



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE CARAÚBAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ANA CARLA CANDEIA LILIOSO

**ANÁLISE DO IMPACTO DA OPERAÇÃO DESCENTRALIZADA DA GERAÇÃO
DISTRIBUÍDA EM UM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DURANTE EVENTOS DE
FALTA**

CARAÚBAS - RN

2024

ANA CARLA CANDEIA LILIOSO

**ANÁLISE DO IMPACTO DA OPERAÇÃO DESCENTRALIZADA DA GERAÇÃO
DISTRIBUÍDA EM UM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DURANTE EVENTOS DE
FALTA**

Monografia apresentada a Universidade
Federal Rural do Semi-Árido como
requisito parcial para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Rodrigo de Almeida Coelho, Prof.
Dr.

CARAÚBAS - RN

2024

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

L634a Lilioso, Ana Carla.
Análise do impacto da operação descentralizada da Geração Distribuída em um sistema de distribuição durante eventos de falta. / Ana Carla Lilioso. - 2024.
64 f. : il.

Orientador: Rodrigo de Almeida Coelho.
Monografia (graduação) - Universidade Federal Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia Elétrica, 2024.

1. geração distribuída. 2. modelagem de sistemas. 3. sistema de proteção. I. de Almeida Coelho, Rodrigo, orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Biblioteca Campus Caraúbas
Bibliotecária: Dalvanira Brito Rodrigues
CRB: 15/700

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

ANA CARLA CANDEIA LILIOSO

**ANÁLISE DO IMPACTO DA OPERAÇÃO DESCENTRALIZADA DA GERAÇÃO
DISTRIBUÍDA EM UM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DURANTE EVENTOS DE
FALTA**

Monografia apresentada a Universidade
Federal Rural do Semi-Árido como requisito
parcial para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Elétrica.

Caraúbas-RN, 24 de outubro de 2024

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **RODRIGO DE ALMEIDA COELHO**
Data: 25/10/2024 14:02:13-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Rodrigo de Almeida Coelho, Prof. Dr. (UFERSA)

Presidente

Documento assinado digitalmente
 **ERICA MANGUEIRA LIMA**
Data: 24/10/2024 21:03:57-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Érica Manguiera Lima, Profa. Dra. (UFERSA)

Membro Examinador

Documento assinado digitalmente
 **DANIEL CARLOS DE CARVALHO CRISOSTOMO**
Data: 25/10/2024 10:03:12-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Daniel Carlos de Carvalho Crisóstomo Prof. MSc. (UFERSA)

Membro Examinador

Dedico este trabalho a Deus, por guiar cada passo e tornar tudo possível.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por toda força, coragem, discernimento e pela oportunidade de realizar este trabalho que culminará ao encerramento de um ciclo de grandes conquistas e aprendizados.

Agradeço a minha família (pai, mãe, irmãos) por toda ajuda e compreensão nesses últimos anos, em especial a minha irmã Ana Paula Candeia e minha mãe Gertrudes Candeia que sempre me impulsionaram a lutar por meus objetivos e ser uma pessoa melhor.

Agradeço as minhas avós Alaíde e Francisca por estarem sempre a minha espera, por sempre depositarem fé nos meus estudos e estarem do meu lado, agradeço também a minha prima Fernanda por sempre ser um ombro de apoio e aconchego.

Agradeço ao meu amigo Edson Alves por toda ajuda, compreensão e momentos de descobertas e aprendizados, sua amizade e companheirismo foram essenciais para que este momento fosse possível. Agradeço a Felipe, um irmão que ganhei em Caraúbas, um amigo fiel que vem me mostrando como a vida pode ser mais doce e tolerável, que me acolheu e desde então se manteve do meu lado.

Agradeço a minha amiga Josy por me ajudar a enxergar além do meu próprio mundo, por me apresentar o exercício da empatia e humildade. Agradeço ao meu amigo Pablo por toda paciência e compreensão, por me mostrar o significado de ser resiliente, de lutar pela família e recomeçar sempre que for possível e agradeço a vida por me presentear com essas três pessoas grandiosas, que amo e torço.

Agradeço ao meu orientador, por todo o suporte, sugestões e disponibilidade em ajudar na realização deste trabalho. Agradeço a banca avaliadora, pela disponibilidade de se dedicar em analisar este trabalho, contribuindo com sugestões e melhorias para a pesquisa.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo analisar os impactos da inserção de geração distribuída (GD) em um sistema de distribuição utilizando o modelo *IEEE 13-Node Distribution Test Feeder*. Para isso, foi realizado um estudo em ambiente de simulação utilizando o *software* MATLAB, especificamente o *Simulink* e a biblioteca *Simscape Electrical*. A pesquisa investigou o comportamento de relés de sobrecorrente em cenários com e sem GD, avaliando a atuação em situações de faltas trifásicas, fluxo reverso de potência e a ocorrência de proteção cega (*blind protection*). Foram realizados dois cenários de simulação: o primeiro focou na análise do perfil de tensão e atuação indevida de relés em função do fluxo bidirecional causado pela GD. O segundo cenário buscou identificar a proteção cega em relés de sobrecorrente devido à posição da GD. Os resultados indicaram que a inserção de GD melhorou o perfil de tensão da rede, mas trouxe desafios para a proteção do sistema, como aumento do nível de curto-circuito e fluxo de potência reverso. Conclui-se que a GD, embora benéfica para o sistema em termos de estabilidade de tensão, pode afetar negativamente a operação da proteção de sobrecorrente não direcional, evidenciando a necessidade de adaptações nos esquemas de proteção para lidar com o novo cenário de fluxo bidirecional.

Palavras-chave: geração distribuída; modelagem de sistemas; sistema de proteção.

ABSTRACT

This work aims to analyze the impacts of distributed generation (DG) integration in a distribution system using the IEEE 13-Node Distribution Test Feeder model. For this purpose, a simulation study was conducted using MATLAB software, specifically Simulink and the Simscape Electrical library. The research investigated the behavior of overcurrent relays in scenarios with and without DG, evaluating their performance in cases of three-phase faults, reverse power flow, and the occurrence of blind protection. Two simulation scenarios were performed: the first focused on analyzing the voltage profile and improper relay operation due to the bidirectional flow caused by DG. The second scenario aimed to identify blind protection in overcurrent relays due to the DG's location in the system. The results indicated that the integration of DG improved the network's voltage profile but posed challenges to the system's protection, such as increased short-circuit levels and reverse power flow. It was concluded that, although DG is beneficial to the system in terms of voltage stability, it can negatively affect the operation of non-directional overcurrent protection, highlighting the need for adaptations in protection schemes to address the new bidirectional flow scenario.

Keywords: distributed generation; system modeling; protection system.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxo de potência em sistemas fotovoltaicos conectados à rede.....	16
Figura 2 - Sistemas elétricos: presente e futuro.....	17
Figura 3 - Princípios da proteção “cega” (blind protection).	20
Figura 4 - Diagrama unifilar do alimentador IEEE 13 Node Test Feeder.	23
Figura 5 - Ferramentas de simulação <i>Simulink</i> e <i>Simscape</i>	26
Figura 6 - Comando para acesso ao sistema <i>IEEE 13 Node Test Feeder</i>	27
Figura 7 - Modelo implementado no <i>Simulink</i> do <i>13-Node Distribution Test Feeder</i>	27
Figura 8 - Proteção contra sobrecorrente para o <i>13-Node Distribution Test Feeder</i>	32
Figura 9 - Trecho alvo de estudo de proteção.	34
Figura 10 - Curto - Circuito trifásico em 671.....	34
Figura 11- Blocos de simulação da fonte trifásica e transformador de acoplamento	35
Figura 12 - Bloco do relé instantâneo.	37
Figura 13 - Janelas para inserção de dados do relé.....	37
Figura 14 - Bloco de simulação de faltas e janela para inserção de informações.	38
Figura 15 - Modelagem no ambiente de simulação do <i>Simulink</i> para cenário 1.....	39
Figura 16 - Presença de GD nos barramentos 611, 646 e 675.	40
Figura 17 - Evento de falta trifásica em 671.	42
Figura 18 - Falta de natureza trifásica no barramento 671 com presença de GD.....	47
Figura 19 - Modelagem no ambiente de simulação do <i>Simulink</i> para cenário 2.....	52
Figura 20 - Falta de natureza trifásica no barramento 671 para o sistema sem GD.	52
Figura 21 - Falta de natureza trifásica no barramento 671 para o sistema com GD a jusante da falta.....	54
Figura 22 - Falta de natureza trifásica no barramento 671 para o sistema com GD a montante da falta.	55

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Tensão do sistema em regime permanente via simulação.....	40
Gráfico 2 - Tensão do sistema em regime permanente após a inserção das GDs.	41
Gráfico 3 - Registro osciloscópio da corrente.....	43
Gráfico 4 – Sinal de <i>Trip</i>	44
Gráfico 5 - Potência Ativa.....	45
Gráfico 6 - Tensão em regime permanente após falta trifásica no barramento 671.	46
Gráfico 7 - Registro osciloscópio da corrente com presença de GD.....	48
Gráfico 8 - Sinal de <i>Trip</i>	49
Gráfico 9 - Potência Ativa com presença de GD.....	50
Gráfico 10 - Tensão em regime permanente após falta trifásica no barramento 671 com presença de GD.....	51
Gráfico 11- Atuação do relé R1 a montante da falta para o sistema sem GD.	53
Gráfico 12 - Sinal de <i>Trip</i> para R1 para o sistema sem GD.....	53
Gráfico 13 - Sinal de <i>Trip</i> para R1 para o sistema com GD a jusante da falta.....	54
Gráfico 14 - Não atuação do relé a montante da falta para o sistema com GD a montante da falta.....	55
Gráfico 15 - Sinal de <i>Trip</i> para R1 para o sistema com GD a montante da falta.	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Distância entre os nós dos diferentes segmentos de linha.	23
Tabela 2 - Dados dos transformadores.....	24
Tabela 3 - Dados dos capacitores.	25
Tabela 4 - Potência das cargas conectadas aos nós do sistema.	25
Tabela 5 - Perfil de tensão do sistema com dados do IEEE e valores em [pu].	28
Tabela 6 - Perfil de tensão do sistema com dados da simulação e valores em [pu].	29
Tabela 7- Correntes de curto-circuito trifásico (LLL) do sistema com dados do IEEE e valores em [A].	30
Tabela 8 - Correntes de curto-circuito trifásico (LLL) do sistema com dados da simulação e valores em [A].	31
Tabela 9 - Correntes de operação com dados da simulação e valores em [A].	33
Tabela 10 - Correntes de pickup para R1, R2 R3.	33
Tabela 11 - Correntes de curto-circuito trifásico (LLL) vistas do nó 632 em [A].	35
Tabela 12 - Parâmetros das GDs inseridas no sistema teste.....	36
Tabela 13 - Parâmetros para os transformadores de acoplamento.....	36
Tabela 14 - Tensão em regime permanente após falta trifásica, valores em [pu].	46
Tabela 15 - Tensão em regime permanente após falta trifásica, valores em [pu].	51

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ABSOLAR	Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica
ANSI	American National Standards Institute
GDFV	Geração Distribuída Fotovoltaica
GD	Geração Distribuída
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
SCEE	Sistema de Compensação de Energia Elétrica
TUSD	Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição
TR	Tensão de Referência

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVO GERAL	14
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
2	REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1	GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	15
2.1.1	Parâmetros normativos	17
2.1.2	Alterações nos níveis de curto-circuito com a instalação de GDs	19
2.1.3	Impactos da GD na Proteção de Sobrecorrente	20
3	METODOLOGIA.....	22
3.1	SISTEMA TESTE DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	22
3.2	AMBIENTE DE SIMULAÇÃO	25
3.3	MODELAGEM DO SISTEMA ELÉTRICO.....	26
3.3.1	Arquivo base utilizado	26
3.3.2	Validação do sistema.....	28
3.3.3	Sistema de proteção para o Cenário 1.....	31
3.3.4	Sistema de proteção para o Cenário 2.....	33
3.3.5	Modelagem dos blocos	35
3.3.5.1	Geradores	35
3.3.5.2	Relés.....	36
3.3.5.3	Bloco de Falta.....	37
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	39
4.1	CENÁRIO 1	39
4.1.1	Presença de GD nos barramentos 611, 646 e 675	39
4.1.2	Aplicação de falta trifásica na barra 671	42
4.1.3	Aplicação de falta trifásica na barra 671 com presença de GD	46
4.2	CENÁRIO 2	51
5	CONCLUSÃO.....	57
5.1	TRABALHOS FUTUROS.....	59
	REFERÊNCIAS.....	60

1 INTRODUÇÃO

O avanço tecnológico, o aumento da atividade industrial e o aprimoramento das condições de vida em uma determinada sociedade ocorrem simultaneamente com o crescimento no consumo de energia, impulsionado pela ampliação dos recursos energéticos disponíveis (Kruger, Zanella e Barichello, 2023)

Com a elevação da demanda de energia elétrica e a busca por diminuir a dependência de combustíveis fósseis, cresceu-se o interesse da sociedade pela diversificação da matriz energética. Destaca-se o uso de fontes renováveis, especialmente a energia solar fotovoltaica, que ganhou maior popularidade ao ser implementada por meio da Geração Distribuída (GD) (Camargos, 2022). Essa tecnologia envolve a geração em pequena escala, localizada próxima aos centros de consumo de energia e conectada ao sistema de distribuição (Reis, 2003).

De acordo com Gabr *et al.* (2021), mediante o amparo de políticas públicas de incentivo à energia fotovoltaica, a exemplo do modelo *net metering* (NM), mais de 5530 municípios brasileiros já dispõem de GD, e esse mercado já conta com 2,1 milhões de instalações, beneficiando mais de 3 milhões de consumidores no país (Agência Brasil, 2023).

Entretanto, apesar dos números expressivos, a GD enfrenta desafios para sua subsistência. Isso ocorre porque a introdução da GD na rede elétrica impõe novos requisitos técnicos, pois o sistema, projetado originalmente para uma configuração radial com fluxo unidirecional da subestação para os consumidores, não foi concebido para integrar essa tecnologia (Torquato *et al.*, 2018; Ismael *et al.*, 2019).

Com a GD, a rede passa de uma configuração passiva para uma operação mais dinâmica, com fluxo bidirecional, devido à presença de ramais que geram, armazenam e consomem energia. Além disso, as fontes de GD, especialmente as renováveis, possuem características intermitentes, o que resulta em uma produção de energia variável e não contínua, complicando o gerenciamento e a operação da rede (Silva Filho, 2023).

Ademais, a inserção da GD pode alterar as correntes de curto-circuito, necessitando de um cuidado maior no projeto de equipamentos de proteção (Silva Filho, 2023). Esses fatores demandam avanços na tecnologia de proteção e controle, bem como adaptações regulatórias para garantir a segurança e a eficiência do sistema elétrico.

No que diz respeito a direitos e deveres, em consonância com as normativas estabelecidas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), cada brasileiro possui o legítimo direito de ter acesso a serviços de energia elétrica que atendam aos mais elevados padrões de qualidade (Casa Civil, 1996). Paralelamente a esse direito fundamental, surge o crescente acesso à GD como uma opção viável para os consumidores.

Em 2012, por meio da Resolução Normativa nº 482, a ANEEL estabeleceu as condições gerais para o acesso de micro e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, permitindo que os consumidores produzissem sua própria energia e pudessem injetar o excedente na rede elétrica (ANEEL, 2016).

Apesar das regulamentações favoráveis, desafios técnicos ainda se impõem a problemática relacionada à inversão de fluxo de potência na Geração Distribuída Fotovoltaica (GDFV) que tem sido frequentemente utilizada pelas concessionárias como justificativa para a rejeição de projetos fotovoltaicos. Dados da Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR) indicam que o Brasil experimenta prejuízos superiores a R\$ 3 bilhões devido a suspensões arbitrárias de geração própria de energia solar por parte das distribuidoras (ABSOLAR, 2023).

Conforme as alegações da ABSOLAR, as decisões de interrupção e cancelamento de projetos fotovoltaicos pelos consumidores, realizadas pelas distribuidoras, baseiam-se na assertiva de possíveis inversões de fluxo de potência em sistemas (ABSOLAR, 2023). Ademais, sabe-se que a inserção da GD pode afetar o funcionamento de dispositivos de proteção, devido ao fluxo inverso, bem como alterar de forma significativa os parâmetros da rede (Ismael *et al.*, 2019; Epri, 2012).

Portanto, pode-se inferir que o debate a respeito da expansão da GD tornou-se imprescindível, o que justifica a realização dessa pesquisa, pois ao passo que se compreende as principais mudanças e impactos da inserção dessa tecnologia, almeja-se a obtenção de maiores esclarecimentos para o futuro do setor no Brasil.

Nesse contexto, esse trabalho visa investigar os impactos da inserção da GD em um sistema de distribuição de energia elétrica. Isto é, compreender o comportamento de sistemas de distribuição com GD no que diz respeito ao fluxo de potência, pontos críticos na integração da geração e consumo, alimentação de defeitos e pertinência de sistemas de proteção baseados apenas na função de sobrecorrente.

1.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo analisar o impacto da operação descentralizada de geradores distribuídos fotovoltaicos em uma rede de distribuição de energia durante eventos de falta.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar a revisão bibliográfica e a fundamentação teórica dos conceitos pertinentes à GD e sua regulamentação;
- Simular o sistema de distribuição IEEE de 13 barras no ambiente Simulink do *software* MATLAB para ser utilizado como sistema teste;
- Verificar o comportamento do sistema em situações de curto-circuito por meio de simulação, considerando a inserção de GD;
- Avaliar o desempenho de sistemas de proteção, como relés de sobrecorrente, em situações de fluxo bidirecional, e analisar a eficácia desses dispositivos frente aos novos desafios impostos pela GD.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção, é apresentado o conceito de GD sua importância no sistema elétrico. Em seguida, são discutidos os principais parâmetros normativos que regulamentam a integração da GD nas redes de distribuição. Posteriormente, são analisadas as alterações nos níveis de curto-circuito decorrentes da inserção de GDs e, por fim, os impactos dessas mudanças nos sistemas de proteção de sobrecorrente.

2.1 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Segundo Borges (2019), as infraestruturas de distribuição, seja em baixa ou alta tensão, foram concebidas para operar com base em um modelo de geração centralizada. Nesse modelo, o fluxo de potência ocorre de forma unidirecional, indo da fonte geradora em direção à carga. Entretanto, com a expansão da GD, essa estrutura de rede começa a sofrer alterações em sua filosofia operacional. O conceito de GD é relativamente novo, e ainda não há uma definição precisa e definitiva. No entanto, Sguaçabia (2015) ressalta que a GD refere-se, de maneira geral, a qualquer fonte de energia elétrica conectada diretamente à rede de distribuição ou ao consumidor final.

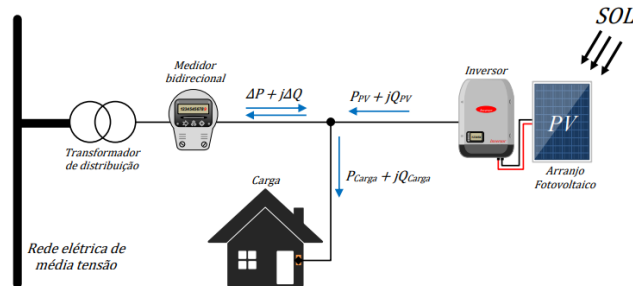
De acordo com estimativas da Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR), a capacidade de GD no Brasil deverá atingir 31 GW até 2024, representando um aumento significativo em relação aos 25,1 GW atuais (ABSOLAR, 2023c). Além disso, no Brasil, o consumidor conta com o incentivo do Sistema de Compensação de Energia Elétrica, que converte a energia injetada em créditos de energia (ANEEL, 2016).

Araújo e Silva Filho (2023) apontam que as unidades geradoras pertencentes à GD, utilizando em sua maioria recursos renováveis, podem ser classificadas como: Geradores Eólicos, Geradores a Combustíveis, Células Fotovoltaicas e Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs), com destaque para a maior expansão da Geração Distribuída Fotovoltaica (GDFV).

Os sistemas de GDFV expandiram-se rapidamente nos últimos anos, atribuídos ao fato de que a energia solar fotovoltaica é a fonte de energia limpa que recebeu maior atenção da comunidade técnica, devido à sua capacidade de adaptação e fácil instalação (Fortes, 2018). O sistema tradicional de GDFV opera com módulos fotovoltaicos que convertem corrente contínua em corrente alternada por meio de um inversor.

Esse processo gera um fluxo de potência direcionado pela diferença angular entre os vetores de tensão do inversor e da rede, permitindo a injeção de potência no sistema elétrico (Fortes, 2018). A potência resultante pode ser direcionada à carga, à rede ou a ambos, conforme a demanda e a produção de energia, como ilustrado na Figura 1.

Figura 1 - Fluxo de potência em sistemas fotovoltaicos conectados à rede.

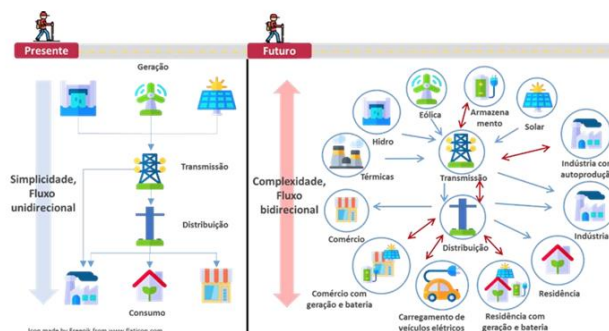


Fonte: Fortes (2018).

Na Figura 2 é representada a transformação nos sistemas elétricos, comparando o modelo tradicional, à esquerda, com o modelo futuro, à direita. No modelo tradicional, o fluxo de energia é unidirecional e linear, partindo das fontes de geração centralizadas, passando pela transmissão e distribuição até chegar ao consumidor final. Esse modelo caracteriza-se pela simplicidade e pelo controle centralizado da rede elétrica

No modelo futuro, observa-se um sistema com fluxo de energia bidirecional e uma estrutura mais complexa. A geração de energia deixa de ser exclusivamente centralizada, permitindo que consumidores, como residências, comércios e indústrias, também produzam e armazenem eletricidade. Tecnologias de geração distribuída, como painéis solares, turbinas eólicas e sistemas de armazenamento, interagem diretamente com a rede elétrica, facilitando a participação ativa dos consumidores no sistema energético (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2019).

Figura 2 - Sistemas elétricos: presente e futuro.



Fonte: EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (2019).

Além disso, novas demandas, como o carregamento de veículos elétricos e a possibilidade de armazenamento de energia em baterias domésticas, ampliam a flexibilidade e a resiliência da rede. Esse modelo de rede híbrida e descentralizada possibilita maior eficiência energética e oferece novas oportunidades para responder à demanda de energia de forma mais sustentável. No entanto, também exige um gerenciamento avançado para lidar com a complexidade e garantir a estabilidade e a confiabilidade da rede elétrica (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2019).

2.1.1 Parâmetros normativos

No Brasil, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) regulamenta a GD, permitindo que consumidores gerem sua própria energia e façam uso do Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE). Essa energia pode ser consumida no local de geração ou injetada na rede elétrica, acumulando créditos que serão compensados nas faturas de energia, conforme estabelecido pela Resolução Normativa nº 482/2012, que incentivou a expansão da GD no país (ANEEL, 2024).

A GD oferece benefícios significativos ao sistema elétrico, como a redução de perdas na transmissão e distribuição, aumento de eficiência e segurança energética, especialmente em áreas remotas dos centros de geração. Além disso, colabora para a diversificação da matriz energética com o uso de fontes renováveis (Silva; Pereira, 2024). Entretanto, a presença de GD no sistema impõe desafios técnicos e operacionais, especialmente em termos de ajustes de proteção e regulação de tensão, dado que a GD pode introduzir fluxos reversos de energia, interferindo na coordenação de relés e na confiabilidade do sistema (Rocha *et al.*, 2024).

Conforme estabelecido pela Lei nº 14.300/2022, a GD divide-se em microgeração, com potências até 75 kW, e minigeração, com potências superiores, limitadas a 3 MW, podendo chegar a 5 MW em situações específicas. Essa legislação introduz mudanças na estrutura tarifária, como a cobrança gradual da Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição (TUSD), e prevê isenções e incentivos para facilitar a instalação de sistemas de GD com fontes solares e eólicas (BRASIL, 2022).

A inserção de GD deve seguir os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), que estipulam requisitos técnicos específicos, incluindo normas de qualidade e desempenho da energia. O Anexo I da Tabela 3 do Módulo 8 do PRODIST define três categorias para tensões em regime permanente em pontos de conexão de 1 kV a 69 kV, fundamentais para a qualidade da energia elétrica:

- Tensão adequada, que deve situar-se entre 93% e 105% da tensão de referência (TR);
- Tensão precária, entre 90% e 93% da TR;
- Tensão crítica, abaixo de 90% ou acima de 105% da TR (ANEEL, 2024).

Essas categorias garantem a qualidade e estabilidade do fornecimento de energia e são essenciais para a avaliação de sistemas de distribuição com GD.

No contexto do estado do Rio Grande do Norte, a norma *DIS-NOR-067* da COSERN estabelece padrões específicos para a conexão de micro e minigeração distribuída, com requisitos técnicos voltados para a segurança e qualidade da rede elétrica. Dentre os critérios definidos, destacam-se os limites de distorção harmônica, a coordenação da proteção e o balanceamento de fases em sistemas trifásicos, alinhando-se com as normas do PRODIST para assegurar que a conexão de GD não comprometa a integridade do sistema (COSERN, 2024).

A expansão da GD no Brasil, com o suporte das regulamentações vigentes e incentivos à geração renovável, demonstra o compromisso do país com o desenvolvimento de uma matriz energética mais limpa e descentralizada. Contudo, o crescimento dessa modalidade exige atenção aos aspectos técnicos e regulatórios, para que a qualidade e a segurança do sistema sejam preservadas.

2.1.2 Alterações nos níveis de curto-circuito com a instalação de GDs

A inclusão de sistemas de GD em redes de distribuição provoca mudanças significativas nos níveis de curto-circuito, elevando as correntes de falha e apresentando desafios para a proteção do sistema. Esse aumento ocorre porque a GD não apenas supre cargas locais, mas também injeta energia durante falhas, elevando os níveis de corrente de curto-circuito. Tradicionalmente, as redes de distribuição foram projetadas para fluxos de potência unidirecionais, oriundos da subestação para as cargas. No entanto, com a presença de GD, várias fontes passam a injetar corrente de curto-circuito, o que eleva a corrente total em comparação com o cenário sem GD (Oliveira *et al.*, 2022; Nogueira *et al.*, 2019).

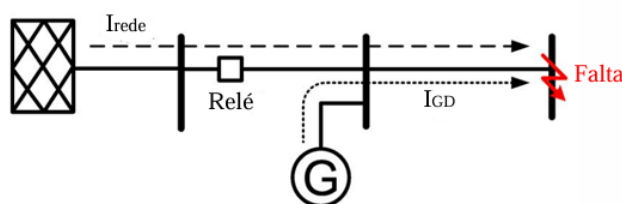
Na Figura 3, observa-se que em um alimentador com GD a ocorrência de curto-circuito em um ponto específico do sistema resulta no aumento da corrente de falta. Esse aumento deve-se à contribuição de ambas as fontes, da rede de distribuição e da GD local, fazendo com que a corrente de curto-circuito em pontos específicos exceda os valores originalmente planejados. Segundo Lopes e Cunha (2020), a presença de GD pode reduzir a corrente proveniente da rede principal, de forma que um relé situado a montante da falha pode não a detectar, pois a corrente percebida pode não atingir o valor de *pickup* necessário para sua atuação, comprometendo a segurança do sistema.

Adicionalmente, Moura e Rodrigues (2021) destacam que a contribuição de correntes de curto-circuito provenientes de sistemas de GD afeta diretamente o desempenho de relés de sobrecorrente convencionais. Estes relés, projetados para fluxos de potência unidirecionais, enfrentam dificuldades em redes bidirecionais e, em alguns casos, podem falhar ao responder adequadamente ao aumento dos níveis de corrente.

As consequências desse cenário estendem-se à coordenação e seletividade dos dispositivos de proteção, que devem ser revisados para adaptarem-se ao comportamento dinâmico da GD. Estudos mais abrangentes de curto-circuito são necessários, considerando localização, potência instalada e variação temporal da geração distribuída, conforme evidencia Borges *et al.* (2021).

A ANEEL (2024) também ressalta que redes com GD devem realizar ajustes contínuos nos parâmetros de proteção para evitar riscos de desconexão acidental, danos a equipamentos e falhas operacionais.

Figura 3 - Princípios da proteção “cega” (*blind protection*).



Fonte: Vargas (2018).

2.1.3 Impactos da GD na Proteção de Sobrecorrente

Os impactos da GD na proteção de sobrecorrente são cada vez mais relevantes à medida que as redes elétricas se tornam mais complexas. Mamede Filho e Mamede (2011) observam que as anormalidades mais comuns em sistemas de potência incluem curtos-circuitos e sobrecargas, ambos resultando em correntes elevadas que podem causar danos substanciais aos equipamentos. Além disso, eventos de sub e sobretensão, frequentemente causados por descargas atmosféricas e manobras de equipamentos, também representam risco de curtos-circuitos e outros distúrbios no sistema.

De acordo com Vargas (2018), os conflitos entre GD e os sistemas de proteção de sobrecorrente geralmente surgem devido ao aumento inesperado das correntes de curto-circuito, perda de coordenação entre os elementos de proteção, religamento ineficaz da rede após uma falta e até situações de ilhamento não intencional. Esses fatores destacam a importância da parametrização correta de dispositivos de proteção, especialmente os relés de sobrecorrente, que devem ser ajustados para garantir a integridade e a segurança do sistema.

No contexto da proteção de sobrecorrente, os relés se dividem em temporizados e instantâneos. Os relés temporizados possuem um tempo de atuação configurável, enquanto os instantâneos operam em um intervalo de tempo extremamente curto, sem atraso proposital na sequência de detecção e operação (Mamede Filho & Mamede, 2011).

A Tabela ANSI é uma referência essencial para a proteção de sistemas elétricos de potência, especificando as funções padrão atribuídas aos dispositivos de proteção e controle. Essa padronização, estabelecida pelo *American National Standards Institute* (ANSI) e também incluída nas diretrizes da norma IEEE C37.2, organiza a identificação de cada dispositivo com um número específico, facilitando a comunicação e a compreensão no setor elétrico (IEEE, 2008).

Cada número ANSI designa uma função específica de proteção ou controle, abrangendo desde o monitoramento de variáveis até a atuação direta em situações de anormalidade. Por exemplo, o Relé de Sobrecorrente Instantâneo (50) é capaz de detectar sobrecorrentes de maneira ágil, atuando imediatamente após a sua detecção, sem a introdução de qualquer atraso intencional. Esta característica é fundamental para a proteção de equipamentos em condições críticas (Mamede Filho & Mamede, 2011).

Em contraste, o Relé de Sobrecorrente Temporizado (51) opera com um atraso de tempo ajustável, permitindo uma coordenação eficiente com outros dispositivos de proteção (IEEE, 2008). Outros exemplos notáveis incluem o Relé de Subtensão (27), que dispara ao detectar uma queda de tensão abaixo de um limite previamente definido, protegendo, assim, o sistema contra condições de baixa tensão (Vargas, 2018).

O Relé de Sobretensão (59) atua em situações de sobretensão, prevenindo danos aos equipamentos causados por tensões excessivas (Mamede Filho & Mamede, 2011). Adicionalmente, o Relé de Direcionalidade de Potência (32) desempenha a função de identificar a direção do fluxo de potência, uma característica de particular relevância em sistemas com geração distribuída (GD), onde é crucial distinguir o sentido do fluxo de potência para evitar atuações inadequadas (Vargas, 2018).

A Tabela ANSI é particularmente útil para engenheiros e técnicos, pois fornece uma linguagem comum para identificar e especificar dispositivos em projetos, instalações e manutenções de sistemas de proteção. Em sistemas de potência modernos, onde há integração de GD e o fluxo de corrente pode se tornar bidirecional, a utilização da Tabela ANSI permite selecionar e coordenar dispositivos de proteção de acordo com as necessidades específicas do sistema, ajudando a garantir a confiabilidade e segurança da operação em ambientes complexos e dinâmicos (IEEE, 2008).

3 METODOLOGIA

A metodologia adotada neste trabalho segue um roteiro cobrindo todas as etapas necessárias para alcançar os objetivos propostos. Inicialmente, define-se um alimentador teste de distribuição de energia elétrica, que serve como base para as simulações e análises subsequentes. Em seguida, o ambiente de simulação é configurado, buscando representar de forma precisa as condições reais do sistema elétrico.

Na sequência, a modelagem do sistema elétrico é realizada com o auxílio de um arquivo base, e posteriormente, o sistema é validado para assegurar que o comportamento simulado corresponda fielmente à realidade. Como parte do desenvolvimento, foram projetados sistemas de proteção para dois cenários distintos: um sistema de proteção para o Cenário 1 e outro para o Cenário 2.

Por fim, a modelagem dos blocos principais do sistema abrange os geradores, os relés de proteção e o bloco de falta, que foi utilizado para a simulação de falhas. Essas etapas fornecem uma visão geral do processo metodológico, organizando de forma clara o caminho percorrido para atingir os resultados deste trabalho.

3.1 SISTEMA TESTE DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

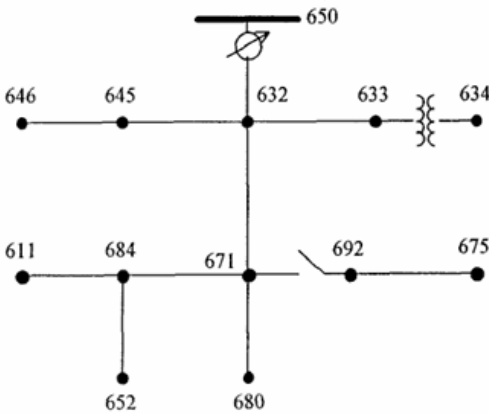
A execução de simulações computacionais exige um sólido embasamento teórico e físico para garantir resultados consistentes e coerentes. Com o avanço e a crescente demanda por estudos em sistemas elétricos de potência, atualmente existe uma variedade de modelos de referência desenvolvidos especificamente para a simulação e análise desses sistemas. Esses modelos foram elaborados ao longo dos anos com o objetivo de padronizar testes e avaliações de desempenho, além de permitir comparações justas entre diferentes métodos de proteção e controle em sistemas elétricos de potência.

Assim, objetivando realizar simulações para analisar o impacto da operação descentralizada da geração distribuída em um sistema de distribuição durante eventos de falta, para esta pesquisa optou-se por utilizar o *13-Node Distribution Test Feeder*, representado na Figura 4. Trata-se de um alimentador de distribuição de teste com 13 nós, elaborado pelo grupo de estudos *Distribution Test Feeders* do subcomitê *Distribution System Analysis da*

Power Energy Society (PES), vinculado ao *Institute of Electrical and Electronic Engineers* (IEEE).

Este modelo de circuito é compacto e usado para testar características comuns de *softwares* de análise de redes de distribuição, operando a 4,16 kV. Suas características incluem um comprimento curto, alta carga relativa, um regulador de tensão único na subestação, presença de linhas aéreas e subterrâneas, capacitores *shunt*, um transformador em linha e cargas desequilibradas (IEEE POWER & ENERGY SOCIETY, 2024).

Figura 4 - Diagrama unifilar do alimentador *IEEE 13 Node Test Feeder*.



Fonte: IEEE PES (1991).

Os comprimentos das linhas presentes no sistema teste de 13 barras do IEEE estão apresentados na Tabela 1:

Tabela 1 - Distância entre os nós dos diferentes segmentos de linha.

Nó A	Nó B	Comprimento (m)	Configuração
632	645	152,4	603
632	633	152,4	602
633	634	0	XFM-1 (trafo)
645	646	91,44	603
650	632	609,6	601
684	652	243,84	607
632	671	609,6	601
671	684	91,44	604

Nó A	Nó B	Comprimento (m)	Configuração
671	680	304,8	601
671	692	0	Switch
684	611	91,44	605
692	675	152,4	606

Fonte: IEEE PES (1991).

A subestação possui um transformador com potência de 5.000 kVA, com tensão trifásica de entrada de 115 kV e saída de 4,16 kV. Além disso, há um transformador (XFM-1) com potência de 500 kVA localizado no trecho entre os barramentos 633 e 634, responsável por reduzir a tensão para 480 V. As informações detalhadas sobre os transformadores estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Dados dos transformadores.

	kVA	kV - Primário	kV - Secundário	R(%)	X(%)
Subestação	5000	115-D	4,16-Gr.Y	1	8
XFM-1	500	4,16-Gr.W	0,48-Gr.W	1,1	2

Fonte: IEEE PES (1991).

Na Tabela 3 é apresentada a distribuição de potências ativas (kW) e reativas (kvar) em diferentes nós do sistema, divididas por fase. Ela destaca a maior concentração de carga nos nós 675, 671 e 634, sendo o nó 675 o de maior demanda total. As potências reativas estão distribuídas de forma relativamente equilibrada, embora algumas fases possuam uma carga levemente maior.

Na Tabela 4 é indicada a compensação de potência reativa em dois nós principais, 675 e 611. No nó 675, há 200 kvar instalados em cada fase (A, B e C), enquanto no nó 611 há 100 kvar na fase C. Esses capacitores ajudam a melhorar o fator de potência do sistema e a reduzir perdas. Os dados das Tabelas 3 e 4 são fundamentais para entender tanto a demanda de potência quanto a compensação reativa no sistema, permitindo uma análise mais detalhada do equilíbrio de carga e da estabilidade da rede.

Tabela 3 - Dados dos capacitores.

Nó	Fase A	Fase B	Fase C
	kvar	kvar	kvar
675	200	200	200
611	0	0	100
Total	200	200	300

Fonte: IEEE PES (1991).

Tabela 4 - Potência das cargas conectadas aos nós do sistema.

Nó	Modelo da carga	Fase A	Fase A	Fase B	Fase B	Fase C	Fase C
		kW	kvar	kW	kvar	kW	kvar
634	Y-PQ	160	110	120	90	120	90
645	Y-PQ	0	0	170	125	0	0
646	D-Z	0	0	230	132	0	0
652	Y-Z	128	86	0	0	0	0
671	D-PQ	385	220	385	220	385	220
675	Y-PQ	485	190	68	60	290	212
692	D-I	0	0	0	0	170	151
611	Y-I	0	0	0	0	170	80
	TOTAL	1158	606	973	627	1135	753

Fonte: IEEE PES (1991).

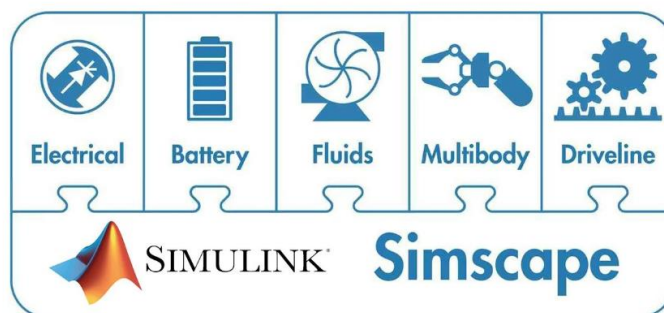
3.2 AMBIENTE DE SIMULAÇÃO

Para a realização das simulações propostas neste trabalho, foi utilizado o ambiente de simulação Simulink, juntamente com a biblioteca *Simscape Electrical*, parte integrante do software MATLAB. O Simulink é uma ferramenta poderosa que permite a modelagem, simulação e análise de sistemas dinâmicos através de uma interface gráfica baseada em diagramas de blocos. Essa abordagem facilita a visualização e a manipulação dos componentes do sistema, permitindo que engenheiros e pesquisadores desenvolvam protótipos virtuais de forma eficiente (MATHWORKS, 2024a).

O *Simscape Electrical* oferece uma ampla gama de componentes para modelar sistemas elétricos, mecatrônicos e eletrônicos. Com ele, é possível simular o comportamento de circuitos elétricos, máquinas, conversores e sistemas de potência, fornecendo uma plataforma robusta para a análise de desempenho e a otimização de soluções. Além disso, a biblioteca permite a integração de modelos mecânicos, térmicos e hidráulicos, proporcionando uma visão holística do sistema em estudo (MATHWORKS, 2024b).

Uma das simulações exemplares disponíveis para download é o *IEEE 13-node Test Feeder*, que serve como um modelo padrão para a análise de sistemas de distribuição elétrica. Esse modelo pode ser acessado através do link: <https://www.mathworks.com/help/sps/ug/ieee-13-node-test-feeder.html>. Ele fornece um ambiente de teste que possibilita aos usuários investigar diversos aspectos, como a operação de equipamentos de proteção, fluxo de potência e impactos da geração distribuída. A utilização deste e de outros modelos disponíveis na biblioteca do *Simscape Electrical* permite uma melhor compreensão das dinâmicas envolvidas em sistemas de potência e facilita a validação de hipóteses propostas ao longo da pesquisa (MATHWORKS, 2024c). Na Figura 5 é ilustrada a simbologia dos produtos citados.

Figura 5 - Ferramentas de simulação *Simulink* e *Simscape*.



Fonte: OPENCADD (2022).

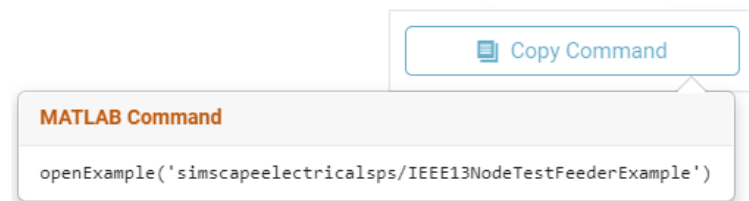
3.3 MODELAGEM DO SISTEMA ELÉTRICO

3.3.1 Arquivo base utilizado

Utilizou-se o modelo base *IEEE 13 Node Test Feeder* disponibilizado pela *MathWorks* através do *Simscape Electrical*. Esse modelo permite simulações de sistemas de

distribuição, auxiliando na análise dos impactos em sistemas de potência. A principal diferença em relação ao modelo original é a ausência do transformador regulador entre os nós 650 e 632. Os blocos principais utilizados, como *"Three-Phase Transformer"*, *"Three-Phase VI Measurement"* e *"Series RLC Load"*, foram parametrizados de acordo com os dados do IEEE, garantindo maior aderência às condições reais do sistema de referência. Para acessar o arquivo base, utiliza-se o comando da Figura 6 no MATLAB:

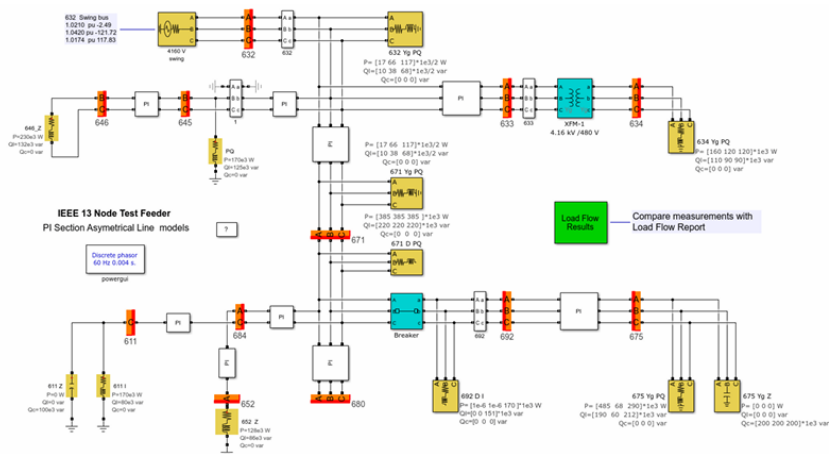
Figura 6 - Comando para acesso ao sistema *IEEE 13 Node Test Feeder*



Fonte: MATHWORKS (2024c).

Após a leitura do comando, o Simulink abre o arquivo mostrado na Figura 7. Esse arquivo servirá como base para os estudos desta pesquisa. Alterações, como o tempo de simulação, a parametrização dos blocos de geração e proteção, além da definição dos cenários para a coleta de dados, serão abordadas nos próximos tópicos.

Figura 7 - Modelo implementado no *Simulink* do *13-Node Distribution Test Feeder*.



Fonte: Autoria própria (2024).

3.3.2 Validação do sistema

Para validação do sistema, buscou-se simular cenários para comparar os resultados obtidos via simulação e contrapor aos dados consolidados na literatura, assim, para simulação obteve-se dados referentes a tensão em pu para regime permanente do sistema e também coletou-se dados para correntes de curto circuito em relação à falta de natureza trifásica.

Ressalta-se que a simulação foi realizada no modo discreto, com um tempo de parada de 0,2 s e um intervalo de amostragem (*sample time*) de 4×10^{-6} s. Essa configuração garante uma boa visualização para transitórios e análises de faltas, permitindo capturar com precisão as variações rápidas do sistema. Assim, para os valores de tensão em regime permanente em pu, os valores de referência estão mostrados na Tabela 5.

A partir da Tabela 5 verifica-se o desbalanceamento presente no sistema, visto que, segundo o Módulo 8 do PRODIST, as tensões em regime permanente não podem ultrapassar 1,05 pu (ANEEL, 2022). No sistema analisado, além de algumas tensões, como no nó 675 (1,0553 pu na fase B), excederem esse limite, o desequilíbrio entre as fases é evidente, devido à presença de cargas monofásicas, bifásicas e trifásicas distribuídas de forma desigual. Esse desbalanceamento torna o sistema pertinente para análises de impacto da GD em situações de falta.

Tabela 5 - Perfil de tensão do sistema com dados do IEEE e valores em [pu].

Nó	Fase	A	B	C
611	C	0	0	0,9738
632	ABC	1,021	1,042	1,0174
633	ABC	1,018	1,0401	1,0148
634	ABC	0,994	1,0218	0,996
645	BC	0	1,0329	1,0155
646	BC	0	1,0311	1,0134
652	A	0,9825	0	0
671	ABC	0,99	1,0529	0,9777
675	ABC	0,9835	1,0553	0,9758
680	ABC	0,99	1,0529	0,9777

Nó	Fase	A	B	C
692	ABC	0,99	1,0529	0,9777

Fonte: IEEE PES (1991).

A variedade de cargas e tensões permite simular cenários realistas, observando como a GD afeta o desbalanceamento, agrava ou mitiga as variações de tensão, e influencia o fluxo bidirecional de potência. Além disso, o sistema é adequado para estudar os efeitos da GD nos níveis de curto-circuito e na atuação dos dispositivos de proteção, como os relés de sobrecorrente, em uma rede com características assimétricas. Isso torna o sistema uma plataforma robusta para entender os impactos da GD na qualidade da energia e na operação segura do sistema elétrico.

Na Tabela 6 são apresentados os dados de tensão em regime permanente coletados via simulação, comparando esses valores simulados aos valores esperados encontrou-se erros relativos baixos, variando de 0,25% a 4,11%, configurando confiabilidade ao arquivo base do Simulink.

Tabela 6 - Perfil de tensão do sistema com dados da simulação e valores em [pu].

Nó	Fase	A	B	C
611	C	0	0	0,9337
632	ABC	1,0210	1,0420	1,0148
633	ABC	1,0180	1,0420	1,0148
634	ABC	0,9939	1,0217	0,9939
645	BC	0	1,0328	1,0154
646	BC	0	1,0311	1,0134
652	A	0,9825	0	0
671	ABC	0,9900	1,0529	0,9777
675	ABC	0,9836	1,0529	0,9777
680	ABC	0,9900	1,0529	0,9777
684	AC	0,9881	0	0,9757
692	ABC	0,9900	1,0529	0,9777

Fonte: Autoria própria (2024).

O próximo passo consistiu na análise quanto aos níveis de curto circuito trifásica linha a linha para o sistema *13-Node Distribution Test Feeder*, novamente norteando-se quanto aos valores coletados via simulação e valores consultados no relatório de curto-circuito do IEEE (Kersting, 2012), para a simulação em questão, foram feitas algumas considerações, sendo elas:

a) A fonte de tensão é balanceada em 115 kV. Como no trabalho em questão não está incluindo a subestação, realizou-se o balanceamento na fonte do barramento 632;

b) Os bancos de capacitores foram desconectados;

c) Corrente de carga é desconsiderada (desconexão das cargas);

d) Impedância de falta é igual a zero;

e) O regulador de tensão deve ser configurado com tap unitário e impedância zero.

Como essa condição já foi desconsiderada neste estudo, ela foi atendida.

Assim, na Tabela 7 são exibidos os valores de curto-circuito trifásico linha a linha contidos na referência e na Tabela 8 os valores obtidos via simulação.

Tabela 7- Correntes de curto-circuito trifásico (LLL) do sistema com dados do IEEE e valores em [A].

Nó	Fase	Falta trifásica (LLL)		
		A	B	C
611	C	0	0	0
632	ABC	4801,3	4705,2	4392,2
633	ABC	4150,2	4023,2	3802,5
634	ABC	15276	15135	14720
645	BC	0	0	0
646	BC	0	0	0
652	A	0	0	0
671	ABC	3350,4	3271,6	2964,7
675	ABC	3121,1	3088,8	2778,2
680	ABC	2909,9	2839,5	2549,7
684	AC	0	0	0
692	ABC	3350,4	3271,6	2964,7

Fonte: Kersting (2001).

Tabela 8 - Correntes de curto-circuito trifásico (LLL) do sistema com dados da simulação e valores em [A].

Nó	Fase	Falta trifásica (LLL)		
		A	B	C
611	C	0	0	0
632	ABC	7253	2016	2224
633	ABC	3641	3556	3556
634	ABC	17490	17550	17490
645	BC	0	0	0
646	BC	0	0	0
652	A	0	0	0
671	ABC	3132	3007	3004
675	ABC	3009	3007	2893
680	ABC	2855	2829	2706
684	AC	0	0	0
692	ABC	3135	3104	3002

Fonte: Autoria própria (2024).

Para validar a proximidade do modelo IEEE de 13 barras com o sistema real, realizou-se testes de curto-circuito trifásico (LLL). Observou-se que a maioria dos nós apresentou um erro médio baixo, com exceção do nó 634, onde o erro foi de aproximadamente 18%. A justificativa para essa discrepância pode estar relacionada à ausência do barramento 650 (subestação) e do regulador de tensão no modelo utilizado.

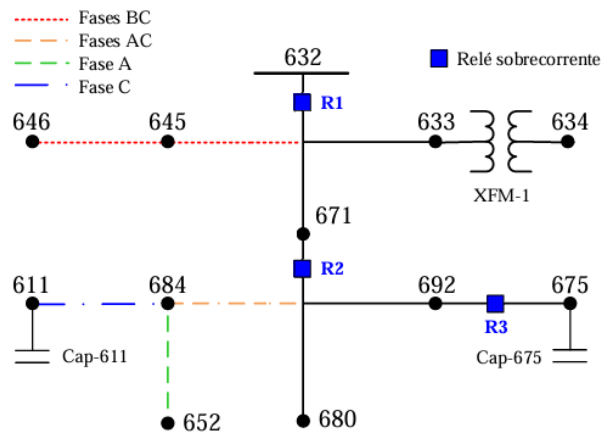
Simplificações no modelo e a sensibilidade local do nó ao fluxo de potência podem amplificar essas diferenças. No entanto, os erros observados nos demais nós são aceitáveis para simulações dessa natureza, validando a consistência geral do modelo com o sistema real, apesar da exceção no nó 634.

3.3.3 Sistema de proteção para o Cenário 1

Neste cenário, buscou-se investigar a atuação dos relés de sobrecorrente em situações de fluxo reverso. Com a inserção de GDs, o fluxo de corrente no sistema pode tornar-se

bidirecional, o que pode causar disparos não esperados de relés projetados para operar apenas com fluxo unidirecional, assim, para a pesquisa, optou-se por utilizar relés de sobrecorrente instantâneos (ANSI 50), considerando que não será necessário um estudo de coordenação mais detalhado entre os relés do sistema. A escolha por relés instantâneos ao invés de relés temporizados simplifica o processo, uma vez que não há a necessidade de coordenar os tempos de atuação entre diferentes relés e isso é possível devido à aplicação, onde a simplicidade e a rapidez de resposta são prioritárias sobre a coordenação entre múltiplas proteções. Assim, buscou-se dimensionar o sistema de proteção para os relés R1, R2 e R3 contidos na Figura 8.

Figura 8 - Proteção contra sobrecorrente para o *13-Node Distribution Test Feeder*.



Fonte: Adaptado de Vargas (2018).

As correntes de disparo (*pickup*) dos relés foram definidas como múltiplos das correntes de carga máxima, sendo esse um procedimento comum para evitar atuações incorretas durante variações normais de carga.

O valor típico de configuração variou entre 1,2 a 1,5 vezes a corrente máxima de operação, garantindo que os relés atuem apenas em situações de falha, sem influência de picos de corrente em condições normais de funcionamento (Karimkhan Zand *et al.*, 2022). Na Tabela 9 têm-se os valores nominais para cada barramento do sistema *13-Node Distribution Test Feeder*,

Tabela 9 - Correntes de operação com dados da simulação e valores em [A].

Nó	Ia	Ib	Ic
611	0	0	63,95
632	503,8	205,5	447,6
633	73.66	57.77	56.64
634	636.9	499.1	489.4
645	0	135	60.89
646	0	60.89	60.89
652	56.93	0	0
671	424.1	117,4	396,3
675	185.1	65.52	111.5
680	0	0	0
684	56.91	0	63.95
692	185.1	65.54	111.5

Fonte: Autoria própria (2024).

Na Tabela 10 são exibidos os valores para os quais R1, R2 e R3 devem atuar. Nesse cenário, vale ressaltar que o dimensionamento está configurado para o sistema sem a inserção de Geração Distribuída.

Tabela 10 - Correntes de *pickup* para R1, R2 R3.

Relés	Corrente de carga máxima [A]	Corrente de Pickup [A]
R1	503,8	750
R2	424,1	600
R3	185,2	300

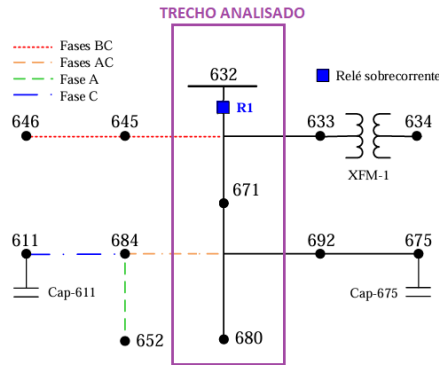
Fonte: Autoria própria (2024).

3.3.4 Sistema de proteção para o Cenário 2

No segundo cenário objetivou-se estudar o conceito de "*Blind Protection*" em um trecho do sistema, no qual o relé de sobrecorrente pode não conseguir identificar corretamente

as condições de falta devido à inserção de GDs. Assim, para esse cenário realizou-se a configuração vista na Figura 9.

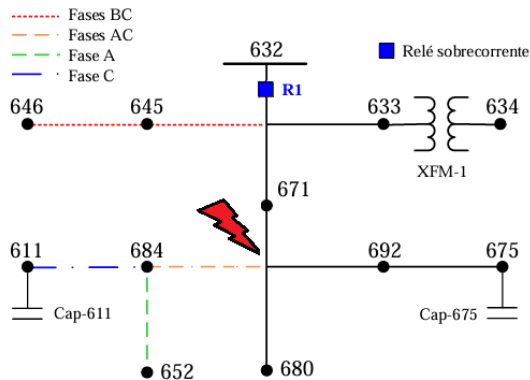
Figura 9 - Trecho alvo de estudo de proteção.



Fonte: Adaptado de Vargas (2018).

Para esse cenário, a preocupação é garantir que o relé atue com precisão durante curtos-circuitos, e, para isso, a corrente de *pickup* foi ajustada com base nos níveis de curto medidos. Isso assegura uma proteção confiável contra eventos de alta severidade. Dessa forma, na Figura 10 é ilustrado o local da falta de natureza trifásica linha a linha e a Tabela 11 contém as correntes de curto vistas do barramento 632.

Figura 10 - Curto - Circuito trifásico em 671.



Fonte: Adaptado de Vargas (2018).

A corrente de *pickup* foi ajustada em 1800 A, sendo um valor abaixo dos níveis máximos de curto-circuito medidos nas três fases (2426 A, 2331 A, e 2202 A), garantindo que o relé só atue em faltas graves e evite disparos por pequenas oscilações, como a inserção de uma GD.

Tabela 11 - Correntes de curto-circuito trifásico (LLL) vistas do nó 632 em [A].

Nó	Fase	Falta trifásica (LLL)		
		A	B	C
632	ABC	2426	2331	2202

Fonte: Autoria própria (2024).

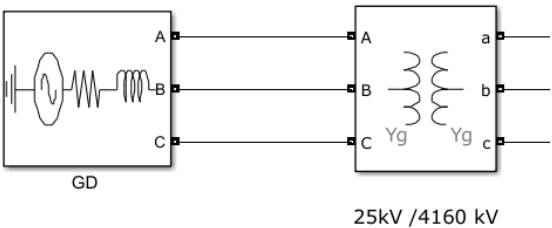
3.3.5 Modelagem dos blocos

Apesar de utilizar um sistema base que já possui cargas e linhas modelados, o intuito é compreender sobre os impactos da inserção de GD no sistema proposto, assim, os blocos de simulação vinculados a esse novo contexto devem ser modelados.

3.3.5.1 Geradores

Para a inserção dos pontos de geração no sistema teste, optou-se em utilizar o bloco *Three-Phase Source* que implementa uma fonte de tensão trifásica balanceada com uma impedância interna R-L. O bloco conecta as três fontes de tensão em Y, com uma conexão neutra que pode ser aterrada internamente ou tornada acessível. A resistência e a indutância internas da fonte podem ser especificadas diretamente, inserindo os valores de R e L, ou indiretamente, especificando o nível de curto-circuito indutivo da fonte e a relação X/R (MATHWORKS,2024c).

Figura 11- Blocos de simulação da fonte trifásica e transformador de acoplamento



MATHWORKS (2024c).

Estabeleceu-se os nós 611, 646 e 675 como os pontos de inserção da GD, como a tensão desses barramentos é de 4160 V e a potência injetada por cada GD ultrapassaria 75 kW, seguindo a orientação do PRODIST (ANEEL, 2022), utilizou-se transformadores de acoplamento e os parâmetros da fonte são padrões do Simulink (MATHWORKS, 2024c). Nas

Tabelas 12 e 13 estão inseridos os dados das fontes trifásicas e transformadores de acoplamento, ressalta-se que a potência ativa foi calculada sendo 80% sobre a média da potência requerida pela carga do ponto de conexão, logo, 80% de penetração no sistema por parte dos geradores.

Tabela 12 - Parâmetros das GDs inseridas no sistema teste.

Parâmetros	GD_611	GD_646	GD_675
Tensão de fase	14,434 kV	14,434 kV	14,434 kV
Ângulo da fase A	0°	0°	0°
Potência em cada fase	136 kW	184 kW	225 kW
Frequência	60 Hz	60 Hz	60 Hz
Resistência da fonte	0,8929 Ω	0,8929 Ω	0,8929 Ω
Indutância da fonte	16,58 mH	16,58 mH	16,58 mH
Tensão de base	25 kV	25 kV	25 kV

MATHWORKS (2024c).

Tabela 13 - Parâmetros para os transformadores de acoplamento.

Parâmetros	Transformador
Potência nominal	500 kVA
Frequência	60 Hz
Tensão primário / secundário	25kV /4,16 kV
Resistência primário / secundário	0,011 / 0
Indutância primário / secundário	0,02 /0
Resistência de magnetização	500
Indutância de magnetização	500
Conexão enrolamento primário (ABC)	Y- aterrado
Conexão enrolamento secundário (abc)	Y- aterrado

MATHWORKS (2024c).

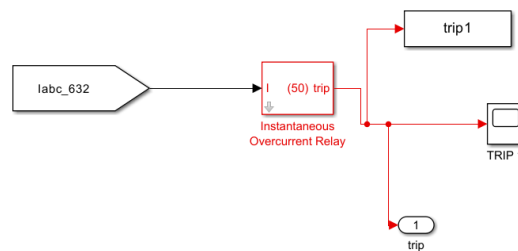
3.3.5.2 Relés

O relé instantâneo de sobrecorrente mostrado na Figura 12 é um dispositivo utilizado para operar quando a corrente excede um valor pré-determinado, seguindo o padrão ANSI/IEEE C37.2. Ele possui duas configurações principais: na aba de ajuste do relé, é

possível configurar o *Plug Setting (PS)* / *Low-set (I>)*, que permite selecionar a corrente de ajuste em relação à corrente nominal do transformador de corrente, com opções variando de 25% a 200%, proporcionando maior flexibilidade na sensibilidade do relé. Além disso, há a configuração *High-set (I >>)*, onde é possível definir um limite de sobrecorrente instantânea, sendo este ajustado no exemplo para x1 (Rodney Tan, 2024).

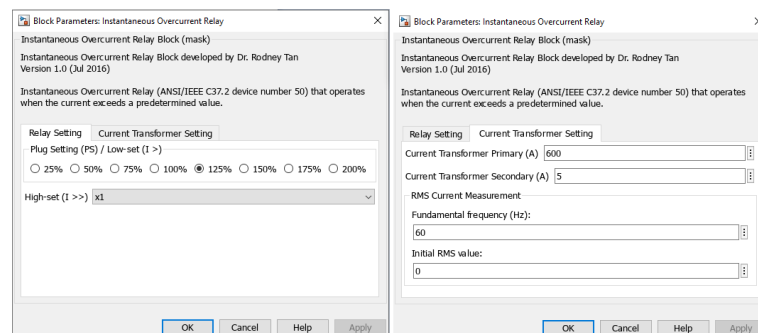
Na aba de configuração do transformador de corrente, como é mostrado na Figura 13, define-se o valor primário do transformador como 600 A e o valor secundário como 5 A, isso pode ser ajustado de acordo com a corrente nominal do barramento. O relé também realiza a medição da corrente eficaz (RMS) com uma frequência fundamental de 60 Hz (Rodney Tan, 2024).

Figura 12 - Bloco do relé instantâneo.



Fonte: Tan (2024).

Figura 13 - Janelas para inserção de dados do relé.



Fonte: Tan (2024).

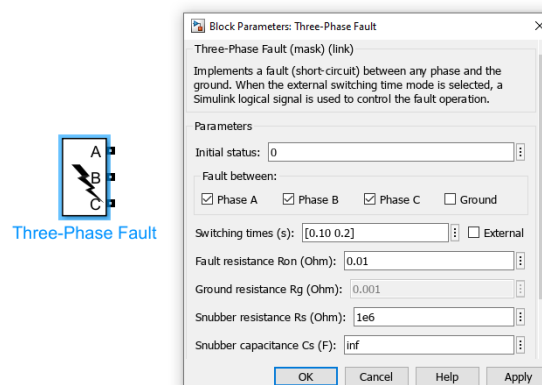
3.3.5.3 Bloco de Falta

Na Figura 14 é ilustrado o bloco *Three-Phase Fault* que implementa um disjuntor trifásico que permite controlar os tempos de abertura e fechamento de forma externa, através de um sinal do Simulink, ou de forma interna, por meio de um temporizador. Ele utiliza três

disjuntores para programar faltas entre fases, fases e terra, ou ambas. A resistência de terra é automaticamente configurada para 106 ohms, exceto quando uma falta à terra é programada.

No modo de controle externo, um sinal de 0 abre os disjuntores e qualquer valor positivo os fecha. No modo de controle interno, os tempos de comutação são definidos na caixa de diálogo do bloco. Circuitos snubber Rs-Cs são opcionais e recomendados para circuitos indutivos, abertos ou com fonte de corrente (MATHWORKS, 2024c).

Figura 14 - Bloco de simulação de faltas e janela para inserção de informações.



Fonte: Autoria própria (2024).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

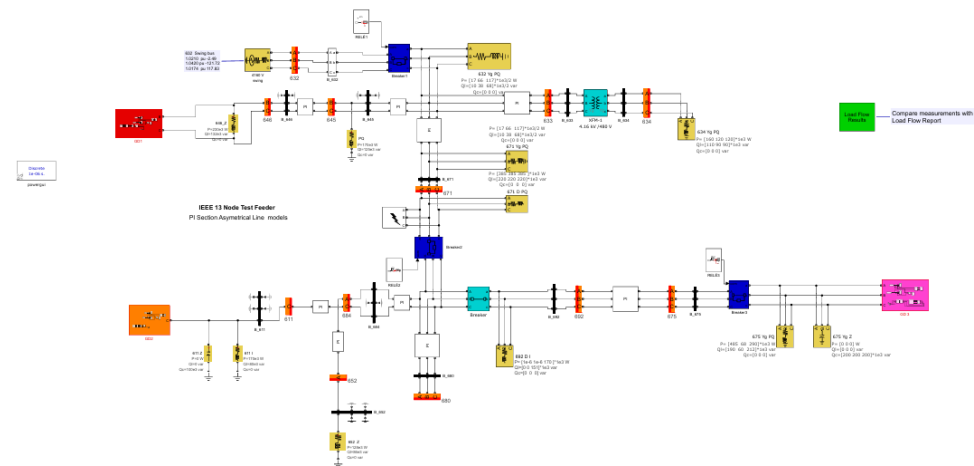
4.1 CENÁRIO 1

Nesta seção, será realizada uma análise das tensões e correntes da rede em regime permanente após a aplicação de uma falta trifásica, comparando o comportamento do sistema com e sem a presença de GD nos barramentos 611, 646 e 675. O objetivo é observar como a inserção de GD impacta a estabilidade das grandezas elétricas após a ocorrência de uma falha, identificando possíveis mudanças no desempenho da rede e nos parâmetros de operação.

4.1.1 Presença de GD nos barramentos 611, 646 e 675

Após compreensão do tema e execução dos passos necessários para dimensionamento e modelagem do sistema *13-Node Distribution Test Feeder*, na Figura 15 tem-se a ilustração do cenário teste no ambiente de simulação do Simulink. Têm-se três blocos de geração distribuídos nos barramentos 611 (bloco laranja), 646 (bloco vermelho) e 675 (bloco lilás). O intuito dessa sessão é compreender o impacto da inserção da geração distribuída no sistema.

Figura 15 - Modelagem no ambiente de simulação do *Simulink* para cenário 1.



Fonte: Autoria própria (2024).

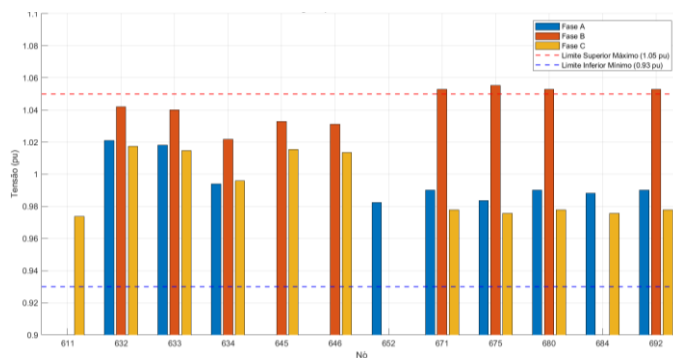
Para nortear e referenciar os impactos, inicialmente será analisado o sistema teste na ausência de geração distribuída. No Gráfico 1 é ilustrado o perfil de tensão do sistema original. Nele, observam-se as tensões em regime permanente nas fases A, B e C em diversas

barras do sistema IEEE 13 barras, comparadas com os limites de tensão estabelecidos pelo PRODIST. A linha vermelha superior indica o limite máximo de 1,05 pu, enquanto a linha azul inferior representa o limite mínimo de 0,93 pu.

Os dados obtidos demonstram um comportamento de tensão variado ao longo das diferentes barras, com algumas operando dentro dos limites adequados, enquanto outras apresentam situações de subtensão ou tensões próximas ao limite máximo permitido.

As barras que operam de forma inadequada, seja com tensões abaixo ou muito próximas dos limites estabelecidos, podem comprometer a eficiência energética e a qualidade do fornecimento, indicando que o sistema não está completamente equilibrado. No entanto, essas variações são esperadas, visto que o sistema teste apresenta características desafiadoras de operação devido à presença de diferentes tipos de cargas e variações de demanda.

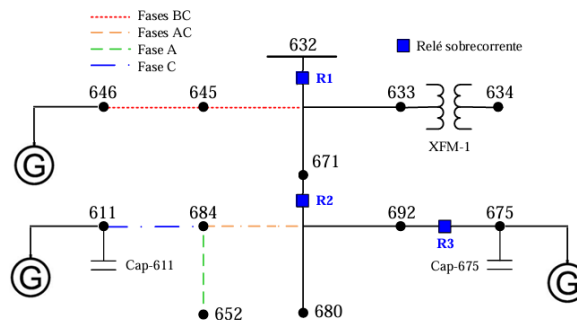
Gráfico 1 - Tensão do sistema em regime permanente via simulação.



Fonte: Autoria própria (2024).

Assim, realiza-se a inserção dos três pontos de GD no sistema teste, com nível de penetração de 80%. Na Figura 16 é ilustrado esquemático pretendido e simulado.

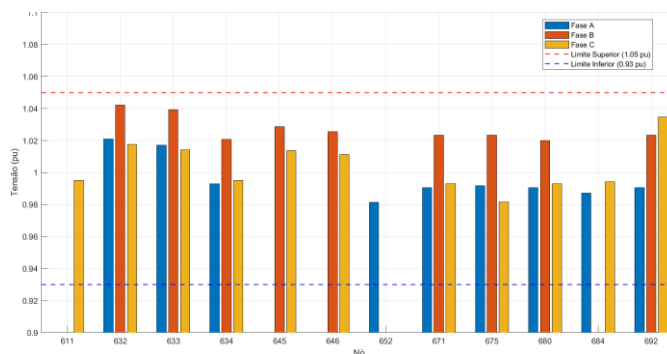
Figura 16 - Presença de GD nos barramentos 611, 646 e 675.



Fonte: Adaptado de Vargas (2018).

Após realizar simulação, coletou-se aos dados referentes a tensão em regime permanente que podem ser visualizados no Gráfico 2.

Gráfico 2 - Tensão do sistema em regime permanente após a inserção das GDs.



Fonte: Autoria própria (2024).

Ao comparar os perfis de tensão do sistema teste antes e depois da inserção das GDs nos barramentos 611, 646 e 675, com uma penetração de 80%, é possível observar mudanças significativas nas tensões das barras.

Antes da inserção das GDs, o sistema apresentava tensões variando consideravelmente, com algumas barras operando próximas aos limites estabelecidos pela norma PRODIST, como observado no Gráfico 1. Isso indicava a existência de barras com tensões inadequadas, tanto por subtensão quanto por sobrecarga, refletindo um desequilíbrio no sistema.

Após a inserção das GDs, nota-se uma melhoria no perfil de tensão nas barras. No Gráfico 2, as tensões se aproximam mais dos valores nominais, com menos incidências de tensões próximas dos limites superior e inferior. As barras nas quais foram inseridas as GDs, como a 611, 646 e 675, mostram uma tendência de estabilização das tensões, evidenciando o impacto positivo das fontes distribuídas na regulação da tensão do sistema.

Entretanto, apesar da melhoria, algumas barras ainda apresentam oscilações, como a 632 e a 692, que continuam a operar próximas ao limite superior de 1,05 pu. Isso sugere que, embora as GDs tenham contribuído para a melhoria do perfil de tensão, ainda existem desafios em manter o equilíbrio em todas as barras do sistema.

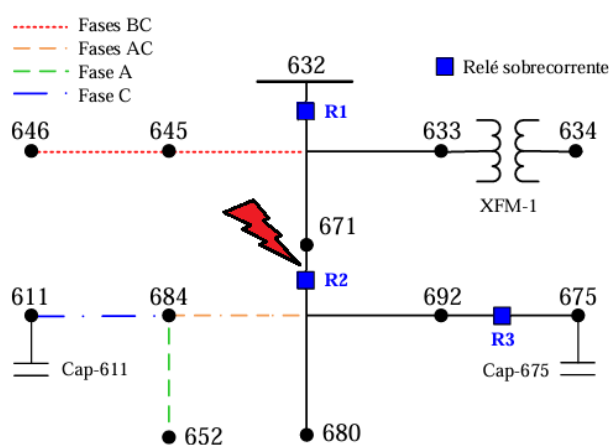
Assim, a inserção de GDs proporcionou uma melhoria significativa na estabilidade e no controle de tensão em regime permanente, tornando o fornecimento de energia mais equilibrado e estável, logo compreende-se que para o cenário em questão, a inserção de

geração distribuída trouxe benefícios significativos para o perfil de tensão do sistema IEEE 13 barras.

4.1.2 Aplicação de falta trifásica na barra 671

Norteando-se para a melhor compreensão dos impactos gerados com a presença da GD em um evento de falta, analisou-se inicialmente o contexto de falta trifásica no barramento 671 sem a presença de GDs, como está ilustrado na Figura 17.

Figura 17 - Evento de falta trifásica em 671.



Fonte: Adaptado de Vargas (2018).

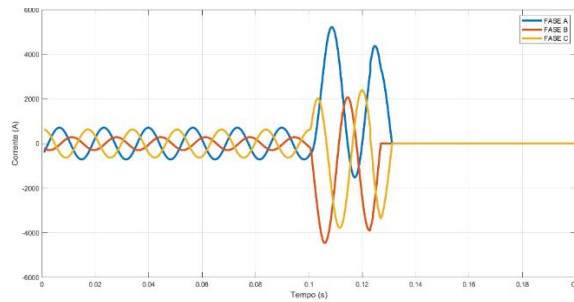
Para uma análise mais detalhada dos fenômenos, foram coletados os registros oscilográficos dos relés R1, R2 e R3, juntamente com os sinais de *Trip*, que permitem examinar os momentos de disparo e não disparo dos relés. Além disso, foram registrados os valores de potência em cada barramento, o que possibilita entender o fluxo de energia durante a ocorrência de faltas. Também foi monitorado o perfil de tensão pós-falta, fornecendo informações essenciais sobre a resposta do sistema após a interrupção. Ressalta-se que a falta foi realizada em 0,1 s dentro de um intervalo de 0,2 s e para a obtenção dos dados de potência desconsiderou-se o transitório inicial.

No Gráfico 3 são apresentados os sinais de corrente registrados pelos relés R1, R2 e R3, evidenciando um aumento abrupto da corrente no momento da falta. No Gráfico 4 é ilustrado o momento do disparo de *Trip* e o instante em que cada relé atinge sua corrente de disparo. Para o relé instantâneo utilizado na simulação, o tempo de envio do sinal de *Trip* é de 20 ms após o alcance da corrente de disparo.

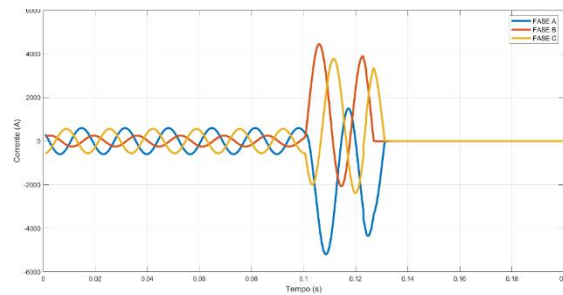
Ao analisar o Gráfico 4, observa-se que os relés R1 e R2 atuaram, enquanto o relé R3 não teve acionamento. Retornando ao Gráfico 3, nota-se que a corrente registrada pelos três relés cessa; para R1 e R2, isso ocorre devido à atuação dos relés, enquanto no caso de R3, a corrente é interrompida pela desconexão da única fonte do sistema. É importante destacar que, nessa situação, não há alimentação da falta, o que contribui para a interrupção da corrente nos relés.

Gráfico 3 - Registro osciloscópio da corrente.

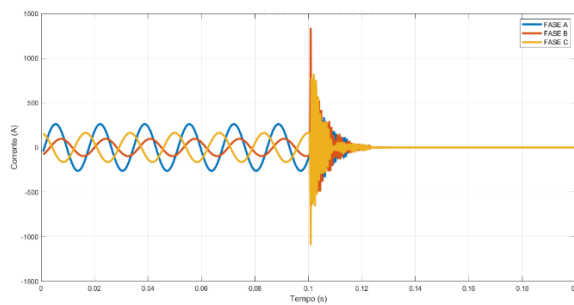
a) R1.



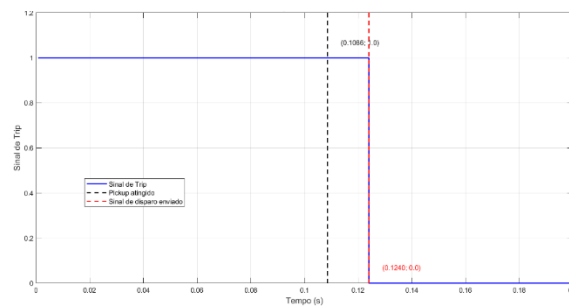
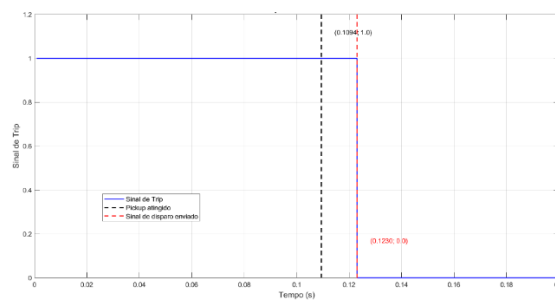
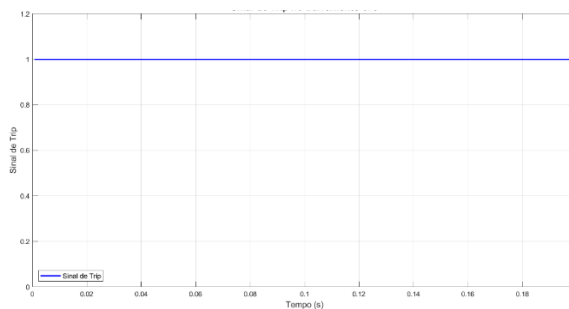
b) R2.



c) R3.



Fonte: Autoria própria (2024).

Gráfico 4 – Sinal de *Trip*.a) *Trip* R1.b) *Trip* R2.c) *Trip* R3.

Fonte: Autoria própria (2024).

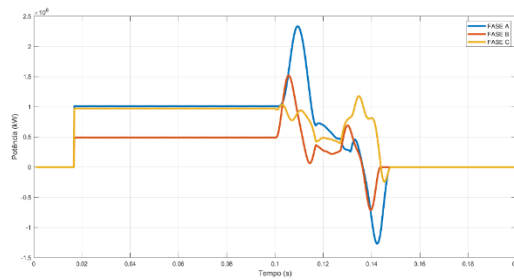
Quanto ao fluxo de potência vista por esses barramentos, no Gráfico 5 é ilustrada a potência ativa para os barramentos 632, 671 e 675. A potência ativa no barramento 632 apresenta variações logo após a ocorrência da falta, refletindo o impacto do distúrbio no sistema. No entanto, após a atuação dos relés de proteção, a energia é cessada.

O barramento 671, por ser o ponto de origem da falta, registra uma queda brusca na potência ativa no momento da falha, seguida por oscilações. Também têm-se a atuação do relé de proteção, e a falta é isolada, cessando a energia no barramento e interrompendo as oscilações de potência.

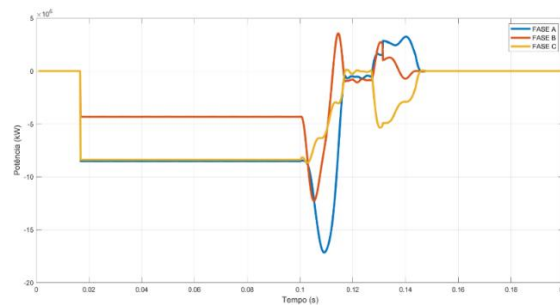
A potência ativa no barramento 675 também sofre uma queda abrupta logo após a falta, com uma interrupção da energia devido à atuação dos relés R1 e R2. A estabilização ocorre de forma semelhante aos outros barramentos.

Gráfico 5 - Potência Ativa.

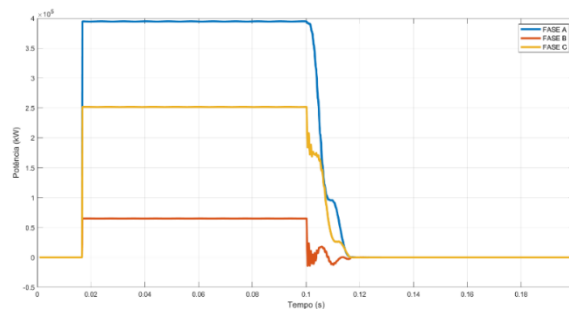
a) Barramento 632.



b) Barramento 671.



c) Barramento 675.



Fonte: Autoria própria (2024).

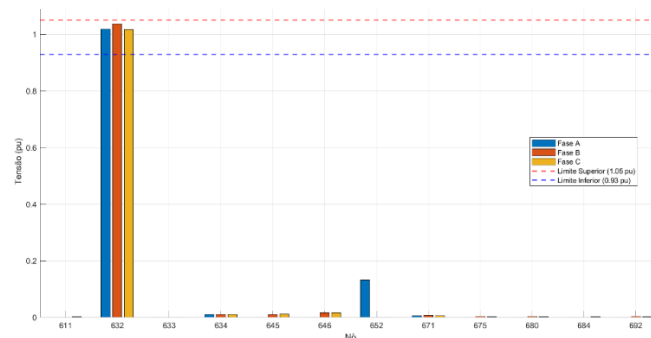
A desconexão do barramento 632, que é a fonte do sistema, impacta significativamente a tensão em toda a rede. Isso pode explicar a presença de tensões muito baixas em praticamente todo o sistema, evidenciando que esses nós estão desconectados. Os dados estão contidos na Tabela 14 e ilustrados no Gráfico 6.

Tabela 14 - Tensão em regime permanente após falta trifásica, valores em [pu].

Nó	Fase	A	B	C
611	C	0	0	$7,29 \cdot 10^{-06}$
632	ABC	1,018653	1,036898	1,016887
633	ABC	0,000953	0,000953	0,00097
634	ABC	0,010407	0,010266	0,010342
645	BC	0	0,010571	0,0107
646	BC	0	0,016105	0,016313
652	A	0,131611	0	0
671	ABC	0,006541	0,007374	0,006541
675	ABC	0,000562	0,003138	0,002002
680	ABC	0,000597	0,003171	0,001944
684	AC	0,000624	0	0,001844
692	ABC	0,000597	0,003171	0,001944

Fonte: Autoria própria (2024).

Gráfico 6 - Tensão em regime permanente após falta trifásica no barramento 671.

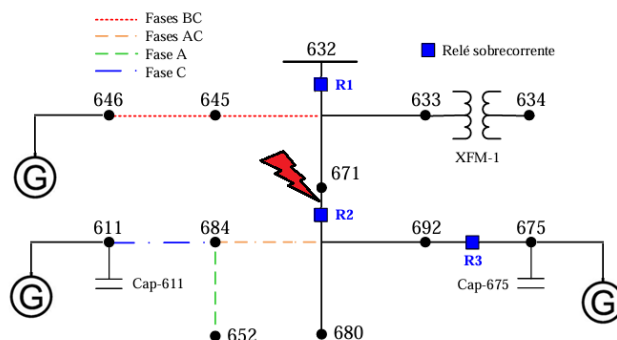


Fonte: Autoria própria (2024).

4.1.3 Aplicação de falta trifásica na barra 671 com presença de GD

Em continuação à análise, o próximo passo consistiu na inserção dos pontos de GD, objetivando-se a compreender os possíveis impactos no sistema em um evento de falta trifásica no barramento 671, bem como caracterizar os fenômenos ocorridos pós falta, assim, na Figura 18 é ilustrado o esquemático que foi simulado no Simulink.

Figura 18 - Falta de natureza trifásica no barramento 671 com presença de GD.



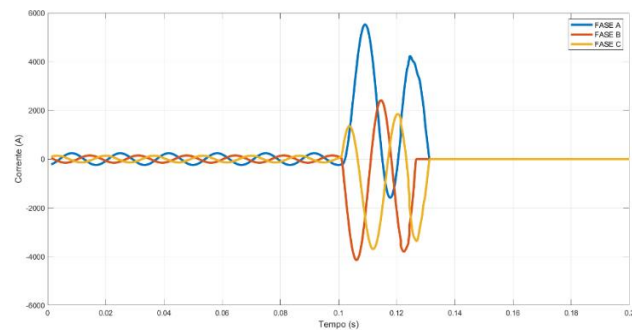
Adaptado de Vargas (2018).

No Gráfico 7 são apresentados os registros oscilográficos dos relés R1, R2 e R3, pode-se visualizar que os níveis de curto-circuito aumentaram com a presença da GD, no barramento 675 a corrente máxima variou de 1400 A na ausência de GD, para quase 7800 A na presença da geração, ressalta-se que para esse contexto, R3 atuou, o que não ocorreu na situação anterior, logo compreende-se que a GD no barramento 675 aumentou o nível de curto-circuito, atingindo mais rapidamente a corrente de *pick-up* em relação ao cenário sem GD.

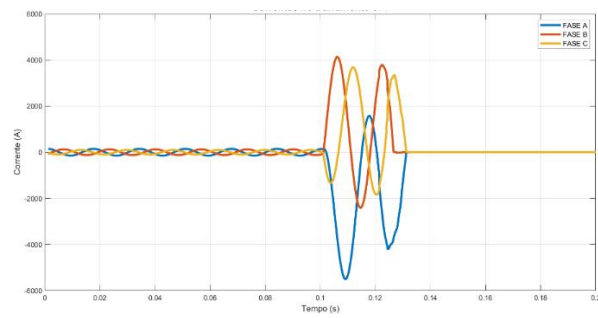
Ao verificar o Gráfico 8, quanto aos tempos de atuação dos relés, R1 e R2 foram semelhantes, com os dois atingindo a corrente de *pick-up* em 0,104 s, enquanto R3 foi 3 ms mais rápido, disparando em 0,101 s. Isso pode sugerir que, embora a coordenação entre relés não tenha sido ajustada, a presença da GD influenciou a dinâmica de resposta do sistema, acelerando a atuação do relé R3.

Gráfico 7 - Registro osciloscófico da corrente com presença de GD.

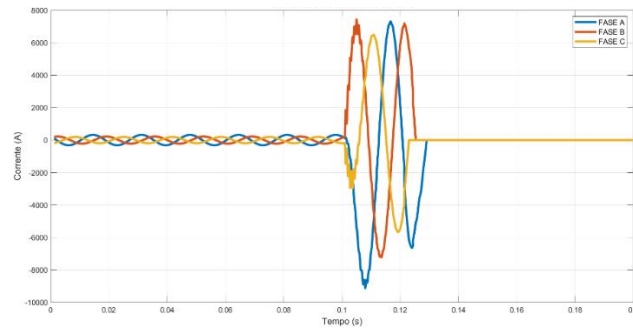
a) R1



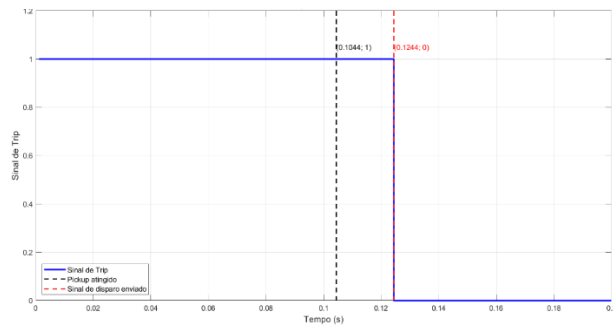
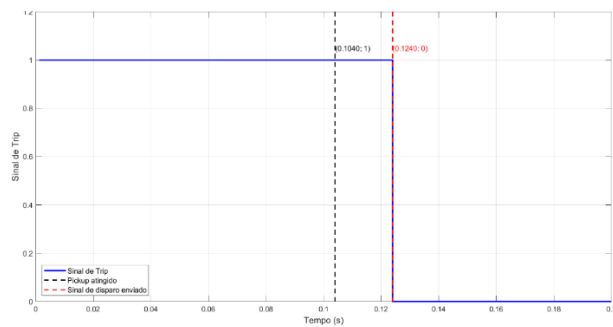
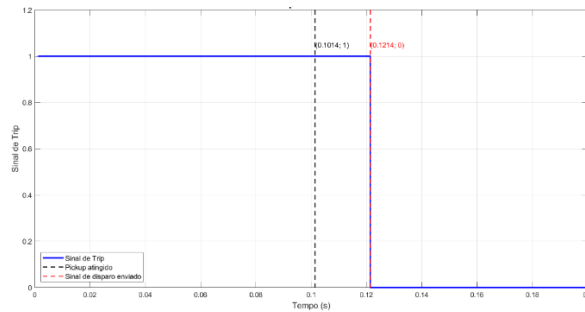
b) R2.



c) R3.



Fonte: Autoria própria (2024).

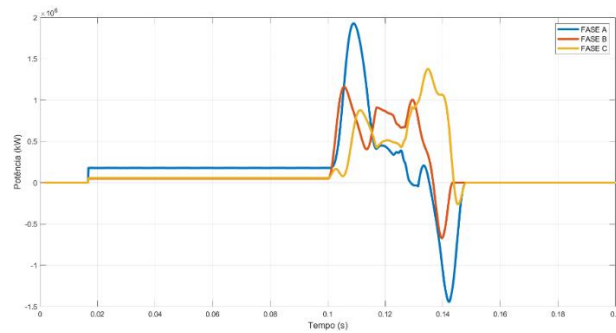
Gráfico 8 - Sinal de *Trip*.a) *Trip* R1b) *Trip* R2.c) *Trip* R3.

Fonte: Autoria própria (2024).

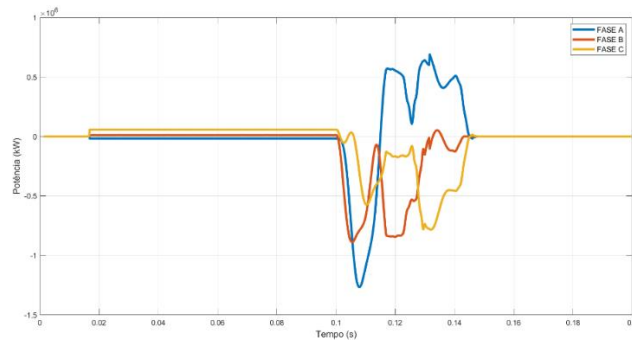
Ao avaliar o Gráfico 9, a potência ativa reversa registrada no barramento 675 confirma o comportamento esperado quando uma GD está conectada. Durante a falta, a potência gerada pela GD foi injetada de volta na rede, alterando o fluxo de potência e contribuindo para o aumento da corrente de falta. Esse fenômeno justifica o aumento significativo de 1300 A para 7800 A, mostrando que a GD teve um impacto direto no comportamento do sistema durante a falta.

Gráfico 9 - Potência Ativa com presença de GD.

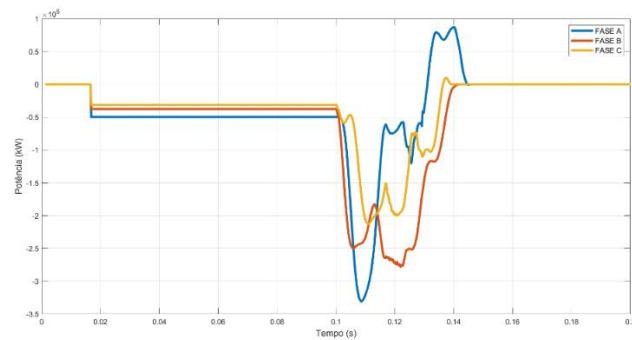
a) Barramento 632.



b) Barramento 671.



c) Barramento 675.



Fonte: Autoria própria (2024).

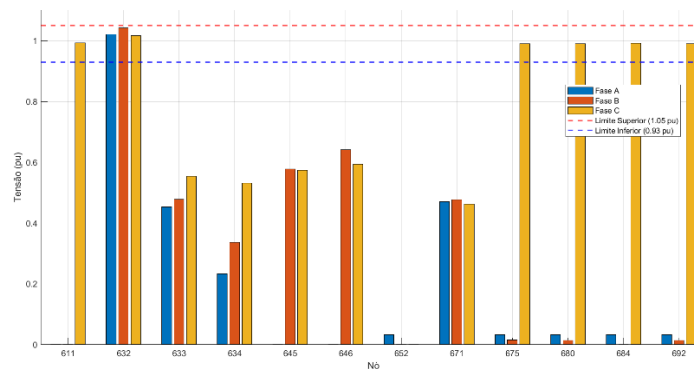
Após a atuação dos três relés, o sistema continuou sendo alimentado pelos barramentos 611 e 646. No entanto, as tensões em algumas fases ficaram abaixo do limite inferior (0,93 pu). Isso sugere que, embora o sistema tenha conseguido se sustentar com a presença das GDs, houve uma deterioração nas condições de operação em termos de qualidade de tensão, especialmente nas fases que ficaram abaixo do limite mínimo. Os dados estão contidos na Tabela 15 e ilustrados no Gráfico 10.

Tabela 15 - Tensão em regime permanente após falta trifásica, valores em [pu].

Nó	Fase	A	B	C
611	C	0	0	0,992597
632	ABC	1,020909	1,041727	1,017162
633	ABC	0,453414	0,478395	0,554589
634	ABC	0,232382	0,336376	0,53152
645	BC	0	0,577905	0,573741
646	BC	0	0,642024	0,594143
652	A	0,032884	0	0
671	ABC	0,470068	0,477562	0,46299
675	ABC	0,031893	0,015193	0,990099
680	ABC	0,0331	0,013294	0,990099
684	AC	0,03303	0	0,991348
692	ABC	0,033105	0,013719	0,990932

Fonte: Autoria própria (2024).

Gráfico 10 - Tensão em regime permanente após falta trifásica no barramento 671 com presença de GD.



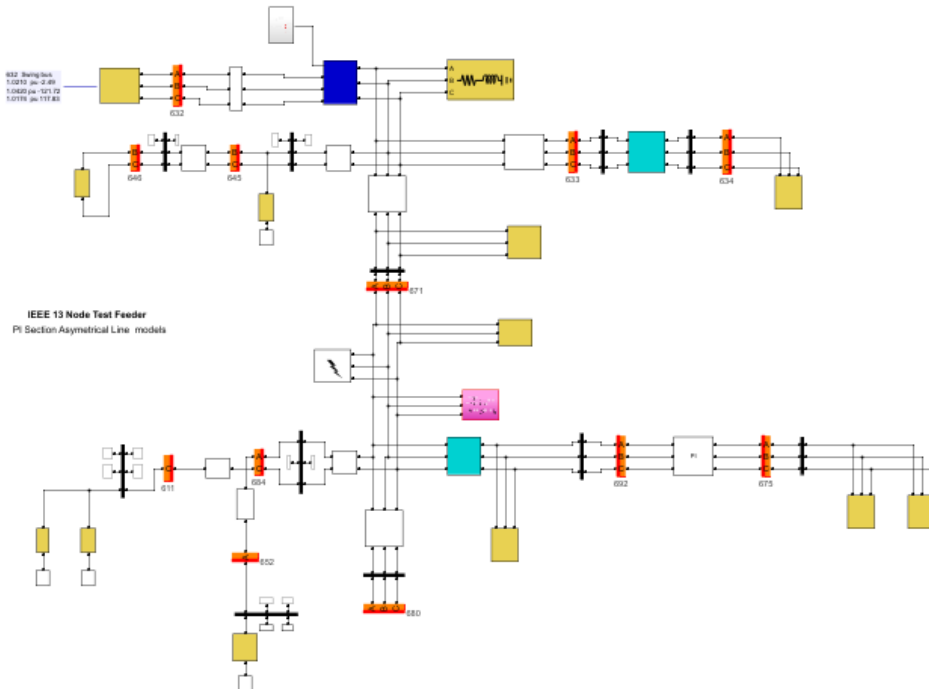
Fonte: Autoria própria (2024).

4.2 CENÁRIO 2

A análise se estenderá a entender como a variação do ponto de geração pode impactar o sistema de proteção, assim na Figura 19 têm-se a modelagem no ambiente de simulação do

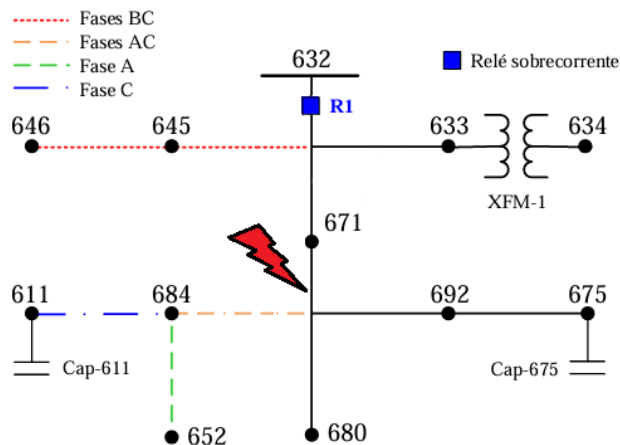
Simulink para cenário 2. O bloco em azul destacado refere-se ao relé de proteção R1 que foi parametrizado em tópicos anteriores. Na Figura 20 tem-se o esquemático da situação de falta, considerando o sistema original, isto é, sem GD.

Figura 19 - Modelagem no ambiente de simulação do *Simulink* para cenário 2.



Fonte: Autoria própria (2024).

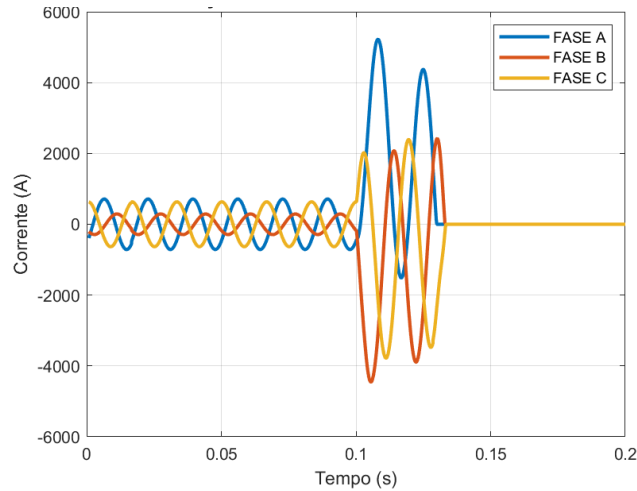
Figura 20 - Falta de natureza trifásica no barramento 671 para o sistema sem GD.



Adaptado de Vargas (2018).

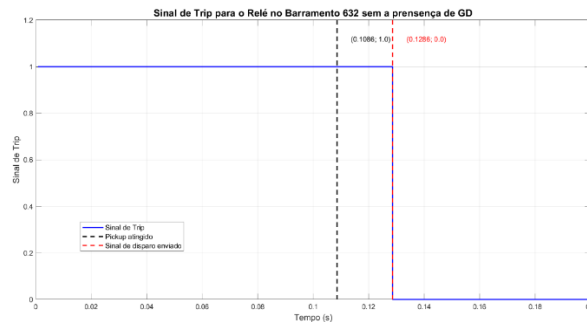
A falta seguiu as mesmas características dos testes anteriores da pesquisa, assim, para esse contexto no Gráfico 11 é ilustra a corrente vista do barramento 632 onde está o relé, e no Gráfico 12 é apresentado o sinal de *Trip*.

Gráfico 11- Atuação do relé R1 a montante da falta para o sistema sem GD.



Fonte: Autoria própria (2024).

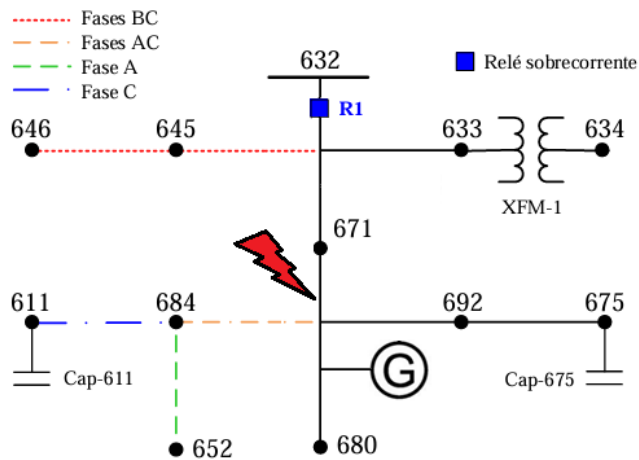
Gráfico 12 - Sinal de *Trip* para R1 para o sistema sem GD.



Fonte: Autoria própria (2024).

Observa-se a atuação do relé R1, o que está dentro do esperado. O próximo passo consistiu em inserir uma GD a jusante da falta e compreender os fatos acerca dessa situação. Na Figura 21 é ilustrado o esquemático simulado.

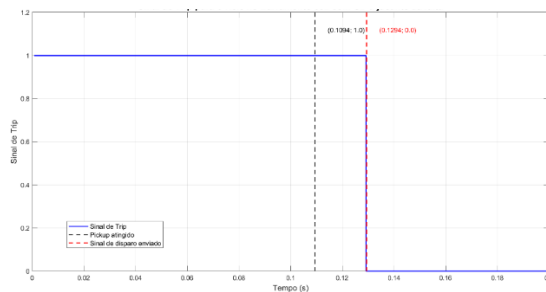
Figura 21 - Falta de natureza trifásica no barramento 671 para o sistema com GD a jusante da falta.



Fonte: Adaptado de Vargas (2018).

No Gráfico 13 é ilustrado o instante do envio do sinal de disparo do relé, concluindo-se que R1 também atuou, para esse contexto o relé levou 1 ms a mais para atuar, mas ainda atuou.

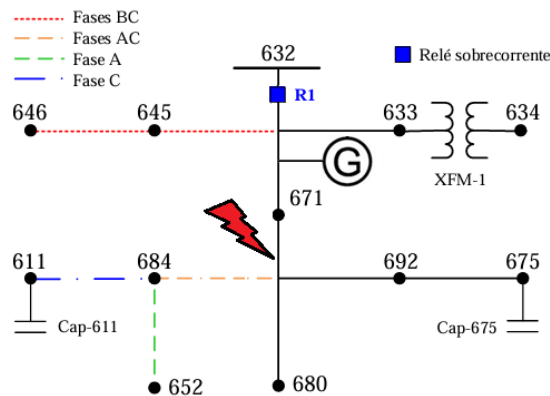
Gráfico 13 - Sinal de *Trip* para R1 para o sistema com GD a jusante da falta.



Fonte: Autoria própria (2024).

Seguindo-se com a ideia de variação do ponto de geração, na Figura 22 é ilustrado o esquemático com a GD a montante da falta, logo a GD está entre R1 e a falta a qual possui natureza trifásica.

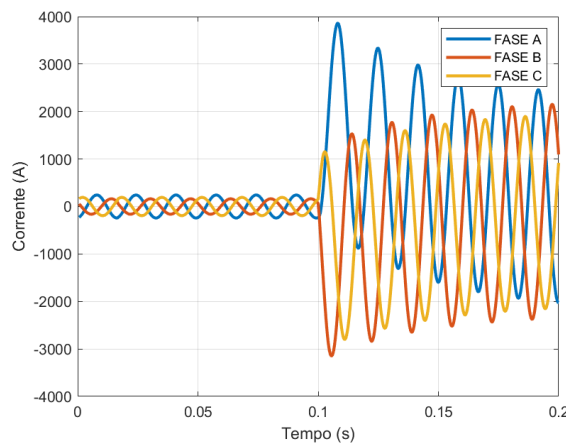
Figura 22 - Falta de natureza trifásica no barramento 671 para o sistema com GD a montante da falta.



Fonte: Adaptado de Vargas (2018).

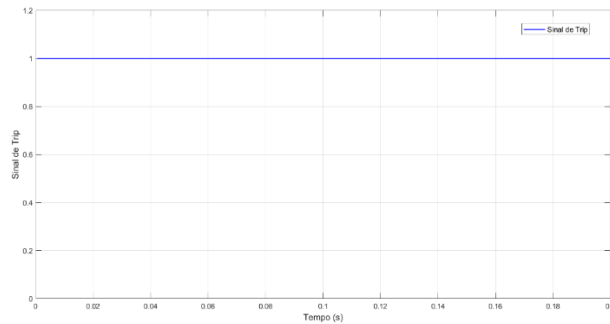
No Gráfico 14 é apresentada a corrente vista por R1, destaca-se que o nível de curto-circuito aumentou com a inserção da GD. No Gráfico 15 é apresentado o sinal de *trip* de R1, concluindo-se que R1 não atuou para esse contexto, inferindo-se que a corrente de *pickup* não foi atingida, causando o conceito de “proteção cega”.

Gráfico 14 - Não atuação do relé a montante da falta para o sistema com GD a montante da falta.



Fonte: Autoria própria (2024).

Gráfico 15 - Sinal de *Trip* para R1 para o sistema com GD a montante da falta.



Fonte: Autoria própria (2024).

A corrente monitorada pelo relé acaba sendo reduzida, uma vez que parte da corrente que seria fornecida pela rede principal agora está sendo suprida pela GD. Como os relés de sobrecorrente são ajustados para atuar quando a corrente ultrapassa um determinado valor, a redução da corrente vista pelo relé pode impedir que ele atinja esse valor, tornando-o "cego" à falta e por sua vez não atuando como deveria.

5 CONCLUSÃO

Diante de um mundo onde a transição energética se faz necessária, convivemos com a descoberta e aplicação de novas tecnologias. Compreendendo que os recursos são finitos, mas as necessidades humanas são infinitas, o uso de fontes renováveis de energia ganha cada vez mais incentivo em agendas econômicas, ambientais e de segurança energética. Nesse contexto, evidencia-se o aumento da GD, caracterizada por estar mais próxima do consumidor, diferentemente da geração centralizada.

Com a adesão a essa nova forma de geração, surgem preocupações quanto ao sistema elétrico de potência, projetado originalmente para um modelo de geração centralizada, com fluxo unidirecional de energia. A inserção da GD na rede, especialmente em situações de excedente de energia, cria um cenário de fluxo bidirecional, que demanda ajustes no sistema. Assim, a presente pesquisa buscou evidenciar os impactos da geração distribuída em um sistema de distribuição, utilizando simulações com faltas trifásicas. Dois cenários foram criados.

No primeiro cenário, investigou-se a atuação dos relés de sobrecorrente em situações de falta com fluxo reverso. Com a inserção das GDs, o fluxo de corrente no sistema tornou-se bidirecional, o que causou disparos inesperados em relés projetados para operar com fluxo unidirecional. Os resultados indicaram que, com a inserção das GDs, o sistema apresentou um perfil de tensão mais estável e próximo do recomendado pela PRODIST, evidenciando a capacidade das GDs de melhorar o perfil da rede. No entanto, em situações de falta trifásica linha a linha, constatou-se que o relé conectado ao barramento com GD atuou de forma indevida. Isso pode ser explicado pelo aumento do nível de corrente de curto-circuito, fluxo de potência inversa, característica não direcional do relé e a proximidade do ponto de falta, entre outros fatores, que ilustram os impactos tanto positivos quanto preocupantes da conexão de GDs.

No segundo cenário, o objetivo foi estudar o conceito de "*Blind Protection*" em um trecho do sistema, onde o relé de sobrecorrente pode não identificar corretamente as condições de falta devido à inserção de GDs. Os resultados mostraram que o relé atuou corretamente na ausência de GD e com a conexão de GD a jusante da falta. No entanto, quando a GD estava a montante da falta, o relé não atuou, evidenciando o conceito de

"proteção cega" e destacando o impacto da variação do ponto de geração em um sistema com proteção não direcional.

Ademais, a pesquisa proporcionou um desenvolvimento significativo em modelagem e simulação, além do aprofundamento no sistema de teste utilizado e no conhecimento sobre geração distribuída e proteção de sistemas elétricos, dado o contexto de fluxo bidirecional. Para trabalhos futuros, há ótimas oportunidades de aprofundamento em modelagem de sistemas eólicos, e no controle e modelagem de geradores a base de inversores.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

Diante das conclusões obtidas na presente pesquisa, que evidenciaram tanto os impactos positivos quanto as limitações da GD em sistemas de distribuição elétrica, surgem diversas oportunidades para trabalhos futuros. Com a transição energética em curso e a crescente adoção de fontes renováveis, a necessidade de avançar na compreensão e no gerenciamento dessas novas tecnologias é premente.

Um caminho promissor para investigações futuras reside na modelagem de sistemas eólicos, que, assim como a GD solar, representa uma forma de geração mais próxima do consumidor e, consequentemente, mais suscetível às variações na demanda e na oferta de energia. O estudo do desempenho e da integração desses sistemas no contexto de fluxos bidirecionais pode proporcionar *insights* valiosos sobre como otimizar a operação e a proteção das redes elétricas.

Além disso, o controle e a modelagem de geradores baseados em inversores são áreas que necessitam de maior atenção. A implementação de inversores de nova geração, que permitem uma melhor resposta a flutuações de carga e geração, pode mitigar os problemas de proteção observados nesta pesquisa, como a "*Blind Protection*". A investigação de estratégias de controle avançadas para esses inversores poderá contribuir para um funcionamento mais seguro e eficiente da rede elétrica.

Outra vertente de pesquisa futura pode envolver o desenvolvimento de algoritmos de proteção adaptativos que considerem as características dinâmicas da GD. A integração de tecnologias de comunicação e automação pode oferecer soluções inovadoras para os desafios de coordenação entre dispositivos de proteção, especialmente em cenários de fluxo bidirecional.

Por fim, recomenda-se a realização de estudos experimentais em ambientes reais que validem os modelos e simulações desenvolvidos, proporcionando uma base empírica sólida para as conclusões teóricas obtidas. Essas investigações não apenas ampliariam o conhecimento sobre a interação entre GD e sistemas de proteção, mas também contribuiriam para a elaboração de diretrizes e normas que apoiem a integração segura de fontes renováveis na rede elétrica.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Geração Distribuída**. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/geracao-distribuida>. Acesso em: 20 out. 2024

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Micro e Minigeração Distribuída**. Caderno Temático. 2 ed. Brasília, 2016. Disponível em: Acesso em 15 dez.2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST**, Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica. Brasília, 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012**. Estabelece as condições gerais para o acesso de micro e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica. Brasília, 2012.

ANEEL. **Regras e Procedimentos de Distribuição (Prodist)**. Publicado em: 08 fev. 2022. Atualizado em: 04 maio 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/centrais-de-conteudos/procedimentos-regulatorios/prodist>. Acesso em: 18 out. 2024.

ARAÚJO, Marcel Ayres de; SILVA FILHO, Cláudio Paz da. **Análise do Impacto da Geração Distribuída sobre um Sistema de Proteção de Sobrecorrente Aplicado ao Alimentador Teste de 13 barras do IEEE**. 2023. Disponível em: <http://lattes.cnpq.br/1775969653837163> e <http://lattes.cnpq.br/0669410110930611>. Acesso em: 14 jul. 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA - ABSOLAR. **Energia solar deve crescer 9,3 GW no Brasil em 2024, alta de 26% em 2023, prevê ABSOLAR**. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/noticia/energia-solar-deve-crescer-93-gw-no-brasil-em-2024-alta-de-26-ante-2023-preve-absolar/>. Acesso em: 13 dez. 2023c.

BORGES, A. et al. **Desafios na Proteção de Sistemas de Distribuição com Geração Distribuída**. Revista Brasileira de Sistemas de Potência, v. 10, n. 4, p. 88-102, 2021.

BORGES, C. F. **Análise da qualidade da energia elétrica em um sistema fotovoltaico conectado à rede**. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Itumbiara, 2019. Orientador: Prof. Dr. Olívio Carlos Nascimento Souto. Disponível em: https://repositorio.ifg.edu.br/bitstream/prefix/299/1/TCC_Caio%20Franco%20Borges.pdf. Acesso em: 14 dez. 2023.

BRASIL. Lei nº 14.300, de 6 de janeiro de 2022. **Institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída e o sistema de compensação de energia elétrica**. Brasília, 2022.

CAMARGOS, R.S. C (2022). **Método de avaliação dos impactos técnicos e financeiros da integração de baterias em redes de distribuição com microgeração fotovoltaica**. Tese de

Doutorado em Engenharia Elétrica, Publicação PPGEE.TD 184/22, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 112p.

CASA CIVIL. Lei nº 9.427, de 26 de dezembro de 1996. **Dispõe sobre a concessão de serviços públicos de energia elétrica e dá outras providências.** Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19427cons.htm. Acesso em: 14 dez. 2023

COMPANHIA ENERGÉTICA DO RIO GRANDE DO NORTE – COSERN. **DIS-NOR-067** – Padrões para Conexão de Geração Distribuída. Natal, 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Recursos Energéticos Distribuídos: Documento de Apoio ao PNE 2050.** Brasília, DF: Ministério de Minas e Energia, 2019.

EPRI. **Stochastic Analysis to Determine Feeder Hosting Capacity for Distributed Solar PV.** EPRI Technical Update 1026640, p. 1–50, 2012.

FALCÃO, D. M. **Impacto da mini e microgeração distribuída nas redes de distribuição de energia elétrica.** IEEE. 2013. http://www.ieee.org.br/wp-content/uploads/2014/05/EspacoIEEE_set2013.pdf. Acesso em: 13 dez. 2023.

FORTES. R.R.A. **Propagação de harmônicos produzidas por inversores fotovoltaicos e transformadores assimetricamente magnetizados na geração distribuída.** Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira-Área de conhecimento: Automação, 2018. Orientador: Luís Carlos Origa de Oliveira. Disponível em: <https://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/2654790>. Acesso em: 13 dez. 2023.

GABR, A. Z.; HELAL, A. A.; ABBASY, N. H. **The viability of battery storage for residential photovoltaic system in Egypt under different incentive policies.** International Transactions on Electrical Energy Systems, v. 31, n. 2, p. 1–18, 2021. ISSN 2050-7038.

IEEE PES, **IEEE 13 Node Test Feeder, Psace Committee**, 1991. Disponível em: <https://site.ieee.org/pes-testfeeders/resources/>. Acesso em 17 out. 2024.

IEEE POWER & ENERGY SOCIETY. **IEEE PES Test Feeder.** Disponível em: <https://cmte.ieee.org/pes-testfeeders/resources/>. Acesso em: 15 out. 2024.

IEEE. **IEEE Standard for Electrical Power System Device Function Numbers, Acronyms, and Contact Designations.** IEEE Std C37.2-2008. New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers.

ISMAEL, S. M.; ABDEL ALEEM, S. H.; ABDELAZIZ, A. Y.; ZOBAA, A. F. **State-of-the-art of hosting capacity in modern power systems with distributed generation.** *Renewable Energy*, Elsevier Ltd, v. 130, p. 1002–1020, 2019. ISSN 1879-0682. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.07.008>. Acesso em: 14 dez. 2023.

KARIMKHAN ZAND, H.; et al. **Multi-objective optimal coordination of directional overcurrent relays using hybrid genetic algorithm and fuzzy logic.** *Scientia Iranica*, v. 29,

n. 3, p. 1562-1572, 2022. Disponível em: https://scientiairanica.sharif.edu/article_21914_981b84898432d672abf2dcb0d907cc73.pdf. Acesso em: 19 out. 2024.

KERSTING, W. H.; SHIREK, G. **Short circuit analysis of IEEE test feeders**. PES T&D 2012. IEEE, 2012. p. 1–9. ISBN 978-1-4673-1935-5. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6281539/>. Acesso em: 19 out. 2024.

KERSTING, W.H. **Radial distribution test feeders**. IEEE Xplore. IEEE Conference Proceedings, 2001. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/916993>. Acesso em: 28 ago. 2024.

KRUGER, S. D.; ZANELLA, C.; BARICHELO, R. **Análise da viabilidade econômico-financeira para implantação de projeto de produção de energia solar fotovoltaica em uma propriedade rural**. *Revista de Gestão e Secretariado*, [S. l.], v. 14, n. 1, p. 428–445, 2023. DOI: 10.7769/gesec.v14i1.1521. Disponível em: <https://ojs.revistagesec.org.br/secretariado/article/view/1521>. Acesso em: 10 out. 2024.

LOPES, S.; CUNHA, M. **Proteção de Redes Elétricas com Geração Distribuída: Um Novo Paradigma**. *Journal of Distributed Energy*, v. 15, n. 2, p. 98-114, 2020.

MAMEDE FILHO, J.; MAMEDE, D. R. **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 620 p., 2011.

MATHWORKS. **IEEE 13-node test feeder**. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/sps/ug/ieee-13-node-test-feeder.html>. Acesso em: 17 out. 2024c.

MATHWORKS. **Simscape Electrical Overview**. Disponível em: <https://www.mathworks.com/products/simscape-electrical.html>. Acesso em: 16 out. 2024b.

MATHWORKS. **What is Simulink?**. Disponível em: <https://www.mathworks.com/products/simulink.html>. Acesso em: 16 out. 2024a.

MOURA, D.; RODRIGUES, C. **Avaliação de Relés de Sobrecorrente em Redes de Distribuição com Geração Distribuída**. *Revista de Proteção Elétrica*, v. 13, n. 3, p. 45-63, 2021.

NOGUEIRA, V.; SILVA, H. **Impacto da Geração Distribuída nos Níveis de Curto-Circuito**. In: Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, 2019, Florianópolis. Anais... Florianópolis: SBSE, 2019.

OLIVEIRA, F.; NASCIMENTO, L. **Avaliação dos Níveis de Curto-Circuito em Redes com Geração Distribuída**. In: Simpósio Nacional de Sistemas Elétricos, Recife, 2023.

OPENCADD. **Ferramentas de simulação Simulink e Simscape**. Conheça cada uma!. OPENCADD. 2022. Disponível em: <https://www.opencadd.com.br/blog/ferramentas-de-simulacao-simulink-e-simscape-conheca-cada-uma>. Acesso em: 17 out. 2024.

PETEAN, D. **Metodologia para avaliação da influência de geradores distribuídos nos níveis de curto-circuito em sistemas de distribuição de energia**. 2014. 145 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014. Disponível em: < <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18154/tde-05082015-105752/publico/Daniel.pdf>>. Acesso em: 15 dez. 2023.

REIS, L.B. **Geração de energia elétrica: tecnologia, inserção ambiental, planejamento, operação e análise de viabilidade**. Barueli:Manole,2003.

ROCHA, J.; ALMEIDA, M.; SANTOS, P. **Impactos Técnicos da Geração Distribuída no Sistema de Proteção Elétrica**. Revista Brasileira de Energia Renovável, v. 14, n. 2, p. 52-65, 2024.

SGUAÇABIA, R.R. **Avaliação do impacto da geração distribuída sobre o sistema de proteção de sobrecorrente de uma rede de distribuição operando em ilhamento intencional**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós – Graduação em Engenharia Elétrica e Área de Concentração em Sistemas Elétricos de Potência- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2015. Orientador José Carlos de Melo Viera Júnior. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18154/tde-25052015-114845/pt-br.php>. Acesso em: 13 dez. 2023.

SHAYANI, R. A. **Método para determinação do limite de penetração da geração distribuída fotovoltaica em redes radiais de distribuição**. 2010. 161 f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2010. Disponível em: <http://repositorio.unb.br/>. Acesso em: 14 dez. 2023.

SILVA, A.; PEREIRA, T. **Benefícios da Geração Distribuída para o Sistema Elétrico Nacional**. In: Congresso Nacional de Geração Distribuída, 2024, São Paulo. Anais [...]. São Paulo: Editora Acadêmica, 2024.

TAN, RODNEY. **Instantaneous overcurrent relay**. 2024. Disponível em: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/62282-instantaneous-overcurrent-relay>. Acesso em: 19 out. 2024.

TORQUATO, R.; SALLES, D.; PEREIRA, C. O.; MEIRA, P. C. M.; FREITAS, W. A **Comprehensive Assessment of PV Hosting Capacity on Low-Voltage Distribution Systems**. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 33, n. 2, p. 1002–1012, 2018. ISSN 08858977.

VARGAS, Murillo Cobe. **Análise dos impactos das faltas na proteção de sobrecorrente em redes de distribuição com elevada penetração de geração distribuída fotovoltaica**. 2018. 272 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico, Vitória, 2018. Orientador: Oureste Elias Batista.