

16º Congresso de Inovação, Ciência e Tecnologia do IFSP - 2025

Desenvolvimento de um conversor buck síncrono para aplicação em sistemas autoalimentados com energia fotovoltaica e bateria para armazenamento

GABRIEL A. MELOTO¹, PABLO R. SOUZA²

¹ Graduando em Engenharia Elétrica, Bolsista PIBIFSP, IFSP, Câmpus Piracicaba, gabriel.meloto@ifsp.edu.br.

² Professor de Eletrônica Analógica, Eletrônica de Potência e Microcontroladores, Orientador, IFSP, Câmpus Piracicaba, pablo@ifsp.edu.br.

Área de conhecimento (Tabela CNPq): 3.04.03.03-0

RESUMO: Dispositivos eletrônicos utilizados em locais sem rede elétrica, dependem de baterias, que apresentam limitações de durabilidade e impactos ambientais. A energia fotovoltaica surge como alternativa promissora o desenvolvimento de sistemas autoalimentados. Neste tipo de aplicação, os conversores CC-CC são essenciais para ajustar a tensão do painel para as condições requeridas pela carga. Este trabalho apresenta o projeto e implementação de um conversor buck síncrono destinado ao carregamento de baterias a partir de painéis fotovoltaicos. O conversor possui sensores de tensão e corrente, necessários para a implementação de algoritmos de rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT) do painel fotovoltaico e para controlar a tensão e a corrente de carga da bateria. Foram desenvolvidos circuitos eletrônicos para condicionar a tensão e corrente de um painel fotovoltaico, produzindo sinais de tensão adequados para serem aplicados nas entradas analógicas de um microcontrolador. O sistema proposto mostra-se adequado para aplicações autônomas de carregamento de baterias em locais sem acesso à rede elétrica, contribuindo para soluções sustentáveis de geração e armazenamento de energia.

PALAVRAS-CHAVE: conversor buck; carregador de bateria; sistemas autoalimentados; fotovoltaico; sensor de tensão; sensor de corrente.

Development of a synchronous buck converter for application in self-powered systems with photovoltaic energy and battery storage

ABSTRACT: Electronic devices used in off-grid locations rely on batteries, which have limited durability and environmental impacts. Photovoltaic energy emerges as a promising alternative for the development of self-powered systems. In such applications, DC-DC converters are essential for adjusting the panel voltage to the load's required conditions. This paper presents the design and implementation of a synchronous buck converter for charging batteries from photovoltaic panels. The converter has voltage and current sensors, necessary for implementing maximum power point tracking (MPPT) algorithms for the photovoltaic panel and for controlling the battery charging voltage and current. Electronic circuits were developed to condition the voltage and current of a photovoltaic panel, producing voltage signals suitable for application to the analog inputs of a microcontroller. The proposed system proves suitable for autonomous battery charging applications in locations without access to the power grid, contributing to sustainable energy generation and storage solutions.

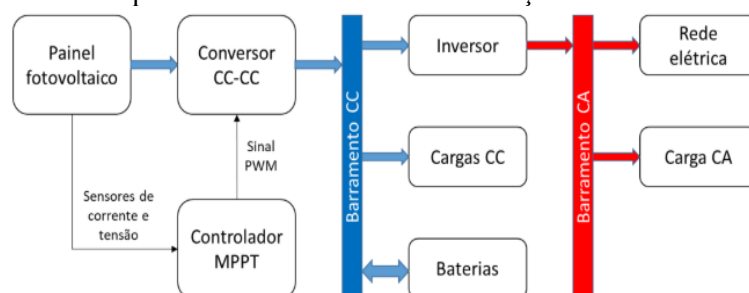
KEYWORDS: buck converter; battery charger; self-powered systems; photovoltaic; voltage sensor; current sensor.

INTRODUÇÃO

Atualmente, os dispositivos eletrônicos são amplamente utilizados em diversos setores, tais como Transporte, Saúde e Agricultura. Em locais sem infraestrutura elétrica, usam-se baterias para energizar estes dispositivos. Contudo, as baterias apresentam limitações quanto a sua durabilidade e questões ambientais. Uma alternativa promissora que vem sendo estudada é o uso de energia fotovoltaica para alimentar esses dispositivos de forma autônoma. Hao *et al.* (2022) fizeram uma revisão sobre aplicações de dispositivos autoalimentados com energia solar, dentre os quais descreve um sistema fotovoltaico portátil para alimentação de dispositivos em ferrovias. Thene e Mathaba (2023), descreveram uma rede de sensores utilizando tecnologia *LoRa* e um sistema de autoalimentação baseado em energia solar.

Os conversores CC-CC (Corrente Contínua) são essenciais em sistemas de energia baseados em painéis solares, pois ajustam a tensão da placa solar para a tensão requerida pela carga. A Figura 1 mostra um diagrama ilustrando os principais componentes que constituem um sistema de alimentação fotovoltaico (Sutkino *et al.*, 2023). A tensão no barramento CC é definida pelo sinal PWM (*Pulse Width Modulation*) gerado pelo circuito de controle do conversor que implementa o algoritmo MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) para extrair a potência máxima do painel. Esta tensão pode ser utilizada para alimentar diretamente cargas com corrente contínua, carregar baterias ou na entrada de um inversor para alimentar uma carga de corrente alternada ou injetar energia na rede elétrica.

FIGURA1. Esquema de um sistema de alimentação fotovoltaico.



MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho apresenta o dimensionamento de um conversor abaixador de tensão (buck) síncrono com circuitos para medir as tensões e correntes na entrada e saída do conversor. A Figura 2 mostra a aplicação deste circuito para carregar baterias a partir de energia solar. A tensão na saída do conversor é dada por:

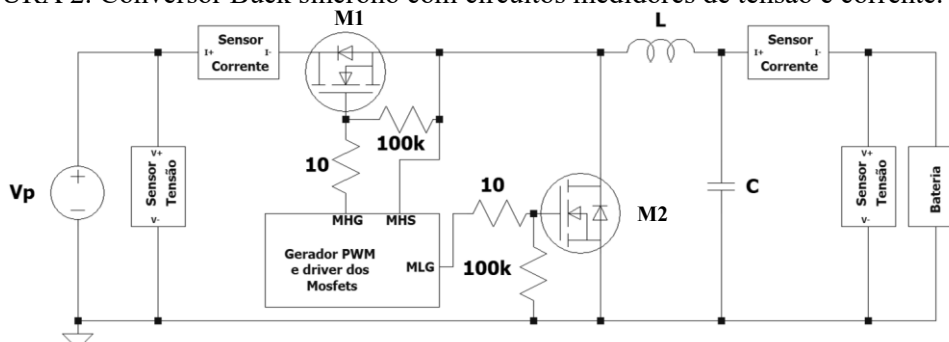
$$V_s = D \times V_p \quad (1)$$

em que,

V_p : tensão de entrada

D : largura do pulso do sinal PWM

FIGURA 2. Conversor Buck síncrono com circuitos medidores de tensão e corrente.



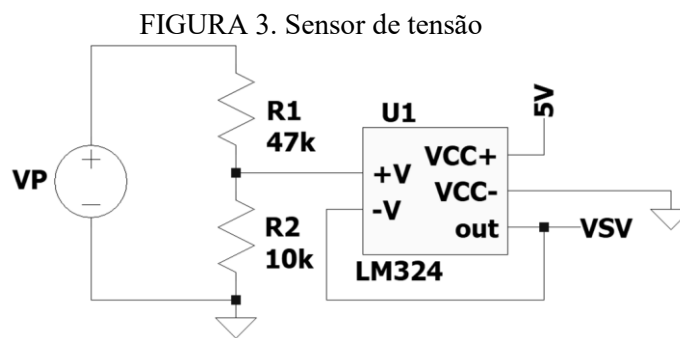
O conversor foi projetado para um painel fotovoltaico de 20W com tensão e corrente de máxima potência de 18 V e 1,2 A, respectivamente, e para uma bateria de 12Ah com tensão de flutuação de 13,7V e corrente de carga de 1,2 A. A indutância e a capacitância do conversor podem ser calculadas pelas equações 2 e 3, onde ΔI_L e ΔV_S correspondem às variações da corrente no indutor e da tensão de saída e f a frequência do sinal PWM.

$$L = \frac{(V_p - V_s) \times D}{\Delta I_L \times f} \quad (2)$$

$$C = \frac{\Delta I_L}{8 \times f \times \Delta V_S} \quad (3)$$

O conversor foi construído com transistores Mosfet IRFZ44N, capacitor de 10uF/25V e indutor 430uH. Considerando $V_p=18V$, $V_s=13,7V$ e $f=62kHz$, as variações da corrente no indutor e da tensão de saída são 122,8mA e 24,7mV.

O sensor de tensão consiste em um divisor resistivo e um amplificador operacional LM324 em ganho unitário, para reduzir a tensão do painel de 18V para aproximadamente 3V para poder ser medida pela entrada analógica de um microcontrolador. A Figura 3 mostra o circuito sensor de tensão. Para obter a curva de calibração do sensor de tensão foi feito um ensaio para medir a tensão na saída do sensor (VSV), variando a tensão V_p de 5V a 18V com uma fonte de bancada variável.



O sensor ACS712-5A foi utilizado para medir as correntes no circuito. O módulo deste sensor possui dois bornes na entrada que recebem a corrente e três pinos, sendo dois para alimentação VCC e GND e a saída analógica, com tensão de 2,5 V para uma corrente de 0A. A sua sensibilidade é de 180mV/A e a faixa de operação é de -5A a 5A (Demetras, 2020). Dessa forma, a tensão na saída do sensor varia entre 1,6V (-5A) e 3,4V (5A). Como a corrente do painel fotovoltaico é contínua, foi desenvolvido um circuito condicionador com dois amplificadores operacionais LM358, com o objetivo de remover a tensão de 2,5V para $I=0$ e aumentar a sensibilidade do sinal correspondente a corrente do painel. A Figura 4 mostra o circuito composto por um divisor de tensão resistivo em conjunto com um amplificador seguidor de tensão que gera uma tensão de 2,5V a partir da tensão de alimentação do módulo sensor e um amplificador diferencial que subtrai essa tensão de 2,5V do sinal da saída do sensor de corrente (SI) e aplica um ganho de tensão. Desse modo, a saída do circuito é dada por:

$$VSI = (0,18 \times I) \times \frac{R6}{R4} \quad (4)$$

em que,

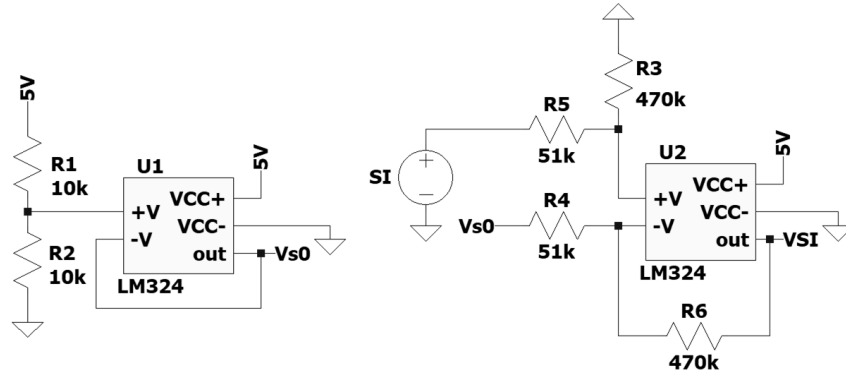
VSI : tensão proporcional a corrente;

I : corrente medida;

$R6$ e $R4$: resistores que determinam o ganho do amplificador diferencial.

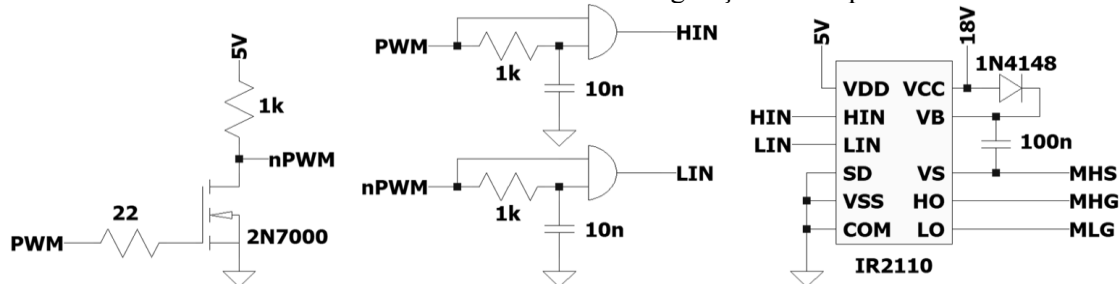
O circuito foi testado na faixa de 0,2 a 2A utilizando uma fonte de bancada com saída variável. O circuito apresenta um ganho de aproximadamente 9,2, gerando uma tensão de 3,31V para uma corrente de 2A.

FIGURA 4. Sensor de corrente



O driver IR2110 foi utilizado para gerar as tensões V_{GS} para controlar os mosfets do conversor buck. A Figura 5 mostra o circuito com um mosfet 2N7000 atuando como inversor para gerar o complemento do sinal PWM e um arranjo com portas lógicas E para gerar um tempo morto entre as transições dos sinais LIN e HIN do IR2110. Isso é necessário para garantir que os transistores M1 e M2 da Figura 1 não entrem em condução simultaneamente.

FIGURA 5. Drive dos transistores Mosfet com geração de tempo morto.



O sinal PWM foi gerado utilizando uma placa de desenvolvimento Arduino Uno. A Figura 6 mostra o programa desenvolvido. Os registradores TCCR2A e TCCR2B ATmega328P foram configurados para ativar o modo fast PWM e gerar um sinal com frequência de 62kHz no pino 3 do microcontrolador. A largura do pulso (D) é controlada pelo valor do registrador OCR2B, sendo 0 para 0 e 255 para 1.

FIGURA 6. Programa do microcontrolador da placa de desenvolvimento Arduino Uno

```

1 //Programa que gera sinal PWM no pino D3 da placa Arduino Nano
2 byte sPWM;
3
4 void setup() {
5     pinMode(3,OUTPUT);
6
7     TCCR2A= _BV(COM2A1) | _BV(COM2B1) | _BV(WGM21) | _BV(WGM20); //WGM21=1, WGM20=1 ativa o modo fast pwm
8     TCCR2B= _BV(CS20); //CS20=1 configura divisor de frequência para 1 para obter fpwm=62,3kHz
9     OCR2B = 209; //Valor da largura de pulso de 0 a 255
10 }
11
12 void loop() {
13
14 }

```

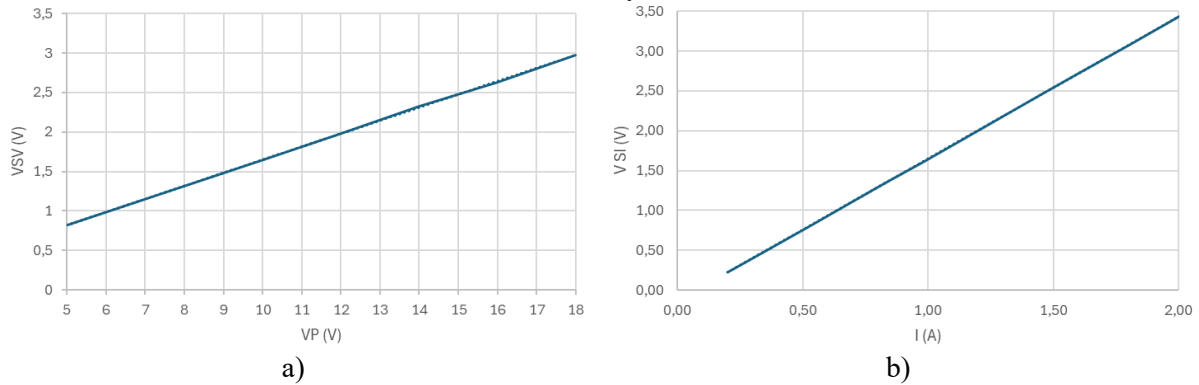
Para testar o conversor, foi utilizada uma fonte de 18V para representar a tensão do painel e uma carga resistiva de 20Ω. A largura do pulso foi ajustada entre 0,3 e 0,9, com incrementos de 0,1.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As curvas de calibração dos sensores de tensão e corrente são apresentadas na Figura 7. As equações 5 e 6, derivadas do ajuste linear dos gráficos da Figura 7, expressam as relações VSV versus

VP e VSI versus I, respectivamente. Essas equações podem ser utilizadas no programa do microcontrolador para implementar o algoritmo MPPT e controlar a tensão e corrente na carga da bateria.

FIGURA 7. Curva de calibração do sensor de tensão.

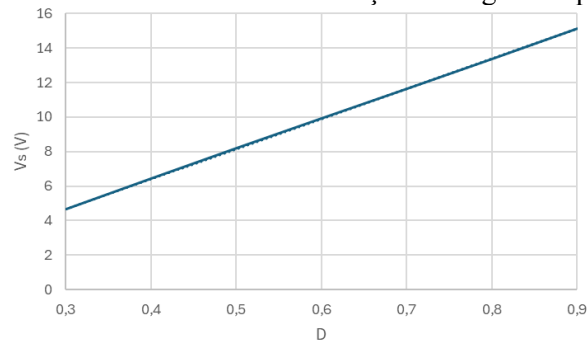


$$VSV = 0,1653 \times Vp - 0,0029 \quad (5)$$

$$VSI = 1,7841 \times I - 0,1296 \quad (6)$$

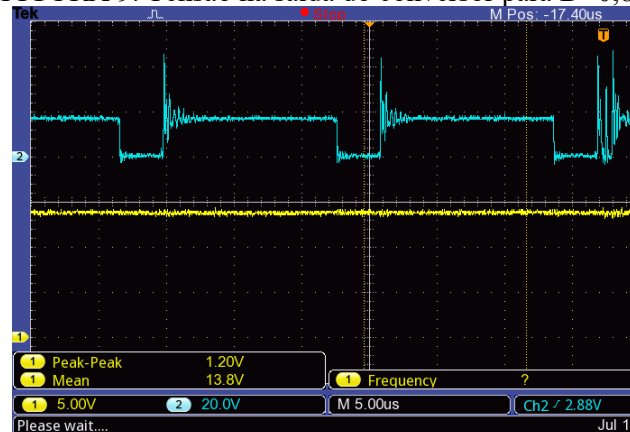
A Figura 8 apresenta a tensão na saída do conversor em função da largura de pulso do sinal PWM.

FIGURA 8. Tensão na saída do conversor em função da largura de pulso do sinal PWM



A Equação 7 mostra o ajuste linear do gráfico da Figura 8. Dessa forma, para obter uma tensão de aproximadamente 13,7 V, a largura do pulso deve ser 0,82. A Figura 9 mostra a tensão VP modulada antes do filtro LC (traço 2 azul) e a tensão filtrada na saída do conversor (traço 1 amarelo), com valor médio de 13,8V.

FIGURA 9. Tensão na saída do conversor para D=0,82



$$V_s = 17,404 \times D - 0,5493 \quad (7)$$

Os sensores de tensão e corrente foram avaliados por meio de medições na saída do conversor buck, operando com razão cíclica $D=0,82$, resultando em 14,8 V para a tensão e 0,66 A para a corrente. Para efeito de comparação, as mesmas grandezas foram medidas utilizando um multímetro comercial, obtendo-se 13,8 V e 0,67 A.

CONCLUSÕES

Neste trabalho foi desenvolvido um conversor buck síncrono com sensores de tensão e corrente e circuitos para o condicionamento dos sinais gerados por esses sensores. As curvas de calibração e as equações das retas de regressão linear dos sensores foram obtidas por meio de experimentos em laboratório. A diferença entre os valores de tensão e corrente indicados pelos sensores e medidos com um multímetro apresentaram erro máximo de aproximadamente 8%. O conversor é controlado pelo sinal PWM gerado pelo microcontrolador da placa Arduino Uno, programado para operar no modo *fast PWM*. A tensão de 13,8 V foi obtida a partir de 18V configurando o sinal PWM com largura de pulso 0,82. O sistema proposto apresenta potencial para uso em sistemas fotovoltaicos autoalimentados. Na etapa atual de desenvolvimento do projeto, o conversor opera em malha aberta, ou seja, os sinais de tensão e corrente obtidos pelos sensores não foram empregados no ajuste da largura de pulso do sinal PWM. Trabalhos futuros irão substituir a fonte de bancada pelo painel fotovoltaico, a carga resistiva pela bateria e o programa do microcontrolador irá implementar o controle da tensão e corrente de carga da bateria e o algoritmo MPPT a partir dos sinais de tensão e corrente medidos pelos sensores.

REFERÊNCIAS

- DEMETRAS, E. Módulo ACS712 - medindo corrente elétrica alternada e contínua com Arduino. 2018. Disponível em: <https://portal.vidadesilicio.com.br/acs712-medindo-corrente-eletrica-alternada-continua/>. Acesso em: 27 abr. 2020.
- HAO, D.; QI, L.; TAIRAB, A. M.; AHMED, A.; AZAM, A.; LUO, D.; PAN, Y.; ZHANG, Z.; YAN, J. Solar energy harvesting technologies for PV self-powered applications: a comprehensive review. *Renewable Energy*, v. 188, p. 123-145, 2022.
- SUTIKNO, T.; SAMOSIR, A. S.; APRILianto, R. A.; PURNAMA, H. S.; ARSADIANDO, W.; PADMANABAN, S. Advanced DC-DC converter topologies for solar energy harvesting applications: a review. *Clean Energy*, v. 7, n. 3, p. 555-570, 2023. DOI: 10.1093/ce/zkad003.
- THENE, M. E.; MATHABA, T. N. D. Analysing the design of a solar energy harvesting wireless sensor node for agricultural applications. In: SAMEERCHAND PUDARUTH; UPASANA SINGH (ed.). *Proceedings of the 5th International Conference on Artificial Intelligence, Big Data, Computing and Data Communication Systems (icABCD 2022)*, Durban, South Africa, 4-5 Aug. 2022. IEEE. ISBN 978-1-6654-8422-0. DOI: 10.1109/icABCD54961.2022.9856301.