

IMPACTO DA RESISTÊNCIA DE FALTA NA ESTABILIDADE DE UM GERADOR SÍNCRONO DE ÍMÃS PERMANENTES CONECTADO À REDE ELÉTRICA.

Paulo Jhefte S. da Silva¹, **Bruno dos Santos Menezes**², **Danrley Alexander Moraes dos Santos**³, **Carlos Patrick Soares de Vilhena**⁴, **Lucas Tadeu de Jesus Santa Brígida**⁵, **João Pedro Alves Ferreira**⁶

¹Universidade Federal do Pará, Faculdade de Engenharia De Energia, Ananindeua, PA, Brasil (paulo.silva.silva@ananindeua.ufpa.br)

² Universidade Federal do Pará, Faculdade de Engenharia De Energia, Ananindeua, PA, Brasil (bruno2001713@gmail.com)

³ Universidade Federal do Pará, Faculdade de Engenharia De Energia, Ananindeua, PA, Brasil (danrley.santos@ananindeua.ufpa.br)

⁴ Universidade Federal do Pará, Faculdade de Engenharia De Energia, Ananindeua, PA, Brasil (carlos.vilhena@ananindeua.ufpa.br)

⁵ Universidade Federal do Pará, Faculdade de Engenharia De Energia, Ananindeua, PA, Brasil (lucas.brigida@ananindeua.ufpa.br)

⁶ Universidade Federal do Pará, Faculdade de Engenharia De Energia, Ananindeua, PA, Brasil (joao.alves.ferreira@ananindeua.ufpa.br)

Resumo: Este trabalho analisa o comportamento de um sistema eólico com Gerador Síncrono a Ímã Permanente (PMSG) conectado à rede elétrica sob diferentes condições de curto-circuito trifásico. Por meio de simulações no *MATLAB/Simulink*, foram avaliados três valores de resistência de falta (R_f), analisando o afundamento de tensão, a corrente de curto-circuito e a Distorção Harmônica Total (THD). Os resultados evidenciam a influência da resistência de falta na resposta dinâmica do sistema.

Palavras-chave: PMSG; afundamento de tensão; curto-circuito trifásico; THD

INTRODUÇÃO

O crescimento da participação da energia eólica na matriz elétrica tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias capazes de garantir maior confiabilidade, eficiência e qualidade da energia fornecida à rede elétrica. Entre essas tecnologias, o Gerador Síncrono a Ímã Permanente (Permanent Magnet Synchronous Generator – PMSG) destaca-se pela elevada eficiência, ampla faixa de operação e pela utilização de conversores eletrônicos de potência em configuração Back-to-Back, que permitem o desacoplamento entre a velocidade do rotor e a frequência da rede, proporcionando controle independente das potências ativa e reativa (Tripathi *et al.*, 2019).

Entretanto, a crescente inserção de geradores baseados em conversores eletrônicos modifica o comportamento dinâmico dos sistemas elétricos, tornando aspectos relacionados à qualidade da energia cada vez mais relevantes (Gatto, 2024). Dentre esses aspectos, destacam-se os afundamentos de tensão (voltage sags), provocados principalmente por faltas na rede elétrica, os quais podem comprometer a estabilidade do sistema e provocar sobretensões no

barramento de corrente contínua (CC), redução da potência ativa injetada e perda de sincronismo caso estratégias adequadas de controle não sejam empregadas (Mohseni *et al.*, 2015; Zhong; Wei; Yan, 2017).

Outro fator importante refere-se à corrente de curto-circuito fornecida por geradores baseados em conversores eletrônicos. Diferentemente dos geradores síncronos convencionais, o PMSG apresenta corrente de falta limitada pela capacidade dos semicondutores e pelas estratégias de controle do conversor, o que altera a resposta transitória do sistema e influencia os estudos de proteção e estabilidade em redes com elevada penetração de geração renovável (Zhong; Wei; Yan, 2017).

Além disso, o chaveamento em alta frequência dos conversores por Modulação por Largura de Pulso (PWM) pode introduzir componentes harmônicas na corrente e na tensão do ponto de acoplamento comum (PAC) (Victorio e Melo, 2022). Embora filtros passivos e técnicas avançadas de controle reduzam significativamente esses efeitos, a distorção harmônica total (THD) permanece como um

importante indicador da qualidade da energia em sistemas eólicos conectados à rede (Silva et al., 2022).

Outro requisito essencial para a integração de parques eólicos é a capacidade de permanência durante faltas (Fault Ride-Through – FRT ou Low Voltage Ride-Through – LVRT) (Gallego Landera *et al.*, 2020). Os códigos de rede atuais exigem que aerogeradores permaneçam conectados durante afundamentos temporários de tensão, contribuindo para a recuperação da tensão por meio do suporte de potência reativa e retomando rapidamente a operação normal após a eliminação da falta (Matos, 2019). Dessa forma, a análise da resposta dinâmica durante e após distúrbios tornou-se fundamental para avaliar o desempenho de sistemas eólicos conectados à rede elétrica (Quadros, 2025).

Nesse contexto, o presente trabalho realiza a modelagem, no ambiente *MATLAB/Simulink*, de um sistema de geração eólica baseado em um (PMSG) conectado a uma rede elétrica trifásica de 60 Hz. As simulações utilizam dados horários de velocidade do vento obtidos na plataforma NASA POWER (2026) para o município de Soure – PA, abrangendo o período de 1º de janeiro de 2021 a 1º de janeiro de 2025.

O desempenho do sistema é avaliado sob diferentes condições de operação e durante a ocorrência de um curto-circuito trifásico, analisando-se parâmetros como tensão, corrente, potência ativa, potência reativa, velocidade do rotor, distorção harmônica e recuperação da rede após a eliminação da falta.

MATERIAL E MÉTODOS

Foram utilizados dados horários de velocidade do vento obtidos na plataforma NASA POWER para o município de Soure – PA, referentes ao período de 01 de janeiro de 2021 a 01 de janeiro de 2025, considerando uma altura de 10 m. A análise desses dados indicou velocidades médias mensais próximas de 5 m/s, valor insuficiente para que a turbina operasse em sua condição nominal, estabelecida em 10 m/s.

Dessa forma, foi selecionado o período de maior intensidade dos ventos, no qual foram observadas velocidades entre 7 e 8 m/s em 12 amostras consecutivas, representando as condições mais favoráveis para a geração de energia. As simulações foram realizadas considerando uma carga de 8 kW e 2 kVAr.

Para representar o sistema eólico, foi adotada a turbina RC-10K-A disponível em REXCO (2026), com potência nominal de 10 kW e saída trifásica em corrente alternada. A conversão da energia mecânica em elétrica foi modelada por meio de um gerador síncrono de ímãs permanentes (PMSG), baseado na tecnologia HS PMG da ABB (2021), escolhida devido à sua elevada eficiência e ao bom desempenho sob diferentes condições de vento. Os principais

parâmetros do gerador foram adaptados ao ambiente *MATLAB/Simulink* para representar adequadamente sua operação.

O sistema estudado consiste em uma turbina eólica conectada a uma rede elétrica trifásica de 60 Hz. Em condições normais de funcionamento, as tensões e correntes das três fases permanecem equilibradas e defasadas em 120°. Para avaliar o comportamento do sistema diante de perturbações na rede, foi aplicado um curto-circuito trifásico entre 4,0 s e 4,2 s da simulação. A severidade da falha foi definida pela resistência de falta (R_f), sendo considerados três cenários distintos, apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Cenários de falta avaliados, definidos pela resistência de falta (R_f).

Cenário	Resistência de falta (R_f)	Caracterização
Leve	10 Ω	Falta de alta impedância — menor severidade
Moderado	1 Ω	Falta de impedância intermediária
Crítico	0,001 Ω	Falta de baixa impedância (próxima do curto franco) — maior severidade

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Em todos os cenários, a configuração do sistema, o instante de aplicação da falha e sua duração foram mantidos constantes, alterando-se apenas o valor da resistência de falta. Dessa forma, foi possível avaliar isoladamente a influência desse parâmetro na resposta do gerador durante o distúrbio. A partir dos resultados obtidos, foram analisados os afundamentos de tensão, a recuperação da rede após a eliminação da falta, os valores máximos de corrente de curto-circuito e a Distorção Harmônica Total (THD), permitindo avaliar os impactos da severidade da falha sobre o desempenho e a qualidade da energia do sistema.

DIAGRAMA DETALHADO DO SISTEMA SIMULADO

Para maior clareza metodológica, apresenta-se na Figura 1 o diagrama de blocos completo do sistema simulado, com cada equipamento identificado por um círculo numerado. A descrição de cada elemento é apresentada na Tabela 2.

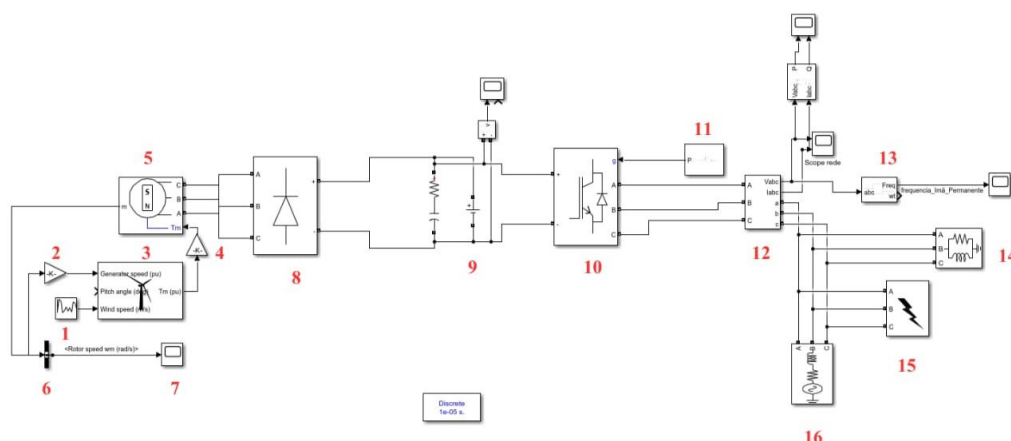


Figura 1. Diagrama de blocos do sistema simulado com os equipamentos numerados.

Tabela 2 - Descrição dos equipamentos numerados na Figura 1.

Nº	Descrição do equipamento
1	Fonte de velocidade do vento — bloco de entrada tipo onda (sine wave) que fornece o perfil de vento (m/s) ao sistema.
2	Ganho (-K-) — realimentação da velocidade do gerador, ajustando o sinal antes de entrar na turbina.
3	Subsistema da Turbina Eólica — recebe velocidade do gerador, ângulo de passo (pitch) e velocidade do vento; calcula o torque mecânico (Tm) produzido pelo rotor eólico.
4	Ganho (-K-) — escala o sinal de torque mecânico (Tm) antes de aplicá-lo ao gerador.
5	Gerador Síncrono de Ímãs Permanentes (PMSG) — máquina elétrica que converte o torque mecânico em energia elétrica trifásica (fases A, B, C).
6	Barramento de medição — ponto de aquisição da velocidade do rotor (wm, em rad/s).
7	Scope — osciloscópio que exibe a curva da velocidade do rotor.
8	Ponte retificadora trifásica (diodos) — converte a tensão CA gerada pelo PMSG em tensão CC.
9	Filtro do elo CC (resistor + capacitor) — suaviza a tensão contínua, reduzindo ondulações (ripple).
10	Conversor/Inversor (ponte IGBT) — converte a tensão CC de volta em CA, controlado pelos pulsos de disparo (g).

11	Bloco gerador de pulsos (PWM) — gera os sinais de comando (gate) que controlam o chaveamento do inversor IGBT.
12	Bloco de medição trifásica (Vabc/Iabc) — mede tensão e corrente trifásicas na saída do inversor ("Tensão_Ima_Permanente").
13	Medidor de frequência (Freq/wt) — calcula a frequência do sistema e o ângulo de fase a partir dos sinais abc.
14	Carga RLC — representa a carga elétrica local conectada ao sistema.
15	Bloco de falta (curto-circuito) — chave/disjuntor trifásico usado para aplicar o curto-circuito simulado (com resistência de falta Rf).
16	Fonte de tensão trifásica (rede elétrica) — representa a rede/grid à qual o gerador está conectado.
17	Powergui (Discrete, 1e-05 s) — bloco de configuração da simulação, definindo o método de solução discreto e o passo de tempo (10 µs).

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados de frequência, tensão e corrente obtidos para os três cenários simulados.

CENÁRIO LEVE ($R_f = 10 \Omega$)

A Figura 2 apresenta a resposta de frequência do gerador ao longo dos 10 s de simulação. Observa-se

um transitório inicial nos primeiros instantes (0 a 2 s), decorrente da partida do sistema, com pico próximo de 60,0 Hz seguido de uma breve oscilação amortecida entre aproximadamente 59,98 Hz e 59,99 Hz.

Após esse transitório inicial, a frequência se estabiliza em torno de 59,985 Hz, com pequenas variações associadas a distúrbios pontuais próximos de 8 – 9 s, sem relação aparente com a falta aplicada em 4 s, o que indica que, para $R_f = 10 \Omega$, o efeito da falta sobre a frequência do gerador é praticamente imperceptível.

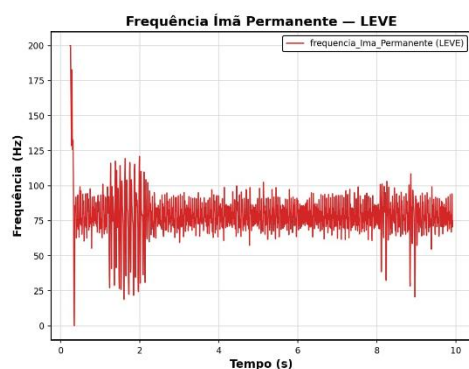


Figura 2. Frequência do gerador durante o cenário leve ($R_f = 10 \Omega$).

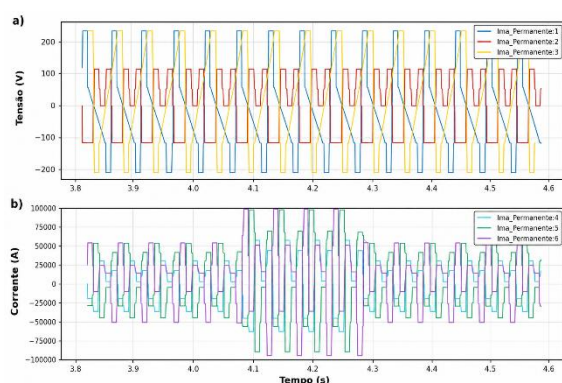


Figura 3. Tensão (a) e; corrente (b) no cenário leve ($R_f = 10 \Omega$).

A Figura 3 (a-b) mostra, respectivamente, a tensão e a corrente do gerador na janela em torno do instante de falta ($t \approx 4$ s). A tensão mantém o padrão de onda retangular típico do conversor, com amplitudes de aproximadamente ± 210 V e ± 100 V entre fases, sem distorções perceptíveis associadas à falta.

As três fases mantêm a defasagem característica de um sistema trifásico equilibrado, com deslocamento angular de 120° entre si (0° , -120° e 120° para as fases 1, 2 e 3, respectivamente), observado pelo escalonamento temporal entre as transições das ondas retangulares de cada fase. A corrente permanece com amplitude reduzida, da ordem de ± 20 a ± 45 A,

apresentando um leve aumento pontual no instante da falta, sem configurar um evento severo.

CENÁRIO MODERADO ($R_f = 1 \Omega$)

No cenário moderado, a resposta de frequência (Figura 4) apresenta comportamento muito semelhante ao cenário leve, com o mesmo padrão de transitório inicial e estabilização em torno de 59,985 Hz, sugerindo que a redução de R_f de 10Ω para 1Ω ainda não é suficiente para provocar um desvio de frequência significativo.

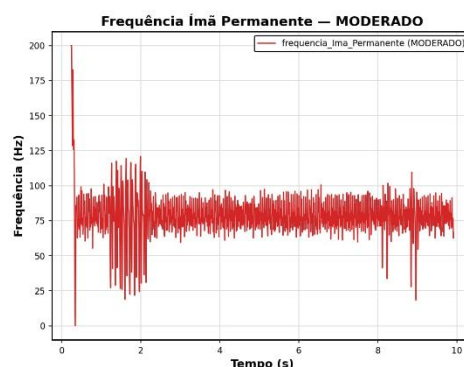


Figura 4. Frequência do gerador, cenário moderado ($R_f = 1 \Omega$).

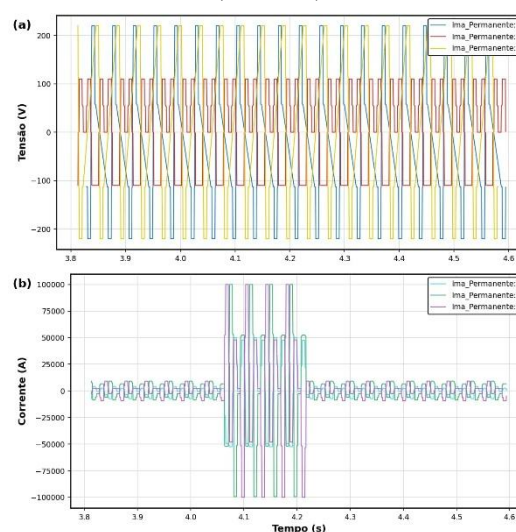


Figura 5. Tensão (a) e; corrente (b) no cenário moderado ($R_f = 1 \Omega$).

A tensão do gerador Figura 5 (a), mantém o padrão observado no cenário leve, sem alterações visíveis, preservando a defasagem trifásica equilibrada de 120° entre as fases (0° , -120° e 120°), o que sugere que, para $R_f = 1 \Omega$, o impacto da falta concentra-se predominantemente na corrente, sem comprometer o equilíbrio de fases da tensão.

Na corrente do gerador Figura 5 (b), observa-se um aumento expressivo de amplitude durante a janela da falta (aproximadamente entre 4,0 s e 4,2 s), com picos atingindo cerca de ± 230 A, um incremento de mais de cinco vezes em relação ao cenário leve.

Após esse intervalo, a corrente retorna a um patamar reduzido, próximo de ± 20 A, indicando a atuação do sistema de controle na recuperação do regime permanente

CENÁRIO CRÍTICO ($R_f = 0,001 \Omega$)

O cenário crítico revela o impacto substancialmente mais severo de uma falta de baixa impedância. A resposta de frequência, visto na Figura 6, apresenta, além do transitório inicial característico, um pico pronunciado no instante da falta (entre aproximadamente 4,0 s e 4,3 s), com a frequência ultrapassando 60,002 Hz antes de retornar ao patamar de regime permanente, evidenciando uma perturbação de frequência claramente associada ao evento de falta, ausente nos dois cenários anteriores.

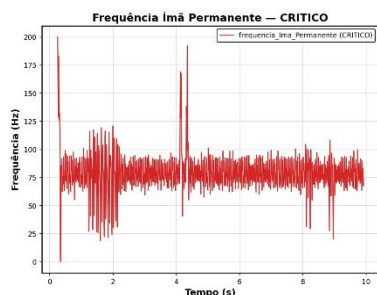


Figura 6. Frequência do gerador, cenário crítico ($R_f = 0,001 \Omega$).

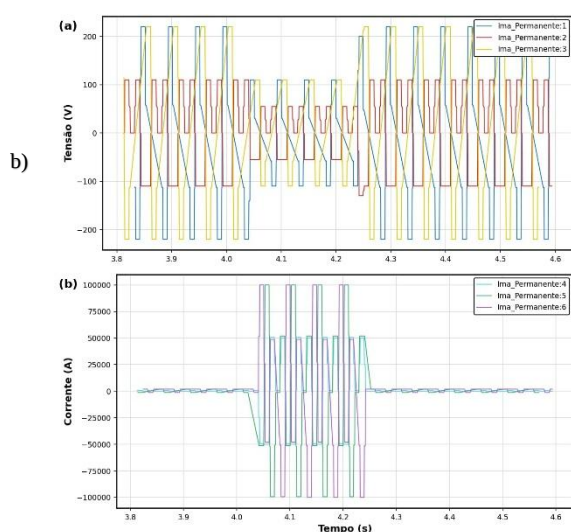


Figura 7. Tensão (a) e; corrente (b) no cenário crítico ($R_f = 0,001 \Omega$).

A tensão do gerador, Figura 7 (a), sofre um colapso acentuado no instante 4,0 – 4,2 s, com distorção significativa da forma de onda antes da recuperação, contrastando com a estabilidade da tensão observada nos cenários leve e moderado. Nesse intervalo, a defasagem nominal de 120° entre as fases (0° , -120° e 120°), preservada nos regimes anterior e posterior à falta, é momentaneamente comprometida, caracterizando um desequilíbrio trifásico transitório associado à baixa impedância do curto-circuito.

A corrente do gerador, Figura 7 (b), apresenta picos da ordem de milhares de ampères no instante da falta, ordens de grandeza acima dos valores observados nos cenários leve e moderado, caracterizando uma corrente de curto-circuito de elevada magnitude, compatível com uma falta de baixíssima impedância.

ANÁLISE COMPARATIVA

A comparação entre os três cenários evidencia uma relação claramente não linear entre a resistência de falta e a severidade da resposta dinâmica do gerador. Enquanto a redução de R_f de 10Ω para 1Ω já resulta em um aumento considerável da amplitude de corrente (de dezenas para centenas de ampères), a redução adicional para $0,001 \Omega$ provoca um salto de magnitude muito mais acentuado, com correntes da ordem de milhares de ampères e colapso de tensão, além de um impacto mensurável sobre a frequência do gerador, efeito ausente nos dois cenários de maior resistência de falta.

Esse comportamento é consistente com a teoria de curtos-circuitos, na qual a corrente de falta é inversamente proporcional à impedância total do caminho de falta: à medida que R_f tende a zero, a corrente tende a valores limitados apenas pela impedância interna do gerador e da rede, resultando no cenário mais severo entre os avaliados. Do ponto de vista prático, esse resultado reforça a importância de dimensionar adequadamente os esquemas de proteção e os requisitos de *fault ride-through* considerando o pior caso, faltas de baixíssima impedância, uma vez que cenários de resistência de falta intermediária ou elevada podem mascarar o real potencial de estresse do sistema.

CONCLUSÃO

O presente trabalho avaliou o impacto de diferentes resistências de falta na estabilidade dinâmica e nos indicadores de qualidade de energia de um sistema eólico baseado em PMSG. A partir das simulações de curto-circuito trifásico, constatou-se que a resposta transitória do gerador apresenta uma relação estritamente não linear com a impedância da falta.



Para cenários de falta leve ($R_f = 10 \Omega$) e moderada ($R_f = 1 \Omega$), o sistema demonstrou resiliência, mantendo a estabilidade da tensão e da frequência operacionais e limitando os impactos à elevação da corrente, que atingiu picos máximos de aproximadamente ± 230 A no caso moderado. Nessas condições, os parâmetros fundamentais de qualidade de energia foram preservados, mantendo a defasagem trifásica de 120° e garantindo a rápida recuperação do sistema após o distúrbio.

No entanto, a simulação do cenário crítico de baixíssima impedância ($R_f = 0,001 \Omega$) revelou um severo comprometimento da qualidade da energia elétrica. A queda abrupta da resistência de falta resultou em correntes de curto-circuito na ordem de milhares de ampères, provocando um afundamento acentuado (*voltage sag*) e distorção significativa da forma de onda da tensão. Além disso, observou-se um desequilíbrio trifásico transitório e desvios anômalos na frequência do gerador.

Conclui-se, portanto, que a estabilidade e a qualidade da energia em sistemas eólicos baseados em PMSG são criticamente sensíveis à proximidade de um curto-circuito franco. Os resultados evidenciam a necessidade imperativa de que os esquemas de proteção e as estratégias de controle para permanência na rede (*Fault Ride-Through* - FRT) sejam dimensionados adotando-se o pior caso possível. O subdimensionamento baseado em faltas moderadas pode mascarar o colapso da tensão e as distorções harmônicas, comprometendo a integridade dos conversores eletrônicos e a confiabilidade do fornecimento de energia à rede elétrica.

REFERÊNCIAS

ABB. High speed permanent magnet generator (HS PMG): Compact design, maximized power per weight ratio. [S. l.]: ABB Renewable Generators, 2021. 1 folder (2 p.). Disponível em: new.abb.com/motors-generators. Acesso em: 14 jul. 2026.

GALLEGO LANDERA, Y. A.; NEVES, F. A. S.; NETO, R. C.; BENÍTEZ-ALONSO, A. A.; León-Viltre, L. Revisão e comparação dos recentes requisitos de integração de fontes renováveis de energia. *Ingeniería Energética*, v. 41, n. 3, p. 1-17, 2020.

GATTO, R. F. A revisitação dos fundamentos de sistemas de potência na era da geração distribuída: uma análise crítica da estabilidade e controle: Revisiting power system fundamentals in the era of distributed generation: a critical analysis of stability and control. *RCMOS-Revista Científica Multidisciplinar O Saber*, v. 1, n. 2, 2024.

MATOS, K. N. V. et al. Secondary Voltage Control Applied to DFIG-based Wind Park and its Effect on

Long-Term Voltage Stability, *Elect. Power Syst. Res.*, vol.175, Oct.2019.

NASA. Prediction of Worldwide Energy Resources (POWER): Data Access Viewer. Hampton: NASA Langley Research Center, [s.d.]. Disponível em: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>. Acesso em: 14 jul. 2026.

NASIRI, M.; MILIMONFARED, J.; FATHI, S. H. A review of low-voltage ride-through enhancement methods for permanent magnet synchronous generator based wind turbines. *Renewable and sustainable energy reviews*, v. 47, p. 399-415, 2015.

QUADROS, E. M. de. Análise da influência de parques eólicos em diferentes princípios de polarização de relés direcionais de sobrecorrente. 2025. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Energia) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2025.

REXCO. Gerador de Turbina Eólica de Eixo Horizontal (Modelo RC-10K-A). Made-in-China, [s.d.]. Disponível em: <https://pt.made-in-china.com>. Acesso em: 14 jul. 2026.

SILVA, L. P. de S.; MOREIRA, A. B.; MOTA, D. de V.; MEDEIROS, L. T. P.; TEIXEIRA, V. S. de C. Técnicas de controle aplicadas a um sistema eólico equipado com o PMSG com função de filtragem de corrente harmônica da rede sob distorções na tensão da rede. *Brazilian Journal of Development*, [S. l.], v. 8, n. 5, p. 33435–33456, 2022.

TRIPATHI, Saurabh Mani; TIWARI, Amar Nath; SINGH, Deependra. Low-voltage ride-through enhancement with the ω and T controls of PMSG in a grid-integrated wind generation system. *IET Generation, Transmission & Distribution*, v. 13, n. 10, p. 1979-1988, 2019.

VICTORIO, M. P. C.; MELO, F. C. Análise do conteúdo harmônico de corrente de um sistema fotovoltaico conectado à rede com inversores convencional e NPC trifásicos usando SPWM e SVPWM. In: *Anais Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS*. 2022. p. 1-10.

ZHONG, Cheng; WEI, Lai; YAN, Gangui. Low voltage ride-through scheme of the PMSG wind power system based on coordinated instantaneous active power control. *Energies*, v. 10, n. 7, p. 995, 2017.