

ANÁLISE DOS IMPACTOS NOS NÍVEIS DE CURTO-CIRCUITO CAUSADOS PELA INSERÇÃO DE FONTES INTERFACEADAS POR INVERSORES

ANALYSIS OF THE IMPACTS ON SHORT-CIRCUIT LEVELS CAUSED BY THE
INTEGRATION OF INVERTER-INTERFACED SOURCES

ANÁLISIS DE LOS IMPACTOS EN LOS NIVELES DE CORTOCIRCUITO
CAUSADOS POR LA INSERCIÓN DE FUENTES INTERCONECTADAS MEDIANTE
INVERSORES

Raimunda Lima Bacelar de Oliveira Neta¹

DOI: 10.54899/dcs.v22i85.4061

Recibido: 17/12/2025 | Aceptado: 22/12/2025 | Publicación en línea: 26/12/2025.

RESUMO

Este trabalho investiga os impactos da crescente inserção de recursos energéticos baseados em inversores (*Inverter-Based Resources – IBR*) nos níveis de curto-circuito em sistemas elétricos de potência. A motivação do estudo está associada às transformações recentes da matriz elétrica, com o aumento da participação de fontes renováveis controladas por eletrônica de potência, e aos desafios impostos aos critérios tradicionais de proteção do sistema. O objetivo principal é analisar e comparar a contribuição de corrente de curto-circuito de um gerador síncrono convencional e de um aerogerador do tipo III (DFIG), avaliando como essas diferentes tecnologias influenciam o comportamento do sistema sob condições de falta. A metodologia adotada baseia-se na modelagem e simulação de um sistema elétrico de testes no ambiente Simulink/MATLAB, composto por duas fontes de geração distintas. O sistema é submetido a diferentes tipos de faltas, aplicadas em diversos pontos da linha de transmissão e com variação de parâmetros, permitindo uma análise abrangente do comportamento dinâmico das correntes de curto. Os resultados evidenciam um contraste significativo entre as tecnologias analisadas. Enquanto o gerador síncrono apresenta correntes de curto elevadas, da ordem de dez vezes a corrente nominal, o IBR tem sua contribuição limitada a aproximadamente 1,5 vezes a corrente nominal, independentemente da severidade ou localização da falta. Além disso, observa-se que o controle eletrônico do IBR reduz rapidamente componentes desequilibradas em faltas monofásicas. Conclui-se que a maior penetração de IBRs tende a reduzir os níveis globais de curto-circuito, reforçando a necessidade de revisão dos critérios de proteção e planejamento dos sistemas elétricos para garantir sua confiabilidade.

Palavras-chave: IBR. Curto-Circuito. Proteção de Sistemas Elétricos de Potência. DFIG. Fonte Eólica.

¹ Graduada em Engenharia Eletricista área de concentração em Elétrotécnica, Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande, Paraíba, Brasil. E-mail: netabacelar7@gmail.com
Orcid: <https://orcid.org/0009-0008-5262-8736>

ABSTRACT

This paper investigates the impact of the increasing penetration of Inverter-Based Resources (IBRs) on short-circuit current levels in electric power systems. The motivation for this study arises from the ongoing transformation of the power generation mix, driven by the integration of renewable energy sources interfaced through power electronic converters, which poses new challenges to conventional protection schemes. The main objective of this research is to analyze and compare the short-circuit current contribution of a conventional synchronous generator and a Type III wind turbine generator (DFIG), assessing how these technologies affect system behavior under fault conditions. The adopted methodology is based on the modeling and simulation of a test power system developed in the Simulink/MATLAB environment, comprising two distinct generation sources. Different fault scenarios are applied at multiple locations along the transmission line, with variations in fault parameters, allowing a comprehensive evaluation of the system's dynamic response. The results reveal a significant contrast between the analyzed technologies. While the synchronous generator supplies high short-circuit currents, reaching at least ten times the nominal current, the IBR contribution is limited to approximately 1.5 times the nominal current, regardless of fault severity or location. Additionally, during single-phase faults, the electronic control of the IBR rapidly mitigates unbalanced components, reducing the fault current after the initial transient. It is concluded that increasing IBR penetration leads to a reduction in overall short-circuit levels, highlighting the need to revise protection and planning criteria to ensure system reliability.

Keywords: IBR. Short-Circuit. Power System Protection. DFIG. Wind Generation.

RESUMEN

Este trabajo investiga el impacto de la creciente penetración de recursos basados en inversores (Inverter-Based Resources – IBR) en los niveles de corriente de cortocircuito en los sistemas eléctricos de potencia. La motivación del estudio está relacionada con la transformación de la matriz de generación eléctrica, impulsada por la integración de fuentes renovables controladas por electrónica de potencia, lo que introduce nuevos desafíos para los esquemas de protección tradicionales. El objetivo principal de la investigación es analizar y comparar la contribución de corriente de cortocircuito de un generador síncrono convencional y de un aerogenerador de tipo III (DFIG), evaluando su influencia en el comportamiento del sistema bajo condiciones de falla. La metodología se basa en la modelación y simulación de un sistema eléctrico de prueba desarrollado en el entorno Simulink/MATLAB, compuesto por dos fuentes de generación distintas. Se aplican diferentes escenarios de falla en varios puntos de la línea de transmisión, con variación de los parámetros de falla, lo que permite una evaluación detallada de la respuesta dinámica del sistema. Los resultados muestran un contraste significativo entre las tecnologías analizadas. Mientras que el generador síncrono suministra corrientes de cortocircuito elevadas, del orden de diez veces la corriente nominal, la contribución del IBR se limita a aproximadamente 1,5 veces la corriente nominal, independientemente de la severidad o ubicación de la falla. Además, en fallas monofásicas, el control electrónico del IBR atenúa rápidamente los componentes desequilibrados, reduciendo la corriente de falla tras los primeros instantes. Se concluye que una mayor penetración de IBRs tiende a reducir los niveles globales de cortocircuito, lo que refuerza la necesidad de revisar los criterios de protección y planificación para garantizar la confiabilidad del sistema eléctrico.

Palabras clave: IBR. Cortocircuito. Protección de Sistemas Eléctricos de Potencia. DFIG. Fuente Eólica.



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución- NoComercial 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

INTRODUÇÃO

As diferenças no comportamento dos recursos baseados em inversores (*Inverter-Based Resources* – IBR) sob condições de falta, quando comparados aos geradores síncronos convencionais, são amplamente discutidas na literatura. Em particular, as correntes de curto-circuito fornecidas por IBRs apresentam magnitude limitada pelos dispositivos de eletrônica de potência. Aerogeradores com conversão eletrônica total, por exemplo, fornecem tipicamente correntes de curto de até cerca de 150% da corrente nominal (IEEE/NERC, 2018), enquanto unidades síncronas podem contribuir com valores da ordem de até dez vezes a corrente nominal (Mariano, 2017).

Além disso, a geração baseada em inversores apresenta baixa contribuição de componentes de sequência negativa e zero durante faltas assimétricas, uma vez que seus sistemas de controle são projetados para suprimir desequilíbrios. Como consequência, as correntes de sequência negativa provenientes de IBRs são frequentemente reduzidas ou instáveis, em contraste com o comportamento de geradores síncronos convencionais (NAGPAL; HENVILLE, 2018). Esse cenário impõe desafios relevantes aos esquemas clássicos de proteção, especialmente àqueles baseados na detecção de componentes de sequência, cuja sensibilidade e confiabilidade podem ser comprometidas em sistemas com elevada penetração de IBRs.

Diante desse contexto, este trabalho tem como objetivo analisar, por meio de simulações, a influência da geração baseada em inversores nos níveis de corrente de curto-circuito e no comportamento das tensões e correntes durante faltas em um sistema elétrico de potência, comparando seu desempenho ao de fontes síncronas convencionais. Para isso, é modelado no ambiente Simulink/MATLAB® um sistema teste composto por um barramento com geração síncrona equivalente, representada por um modelo de Thévenin, interligado por uma linha de transmissão a um barramento com geração eólica do tipo III (DFIG). Inicialmente, estabelece-se o regime permanente do sistema, garantindo um ponto de operação estável, e, em seguida, são simulados diferentes cenários de faltas ao longo da linha de transmissão. Em cada caso, avaliam-

se as correntes de curto-circuito e os níveis de tensão nos terminais local e remoto, buscando comparar a contribuição das fontes, a sustentação de tensão e as implicações dos resultados para a coordenação e a eficácia dos sistemas de proteção em redes com alta penetração de IBRs.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A crescente inserção de recursos energéticos baseados em inversores (Inverter-Based Resources – IBRs) tem introduzido desafios relevantes à operação, ao planejamento e à proteção dos sistemas elétricos de potência. Diferentemente das máquinas síncronas convencionais, os IBRs não fornecem inércia eletromecânica natural nem contribuem com elevados níveis de corrente de curto-circuito, o que altera de forma significativa o comportamento dinâmico da rede. Como os sistemas de transmissão foram originalmente projetados considerando o desempenho da geração síncrona, a elevada penetração dessas fontes pode comprometer características fundamentais da rede, como a estabilidade transitória, o controle de tensão e a resposta em frequência (IEEE/NERC, 2018).

No contexto do sistema elétrico brasileiro, a participação crescente de fontes intermitentes baseadas em inversores, especialmente a geração eólica, impõe desafios adicionais à operação do Sistema Interligado Nacional (SIN). A dependência das condições climáticas introduz variações rápidas na potência ativa injetada na rede, dificultando o equilíbrio entre geração e carga e afetando a previsibilidade operacional. Esse cenário reforça a necessidade de aprimoramento das estratégias de controle, planejamento e coordenação da operação para garantir a confiabilidade do sistema elétrico nacional (Lopes, 2023).

Sob a perspectiva da proteção de sistemas elétricos, os IBRs apresentam contribuições de corrente de curto-circuito significativamente inferiores às observadas em sistemas com geração síncrona convencional, em função das limitações impostas pelos conversores eletrônicos de potência. Em aerogeradores do tipo IV, por exemplo, a corrente de falta tipicamente não ultrapassa 150% da corrente nominal, enquanto em sistemas síncronos essa contribuição pode atingir valores da ordem de dez vezes a corrente nominal (IEEE Power and Energy Society, 2016; Mariano, 2017). Essa redução nos níveis de corrente de curto-circuito compromete a sensibilidade, a coordenação e a seletividade dos esquemas de proteção tradicionais.

Além da limitação na magnitude da corrente de falta, os IBRs tendem a fornecer baixos níveis de componentes de sequência negativa e zero durante condições de falha, em função das

estratégias de controle adotadas. Esse comportamento afeta diretamente o desempenho de relés convencionais baseados nessas componentes, especialmente os esquemas de proteção direcional e de desequilíbrio. Estudos recentes indicam que a padronização de requisitos mínimos de resposta dos IBRs, aliada à análise detalhada do impacto dos parâmetros de falta, pode reduzir a variabilidade entre equipamentos e contribuir para o aumento da confiabilidade dos sistemas de proteção em cenários de alta penetração de geração baseada em inversores (IEEE/NERC, 2018; Nagpal; Henville, 2018; Davi et al., 2021a; Davi et al., 2023).

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Faltas e Modelagem da Linha de Transmissão

As faltas em sistemas elétricos de potência podem ser classificadas em simétricas e assimétricas, conforme estabelecido por Glover et al. (2012). As faltas trifásicas mantêm o sistema balanceado, enquanto as faltas monofásicas, fase-fase e fase-fase-terra introduzem desequilíbrios e representam a maioria das ocorrências em sistemas de transmissão. A avaliação das faltas assimétricas é realizada no domínio das componentes simétricas, permitindo a representação do sistema por redes equivalentes de sequência positiva, negativa e zero, conectadas no ponto de falta (Glover et al., 2012).

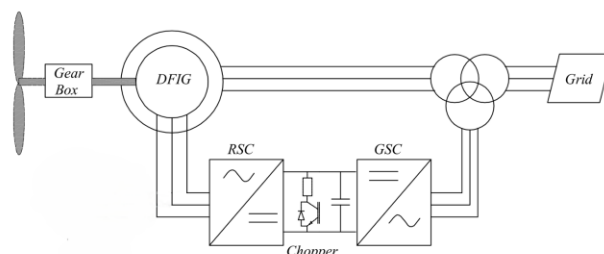
A linha de transmissão é modelada por meio do modelo de Bergeron, baseado em parâmetros distribuídos, adequado para estudos de transitórios eletromagnéticos. Esse modelo representa a propagação de ondas e as reflexões ao longo da linha por meio de um atraso de propagação entre os terminais, fornecendo maior fidelidade na análise das tensões e correntes durante a ocorrência de faltas quando comparado aos modelos a parâmetros concentrados (LEDA, 2014).

Modelos de Fontes de Geração Eólica

As turbinas eólicas de geração elétrica são classificadas em quatro tipos principais (I a IV), de acordo com a topologia do gerador e do sistema de conversão. E, embora os quatro tipos apresentem aplicações específicas, o aerogerador **Tipo III (DFIG)**, ilustrado na Figura 5, configuram-se como uma solução intermediária entre custo e desempenho, e domina maioria das

instalações eólicas terrestres ao longo das últimas décadas, justificando seu destaque e foco neste estudo (Asad; Sànchez-Fernàndez, 2025).

Figura 1. Modelo do aerogerador Tipo III.



Fonte: Ackermann (2005).

Conforme ilustrado na Figura 1, o sistema de conversão de potência é composto pelo *Rotor Side Converter* (RSC), responsável pelo controle da potência ativa e reativa, e pelo *Grid Side Converter* (GSC), cuja função principal é manter a tensão do elo CC constante. Como esses conversores processam apenas a potência associada ao escorregamento, aproximadamente 30% da potência nominal do gerador, a topologia apresenta menores custos e perdas quando comparada aos sistemas de conversão total (Tipo IV) (Ghaffarzadeh; Mehrizi-Sani, 2020).

Proteção Direcional de Sistemas (Função 32)

A função ANSI 32 corresponde à proteção direcional de potência, utilizada para identificar o sentido do fluxo de potência ou da corrente de falta em relação ao ponto de instalação do relé, distinguindo entre direções avante e reversa. Seu princípio de funcionamento baseia-se na comparação angular entre uma grandeza de operação, geralmente a corrente, e uma grandeza polarizadora, tipicamente a tensão, permitindo determinar se a corrente associada à falta entra ou sai da zona protegida (Roberts; Guzmán, 2006).

No contexto deste trabalho, a análise é fundamentada nos elementos direcionais associados às sequências positiva, negativa, zero e ao elemento combinado (32P, 32Q, 32V e 32PQ). As formulações matemáticas, critérios de atuação e conclusões associadas a esses elementos direcionais podem ser obtidas a partir da análise detalhada do trabalho de Roberts e Guzmán (2006). O elemento direcional de sequência zero apresenta menor confiabilidade, uma vez que depende da tensão residual, suscetível a influências externas e a desequilíbrios do

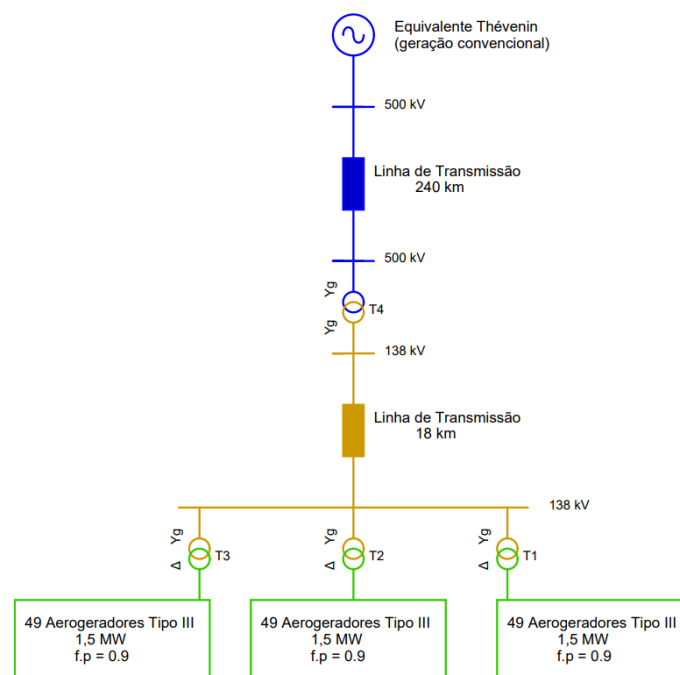
sistema; por esse motivo, sua utilização é restrita a fins didáticos, não sendo adotada como base única para conclusões.

METODOLOGIA

Sistema de Estudo

O sistema elétrico adotado neste trabalho é baseado na topologia de duas barras proposta por Davi et al. (2021a), interligadas por uma linha de transmissão. Uma extremidade é representada por uma fonte síncrona equivalente, modelada por um equivalente de Thévenin, enquanto a outra corresponde a três parques eólicos compostos por aerogeradores do tipo III (DFIG). As análises são realizadas a partir de medições nos terminais local e remoto, permitindo a comparação do comportamento do sistema sob diferentes condições de falta. A Figura 2 apresenta o diagrama unifilar do sistema considerado, utilizado como base para as simulações.

Figura 2. Sistema de estudo.



Fonte: Adaptado de Davi et al. (2021a).

As simulações foram conduzidas no ambiente MATLAB/Simulink, utilizando bibliotecas especializadas para sistemas elétricos de potência, com modelos adequados à análise de transitórios eletromagnéticos.

Modelagem do Aerogerador

O aerogerador considerado é do tipo III (DFIG), no qual o estator é conectado diretamente à rede elétrica e o rotor é conectado por meio de um conversor CA/CC/CA, que permite a operação em velocidade variável e o controle independente das potências ativa e reativa por meio dos conversores do lado do rotor e do lado da rede, sendo amplamente empregada em parques eólicos terrestres (Ackermann, 2005; Carrilho, 2021).

A modelagem adotada baseia-se no modelo proposto por Ganon (2021), disponibilizado na biblioteca do MATLAB/Simulink, o qual contempla a dinâmica eletromecânica do gerador, os sistemas de controle e os limites impostos pela eletrônica de potência durante condições de falta. Os principais parâmetros elétricos e mecânicos do gerador de indução utilizado nas simulações, tais como potência nominal, resistências, reatâncias e constante de inércia, são apresentados na **Tabela 1**, com base nos valores empregados por Davi et al. (2021a), a fim de garantir a coerência com estudos consolidados na literatura.

Tabela 1. Parâmetros do gerador de indução.

Grandeza	Símbolo	Valor
Potência nominal	S_n	1,67 MVA
Tensão nominal do estator	V_s	575 V
Tensão nominal do rotor	V_r	1975 V
Frequência	f	60 Hz
Resistência do estator	R_s	0,023 p.u.
Reatância de dispersão do estator	L_{ls}	0,180 p.u.
Resistência do rotor	R_r	0,016 p.u.
Reatância de dispersão do rotor	L_{lr}	0,160 p.u.
Reatância de magnetização	L_m	2,900 p.u.
Constante de inércia	H	0,685 s

Fonte: Adaptado de Davi et al. (2021a).

Especificação dos Componentes do Sistema de Estudo

Os componentes do sistema elétrico analisado foram parametrizados a partir de suas potências nominais, impedâncias e demais parâmetros elétricos. As especificações técnicas adotadas, utilizadas na implementação do modelo no ambiente MATLAB/Simulink, são apresentadas na Tabela 2, a qual consolida os parâmetros do sistema de estudo ilustrado na Figura 2.

Tabela 2. Parâmetros dos elementos do sistema de estudo.

Elemento	Parâmetros
Sistema Equivalente	500 kV – 10 GVA – X/R =10
Transformador D-Yn (34,5– 0,575 kV)	1,75 MVA – Z = 6%
Transformador Yn-D (138– 34,5 kV)	90 MVA – Z =10%
Alimentador (18 km)	R=0,191Ωkm ⁻¹ , L=1,192mHkm ⁻¹
Transformador Yn-Yn (500– 138 kV)	360 MVA – Z = 10%
Linha de Transmissão (240 km)	R+/0 = 0,0191/0,2044Ω·km ⁻¹ L+/0 = 0,818/2,17mH·km ⁻¹ C+/0 = 0,0142/0,009μF·km ⁻¹

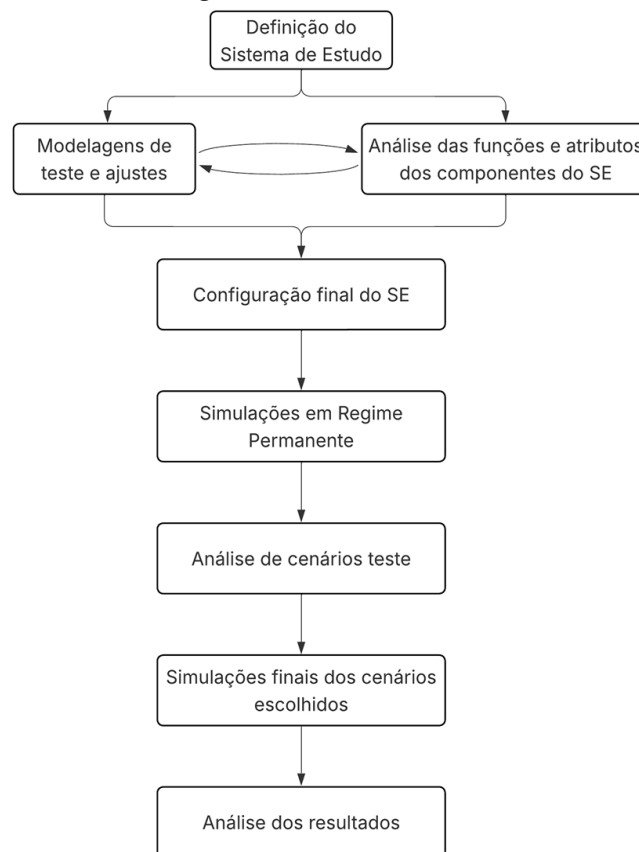
Fonte: Davi et al. (2021a).

Na modelagem do sistema, os transformadores foram discretizados pelo método *Backward Euler*, a linha de transmissão de 18 km foi representada pelo modelo equivalente π , e a geração remota foi definida como a barra de balanço do sistema.

METODOLOGIA

O procedimento de estudo e simulação adotado neste trabalho é sintetizado no fluxograma apresentado na Figura 3, que resume as principais etapas da metodologia, desde a definição do sistema de estudo até a análise final dos resultados.

Figura 3. Sistema de estudo.



Fonte: De autoria própria (2025).

ANÁLISES E RESULTADOS DOS CENÁRIOS SIMULADOS

Antes da aplicação dos cenários de falta, o sistema foi operado em regime permanente, de modo a estabelecer um ponto de operação estável para as grandezas elétricas, garantindo uma referência consistente para a comparação entre as condições pré-falta e durante a ocorrência das faltas.

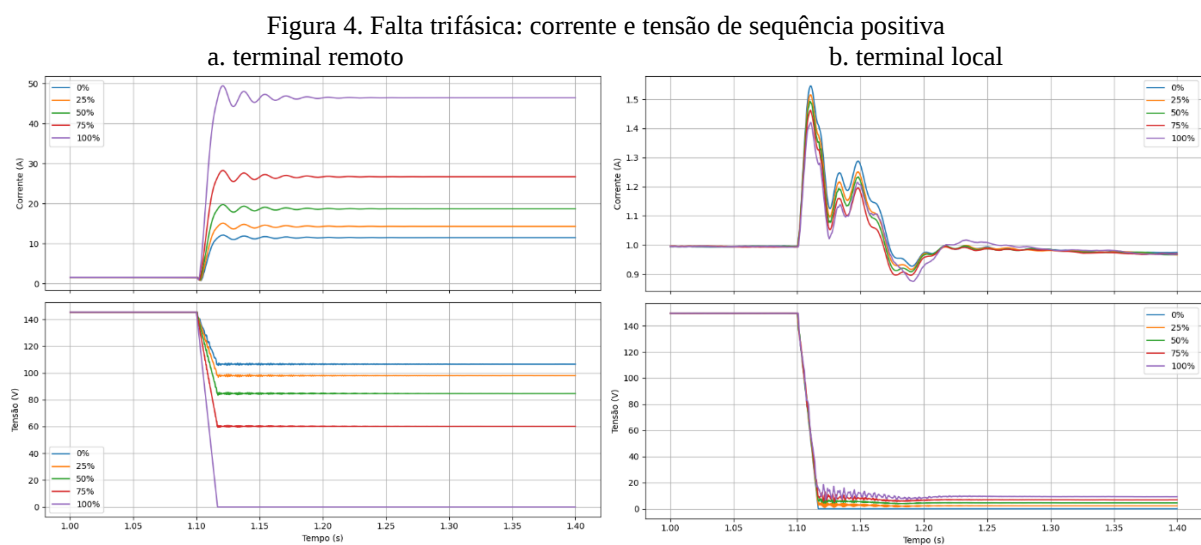
As tensões e correntes analisadas foram registradas nos terminais remoto e local por meio de transformadores ideais de potencial e corrente, com relações de transformação de 500 kV/115 V e 350 A/1 A, respectivamente, as quais foram mantidas nas simulações dos cenários subsequentes.

Faltas Trifásicas

Nesta etapa, foram simuladas faltas trifásicas ao longo da linha de transmissão em diferentes pontos de seu comprimento, correspondentes a 0%, 25%, 75% e 100% da extensão. O

terminal local refere-se à extremidade inicial da linha (0%), associada à geração baseada em inversores, enquanto o terminal remoto corresponde à extremidade oposta (100%), associada à geração síncrona convencional. As Figuras 4(a) e 4(b) apresentam, respectivamente, as medições realizadas nos terminais remoto e local.

As tensões e correntes de sequência positiva foram registradas em ambos os terminais durante a ocorrência das faltas, considerando-se uma impedância de falta nula ($R_f = 0 \Omega$), de modo a representar o cenário mais severo. As faltas foram aplicadas no instante $t = 1,1 \text{ s}$, permitindo a avaliação das grandezas elétricas nas condições pré-falta e durante a falta.



Fonte: De autoria própria (2025).

Nas faltas trifásicas, observa-se uma assimetria clara entre a contribuição de corrente do terminal remoto, associado à geração síncrona convencional, e do terminal local, associado ao DFIG. No terminal remoto, faltas próximas ao barramento síncrono resultaram em correntes elevadas, da ordem de 48 A, que se reduziram gradativamente com o aumento da distância da falta, atingindo cerca de 12 A no terminal oposto, comportamento típico de fontes com baixa impedância interna. Em contraste, no terminal local, a corrente permaneceu limitada em aproximadamente 1,5 p.u. da corrente nominal, independentemente da posição da falta, em função das restrições impostas pelos controles do conversor.

Do ponto de vista das tensões, o colapso no terminal remoto ocorreu apenas nos casos de falta aplicada diretamente ao barramento síncrono, enquanto, para faltas mais distantes, a redução do nível de tensão foi gradual. Já no terminal local, verificou-se colapso de tensão em praticamente todos os cenários analisados, inclusive para faltas afastadas, frequentemente

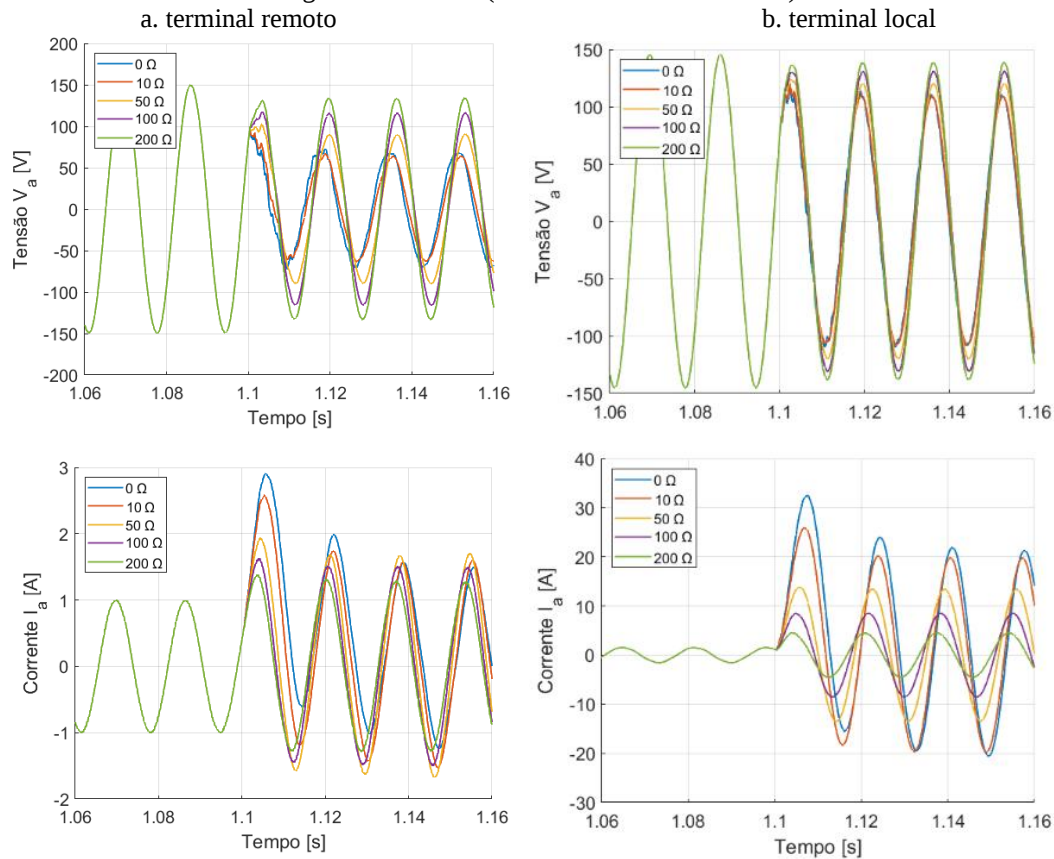
acompanhado de oscilações associadas ao controle do conversor. Esses resultados evidenciam o comportamento distinto entre a geração síncrona, caracterizada como uma fonte forte, e a geração baseada em inversores, que apresenta limitação de corrente e maior sensibilidade à localização da falta (IEEE/NERC, 2018; PUC-GOIÁS, 2025).

Faltas Monofásicas

Para o cenário de falta monofásica, foi considerada uma falta fase A–terra aplicada no ponto médio da linha de transmissão, no instante $t = 1,1$ s, avaliando-se diferentes valores de resistência de falta ($R_f = 0, 10, 50, 100$ e 200Ω). Essa variação permite analisar a influência direta da resistência de aterramento sobre as tensões e correntes medidas nos terminais remoto e local, cujos resultados são apresentados nas Figuras 5(a) e (b).

No terminal remoto, associado à geração síncrona convencional, observa-se a recuperação da tensão para valores próximos ao nominal à medida que a resistência de falta aumenta, enquanto a corrente decresce significativamente, variando aproximadamente de 30 A para 10 A. Já no terminal local, associado ao DFIG, a tensão apresenta maior sensibilidade à resistência de falta, variando de cerca de 50 V a 140 V, enquanto a corrente permanece limitada, destacando-se uma redução acentuada no regime transitório para o caso de falta franca ($R_f = 0 \Omega$).

Figura 5. Falta AT (corrente e tensão da Fase A)



Fonte: De autoria própria (2025).

Ao analisar o comportamento da corrente de falta, nota-se uma distinção marcante entre os dois terminais. No terminal remoto, a corrente decresce de forma gradual à medida que a resistência de falta aumenta, o que corresponde ao comportamento esperado. Já no terminal local, a atuação dos controles eletrônicos dos conversores rompe essa progressão: a capacidade de limitação da corrente, para valores de $R_{falta} = 0 \Omega$, chega a ser inferior às correntes medidas para 10 e 50 Ω . Já a análise da tensão revela que o terminal remoto apresenta uma variação significativamente menor em comparação ao terminal local. Essa diferença sugere a falta de suporte de tensão no terminal local, um comportamento típico de sistemas baseados em inversores, enquanto o terminal remoto demonstra um suporte de tensão mais robusto, equivalente à geração síncrona.

Faltas Fase-fase e Fase-fase-terra

Nas faltas bifásicas (FF) e bifásicas-terra (FFT), considera-se um cenário de falta entre as

fases B e C e B, C e terra, em 50% da linha, com $R_{falta} = 0 \Omega$ e início da falta em $t = 1,1 \text{ s}$. As grandezas reconstruídas de fase a partir das grandezas de sequência, para ambos os tipos de falta, são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3. Reconstrução das grandezas de fase para as faltas FF e FFT.

Grandeza	Falta fase-fase		Falta fase-fase-terra	
	remoto	local	remoto	local
Tensão (V)	$V_a = 82,5 \angle 0,2^\circ$	$V_a = 81,1 \angle 3,7^\circ$	$V_a = 81,7 \angle 0,2^\circ$	$V_a = 72,4 \angle -8,7^\circ$
	$V_b = 59,2 \angle -134,2^\circ$	$V_b = 38,2 \angle -174,6^\circ$	$V_b = 41,2 \angle -121,0^\circ$	$V_b = 2,6 \angle -21,5^\circ$
	$V_c = 58,9 \angle 134,4^\circ$	$V_c = 43,0 \angle -177,8^\circ$	$V_c = 53,6 \angle 113,3^\circ$	$V_c = 2,1 \angle -179,0^\circ$
Corrente (A)	$I_a = 1,0 \angle 156,2^\circ$	$I_a = 1,4 \angle 51,7^\circ$	$I_a = 0,9 \angle -175,5^\circ$	$I_a = 1,2 \angle 110,3^\circ$
	$I_b = 15,7 \angle -175,6^\circ$	$I_b = 1,7 \angle -116,7^\circ$	$I_b = 23,0 \angle 154,7^\circ$	$I_b = 0,9 \angle -136,2^\circ$
	$I_c = 16,6 \angle 2,8^\circ$	$I_c = 0,4 \angle 107,2^\circ$	$I_c = 16,5 \angle 45,8^\circ$	$I_c = 1,7 \angle 51,1^\circ$

Fonte: De autoria própria (2025).

No terminal remoto, as tensões e correntes apresentam magnitudes elevadas, coerentes com a falta aplicada, e mantêm níveis de resposta compatíveis com um gerador síncrono. Já no terminal local, observa-se queda acentuada da tensão nas condições de falta fase-fase-terra (FFT), com valores de V_c e I_b praticamente nulos e correntes cuja magnitude sugere equivocadamente uma falta entre as fases A e B (comportamento atípico ausente no terminal remoto). Fenômeno semelhante ocorre na falta FF, em que há troca da fase C pela fase A. Esse contraste evidencia a limitação imposta pelo IBR, que reduz a sustentação de tensão e restringe a contribuição de corrente durante as faltas. Assim, evidencia-se o contraste: o gerador síncrono sustenta tensão e fornece correntes de sequência previsíveis, ao passo que o IBR se comporta como fonte limitada, e oferece suporte de tensão reduzido durante a falta.

Análise Direcional Baseada em Componentes de Sequência

Além da análise direta das correntes e tensões, esta etapa contempla o estudo das magnitudes e ângulos das componentes de sequência, sob a perspectiva da proteção do sistema. Empregou-se a função direcional ANSI 32 para avaliar os dados obtidos nos terminais durante faltas bifásicas (FF) e bifásicas-terra (FFT). Adotou-se como condição direta aquela em que o torque calculado é positivo, indicando fluxo no sentido da linha de transmissão, e como reversa a condição em que o torque é negativo, fluxo para fora da linha.

No caso da falta FF, os elementos direcionais 32P (potência ativa), 32Q (potência reativa),

32V (sequência zero, polarizado por V_0/I_0 e $\angle Z_0$) e 32PQ (combinação de potência ativa e reativa) mostraram que o terminal remoto classificou corretamente a direção e o tipo da falta, enquanto no terminal local ocorreu inversão em algumas grandezas e erro na identificação das fases envolvidas, evidenciando a limitação do IBR em fornecer sinais confiáveis à lógica de proteção. Os resultados dessa análise e a detecção das fases envolvidas (da análise advinda da tabela 3) estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Direção e Classificação para falta fase-fase.

Terminal	Tipo	dir32P	dir32Q	dir32V	dir32PQ
LOCAL	BA	Inversa ($\tau < 0$)	Direta ($\tau > 0$)	Direta ($\tau = 0$)	Direta ($\tau > 0$)
REMOTO	CB	Direta ($\tau > 0$)	Direta ($\tau > 0$)	Direta ($\tau = 0$)	Direta ($\tau > 0$)

Fonte: De autoria própria (2025).

De forma semelhante, para a falta FFT, observou-se que o terminal remoto manteve coerência na indicação da direção, confirmando o comportamento robusto do gerador síncrono. No terminal local, entretanto, ocorreu novamente inversão da função direcional de potência ativa (32P) e erro na classificação das fases participantes da falta, o que pode comprometer a coordenação da proteção. A Tabela 5 apresenta os resultados da análise da Função 32, bem como da detecção das fases envolvidas na falta FFT.

Tabela 5. Direção e Classificação para falta fase-fase-terra.

Terminal	Tipo	dir32P	dir32Q	dir32V	dir32PQ
LOCAL	C-T	Inversa ($\tau < 0$)	Direta ($\tau > 0$)	Direta ($\tau > 0$)	Direta ($\tau > 0$)
REMOTO	BC-T	Direta ($\tau > 0$)	Direta ($\tau > 0$)	Direta ($\tau > 0$)	Direta ($\tau > 0$)

Fonte: De autoria própria (2025).

Do ponto de vista prático, a análise comparativa evidencia desafios relevantes para a proteção. No terminal remoto, as correntes de falta se mantêm bem acima das correntes de carga, permitindo atuações consistentes das filosofias tradicionais. Já no terminal local, associado à geração renovável, observaram-se limitações mais severas: correntes de curto reduzidas, inversão de direção em funções como a 32P e erros na identificação das fases em faltas FF e FFT, o que pode comprometer a seletividade e gerar atuações indevidas ou atrasos.

CONCLUSÃO

A modelagem do sistema de estudo e a simulação de diferentes cenários de falta

permitiram comparar o comportamento de fontes baseadas em inversores (IBRs) e de geração síncrona convencional durante curtos-circuitos. Os resultados confirmam diferenças marcantes entre essas fontes, especialmente no que se refere à contribuição de corrente de falta, ao suporte de tensão e às implicações para os esquemas de proteção.

Observou-se que as fontes interfaceadas por inversores apresentam limitação ativa da corrente de curto-circuito, restrita a aproximadamente 1,5 vezes a corrente nominal, independentemente da localização ou da severidade da falta. Em contraste, os geradores síncronos forneceram correntes de falta significativamente mais elevadas, compatíveis com seu comportamento de baixa impedância interna. Em faltas monofásicas e bifásicas, verificou-se ainda a atenuação das componentes desequilibradas no terminal associado ao IBR, resultando em respostas atípicas quando comparadas àquelas observadas no terminal síncrono, o qual apresentou comportamento característico de uma fonte forte, com maior sustentação de tensão (PUC-GOIÁS, 2025; LIYANARACHCHI et al., 2023).

As análises evidenciaram que o comportamento limitado dos IBRs pode comprometer a sensibilidade e a seletividade de esquemas de proteção tradicionais, sobretudo aqueles baseados exclusivamente em sobrecorrente, além de introduzir ambiguidades na identificação das fases envolvidas em faltas assimétricas. Por outro lado, funções de proteção baseadas em relações de tensão e corrente das componentes de sequência demonstraram maior robustez nesse contexto, corroborando resultados recentes da literatura (DAVI et al., 2021a).

Em síntese, os resultados reforçam que a eletrônica de potência associada às fontes baseadas em inversores altera de forma significativa o comportamento do sistema durante faltas, exigindo adaptações nos critérios de projeto e nos esquemas de proteção para garantir a operação segura e confiável dos sistemas elétricos em cenários de elevada penetração de IBRs.

REFERÊNCIAS

ACKERMANN, T. **Wind Power in Power Systems**. 2. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2005.

ASAD, M.; SÁNCHEZ-FERNÁNDEZ, J. A. **Wind turbine technologies and grid integration challenges**. *Renewable Energy*, v. 220, p. 1–15, 2025.

CARRILHO, F. **Modelagem e controle de aerogeradores baseados em DFIG**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2021.

- DAVI, G. A. et al. **Impact of inverter-based resources on distance protection of transmission lines**. Electric Power Systems Research, v. 194, p. 107072, 2021a.
- DAVI, G. A. et al. **Standardization of inverter-based resource fault response and its impact on protection systems**. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 38, n. 2, p. 1234–1245, 2023.
- GANON, J. **Modeling of doubly-fed induction generators for power system studies**. MATLAB Central File Exchange, 2021.
- GHAFFARZADEH, N.; MEHRIZI-SANI, A. **Modeling and control of doubly-fed induction generators**. IEEE Transactions on Energy Conversion, v. 35, n. 3, p. 1501–1512, 2020.
- GLOVER, J. D.; SARMA, M. S.; OVERBYE, T. J. **Power System Analysis and Design**. 5. ed. Boston: Cengage Learning, 2012.
- IEEE/NERC. **Impact of Inverter Based Generation on Bulk Power System Dynamics and Short-Circuit Performance**. Technical Report PES-TR68. [S.l.]: IEEE Power & Energy Society, 2018.
- IEEE POWER AND ENERGY SOCIETY. **Wind power plant grounding, protection, and modeling**. IEEE PES Technical Report, 2016.
- LIYANARACHCHI, G. et al. **Protection challenges in power systems with high penetration of inverter-based resources**. IET Generation, Transmission & Distribution, v. 17, n. 4, p. 845–857, 2023.
- LOPES, J. A. P. **Desafios operacionais do Sistema Interligado Nacional com alta penetração de renováveis**. Revista Brasileira de Energia, v. 29, n. 1, p. 55–68, 2023.
- MARIANO, Augusto César Santos. **Aplicação do Software ANAFAS para Cálculo de Curto-circuitos em Sistemas Elétricos de Potência**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2017.
- NAGPAL, M.; HENVILLE, C. **Impact of inverter-based generation on negative-sequence protection**. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 33, n. 4, p. 1814–1823, 2018.
- PUC-GOIÁS. **Notas de aula – Sistemas Elétricos de Potência**. Goiânia: Pontifícia Universidade Católica de Goiás, 2025.
- ROBERTS, J.; GUZMÁN, A. **Directional element design and application**. Schweitzer Engineering Laboratories, Pullman, 2006.