valores obtidos na simulação do PSIM nos terminais de saída do conversor, apresentados na Figura. 8. Para este

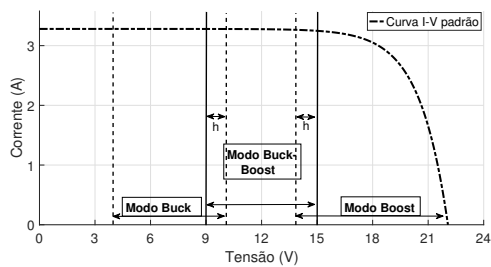


Figura 6: Seleção dos modos de operação do conversor FSBB na curva I-V padrão.

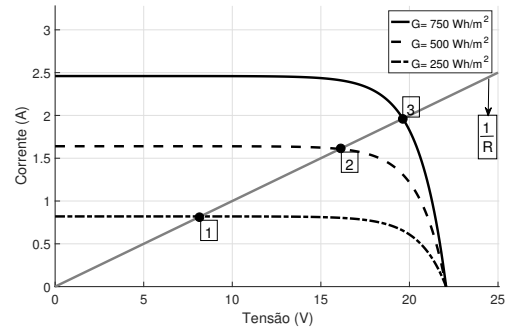


Figura 7: Curvas I-V simuladas variando a irradiação na temperatura padrão.

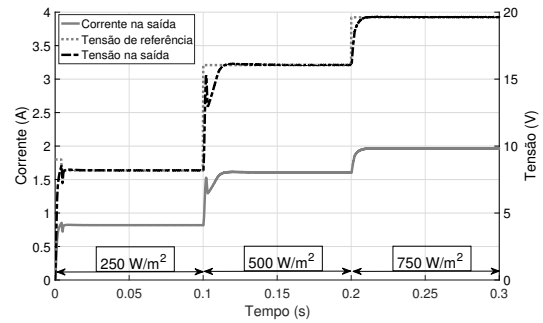


Figura 8: Resultados da simulação do emulador PV sob variação da irradiação.

teste, o conversor trabalha em dois modos de operação distintos, *buck* quando a irradiação está em  $250 \text{ W/m}^2$ , e *boost* para  $500 \text{ W/m}^2$  e  $750 \text{ W/m}^2$ . Tal caso mostra que o controle consegue mudar o modo de operação do emulador de maneira estável. Logo, no segundo teste, utilizando a irradiação máxima variou-se a temperatura em conformidade aos valores da Tabela 4, comparando o modelo analítico com os valores obtidos nos terminais do conversor a partir da simulação no PSIM, ilustrados na Figura. 10. Neste caso, o conversor opera somente no modo de operação *boost*, isso se deve que a variação mais significativa entre as curvas I-V acontece entre os pontos de MPPT e circuito-aberto que possuem tensões maiores do que a tensão de alimentação. Pode-se observar nessas tabelas valores aceitáveis, pois existe um erro satisfatório entre o valor emulado com o valor teórico. Por isso, pode-se afirmar que o emulador, para estes estudos de caso, opera corretamente.

Um último teste teve como objetivo verificar o comportamento do emulador PV sob variação de carga na saída para uma curva I-V específica. A curva selecionada como referência foi a curva I-V padrão do painel YL055P e foram escolhidos três pontos desta curva onde o emulador opera nos três modos de operação. Estes três pontos são  $2 \Omega$  para o modo *buck*,  $4 \Omega$  para o modo *buck – boost* e  $12 \Omega$  para o modo *boost*, portanto os coeficientes angulares de cada reta consistem no inverso desses

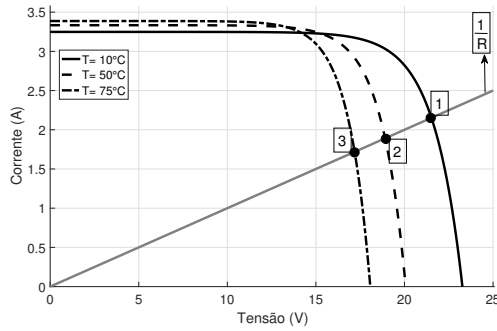


Figura 9: Curvas I-V simuladas variando a temperatura na irradiação máxima.

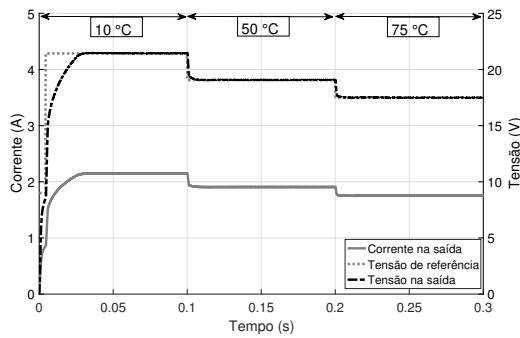


Figura 10: Resultados da simulação do emulador PV sob variação da temperatura.

valores selecionados, como ilustrado na Figura 11. Então, para comprovar que a estratégia de controle proposta teve sucesso, os terminais do emulador PV devem apresentar na saída os mesmos pares I-V dos pontos para cada carga escolhida, simulando uma variação na curva I-V padrão do painel PV.

A Figura 12 mostra os valores obtidos nos

Tabela 3: Comparação entre o modelo desenvolvido e a saída do emulador PV variando irradiação a 25°C.

Resultados da Simulação				
G ( $W/m^2$ )	Pares das curvas I-V		Emulador PV	
	I (A)	V (V)	I (A)	V (V)
250	0,82	8,2	0,818	8,18
500	1,61	16,1	1,607	16,07
750	1,96	19,6	1,962	19,62

Tabela 4: Comparação do modelo desenvolvido com a saída do emulador PV variando temperatura na irradiação máxima.

Resultados da Simulação				
T (°C)	Pares das curvas I-V		Emulador PV	
	I (A)	V (V)	I (A)	V (V)
10	2,145	21,45	2,147	21,47
50	1,905	19,05	1,907	19,07
75	1,75	17,5	1,748	17,48

terminais de saída do emulador PV simulados no PSIM para a variação da carga na saída tomando como referência a Figura 11, demonstrando a eficácia do emulador para este tipo de variação. Neste caso, o tempo aumentou para 1 s, pois esta mudança exige um maior tempo de acomodação para o controle estabilizar. O conversor conseguiu operar nos três modos e apresentou pequenas oscilações quando muda de um modo para outro devido à histerese implementada. Portanto, nota-se que o sistema de controle em cascata proposto atua de forma eficiente e que alcança os valores desejados em tempo aceitável.

Na Tabela 5 se apresentam os resultados da simulação do emulador PV realizada no PSIM e os valores nos pontos selecionados da curva I-V padrão a partir do modelo analítico desenvolvido no Matlab. Se colocaram os valores para os três modos de operação do conversor FSBB para ambos casos. Pode-se observar que foram obtidos valores aceitáveis, pois existe um erro satisfatório entre o valor na saída do emulador PV com o valor do modelo teórico da curva I-V padrão. Por fim, pode-se afirmar que o emulador opera corretamente quando se varia a carga na saída para simular pontos de uma mesma curva I-V selecionada nos diferentes modos de operação do conversor FSBB.

Os três testes demonstraram a efetividade do

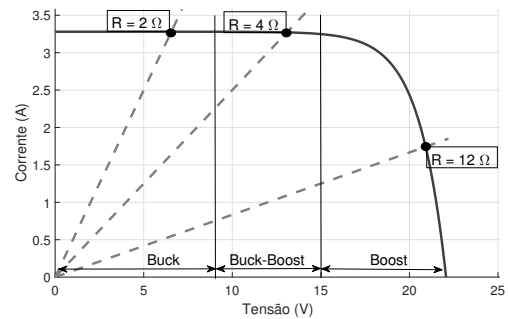


Figura 11: Curva I-V padrão com os três pontos onde o conversor FSBB trabalha nos 3 modos de operação.

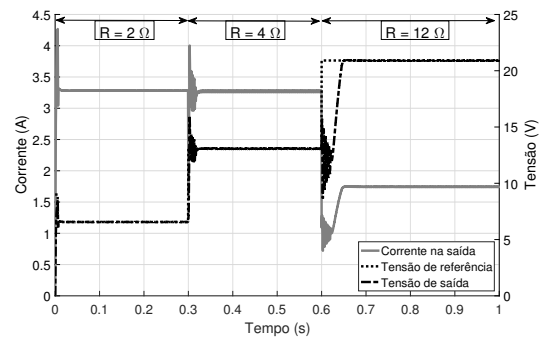


Figura 12: Resultados da simulação do emulador PV sob variação da carga.

Tabela 5: Resultados obtidos da curva I-V selecionada e do emulador PV proposto para cada modo de operação.

Modo de Operação	Resultados da Simulação				
	$R \ (\Omega)$	Modelo da curva I-V		Emulador PV	
		$I \ (A)$	$V \ (V)$	$I \ (A)$	$V \ (V)$
BUCK	2	3,28	6,57	3,28	6,567
BUCK-BOOST	4	3,27	13,1	3,269	13,08
BOOST	12	1,75	20,9	1,747	20,91

algoritmo implementado para o emulador PV e do sistema de controle em cascata proposto, para cada modo de operação do conversor FSBB. Concluindo que, a partir destes resultados simulados, é possível garantir a eficácia do emulador proposto.

## 5 Conclusões

Este artigo apresentou o projeto de um emulador PV baseado em um conversor CC-CC buck-boost de quatro interruptores (FSBB). O emulador usou a aproximação linear e o método de Newton para determinar a tensão de referência que corresponde à curva I-V, com baixa complexidade e erro. O método da histerese implementado determinou de forma correta o modo de operação do conversor a partir da tensão de referência encontrada. Esta tensão de referência com precisão aceitável é rastreada por uma estrutura em cascata composta por dois controladores PI. Os primeiros testes realizados corroboraram a capacidade de adaptação na variação das condições climáticas (temperatura e irradiação), pois o emulador PV atingiu os valores selecionados do modelo analítico destas curvas I-V. Logo, o emulador foi testado usando diferentes cargas resistivas que forçam o conversor a trabalhar em cada modo de operação (*buck*, *buck – boost* e *boost*). Estes resultados demonstraram a eficácia do emulador ao atingir os valores do modelo da curva I-V padrão selecionada sob diferentes condições de carga.

## Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à CAPES pelo suporte financeiro fornecido e aos colegas do LABEFEA da UFBA pela ajuda prestada no desenvolvimento do projeto.

## Referências

Armstrong, S., Lee, C. K. and Hurley, W. G. (2005). Investigation of the harmonic response of a photovoltaic system with a solar emulator, *European Conference on Power Electronics and Applications*, pp. 8 pp.–P.8.

Bacha, S., Munteanu, I. and Bratcu, A. I. (2014). *Power Electronic Converters Modeling and Control*, Springer-Verlag London.

Cordeiro, A., Foito, D. and Pires, V. F. (2015). A pv panel simulator based on a two quadrant dc/dc power converter with a sliding mode controller, *International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, pp. 928–932.

Erickson, R. W. and Maksimovic, D. (2004). *Fundamentals of Power Electronics*, second edn, Kluwer Academic Publishers.

Lu, D. and Nguyen, Q. (2012). A photovoltaic panel emulator using a buck-boost dc/dc converter and a low cost micro-controller, *Solar Energy* **86**: 1477–1484.

Mukerjee, A. and Dasgupta, N. (2007). Dc power supply used as photovoltaic simulator for testing mppt algorithms, *Renewable Energy* **32**(4): 587 – 592.

Orellana, M., Petibon, S., Estibals, B. and Alonso, C. (2010). Four switch buck-boost converter for photovoltaic dc-dc power applications, *IECON - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 469–474.

Ortiz-Rivera, E. I. and Peng, F. Z. (2005). Analytical model for a photovoltaic module using the electrical characteristics provided by the manufacturer data sheet, *IEEE 36th Power Electronics Specialists Conference*, pp. 2087–2091.

Ren, X., Ruan, X., Qian, H., Li, M. and Chen, Q. (2009). Three-mode dual-frequency two-edge modulation scheme for four-switch buck-boost converter, *IEEE Transactions on Power Electronics* **24**(2): 499–509.

Sampaio, P. G. V. and Gonzalez, M. O. A. (2017). Photovoltaic solar energy: Conceptual framework, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **74**: 590 – 601.

Trapp, J. G., de Lima, L. P., Farret, F. A., Fernandes, F. T. and Balen, G. (2011). Fc and pv emulation by buck converter based on experimental vxi curves and dynamic response, *XI Brazilian Power Electronics Conference*, pp. 984–991.