

ESTUDO E SIMULAÇÃO DE TÉCNICAS DE DETECÇÃO DE ILHAMENTO APLICADAS A SISTEMAS DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Calisto José da Silva Neto¹, Luiz Henrique Silva Santos², Jackson dos Santos Lima²

¹Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Feira de Santana, Brasil
(calisto.jose@aluno.ufrb.edu.br)

²Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Feira de Santana, Brasil

Resumo: Até o final do ano de 2022, o *boom* no mercado de energia por geração distribuída (GD) se justifica devido a associação de fontes renováveis. No entanto, condições anormais de operação podem fazer com que a GD seja desconectada da rede elétrica, conhecida como ilhamento. O evento infringe medidas de segurança e qualidade estabelecidas em normas técnicas. Portanto, o presente trabalho dedica-se ao estudo e simulação de técnicas de detecção de ilhamento em sistemas de GD através do software Matlab.

Palavras-chave: Geração Distribuída; Ilhamento; Detecção; Controle

INTRODUÇÃO

Desde meados de 2010, no Brasil o crescimento das fontes de energia elétrica renováveis tem tido um boom no mercado de produção através de gerações distribuídas. Isso ocorre também no mundo inteiro, já que a busca pela independência de combustíveis fósseis e do uso de radiação por fissão nuclear para geração de eletricidade, através de termoeletrônicas, se tornam desinteressantes (Alves et al., 2021). Esse desinteresse vem a tona das consequências ao meio ambiente, ao nível de dependência mercadológica (as crises do petróleo e a dificuldade do tratamento de enriquecimento de matéria radioativa) e á tratados no contexto do desenvolvimento sustentável, que surgem com maior impacto desde 1997 com o Protocolo de Kyoto. Portanto, a Geração Distribuída (GD) tem se tornado mais palpável no contexto da mudança da matriz energética, como auxílio às fontes convencionais, dada a melhor qualidade de energia e confiabilidade, maior eficiência e melhor desempenho ambiental (Pitombo, 2010).

Em EPE (2022), nota-se a expressividade da geração de energia elétrica no Brasil por meio de GD, com um crescimento exponencial entre os anos de 2016 a 2022, alcançando uma capacidade de geração total acumulada em 17,5 GW de potência em 2022. Com essa expansão, novos paradigmas começam a surgir quanto a necessidade de medidas de segurança, e qualidade disciplinadas em regulamentações que possuem o intuito de aperfeiçoar a estabilidade de conexão da GD no ponto de acoplamento comum

(PAC), com a rede de distribuição elétrica. Um bom exemplo regulatório com a finalidade de garantir a qualidade da energia, são os parâmetros recomendados em IEE Std 1547.1 (2005), que para geradores com capacidades maiores que 30 kW, sejam desligados em 160 ms se a frequência elétrica for maior que 60,5 ou menor que 57 Hz, não sendo necessário quando a oscilação está dentro do intervalo de $60 \pm 0,5$ Hz.

Em associação, parâmetros nacionais que detêm limites de operação de uma GD acoplada a rede, é exigido um tempo máximo de desconexão em 0,4 s para o caso em que a tensão do PAC (VPAC) está abaixo de 80% da tensão nominal (V_n), e de 0,2 s para um VPAC superior a 110% de V_n , limitando a operação normal ao intervalo de tensão entre 80% - 110% de V_n (ABNT, N. 16150, 2013). Sobre o parâmetro de frequência, em ABNT, N. 16149 (2013) ainda é sugerido um intervalo de operação normal entre os 57,5 Hz - 62 Hz, com salvas restrições de potência ativa, conforme a frequência aumenta de 60,5 Hz para 62 Hz. E para valores superiores a exigência de tempo máximo de desconexão de 0,2 s, sendo posta a mesma exigência para valores inferiores a 57,5 Hz, podendo-se reconectar a rede apenas após determinado período em que a faixa esteja entre 59,9 - 60,1 Hz continuamente.

Conforme Vieira et al. (2005), os parâmetros de frequência, tensão e distorção harmônica, comumente se alteram na operação ilhada, de forma a infringir as normas citadas anteriormente. No

entanto, para além da má qualidade de energia que pode ser fornecida, essas exigências têm virtude em outros problemas que a operação ilhada pode causar, que conforme Pitombo (2010) e Vieira et al. (2005), são

- Diminuição da qualidade da energia para as cargas que se encontram no sistema ilhado;
- Perigos associados ao processo de manutenção realizado pelos operadores da concessionária de distribuição, já que a rede se mantém eletrizada;
- A proteção contra sobrecorrente no sistema ilhado pode deixar de operar satisfatoriamente devido à redução significativa das correntes de curto-circuito após a perda da conexão com a subestação da concessionária, onde o sistema ilhado não tem aterramento adequado. Por consequência, podem ocorrer danificações à isolação dos cabos e aparelhos conectados;
- Atrasos na restauração da rede;
- Riscos de danificação das máquinas elétricas (inversores, geradores e transformadores) da GD ilhada, durante a operação ilhada e no instante de reenergização da rede;

Para a detecção do ilhamento, vale destacar que os métodos estudados são comumente divididos em dois tipos, os passivos e ativos. Os métodos passivos monitoram os parâmetros da rede e desacoplam da GD no PAC quando limites de operação estão dentro da zona de detecção de relés. Os métodos passivos causam instabilidade em realimentação positiva, que ajuda a detecção, quando o ilhamento ocorre, diminuindo a zona de não detecção, do inglês *non-detection zone* (NZD). A realimentação causa um ganho, que é proporcional à eficiência da detecção mas que tende a diminuir a qualidade da energia continuamente (Aguilar, 2013).

O objetivo do trabalho é a aplicação de um modelo funcional de GD no software Matlab, pela ferramenta simulink. Com a proposta de que o modelo possa ser utilizado em simulações futuras para diversos fins, mas principalmente ao contexto da desconexão com a rede. Contribuindo assim, como ferramenta base para estudo de algoritmos de detecção do ilhamento.

MATERIAL E MÉTODOS

O simulink é uma ferramenta para modelagem, simulação e análise de sistemas dinâmicos do Matlab. A versão que foi utilizada, versão R2018b, fornece em sua biblioteca diversos blocos com programações já estabelecidas e facilita a esquematização de sistemas elétricos.

A esquematização da geração distribuída, na Figura 1, envolve um controlador de corrente, analisando a frequência (ω) e a fase (θ) das tensões trifásicas no PAC, por meio do algoritmo de sincronização PLL (Phase-locked Loop), enquanto que as correntes e tensões do referencial síncrono i_d e i_q , e V_d e V_q ,

são obtidas com o uso da transformada de Park, tomando as correntes e tensões do PAC i_a , i_b , i_c , V_a , V_b e V_c , e o valor de θ do PLL (Silva, 2019; Aguiar, 2013). A transformada muda os parâmetros de fase "abc" para as coordenadas síncronas "dq0". Essa transformação se torna interessante para controladores de inversores CC-CA, dado o erro de regime nulo em sistemas com valor de regime final constante. Os sinais que saem do controlador são os índices de modulação u_d e u_q , tomando como referência base a frequência (ω) de tensão do PAC pelo PLL. A transformada inversa de Park por sua vez, obtém os índices de modulação de fase u_a , u_b e u_c , que servem como referência para o Pulse-Width Modulation (PWM) comandar o inversor, que opera em 18kHz (o caso típico de inversores comerciais), a fim de que sejam injetadas correntes com fator de potência unitário no PAC.

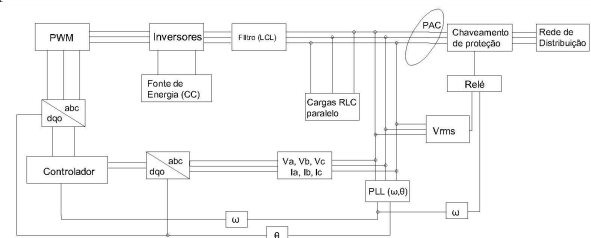


Figura 1. Modelo de GD com cargas locais características e ligada a rede de distribuição.

O filtro utilizado é do tipo LCL (Indutivo-capacitivo-indutivo) paralelo, trifásico. Esse filtro tem como finalidade a redução das distorções harmônicas causadas pelos chaveamentos dos inversores (Paiva et al., 2019; Silva, 2019). Os filtros LCL podem ser conectados em delta ou estrela, sendo a ligação em estrela usada neste trabalho, representado pelas Figuras 2 e 3. Considerando R_1 , R_2 e R_3 como as resistências de amortecimento ligadas em série com os capacitores, L_4 , L_5 e L_6 , os indutores direcionados ao lado dos inversores e L_1 , L_2 e L_3 , os indutores direcionados ao lado da rede. A escolha do modelo de filtro, está na capacidade de obter resultados na faixa de potência, com o uso de pequenos valores de indutores e capacitores, de até centenas de kVA (Silva, 2019).

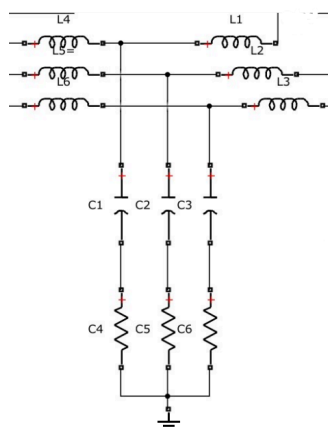


Figura 2. Filtro LCL em paralelo, trifásico

Ainda vale destacar a importância da parte real da impedância, do resistor, que diminui os picos de ganho na frequência de ressonância e estabiliza a fase em -180° suavemente, como visto em Suárez (2018) e Silva (2019), nos diagramas de Bode. A metodologia de estimação dos valores dos indutores, capacitores e resistores, em circuito equilibrado, pode ser encontrada em Suárez (2018), e para o modelo de GD, os valores calculados se encontram na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros do filtro LCL.

Componentes	Valores
L voltado para o inversor	20 mH
L voltado para a rede	1 μ H
C	4 μ F
R	3.5 Ω

A estrutura básica de um PLL apresenta alguns componentes em comum, que são a detecção de fase, o filtro de laço e o oscilador interno. Sabendo-se continuamente do ângulo de referência do eixo síncrono "dq0" (θ') para calcular V_q e V_d pela transformada de Park, a intenção do esquema de blocos na Figura 3, é levar V_q ao valor nulo sempre recalculando o valor de θ' , com o uso do controlador PI (proporcional-integral) que processa o erro da referência $V_q^*=0$. Após o processamento do erro no controlador PI, a resultante de frequência angular da tensão da rede (ω') precisa ser integrada (1/s) para determinar o ângulo da estrutura rotativa em comparação com a tensão da rede no referencial estacionário (Silva, 2019). Dessa forma, o eixo de referência "dq" rotaciona em sincronismo com a frequência fundamental da rede, até fazer $\theta' = \theta$, colocando VPAC em fase com V_d , que está sempre ortogonal a V_q , emitindo os valores precisos de θ e ω do PAC. A frequência W_{ff} (compensação *feed forward*) é acrescentada a fim de tornar a estabilização do sistema mais rápida, principalmente na sua inicialização (Silva, 2018).

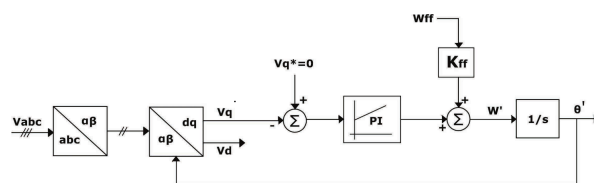


Figura 3. Estrutura Básica de um PLL (Silva, 2018).

Neste contexto, o Matlab já detém um bloco na biblioteca do Simulink que opera muito bem com os parâmetros recomendados. Este bloco, como sugerido na Figura 1, deve receber como sinal de entrada as tensões trifásicas do PAC, Figura 4.



Figura 4. PLL do Simulink.

Obtendo os valores de θ e ω do PAC, no controlador, as correntes i_d e i_q são comparadas com valores de referência para as mesmas, levando o valor associado ao erro para ser regulado por um controlador PI, o regulador de corrente na Figura 5, fornecendo os índices de modulação do inversor (Aguiar, 2013; Suárez, 2018). Por sua vez u_d e u_q são os resultados de tensão, que passam pela transformação inversa de Park, das coordenadas "dq0" para "abc" de fase, sendo um sinal de referência para o Pulse-Width Modulation (PWM) comandar o chaveamento do inversor.

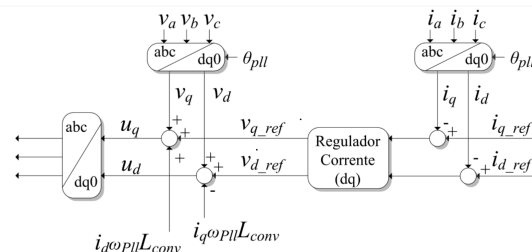


Figura 5. Controlador de corrente (Aguiar, 2013).

No Simulink, a corrente de referência adotada foi de 10 A. Os ganhos "K" da Figura 6, que é a implementação do controlador de corrente, são justificados em Silva (2018), com o valor de ωL_i (Suárez, 2018). A transformada de Park e a transformada inversa, devem ser implementadas ao bloco "S-Function", onde serão fornecidos os sinais de entrada "u(n)", em que podem ser implementados as equações de transformação, encontradas em Silva (2019) e Aguilar (2013), para a saída do bloco "y(n)".

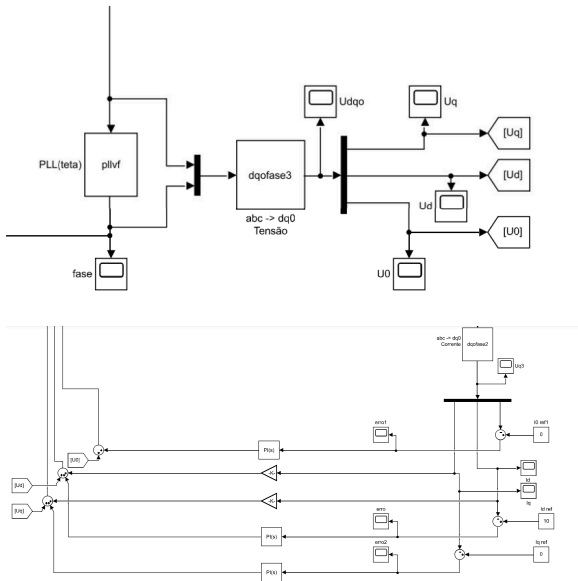


Figura 6. Controlador de corrente no Simulink.

O PWM tem seu bloco específico também dentro da biblioteca do simulink, e deve operar a 18kHz.

O inversor utilizado é do tipo trifásico CC-CA, com 3 braços, sendo composto por 6 (seis) chaves IGBTs controladas pelos sinais do PWM (Suárez, 2018). Na Figura 7, A1, A2, B1, B2, C1 e C2 são os dados importados do PWM. E 1, 2 e 3 são os blocos de porta conexão de subsistemas (PMC_Port), que enviam os sinais de tensão para o filtro.

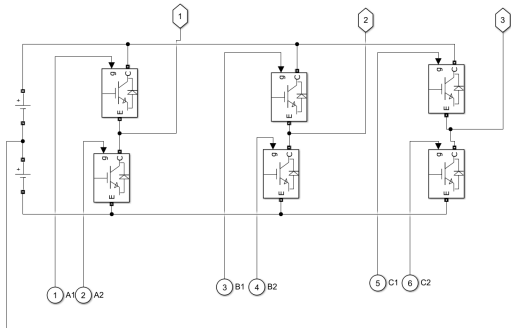


Figura 7. Inversor utilizado

Ainda na Figura 7, a tensão que está entrando no inversor, da fonte de energia alternativa, leva amplitude de 250 V, enquanto que cada chave do inversor seque os seguintes parâmetros dos blocos são os recomendados pelo Simulink.

Por sua vez, é incluído um disjuntor que irá simular a queda de tensão na rede, na Figura 8, essa que está definida pelo bloco de “Fonte programável”, com tensão de linha eficaz de 230 V, fase em 0° e 60 Hz, associada a uma impedância em série, que ajuda na estabilização do sinal.

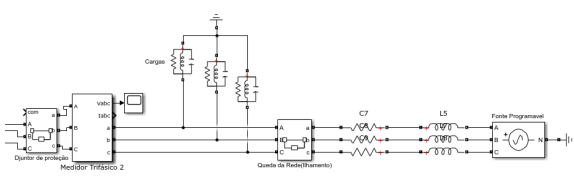


Figura 8. Título da figura.

Conforme recomenda a norma IEE Std 1547.1 (2005), as cargas são do tipo trifásicas equilibradas RLC em paralelo. Na Figura 8, ainda nota-se um medidor de tensão no PAC e um disjuntor de proteção. O medidor de tensão será o responsável por fornecer tanto as tensões quanto as correntes trifásicas, ao PLL, ao bloco da lantrofmadada de Park, levando ao controlador de corrente do inversor, e ao bloco que calcula a tensão eficaz, pelo método de raiz média quadrada (Vrms), que pode auxiliar um relé monitorador de tensão e tem seu bloco visualizado na Figura 9. Quanto ao disjuntor de proteção, ao lado esquerdo na Figura 8, esse deve receber um sinal de deschaveamento, de um relé de proteção quando for detectado o ilhamento, evitando a energização da rede e das cargas, e a má operação do controlador de corrente.



Figura 9. Medidor de Vrms.

Por fim, como abordado anteriormente na introdução, a estimativa das cargas locais são de grande importância para a causa da instabilidade do sistema ilhado, fazendo-o sair da NDZ (Paiva et al., 2019; Brito et al., 2018). Como abordado em Vieira et al. (2005), Aguiar (2013) e Pitombo (2010), a equivalência da potência de consumo causa uma operação ilhada dentro da NDZ. Calculando as cargas da mesma forma que recomenda IEE Std 1547.1 (2005), com um ganho de $Q_f = 2.5$, será simulado o funcionamento da GD com o ilhamento ocorrendo em 0.4 segundos, para cargas que consomem 25% da potência fornecida, na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros das cargas locais com 25% de consumo de potência.

Componentes	Valores
R	76.25 Ω
L	80.9 mH
C	86.96 μ F

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As simulações com duração de 0.5s, mostraram excelentes resultados para a proposta de modelagem de GD no software Matlab.

Na Figura 10, considerando o sistema trifásico equilibrado, analisamos a corrente e tensão de fase A, pressupondo que o mesmo comportamento ocorre também nas fases B e C, notando os mesmos picos e defasagens de 120° , como visto na Figura 12. Visualiza-se portanto na Figura 10, a rapidez da estabilidade das tensões de fase em um período menor do que 230 ms, com um valor de pico consistente com a tensão de linha em valor eficaz da rede, de 230 V. Isso mostra a compatibilidade da GD com a rede em sincronismo, assim como estabelecido em ABNT, N. 16150 (2013) e IEEE Std 929-2000 (2000).

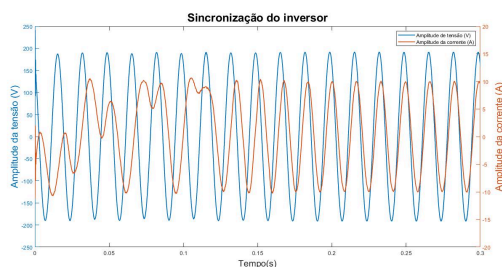


Figura 10. Sincronização do controlador de corrente

Ainda na Figura 10, percebe-se a rapidez de sincronismo da corrente, atingindo o pico da referência estabelecida em 10 A, mostrando o bom funcionamento dos filtros e do controlador, convergindo rapidamente para a injeção de um fator de potência unitário.

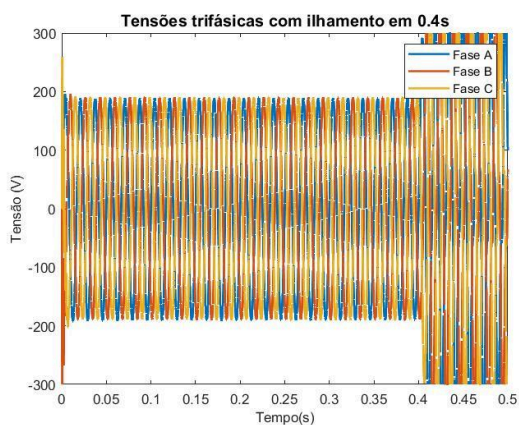


Figura 11. Tensões trifásicas equilibradas na saída do inversor.

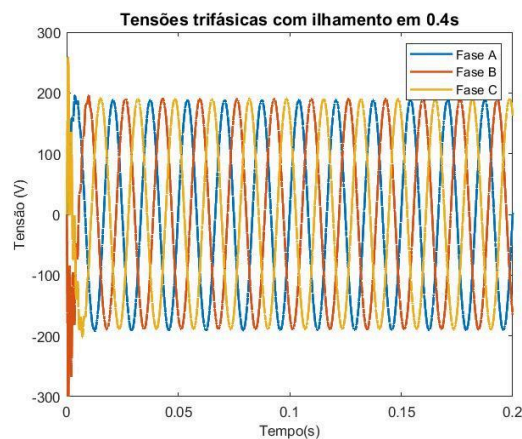


Figura 12. Tensões trifásicas equilibradas na saída do inversor, recorte da Figura 11.

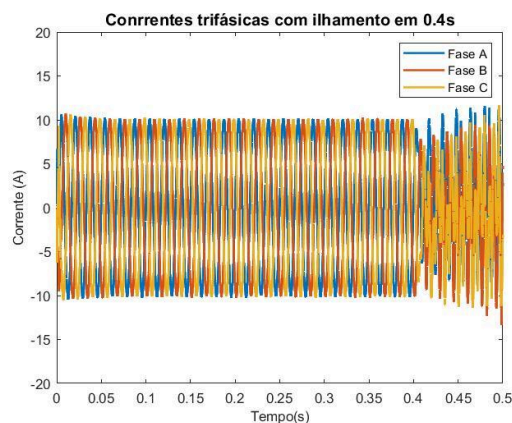


Figura 13. Correntes trifásicas equilibradas na saída do inversor.

No instante de 0.4 s, em que o disjuntor simula o ilhamento, tanto as tensões e quanto as correntes, Figura 11, 12 e 13, se desestabilizam com a queda da rede, tornando parâmetros que deveriam ser fixos, como amplitude, frequência e fase, totalmente aleatórios. Nesse cenário, as cargas locais seriam danificadas pela má qualidade da energia, tal qual os equipamentos eletrônicos dos inversores, dado a desestabilização do sistema realimentado pelo controlador. Em um cenário em que a rede ainda é energizada e as cargas têm baixo consumo de potência, os picos de sobretensão podem causar riscos aos técnicos de manutenção da rede.

Esses picos de sobretensão podem ser visualizados também pela medida de valor médio eficaz, na Figura 14, com sobre picos superiores a 250 V das tensões de fase.

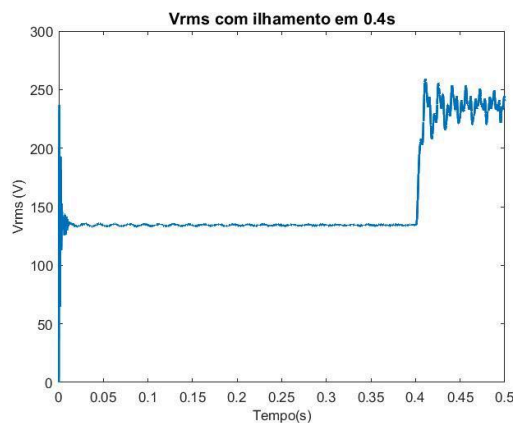


Figura 14. Cálculo da tensão pelo bloco Vrms.

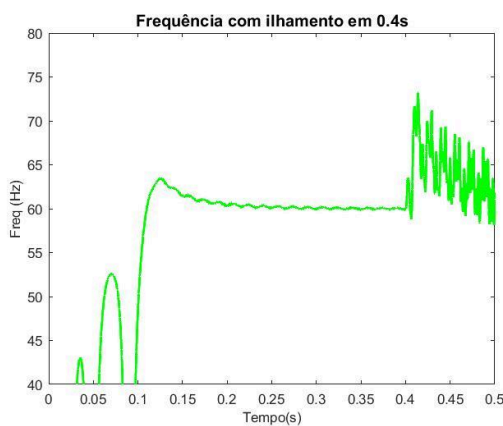


Figura 15. Cálculo da frequência pelo PLL

Na figura 15, entende-se que a queda da rede implica em distúrbios da frequência calculada pelo PLL. Como o PLL é responsável por fornecer a fase e a frequência para a sincronização do controlador da GD, esses distúrbios se prolongam por todo o sistema ilhado. Como o perfil do subconsumo de potência, gerou sobrefrequência e sobretensão (Vieira et al., 2005; Brito et al., 2018), os medidores das Figuras 14 e 15, serviriam também como ótimos estimadores para relés a base de limites de picos de operação ou de taxas de variações, que detectarão o ilhamento muito rapidamente após seu início (Alves et al., 2021).

CONCLUSÃO

Em conclusão, o modelo de GD adotada tem sucesso em implementação no software de simulação do Matlab, Simulink. Os algoritmos de sincronização do próprio programa são capazes de operar em simulação, com total desempenho e em concordância com as principais normas a respeito da sincronização do sistema, que tem como finalidade entregar potência à rede de distribuição. Portanto a modelagem se mostra relevante, dado que também é relevante o atual crescimento da geração de energia elétrica por GD no país, e os principais problemas

associados se tornam mais fáceis de serem resolvidos.

Com isso bem estabelecido, o disjuntor que causa a queda da rede, mostra que distúrbios são causados nos parâmetros da GD, devido ao mau funcionamento dos algoritmos de sincronização que tem como sinais de entrada os parâmetros da rede, enquanto que a GD continua operando conectada ao PAC, em ilhamento. Isso pode causar diversos riscos às cargas locais do sistema, aos equipamentos da GD e a própria rede que se mantém energizada, dado que no ilhamento a qualidade da energia é muito baixa devido a desestabilidade dos parâmetros da eletricidade.

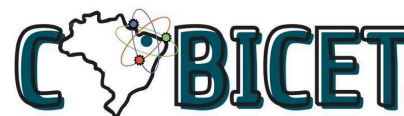
Assim, futuros trabalhos podem tomar esse modelo e criar algoritmos de detecção do ilhamento, com base em relés monitoradores, implementados ao Matlab/Simulink com o sistema proposto neste trabalho. Assim, a facilidade de implementar algoritmos de detecção do ilhamento em simulação virtual, pode ajudar a contribuir com a resolução de problemas práticos no contexto em que as gerações distribuídas têm cada vez mais relevância na matriz elétrica nacional.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa da Bahia (Fapesb).

REFERÊNCIAS

- ABNT, N. 16149: 2013. Sistemas fotovoltaicos (FV)–Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição, 2013.
- ABNT, N. 16150: 2013. Sistemas fotovoltaicos (FV)–Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição–Procedimento de ensaio de conformidade, 2013.
- AGUIAR, C. R. Estudo e análise de algoritmos de detecção de ilhamento em sistemas de geração distribuída conectados à rede de distribuição. Orientador: Prof. Dr. Ricardo Quadros Machado, Dissertação de Mestrado em Sistemas Dinâmicos. Universidade de São Paulo (USP). São Carlos, 2013.
- ALVES, G. H. et al. Análise e avaliação operacional da metodologia de controle V/f aplicada em situações de ilhamento intencional. In: 2021 14th IEEE international conference on industry applications (INDUSCON). p. 567-574. IEEE, 2021.
- BRITO, M. A. et al. Estratégias de anti-ilhamento aplicadas a sistemas de geração distribuída fotovoltaica. *Eletrônica de Potência*, v. 23, n. 2, p. 226-234, 2018.



EPE Empresa brasileira de pesquisa energética.
Balanço energético nacional. 2023.

IEEE Std 1547.1. "IEEE Standard Conformance Test Procedures for Equipment Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems" in IEEE Std 1547.1-2020 , vol., no., pp.1-282, 2005.

IEEE Std 929-2000. "IEEE Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic (PV) Systems," in IEEE Standard 929-2000 , vol., no., pp.i-, 2000.

PAIVA, S. C. et al. Ilhamento em um Sistema Elétrico de Potência com Geração Distribuída. In: Congresso Brasileiro de Automática-CBA. 2019.

PITOMBO, S. O. Proteção adaptativa anti-ilhamento de geradores síncronos distribuídos. Orientador: Prof. Dr. José Carlos de Melo Vieira Júnior, Dissertação de Mestrado em Sistemas Elétricos de Potência, Universidade de São Paulo (USP). São Carlos, 2010.

VIEIRA, J. C. M.; FREITAS, W.; FRANÇA, A. L. M. Análise comparativa sobre a eficácia de relés baseados em medidas de frequência para detecção de ilhamento de geradores distribuídos. Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica, v. 16, p. 251-251, 2005.

SILVA, I. K. A. D. Modelagem de controle do inversor para geração distribuída em DIgSILENT PowerFactory® para análise de redes elétricas. Orientador: Prof. Dr. Yuri Percy Molina Rodriguez, Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Universidade Federal da Paraíba (UFPB). João Pessoa, 2019.

SUÁREZ, J. H. Estimación De Impedância Da Rede Para Inversores On-Grid, Em Rede Fraca Baixo Influência De Harmônicos E Desequilíbrio De Tensão, Com Base Em Estimador De Sequência Positiva E Filtro Morfológico. Orientador: : Prof. Dr. Fabiano Fragoso Costa, Dissertação de Doutorado em Engenharia Elétrica, Universidade Federal da Bahia (UFBA). Salvador, 2018.