

Análise e implementação de uma carga eletrônica com conversores CC–CC utilizando controladores sliding mode

Gabriel J. N. Cardoso * Daniel F. Oliveira * Humberto M.C. Abádio *
Rafael F. Q. Magossi *

* Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET em Nova Friburgo, RJ (e-mail: gabriel.nogueira@aluno.cefet-rj.br, daniel.filipecki@aluno.cefet-rj.br, humberto.abadio@aluno.cefet-rj.br, rafael.magossi@cefet-rj.br)

Abstract: In this work, it is presented a topology of a DC electronic load for photovoltaic panels using DC–DC converters. The DC electronic load was designed for four operation modes, which are constant voltage, current, power and resistance. Moreover, it uses boost converters and bidirectional buck-boost along with double-loop sliding mode controller (SMC) and PI controllers. The use of the SMC with the DC–DC converters leads to a ripple reduction, as well as to robustness and a reduced sensitivity to variations to external parameters and disturbances. For validation, simulation results are provided.

Resumo: Neste trabalho, apresenta-se uma topologia de uma carga eletrônica para painéis fotovoltaicos utilizando-se conversores CC–CC. A carga eletrônica foi projetada para quatro modos de operação, tensão, corrente, potência e resistência constantes, além disso utiliza os conversores boost e a buck-boost bidirecional em conjunto com controladores *sliding mode* (SMC) e PI em dupla malha. O uso do SMC em conjunto com conversores CC–CC permite uma redução *ripple*, além de robustez e uma sensibilidade reduzida para variações de parâmetros e distúrbios externos. Resultados de simulação foram realizados para validar o projeto.

Keywords: Bidirectional Buck-Boost Converter; Boost Converter; Solar Power; Virtual Resistance; Power Electronics; PI Controller.

Palavras-chaves: Conversor Buck-Boost Bidirecional; Conversor Boost; Energia Fotovoltaica; Resistência Virtual; Eletrônica de Potência; Controlador PI;

1. INTRODUÇÃO

Dentre as fontes de energia renováveis, a energia fotovoltaica tem se mostrado atrativa. Em 2012 a capacidade instalada de sistemas fotovoltaicos no mundo era de 100 GW, e em 2018, a capacidade chegou à 480 GW. Estima-se que em 2050, a capacidade instalada será de 8500 GW, o que representará mais de 25% de toda a energia elétrica demandada no mundo, juntamente com a redução de 70% das emissões de CO₂ (IRENA, 2019). Em geral, os painéis fotovoltaicos demandam o uso de conversores CC–CC com o objetivo de obter a máxima extração de energia da fonte, além de garantir adequados níveis de tensão e corrente (Magossi et al., 2020; Sutikno et al., 2021; Chaturvedi et al., 2021).

Usualmente, as características do painel fotovoltaico são fornecidas pelo fabricante e obtidas sob condições de luz e temperatura controladas em um ambiente de laboratório (Patel, 2005). Devido as variações climáticas ao longo do dia é difícil reproduzir as características do ambiente

controlado. Para contornar esta situação, é possível variar a carga do painel em um curto intervalo de forma que as variações climáticas sejam praticamente constantes neste intervalo. Em geral, um Transistor de Efeito de Campo de Óxido de Metal Semicondutor (da sigla em inglês, MOSFET) operando na região linear, pode ser usado como uma carga eletrônica para testar o painel, se comportando como uma resistência de carga equivalente, a qual consegue atender rápidas variações (Kuai and Yuvarajan, 2006). A carga eletrônica pode controlar a tensão, corrente ou potência de forma manual ou por comunicação, sendo possível analisar o desempenho dos painéis em campo ou em laboratório (Jin-Ho et al., 2012). Entretanto, a reprodução de pontos em torno da máxima potência exigem excessiva dissipação de energia, uma vez que os transistores operam em sua região linear (Duran et al., 2008).

De forma alternativa, pode-se utilizar conversores CC–CC em conjunto com painéis fotovoltaicos para extração da curva $I-V$, como em Sanchis et al. (2003) em que os autores utilizam um conversor *boost* bidirecional. Em Kazerani (2007) os autores demonstram o uso de um conversor *buck* operando como uma carga eletrônica CC para obtenção da curva $I-V$ do painel. Além disso, o uso do conversor CC–CC é geralmente mais acessível, flexível, modular e

* Este trabalho é fruto da disciplina de graduação Tópicos em Controle e Eletrônica de Potência, ministrada pelo Prof. Rafael Magossi no curso de Engenharia Elétrica do CEFET/RJ Campus de Nova Friburgo.

confiável do que as demais soluções, por outro lado pode apresentar elevado *ripple* devido ao chaveamento (Duran et al., 2008). O uso de controladores por modos deslizantes (SMC, da sigla em inglês) em conjunto com conversores CC-CC usualmente implicam em redução do *ripple* e da sensibilidade para variações de parâmetros e distúrbios externos (maior robustez) (Utkin, 2013; AlZawaideh and Boiko, 2020). Do ponto de vista comercial, as cargas eletrônicas não são utilizadas apenas para a extração da curva $I-V$, sendo vistas como instrumentos programáveis capazes de reproduzir grandezas físicas como tensão, corrente, potência e/ou resistência, criando diferentes cenários de teste, tornando possível testar um dispositivo em um circuito equivalente e facilitar questões logísticas e orçamentárias em um projeto (Keysight, 2019). Assim, neste trabalho é apresentada a implementação de uma carga eletrônica programável para diferentes cenários utilizando conversores CC-CC em conjunto com controladores SMC.

2. PRELIMINARES

Nesta seção encontra-se resumidamente o projeto de SMC para conversores CC-CC como mostrado em (Utkin, 2013) e as referências nele contidas. Suponha um sistema bilinear da forma

$$\dot{x} = Ax + uBx, \quad (1)$$

em que $x \in \mathcal{R}^n$, $A \in \mathcal{R}^{n \times n}$, $B \in \mathcal{R}^{n \times n}$ e u é um controle escalar com valores no conjunto $U =: [0, 1]$. Para esse sistema é possível escolher a seguinte lei de controle descontínua

$$u = \frac{1}{2} (1 - \text{sign}(s)), \quad \text{sign}(s) = \begin{cases} 1 & \text{se } s(x) > 0 \\ 0 & \text{se } s(x) = 0 \\ -1 & \text{se } s(x) < 0 \end{cases}, \quad (2)$$

tal que s é uma função escalar de chaveamento definida por

$$s = c^T x, \quad c^T = [\partial s / \partial x]. \quad (3)$$

Em (Utkin, 2013) mostra-se que é possível obter uma lei de controle equivalente deste sistema como

$$u_{eq} = -\frac{c^T Ax}{c^T Bx}, \quad (4)$$

e o sistema dinâmico durante o deslizamento se torna

$$\dot{x} = Ax + u_{eq} Bx, \quad (5)$$

além disso, mostra-se que para existir a condição de modo deslizante, o controle equivalente deve satisfazer

$$0 < u_{eq} = -\frac{c^T Ax}{c^T Bx} < 1. \quad (6)$$

Os conversores *boost* e *buck-boost* podem ser modelados como em (1) e a lei de controle (2) garante estabilidade do sistema (Utkin, 2013).

3. METODOLOGIA

Nesta seção descreve-se a topologia e os controladores utilizados para implementação da carga eletrônica. Os requisitos de projeto são os seguintes:

- A carga eletrônica deve ser bivolt operando em 127/220 V_{RMS} ;
- Deve possuir 4 modos de operação

- Tensão constante
- Corrente constante
- Potência constante
- Resistência constante

- A carga eletrônica deve garantir níveis constantes mesmo com flutuações de irradiação e temperatura do painel;
- A carga eletrônica deve ser capaz de lidar com sistemas de até 1kVA.

A partir desses requisitos, o diagrama de blocos da carga a ser implementada é mostrado na Figura 1. Os modos de operação são selecionados a partir dos circuitos lógicos BL1 e BL2 da Figura 1, os quais são explicados em maior detalhe na próxima seção.

4. FUNCIONAMENTO E MODOS DE OPERAÇÃO

O circuito foi dividido em dois módulos, como pode ser visto na Figura 1, que representa o diagrama da carga eletrônica. Um dos módulos é o responsável pelos modos de corrente e potência e o outro, pelos modos de tensão e resistência. Cada módulo apresenta duas entradas, uma para o painel fotovoltaico e outra para a alimentação externa. Para o controle dos módulos o SMC controla o chaveamento dos MOSFETs dos circuitos, seja em cascata com o controlador PI, ou isoladamente. Os quatro modos de operação são explicados a seguir.

4.1 Circuitos Lógicos

A partir do circuito lógico BL1 (Figura 2), é possível determinar o modo de operação do conversor *buck-boost* bidirecional por controle manual. Caso não esteja operando nos modos de tensão ou resistência, o sinal resultante do multiplexador é 0, assim, pode-se utilizar o conversor, com referência fixa para 100 V, de forma a manter essa tensão na saída do conversor *boost*, garantindo o funcionamento dos modos de corrente e potência.

Além disso, neste circuito é implementado a lógica da resistência virtual, calculando-se um valor de tensão em relação a tensão do painel (V_P). Este valor é utilizado como parâmetro de tensão para o modo de resistência, ou seja, ambos os modos de tensão e resistência utilizam apenas valores de tensão como referência para o controlador. Assim, a saída de BL1 é utilizada como a entrada do controlador PI em cascata com o SMC para controle do conversor *buck-boost* bidirecional.

O circuito lógico BL2, mostrado na Figura 3, funciona de forma semelhante ao BL1, porém de forma simplificada. Seleciona-se o modo de operação desejado, e a saída do multiplexador é utilizada como referência para o controlador SMC. O valor desejado de potência é convertido para um valor proporcional de corrente a partir do valor da tensão do painel (V_P). Logo, o controlador do conversor *boost* opera apenas com referências de corrente.

A estrutura de chave utilizada para selecionar os modos de operação da carga eletrônica é composta por uma lógica com multiplexador (MUX) com duas entradas de controle (s_1 e s_0) que selecionam os quatro modos de operação utilizando as quatro combinações possíveis.

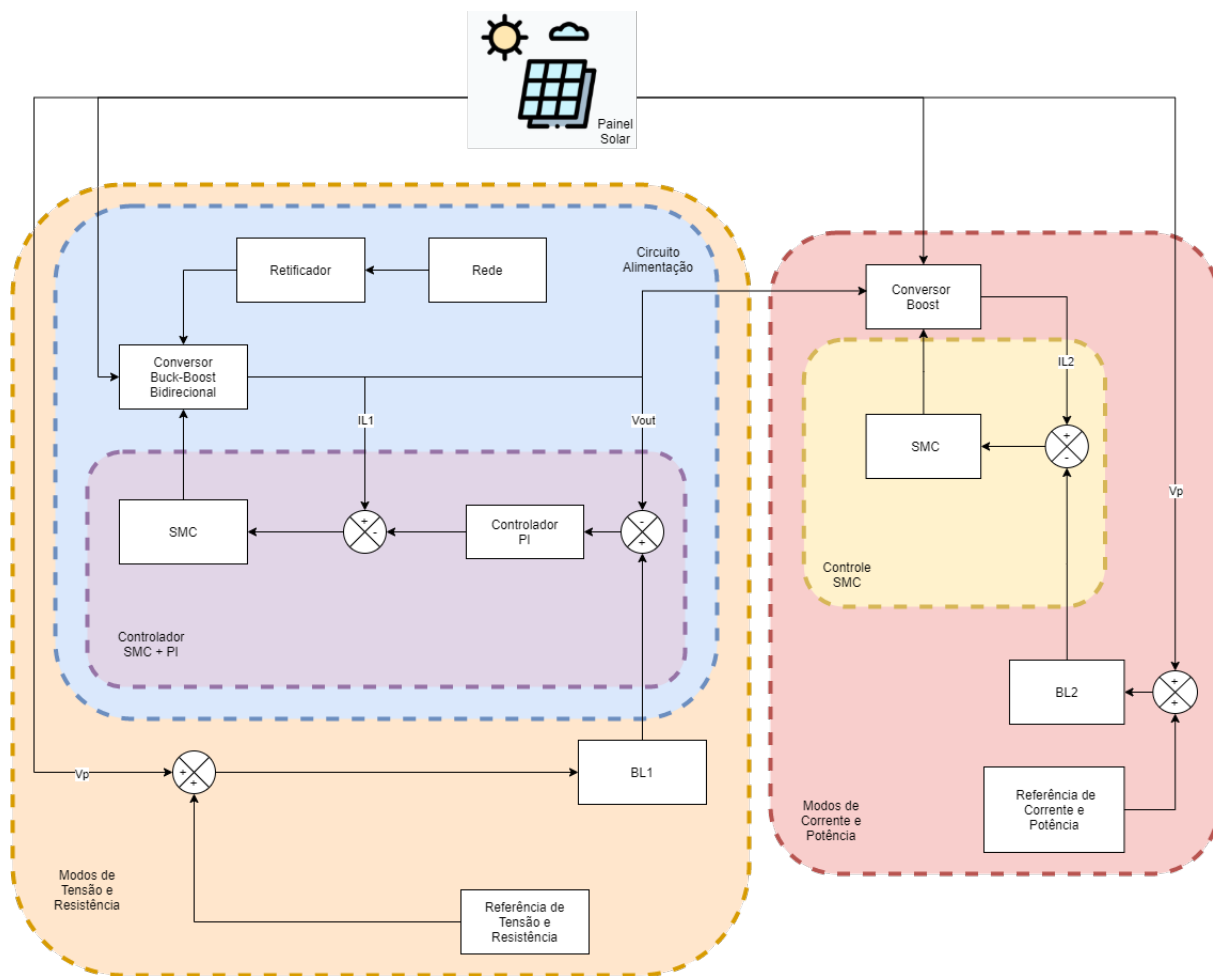


Figura 1. Diagrama da Carga Eletrônica

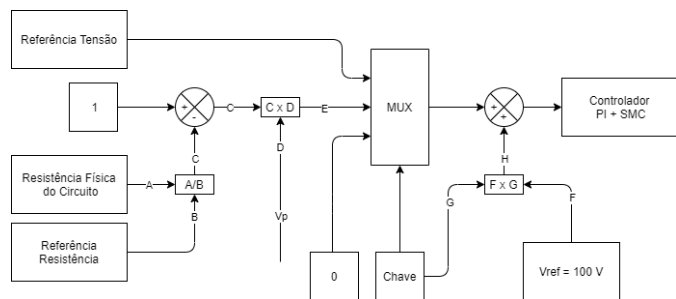


Figura 2. Circuito Lógico BL1.

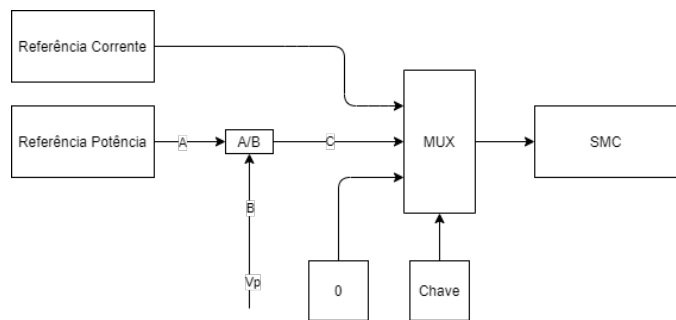


Figura 3. Circuito Lógico BL2.

4.2 Controladores

Para os modos de corrente e potência constantes, utilizou-se um SMC, como mostrado na Figura 5, controlando-se

a corrente do conversor *boost*. Para os modos de tensão e resistência constantes foi utilizado um controlador de dupla malha. Na malha interna, utiliza-se um SMC para o controle da corrente, e na malha externa, um controlador PI para controle da tensão do conversor *buck-boost*, como mostrado na Figura 6.

4.3 Modos de operação

Modo de Corrente A corrente do painel solar é a corrente de entrada do conversor *boost* (I_{L2}), a qual pode ser controlada e ajustada para um valor de referência de corrente sendo passado para BL2 e se tornando referência para o SMC.

Modo de Potência O funcionamento deste modo é semelhante ao modo de corrente, porém escolhe-se o valor da potência desejada. Este valor arbitrado para potência é transformado em um parâmetro proporcional no circuito lógico BL2, que é a corrente necessária para manter a potência desejada a partir da leitura da tensão do painel solar (V_P) na entrada do conversor *boost*.

Modo de Tensão O modo de tensão é obtido utilizando-se o conversor *buck-boost* bidirecional. O valor de tensão desejado é passado ao bloco lógico BL1 e gera-se a referência para o controlador PI-SMC.

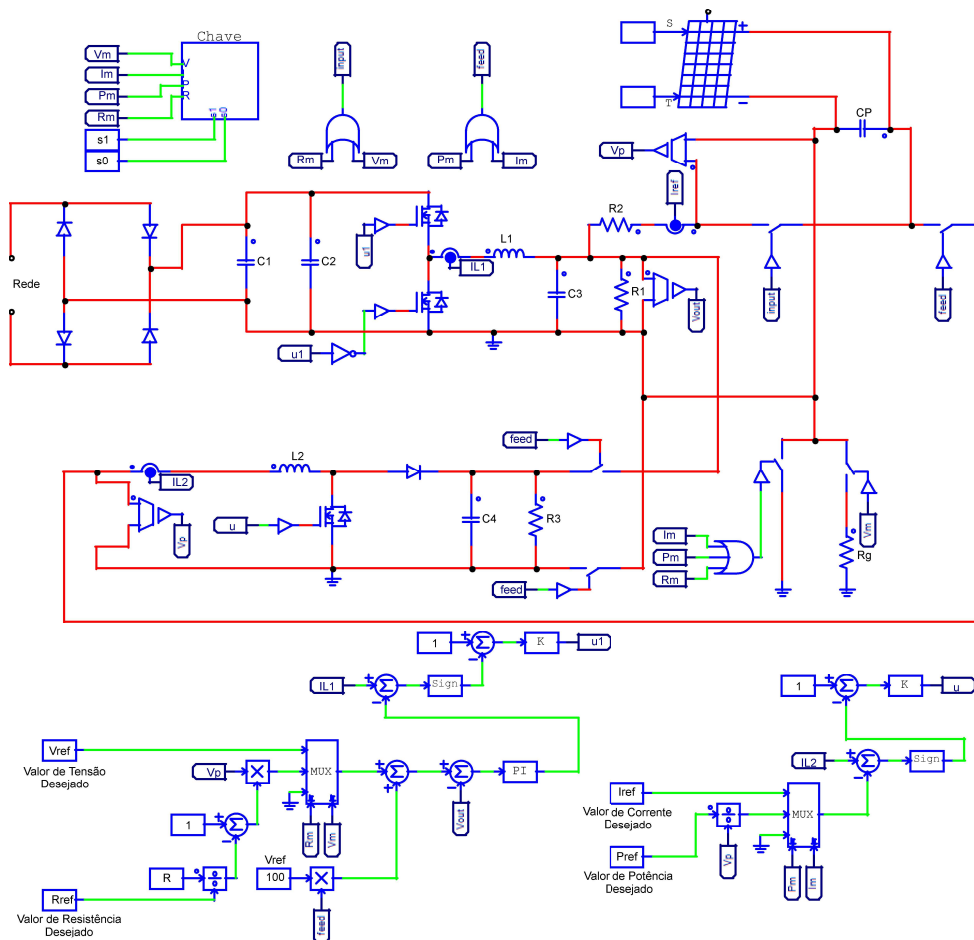


Figura 4. Carga Eletrônica.

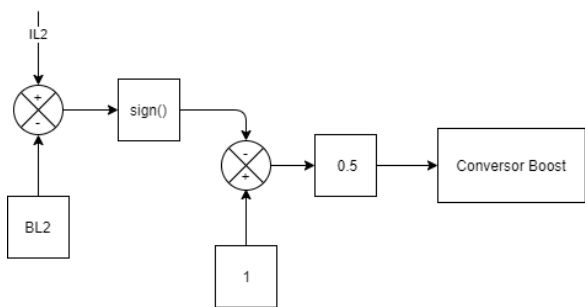


Figura 5. Diagrama do Controle Sliding Mode.

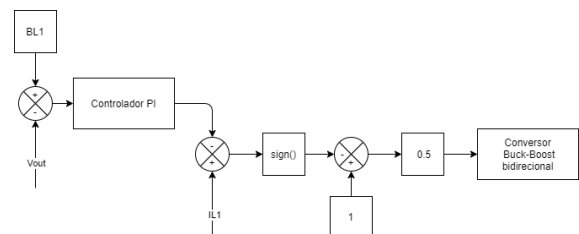


Figura 6. Diagrama do Controle em Cascata PI-SMC.

Modo de Resistência Este modo funciona de forma similar ao modo de tensão, porém escolhe-se o valor da resistência vista pelo painel solar. Apesar de ser possível controlar a corrente de entrada do circuito a partir de

uma tensão base medida, para obter valores elevados de resistência este método apresenta maior imprecisão devido a necessidade de controlar uma corrente de entrada muito baixa. Para contornar este problema foi utilizado o conceito de resistência virtual de forma a controlar a tensão, e assim, permitindo uma maior precisão para o valor da resistência vista pela entrada. Esta resistência virtual pode ser modelada ajustando-se o valor da tensão de saída (V_{out}) do conversor *buck-boost* em relação à tensão de entrada do painel (V_P). Assuma

$$I_P = \frac{V_P}{R_V} \quad (7)$$

na qual um valor de tensão V_P é a tensão medida no painel solar e I_P é a corrente que flui por uma resistência R_V . Por outro lado, na Figura 4 sabe-se que

$$I_P = \frac{V_P - V_{out}}{R_2} \quad (8)$$

para um R_2 (componente real do circuito) fixo. A partir de (7) e (8), tem-se

$$R_V V_P - R_V V_{out} = R_2 V_P \quad (9)$$

ou seja,

$$V_{out} = V_P \left(1 - \frac{R_2}{R_V} \right) \quad (10)$$

Logo, ao arbitrar um valor para R_V , encontra-se um valor para V_{out} . Portanto, pode-se utilizar o controlador SMC para controlar a tensão V_{out} a partir de um valor

de referência R_V . Desta forma, é possível obter valores variáveis de resistência constante sem a necessidade de um banco de resistores interno ao circuito.

5. RESULTADOS

A carga eletrônica foi simulada no PSIM, conforme apresentado na Figura 4, com os parâmetros mostrados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros nominais.

Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
R_1	100 Ω	C_1	10 mF
R_2	100 Ω	C_2	100 μ F
R_3	100 Ω	C_3	1 mH
R_g	1 M Ω	C_4	100 μ H
L_1	10 mH	C_p	10 mF
L_2	10 mH	V_{rede}	110 – 220 V

As simulações foram realizadas variando-se os parâmetros de irradiação solar (G) e temperatura ambiente (T_A) do painel fotovoltaico. Os valores utilizados foram divididos em três cenários, como mostra a Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros de irradiação e temperatura utilizados para os cenários de teste.

Cenário	G	T_A
1	1000 W/m^2	25 $^{\circ}C$
2	800 W/m^2	20 $^{\circ}C$
3	600 W/m^2	40 $^{\circ}C$

Além disso, todas as simulações foram realizadas utilizando o valor da resistência interna dos MOSFETs ($R_{DS(on)} = 95\text{ m}\Omega$). Foram arbitrados valores para os quatro modos de operação e os resultados obtidos estão dispostos na Tabela 3.

Tabela 3. Resultados obtidos para diferentes condições de operação.

	Tensão	Corrente	Potência	Resistência
Arbitrado	48 V	1,5 A	425 W	2000 Ω
Cenário 1	48,0037 V	1,50255 A	425,157 W	2000,01 Ω
Cenário 2	48,0038 V	1,50260 A	425,157 W	1999,99 Ω
Cenário 3	48,0029 V	1,50178 A	425,044 W	2000 Ω

Modo de Tensão

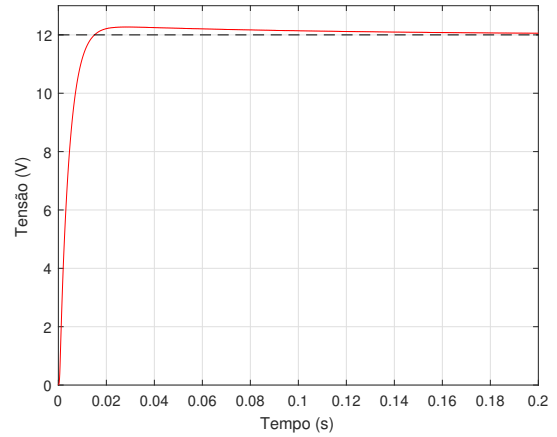
Obteve-se uma precisão de uma casa decimal para o tempo mostrado na Figura 7. Após este intervalo, atinge-se precisão de duas casas decimais em até 1 s, com alcance de 12 V à 120 V.

Modo de Corrente

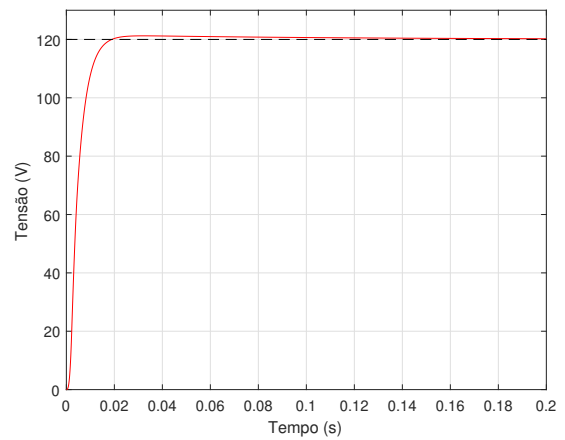
Atingiu-se precisão de duas casas decimais, tendo como valor mínimo 1 A e valor máximo projetado de 20 A. Utilizando o Cenário 1, foi arbitrado 14 A para a corrente, de forma a analisar o tempo de subida mostrado na Figura 8.

Modo de Potência

Na simulação arbitrou-se 800 W de forma a obter o tempo de subida até chegar na superfície deslizante, como mostrado na Figura 9.



(a) Tensão mínima de operação



(b) Tensão máxima de operação

Figura 7. Resposta ao degrau do sistema operando no modo de tensão.

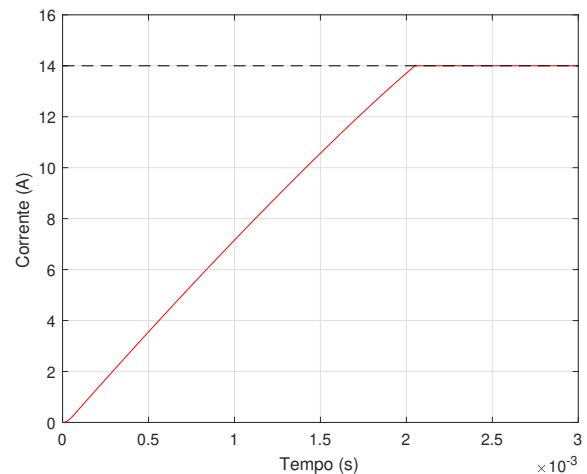


Figura 8. Carga eletrônica operando no modo de corrente.

Modo de Resistência

O circuito projetado permitiu obter resistências de 200 Ω a 2000 Ω com uma boa precisão, como mostra a Figura 10 e a Tabela 3.

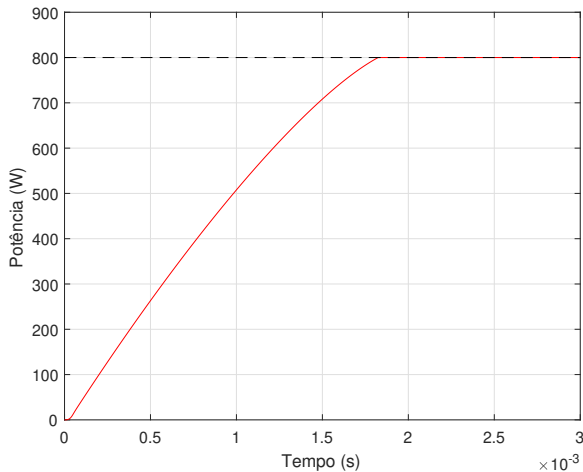
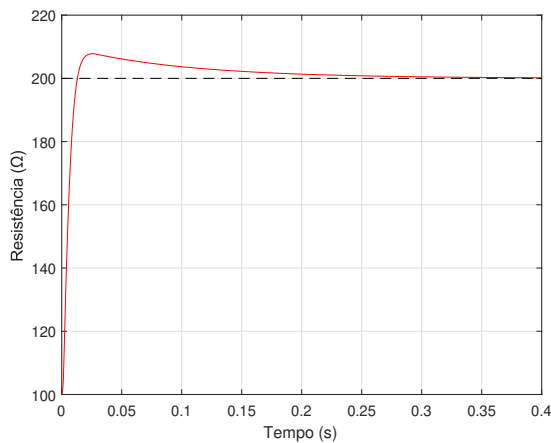
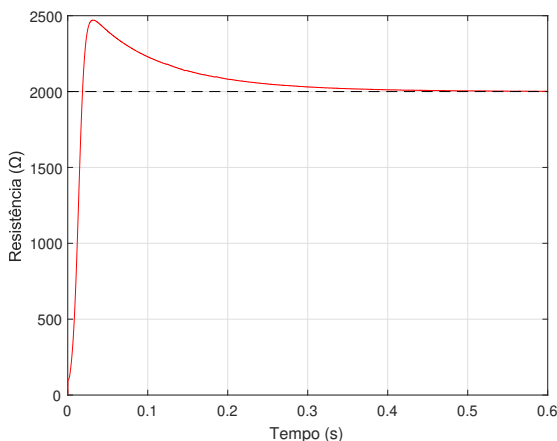


Figura 9. Carga eletrônica operando no modo de potência.



(a) Resistência mínima de operação



(b) Resistência máxima de operação

Figura 10. Resposta ao degrau da carga eletrônica operando no modo de resistência.

6. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos com o projeto mostram-se satisfatórios, apresentando baixos valores de *ripple* e boa precisão para os modos de operação. O uso do SMC, em conjunto

com o controlador PI, permitiu que o circuito fosse preciso mesmo sob variações de irradiação e temperatura do painel. A solução desenvolvida para a simulação da resistência no circuito *buck-boost* bidirecional é um dos pontos de maior destaque no desenvolvimento do projeto, permitindo encontrar valores precisos a partir de uma resistência fixa definida pelo projetista. Trabalhos futuros incluem a alocação de um sistema de armazenamento para aproveitar a energia não utilizada em cada modo de operação e permitir reversão de fluxo de potência, além disso espera-se realizar a implementação de um protótipo em bancada.

REFERÊNCIAS

- AlZawaideh, A. and Boiko, I. (2020). Analysis of a sliding mode dc-dc boost converter through lprs of a nonlinear plant. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 35(11), 12321–12331. doi:10.1109/TPEL.2020.2983596.
- Chaturvedi, S., Fulwani, D., and Patel, D. (2021). Dynamic virtual impedance based second order ripple regulation in dc microgrids. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 1–1.
- Duran, E., Piliouge, M., Sidrach-de Cardona, M., Galan, J., and Andujar, J. (2008). Different methods to obtain the i-v curve of pv modules: A review. In *2008 33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 1–6.
- IRENA (2019). Future of solar photovoltaic: Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects. *International Renewable Energy Agency*, 12–34.
- Jin-Ho, A., Cho, E.C., Hwang, M.I., Shin, S.M., and Kim, H.I. (2012). A cost-effective method for pv module field test using an electronic load. In *2012 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 001282–001285. doi: 10.1109/PVSC.2012.6317836.
- Kazerani, M. (2007). A high-performance controllable dc load. In *2007 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 1015–1020. doi:10.1109/ISIE.2007.4374737.
- Keysight (2019). Electronic load fundamentals.
- Kuai, Y. and Yuvarajan, S. (2006). An electronic load for testing photovoltaic panels. *Journal of Power Sources*, 154(1), 308–313.
- Magossi, R.F.Q., Han, S., Machado, R.Q., Oliveira, V.A., and Bhattacharyya, S.P. (2020). Geometric-based pid control design with selective harmonic mitigation for dc-dc converters by imposing a norm bound on the sensitivity function. *IET Control Theory & Applications*.
- Patel, M.R. (2005). *Wind and solar power systems: design, analysis, and operation*. CRC press.
- Sanchis, P., Echeverria, I., Ursua, A., Alonso, O., Gubia, E., and Marroyo, L. (2003). Electronic converter for the analysis of photovoltaic arrays and inverters. In *IEEE 34th Annual Conference on Power Electronics Specialist, 2003. PESC '03.*, volume 4, 1748–1753 vol.4. doi:10.1109/PESC.2003.1217720.
- Sutikno, T., Subrata, A.C., and Elkhateb, A. (2021). Evaluation of fuzzy membership function effects for maximum power point tracking technique of photovoltaic system. *IEEE Access*, 9, 109157–109165.
- Utkin, V. (2013). Sliding mode control of dc/dc converters. *Journal of the Franklin Institute*, 350(8), 2146–2165.