

MODELAGEM E VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DE UM INVERSOR MONOFÁSICO GRID-TIE BASEADA NA CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL PARA APLICAÇÕES EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Geovane Vinicius Lopes¹, Cláudio Henrique Gomes dos Santos², Raul Vieira da Silva³

¹ Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Divinópolis, Brasil
(geovl450al@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 e a validação de um inversor monofásico *grid-tie* de 1,5 kW no ambiente PSIM, utilizando parâmetros obtidos por caracterização experimental. O modelo incorpora a topologia Full-Bridge e controle em referencial DQ sincronizado por PLL. A comparação entre os resultados simulados e experimentais demonstrou elevada concordância, evidenciando a confiabilidade da metodologia para análise e desenvolvimento de conversores conectados à rede.

Palavras-chave: Inversor *grid-tie*; modelagem computacional; sistemas fotovoltaicos; controle DQ; validação experimental.

INTRODUÇÃO

A crescente demanda por energia elétrica, aliada à necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa e diversificar a matriz energética, tem impulsionado a expansão das fontes renováveis de energia em todo o mundo. Nesse contexto, a geração distribuída baseada em sistemas fotovoltaicos destaca-se como uma das principais alternativas para a produção de energia limpa, apresentando crescimento expressivo nos setores residencial, comercial e industrial. Entretanto, a integração dessas fontes à rede elétrica requer sistemas de conversão de energia capazes de garantir elevada eficiência, confiabilidade e qualidade da potência fornecida, tornando os conversores eletrônicos de potência elementos fundamentais nesses sistemas (JANA et al., 2017).

Entre os conversores empregados em sistemas fotovoltaicos conectados à rede, os inversores *grid-tie* são responsáveis por converter a energia em corrente contínua proveniente dos módulos fotovoltaicos em corrente alternada sincronizada com a rede elétrica. Além da conversão de energia, esses equipamentos devem atender a requisitos relacionados à estabilidade, fator de potência, baixos níveis de distorção harmônica e sincronismo com a tensão da concessionária, garantindo uma operação segura e eficiente. Dessa forma, o desenvolvimento de técnicas de controle e modelagem desses inversores tornou-se um importante campo de pesquisa na área de Eletrônica de Potência (HART, 2012).

Diversas topologias de inversores têm sido propostas para aplicações conectadas à rede, diferindo quanto ao número de dispositivos semicondutores, complexidade do circuito, capacidade de processamento de potência e desempenho elétrico. Dentre essas configurações, a topologia em ponte completa (Full-Bridge) destaca-se pela simplicidade de implementação, elevada confiabilidade e ampla utilização em sistemas monofásicos de baixa potência. Associada às técnicas de modulação por largura de pulso (*Pulse Width Modulation* – PWM), essa configuração possibilita a obtenção de tensões de saída com reduzido conteúdo harmônico, elevada eficiência e melhor aproveitamento do barramento em corrente contínua (ABDULLAH et al., 2023).

Paralelamente ao desenvolvimento das topologias de potência, diversas estratégias de controle foram propostas visando melhorar o desempenho dos inversores conectados à rede. Entre elas, o controle vetorial no referencial síncrono DQ destaca-se por permitir o controle desacoplado das componentes ativa e reativa da corrente, proporcionando maior precisão no controle da potência injetada, rápida resposta dinâmica e operação com fator de potência próximo da unidade. Para isso, torna-se necessária a sincronização entre o inversor e a rede elétrica por meio de algoritmos *Phase-Locked Loop* (PLL), responsáveis por estimar continuamente a fase da tensão da rede e fornecer as informações necessárias para o controle vetorial (LI et al., 2020; PARVEZ et al., 2020).

Apesar dos avanços observados na literatura, muitos trabalhos concentram-se na análise de estratégias de controle ou no desenvolvimento de modelos computacionais baseados em parâmetros nominais fornecidos pelos fabricantes, os quais nem sempre representam fielmente o comportamento de equipamentos comerciais em condições reais de operação. Essa simplificação pode resultar em diferenças entre os resultados simulados e experimentais, reduzindo a confiabilidade das simulações e limitando sua aplicação no desenvolvimento e validação de novas estratégias de controle (DIAS, 2019).

Nesse contexto, a modelagem computacional baseada na caracterização experimental de equipamentos reais apresenta-se como uma alternativa para aumentar a fidelidade dos modelos utilizados em simulações. A utilização de parâmetros obtidos experimentalmente possibilita representar de forma mais precisa o comportamento elétrico do inversor, permitindo que estudos de desempenho, controle e otimização sejam realizados com maior confiabilidade.

Diante desse cenário, este trabalho tem como objetivo desenvolver e validar um modelo computacional de um inversor monofásico grid-tie de 1,5 kW a partir da caracterização experimental de um equipamento comercial. A proposta busca contribuir para o desenvolvimento de uma ferramenta de simulação capaz de reproduzir com maior fidelidade o comportamento do sistema real, fornecendo uma plataforma confiável para análises de desempenho e futuras pesquisas envolvendo conversores eletrônicos conectados à rede elétrica.

MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia empregada neste trabalho compreende a caracterização experimental de um inversor monofásico conectado à rede, o desenvolvimento de seu modelo computacional no ambiente PSIM e a validação do modelo por meio da comparação entre os resultados simulados e experimentais. Inicialmente, foram realizados ensaios experimentais para identificação dos principais parâmetros elétricos do equipamento. Em seguida, esses parâmetros foram utilizados na construção do modelo computacional e na implementação da estratégia de controle adotada. Por fim, os resultados obtidos em simulação foram comparados com aqueles medidos experimentalmente, permitindo avaliar a representatividade do modelo desenvolvido.

A caracterização experimental foi realizada utilizando uma bancada destinada ao estudo de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica. A plataforma é composta por um inversor monofásico grid-tie com potência nominal de 1,5 kW, alimentado

por uma fonte de corrente contínua responsável por emular o comportamento do arranjo fotovoltaico durante os ensaios.

Além do inversor, a bancada experimental é constituída por instrumentos de medição, dispositivos de proteção, sistema de aquisição de dados e equipamentos destinados ao monitoramento das principais grandezas elétricas do sistema, como tensão, corrente e frequência de chaveamento. Essa infraestrutura permitiu a obtenção dos parâmetros necessários para o desenvolvimento do modelo computacional, bem como a aquisição das formas de onda utilizadas na etapa de validação.

A configuração geral da bancada utilizada neste trabalho é apresentada na Figura 1.



Figura 1. Montagem final do experimento. Fonte: Autor, 2026.

Após a montagem da bancada experimental, foi realizada a caracterização elétrica do inversor comercial com o objetivo de determinar os parâmetros necessários para sua representação computacional. Inicialmente foi efetuada a inspeção da placa eletrônica, identificando os principais componentes do circuito de potência, do barramento em corrente contínua, do filtro de saída e dos circuitos de acionamento.

Posteriormente, foram realizadas medições experimentais para determinar a tensão do barramento CC, frequência de chaveamento, características do filtro de saída e demais parâmetros elétricos empregados na modelagem. Essas informações foram complementadas por consultas à documentação técnica do fabricante, possibilitando a

obtenção de um conjunto consistente de parâmetros para representação do sistema.

A placa eletrônica do inversor utilizada durante a etapa de caracterização é apresentada na Figura 2.



Figura 2. Placa do inversor comercial usado para estudo. Fonte: Autor, 2026.

Os principais parâmetros obtidos durante a caracterização experimental são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros elétricos obtidos durante a caracterização experimental da placa do inversor.

Parâmetro	Valor
Número de capacitores do barramento	4
Tensão nominal de cada capacitor	500 V
Capacitância de cada capacitor	470 μF
Capacitância equivalente do barramento	1880 μF

Os resultados apresentados na Tabela 1 evidenciam que o barramento em corrente contínua é constituído por quatro capacitores associados em paralelo, totalizando uma capacitância equivalente de 1880 μF , adequada para reduzir as oscilações de tensão provocadas pelo processo de chaveamento do conversor. Além disso, verificou-se a presença de três indutores com valores distintos, responsáveis pela filtragem das componentes de alta frequência produzidas pela modulação PWM e pela redução da distorção harmônica da corrente injetada na rede elétrica.

A utilização desses valores experimentais representa uma vantagem em relação à adoção de parâmetros exclusivamente nominais, uma vez que considera as características reais do equipamento analisado. Dessa forma, os parâmetros levantados foram empregados

diretamente na parametrização do modelo computacional desenvolvido no ambiente PSIM, aumentando a representatividade das simulações e reduzindo discrepâncias entre os resultados simulados e experimentais.

Com base nos parâmetros obtidos durante a caracterização experimental, foi desenvolvido o modelo computacional do estágio de potência utilizando o software PSIM, amplamente empregado na análise de conversores eletrônicos devido à sua elevada eficiência computacional e precisão na representação de sistemas de potência.

O modelo contempla a fonte de alimentação em corrente contínua, o barramento CC, a ponte inversora do tipo Full-Bridge, o filtro de saída e a interface de conexão com a rede elétrica. Todos os parâmetros elétricos utilizados na modelagem foram definidos a partir dos valores obtidos experimentalmente, garantindo maior proximidade entre o comportamento do modelo e o sistema físico.

A estrutura implementada no ambiente PSIM é apresentada na Figura 3.

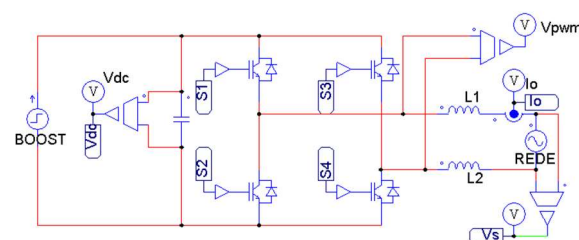


Figura 3 – Modelo do estágio de potência desenvolvido no ambiente PSIM.

O sistema de controle foi implementado utilizando a estratégia vetorial no referencial síncrono DQ, amplamente empregada em inversores conectados à rede devido à sua capacidade de controlar independentemente as componentes ativa e reativa da corrente.

Inicialmente, a tensão da rede é processada por um algoritmo PLL, responsável por estimar continuamente seu ângulo de fase. A partir dessa informação, as correntes são transformadas para o referencial síncrono, permitindo que controladores proporcionais-integrais (PI) atuem separadamente sobre as componentes I_d e I_q .

Após o processamento pelos controladores, os sinais retornam ao sistema estacionário por meio da transformação inversa, sendo posteriormente utilizados pelo modulador PWM para geração dos pulsos de acionamento dos interruptores semicondutores.

A estrutura completa do sistema de controle implementado é apresentada na Figura 4.

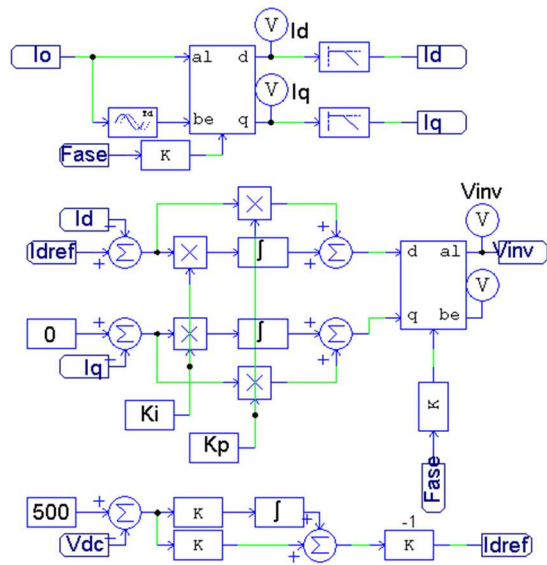


Figura 4 – Sistema de controle DQ implementado no ambiente PSIM. Fonte: Autor, 2026.

A validação do modelo computacional foi realizada mediante a comparação entre os resultados obtidos experimentalmente e aqueles provenientes das simulações desenvolvidas no PSIM.

Foram comparadas as principais grandezas elétricas do sistema, incluindo as formas de onda de tensão e corrente, a frequência de chaveamento e o comportamento do barramento em corrente contínua. A análise dessas variáveis permitiu verificar a capacidade do modelo em reproduzir o comportamento observado na bancada experimental, fornecendo evidências sobre sua representatividade e confiabilidade.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a caracterização da placa eletrônica do inversor e a determinação dos parâmetros elétricos apresentados na Tabela 1, foi possível desenvolver um modelo computacional baseado nas características reais do equipamento.

A utilização dos valores medidos para os componentes passivos permitiu representar de maneira mais precisa o comportamento do barramento em corrente contínua e do filtro de saída. Essa abordagem reduz as incertezas normalmente associadas aos modelos desenvolvidos exclusivamente a partir de dados nominais fornecidos pelos fabricantes.

Além disso, a caracterização experimental forneceu informações importantes para a parametrização do controlador e para a definição das condições iniciais empregadas nas simulações.

A implementação da estratégia de controle em referencial síncrono DQ foi inicialmente avaliada por meio de simulações no ambiente PSIM.

A Figura 5 apresenta o comportamento das principais variáveis de controle durante a operação do inversor.

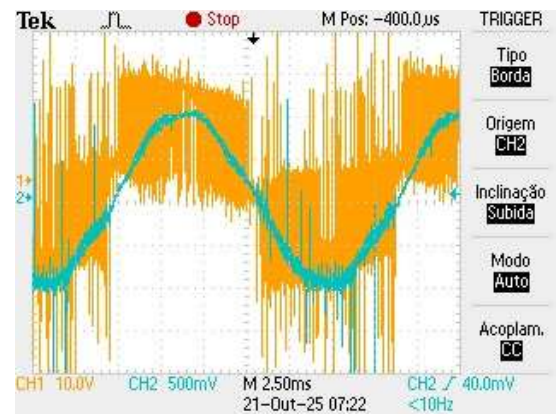


Figura 5. Leitura do osciloscópio comparando a saída decorrente e de tensão do inversor comercial. Fonte: Autor, 2026.

Observa-se que o algoritmo PLL sincroniza adequadamente o sistema com a tensão da rede elétrica, permitindo que o controlador DQ mantenha o desacoplamento entre as componentes ativa e reativa da corrente.

Durante o regime permanente verifica-se que a componente I_q permanece próxima de zero, indicando operação com fator de potência aproximadamente unitário, enquanto a componente I_d acompanha a referência estabelecida pelo controlador. Esse comportamento demonstra a eficiência da estratégia de controle na regulação da potência ativa injetada na rede.

A rápida estabilização das variáveis de controle também evidencia o adequado ajuste dos controladores PI implementados no modelo computacional.

A Figura 6 apresenta as formas de onda medidas experimentalmente durante a operação do inversor conectado à rede.



Figura 6. Sinal medido da saída do inversor comercial. Fonte: Autor, 2026.

Verifica-se que a corrente injetada permanece sincronizada com a tensão da rede elétrica durante todo o período analisado, indicando o correto funcionamento do sistema de controle.

As formas de onda apresentam baixo conteúdo harmônico e comportamento estável, evidenciando a atuação eficiente do filtro de saída e da estratégia de modulação PWM utilizada pelo inversor.

Além disso, observa-se que a tensão do barramento permanece praticamente constante durante a operação, demonstrando que o sistema mantém o equilíbrio energético necessário para o correto funcionamento do conversor.

Esses resultados confirmam o desempenho satisfatório da plataforma experimental empregada na validação do modelo.

A Figura 7 apresenta as principais formas de onda obtidas a partir do modelo desenvolvido no ambiente PSIM.

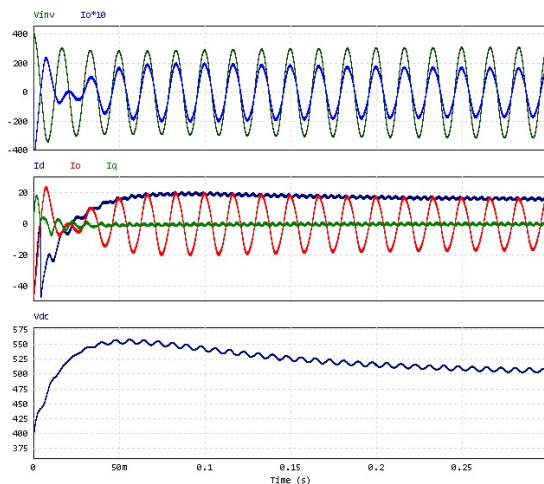


Figura 7. Resultados do controle do inversor feito em simulação. Fonte: Autor, 2026.

Os resultados simulados reproduzem o comportamento esperado para um inversor monofásico conectado à rede elétrica, apresentando tensão e corrente sincronizadas, estabilidade do barramento em corrente contínua e adequado funcionamento do sistema de controle.

Durante a operação em regime permanente observa-se que as oscilações transitórias são rapidamente amortecidas, indicando a estabilidade do controlador implementado.

A utilização dos parâmetros experimentais obtidos durante a caracterização mostrou-se fundamental para que o modelo reproduzisse adequadamente as características observadas no equipamento real.

A comparação entre os resultados experimentais e simulados é apresentada na Figura 8.

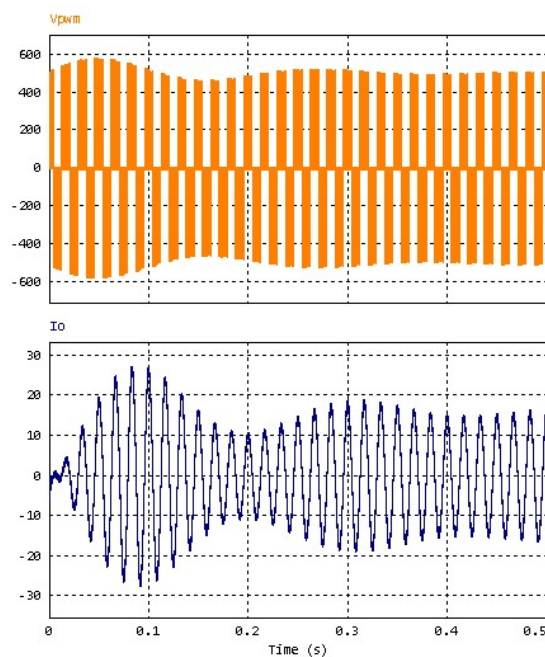
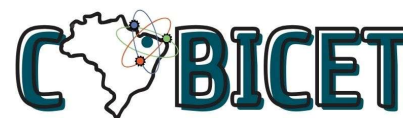


Figura 8. Sinal de saída do inversor em comparação com a corrente da rede. Fonte: Autor, 2026.

De maneira geral, observa-se elevada concordância entre as formas de onda obtidas experimentalmente e aquelas provenientes da simulação. Tanto a amplitude quanto a frequência dos sinais apresentaram comportamento semelhante, evidenciando que o modelo desenvolvido reproduz adequadamente as principais características elétricas do inversor comercial.

As pequenas diferenças observadas podem ser atribuídas às simplificações adotadas durante a modelagem, como a desconsideração das perdas por comutação dos semicondutores, das resistências parasitas dos componentes e das tolerâncias de fabricação dos elementos passivos. Adicionalmente,



incertezas associadas aos instrumentos de medição e aos atrasos dos circuitos de acionamento também podem contribuir para as discrepâncias observadas.

Apesar dessas diferenças, os resultados demonstram que a metodologia baseada na caracterização experimental proporciona um modelo computacional com elevada representatividade, tornando-o adequado para estudos de controle, análise de desempenho e desenvolvimento de novas estratégias de modulação para inversores conectados à rede.

CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou a modelagem computacional de um inversor monofásico grid-tie de 1,5 kW desenvolvida a partir da caracterização experimental de um equipamento comercial. A metodologia proposta contemplou o levantamento dos principais parâmetros elétricos do inversor, a implementação do estágio de potência e da estratégia de controle no ambiente PSIM e a validação do modelo por meio da comparação entre os resultados simulados e experimentais.

Os parâmetros obtidos durante a caracterização experimental, especialmente os valores dos componentes passivos do barramento em corrente contínua e do filtro de saída, permitiram desenvolver um modelo computacional mais representativo das condições reais de operação do equipamento. A utilização desses valores contribuiu para reduzir as simplificações normalmente adotadas em modelos baseados exclusivamente em especificações nominais.

Os resultados obtidos demonstraram que o modelo desenvolvido reproduziu satisfatoriamente o comportamento do inversor durante a operação conectada à rede elétrica. A estratégia de controle em referencial síncrono DQ associada ao algoritmo PLL apresentou desempenho adequado na sincronização com a rede, permitindo o controle da corrente injetada e a operação estável do conversor. Além disso, a comparação entre os resultados experimentais e simulados evidenciou boa concordância entre as formas de onda analisadas, confirmando a consistência da metodologia empregada.

Dessa forma, conclui-se que o modelo computacional desenvolvido constitui uma ferramenta confiável para estudos de análise, projeto e validação de estratégias de controle aplicadas a inversores grid-tie. Sua utilização pode reduzir a necessidade de ensaios experimentais nas etapas iniciais de desenvolvimento, contribuindo para diminuir custos e tempo de projeto.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Campus Divinópolis, pela infraestrutura e pelo suporte disponibilizados para o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

ABDULLAH, R.; SMIDA, M. B.; THAMALLAH, A.; KHALAF, A.; SAKLY, A. Novel dq-based multicarrier PWM strategy for a single-phase F-type inverter. *Electronics*, v. 12, n. 13, p. 2972, 2023. DOI: 10.3390/electronics12132972.

DIAS, A. L. A. Modelagem, projeto e implementação de um inversor monofásico para sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica. 2019. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Ouro Preto, Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas, João Monlevade, 2019. Disponível em: <http://www.monografias.ufop.br/handle/35400000/1808>. Acesso em: 07 mai. 2026.

HART, D. W. Eletrônica de potência: análise e projetos de circuitos. Porto Alegre: Bookman, 2012. Tradução da obra original *Power Electronics: Analysis and Design*.

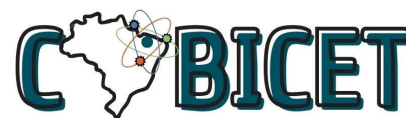
JANA, J.; SAHA, H.; DAS BHATTACHARYA, K. A review of inverter topologies for single-phase grid-connected photovoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 72, p. 1256–1270, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.049>.

KLANN, M. Controle de um inversor monofásico conectado à rede: controle de corrente por espaço de estados com realimentação de estados observados. 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/240486>. Acesso em: 20 abr. 2026.

LI, C.; LIANG, J.; CIPCIGAN, L. M.; MING, W.; COLAS, F.; GUILLAUD, X. DQ impedance stability analysis for the power-controlled grid-connected inverter. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, v. 35, n. 4, 2020. DOI: 10.1109/TEC.2020.2989855.

PARVEZ, M.; ELIAS, M. F. M.; RAHIM, N. A.; BLAABJERG, F.; ABBOTT, D.; AL-SARAWI, S. F. Comparative study of discrete PI and PR controls for single-phase UPS inverter. *IEEE Access*, v. 8, p. 45584–45595, 2020. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2964603.

PIRES, L. P. Projeto e desenvolvimento de um inversor solar ponte completa bidirecional para microrredes CC conectadas à rede CA em baixa tensão. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia



Elétrica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/18078/1/ProjetoDesenvolvimentoInversor.pdf>. Acesso em: 25 fev. 2026.