

CARACTERIZADOR ELÉTRICO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS UTILIZANDO O CONVERSOR CC-CC ĆUK

Thiago A. Pereira, Walbermark M. dos Santos, Denizar C. Martins, Roberto F. Coelho
 Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Instituto de Eletrônica de Potência – INEP, Florianópolis, SC, Brasil
 e-mail: thiago.pereira@inep.ufsc.br, walbermark@inep.ufsc.br, denizar@inep.ufsc.br, roberto@inep.ufsc.br

Resumo – Neste artigo apresenta-se uma metodologia utilizada para projetar um conversor Ćuk de 300 W que opere como caracterizador elétrico de módulos fotovoltaicos. O protótipo projetado é de fácil operação, portátil e permite a transferência das grandezas medidas (tensão, corrente, irradiância solar e temperatura) a um computador pessoal, por meio de comunicação serial. A partir destas grandezas são traçadas as curvas I-V e P-V e extraídos os cinco parâmetros que descrevem o circuito elétrico equivalente do módulo fotovoltaico ensaiado. De posse destes parâmetros, é possível replicar o comportamento do módulo fotovoltaico em ambiente de simulação, sob quaisquer condições de irradiância solar e temperatura. A fim de validar a precisão do caracterizador desenvolvido, as curvas I-V e P-V por meio dele obtidas são comparadas com as provenientes do traçador *Profitest PV*, fabricado pela empresa alemã *Grossen Metrawatt*.

Palavras-Chave – Caracterizador elétrico, Conversor Ćuk, Módulos fotovoltaicos.

ELECTRICAL CHARACTERIZER OF FOTOVOLTAIC MODULES USING THE DC-DC ĆUK CONVERTER

Abstract – This paper presents a methodology employed to design and a Ćuk converter of 300 W, applied as an electrical characterizer of photovoltaic modules. The designed prototype is autonomous, portable and permits to transfer the measured data (voltage, current, solar irradiance and temperature) to a personal computer via serial communication. From these data, the I-V and P-V curves are plotted and the five parameters that describe the electrical circuit of the photovoltaic module under test are obtained. Thus, it is possible to replicate the photovoltaic module behavior in a simulated platform, under any solar irradiance and temperature conditions. In order to validate the accuracy of the developed characterizer, the curves obtained through it are compared with those obtained from the use of a *Profitest PV* tracer, manufactured by German company *Grossen Metrawatt*.

Keywords – Ćuk Converter, Electrical characterizer, Photovoltaic modules.

Artigo submetido em 25/07/2016. Primeira revisão em 22/09/2016. Aceito para publicação em 02/11/2016 por recomendação do Editor Marcelo Cabral Cavalcanti.

I. INTRODUÇÃO

A célula fotovoltaica é o elemento base na geração fotovoltaica, capaz de gerar potências entre 3 W e 5 W, dependendo de suas dimensões e do material utilizado em sua confecção. Tipicamente, com o intuito de elevar a potência gerada, células fotovoltaicas são eletricamente conectadas em série e mecanicamente encapsuladas em uma estrutura rígida, denominada de módulo fotovoltaico [1].

Um módulo fotovoltaico pode ser representado pelo circuito elétrico equivalente ilustrado na Figura 1, em que I_{ph} representa a corrente fotogerada pela interação fóton-elétron, R_S a resistência série que modela as perdas nos contatos elétricos e R_P a resistência paralela que adiciona ao modelo as perdas por fuga de corrente. O diodo D , ao ser introduzido, confere ao circuito as características semicondutoras inerentes ao comportamento do módulo, enquanto as variáveis V_{pv} e I_{pv} descrevem a tensão e a corrente de saída, respectivamente. Matematicamente, a corrente I_{pv} é descrita como uma função de V_{pv} e dela própria, apresentando, portanto, comportamento não linear, conforme:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_D - I_{R_P}. \quad (1)$$

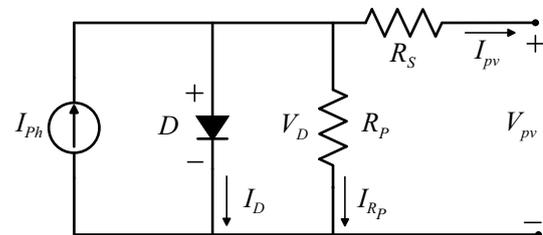


Fig. 1. Modelo elétrico equivalente de um módulo fotovoltaico.

As grandezas I_{ph} , I_D e I_{R_P} são calculadas por meio de (2), (3) e (4) respectivamente, em que S representa a irradiância incidente na superfície do módulo fotovoltaico e T sua temperatura de operação, enquanto $S_{ref}=1000 \text{ W/m}^2$ e $T_{ref}=25 \text{ }^\circ\text{C}$ representam estas mesmas grandezas na condição padrão de teste (*Standard Test Condition - STC*). A variável β é constante e representa a taxa de variação da corrente de curto circuito em função da temperatura ($\text{A}/^\circ\text{C}$), sendo fornecida pelo fabricante de cada módulo; $q=1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ é a carga do elétron, $k=1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ é a constante de Boltzmann e $E_G=1,12 \text{ eV}$ (para o silício) é a energia de banda proibida do semicondutor [1], [2].

$$I_{ph} = \frac{S}{S_{ref}} I_{phref} + (T - T_{ref}) \beta \quad (2)$$

$$I_D = I_{oref} \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^3 \left[e^{\frac{q(V_{pv} + R_S I_{pv})}{AkT}} - 1 \right] e^{\frac{qE_G}{Ak} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right)} \quad (3)$$

$$I_{Rp} = \frac{V_{pv} + R_S I_{pv}}{R_p} \quad (4)$$

A determinação dos cinco parâmetros restantes nas referidas equações (I_{phref} , I_{oref} , R_S , R_p e A) tipicamente se dá a partir da solução de um sistema de cinco equações não lineares, as quais podem ser encontradas por meio da aplicação de cinco pontos de operação distintos em (1). Uma vez determinados tais parâmetros, as curvas características I-V (corrente *versus* tensão) e P-V (potência *versus* tensão) podem ser traçadas para diferentes valores de irradiância solar e de temperatura, tal como o exemplo ilustrado na Figura 2, referente ao módulo fotovoltaico HiS-M300MI, da *Hyundai*.

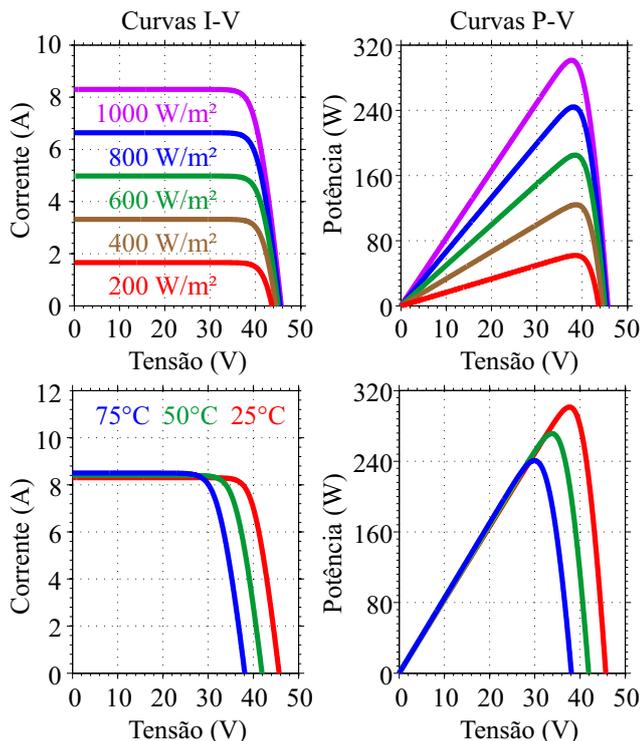


Fig. 2. Comportamento das curvas I-V e P-V do módulo fotovoltaico HiS-M300MI da *Hyundai* sob diversas condições de irradiância solar e de temperatura.

Conforme pode ser verificado, a irradiância e a temperatura apresentam influência significativa nos níveis de corrente, tensão e potência de saída de um módulo fotovoltaico. Desta forma, para que projetos de sistemas fotovoltaicos sejam otimizados, a caracterização dos módulos para obtenção experimental das curvas I-V e P-V torna-se uma etapa crucial, pois permite ao projetista dimensionar o sistema com base nos valores reais de operação e não mais pelos valores do *STC*. Além disso, a caracterização tem papel importante também na instalação, por fornecer informações que permitam acompanhar, por meio da análise das curvas I-V e P-V, o desempenho dos módulos ao longo do tempo, ressaltando degradações decorrentes do envelhecimento.

Com base nestas necessidades, apresenta-se neste artigo uma metodologia para projetar um caracterizador de módulos fotovoltaicos com potência de 300 W, desenvolvido a partir de um conversor *Ćuk* operando no Modo de Condução Contínua (MCC). Esta metodologia utiliza o conceito de

ciclos inteiros como ferramenta de dimensionamento, permitindo calcular o valor ótimo da potência do resistor a ser utilizado como carga do conversor. Além disso, o caracterizador proposto diferencia-se dos tradicionais traçadores de curvas I-V (*PV Tracers*), pelo fato de determinar o valor dos parâmetros I_{phref} , I_{oref} , R_S , R_p e A , a partir das curvas experimentalmente obtidas. Tal fato resulta em modelos precisos que podem ser utilizados para extrapolar a operação do módulo fotovoltaico ensaiado em ambiente de simulação, sob quaisquer condições de irradiância solar e de temperatura.

II. SELEÇÃO DO MÉTODO DE CARACTERIZAÇÃO ELÉTRICA DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

O princípio para obtenção experimental das curvas I-V e P-V consiste no monitoramento da corrente fornecida pelo módulo fotovoltaico para uma excursão completa da tensão aplicada entre seus terminais, desde zero até a tensão de circuito aberto. Diferentes métodos foram propostos na literatura com essa finalidade, sendo eles: método do resistor variável; da carga capacitiva; da carga eletrônica; do amplificador de potência; do conversor de quatro quadrantes e do conversor cc-cc [3].

Dentre os métodos anteriormente citados, o que utiliza conversores cc-cc mostra-se mais adequado à aplicação proposta, pois tais conversores tipicamente apresentam elevada densidade de potência (W/cm^3), facilitando sua acomodação em um pequeno gabinete.

Em termos de funcionamento, o método do cc-cc baseia-se no fato de que a resistência equivalente vista pelo módulo fotovoltaico varia em função da resistência da carga alocada na saída do conversor e de sua razão cíclica de operação. Dessa forma, ao variar a razão cíclica, altera-se a referida resistência, bem como a tensão e a corrente fornecida pelo módulo fotovoltaico [3]. A Figura 3 apresenta o diagrama do método proposto.

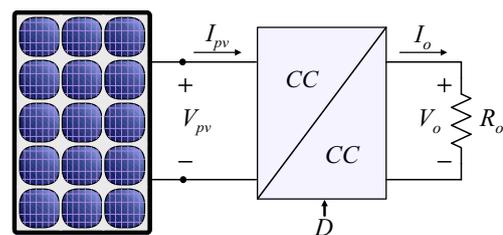


Fig. 3. Diagrama elétrico do caracterizador de módulos fotovoltaicos por meio do método do conversor cc-cc.

Para que o caracterizador opere corretamente, o conversor cc-cc empregado deve ser capaz de varrer completamente a curva I-V durante a excursão da razão cíclica entre 0 e 1. Dentre as topologias de conversores cc-cc com tal característica [4], [5], adotou-se o conversor *Ćuk*, por também apresentar entrada e saída com características de fonte de corrente, fato que elimina a necessidade de uso de filtro de entrada e proporciona a retirada do capacitor de saída, em virtude de a ondulação de tensão na carga não ser relevante à operação do caracterizador (o interesse está nas grandezas de entrada V_{pv} e I_{pv}). A Figura 4 ilustra o diagrama de blocos do caracterizador proposto neste trabalho.

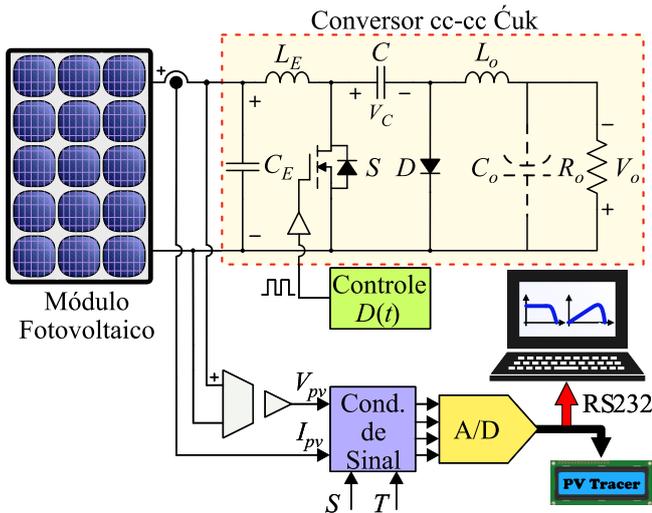


Fig. 4. Diagrama simplificado do caracterizador de módulos fotovoltaicos baseado no conversor cc-cc Ćuk, com ênfase à supressão do capacitor de saída C_o .

Em termos gerais, o caracterizador opera da seguinte forma: o conversor Ćuk emula uma resistência cujo valor é modificado por meio da variação da razão cíclica. A tensão e a corrente de saída do módulo, assim como a irradiância e a temperatura, são medidas, condicionadas e, posteriormente, acumuladas na memória RAM de um microcontrolador. Por intermédio do protocolo de comunicação RS-232, os dados são transferidos para um computador, para serem apresentados na forma das curvas I-V e P-V, mediante o emprego do *software* MATLAB[®]. Cinco pontos são, então, extraídos destas curvas e aplicados em (1), resultando na determinação dos cinco parâmetros do modelo elétrico equivalente da Figura 1.

III. CONVERSOR CC-CC ĆUK EMULANDO UMA RESISTÊNCIA VARIÁVEL

A razão cíclica D é definida como a razão entre o tempo de condução do interruptor (t_c) e período de comutação do conversor (T_s), tal como:

$$D = \frac{t_c}{T_s} \quad (5)$$

Sabendo que o ganho estático ideal do conversor Ćuk em MCC é dado por (6) e que a resistência R_o de carga é calculada por (7), obtém-se a resistência vista a partir dos terminais do módulo fotovoltaico, expressa por (8).

$$G(D) = \frac{V_o}{V_{pv}} = \frac{I_{pv}}{I_o} = \frac{D}{1-D} \quad (6)$$

$$R_o = \frac{V_o}{I_o} \quad (7)$$

$$R_{pv}(D, R_o) = \frac{V_{pv}}{I_{pv}} = R_o \left(\frac{1-D}{D} \right)^2 \quad (8)$$

A grandeza $R_{pv}(D, R_o)$ pode ser entendida como uma resistência variável, cujo valor depende da resistência de carga R_o e da razão cíclica D [3]. Logo, o conversor cc-cc Ćuk acrescido de uma carga resistiva de valor fixo, é visto

pele módulo fotovoltaico como uma resistência variável dependente da razão cíclica, isto é, $R_{pv}(D)$ [4], [5]. Em outras palavras, fixando-se o valor de R_o , consegue-se, por meio da variação de D , alterar o ponto de operação do módulo ao longo das curvas I-V e P-V. Na Figura 5 ilustra-se a resistência equivalente vista pelo módulo fotovoltaico e uma tabela retratando os limites dessa resistência para os conversores cc-cc básicos não isolados.

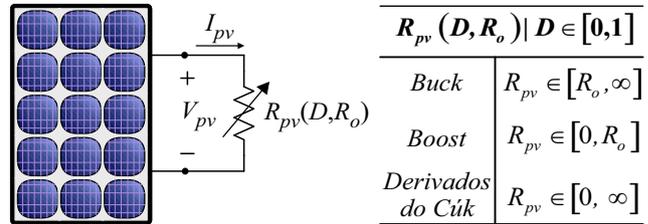


Fig. 5. Resistência equivalente de entrada vista pelo módulo fotovoltaico considerando-se o emprego dos conversores básicos não isolados [4].

Cada ponto sobre a curva I-V representa um ponto de operação ao qual está associado um par ordenado (I_{pv}, V_{pv}) . Os limites extremos da curva são os pontos de circuito aberto $(0, V_{ca})$ e de curto circuito $(I_{cc}, 0)$. A Figura 6 ilustra a variação do par ordenado (I_{pv}, V_{pv}) entres os dois limites extremos. Percebe-se que a variação pode ser realizada no sentido horário, Figura 6 (a), partindo-se do ponto de circuito aberto (resistência tendendo a infinito) em direção ao ponto de curto-circuito (resistência tendendo a zero) ou no sentido oposto, Figura 6 (b), partindo-se do ponto de curto-circuito em direção ao de circuito aberto. A flexibilidade do método do conversor cc-cc quanto ao sentido de medição possibilita efetuar varreduras contínuas e consecutivas das curvas I-V e P-V, ou mesmo medir regiões específicas das curvas, como por exemplo, os entornos do ponto de máxima potência, representando por P_{mp} .

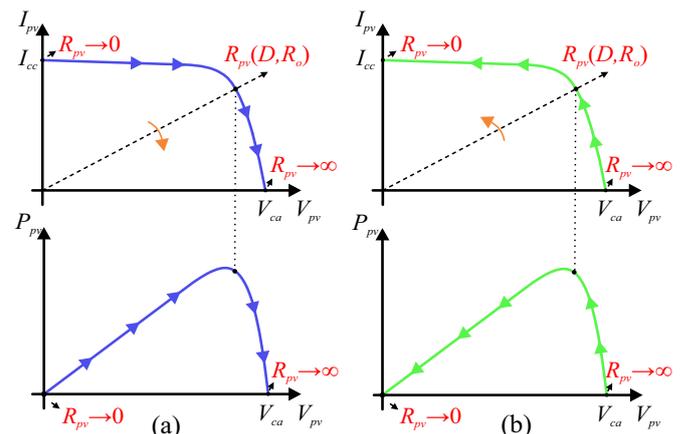


Fig. 6. Variação da resistência efetiva de entrada ao longo da curva I-V e P-V. (a) sentido horário: razão cíclica variando de 1 até 0; (b) sentido anti-horário: razão cíclica variando de 0 de 1.

Cabe salientar que a varredura das curvas I-V e P-V é realizada à medida que a razão cíclica de operação do conversor é incrementada ou decrementada, dependendo do sentido escolhido. O tempo t_V de duração do ciclo de varredura exerce função importante na qualidade das curvas obtidas e deve ser criteriosamente escolhido: t_V deve ser

suficientemente grande para que as leituras de tensão e de corrente ocorram sempre após o conversor ter alcançado um novo ponto de operação; t_V deve ser suficientemente pequeno para garantir que o traçado das curvas seja realizado sob irradiação e temperatura constantes.

Ademais, o tempo de permanência do módulo fotovoltaico em cada ponto de operação se traduz em maior ou menor energia dissipada no resistor de carga. Obviamente, por se tratar de um sistema portátil, é de extrema relevância reduzir a energia dissipada neste resistor, evitando a geração excessiva de calor dentro do gabinete. À luz deste fato, realizou-se um estudo para decidir a melhor forma de variar a razão cíclica D dentro do período de varredura t_V : em um primeiro caso, a razão cíclica foi incrementada/decrementada de forma linear, enquanto o ganho do conversor, descrito por (6), apresentou comportamento não linear. No segundo caso, o ganho do conversor foi variado de forma linear, resultando em uma evolução não linear da razão cíclica.

Embora idealmente a razão cíclica possa variar entre 0 e 1, na implementação prática foi limitada a $D_{max}=0,95$; assim, impondo-se $t_V=1$ s, as equações que descrevem a variação linear da razão cíclica $d_L(t)$ e a variação não linear do ganho estático $G_{NL}(t)$, podem ser expressas por:

$$d_L(t) = \frac{D_{max}}{t_V} t = 0,95t \quad (9)$$

$$G_{NL}(t) = \frac{d(t)}{1-d(t)} = \frac{D_{max}t}{t_V - D_{max}t} = \frac{0,95t}{1-0,95t} \quad (10)$$

Alternativamente, pode-se fazer o ganho estático variar de forma linear $G_L(t)$, desde que a razão cíclica varie não linearmente $d_{NL}(t)$, tal como expressa (11), sendo α a taxa de crescimento do ganho estático no decorrer do tempo. Novamente, considerando que o ganho máximo é $D_{max}=0,95$ e que ocorre em $t=t_V=1$ s, encontram-se (12) e (13).

$$G_L(t) = \alpha t = \frac{d(t)}{1-d(t)} \quad (11)$$

$$\alpha = 19$$

$$G_L(t) = 19t \quad (12)$$

$$d_{NL}(t) = \frac{19t}{1+19t} \quad (13)$$

Para efeitos de comparação, os resultados obtidos são apresentados sob a forma gráfica na Figura 7 (a) e (b).

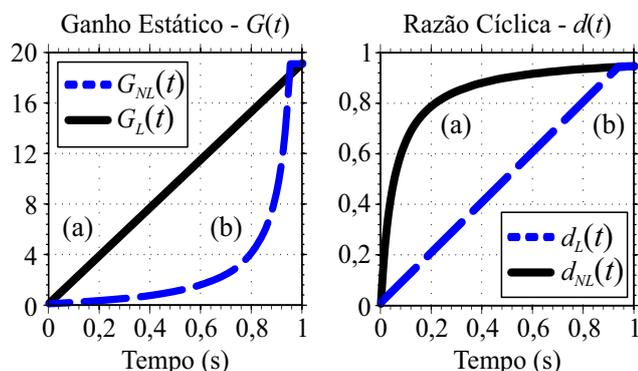


Fig. 7. (a) Ganho Estático Linear versus Razão Cíclica Não Linear; (b) Ganho Estático Não Linear versus Razão Cíclica Linear.

Conforme será verificado adiante, a escolha pela implementação do método com razão cíclica não linear permite reduzir a energia transferida ao resistor de saída durante o ciclo de varredura e, portanto, será a utilizada.

IV. ANÁLISE, PROJETO E DIMENSIONAMENTO DO CONVERSOR CC-CC ĆUK

A teoria referente ao projeto do conversor Ćuk pode ser explorada com maior profundidade em [6]. Para determinar os elementos passivos que compõem este conversor é necessário primeiramente especificar os valores máximos de corrente, tensão e potência a serem processados, tal como é evidenciado na Tabela I.

TABELA I
Especificações de Tensão, Corrente e Potência Máxima para Projeto do Conversor Ćuk

Tensão de circuito aberto - V_{ca}	50 V
Corrente de curto-circuito - I_{cc}	10 A
Ponto de máxima potência - P_{mp}	300 W

Distintamente de um projeto convencional de conversores cc-cc, não há interesse em manter as grandezas de saída constantes. Desse modo, a fim de reduzir o tamanho dos componentes reativos de saída, optou-se por dispensar as baixas ondulações de saída tipicamente requeridas. Sendo assim, o capacitor de saída C_o foi suprimido. Adicionalmente, como o aumento da potência fornecida pelo módulo fotovoltaico implica elevação das ondulações de tensão e de corrente nos elementos do conversor, o dimensionamento foi realizado considerando este ponto de operação, isto é, $P=P_{max}=300$ W. As demais especificações de projeto seguem listadas na Tabela II.

TABELA II
Especificações para Projeto do Conversor Ćuk

Frequência de comutação	f_s	100 kHz
Máxima ondulação da corrente de entrada	ΔI_E	20 % de I_E
Máxima ondulação da tensão de entrada	ΔV_E	1 % de V_E
Máxima ondulação da corrente de saída	ΔI_o	50 % de I_o
Máxima ondulação da tensão de saída	ΔV_o	50 % de V_o
Máxima ondulação da tensão no capacitor Ćuk	ΔV_C	20 % de V_C

Ainda, para fins de projeto, utilizaram-se as informações do módulo fotovoltaico HiS-M300MI de 300 W, da Hyundai, especificados no *STC* conforme a Tabela III [7].

TABELA III
Características Elétricas (STC) do HiS-M300MI

V_{mp}	37,7 V	I_{mp}	8,0 A
I_{mp}	8,0 A	I_{cc}	8,3 A

O primeiro passo do dimensionamento do conversor consiste em fixar uma resistência de carga que permita a excursão completa da corrente entre 0 e I_{cc} . Embora alguns autores utilizem o ponto de máxima potência para encontrar o valor da referida resistência [8]-[12], esta não é a metodologia aconselhável, pois geralmente resulta em resistores superdimensionados.

Uma abordagem apropriada deve considerar a potência média entregue ao resistor em um período de varredura, de modo que o componente suporte, ao longo das sucessivas medições, as solicitações térmicas oriundas do efeito joule, sem, todavia, apresentar volume superior ao necessário. Para

tanto, elaborou-se uma metodologia de cálculo que resulta em um valor teórico de potência que se aproxima daquela em que o resistor estará, de fato, submetido, tal como será demonstrado.

A. Potência do Resistor de Carga – P_{Ro}

Inicialmente será determinada a potência do resistor de carga e, em seguida, seu valor. A metodologia adotada é similar à utilizada no Controle por Ciclos Inteiros [13], contudo, utilizando-se a curva P-V no lugar da tradicional forma de onda senoidal. Adicionalmente, devido ao fato de a função que descreve a curva P-V ser transcendental e demandar um grande esforço matemático para ser solucionada, propõe-se neste artigo aproximá-la por uma forma triangular, conforme ilustra a Figura 8.

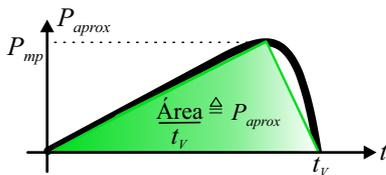


Fig. 8. Aproximação da curva para cálculo de P_{Ro} .

É possível, portanto, determinar o valor médio da potência gerada pelo módulo fotovoltaico no intervalo definido por um ciclo de varredura, cuja duração é t_V , tal como:

$$P_{aprox} = \frac{P_{mp}}{2}. \quad (14)$$

Assim sendo, definindo-se um período T como o intervalo de tempo a partir do qual são realizadas n varreduras consecutivas, obtém-se a representação gráfica ilustrada na Figura 9.

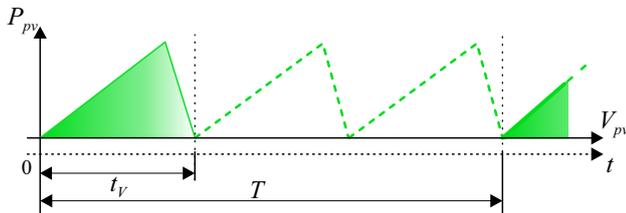


Fig. 9. - Representação gráfica das n varreduras consecutivas da curva aproximada com tempo morto (curva pontilhada).

Tal como na técnica de Controle por Ciclos Inteiros, o traçado de curvas P-V ocorre com transferência de potência por meio de pacotes de energia. Desta forma, por similaridade, a relação entre a potência média P_{aprox} gerada pelo módulo fotovoltaico e a potência P_{Ro} dissipada no resistor de carga durante o período T , fica estabelecida por:

$$P_{Ro} = \frac{t_V}{T} P_{aprox} = \frac{t_V}{T} \frac{P_{mp}}{2}. \quad (15)$$

Por fim, pode-se corrigir (15) por meio da introdução do fator k_a , de modo a se obter:

$$P_{Ro} = k_a \frac{t_V}{T} \frac{P_{mp}}{2}. \quad (16)$$

O fator de aproximação k_a foi determinado empiricamente a partir da comparação entre o valor da potência média calculada a partir da curva P-V com o valor obtido a partir da curva aproximada. As comparações foram realizadas utilizando-se treze módulos fotovoltaicos de diversos fabricantes. Os erros oriundos da comparação estabeleceram-se entre 5% e 15%; dessa forma, a fim de não tornar o resistor subdimensionado em potência, empregou-se $k_a = 1,2$.

Por fim, fazendo-se $t_V = 1$ s e $T = 5$ s em (16), encontra-se a potência do resistor de carga como sendo 36 W.

B. Resistência do Resistor de Carga – R_o

Para determinar R_o , inicialmente calcula-se seu valor mínimo, assumindo-se que dissipará a potência máxima, tal como:

$$R_{o_min} = \frac{V_{mp}^2}{P_{mp}} = \frac{(37,7 \text{ V})^2}{300 \text{ W}} \approx 5 \Omega. \quad (17)$$

Idealmente, não existe limite para o valor máximo da resistência de carga, pois o caracterizador é capaz de traçar as curvas de qualquer módulo fotovoltaico com potência nominal entre zero e 300 W, o que implica $R_o \in [5, \infty]$. Contudo, quantitativamente, assume-se que o menor valor de P_{mp} seja 50 W (condição de baixa irradiância solar), de maneira que a resistência de carga máxima passa ser dada por:

$$R_{o_max} = \frac{V_{mp}^2}{P_{mp}} = \frac{(37,7 \text{ V})^2}{50 \text{ W}} = 28 \Omega. \quad (18)$$

Portanto, adotando um valor de resistência pertencente ao intervalo $5 \Omega < R_o < 28 \Omega$, optou-se por utilizar $R_o = 20 \Omega$. Ressalta-se que o valor deste resistor, quando enquadrado no intervalo especificado, não influencia o processo de varredura da curva I-V, desde que seja capaz de dissipar a potência gerada em um ciclo de varredura.

C. Ganho Estático no Ponto de Operação – $G(D)$

$$G(D) = \sqrt{\frac{R_o}{R_{pv}}} = \sqrt{\frac{I_{mp}}{V_{mp}} R_o} = \sqrt{\frac{8,0 \text{ A}}{37,7 \text{ V}} 20 \Omega} = 2,0601$$

D. Razão Cíclica no Ponto de Operação – D

$$D = \frac{G(D)}{1 + G(D)} = \frac{2,0601}{3,0601} = 0,6732$$

E. Tensão Média no Capacitor de Acumulação $\acute{C}uk - V_{cméd}$

$$V_{Cmed} = \frac{V_{pv} G(D)}{D} = \frac{(37,7 \text{ V}) 2,0601}{0,6732} = 115,37 \text{ V}$$

F. Capacitância de Acumulação $\acute{C}uk - C$

$$C = \frac{I_{mp}(1-D)}{f_s \Delta V_C} = \frac{(8 \text{ A})(1-0,6732)}{(100 \text{ kHz})(23,07344)} = 1,133 \mu\text{F}$$

G. Indutância de Entrada – L_E

$$L_E = \frac{V_{mp} D}{f_s \Delta I_E I_{mp}} = \frac{(37,7 \text{ V})(0,6732)}{(100 \text{ kHz})(0,2)(8 \text{ A})} = 158,62 \mu\text{H}$$

H. Indutância de Saída – L_o

$$L_o = \frac{G(D)V_{mp} D}{f_s \Delta I_o I_{mp}} = \frac{(2,06)(37,7 \text{ V})(0,6732)}{(100 \text{ kHz})(0,5)(8 \text{ A})} = 130,71 \mu\text{H}$$

I. Capacitância de Entrada - C_E

$$C_E = \frac{4\Delta I_E}{\pi^3 f_s \Delta V_{CE}} = \frac{4(0,2)(8 \text{ A})}{\pi^3 (100 \text{ kHz})(0,01)(37,7)} = 5,475 \mu\text{F}$$

A Tabela IV apresenta um resumo dos valores comerciais utilizados na montagem do conversor Ćuk.

TABELA IV Resumos de Valores dos Componentes do Conversor Ćuk	
Capacitor da entrada - C_E	4,7 μF
Indutor da entrada - L_E	158,622 μH
Capacitor de acumulação Ćuk - C	1,0 μF
Indutor da saída - L_o	130,711 μH
Resistor de carga - R_o	20 Ω / 36 W

V. SIMULAÇÃO

A partir das informações contidas na Tabela IV e utilizando o *software* de simulação PSIM®, foi realizado um conjunto de simulações com o intuito de validar a metodologia de dimensionamento do conversor Ćuk e de obtenção das curvas. Nas simulações empregou-se o circuito elétrico da Figura 10, comandado sob duas formas: (a) razão cíclica variando de forma linear; (b) razão cíclica variando de forma não linear.

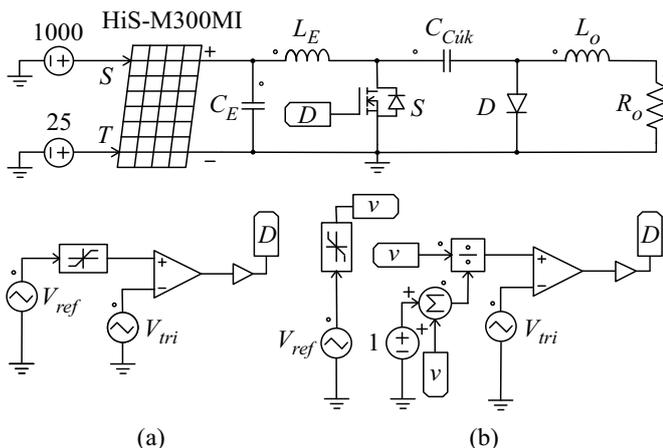


Fig. 10. Circuito elétrico do conversor Ćuk empregado na simulação: (a) razão cíclica linear; (b) razão cíclica não linear.

Como resultado obteve-se a Figura 11, a partir da qual se verifica que a potência média gerada, dentro do intervalo de varredura, é menor para o caso onde a razão cíclica é não linear. Assim, visando o menor aquecimento do resistor de carga, este método foi adotado na realização prática.

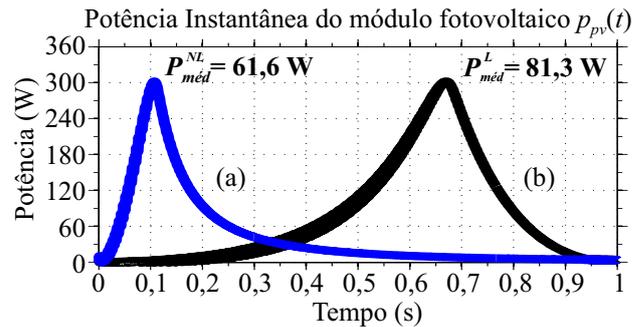


Fig. 11. Potência instantânea fornecida pelo módulo fotovoltaico HiS-M300MI ao resistor de carga em um período de varredura, considerando $t_V = T = 1 \text{ s}$, para a razão cíclica não-linear (NL) e linear (L) obtida por meio de simulação no *software* PSIM®.

Em seguida, obtiveram-se as curvas I-V e P-V do módulo HiS-M300MI [7], como mostra a Figura 12.

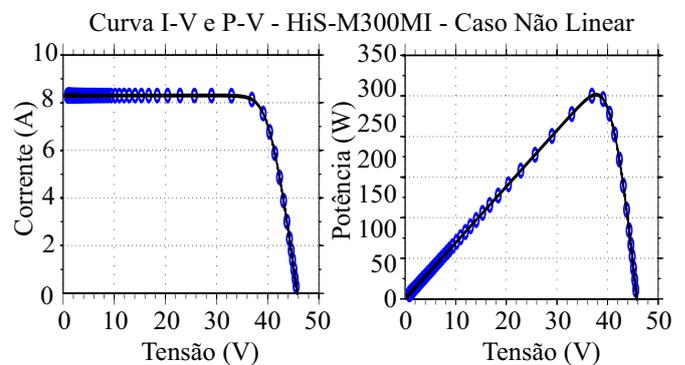


Fig. 12. Curvas I-V e P-V do módulo fotovoltaico HiS-M300MI obtidas a partir de simulação com razão cíclica não linear.

VI. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Com o intuito de validar o funcionamento do caracterizador proposto, construiu-se o protótipo destacado na Figura 13 e Figura 14, a partir do qual foram realizados ensaios com diversos módulos fotovoltaicos, dentre eles o KC200GT, KB260 e SV290D. A título de comparação, utilizou-se o instrumento de ensaio *ProfiTest PV* como referência, que consiste em um equipamento destinado à traçar curvas I-V. As Figuras 15, 16 e 17 apresentam os resultados de medição para os módulos KC200GT, KB260 e SV290D.

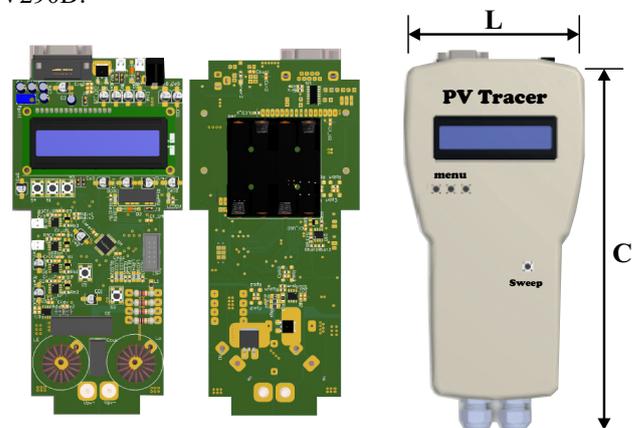


Fig. 13. Imagem do caracterizador elétrico e dispositivo encapsulado em um gabinete de 100 x 220 mm (L x C).



Fig. 14. Protótipo do caracterizador elétrico encapsulado em um gabinete de 100 x 220 mm (L x C).

Curvas I-V e P-V KC200GT - Caracterizador x *Profitest PV*
 $S = 829,83 \text{ W/m}^2$ e $T = 44,1 \text{ }^\circ\text{C}$

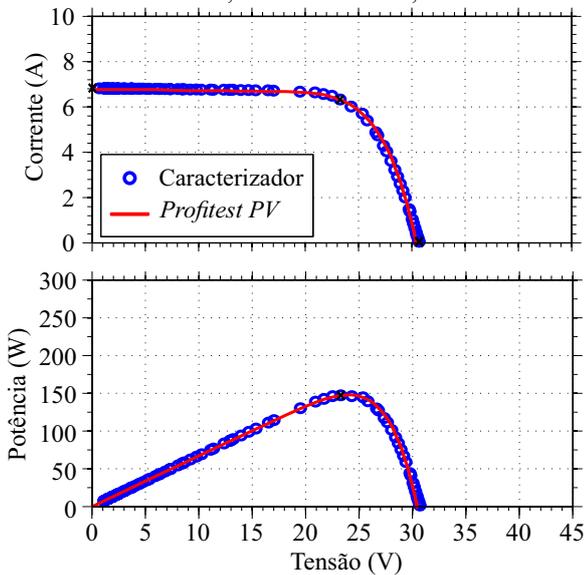


Fig. 14. Resultado experimental da caracterização elétrica do módulo fotovoltaico KC200GT.

Curvas I-V e P-V KB260 - Caracterizador x *Profitest PV*
 $S = 954,24 \text{ W/m}^2$ e $T = 51,4 \text{ }^\circ\text{C}$

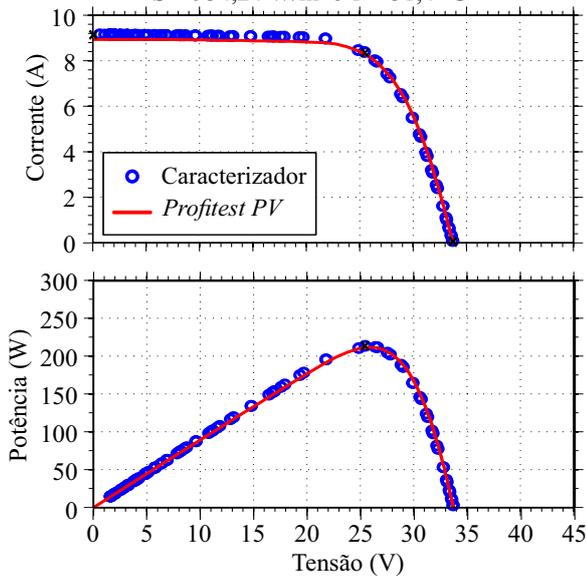


Fig. 16. Resultado experimental da caracterização elétrica do módulo fotovoltaico KB260.

Curvas I-V e P-V SV290D - Caracterizador x *Profitest PV*
 $S = 972,4 \text{ W/m}^2$ e $T = 55 \text{ }^\circ\text{C}$

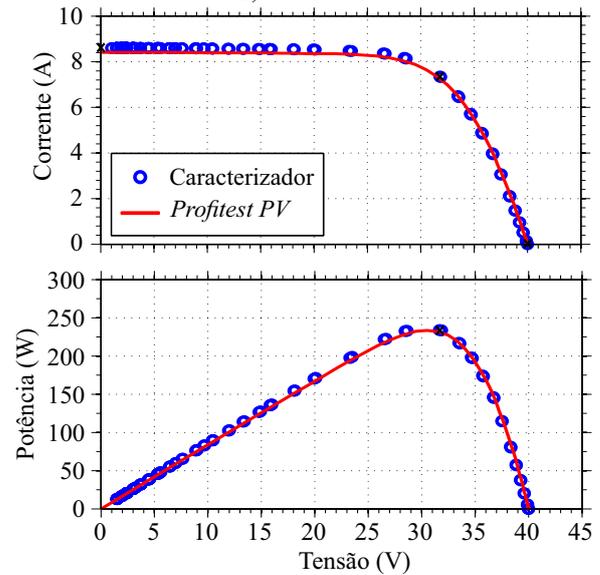


Fig. 17. Resultado experimental da caracterização elétrica do módulo fotovoltaico SV290D.

Os testes foram realizados com a leitura simultânea de irradiância e de temperatura, além dos valores de tensão e de corrente de saída do módulo fotovoltaico, como é destacado na Tabela V, que apresenta também o erro relativo entre os resultados provenientes do caracterizador e do *Profitest PV*, validando a exatidão do caracterizador desenvolvido.

Mediante à aplicação de cinco pares de pontos (I_{pv} , V_{pv}), extraídos das curvas experimentalmente obtidas, conforme ilustra a Figura 18, em (1) à (4), encontraram-se, por meio de um algoritmo implementado em MATLAB®, os cinco parâmetros elétricos do referido módulo, ilustrados na Tabela VI. O algoritmo desenvolvido utiliza o Método de *Newton-Raphson* para determinar o vetor solução do sistema de cinco de equações não lineares.

TABELA V
Grandezas Elétricas do Módulo Fotovoltaico KC200GT, KB260 e SV290D

Medido	Referência (<i>Profitest PV</i>)	Erro (%)
V_{mp} 23,283 V	V_{mp} 24,261 V	4,031
I_{mp} 6,330 A	I_{mp} 6,099 A	3,783
V_{ca} 30,777 V	V_{ca} 30,468 V	1,013
I_{cc} 6,821 A	I_{cc} 6,767 A	0,800
V_4 9,777 V	V_4 9,766 V	0,112
I_4 6,773 A	I_4 6,717 A	0,826
V_5 28,667 V	V_5 28,710 V	0,150
I_5 2,925 A	I_5 2,991 A	2,256
V_{mp} 25,44 V	V_{mp} 25,696 V	0,982
I_{mp} 8,385 A	I_{mp} 8,232 A	1,863
V_{ca} 33,771 V	V_{ca} 33,762 V	0,025
I_{cc} 9,153 A	I_{cc} 8,930 A	2,493
V_4 9,586 V	V_4 9,897 V	3,244
I_4 9,118 A	I_4 8,909 A	2,292
V_5 31,310 V	V_5 31,401 V	0,290
I_5 3,809 A	I_5 3,868 A	1,629
V_{mp} 31,805 V	V_{mp} 30,504 V	0,446
I_{mp} 7,355 A	I_{mp} 7,654 A	3,902
V_{ca} 40,042 V	V_{ca} 40,048 V	0,016
I_{cc} 8,617 A	I_{cc} 8,414 A	2,418
V_4 11,936 V	V_4 11,668 V	2,245
I_4 8,576 A	I_4 8,391 A	2,157
V_5 37,500 V	V_5 37,601 V	0,270
I_5 3,068 A	I_5 3,071 A	0,094

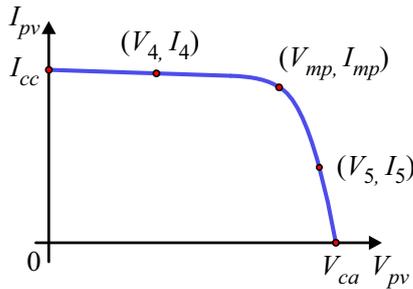


Fig. 18. Pontos de operações extraídos da curva I-V para compor o sistema de cinco equações não lineares.

TABELA VI

Parâmetros Elétricos do Módulo Fotovoltaico KC200GT, KB260 e SV290D Obtidas nas Condições de Testes

	KC200GT	KB260	KB260
I_{ph}	6,834 A	9,165 A	8,632 A
I_0	238,214 nA	854,456 nA	276,577 nA
A	1,216	1,245	1,141
R_S	0,006830 Ω	0,005775 Ω	0,006799 Ω
R_P	3,0760526 Ω	4,452135 Ω	4,024952 Ω

Novamente, como forma de comparação, utilizaram-se os parâmetros listados na Tabela VI como entrada da equação (1) e do modelo físico de módulo fotovoltaico disponibilizado pelo *software* PSIM[®]. Como resultado, obtiveram as curvas I-V e P-V ilustrados na Figura 19, que evidenciam a total conformidade entre as curvas obtidas a partir do caracterizador e do modelo do *software* PSIM[®].

Curvas I-V e P-V do Módulo Fotovoltaico SV290D

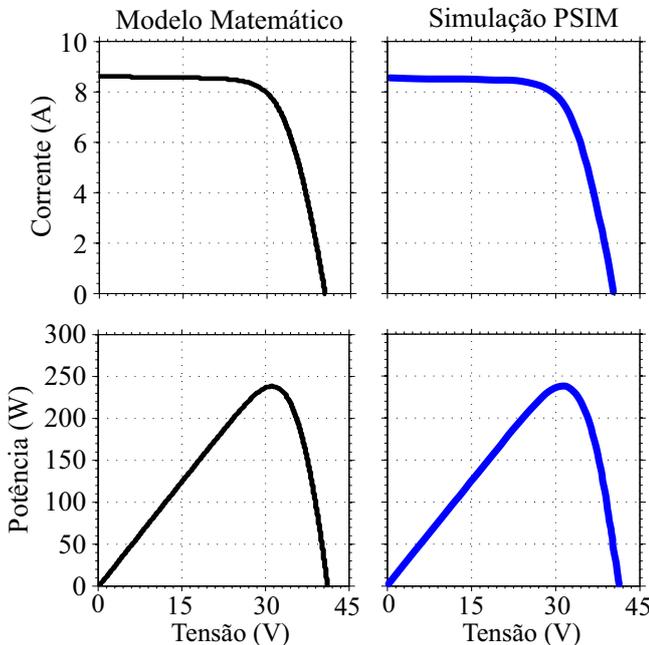


Fig. 19. Comparação entre as curvas I-V e P-V do módulo fotovoltaico SV290D obtidas por meio do modelo matemático e pelo PSIM[®] ao utilizarem-se os parâmetros elétricos da Tabela VI.

Por fim, mediante a análise da Figura 20, obtida por meio da câmera térmica FLIR SC600 nota-se que a operação do conversor com razão cíclica não linear, de fato, proporciona o menor aquecimento do resistor de carga. Na Tabela VII são

apresentados os valores de temperaturas medidos em quatro pontos diferentes ao redor de R_o para ambos os casos: razão cíclica linear e não linear, considerando $t_V = 1$ s, $T = 5$ s e 4 s de tempo morto durante um minuto, ou seja, foram realizados doze varreduras consecutivas. A Figura 20 retrata a distribuição térmica nos resistores exatamente após o término da décima segunda varredura.

Obviamente, em aplicações práticas, pode-se aumentar o tempo morto em função do valor limite de temperatura admitida no interior do gabinete. Isso significa que o valor máximo de temperatura é uma variável a ser definida na etapa de projeto, e não um fator que inviabilize a realização prática do caracterizador.

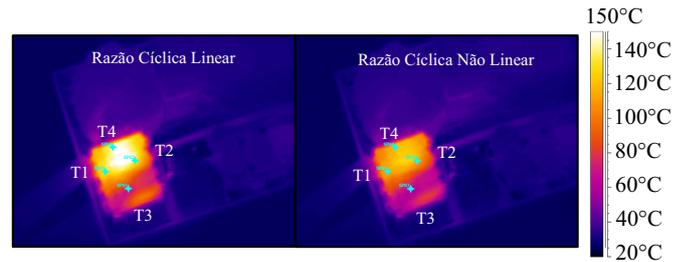


Fig. 20. Teste realizado com a câmera térmica FLIR SC600 para análise da elevação de temperatura no resistor de carga R_o .

TABELA VII

Valores de Temperatura Obtidos na Medição Apresentada na Figura 16

Ponto Medido	D linear	D não linear
T1	129,1 °C	112,3 °C
T2	136,2 °C	115,1 °C
T3	75,0 °C	63,6 °C
T4	145,4 °C	119,8 °C

VII. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou uma metodologia para desenvolvimento de um sistema de caracterização elétrica de módulos fotovoltaicos de até 300 W. As curvas I-V e P-V encontradas a partir do caracterizador proposto mostraram-se em total conformidade com as obtidas pelo equipamento comercial *Profitest PV*, validando a metodologia de dimensionamento proposta e também a escolha do método de caracterização. A metodologia de projeto utilizada possibilitou miniaturizar o conversor *Ćuk* e, então, integrá-lo ao sistema de controle e condicionamento. Outro aspecto preponderante concerniu no tipo de razão cíclica não linear empregado, que possibilitou uma considerável redução da potência média dissipada nos resistores e, deste modo, o encapsulamento do sistema em um gabinete portátil. O próximo passo do trabalho consiste em implementar um *software* multiplataforma a ser integrado ao *hardware* e então fornecer as curvas e os parâmetros diretamente sem o auxílio do MATLAB[®].

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES, CNPq e FINEP pelo apoio financeiro, e ao INEP pela estrutura física disponibilizada para realização deste trabalho.

- [1] F. Coelho, *Concepção, análise e implementação de uma microrrede interligada à rede elétrica para alimentação ininterrupta de cargas cc a partir de fontes renováveis*. Tese de doutorado, Departamento de Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2013.
- [2] D. L. S. Solano, *Sistema de supervisão e controle de geração solar fotovoltaica para aplicação em microrredes inteligentes*. Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2011.
- [3] E. Duran, M. Piliouguine, M. Sidrach-de-Cardona, Gala, x, J. n, et al., "Different methods to obtain the IxV curve of PV modules: A review", in *Photovoltaic Specialists Conference*, pp. 1-6, 2008.
- [4] R. F. Coelho, F. Concer, and D. C. Martins, "A study of the basic DC-DC converters applied in maximum power point tracking", in *Brazilian Power Electronics Conference*, pp. 673-678, 2009.
- [5] R. F. Coelho, *Estudo dos conversores Buck e Boost aplicados ao rastreamento de máxima potência de sistemas solares fotovoltaicos*, Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2008.
- [6] D. C. Martins and I. Barbi, *Conversores CC-CC Básicos Não Isolados*, 4ª ed., 2011.
- [7] Hyundai Solar Module Photovoltaic – HiS-M300MI, "Hyundai Solar", 2016 [online]. Disponível: <http://www.hhi-green.com/solar/en/main>.
- [8] E. Durán, J. M. Andújar, J. M. Enrique, and J. M. Pérez-Oria, "Determination of PV Generator I-V/P-V Characteristic Curves Using a DC-DC Converter Controlled by a Virtual Instrument," *International Journal of Photoenergy*, vol. 2012, Article ID 843185, 13 pages, 2012.
- [9] M. Kazerani, "A High-Performance Controllable DC Load", in *International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, pp. 1015-1020, 2007.
- [10] V. Boscaïno, G. Cipriani, V. Di Dio, R. Miceli, A. Pulizzotto, and R. Rizzo, "A standard-compliant prototype for PV module curve detection", in *Renewable Power Generation Conference (RPG 2014)*, pp. 1-6, 2014.
- [11] Lima, N. N.; Coelho, E. A. A.; Freitas, L. C. G; Buiatti, G. M.; Freitas, L. C.; V. Junior, J. B. "Sistema de Caracterização de Painéis Fotovoltaicos de Baixo Custo Para Detecção de Falhas". In: *XIX Congresso Brasileiro de Automática*, 2012.
- [12] E. Duran, Gala, x, J. n, M. Sidrach-de-Cardona, and J. M. Andujar, "A New Application of the Buck-Boost-Derived Converters to Obtain the I-V Curve of Photovoltaic Modules", in *Power Electronics Specialists Conference*, pp. 413-417, 2007.
- [13] I. Barbi, *Eletrônica de potência*, 7ª ed.: Edição do autor, 2012.

Thiago Antonio Pereira, nascido em Florianópolis, é Tecnólogo em Mecatrônica Industrial (2011) pelo IFSC, Engenharia Elétrica (2016) pela UFSC. Atualmente é aluno de mestrado em Engenharia Elétrica da UFSC, desenvolvendo atividades de pesquisa e desenvolvimento no Instituto de Eletrônica de Potência (INEP). Suas áreas de interesse são: eletrônica de potência e industrial, sistemas de controle eletrônicos, acionamentos de máquinas elétricas, energia solar e eólica, microrredes CC e CA, transformadores de estado sólido (SST), UPS e qualidade do processamento da energia elétrica. Thiago A. Pereira é membro da SOBRAEP e do IEEE.

Walbermark Marques dos Santos, nascido em São Luís, Maranhão, Brasil, é Engenheiro Eletricista (2003) pela Universidade Federal do Maranhão (UFMA), Mestre e Doutor em Engenharia Elétrica na área de Eletrônica de Potência e Acionamentos Elétricos (2011) e (2016) pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), tendo desenvolvido seu trabalho de mestrado no Instituto de Eletrônica de Potência (INEP). Atualmente, é professor adjunto do Departamento em Engenharia Elétrica da UFES. Suas áreas de interesse são: eletrônica de potência e industrial, acionamentos de máquinas elétricas, energia solar e eólica, conversores multiportas, microrredes CC e CA, transformadores de estado sólido (SST), UPS, *link* magnético de alta frequência. Dr. Walbermark dos Santos é membro da SOBRAEP e da SBA.

Denizar Cruz Martins nasceu em São Paulo, SC, Brasil, em 24 de abril de 1955. Recebeu o título de Engenheiro Eletricista e Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, em 1978 e 1981, respectivamente, e o título de Doutor em Engenharia Elétrica pelo Instituto Nacional Politécnico de Toulouse, Toulouse, França, em 1986. Atualmente é professor titular do Departamento de Engenharia Elétrica da mesma instituição, onde desenvolve trabalhos nos seguintes temas: conversores estáticos CC-CC e CC-CA, correção de fator de potência, qualidade de energia, processamento eletrônico da energia solar fotovoltaica, redes ativas de distribuição, simulação de conversores estáticos e acionamento elétrico, Brasil. É membro do IEEE, da SOBRAEP e da SBA.

Roberto Francisco Coelho nasceu em Florianópolis, em agosto de 1982. Recebeu o título de Engenheiro Eletricista, Mestre e Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, em 2006, 2008 e 2013, respectivamente. Atualmente é professor do Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica da mesma instituição, onde desenvolve trabalhos relacionados ao processamento de energia proveniente de fontes renováveis e ao controle e estabilidade de microrredes. Prof. Roberto é membro do IEEE e da SOBRAEP.