

ASPECTOS IMPORTANTES PARA IMPLEMENTAÇÃO DE ALGORITMOS DE SINCRONISMO BASEADOS EM FB-PLL PARA O CONTROLE DE INVERSORES CONECTADOS À REDE

Ana Liz Ferreira¹, Claudio Henrique Gomes dos Santos², Raul Vieira da Silva³

¹. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Divinópolis, Brasil
(analiz.alr91@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 implementação e validação de um algoritmo FB-PLL aplicado ao controle vetorial de um inversor on-grid conectado à rede elétrica. O modelo foi desenvolvido no software PSIM e validado experimentalmente em bancada. Os resultados demonstraram sincronismo adequado com a rede, estabilização do barramento CC e correta injeção de potência ativa, comprovando a viabilidade do método para aplicações em geração distribuída.

Palavras-chave: FB-PLL; Sincronismo; Controle vetorial; Inversores.

INTRODUÇÃO

O crescimento da geração distribuída, impulsionado principalmente pela expansão dos sistemas fotovoltaicos, tem aumentado a necessidade de conversores eletrônicos capazes de operar de forma sincronizada com a rede elétrica. Nesse contexto, os inversores on-grid desempenham papel fundamental ao realizar a conversão da energia em corrente contínua proveniente da fonte geradora em corrente alternada compatível com a rede, assegurando a injeção de potência com qualidade e estabilidade (Teodorescu et al., 2011).

O sincronismo entre o inversor e a rede é normalmente realizado por algoritmos baseados em Phase-Locked Loop (PLL), responsáveis pela estimação da fase e da frequência da tensão da rede. Essas informações são fundamentais para o controle vetorial em coordenadas síncronas (dq), permitindo o controle independente das componentes ativa e reativa da corrente injetada (Marafão et al., 2005; Liserre et al., 2004).

Diversas estruturas de PLL têm sido propostas para aplicações em sistemas conectados à rede. Entre elas, o Frequency-Based Phase-Locked Loop (FB-PLL) destaca-se por utilizar a frequência estimada como variável de realimentação, proporcionando maior robustez frente a perturbações, distorções harmônicas e variações da frequência da rede. Em comparação com técnicas convencionais, como o *Synchronous Reference Frame PLL* (SRF-PLL), essa estratégia apresenta melhor desempenho sob condições adversas de operação, tornando-se uma alternativa

promissora para aplicações em geração distribuída (Santos et al., 2010; Golestan et al., 2017; Santos et al., 2013).

Antes da implementação em hardware, a utilização de modelos computacionais permite avaliar o desempenho do sistema, reduzir custos experimentais e validar estratégias de controle em diferentes condições de operação. Neste trabalho, o barramento CC do inversor é alimentado por uma planta capaz de emular o comportamento dinâmico de um arranjo fotovoltaico, possibilitando reproduzir, em ambiente computacional e experimental, condições representativas de operação de um sistema fotovoltaico conectado à rede.

Dessa forma, este trabalho apresenta a implementação e a validação de um algoritmo FB-PLL aplicado ao controle vetorial de um inversor on-grid conectado à rede elétrica. Para isso, foi desenvolvido um modelo computacional no software PSIM, baseado na bancada experimental disponível em laboratório. Os resultados obtidos por simulação foram posteriormente comparados aos ensaios experimentais, permitindo avaliar o desempenho do algoritmo de sincronismo quanto ao processo de travamento de fase, à estabilidade do barramento CC e à injeção de potência ativa na rede elétrica.

MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia desenvolvida fundamenta-se na modelagem, simulação e validação experimental de um inversor on-grid. Na plataforma experimental, a

fonte de corrente contínua é emulada por um conjunto de motores acoplados, reproduzindo o comportamento de um arranjo fotovoltaico durante a etapa de geração em corrente contínua. A simulação foi desenvolvida no ambiente PSIM, contemplando tanto o estágio de potência quanto a estratégia de controle vetorial e o sincronismo com a rede elétrica por meio do algoritmo FB-PLL. Essa abordagem permitiu reproduzir, no ambiente computacional, condições de operação próximas às observadas experimentalmente, proporcionando maior aderência entre o modelo teórico e a plataforma utilizada para validação.

A Figura 1 apresenta o estágio de potência do inversor on-grid modelado neste trabalho, constituído pelo barramento em corrente contínua (CC), pela ponte inversora, pelo filtro de acoplamento e pela conexão com a rede elétrica. O modelo foi elaborado de forma a representar, com elevada fidelidade, a topologia empregada na bancada experimental, permitindo que as dinâmicas elétricas obtidas em simulação reproduzissem o comportamento observado no sistema real.

O barramento CC é alimentado por uma fonte equivalente ao arranjo fotovoltaico, cuja implementação experimental é realizada por meio de motores acoplados. A conversão de energia CC/CA é efetuada por uma ponte composta por semicondutores IGBTs (representados pelos interruptores S1 a S4), enquanto a filtragem da corrente injetada na rede é realizada pelos indutores L1 e L2, responsáveis por atenuar as componentes harmônicas decorrentes da comutação PWM antes da conexão ao ponto de acoplamento com a rede elétrica.

A correspondência entre os elementos do sistema experimental e os componentes do modelo computacional garante a preservação das principais características dinâmicas do conversor, possibilitando a avaliação consistente do desempenho da estratégia de controle e do algoritmo de sincronismo em condições representativas de operação.

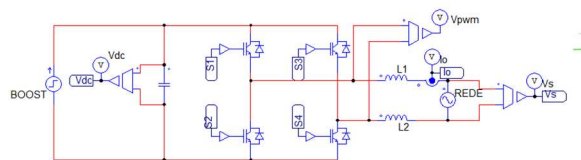


Figura 1. Estágio de potência do inversor on-grid, composto pelo barramento CC, ponte inversora trifásica e filtro de acoplamento LCL conectado à rede. Fonte: Autor, 2026.

A Figura 2 apresenta a implementação da malha de controle vetorial empregada no inversor, estruturada

no referencial síncrono dq. Inicialmente, as correntes trifásicas medidas no lado CA são transformadas do referencial estacionário abc para o referencial síncrono dq, utilizando o ângulo de fase (FASE2) fornecido pelo algoritmo de sincronismo FB-PLL. Essa transformação promove o desacoplamento das componentes de correntes associadas às potências ativa e reativa, permitindo o controle independente de I_d e I_q .

A componente I_d é utilizada para controlar a potência ativa injetada na rede e, consequentemente, regular a tensão do barramento CC. Em contrapartida, a componente I_q é mantida próxima de zero, garantindo a operação com fator de potência unitário. Para isso, são empregados controladores proporcionais-integrais (PI) independentes em cada eixo, responsáveis por minimizar o erro entre as correntes de referência ($I_{d,ref}$ e $I_{q,ref} = 0$) e as correntes medidas.

Os sinais de saída dos controladores são então transformados do referencial síncrono dq para o referencial estacionário abc, gerando as tensões de referência aplicadas ao modulador PWM, responsável pelo acionamento dos interruptores do inversor.

Essa estratégia de controle permite a injeção de potência ativa de forma estável e sincronizada com a rede elétrica, assegurando elevado desempenho dinâmico, operação com fator de potência unitário e reduzida distorção harmônica na corrente injetada.

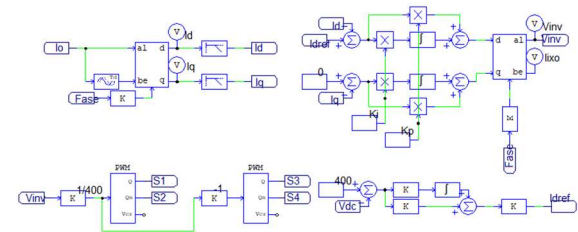


Figura 2. Diagrama do algoritmo FB-PLL utilizado para estimação de fase e frequência da rede. Fonte: Autor 2026.

A Figura 3 apresenta o diagrama esquemático do algoritmo de sincronismo implementado, baseado no método FB-PLL. Nessa estrutura, a tensão trifásica medida no ponto de acoplamento com a rede elétrica (V_s) é utilizada para estimar o ângulo de fase θ por meio de um processo de realimentação responsável por ajustar continuamente a fase e a frequência estimadas.

Inicialmente, a tensão da rede é processada pelo algoritmo FB-PLL, no qual os blocos de multiplicação, filtragem e realimentação geram um sinal de erro proporcional ao desvio entre a fase estimada e a fase instantânea da rede. Esse erro é

processado por um controlador PI, responsável por corrigir a frequência angular estimada (ω). A integração dessa frequência fornece o ângulo de fase estimado (θ), que permanece sincronizado com a tensão da rede em regime permanente.

Após a convergência do algoritmo, são obtidas as funções $\sin(\theta)$ e $\cos(\theta)$, utilizadas diretamente nas transformações de coordenadas $abc \rightarrow d_q$ e $d_q \rightarrow abc$ da malha de controle vetorial. Dessa forma, o controle passa a operar em um referencial síncrono alinhado à tensão da rede, permitindo o desacoplamento entre as componentes associadas às potências ativa e reativa e proporcionando uma injeção de corrente com elevado desempenho dinâmico e sincronismo adequado.

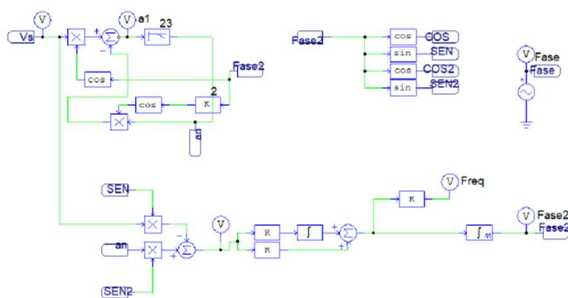


Figura 3. Diagrama do algoritmo FB-PLL utilizado para estimação da fase e da frequência da rede elétrica. Fonte: Autor, 2026.

Para validar o modelo desenvolvido, os resultados obtidos em simulação foram comparados com medições realizadas na bancada experimental do inversor on-grid. A análise contemplou as principais grandezas elétricas do sistema, incluindo a tensão do barramento CC, os sinais PWM de acionamento, a corrente injetada na rede e o ângulo de fase estimado pelo algoritmo FB-PLL.

A comparação entre os resultados simulados e experimentais permitiu avaliar a fidelidade do modelo computacional na representação do sistema físico. A elevada concordância observada entre as formas de onda e o comportamento dinâmico das variáveis analisadas demonstra que a modelagem proposta reproduz adequadamente a operação do inversor, validando tanto o estágio de potência quanto a estratégia de controle vetorial e o algoritmo de sincronismo empregados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A validação do método proposto foi realizada em duas etapas. Inicialmente, foram conduzidas simulações no ambiente PSIM, com o objetivo de avaliar o desempenho do algoritmo de sincronismo

em condições controladas de operação. Em seguida, foram realizados ensaios experimentais em um protótipo físico de um inversor on-grid conectado à rede elétrica, permitindo verificar o comportamento do sistema em condições reais de funcionamento.

Os resultados obtidos em simulação possibilitaram analisar a dinâmica do estimador de fase e frequência durante o processo de sincronização com a rede, enquanto os resultados experimentais confirmaram a eficácia do método diante das não idealidades inerentes ao sistema físico, tais como ruídos de medição, atrasos de processamento e imperfeições dos dispositivos eletrônicos. A concordância entre os resultados simulados e experimentais demonstra que a modelagem representa adequadamente o comportamento do sistema, validando a estratégia de sincronismo proposta e evidenciando sua robustez para aplicações em inversores conectados à rede.

A Figura 4 apresenta os resultados obtidos em simulação para o processo de sincronismo do inversor conectado à rede, empregando o método FB-PLL para a estimação simultânea da fase e da frequência.

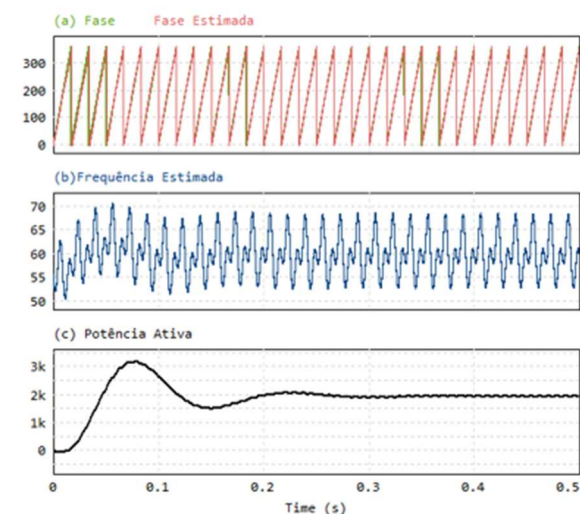


Figura 4. Travamento do FB-PLL: (a) convergência da fase, (b) estabilização da frequência estimada e (c) injeção gradual de potência ativa. Fonte: Autor, 2026.

A Figura 4(a) apresenta a comparação entre a fase estimada pelo FB-PLL e a fase de referência da rede. Após um curto período transitório, ambas passam a coincidir, evidenciando que o algoritmo estabelece rapidamente o sincronismo, condição indispensável para a operação do inversor em malha fechada.

Na Figura 4(b), observa-se a evolução da frequência estimada durante o processo de sincronização. Pequenas oscilações são verificadas durante o transitório, decorrentes do processo adaptativo de

estimação. Após aproximadamente 0,2 s, a frequência converge para o valor nominal de 60 Hz, indicando que o FB-PLL fornece uma referência angular estável para a malha de controle vetorial.

A Figura 4(c) apresenta a evolução da potência ativa injetada na rede. Inicialmente, verifica-se um crescimento rápido da potência, seguido por pequenas oscilações transitórias e posterior estabilização em regime permanente. Esse comportamento demonstra a atuação adequada da malha de controle de corrente e da regulação do barramento CC, permitindo a transferência estável de potência ativa para a rede elétrica.

Os resultados apresentados na Figura 5 ilustram o comportamento das correntes no referencial síncrono d_q durante o processo de sincronização.

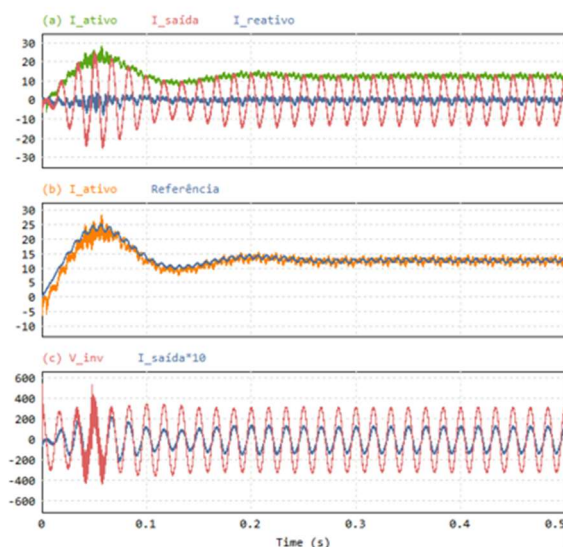


Figura 5. (a) Comportamento dinâmico das correntes; (b) rastreamento da corrente ativa; e (c) corrente em fase com a tensão após o sincronismo. Fonte: Autor, 2026.

Na Figura 5(a), observa-se um transitório nas componentes I_{ativo} e $I_{reativo}$ decorrente do fechamento da malha de corrente. Após o período de acomodação, I_{ativo} converge para um valor positivo, indicando a injeção de potência ativa na rede, enquanto $I_{reativo}$ permanece próximo de zero, caracterizando operação com fator de potência unitário. Também é possível observar que a corrente injetada na rede I_{saida} atinge amplitude aproximada de ± 12 A em regime permanente.

A Figura 5(b) evidencia o adequado rastreamento entre a corrente ativa medida e sua referência, demonstrando que o controlador PI apresenta resposta rápida e erro em regime permanente praticamente nulo.

Na Figura 5(c), a comparação entre a tensão sintetizada pelo inversor V_{inv} e a corrente injetada I_{saida} , está ampliada dez vezes para fins de visualização, mostra que ambas permanecem praticamente em fase. Esse resultado confirma o correto sincronismo com a rede elétrica e evidencia que a potência transferida é predominantemente ativa.

A Figura 6 apresenta os sinais relacionados ao sincronismo, à tensão do barramento CC e à modulação PWM durante a conexão do inversor à rede.

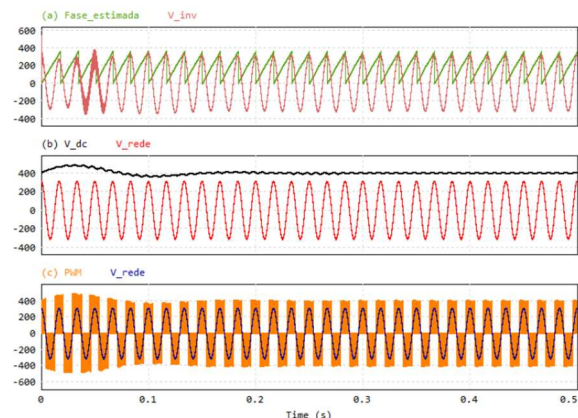


Figura 6. (a) Coerência angular do PLL; (b) estabilização do elo CC; e (c) modulação PWM alinhada à tensão da rede. Fonte: Autor, 2026.

Na Figura 6(a), verifica-se que a fase estimada converge rapidamente para a tensão sintetizada pelo inversor, demonstrando o correto travamento do FB-PLL e a coerência entre o ângulo estimado e a tensão gerada em regime permanente.

A Figura 6(b) apresenta o comportamento da tensão do barramento CC V_{cc} e da tensão da rede. Observa-se um pequeno afundamento inicial do barramento, seguido de sua estabilização, evidenciando a atuação da malha de controle da potência ativa. Simultaneamente, a tensão da rede permanece estável, indicando que o sincronismo é mantido durante todo o processo de conexão.

Na Figura 6(c), a comparação entre o sinal de modulação PWM e a tensão da rede evidencia que a modulação permanece alinhada ao ângulo elétrico estimado pelo FB-PLL. A redução gradual das oscilações durante o transitório confirma a transição controlada até o regime permanente e demonstra a estabilidade do sistema de controle.

Em conjunto, os resultados de simulação demonstram que o método FB-PLL proporciona sincronismo rápido e estável com a rede elétrica, fornecendo uma referência angular confiável para a malha de controle

vetorial. Como consequência, o inversor apresenta injeção estável de potência ativa, operação com fator de potência unitário e adequado desempenho dinâmico durante a conexão à rede.

A Figura 7 apresenta a tensão de saída do inversor (laranja) e o sinal de fase estimado pelo algoritmo FB-PLL (azul).

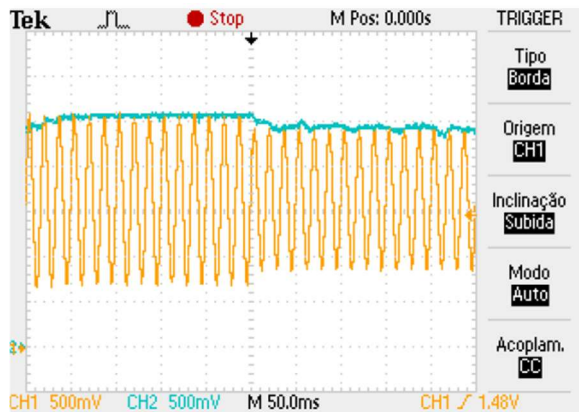


Figura 7. Medição experimental da tensão de saída do inversor e do sinal de fase estimada pelo FB-PLL. Fonte: Autor, 2026.

Após o processo de sincronização, observa-se que o sinal de fase permanece alinhado à tensão sintetizada pelo inversor, reproduzindo o comportamento previsto na Figura 6(a). Esse resultado demonstra que o FB-PLL estima corretamente o ângulo elétrico da rede, mantendo o sincronismo mesmo na presença das não idealidades inerentes ao sistema físico. Dessa forma, confirma-se experimentalmente a eficácia da estratégia de sincronismo proposta.

A Figura 8 apresenta a tensão do barramento CC (azul) e a tensão da rede elétrica (laranja).

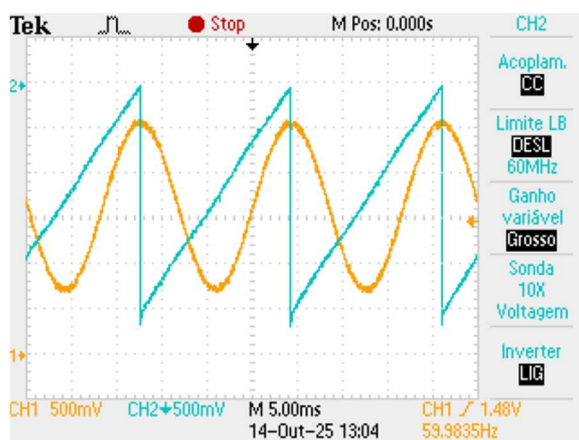


Figura 8. Medição experimental da tensão do barramento CC e da tensão da rede. Fonte: Autor, 2026.

Verifica-se que a tensão do barramento CC permanece praticamente constante durante toda a operação, apresentando apenas pequenas ondulações decorrentes do chaveamento do inversor e da dinâmica da malha de controle. Esse comportamento confirma a atuação adequada do controlador responsável pela regulação da potência ativa e assegura a disponibilidade de energia para a conversão CC/CA. Simultaneamente, a tensão da rede mantém sua característica senoidal, evidenciando que o inversor permanece sincronizado e operando em regime permanente, conforme observado nos resultados de simulação.

A Figura 9 apresenta a comparação entre o sinal de modulação PWM do inversor (laranja) e a tensão da rede (azul).

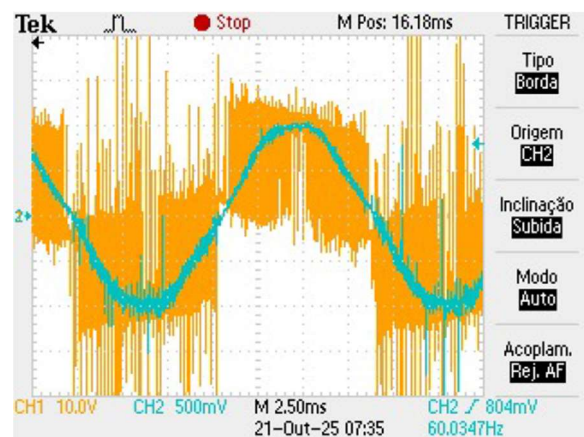
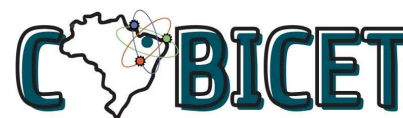


Figura 9. Sinal PWM e tensão da rede. Fonte: Autor, 2026.

Observa-se que o sinal PWM apresenta elevada frequência de chaveamento, característica inerente ao processo de síntese da tensão alternada a partir do barramento CC. Além disso, o envelope da modulação acompanha a forma de onda da tensão da rede, reproduzindo o comportamento previsto na Figura 6(c). Esse alinhamento confirma que o controlador permanece sincronizado com o ângulo estimado pelo FB-PLL e que a referência de modulação é corretamente aplicada ao estágio de potência.

De forma geral, os resultados experimentais apresentam elevada concordância com os resultados obtidos em simulação, validando tanto o modelo desenvolvido quanto a estratégia de sincronismo baseada no FB-PLL. A boa correspondência entre as formas de onda simuladas e experimentais demonstra que o método proposto é capaz de fornecer uma referência angular confiável para o controle vetorial, garantindo sincronismo estável e adequada injeção de potência ativa em inversores conectados à rede.



CONCLUSÃO

Os resultados obtidos neste trabalho demonstram que o método de sincronismo baseado no FB-PLL apresenta desempenho satisfatório quando aplicado ao controle vetorial de inversores on-grid. A modelagem desenvolvida no ambiente PSIM possibilitou analisar o comportamento dinâmico do sistema durante as etapas de sincronização e injeção de potência ativa, evidenciando que o algoritmo fornece uma referência angular estável para as transformações de coordenadas e para o correto funcionamento da malha de controle vetorial.

Os resultados de simulação mostraram rápida convergência da fase e da frequência estimadas, além da adequada regulação da corrente ativa, da operação com fator de potência unitário e da estabilidade da tensão do barramento CC. Esses resultados foram corroborados pelas medições experimentais, que apresentaram elevada concordância com as formas de onda obtidas em simulação. A manutenção do sincronismo entre a tensão da rede e o sinal de modulação, bem como a estabilidade do elo CC durante a operação, evidenciam a robustez do método frente às não idealidades presentes na implementação prática.

Dessa forma, conclui-se que o FB-PLL constitui uma estratégia eficiente e confiável para o sincronismo de inversores conectados à rede, fornecendo uma referência angular precisa para o controle vetorial e contribuindo para a injeção estável de potência ativa na rede elétrica.

Como continuidade deste trabalho, sugere-se investigar o desempenho do método sob condições mais severas de operação, incluindo afundamentos de tensão, desequilíbrios trifásicos, variações de frequência da rede e elevados níveis de distorção harmônica. Além disso, estudos comparativos com técnicas modernas de sincronismo, como PLLs baseados em observadores de estado, filtros adaptativos e estruturas SOGI-PLL, podem fornecer uma avaliação mais abrangente das vantagens e limitações do FB-PLL em aplicações de geração distribuída.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais pela infraestrutura disponibilizada para o desenvolvimento deste trabalho, em especial aos laboratórios utilizados para a realização das simulações e dos ensaios experimentais.

REFERÊNCIAS

- GOLESTAN, S.; GUERRERO, J. M.; VASQUEZ, J. C. Three-phase PLLs: a review of recent advances. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 32, n. 3, p. 1894-1907, 2017.
- LISERRE, M.; BLAAJBJERG, F.; HANSEN, S. Overview of multi-MW wind turbines and wind parks. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 54, n. 4, p. 1086-1100, 2004.
- MARAFÃO, F. P.; DECKMANN, S. M.; POMILIO, J. A.; MACHADO, R. Q. Metodologia de projeto e análise de algoritmos de sincronismo PLL. **Eletrônica de Potência**, v. 10, n. 1, p. 7-14, 2005.
- SANTOS, C. H.; SILVA, S. M.; CARDOSO FILHO, B. J. A Fourier-based PLL for single-phase grid-connected systems. In: **IEEE ENERGY CONVERSION CONGRESS AND EXPOSITION**, 2010. Proceedings [...]. IEEE, p. 2626-2632, 2010.
- SANTOS, C. H.; FERREIRA, R. V.; SILVA, S. M.; CARDOSO FILHO, B. J. Fourier-based PLL applied for selective harmonic estimation in electric power systems. **Journal of Power Electronics**, v. 13, n. 5, p. 884-895, 2013.
- TEODORESCU, R.; LISERRE, M.; BLAAJBJERG, F. **Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems**. Wiley-IEEE Press, Hoboken, 2011.