

# ESTUDO E IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL DE UM TRAÇADOR DE CURVA I-V PARA MÓDULOS FOTOVOLTAICOS UTILIZANDO CONVERSORES CC-CC

Lucas Rafael de Brito Dantas – brito.lucasr@gmail.com

Eubis Pereira Machado – eubis.machado@univasf.edu.br

Universidade Federal do Vale do São Francisco, Colegiado de Engenharia Elétrica

**Resumo.** O presente trabalho busca o desenvolvimento computacional de um traçador de curvas a partir de conversores CC-CC de topologias Ćuk e SEPIC. As duas topologias mencionadas foram investigadas para empregar uma metodologia de projeto comum para o equipamento, a qual toma como base as possíveis variações das tensões e correntes dos componentes passivos. Por fim, foi implementado o projeto dos conversores nas duas topologias para frequência de chaveamento de 10 kHz e 100 kHz, com o propósito de obter a curva I-V do módulo fotovoltaico de especificação JAM72S03-370. Para os projetos implementados, observou-se que as topologias aplicadas conseguem realizar com sucesso a obtenção das curvas para as duas frequências propostas, tanto na operação em STC, quanto na operação em condição de irradiância reduzida.

**Palavras-chave:** Energia solar, Traçador de curvas I-V. Conversores CC-CC.

## 1. INTRODUÇÃO

A célula fotovoltaica é o elemento fundamental da geração fotovoltaica. A fim propiciar níveis de tensão mais adequados ao processo de conversão de energia, as células são agrupadas em módulos fotovoltaicos, que são construídos a partir de um conjunto de células pré-cabeadas em série, todas encapsuladas em pacotes resistentes às intempéries e aos choques mecânicos.

Na literatura, os módulos fotovoltaicos, geralmente, são representados por um circuito elétrico equivalente que seja capaz de reproduzir as curvas características I-V e P-V experimentadas pela carga conectada ao par de terminais, sendo os principais modelos reportados (Green, 1981; Fahrenbruch e Bube, 1983; De Soto *et al.*, 2006; Chin *et al.*, 2017): modelo ideal, no qual é considerado apenas a natureza semicondutora da célula fotovoltaica e a dependência da temperatura e irradiância; modelo a cinco parâmetros, que considera as perdas por correntes parasitas e pela resistência do material ao fluxo de corrente, modelo a quatro parâmetros que, para fins de simplicidade, exclui a resistência associada às perdas por corrente parasita e modelo a dois diodos, no qual é adicionado um segundo diodo ao circuito equivalente para representar melhor o efeito de recombinação dos pares. Nos modelos supracitados, é comum assumir como entradas os níveis irradiância e temperatura e, como saída, a corrente elétrica gerada pelo módulo fotovoltaico.

Devido ao *software* utilizado para a implementação do circuito proposto utilizar o modelo a cinco parâmetros, foi realizado o estudo deste modelo a fim de obter uma representação baseada em um módulo fotovoltaico comercial. O circuito equivalente que representa o modelo a cinco parâmetros de um módulo fotovoltaico é ilustrado na Fig. 1, o qual pode descrito pelas equações (De Soto *et al.*, 2006):

$$I = I_{ph} - I_o \left[ \exp \left( \frac{V + I N_s R_s}{N_s A V_T} \right) - 1 \right] - \frac{V + I N_s R_s}{R_p} \quad (1)$$

$$I_{ph} = \frac{G}{G_{ref}} I_{sc,ref} + (T - T_{ref}) k_i \quad (2)$$

$$I_o = \frac{I_{sc,ref}}{\exp \left( \frac{V_{oc,ref}}{N_s A V_{T,ref}} \right) - 1} \left( \frac{T}{T_{ref}} \right)^3 \exp \left[ \frac{q \epsilon_g}{A k} \left( \frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (3)$$

$$V_T = \frac{kT}{q} \quad (4)$$

Sendo  $I_{ph}$  a fotocorrente,  $I_o$  a corrente de saturação,  $N_s$  o número de células associadas em série,  $A$  o fator de idealidade,  $V_T$  a tensão térmica,  $G$  é a irradiância atual,  $G_{ref}$  a irradiância nas condições de referência,  $T$  a temperatura atual,  $T_{ref}$  a temperatura nas condições de referência,  $k_i$  é a constante de tensão/temperatura (informação contida no *datasheet* do

módulo),  $\epsilon_g$  a energia de *gap* do material que caracteriza as células (equivale a 1,12 eV para células de silício policristalino),  $q$  a carga do elétron ( $1.60217646 \times 10^{-19}$  C) e  $k$  a constante de Boltzmann ( $1.3806503 \times 10^{-23}$  J/K).

De acordo com as Eq. (1)-(4), os parâmetros a serem determinados são: fotocorrente ( $I_{ph}$ ), corrente de saturação reversa ( $I_0$ ), resistência em série ( $R_s$ ), resistência em paralelo ( $R_p$ ) e fator de idealidade ( $A$ ). Em Vilalva *et al.* (2009) é desenvolvido um método iterativo capaz de computar o par de resistências ( $R_s$  e  $R_p$ ). Contudo, é possível simplificar o modelo a cinco parâmetros ao assumir um valor elevado para a resistência  $R_p$  e, ainda assim, o modelo ser bem representativo para módulos a base de silício cristalino (Townsend, 1989).

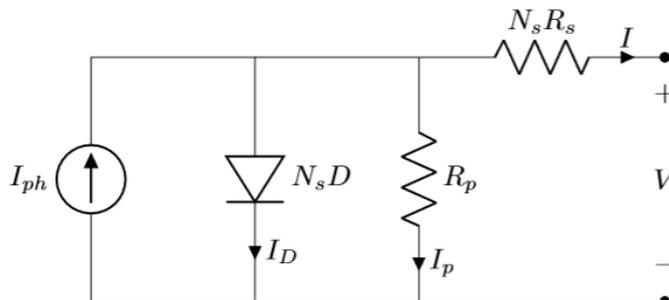


Figura 1 – Modelo equivalente de um módulo fotovoltaico.

A partir da resolução das equações do modelo, é possível traçar as curvas características I-V e P-V do módulo fotovoltaico, para diferentes condições de temperatura e irradiância. Contudo, como os parâmetros que definem o modelo são dependentes das condições de irradiância e temperatura de operação, eles são variantes no tempo. Geralmente, os parâmetros desconhecidos são calculados com base nas informações presentes na folha de dados disponibilizadas pelo fabricante, sendo, portanto, representativos para estudos que consideram a STC (*Standard Test Conditions*). Por outro lado, como os módulos fotovoltaicos podem ter seu desempenho quantificado a partir das curvas I-V e P-V, torna-se muito importante o estudo e apresentação de ferramentas que permitam levantar a curva característica para condições reais operação.

Os métodos de obtenção experimental das curvas características consistem em variar a tensão no módulo fotovoltaico e obter o valor de corrente correspondente para a curva I-V e potência correspondente para a curva P-V. As folhas de dados dos fabricantes contêm algumas curvas obtidas sob condições controladas em laboratório, as quais não garantem retratar a caracterização real do dispositivo operando em campo. Para um melhor diagnóstico e, simultaneamente, prover dados mais realistas para obtenção dos parâmetros do modelo de circuito, é necessário utilizar um equipamento denominado traçador de curvas. Este equipamento é capaz de adquirir a curva I-V nas condições reais as quais os geradores fotovoltaicos estão submetidos, tratando-se de uma ferramenta poderosa de diagnósticos desses elementos.

Apesar da importância deste equipamento, os traçadores de curvas apresentam um custo elevado no mercado brasileiro, sobretudo devido às taxas de importação. Logo, é importante realizar estudos de implementação do equipamento, com o intuito de apontar um método que alie baixo custo, bom desempenho em termos de precisão, velocidade de aquisição e potência de operação. Seguindo esses objetivos, este trabalho apresenta uma revisão bibliográfica dos principais métodos utilizados pelos dispositivos traçadores de curvas reportados na literatura. Utilizando o método de conversores CC-CC, por propiciar as principais características supracitadas, foram investigadas duas topologias de conversores e seus requisitos mínimos de projeto. Com base no trabalho de Pereira *et al.* (2017), onde foi apresentada uma metodologia de projeto de um traçador baseado na topologia Čuk, neste artigo, a metodologia será estendida ao conversor SEPIC. Utilizando simulações computacionais, as duas topologias de conversores CC-CC foram avaliadas à luz do desempenho dinâmico e da capacidade de reprodutibilidade da curva I-V fornecida pelo fabricante de um módulo fotovoltaico.

## 2. CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

Existem diversos fatores que podem alterar o comportamento da curva característica de um módulo fotovoltaico, a saber (Hernday, 2011):

- **Perdas séries:** ocorrem devido às quebras, corrosão ou desconexões dos barramentos internos entre as células ou módulos, sendo o tipo de perda mais comum em sistemas fotovoltaicos. Essas perdas causam aumento na resistência série do módulo, diminuindo a tensão de saída e, por consequência, causam diminuição na inclinação nas curvas I-V na proximidade do ponto de tensão de circuito aberto.
- **Perdas paralelas:** São causados por imperfeições no material das células, resultando em caminhos de baixa resistência nestas. Essas perdas causam diminuição na inclinação nas curvas I-V na proximidade do ponto de corrente de curto-circuito.

- **Redução de corrente de curto-circuito:** causadas pela sujidade na superfície das células, o que propicia diminuição da irradiância de entrada e, por consequência, na fotocorrente. Segundo Jiang *et al.* (2011), condições climáticas e módulos degradados também são situações que levam a redução da corrente de curto-circuito.
- **Redução de tensão de circuito aberto:** ocorrem principalmente devido ao aumento da temperatura do sistema, causando redução na largura da curva P-V devido a diminuição das grandezas que dependem da temperatura, como a tensão de circuito aberto. De acordo com Luna (2016), a baixa velocidade do vento pode aumentar a temperatura do módulo, impactando nos valores de tensão de circuito aberto e tensão no ponto de máxima potência.
- **Perdas por desacoplamento:** essa perda pode ter várias causas, como sujidade, sombreamento, fixação inadequada do módulo, células rachadas, ligação entre diferentes módulos num mesmo arranjo, entre outras. Os efeitos das perdas por desacoplamento nos parâmetros dos modelos fotovoltaicos teóricos foram investigados em Saha *et al.* (1988), concluindo que o parâmetro de corrente na máxima potência e o fator de forma são os mais afetados por essa perda, o que acarretam perda de potência do módulo.

As diversas perdas mencionadas são ilustradas na Fig. 2 (Hernday, 2011), onde se observa que todas propiciam um comportamento previsto na curva I-V, o que permite realizar diagnósticos a partir da obtenção da curva. Outro ponto a ser observado é que todas as perdas mencionadas causam diminuição no ponto de potência máxima, portanto sendo indesejadas para o sistema. Em virtude das adversidades as quais os geradores fotovoltaicos podem estar sujeitos, é notório a importância dos dispositivos traçadores de curva como ferramenta de diagnóstico capaz de detectar uma ampla variedade de problemas na geração.

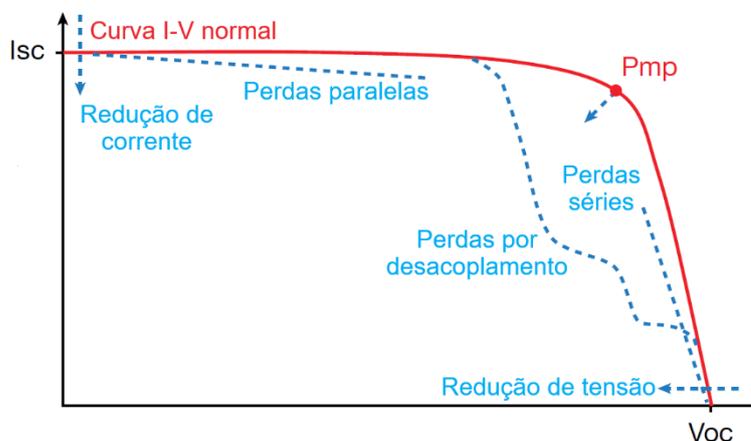


Figura 2 – Impacto das perdas nas curvas I-V.

### 3. SELEÇÃO DO MÉTODO

Os métodos de obtenção da curva I-V de módulos fotovoltaicos podem ser descritos, em linhas gerais, como um dispositivo capaz de emular uma carga variável. Na literatura, os principais métodos de caracterização são designados com sendo: resistor variável, carga capacitiva, fonte de 4 quadrantes, conversor CC-CC e carga eletrônica. Os trabalhos reportados e algumas das características dos equipamentos investigados são exibidos na Tab. 1.

Tabela 1: Sinopse dos trabalhos reportados e principais características dos traçadores de curva implementados.

Trabalho	Método	Potência máxima (W)	Nº de pontos de aquisição	Tempo de aquisição (s)
Isaac (2013)	Resistivo	10	100	-
Willoughby <i>et al.</i> (2014)	Resistivo	45	10	-
Muñoz e Lorenzo (2006)	Capacitiva	aprox. 4000	512	0,1 s
García-Valverde <i>et al.</i> (2016)	Capacitiva	90	aprox.2200	2,5~4 s
Gasparin (2009)	Fonte de quatro quadrantes	250	até 2000	1,8 s
Luna (2016)	Carga Eletrônica	80	-	3 s
Sarikh <i>et al.</i> (2017)	Carga Eletrônica	15	20	-
Durán <i>et al.</i> (2012)	Conversor CC-CC	70	-	0,2 s
Pereira <i>et al.</i> (2017)	Conversor CC-CC	150	42	1 s

A princípio, os métodos de carga capacitiva e fonte de quatro quadrantes apresentam alto custo de aquisição devido à natureza da carga utilizada e, portanto, não seriam adequadas como alternativas de baixo custo. O método de resistor variável é o método mais primitivo, por não apresentar um controle direto da resistência aplicada e também por necessitar a associação de vários resistores de potência. Sobre as duas metodologias restantes, foi possível notar que o método de carga eletrônica tem desempenho similar ao método de conversor CC-CC, porém, o primeiro método apresenta um desempenho menor devido à impossibilidade de caracterização nas regiões de corte e ôhmica do dispositivo transistor (Luna, 2016). Portanto, o método de conversor CC-CC foi escolhido por atender melhor aos requisitos propostos para o desenvolvimento do equipamento, como baixo tempo de aquisição, exatidão na obtenção da curva, aplicação para potências razoavelmente altas e, principalmente, baixo custo.

O pré-requisito exigido dos conversores CC-CC para atuar como um circuito traçador de curvas é a capacidade de emular uma resistência de carga de zero a infinito, o que implica realizar a varredura completa da curva I-V (Duran *et al.*, 2007). Dentre os possíveis conversores, é necessário realizar o estudo das topologias para avaliar quais são as mais indicadas, com base em determinados índices de desempenho, por exemplo, estresse dos componentes, ondulação nos parâmetros de entrada e energia absorvida pelos indutores. A partir do trabalho de Durán *et al.* (2008), é possível verificar que as topologias Ćuk e SEPIC são as mais adequadas no atendimento dos requisitos, além do mais, ambas possuem apenas um dispositivo chaveado, o que simplifica o controle em relação a outras estruturas.

#### 4. METODOLOGIA DE PROJETO

Definidas as topologias a serem utilizadas, é necessário projetar os parâmetros que as caracterizam. A consecução dos elementos passivos do conversor Ćuk foi realizada a partir da metodologia apresentada em Pereira *et al.* (2017), cujas indutâncias e capacitâncias foram calculadas a partir de equações de ondulação em regime permanentes. Neste trabalho, será adotada a mesma metodologia de projeto, porém estendida ao conversor SEPIC.

Para realizar o projeto dos elementos, inicialmente, faz-se necessário definir o valor de máxima potência do módulo fotovoltaico e os valores correspondentes de tensão e de corrente. Para o módulo utilizado, de especificação JAM72370S e fabricado pela JA Solar, os valores são 370 W de máxima potência, 39,36 V de tensão na máxima potência e 9,41 A de corrente na máxima potência. Além dessas especificações, os demais parâmetros de projeto estão na Tab. 2.

Tabela 2: Parâmetros de projeto dos conversores CC-CC avaliados

Parâmetros de projeto	Especificação
Frequência de chaveamento ( $f_s$ )	10 kHz e 100 kHz
Máxima ondulação da corrente de entrada ( $\Delta I_{in}$ )	10% da corrente média de entrada
Máxima ondulação de corrente no capacitor de acoplamento ( $\Delta V_C$ )	20% da tensão média do capacitor
Máxima ondulação da tensão de saída ( $\Delta V_o$ )	50% da tensão média de saída
Máxima ondulação da corrente de saída ( $\Delta I_o$ ) (apenas para conversor Ćuk)	50% da corrente média de saída
Máxima ondulação de corrente no indutor magnetizante ( $\Delta I_L$ ) (apenas para conversor SEPIC)	20% da corrente média do indutor

Definidos os parâmetros de projeto, é necessário estabelecer o valor do resistor de carga (responsável por dissipar a potência do módulo), o ganho de operação no ponto de potência máxima e a razão cíclica correspondente a esse ganho. Tais parâmetros podem ser apresentados, respectivamente, nas formas (Pereira *et al.*, 2017):

$$R_o = \frac{V_{mp}^2}{P_{mp}} \quad (5)$$

$$G(D) = \sqrt{R_o \frac{I_{mp}}{V_{mp}}} \quad (6)$$

$$D = \frac{G(D)}{1 + G(D)} \quad (7)$$

Conforme Barbi e Martins (2011), as ondulações de corrente e tensão observadas nos elementos passivos de um conversor Ćuk podem ser expressas, respectivamente, nas formas:

$$\Delta I_E = \frac{E D}{L_1 f_s} \quad (8)$$

$$\Delta I_o = \frac{-V_o(1 - D)}{L_2 f_s} \quad (9)$$

$$\Delta V_c = \frac{I_E(1 - D)}{C_1 f_s} \quad (10)$$

$$\Delta V_o = \frac{E D}{8 L_2 C_2 f_s^2} \quad (11)$$

Para o conversor SEPIC, segundo Barbi e Martin (2011), as ondulações de corrente e tensão experimentadas pelos elementos passivos podem ser expressas, respectivamente, nas formas:

$$\Delta I_E = \frac{E D}{L_1 f_s} \quad (12)$$

$$\Delta I_{L2} = \frac{E D}{L_2 f_s} \quad (13)$$

$$\Delta V_c = \frac{E D^2}{R_o C_1 (1 - D) f_s} \quad (14)$$

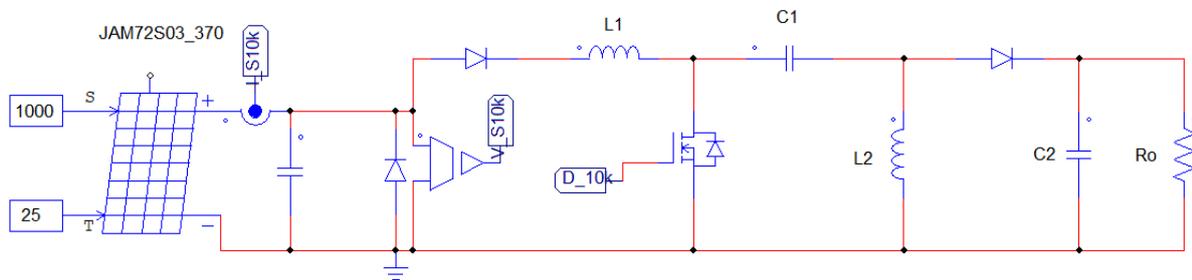
$$\Delta V_o = \frac{E D^2}{R_o C_2 (1 - D) f_s} \quad (15)$$

Utilizando as especificações exibidas na Tab. 2 e os limites de tensão e corrente de entrada dos conversores, os únicos parâmetros indefinidos nas Eqs. (8)-(15) são as indutâncias e capacitâncias. Reordenando as equações em termos destes elementos, o resultado é dado na Tab. 3 para as frequências de projeto definidas por 10 kHz e 100 kHz.

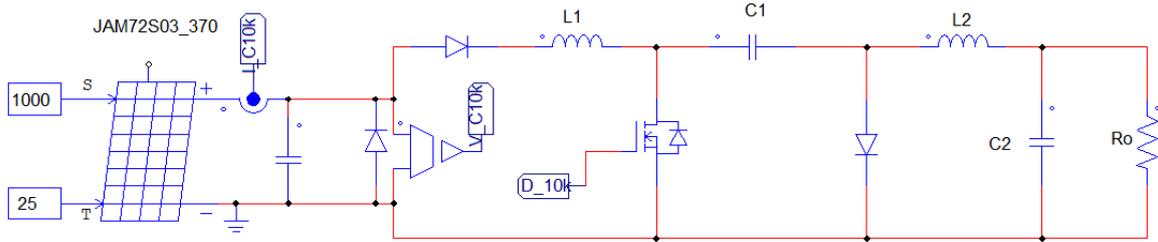
Tabela 3: Parâmetros calculados e utilizados nos estudos.

Parâmetros	ĆUK		SEPIC	
	10 kHz	100 kHz	10 kHz	100 kHz
$f_s$				
$R_o$	4,18 $\Omega$			
$L_1$	2,1 mH	210 $\mu$ H	2,1 mH	210 $\mu$ H
$C_1$	60 $\mu$ F	6 $\mu$ F	60 $\mu$ F	6 $\mu$ F
$L_2$	1 mH	104,6 $\mu$ H	1 mH	104,6 $\mu$ H
$C_2$	1,2 $\mu$ F	2,4 $\mu$ F	24 2 $\mu$ F	2,4 $\mu$ F

A partir da Tab. 3 também é possível visualizar a adaptação da metodologia para o conversor Ćuk e o conversor SEPIC através das ondulações dos indutores de saída que, no conversor Ćuk se trata no indutor ligado diretamente a saída de circuito e no conversor SEPIC este indutor é ligado em paralelo à saída, sendo denominado indutor de magnetização. Esta diferença pode ser evidenciada na Fig. 3, que mostra a implementação dos circuitos no *software* PSIM®.



(a)



(b)

Figura 3: Projeto do traçador de curvas no *software* PSIM® (a) Topologia SEPIC (b) Topologia Ćuk.

A partir da Fig. 3, nota-se que na entrada dos conversores foram introduzidos diodos para assegurar que apenas tensões e correntes positivas sejam experimentadas, pois valores negativos podem estar presentes no conversor. A presença do capacitor de entrada é justificada em Leppäaho *et al.* (2010), onde é apontada a disparidade entre a natureza fonte de corrente dos geradores fotovoltaicos e a natureza de tensão utilizada no equacionamento dos conversores CC-CC. Para realizar essa interface, foi adicionado um capacitor de baixa capacitância à entrada dos conversores. Os parâmetros que caracterizam o módulo fotovoltaico utilizado nas simulações são apresentados na Tab. 4.

Para o circuito projetado funcionar como traçador de curvas, o sinal de comutação aplicado ao MOSFET é obtido via modulação PWM, com ciclo de trabalho regulado no intervalo  $[0, 1[$ . O circuito utilizado nas simulações é mostrado na Fig. 4, sendo a tensão de controle uma onda triangular de frequência duzentas vezes menor que portadora.

Tabela 4: Parâmetros utilizados para simulação do módulo fotovoltaico JAM7203-370W.

Parâmetros do Datasheet (JAM72S03-370W)	
Número de Células ( $N_s$ )	144
Potência Máxima ( $P_{mp}$ )	370 W
Tensão na Potência Máxima ( $V_{mp}$ )	39,36 V
Corrente na Potência Máxima ( $I_{mp}$ )	9,41 A
Tensão de Circuito Aberto ( $V_{oc}$ )	47,56 V
Corrente de Curto-Circuito ( $I_{sc}$ )	9,97 A
Coefficiente de Tensão/Temperatura ( $k_v$ )	-0,289% V/°C
Coefficiente de Corrente/Temperatura ( $k_i$ )	+0,051% A/°C
Inclinação $dv/di$	-0,3935 V/A
Parâmetros Definidos	
Fator de Idealidade ( $A$ )	0,6046
Resistência em paralelo ( $R_p$ )	1 M $\Omega$
Parâmetros Calculados Via Software	
Resistência Série ( $R_s$ )	1,2 m $\Omega$
Fotocorrente ( $I_{ph}$ )	9,97 A
Corrente de Saturação	5,99 nA

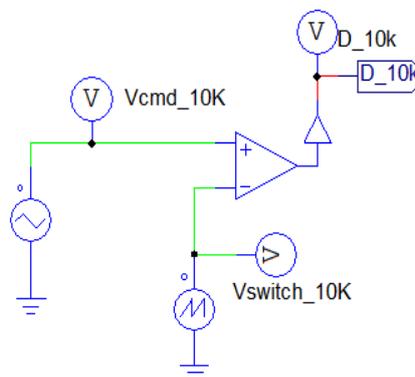


Figura 4: Circuito de chaveamento do MOSFET

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As Figs. 5 e 6 exibem o comportamento dinâmico dos sinais de tensão e corrente experimentados nos terminais de saída do módulo fotovoltaico, quando são utilizados os conversores SEPIC e  $\hat{C}uk$ , respectivamente. Em ambos os casos, o módulo fotovoltaico opera na STC com frequência de chaveamento de 10 kHz. Um comportamento semelhante é obtido ao utilizar uma frequência de comutação de 100 kHz e diferentes níveis de irradiância.

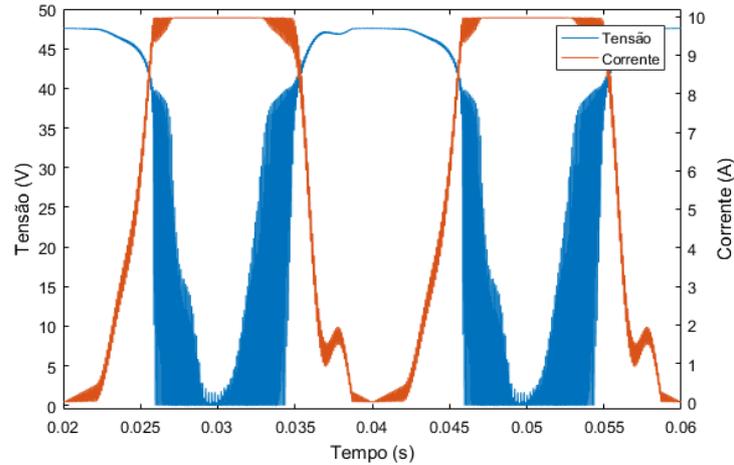


Figura 5: Comportamento dinâmico tensão e corrente durante a utilização do conversor SEPIC.

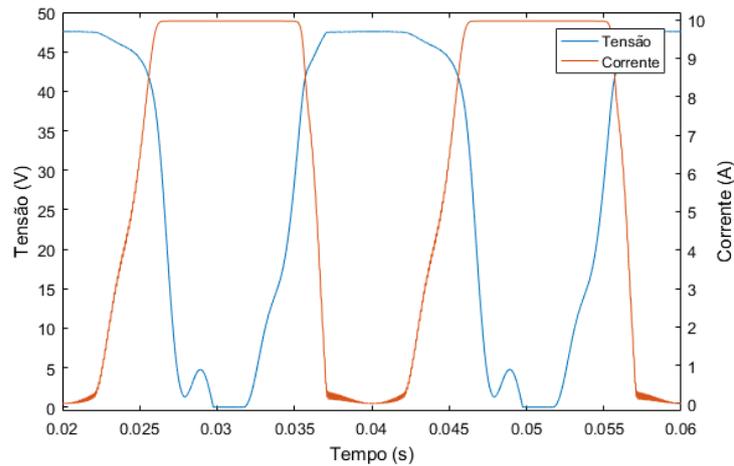


Figura 6: Comportamento dinâmico tensão e corrente durante a utilização do conversor  $\hat{C}uk$ .

A partir dos resultados exibidos na Fig. 5, observa-se que o conversor SEPIC propicia ao módulo fotovoltaico uma tensão terminal com oscilações de alta frequência, quando a corrente de entrada fica estabilizada nas proximidades da corrente de curto-circuito do módulo fotovoltaico. Por outro lado, com base nos resultados exibidos na Fig. 6, o conversor  $\hat{C}uk$  simulado proporciona um comportamento suave para as correntes e tensões terminais do módulo, embora também esteja operando sob condições de malha aberta.

Obtido o comportamento dinâmico das grandezas elétricas de interesse, as curvas I-V são obtidas a partir da correspondência entre os pontos de tensão e corrente. Tabulando os resultados numéricos, o resultado do comparativo das curvas I-V traçadas com a curva extraída do *datasheet* nas condições de teste padrão estão mostrados na Fig. 7, para ambas as frequências de comutação assumidas no projeto dos conversores. Com base nos resultados, observa-se que, embora o conversor SEPIC tenha proporcionado oscilações de alta frequência, elas não afetam a reprodutibilidade das curvas características do módulo, conforme se observa pelos erros médios quadráticos apresentados na Tab. 5.

A Fig. 8 apresenta o mesmo resultado para a condição de irradiância a  $400 \text{ W/m}^2$ , para verificar o funcionamento do traçador de curvas para condições diferentes das condições STC. Embora as curvas características também sejam obtidas para essa condição, os valores de erros médios quadráticos apresentados na Tab. 5 indicam que o circuito projetado apresenta exatidão menor nesta condição. Este fato pode ser associado à modelagem do gerador fotovoltaico, indicando que o modelo seja menos representativo para condições de irradiância menor que as condições STC.

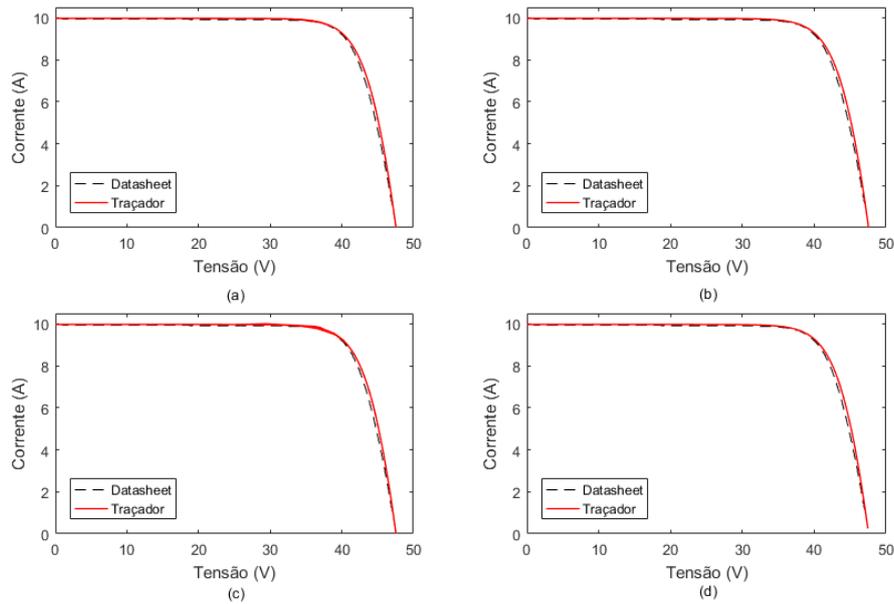


Figura 7: Comparativo entre as curvas obtidas pelos caracterizadores projetados e a curva do *datasheet* para as condições STC (a) Curva para o conversor SEPIC com frequência de chaveamento de 10 kHz (b) Curva para o conversor Ćuk com frequência de chaveamento de 10 kHz (c) Curva para o conversor SEPIC com frequência de chaveamento de 100 kHz (d) Curva para o conversor Ćuk com frequência de chaveamento de 100 kHz.

Tabela 5: Relação dos erros médios quadrados calculados para cada um dos casos testados.

Frequência	STC		Irradiância Reduzida	
	10 kHz	100 kHz	10 kHz	100 kHz
Ćuk	0,1850	0,1739	0,2781	0,2889
SEPIC	0,1804	0,1825	0,2981	0,2972

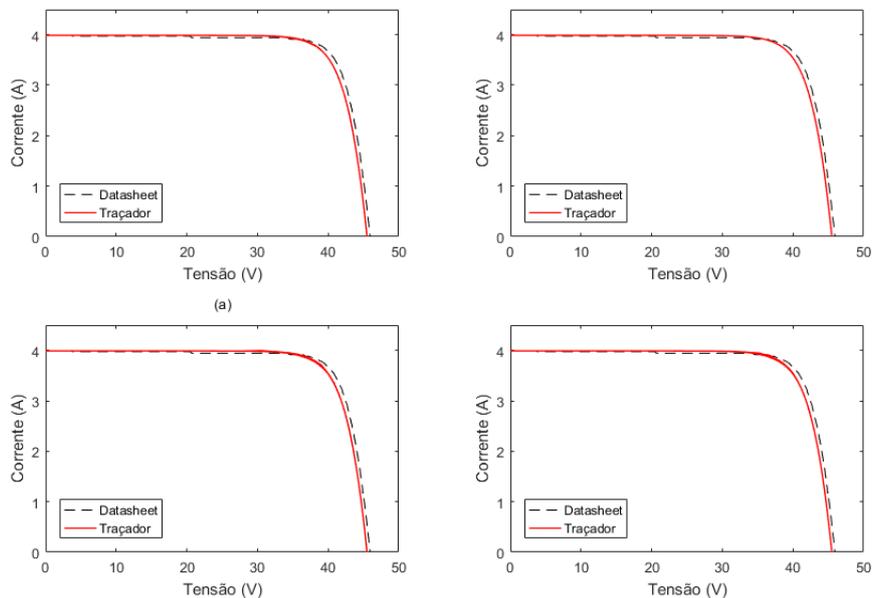


Figura 8: Comparativo entre as curvas obtidas pelos caracterizadores projetados e a curva do *datasheet* para as condições de irradiação reduzida (a) Curva para o conversor SEPIC com frequência de chaveamento de 10 kHz (b) Curva para o conversor Ćuk com frequência de chaveamento de 10 kHz (c) Curva para o conversor SEPIC com frequência de chaveamento de 100 kHz (d) Curva para o conversor Ćuk com frequência de chaveamento de 100 kHz.

## 6. CONCLUSÕES

No presente artigo foram apresentados os métodos de caracterização implementação de um traçador de curvas, com ênfase no método de conversor CC-CC, devido às vantagens apresentadas, sobretudo ao baixo custo de projeto. Assim, o método foi investigado para obter as condições mínimas necessárias para a implementação deste. Obedecidas essas questões, o método foi implementado computacionalmente nas topologias e frequências propostas.

É possível concluir que a metodologia de projeto para traçadores de curvas baseados em conversores CC-CC apresenta resultados positivos em termos de precisão, não só para condições padrões como também para condições de menor irradiância. Portanto, a forma de projeto abordada traz bons resultados para o traçador de curva, podendo ser aplicada em trabalhos futuros para implementação física deste dispositivo. Esta conclusão se aplica as duas topologias utilizadas e também para altas e baixas frequências propostas no projeto. Em termos de metodologia de projeto, o presente trabalho trouxe como contribuição a expansão da metodologia de projeto apresentada por Pereira et al. (2017), mostrando que a metodologia de projeto aplicada inicialmente apenas ao conversor Ćuk pode ser aplicado para projeto de conversores SEPIC.

Adicionalmente, pode ser concluído que os métodos aplicados possibilitam a obtenção da curva de forma rápida, já que para a frequência de chaveamento 10 kHz, o tempo de varredura de todos os pontos da curva foi de 10 ms, tornando-se ainda menor para maiores valores de frequências.

## REFERÊNCIAS

- Barbi, I., Martins, D. C., 2011. Conversores CC-CC básicos não isolados. Edição dos autores.
- Chin, V. J., Salam, Z., Ishaque, K., 2017. An accurate and fast computational algorithm for the two-diode model of PV module based on a hybrid method. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, n. 8, p. 6212-6222.
- De Soto, W., Klein, S. A., & Beckman, W. A., 2006. Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance. *Solar energy*, vol. 80, n. 1, pp. 78-88.
- Duran, E., Galán, J., Sidrach-de-Cardona, M., Andujar, J. M., 2007. A new application of the buck-boost-derived converters to obtain the IV curve of photovoltaic modules, 2007 IEEE Power Electronics Specialists Conference, pp. 413-417.
- Duran, E., Galán, J., Sidrach-de-Cardona, M., Andujar, J. M., 2008. Comparative analysis of buck-boost converters used to obtain I-V characteristic curves of photovoltaic modules, 2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference, pp. 2036-2042.
- Durán, E., Andújar, J. M., Enrique, J. M., Pérez-Oria, J. M., 2012. Determination of PV generator IV/PV characteristic curves using a DC-DC converter controlled by a virtual instrument, *International Journal of Photoenergy*, vol. 2012.
- Fahrenbruch, A., Bube, R., 2012. *Fundamentals of solar cells: photovoltaic solar energy conversion*. Elsevier.
- García-Valverde, R., Chaouki-Almagro, S., Corazza, M., Espinosa, N., Hösel, M., Søndergaard, R. R., Krebs, F., 2016. Portable and wireless IV-curve tracer for > 5 kV organic photovoltaic modules, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 151, pp. 60-65.
- Gasparin, F. P. (2009). *Desenvolvimento de um traçador de curvas características de Módulos Fotovoltaicos*, Dissertação de Mestrado, PROMEC, UFRGS, Porto Alegre.
- Green, M. A., 1982. *Solar cells: operating principles, technology, and system applications*, Englewood Cliffs.
- Hernday P., 2011. Field applications for IV curve tracers, *Solarpro*, vol. 18, pp. 76-106.
- Isaac, M. K., 2013. *Designing and Fabrication of a Current-Voltage Curve Meter for Electrical Characterization of Photovoltaic Modules*, Tese de Doutorado, Department of physics, Kenyatta University, Nairobi.
- Jiang, H., Lu, L., Sun, K., 2011. Experimental investigation of the impact of airborne dust deposition on the performance of solar photovoltaic (PV) modules. *Atmospheric environment*, vol. 45, n. 25, pp. 4299-4304.
- Jasolar, 2015. 380W PERC Half-Cell Module. JAM72S03 360-380/PR.
- Leppäaho, J., Nousiainen, L., Puukko, J., Huusari, J., & Suntio, T., 2010. Implementing current-fed converters by adding an input capacitor at the input of voltage-fed converter for interfacing solar generator, *Proceedings of 14th International Power Electronics and Motion Control Conference, Ohrid*
- Luna, M. L. M., 2016. *Desenvolvimento e validação de traçador de curva I x V para módulos fotovoltaicos*, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, UFC, Fortaleza.
- Muñoz, J., Lorenzo, E., 2006. Capacitive load based on IGBTs for on-site characterization of PV arrays. *Solar Energy*, vol. 80, n. 11, pp. 1489-1497.
- Pereira, T. A., dos Santos, W. M., Martins, D. C., Coelho, R. F., 2017. Caracterizador elétrico de módulos fotovoltaicos utilizando o conversor cc-cc Ćuk, *Revista Eletrônica de Potência*, vol. 22, n. 2, pp. 139-147.
- Saha, H., Bhattacharya, G., Mukherjee, D., 1988. Mismatch losses in series combinations of silicon solar cell modules. *Solar cells*, vol. 25, n. 2, pp. 143-153.
- Sarikh, S., Raoufi, M., Bennouna, A., Benlarabi, A., Ikken, B., 2017. Design of an IV characteristic tracer for photovoltaic systems. In *2017 International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*, pp. 1-5.
- Townsend, T. U., 1989 *A Method for Estimating the Log-Term Performance of Direct-Coupled Photovoltaic Systems*, Dissertação de Mestrado, University of Wisconsin, Madison.

- Villalva, M. G., Gazoli, J. R., Ruppert Filho, E., 2009. Modeling and circuit-based simulation of photovoltaic arrays. 2009 Brazilian Power Electronics Conference, pp. 1244-1254.
- Willoughby, A. A., Omotosho, T. V., & Aizebeokhai, A. P., 2014. A simple resistive load IV curve tracer for monitoring photovoltaic module characteristics. 5th International Renewable Energy Congress (IREC), Hammamet.

### **STUDY AND IMPLEMENTATION OF I-V TRACER FOR PHOTOVOLTAIC MODULES USING DC-DC CONVERTERS**

**Abstract.** *This paper pursues the computational development of an I-V tracer from DC-DC converters of Ćuk and SEPIC topologies which were explored to apply a common project methodology to the equipment that take as a basis the possible voltage and current ripple of the passive components. In conclusion, the project of the converters was implemented on both topologies to the switching frequency of 10 kHz and 100 kHz for the purpose of obtaining the curve I-V of the photovoltaic module of specification JAM72S03-370. It was observed on the implemented projects that the applied topologies can manage successfully the obtainment of the curves to the two frequencies presented, for both the operation in STC, and the operation in reduced irradiance condition.*

**Key words:** *Solar Energy, I-V Tracer, DC-DC Converters*