Estudo Computacional de Sistema Fotovoltaico com Conversor BOOST e MPPT

Pedro Mendes S. Júnior[1], Eliane Silva Custódio[2], Maria Aline Gonçalves[2]

[1]Estudante de Engenharia Elétrica, Centro Universitário Internacional UNINTER, Anápolis, GO, Brasil (jrpedromendes@gmail.com)
[2]Docente do Centro Universitário Internacional UNINTER, Curitiba, PR, Brasil

*Resumo:*Este trabalho apresenta a modelagem e simulação de um sistema fotovoltaico integrado a um conversor CC-CC BOOST com rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT). A análise é realizada no LTspice, com obtenção das curvas I-V e P-V sob diferentes condições operacionais. Os resultados indicam que o sistema opera próximo ao ponto de máxima potência, validando a abordagem proposta.

Palavras-chave: MPPT; Conversor BOOST; Controle de Potência; Simulação no LTspice.

INTRODUÇÃO

Os sistemas de rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT - *Maximum Power Point Tracking*) são utilizados para aumentar a eficiência energética de sistemas fotovoltaicos, uma vez que as características corrente-tensão (I-V) e potência-tensão (P-V) dos painéis apresentam comportamento não linear e variam conforme as condições ambientais, como irradiância e temperatura (Subudhi; Pradhan, 2013). Dessa forma, o ponto de operação que maximiza a potência extraída do painel não é fixo, exigindo adaptação contínua do sistema.

Assim, conversores CC-CC do tipo BOOST são empregados como estágio de interface entre o gerador fotovoltaico e a carga, devido à sua capacidade de elevação de tensão e facilidade de controle por meio do ajuste do ciclo de trabalho (*duty cycle*) (Ahmed, 2000; Hart, 2012). Quando associados a algoritmos MPPT, esses conversores deixam de atuar apenas como reguladores de tensão e passam a desempenhar papel ativo no gerenciamento energético do sistema.

Este trabalho dá continuidade a um estudo previamente desenvolvido sobre o projeto e dimensionamento de um conversor CC-CC BOOST operando em modo de condução contínua. A partir dessa base, o conversor é integrado a um sistema fotovoltaico com MPPT, no qual o controle do ciclo de trabalho é utilizado para rastrear o ponto de máxima potência do painel fotovoltaico, adotando-se o algoritmo de Perturbação e Observação (P&O), amplamente utilizado na literatura devido à sua simplicidade e robustez (Subudhi; Pradhan, 2013; Cavalcanti et al., 2007).

MATERIAL E MÉTODOS

O desenvolvimento do sistema proposto baseia-se em um estudo computacional da integração de um conversor CC-CC BOOST a um sistema de rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT) aplicado a sistemas fotovoltaicos. A metodologia adotada tem como foco principal a análise e validação do comportamento elétrico do sistema por meio de simulações no software LTspice.

O conversor BOOST considerado neste estudo opera em modo de condução contínua (CCM), sendo do tipo não isolado, também conhecido como chopper elevador de tensão (*step-up*) (Ahmed, 2000). Sua topologia básica é composta por uma fonte de entrada, um indutor (L), um dispositivo de chaveamento controlado (MOSFET), um diodo (D), um capacitor (C) e uma carga resistiva (RL), conforme apresentado na Figura 1.

O conversor utilizado tem como base um projeto previamente dimensionado, passando, neste trabalho, a atuar como estágio de interface entre o painel fotovoltaico e a carga no contexto de um sistema com MPPT.

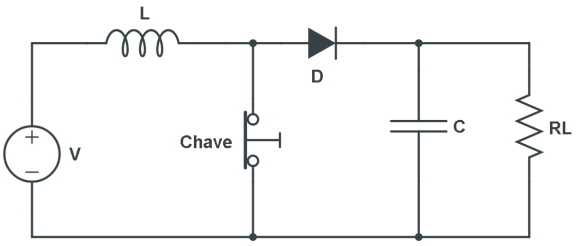

Figura 1 - Circuito do conversor Boost.

Em trabalhos clássicos, o funcionamento do conversor BOOST é analisado considerando seus dois estados de operação, com a chave ligada e desligada, conforme descrito em Hart (2012). O controle do circuito é realizado por meio do ajuste do ciclo de trabalho (*duty cycle*), representado por D, parâmetro fundamental para a definição da relação entre as tensões de entrada e saída. A partir dessas relações, são avaliados os efeitos do *duty cycle* no comportamento do conversor quando submetido às variações impostas pela atuação do MPPT.

Entretanto, no presente trabalho, optou-se por utilizar uma representação simplificada do conversor, adequada ao objetivo educacional da simulação. Em vez de modelar explicitamente o indutor, o capacitor, a chave semicondutora, o diodo, a carga e o ciclo de trabalho, o conversor foi representado por uma dinâmica equivalente de primeira ordem discretizada. Essa aproximação considera que o estágio boost atua de forma a fazer a tensão terminal do painel fotovoltaico seguir uma referência de tensão V_{ref}, definida pelo algoritmo MPPT (Tonolo, 2024). O modelo simplificado adotado no código é dado por:

$$V_{pv}[k] = V_{pv}[k-1] + \frac{\Delta t}{\tau}\left(V_{ref} - V_{pv}[k-1]\right) \quad (1)$$

A modelagem do painel fotovoltaico é realizada no ambiente de simulação, utilizando um modelo matemático amplamente empregado na literatura, baseado no circuito equivalente de um diodo com resistências série e paralela, o qual descreve seu comportamento elétrico e permite a obtenção das curvas corrente-tensão (I-V) e potência-tensão (P-V) (Martins et al., 2022). O ponto de máxima potência é identificado a partir da condição de máximo da curva P-V, sendo esse ponto utilizado como referência para a atuação do algoritmo MPPT.

As Equações (2) a (5) são empregadas para representar matematicamente as características do painel fotovoltaico e possibilitar a análise de seu comportamento sob diferentes condições de operação.

A Equação (2) é baseada no modelo equivalente de um diodo com resistências série e paralela, utilizado na modelagem de sistemas fotovoltaicos (Chariag; Sbita, 2017; Martins et al., 2022). Já as Equações (3) a (5) decorrem da definição da potência elétrica e da condição de maximização da curva potência-tensão (P-V).

$$I = I_{ph} - I_S\left[exp\left(\frac{V+R_S I}{aV_t}\right) - 1\right] - \frac{V+IR_S}{R_{sh}} \quad (2)$$

Onde:

I é a corrente de saída do módulo fotovoltaico;

V é a tensão nos terminais do módulo;

I_{ph} é a corrente fotogerada;

I_s é a corrente de saturação do diodo;

R_s é a resistência série;

R_{sh} é a resistência paralela;

a é o fator de idealidade do diodo;

V_t é a tensão térmica.

O ponto de máxima potência ocorre quando:

$$\frac{dP}{dV} = 0 \quad (3)$$

$$P = VI \quad (4)$$

$$\frac{dP}{dV} = I + V\frac{dI}{dV} = 0 \quad (5)$$

Embora a Equação (2) represente o modelo completo do painel fotovoltaico, nas simulações computacionais foi adotada uma abordagem simplificada da curva potência-tensão (P-V), baseada em uma aproximação parabólica em torno do ponto de máxima potência (Leedy; Garcia, 2013; Liu et al., 2024), conforme expressa pela Equação (6):

$$P(V) = P_{max}\left(\left(\frac{V-V_{mpp}}{V_{mpp}}\right)^2\right) \quad (6)$$

Essa simplificação permite avaliar o desempenho dos algoritmos MPPT com menor custo computacional, mantendo as características principais do comportamento do sistema fotovoltaico.

Os parâmetros elétricos do módulo fotovoltaico utilizados na modelagem e nas simulações são apresentados na Tabela 1, sendo empregados diretamente nas Equações (2) a (5) para a obtenção das curvas características I-V e P-V do painel.

Os parâmetros foram obtidos a partir de duas fontes: dados fornecidos pelo fabricante do módulo fotovoltaico KC200GT, em condições padrão de teste (STC), e parâmetros do modelo equivalente de um diodo, determinados por meio de ajuste matemático com base nesses dados, conforme metodologia amplamente utilizada na literatura (MARTINS et al., 2022).

Com base nesses parâmetros, foram realizadas simulações no software LTspice para a obtenção das curvas características do painel fotovoltaico, apresentadas nas Figuras 3 e 4.

Tabela 1. Parâmetros do módulo fotovoltaico KC200GT

Parâmetros	Valores	Origem
Ns	54	Fabricante
Isc (A)	8,21	Fabricante
Voc (V)	32,9	Fabricante
Impp (A)	7,61	Fabricante
Vmpp (V)	26,3	Fabricante
KI (mA/°C)	3,18	Fabricante
KV (V/°C)	-0,123	Fabricante
a	1,3	Modelo
IS (A)	$9{,}82 \times 10^{-8}$	Modelo
Rs (Ω)	0,22831	Modelo
Rsh (Ω)	568,3779	Modelo
IPV (A)	8,2133	Calculado

Fonte: Dados do fabricante Kyocera e parâmetros obtidos por modelagem do circuito equivalente conforme metodologia apresentada em MARTINS et al. (2022).

O algoritmo de rastreamento adotado é o Perturbação e Observação (P&O), é utilizado na literatura devido à sua simplicidade e eficácia (Subudhi; Pradhan, 2013).

As simulações do conversor e do sistema elétrico são realizadas no software LTspice, permitindo a análise das grandezas elétricas do sistema. A implementação e avaliação dos algoritmos MPPT são realizadas em ambiente computacional utilizando linguagem Python, possibilitando a análise do comportamento dinâmico dos métodos frente a variações de irradiância e condições operacionais. Adicionalmente, ferramentas computacionais são empregadas para o tratamento e a visualização dos dados obtidos.

Nesta etapa, não é implementada uma malha de controle PWM nem uma arquitetura embarcada com microcontrolador. A simulação concentra-se na comparação entre os algoritmos MPPT P&O e Incremental Conductance, que ajustam a referência de tensão V_{ref} do painel fotovoltaico (Fig. 2). O conversor boost é representado por uma dinâmica equivalente de primeira ordem, de modo que a tensão do painel V_{pv} tende a seguir essa referência. Assim, o foco do trabalho está na análise da potência extraída, da resposta às variações de irradiância e do erro de rastreamento em relação ao ponto de máxima potência teórico.



Figura 2 – Fluxograma do algoritmo implementado.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos a partir das simulações computacionais evidenciam o comportamento esperado do sistema MPPT baseado em conversor BOOST na extração da máxima potência de um painel fotovoltaico. Inicialmente, foram geradas as curvas características corrente-tensão (I-V) e potência-tensão (P-V) do módulo fotovoltaico KC200GT, apresentadas nas Figuras 2 e 3.

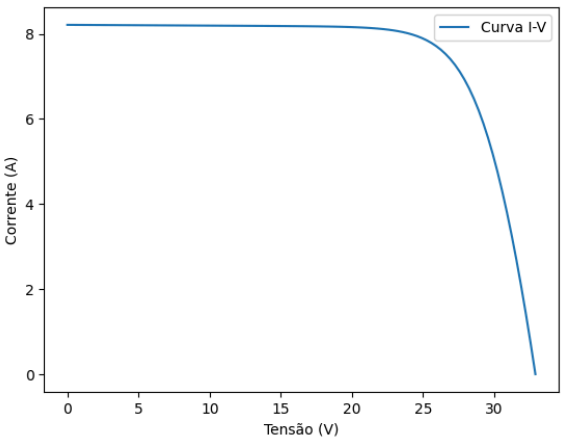

Figura 3. Curva I-V do painel.

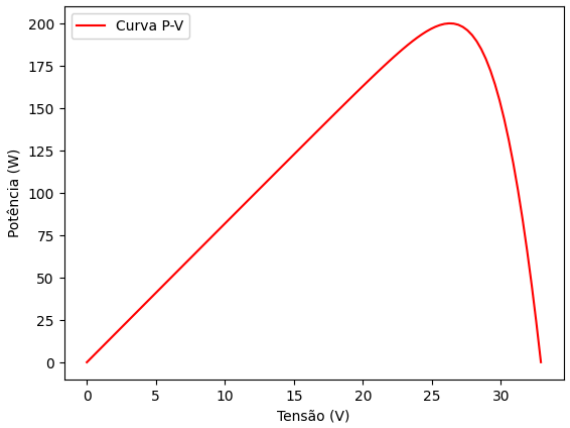

Figura 4. Curva P-V do painel KC200GT.

A Figura 3 apresenta a curva I-V do painel fotovoltaico, evidenciando o comportamento não linear característico desses dispositivos. Esse comportamento confirma a adequação do modelo matemático adotado, bem como sua coerência com a literatura especializada.

A Figura 4 ilustra a curva P-V do painel, na qual é possível identificar o ponto de máxima potência. Esse ponto é utilizado como referência para a atuação do algoritmo de rastreamento, sendo fundamental para a análise do desempenho do sistema MPPT.

A Figura 5 apresenta a arquitetura conceitual do sistema proposto, composta pelo painel fotovoltaico, o conversor BOOST e o bloco de controle responsável pela variação do *duty cycle*. Essa estrutura evidencia o papel do conversor BOOST como elemento de interface entre o gerador fotovoltaico e a carga, permitindo o ajuste dinâmico do ponto de operação do sistema por meio da atuação do MPPT.

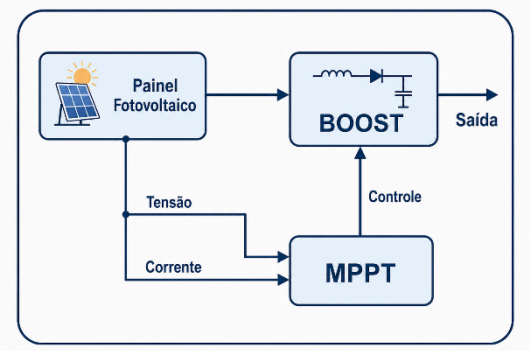

Figura 5 - Gráfico do arranjo proposto para o MPPT.

De forma geral, os resultados das simulações demonstram que a integração do conversor BOOST ao algoritmo MPPT possibilita a operação do sistema próximo ao ponto de máxima potência, validando a abordagem proposta.

Para a análise do desempenho dos algoritmos MPPT, foram realizadas simulações computacionais utilizando um modelo simplificado da curva potência-tensão (P-V), baseado em uma aproximação em torno do ponto de máxima potência. Essa abordagem permite avaliar o comportamento dinâmico dos algoritmos com menor custo computacional, preservando as principais características do sistema fotovoltaico.

A Figura 6 apresenta uma comparação direta do desempenho dos algoritmos P&O e Incremental Conductance (InCond) na capacidade de rastreamento da máxima potência sob variações de irradiância. Observa-se a comparação entre a potência ideal disponível no sistema e a potência efetivamente rastreada pelos algoritmos. Quanto mais próxima da curva ideal, melhor é o desempenho do método na extração da potência máxima.

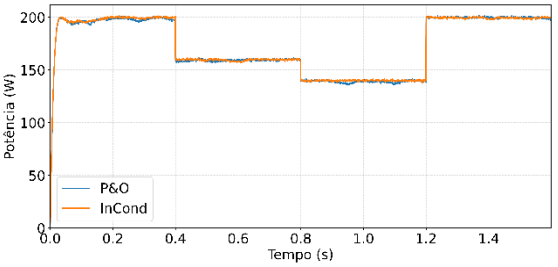

Figura 6. Simulação dos algoritmos com base nos parâmetros qualitativos.

Observa-se que o algoritmo Incremental Conductance apresenta melhor acompanhamento dos valores ideais de potência (10000 W, 8000 W e 7000 W), mantendo maior estabilidade em regime permanente. Apesar de apresentar maior variação no início de sua operação, o algoritmo converge para um comportamento estável. Durante transições de irradiância, observa-se uma resposta mais rápida, porém com maior sensibilidade às variações.

Por outro lado, o algoritmo P&O apresenta oscilações mais evidentes em torno do ponto de máxima potência, característica típica desse método. Ainda assim, o algoritmo demonstra bom desempenho geral, com diferenças não significativas em relação ao método Incremental Conductance, especialmente em regime permanente.

Os resultados obtidos estão em conformidade com o comportamento esperado para os algoritmos analisados, evidenciando a eficiência das técnicas de rastreamento na maximização da potência extraída do sistema fotovoltaico, bem como sua aplicabilidade em diferentes condições operacionais.

Os códigos e documentos utilizados no desenvolvimento do projeto encontram-se

disponíveis em repositório online para consulta e reprodução dos resultados:

https://github.com/CyberArcher0/MPPT.

CONCLUSÃO

Os resultados obtidos por meio das simulações computacionais indicam que o sistema proposto foi capaz de rastrear de forma eficiente o ponto de máxima potência de um painel fotovoltaico, evidenciando a eficácia da integração entre o conversor BOOST e os algoritmos de rastreamento MPPT.

As simulações mostraram que os algoritmos avaliados conseguem acompanhar adequadamente as variações de irradiância, mantendo o sistema operando próximo ao ponto de máxima potência. O ambiente LTspice mostrou-se adequado para a análise do comportamento elétrico do conversor, enquanto a implementação computacional dos algoritmos permitiu avaliar o desempenho dinâmico das técnicas de rastreamento.

O estudo demonstrou que um conversor CC-CC BOOST, previamente dimensionado para operação em modo de condução contínua, pode atuar de forma efetiva no ajuste do ponto de operação em sistemas fotovoltaicos, contribuindo para a maximização da potência extraída. Dessa forma, o trabalho fornece uma base consistente para a análise e desenvolvimento de sistemas MPPT em aplicações de energia solar.

Como continuidade desta pesquisa, recomenda-se a implementação do algoritmo MPPT em hardware utilizando um microcontrolador dedicado, bem como a realização de testes experimentais em condições reais de operação. Adicionalmente, a avaliação de outras técnicas de rastreamento poderá contribuir para a redução de oscilações em regime permanente e para a melhoria do desempenho global do sistema.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Centro Universitário Internacional UNINTER pelo suporte institucional e pela infraestrutura disponibilizada ao longo deste trabalho. Agradecem também aos professores e colaboradores da UNINTER pelo apoio técnico e acadêmico, cujas orientações contribuíram para o aprimoramento deste estudo.

REFERÊNCIAS

AHMED, Ashfaq. Eletrônica de potência. São Paulo: Pearson, 2000.

CAVALCANTI, M. C.; OLIVEIRA, K. C.; AZEVEDO, G. M. S.; NEVES, F. A. S. Comparative Study Of Maximum Power Point Tracking Techniques For Photovoltaic Systems. Eletrônica de Potência, v. 12, n. 2, p. 163–171, 2007. DOI: 10.18618/REP.2007.2.163171. Disponível em: https://journal.sobraep.org.br/index.php/rep/article/view/882.

CHARIAG, M.; SBITA, L. A. Design and Simulation of Photovoltaic Emulator. 2017.

HART, Daniel W. Eletrônica de potência: análise e projetos de circuitos. Porto Alegre: Grupo A, 2012.

KYOCERA. KC200GT High Efficiency Multicrystal Photovoltaic Module – Datasheet. 2022.

LEEDY, A. W.; GARCIA, K. E. Approximation of P-V characteristic curves for use in maximum power point tracking algorithms. *In*: IEEE, 2013, doi: 10.1109/SSST.2013.6524945.

LIU, Yi-Hua *et al.* Comprehensive review on fast maximum power point tracking algorithms for solar power generation systems. Ain Shams Engineering Journal, v. 15, n. 12, p. 103093, 2024, doi: 10.1109/SSST.2013.6524945.

MARTINS, L. F. B. et al. Simulação de painel solar com LTspice XVII. Revista Mundi Engenharia, Tecnologia e Gestão, v. 7, n. 7, 2022.

SUBUDHI, B.; PRADHAN, R. A comparative study on maximum power point tracking techniques for photovoltaic power systems. IEEE Transactions on Sustainable Energy, v. 4, n. 1, p. 89–98, 2013.

TONOLO, Édwin Augusto. Conversores CC-CC de alto ganho interleaved baseados na célula de comutação SC-PFM sem sensor de corrente para sistemas fotovoltaicos. 2024. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica e Informática Industrial) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2024. Disponível em: https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/34163/1/conversoresaltoganhointerleaved.pdf.

VILLALVA, Marcelo G.; GAZOLI, Jonas R.; FILHO, Ernesto Ruppert. Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays. IEEE Transactions on Power Electronics, v. 24, n. 5, p. 1198–1208, 2009. DOI: 10.1109/TPEL.2009.2013862.