

## COORDENAÇÃO DO RELÉ DE PROTEÇÃO DE SOBRECORRENTE DIRECIONAL PARA REDE DE DISTRIBUIÇÃO COM ALTA PENETRAÇÃO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Gabriel Geraldo Pereira (IC)<sup>1</sup>, Arthur de Sousa Costa (PQ)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Itajubá - Campus Itabira

**Palavras-chave:** Coordenação. Geração Distribuída. Seletividade, Relé de sobrecorrente direcional.

### Introdução

A dependência da energia elétrica nas atividades cotidianas é notável, e o crescimento exponencial da demanda de energia em áreas urbanas densamente povoadas é um fato inegável. De acordo com [1], o desenvolvimento está intrinsecamente ligado ao controle e ao acesso às fontes de energia elétrica. O sistema elétrico, basicamente, é constituído pela unidade de geração, transmissão e distribuição. A geração normalmente é distante dos grandes centros consumidores, sendo necessário o transporte dessa energia por intermédio das linhas de transmissão e distribuição, sendo assim, o elo entre a geração e o consumidor.

No Brasil o sistema elétrico é interligado e constituído por quatro grandes subsistemas, Sul, Sudeste/Centro-Oeste, Nordeste e Norte, a interligação desses subsistemas permite melhor ganhos sinérgicos e melhor aproveitamento do regime hídrico das bacias hidrográficas [2]. O sistema interligado nacional é constituído por diversas fontes, de acordo com o Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2023, que tem como base o ano de 2022 relata que a capacidade de geração elétrica instalada no Brasil teve um aumento de 4,1% de 2021 para 2022, com maior contribuição na geração hidráulica. Vale destacar que a geração solar apresentou maior crescimento, com 79,8%, seguida pela hidráulica que apresentou crescimento de 17,7%, devido ao regime hidrológico favorável observado em 2022.

As crescentes mudanças no cenário energético mundial requerem alternativas inovadoras ou que antes eram empregadas em outras circunstâncias para solucionar problemas pontuais, antes inexistentes, foram altamente aderidas ao sistema elétrico, tais como os geradores distribuídos. De acordo com [3], no último ano a Geração Distribuída (GD) teve um aumento de 90% em relação ao ano anterior, esse crescimento foi mediante a necessidade de aproveitar o subsídio estabelecido pelo governo que tinha como previsão de encerramento no mês de janeiro de 2023.

A inserção de uma considerável quantidade de GD no Sistema de distribuição resulta na transição do

sistema, que originalmente operava de forma radial, para um comportamento mais similar ao de um sistema em anel. Desta maneira, a transição deve ser analisada quanto a algumas características que podem ser afetadas, tais como a inversão do sentido do fluxo de potência e a possível perda de coordenação e seletividade no sistema de proteção. Anteriormente, o fluxo de corrente seguia uma direção unidirecional, enquanto em um sistema em anel, ele pode variar em direções opostas, o que pode impactar a coordenação e seletividade do sistema de proteção. Conforme mencionado em [4], a coordenação envolve a disposição de dois ou mais dispositivos de maneira a operarem em uma ordem predefinida, e a seletividade assegura que o dispositivo de proteção mais próximo do ponto de falha opere antes do dispositivo secundário.

Neste trabalho, tem-se o objetivo de realizar uma comparação entre a coordenação e seletividade em duas configurações diferentes do sistema teste de 13 barras do IEEE. Inicialmente, será analisado o sistema radial padrão, equipado com relés de sobrecorrente instantânea (50) e temporizada (51) nos trechos entre as barras 650-632; 632-671 e 671-675. Em seguida, será explorado a mesma configuração, porém com a inclusão de geração distribuída na barra 633 para atender à carga local com sua respectiva proteção de sobrecorrente temporizada e instantânea, mantendo os ajustes da proteção de sobrecorrente (50) e (51) dos trechos supracitados anteriormente (sistema radial padrão). Por último, avaliaremos a eficácia da função (67) direcional na proteção adicionada (a montante da barra 633) a fim de manter a preservação da coordenação e seletividade após a inserção da geração distribuída.

### Metodologia

A metodologia empregada para o desenvolvimento do trabalho foi conduzida seguindo as etapas seguintes;

1. **Revisão Bibliográfica:** Inicialmente, realizou-se uma revisão bibliográfica abrangente abordando temas relacionados à geração

distribuída, sistemas de distribuição de energia elétrica, estudos de proteção de sobrecorrente, normatização de proteção e as diretrizes para a integração de geração distribuída no Sistema Interligado Nacional (SIN).

2. **Simulação do Sistema Radial de Teste:** Nessa etapa, implementou-se o sistema de teste de 13 barras do IEEE no software ETAP em sua versão estudante. Conduziu-se estudos de fluxo de potência, análise de curto-circuito e avaliações de coordenação e seletividade da proteção de sobrecorrente temporizado (51) e instantâneo (50) [4 - 7].
3. **Simulação com Inserção de Geração Distribuída:** Introduziu uma fonte de geração distribuída na barra 633 para atender à demanda local, bem como a proteção de sobrecorrente 50 e 51 a montante do trecho -relé R6. Novamente, conduziu-se estudos de fluxo de potência, análise de curto-circuito e avaliações de coordenação e seletividade da proteção.
4. **Simulação do Sistema com Geração Distribuída e Função Direcional de Sobrecorrente:** Reconhecendo que a proteção planejada para um sistema radial pode operar de maneira inadequada em um sistema que passa a operar em anel, e ainda quando ocorre a inversão no fluxo de potência provocada pela inserção da GD de 3 MW, realizou-se os mesmos estudos da etapa anterior para verificar se a ativação da função direcional do relé responsável em proteger o trecho que está conectado a GD (R6), conseguirá manter a coordenação e seletividade do sistema.
5. **Comparação dos Casos Analisados:** Nessa fase, compara-se os resultados dos estudos de fluxo de potência, curto-circuito e proteção conduzidos nas etapas 2, 3 e 4. O objetivo é determinar se a função direcional é eficaz ou não no cenário analisado, ou seja, quando ocorre a inversão de fluxo de potência.

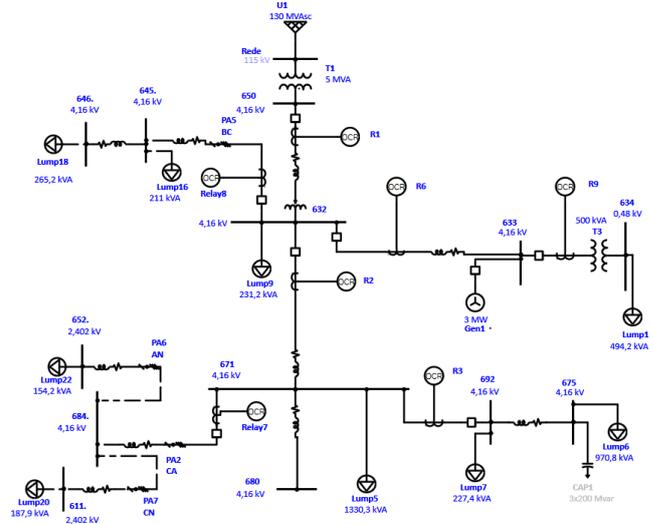


Figura 1 – Sistema de 13 barras do IEEE modelado no Software Etap 19.1

Na aba *protection and Coordination* do Software foi aplicado um curto circuito trifásico na barra 675, a Figura 2 apresenta a sequência de operação dos relés R3, R2 e R1, respectivamente, sobre o trecho adotado como radial padrão (da barra 650 em direção a barra 675).

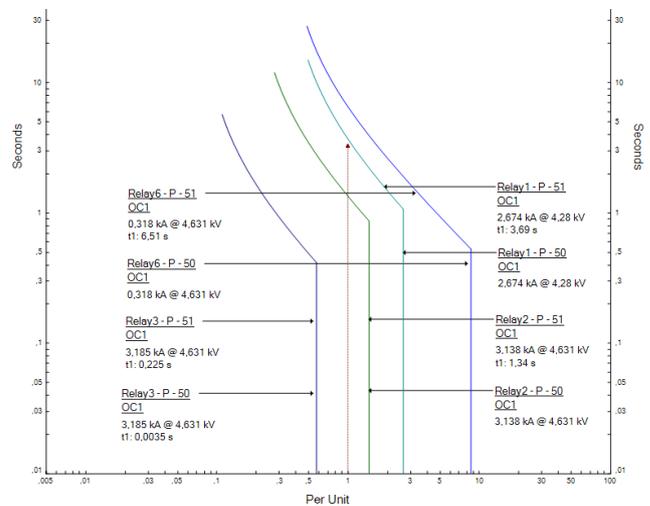


Figura 2 – Coordenograma de proteção do ramal radial padrão com curto circuito trifásico na barra 675

## Resultados e discussão

A rede de 13 barras do IEEE foi modelada no software ETAP 19.1 versão estudantil. Durante a simulação foi realizado uma análise de proteção para as funções de sobrecorrente instantâneo ANSI 50 e temporizado ANSI 51. Os locais de instalação dos relés (R1, R2 e R3) podem ser visualizados na Figura 1.

Posteriormente, um curto circuito trifásico foi induzido na barra 634, a Figura 3 mostra a efetividade da operação dos relés R9, R6 e R1, respectivamente, as quais estão associadas ao ramal secundário que compreende entre as barras 650-632, 632-633 e 633-634.

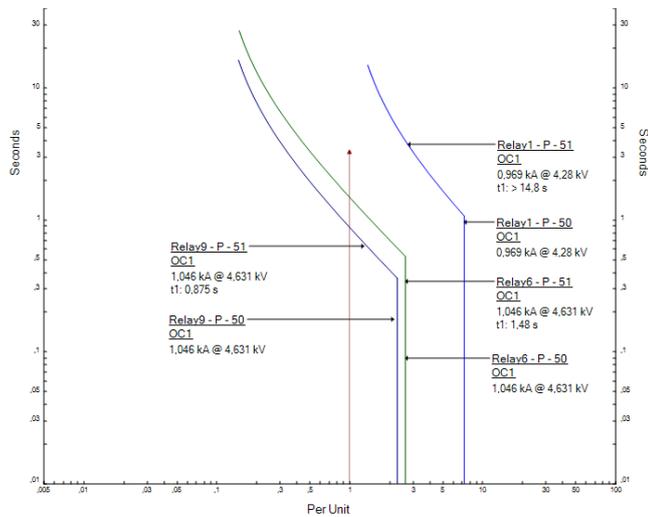


Figura 3 – Coordenograma de proteção do ramal secundário com curto circuito trifásico na barra 634

Após a integração da geração distribuída (GD) de 3 MW na barra 633, um curto-circuito trifásico foi provocado na barra 634, mantendo a coordenação entre os relés responsáveis pela proteção do segmento secundário. Subsequentemente, um curto-circuito trifásico ocorreu na barra 675 e o relé R6 foi acionado antes do relé R2, resultando na perda de coordenação e seletividade, conforme demonstra a Figura 4.

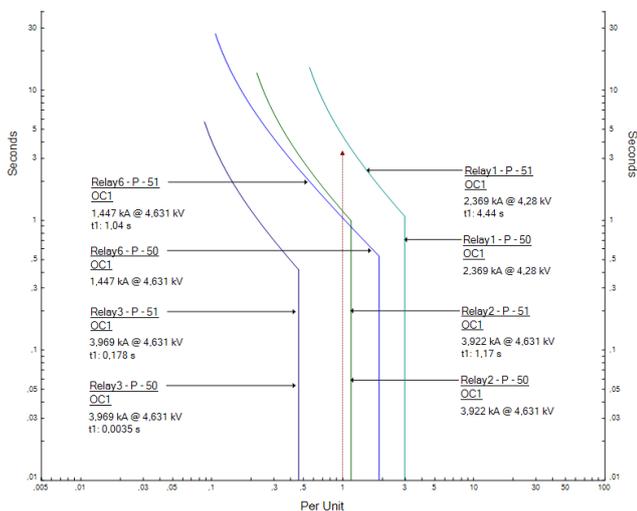


Figura 4 – Coordenograma de proteção com a GD na barra 633 e curto circuito trifásico na barra 675

Conforme evidenciado na Figura 4, após a integração da geração distribuída na barra 633, o relé R6 apresentou uma operação inadequada, atuando antes do relé R2 em resposta a uma falha na barra 675. Para manter a coordenação e a seletividade da rede, uma solução proposta foi ativar a função direcional do relé R6. Essa ação foi tomada devido à sensibilização do relé causada pela inversão do fluxo de potência, induzida pela inserção

da geração distribuída de 3 MW. Assim, a função direcional do relé R6 foi ativada e uma nova simulação de curto-circuito trifásico na barra 675 foi conduzida. O resultado dessa simulação, ilustrado na Figura 5, demonstra que o relé R6 não aparece no gráfico devido ao bloqueio de sua atuação provocado pela ativação da função direcional ANSI (67).

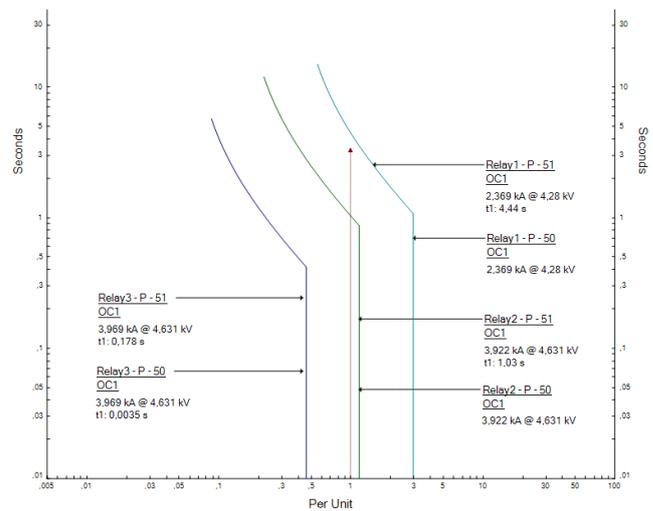


Figura 5 – Coordenograma de proteção com a habilitação da função direcional do Relé R6 com curto circuito trifásico na barra 675

## Conclusões

Este trabalho ressalta que a incorporação de uma geração distribuída (GD) em um sistema elétrico de potência tem o potencial de transformar a topologia da rede, passando de radial para uma configuração em anel. Essa mudança pode, por sua vez, afetar negativamente a coordenação e a seletividade dos dispositivos de proteção do sistema. Além disso, em cenários onde ocorre a reversão do fluxo de potência devido à presença da GD e na ocorrência de um curto-circuito em um trecho próximo ao ramal da GD, a proteção principal do trecho com GD poderá atuar antes da proteção de retaguarda do trecho onde ocorreu a falta.

Nas simulações conduzidas no sistema teste de 13 barras do IEEE, observa-se que a conexão de uma GD de 3 MW na barra 633 resulta na inversão do fluxo de potência no relé R6. Como resultado, quando ocorre um curto-circuito na barra 675, o relé R6 é acionado antes do relé R2, levando a uma situação de perda de coordenação e seletividade. No entanto, após a configuração da função direcional de sobrecorrente no relé R6, o sistema de proteção recupera sua capacidade de operar de forma coordenada e seletiva.

## Agradecimentos

Primeiramente agradeço a Deus pela realização desse trabalho, bem como a Universidade Federal de Itajubá e ao CNPq, que por meio do programa PIBIC disponibilizou a bolsa que tornou possível todo o desenvolvimento.

### Referências

[1] PATRÍCIO, Fernando Nunes. NOSSA DEPENDÊNCIA DA ENERGIA ELÉTRICA E DOS EQUIPAMENTOS ELETROELETRONICOS – SEUS BENEFÍCIOS E SEUS PERIGOS. Curitiba, 31 mar. 2020. Disponível em: <http://www.senge-pr.org.br/wp-content/uploads/2020/03/INTEGRA-A-energia-el%C3%A9trica-benef%C3%ADcios-e-riscos.pdf>. Acesso em: 23 maio 2023.

[2] ONS, “O SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL. disponível em: <https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-que-e-o-sin> - acesso em 23 mai. 2023.”

[3] EPBR. Solar atinge 23,9 GW e sobe para 2º lugar em potência no Brasil [online]. Disponível em: <https://epbr.com.br/solar-atinge-239-gw-e-sobe-para-2o-lugar-em-potencia-no-brasil/#:~:text=Destaque%20para%20a%20gera%C3%A7%C3%A3o%20distribu%C3%ADda,para%20encerra%20agora%20em%20janeiro>. Acesso em: [23/05/2023]

[4] CARDOSO JÚNIOR, G. Proteção de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica: notas de aula. Universidade Federal de Santa Maria. 2009. 32f

[5] VARGAS, Murillo Cobe. Análise dos Impactos das Faltas na Proteção Sobrecorrente em Redes de Distribuição com Elevada Penetração de Geração Distribuída Fotovoltaica. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica: Universidade Federal do Espírito Santo - Centro Tecnológico - Departamento de Engenharia Elétrica, Vitória - ES, 2018.

[6] ETAPSoftwarePortugues. [Canal do YouTube]. Disponível em: <https://www.youtube.com/@ETAPSoftwarePortugues>. Acesso em: [28/05/2023].

[7] GARCIA, Jair; FILHO, Garcia. Análise de Curto-Circuito em Sistemas Desequilibrados de Distribuição com Geração Distribuída: Dissertação de bacharelado em Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Rio Grande do Sul: Escola de Engenharia - Departamento de Engenharia Elétrica, Porto Alegre - RS, 2016.

[8] IEEE. IEEE 13 Node Test Feeder. Disponível em: <https://cmte.ieee.org/pes-testfeeders/comprehensive-test-feeder>. 1992. Acesso em: 12 fev. 22.

[9] Mamede Filho, J. Proteção de Sistemas Elétricos de Potência. Editora LTC - 2011