

MODELAGEM DO CONVERSOR BOOST DE ENTRADA DE UM INVERSOR ONGRID

Filipe Simões Silva¹, Claudio Henrique Gomes dos Santos ², Raul Vieira da Silva³

¹. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Divinópolis, Brasil
(filipesimoessilva31@gmail.com)

². Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Divinópolis, Brasil

³. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Divinópolis, Brasil

Resumo: Este trabalho apresenta a modelagem do conversor BOOST de entrada de um inversor on-grid com rastreamento do ponto de máxima potência. Os parâmetros do conversor foram obtidos experimentalmente em laboratório e utilizados na simulação em PSIM. Os resultados simulados foram comparados aos experimentais, evidenciando boa concordância e validando o modelo proposto quanto ao comportamento dinâmico, à elevação de tensão e ao desempenho do algoritmo MPPT.

Palavras-chave: Conversor BOOST; MPPT; Inversor on-grid; Sistemas fotovoltaicos; Modelagem.

INTRODUÇÃO

O crescente aumento na demanda global por energia, especialmente a proveniente de fontes renováveis, tem sido um tema de grande relevância nos últimos anos. Diante desse contexto, o aproveitamento da energia solar fotovoltaica (PV) representa um pilar fundamental e de rápido crescimento na matriz energética sustentável. Contudo, a produção de eletricidade pelos painéis fotovoltaicos é intrinsecamente desafiadora, sendo drasticamente influenciada pelas constantes variações climáticas, notadamente a irradiação solar e a temperatura ambiente (Eltawil e Zhao, 2013). Tais alterações resultam em um comportamento de saída não linear, que desloca continuamente as curvas características de Potência-Tensão (P-V) dos módulos (Seguel et al., 2021).

Essa dependência das variáveis ambientais impõe um desafio técnico crucial no projeto de sistemas fotovoltaicos: a dificuldade em garantir um alto rendimento e uma extração de potência consistentemente otimizada. Uma vez que a eficiência de conversão dos módulos PV é limitada, qualquer falha em manter o sistema operando em seu ponto ideal acarreta perdas significativas de energia e o subaproveitamento da capacidade instalada, comprometendo a viabilidade econômica e a eficácia global do sistema.

Para superar esta limitação e maximizar a colheita energética, o emprego de técnicas de Rastreamento do Ponto de Máxima Potência (MPPT – *Maximum Power Point Tracking*) é essencial. O conceito central reside na capacidade de identificação e

seguimento do Ponto de Máxima Potência (MPP) na curva I-V (Ramírez-Murillo et al., 2023). O MPPT atua como um algoritmo de controle que modula dinamicamente a impedância de entrada do sistema, tipicamente por meio de um conversor CC-CC, forçando o painel a operar no ponto de máxima extração de potência, independentemente das oscilações de irradiação e temperatura. No estágio de elevação de tensão do sistema fotovoltaico, a topologia mais amplamente utilizada para implementar essa função de MPPT é o Conversor CC-CC BOOST.

Diante desse cenário, este trabalho tem como objetivo desenvolver a modelagem do conversor BOOST de entrada de um inversor fotovoltaico on-grid, utilizando parâmetros obtidos experimentalmente em laboratório e validando o modelo por meio da comparação entre resultados simulados e experimentais, com ênfase na avaliação do desempenho do algoritmo MPPT.

MATERIAL E MÉTODOS

O desenvolvimento deste trabalho foi dividido em quatro etapas: revisão bibliográfica, modelagem matemática do conversor BOOST, levantamento experimental dos parâmetros do inversor fotovoltaico e validação do modelo por meio de simulações computacionais e ensaios experimentais. Inicialmente, foi realizada uma revisão da literatura sobre sistemas fotovoltaicos conectados à rede, técnicas de rastreamento do ponto de máxima

potência e conversores CC-CC do tipo BOOST, visando fundamentar a modelagem proposta.

A Figura 1 mostra um sistema para um inversor fotovoltaico monofásico conectado a rede cujo primeiro estágio utiliza um conversor BOOST.

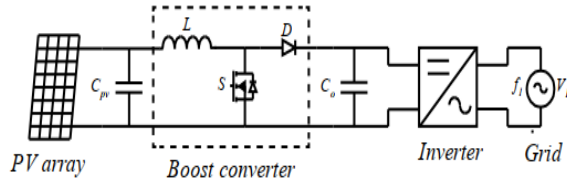


Figura 1. Arquitetura simplificada do sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica com conversor BOOST. Fonte: Figueira et al., 2023.

A modelagem matemática do conversor BOOST foi desenvolvida considerando os dois modos de operação do semicondutor: condução e corte. As equações diferenciais foram obtidas por meio da aplicação das Leis de Kirchhoff de Tensões e Correntes, permitindo representar a dinâmica da corrente no indutor e da tensão no capacitor.

Modo de condução

$$\frac{di}{dt} = \frac{V_g}{L} - \frac{(R_L + R_{on})}{L} \quad (1)$$

$$\frac{dV}{dt} = -\frac{V}{RC} - \frac{i_{load}}{C} \quad (2)$$

Modo de corte

$$\frac{di}{dt} = \frac{V_g}{L} - \frac{V}{L} - \frac{R_L}{L} - \frac{V_D}{L} \quad (3)$$

$$\frac{dV}{dt} = \frac{I}{C} - \frac{V}{RC} - \frac{i_{load}}{C} \quad (4)$$

Em que V_g representa a tensão de entrada do conversor; L a indutância do circuito; i a corrente no indutor; R_L a resistência série do indutor; R_{on} a resistência de condução da chave semicondutora; V a tensão no capacitor de saída; R a resistência equivalente da carga; C a capacitância do filtro de saída; i_{load} a corrente consumida pela carga; e V_D a queda de tensão direta no diodo.

Essas equações foram utilizadas para representar o comportamento dinâmico do conversor BOOST durante a simulação computacional.

Os parâmetros elétricos empregados na modelagem foram obtidos experimentalmente a partir da desmontagem de um inversor fotovoltaico comercial. As medições de indutância e capacitância foram realizadas utilizando um medidor LCR digital, sendo posteriormente incorporadas ao modelo simulado. Os valores medidos podem ser observados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros elétricos medidos do estágio BOOST utilizados na modelagem.

Componente	Medição
Capacitor de entrada	180,00 μ F
Capacitor de saída	1880,00 μ F
Indutor	1,43 mH

A validação experimental foi conduzida em laboratório por meio da bancada experimental apresentada na Figura 2. Para reproduzir as características elétricas de um painel fotovoltaico sob condições controladas, utilizou-se um gerador síncrono acionado por um motor de indução. Durante os ensaios foram adquiridos sinais de tensão, corrente e chaveamento do conversor utilizando osciloscópios digitais. Um filtro *Sallen-Key* foi empregado para minimizar ruídos provenientes do chaveamento.



Figura 2. Bancada experimental utilizada para validação do modelo do conversor BOOST, composta por motor de indução acoplado a gerador síncrono para emulação do painel fotovoltaico. Fonte: Autor 2026.

As simulações foram realizadas no software PSIM 2025 utilizando os parâmetros obtidos experimentalmente. O modelo computacional, ilustrado na Figura 3, contempla a representação do painel fotovoltaico, do conversor BOOST, do algoritmo MPPT e do controlador proporcional-integral (PI), permitindo avaliar o comportamento dinâmico do sistema antes da etapa de validação experimental.

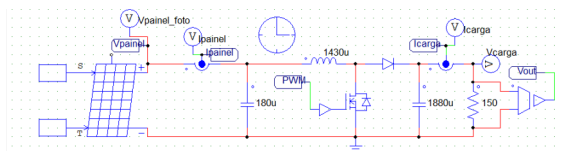


Figura 3. Modelo implementado no software PSIM para simulação do painel fotovoltaico e do conversor BOOST. Fonte: Autor 2026.

O controlador PI, apresentado na Figura 4, foi empregado para regular a tensão de saída do sistema, reduzindo o erro entre a tensão de referência e a tensão medida, contribuindo para a estabilidade e o desempenho do conversor durante a operação.

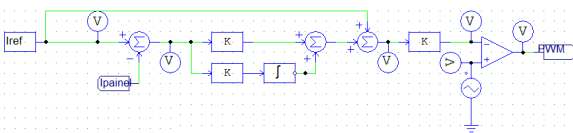


Figura 4. Controlador PI implementado no software PSIM para controle da tensão de saída do sistema. Fonte: Autor 2026.

Os resultados simulados foram posteriormente comparados aos dados experimentais, permitindo avaliar a fidelidade da modelagem proposta e o desempenho do algoritmo MPPT.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a implementação do modelo no software PSIM 2025, foram realizadas simulações para avaliar o comportamento do conversor BOOST e do algoritmo de MPPT. Os parâmetros utilizados foram aqueles obtidos experimentalmente durante a caracterização

do inversor fotovoltaico, permitindo maior fidelidade entre o modelo computacional e o sistema real.

As Figuras 5 e 6 apresentam, respectivamente, os resultados de corrente e tensão fornecidos pelo simulador do painel fotovoltaico no domínio do tempo. Observa-se, inicialmente, um regime transitório caracterizado pela redução da corrente e pelo ajuste da tensão nos terminais de entrada do conversor BOOST até que o sistema atinja o ponto de operação em regime permanente. Esse comportamento está associado à atuação do algoritmo de MPPT, que ajusta o ciclo de trabalho do conversor BOOST para deslocar o ponto de operação em direção ao ponto de máxima potência do painel fotovoltaico.

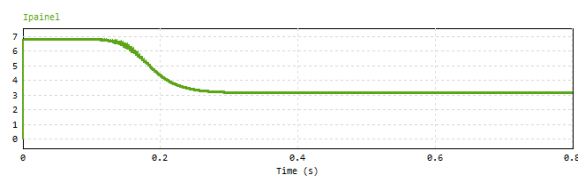


Figura 5. Corrente fornecida pelo painel fotovoltaico. Fonte: Autor (2026).

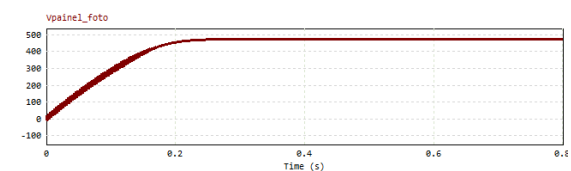


Figura 6. Tensão de saída do BOOST. Fonte: Autor (2026).

A Figura 7 apresenta os resultados simulados para a tensão de saída V_{out} do conversor BOOST. O gráfico demonstra o sucesso do conversor em seu objetivo principal, elevar a tensão em um valor superior a 400V, confirmando o funcionamento adequado do modelo na elevação de tensão.

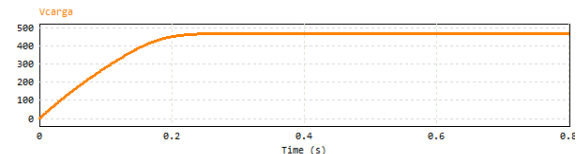


Figura 7. Tensão de saída do BOOST. Fonte: Autor (2026).

O comportamento da corrente de saída I_{out} do conversor BOOST no ambiente simulado é ilustrado

na Figura 8. O resultado indica a estabilização da corrente no Ponto de Máxima Transferência de Potência, validando o desempenho do modelo na extração de potência máxima para as condições de entrada especificadas.

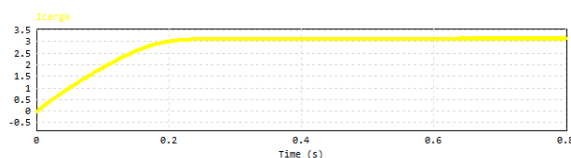


Figura 8. Corrente de saída do BOOST. Fonte: Autor (2026).

Utilizando os dados simulados de tensão e corrente, a Figura 9 exibe a curva característica $I \times V$ do MPPT. A curva gerada pelo modelo demonstra a relação não linear entre corrente e tensão, e, mais importante, confirma a existência de um Ponto de Máxima Potência único, para a condição de simulação estabelecida. Este resultado valida a eficácia do modelo proposto e serve como referência teórica para a análise e comparação com os resultados experimentais.

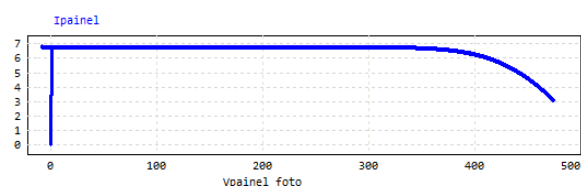


Figura 9. Curva característica $I \times V$ do MPPT. Fonte: Autor (2026).

A Figura 10 exibe o sinal do PWM gerado pela simulação, que é aplicado ao chaveamento do conversor BOOST. O sinal ilustrado valida a frequência de chaveamento e o ciclo de trabalho (D) determinado pelo algoritmo MPPT do modelo. O ciclo de trabalho é ajustado dinamicamente para garantir que o conversor opere com a tensão de entrada necessária para a máxima transferência de potência.

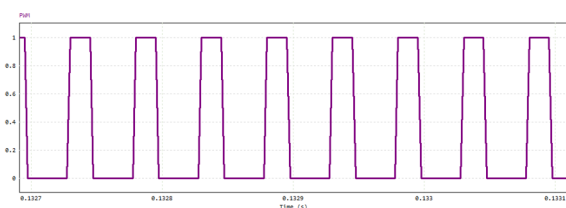


Figura 10. PWM do chaveamento do conversor BOOST. Fonte: Autor (2026).

A Figura 11 apresenta a curva de Potência por Tensão ($P \times V$) obtida pela simulação do conversor. Esta curva é crucial, pois ilustra o processo de MPPT, demonstrando visualmente a capacidade do algoritmo de controle em buscar e alcançar o ponto de máxima extração de potência durante os testes práticos.

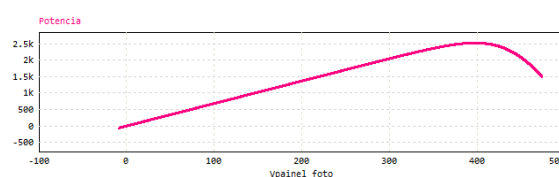


Figura 11. Curva de Potência por Tensão. Fonte: Autor (2026).

A Figura 12 apresenta a curva de Potência por Tempo ($P \times T$), obtida através dos dados experimentais do conversor BOOST. O gráfico ilustra o comportamento dinâmico do MPPT, demonstrando o tempo de resposta e o processo de convergência do algoritmo para MPP. A análise desta curva é fundamental para validar a eficiência do controle na extração máxima de energia ao longo do tempo.

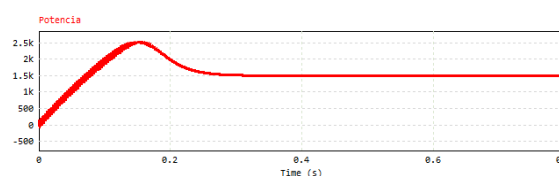


Figura 12. Curva de Potência por Tempo. Fonte: Autor (2026).

Os principais resultados obtidos durante a simulação são apresentados na Tabela 2, evidenciando que os valores calculados estão de acordo com o comportamento esperado para o conversor BOOST operando em regime permanente.

Tabela 2. Valores obtidos por simulação.

Medição	Valor
Corrente de saída do BOOST	3,16 A
Tensão de saída do BOOST	476,30 V
Potência	1498,50 W

Com o objetivo de validar o modelo proposto, foram realizados ensaios experimentais na bancada descrita anteriormente. Os resultados obtidos são apresentados nas Figuras 13, 14 e 15, permitindo analisar o comportamento do conversor BOOST e do algoritmo MPPT em condições reais de operação.

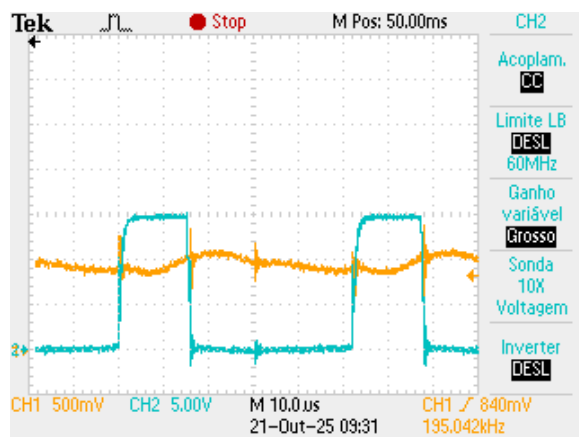


Figura 13. Sinal de chaveamento do conversor BOOST durante a atuação do algoritmo MPPT. Fonte: Autor (2026).

A Figura 13 apresenta o sinal de chaveamento do conversor BOOST em regime permanente. A análise do sinal PWM permite verificar a frequência de comutação e o ciclo de trabalho empregados durante a operação do conversor, confirmando o correto funcionamento da estratégia de controle implementada. Além disso, observa-se uma pequena ondulação na corrente, com frequência aproximada de 120 Hz, característica do processo de conversão de energia e das condições de operação do sistema.

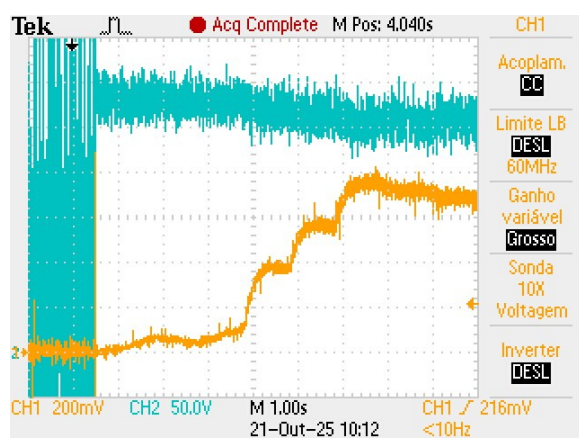


Figura 14. Resposta experimental do algoritmo MPPT. Fonte: Autor (2026).

A Figura 14 apresenta o comportamento dinâmico do algoritmo MPPT durante o processo de rastreamento do ponto de máxima potência. Observa-se a trajetória de convergência do algoritmo até a estabilização do ponto de operação, demonstrando sua capacidade de ajustar continuamente o ciclo de trabalho do conversor BOOST para maximizar a potência extraída da fonte fotovoltaica.

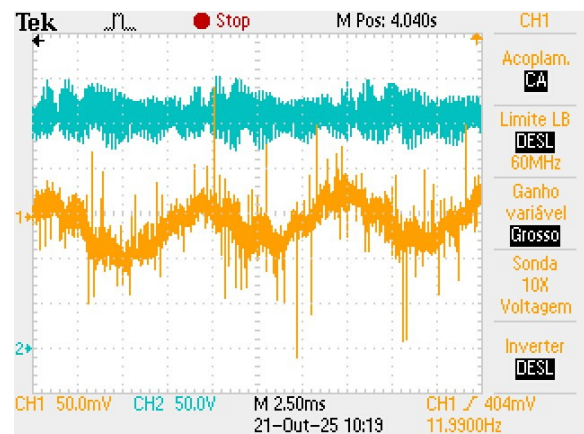


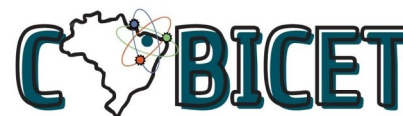
Figura 15. Tensão e corrente após a convergência do algoritmo MPPT.

Após a convergência do algoritmo MPPT, a Figura 15 apresenta as formas de onda da tensão e da corrente medidas na saída do conversor BOOST. Verifica-se que ambas permanecem estabilizadas em torno do ponto de máxima potência, evidenciando o correto funcionamento do sistema de controle. As pequenas oscilações observadas são atribuídas ao chaveamento dos dispositivos semicondutores, às tolerâncias dos componentes eletrônicos e aos ruídos inerentes ao sistema de medição, sem comprometer a estabilidade da operação.

A comparação entre os resultados experimentais e aqueles obtidos por simulação demonstra comportamento compatível entre o modelo computacional e o sistema real. Dessa forma, a metodologia proposta mostrou-se adequada para representar a dinâmica do conversor BOOST e a atuação do algoritmo MPPT, validando o modelo desenvolvido para aplicações em sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica.

CONCLUSÃO

O presente trabalho atingiu seus objetivos propostos, realizando com êxito a modelagem do conversor BOOST de entrada de um inversor on-grid e a validação de seus parâmetros a partir de dados experimentais.



Os resultados simulados apresentaram valores de tensão e corrente de saída condizentes com os dados experimentais, demonstrando a eficiência do modelo simulado. Observou-se que o comportamento obtido em experimento reproduz de forma convincente as características típicas de um sistema MPPT, evidenciando a atuação ativa do algoritmo no rastreamento do MPP. As medições de tensão e corrente confirmaram que o controle promove a estabilização em torno do MPP, ainda que com pequenas oscilações, que são atribuídas a ruídos de medição e incertezas dos instrumentos.

De forma geral, o desempenho do MPPT simulado mostrou-se eficiente na extração de potência do sistema. Ressalta-se, contudo, que a inclusão dos efeitos do estágio retificador e de acoplamento com a rede elétrica tende a aprimorar a precisão da modelagem, reduzindo discrepâncias entre os resultados simulados e os experimentais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CEFET-MG pela infraestrutura disponibilizada no Laboratório de Conversão de Energia para realização dos experimentos e a todos que contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

ELTAWIL, M. A.; ZHAO, Z. MPPT techniques for photovoltaic applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 25, p. 793–813, 2013.

FIGUEIRA, H. H.; BELLINASSO, L. V.; MICHELS, L.; BASQUERA JR., M. F. Comparison of control techniques applied to photovoltaic boost converters. 2023.

RAMÍREZ-MURILLO, H.; TORRES-PINZÓN, C. A.; SALAZAR-CÁCERES, F.; VERA-SALDAÑA, V.; MOJICA-CASALLAS, C. J. Design and control of a photovoltaic distribution system based on modular buck-boost converters. *Ingeniería e Investigación*, v. 43, n. 3, 2023.

SEGUEL, J. L.; SELEME JR., S.; MORAIS, L. M. Comparison of the performance of MPPT methods applied in converters buck and buck-boost for autonomous photovoltaic systems. *Ingeniare: Revista Chilena de Ingeniería*, v. 29, n. 2, p. 229–244, 2021.

VILELA, A. O. R. Projeto e construção de um conversor boost controlado em modo de tensão. Universidade Federal de Viçosa, 2011.