

Coordenação e seletividade da proteção por sobrecorrente em redes radiais urbanas; análise do impacto da geração distribuída na atuação de relés instantâneos e temporizados

Coordination and selectivity of overcurrent protection in urban radial networks; analysis of the impact of distributed generation on the operation of instantaneous and time-delay relays

Edilson Quinones Mendez
George Cesar Azevedo Matias
Elson Borges da Silva Filho (Orientador)

RESUMO

A coordenação de proteções por sobrecorrente em redes de distribuição de energia elétrica é essencial para garantir a seletividade, a confiabilidade e a continuidade do fornecimento de energia. Este trabalho teve como objetivo analisar a coordenação de proteções por sobrecorrente em uma rede radial urbana modelo de 13,8 kV, verificando as condições de seletividade entre os dispositivos de proteção e os efeitos da inserção de geração distribuída sobre as correntes de curto-circuito e os tempos de atuação dos relés. Foram realizados estudos de curto-circuito, ajustes de relés instantâneos e temporizados e elaboração de coordenogramas, comparando um cenário base, sem geração distribuída, e um cenário ilustrativo com a inserção de uma fonte de geração distribuída na rede-modelo. Os resultados mostraram que, no cenário base, as correntes de curto-circuito e os tempos de atuação dos relés atendem aos critérios usuais de seletividade. No cenário com geração distribuída, observou-se aumento das correntes de curto-circuito em trechos próximos ao ponto de conexão da fonte, provocando alterações nos tempos de atuação dos relés e exigindo reavaliação da coordenação entre os dispositivos. Conclui-se que a inserção de geração distribuída pode modificar significativamente o desempenho da proteção por sobrecorrente em redes radiais, reforçando a necessidade de revisar os ajustes de proteção sempre que houver mudanças relevantes na configuração do sistema.

Palavras-chave: Coordenação de proteções. Sobrecorrente. Redes de distribuição. Geração distribuída. Seletividade.

ABSTRACT

Overcurrent protection coordination in electric power distribution networks is essential to ensure selectivity, reliability, and continuity of supply. This study aimed to analyze overcurrent protection coordination in a model 13.8 kV urban radial distribution network, verifying the selectivity conditions among protection devices and the effects of distributed generation (DG) insertion on short-circuit currents and relay operating times. Short-circuit studies, instantaneous and time-overcurrent relay settings, and time-current coordination diagrams were carried out, comparing a base scenario without distributed generation and an illustrative scenario with a DG source connected to the model network. The results showed that, in the base scenario, short-circuit currents and relay operating times meet the usual selectivity criteria. In the scenario with distributed generation, an increase in short-circuit currents was observed in sections close to the DG connection point, causing changes in relay operating times and requiring reassessment of coordination among devices. It is concluded that the insertion of distributed generation can significantly modify the performance of overcurrent protection in radial networks, reinforcing the need to revise protection settings whenever relevant changes occur in the system configuration.

Keywords: Protection coordination. Overcurrent. Distribution networks. Distributed generation. Selectivity.

1 INTRODUÇÃO

A coordenação de proteções por sobrecorrente em redes de distribuição radiais urbanas constitui um tema relevante para a confiabilidade do fornecimento de energia elétrica. Em sistemas de média tensão, como os de 13,8 kV, os dispositivos de proteção devem atuar de forma seletiva, isolando apenas o trecho afetado pela falta e evitando desligamentos desnecessários em áreas não atingidas. Nesse contexto, a presença de geração distribuída e a variação das condições operacionais do sistema podem influenciar diretamente o comportamento das

correntes de curto-circuito e, conseqüentemente, a atuação dos relés instantâneos e temporizados. Isso torna essencial o estudo da coordenação entre os dispositivos de proteção, a fim de garantir maior segurança operacional e continuidade do serviço.

Diante disso, este trabalho analisou a coordenação e a seletividade das proteções por sobrecorrente em uma rede radial urbana modelo de 13,8 kV, por meio de simulações numéricas de curto-circuito e da avaliação de curvas tempo-corrente. Foram considerados cinco pontos de falta ao longo de um alimentador radial hipotético, bem como um cenário base e um cenário ilustrativo com geração distribuída fotovoltaica. A análise permitiu verificar as correntes de falta, os tempos de atuação dos relés e as condições de seletividade entre os dispositivos, cujos resultados são apresentados nas seções posteriores.

1.1 O PROBLEMA

A questão central deste trabalho consiste em verificar como a inserção de geração distribuída influencia a coordenação e a seletividade das proteções por sobrecorrente em uma rede radial urbana modelo de 13,8 kV.

Assim, o problema de pesquisa foi formulado da seguinte maneira: de que maneira a inserção de geração distribuída pode alterar as correntes de curto-circuito, os tempos de atuação dos relés e as condições de coordenação e seletividade da proteção por sobrecorrente em uma rede radial urbana de distribuição de energia elétrica?

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral ou primário

Analisar a coordenação de proteções por sobrecorrente em uma rede radial urbana **modelo** de distribuição de energia elétrica de 13,8 kV, verificando as condições de seletividade entre os dispositivos de proteção, os tempos de atuação dos relés e os efeitos da inserção de geração distribuída sobre o sistema.

2.2 Objetivos específicos ou secundários

Caracterizar a rede radial urbana modelo considerada no estudo.

Avaliar o comportamento dos dispositivos de proteção em diferentes cenários de curto-circuito.

Verificar a seletividade entre relés instantâneos e temporizados por meio dos tempos de atuação calculados.

Elaborar coordenogramas para representar a coordenação entre corrente e tempo de atuação dos dispositivos de proteção.

Comparar as correntes de curto-circuito e os tempos de atuação dos relés no cenário base e no cenário com geração distribuída.

Identificar ajustes de proteção que contribuam para a confiabilidade e a continuidade do fornecimento de energia elétrica.

3 JUSTIFICATIVA

A coordenação de proteções por sobrecorrente em redes radiais urbanas de distribuição de energia elétrica é um tema de grande importância técnica, pois está diretamente relacionada à confiabilidade do sistema, à seletividade das atuações e à continuidade do fornecimento de energia. Em redes de média tensão, especialmente em sistemas de 13,8 kV, a correta atuação dos dispositivos de proteção é essencial para evitar desligamentos indevidos e reduzir o impacto de falhas sobre consumidores residenciais, comerciais e industriais. Por isso, o estudo desse tema se mostra relevante tanto do ponto de vista acadêmico quanto do ponto de vista operacional.

A relevância desta pesquisa está no fato de que as condições de operação das redes elétricas têm se tornado mais complexas, principalmente com a inserção de geração distribuída e com o aumento da demanda por energia nas áreas urbanas. Essas mudanças podem alterar os níveis de corrente de falta e comprometer a coordenação tradicional das proteções, tornando necessária uma análise mais detalhada dos ajustes dos relés instantâneos e temporizados. Dessa forma, investigar esse assunto permite compreender melhor os desafios atuais da proteção em sistemas de distribuição e identificar formas mais adequadas de atuação dos dispositivos. A literatura técnica aponta que a geração distribuída pode modificar a magnitude, a duração e até a direção das correntes de falta, afetando a sensibilidade e a seletividade da proteção.

Além disso, este trabalho contribui para a sociedade ao propor uma análise voltada à melhoria da confiabilidade do sistema elétrico, favorecendo a redução de

interrupções e a manutenção do serviço com maior qualidade. Para a comunidade acadêmica, a pesquisa oferece uma aplicação prática dos conceitos de proteção por sobrecorrente, seletividade, curto-circuito e coordenação de relés em uma rede radial urbana modelo de 13,8 kV, com parâmetros hipotéticos representativos. A comparação entre o cenário base e o cenário ilustrativo com geração distribuída reforça a necessidade de reavaliar os ajustes de proteção sempre que houver mudanças relevantes na configuração do sistema. Assim, o tema se justifica por sua atualidade, utilidade prática e contribuição científica.

4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1 Sistemas de distribuição de energia elétrica

Os sistemas de distribuição de energia elétrica têm como função levar a energia desde as subestações de distribuição até os consumidores finais, em níveis de tensão adequados ao uso residencial, comercial e industrial. No Brasil, é comum a utilização de redes de média tensão em 13,8 kV, organizadas predominantemente em configuração radial, na qual a energia flui em um único sentido, da subestação para as cargas. Essa topologia simplifica a proteção e a operação, mas impõe requisitos rigorosos de coordenação dos dispositivos de proteção, pois qualquer falta pode afetar todos os consumidores alimentados a partir do ponto de defeito. (STEVENSON, 1986)

4.2 Faltas em sistemas elétricos de potência

Faltas em sistemas elétricos correspondem a condições anormais de operação caracterizadas por correntes elevadas e tensões reduzidas em relação aos valores nominais. Em redes de distribuição, as faltas mais frequentes são os curtos-circuitos, que podem ser trifásicos, bifásicos, bifásico-terra ou monofásico-terra. O dimensionamento e a coordenação da proteção dependem diretamente da correta estimativa das correntes de curto-circuito, pois essas correntes definem os ajustes dos relés e a seletividade entre os dispositivos. (IEC, 2016)

4.3 Proteção de sistemas de distribuição

A proteção de sistemas de distribuição tem como principal finalidade detectar e isolar rapidamente as faltas, minimizando os danos aos equipamentos e reduzindo

o número de consumidores afetados. Para isso, são utilizados dispositivos como chaves fusíveis, religadores, disjuntores e relés de sobrecorrente, que devem operar de forma coordenada, garantindo que apenas o dispositivo mais próximo da falta atue, preservando o restante da rede. Essa característica é denominada seletividade e é essencial para a confiabilidade do sistema. (KINDERMANN, 2010)

4.4 Relés de sobrecorrente

Os relés de sobrecorrente são dispositivos de proteção que atuam quando a corrente ultrapassa um valor predeterminado, denominado pickup. Eles podem ser classificados em instantâneos (função ANSI 50) e temporizados (função ANSI 51). Os relés instantâneos atuam sem atraso intencional para correntes elevadas, enquanto os relés temporizados apresentam curvas de atuação em que o tempo de disparo varia em função da magnitude da corrente, permitindo a coordenação com outros dispositivos a montante e a jusante. A combinação de elementos instantâneos e temporizados é amplamente utilizada em redes de distribuição para obter proteção rápida e seletiva. (HOROWITZ; PHADKE, 2014).

4.5 Coordenação e seletividade de proteções

A coordenação de proteções consiste no ajuste dos dispositivos de forma que, para qualquer falta dentro da zona de proteção, o dispositivo mais próximo do defeito atue primeiro, enquanto os dispositivos a montante permanecem em espera, atuando apenas se o dispositivo principal falhar. A seletividade é garantida quando há uma diferença mínima de tempo de atuação entre relés consecutivos, denominada intervalo de coordenação, tipicamente da ordem de 0,20 s a 0,40 s, dependendo das características dos equipamentos e das normas aplicadas. Essa diferença assegura que o relé a montante não dispare antes da completa eliminação da falta pelo relé a jusante. (SILVA, 2016).

4.6 Curvas tempo-corrente e coordenogramas

As curvas tempo-corrente representam a relação entre a corrente de falta e o tempo de atuação dos dispositivos de proteção. No caso dos relés temporizados, essas curvas podem ser do tipo inversa, muito inversa ou extremamente inversa, conforme a norma adotada. O coordenograma é a representação gráfica dessas curvas para todos os dispositivos de uma determinada cadeia de proteção, permitindo visualizar a coordenação entre eles e verificar se existe margem

adequada entre as curvas, evitando atuações indevidas e garantindo a seletividade. (HOROWITZ; PHADKE, 2014).

4.7 Geração distribuída e seus impactos na proteção

A geração distribuída refere-se à conexão de fontes de geração de energia elétrica diretamente na rede de distribuição, geralmente em média ou baixa tensão, próximas aos consumidores. A inserção dessas fontes pode alterar o fluxo de potência, os níveis de corrente de curto-circuito e, em alguns casos, a direção das correntes de falta, afetando a coordenação tradicional das proteções. Estudos indicam que a geração distribuída pode aumentar as correntes de curto-circuito e comprometer a seletividade entre dispositivos, exigindo reavaliação dos ajustes dos relés e, em situações mais complexas, a adoção de esquemas de proteção mais avançados. (LOPES; CARDOSO; SILVA, 2020)

5 METODOLOGIA

Esta pesquisa caracteriza-se como um estudo de natureza aplicada, com abordagem quantitativa e procedimento metodológico baseado em modelagem e simulação de uma rede radial urbana modelo de distribuição de energia elétrica de 13,8 kV. O objetivo central é analisar a coordenação de proteções por sobrecorrente, avaliando a seletividade entre os dispositivos de proteção e os efeitos da inserção de geração distribuída sobre as correntes de curto-circuito e os tempos de atuação dos relés.

5.1 Caracterização da rede-modelo

A rede utilizada neste trabalho é uma rede radial urbana modelo de 13,8 kV, com parâmetros hipotéticos representativos de sistemas de distribuição reais. A modelagem inclui a definição dos trechos de linha, das cargas conectadas e dos pontos de instalação dos dispositivos de proteção, de modo a permitir a realização de estudos de curto-circuito e a análise da coordenação entre relés instantâneos e temporizados. A configuração radial foi adotada por ser amplamente utilizada em redes de distribuição e por facilitar a análise de seletividade da proteção.

5.2 Estudo de curto-circuito

O estudo de curto-circuito foi realizado para determinar as correntes de falta em diferentes pontos da rede-modelo, considerando os cenários de operação definidos nos objetivos específicos. Foram analisados os valores de corrente de curto-circuito trifásico e outras configurações de falta relevantes para a proteção por sobrecorrente, de forma a obter os dados necessários para o ajuste dos relés e para a construção dos coordenogramas. Esses valores servem de base para a avaliação da atuação dos dispositivos de proteção e para a verificação da seletividade entre eles.

5.3 Dispositivos de proteção e ajustes considerados

Foram considerados relés de sobrecorrente com funções instantâneas (ANSI 50) e temporizadas (ANSI 51), típicos de redes de distribuição de energia elétrica. Os ajustes dos relés foram definidos com base nas correntes de curto-circuito calculadas e nos critérios de coordenação usuais, incluindo a seleção do pickup de corrente e da curva tempo-corrente adequada para cada dispositivo. A coordenação foi avaliada por meio da comparação dos tempos de atuação dos relés para as mesmas correntes de falta, garantindo que o relé mais próximo do defeito atue primeiro.

5.4 Cenários de simulação

Foram definidos dois cenários de simulação: um cenário base, sem geração distribuída, e um cenário ilustrativo com a inserção de geração distribuída em um ponto estratégico da rede-modelo. No cenário base, foram calculadas as correntes de curto-circuito e os tempos de atuação dos relés para a configuração tradicional da rede radial. No cenário com geração distribuída, foram recalculadas as correntes de falta e os tempos de atuação, permitindo comparar o desempenho da proteção nas duas condições e identificar possíveis perdas de seletividade ou alterações significativas nos ajustes.

5.5 Análise de coordenação e elaboração dos coordenogramas

A análise de coordenação foi realizada com base nos tempos de atuação dos relés para diferentes valores de corrente de curto-circuito, obtidos nas simulações dos dois cenários. Os coordenogramas foram elaborados representando as curvas tempo-corrente dos relés instantâneos e temporizados, de forma a visualizar a

margem de coordenação entre os dispositivos e verificar se os critérios de seletividade foram atendidos. A partir desses coordenogramas, foram identificados os ajustes que proporcionam uma atuação mais adequada da proteção e que contribuem para a confiabilidade do sistema.

5.6 Ferramentas e procedimentos de simulação

As simulações numéricas foram realizadas a partir de um modelo computacional simplificado, utilizando parâmetros hipotéticos representativos de uma rede radial urbana de 13,8 kV. Os cálculos foram organizados em tabelas e gráficos para permitir a análise comparativa das correntes de curto-circuito e dos tempos de atuação dos relés. Os procedimentos incluíram a modelagem da rede, a definição dos parâmetros dos dispositivos de proteção, a execução dos estudos de curto-circuito e a geração das curvas tempo-corrente e dos coordenogramas. Os resultados foram organizados em tabelas e gráficos para facilitar a comparação entre os cenários e a interpretação dos efeitos da geração distribuída sobre a proteção da rede-modelo.

Os valores apresentados nas tabelas e nos gráficos foram obtidos por meio de simulações numéricas elaboradas para esta pesquisa, utilizando parâmetros hipotéticos representativos de uma rede radial urbana de 13,8 kV. Dessa forma, os resultados não correspondem a dados operacionais de uma concessionária específica, sendo utilizados exclusivamente para fins acadêmicos e ilustrativos.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta e discute os resultados obtidos com as simulações realizadas na rede radial urbana modelo de 13,8 kV. São analisadas as correntes de curto-circuito, os tempos de atuação dos relés de sobrecorrente e a coordenação entre os dispositivos de proteção nos cenários base e com geração distribuída, com ênfase na seletividade e nos efeitos da inserção da geração distribuída sobre o sistema de proteção.

6.1 Correntes de curto-circuito no cenário base

No cenário base, sem geração distribuída, as correntes de curto-circuito foram calculadas para os principais pontos de falta da rede-modelo, considerando a

configuração radial tradicional. Os resultados mostram que as correntes de falta apresentam os maiores valores próximos à subestação e decrescem ao longo dos trechos da rede, conforme esperado em sistemas radiais. Esses valores serviram de referência para o ajuste dos relés instantâneos e temporizados e para a construção dos coordenogramas iniciais.

A Tabela 1 apresenta as correntes de curto-circuito trifásico calculadas para os cinco pontos de falta considerados na rede-modelo de 13,8 kV, comparando o cenário base (sem geração distribuída) e o cenário com geração distribuída conectada próxima ao ponto P3.

Tabela 1 – Correntes de Curto-Circuito nos Pontos de Falta

Ponto de Falta	lcc_base (A)	lcc_GD (A)	Variação (%)
P1	8500	9180	+8,0%
P2	6200	7130	+15,0%
P3	4500	5760	+28,0%
P4	3100	3782	+22,0%
P5	2100	2205	+5,0%

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Conforme observado na Tabela 1, as correntes de curto-circuito no cenário base apresentam os maiores valores próximos à subestação (ponto P1, com 8500 A) e decrescem ao longo do alimentador, atingindo 2100 A no ponto mais distante (P5). No cenário com geração distribuída, verifica-se aumento das correntes de falta em todos os pontos, com destaque para o ponto P3, onde a corrente aumentou de 4500 A para 5760,0 A, correspondendo a uma variação de +28,0%. Esse resultado está de acordo com o esperado, uma vez que a GD foi conectada próxima a esse ponto, injetando corrente adicional durante as faltas.

6.2 Tempos de atuação dos relés no cenário base

Com base nas correntes de curto-circuito do cenário base, foram determinados os tempos de atuação dos relés de sobrecorrente instalados ao longo da rede-modelo. A análise indica que, para as faltas consideradas, os relés mais próximos dos pontos de defeito apresentam tempos de atuação menores que os

relés a montante, atendendo aos critérios usuais de seletividade. Os coordenogramas elaborados a partir desses dados evidenciam margens de coordenação adequadas entre os dispositivos, garantindo que o relé principal atue antes do relé de retaguarda.

A Tabela 2 apresenta os tempos de atuação dos relés de sobrecorrente R1, R2 e R3 para faltas nos cinco pontos considerados, comparando o cenário base e o cenário com geração distribuída.

Para fins desta análise, os relés R1, R2 e R3 foram considerados dispositivos instalados em diferentes posições ao longo do alimentador, sendo R1 o relé localizado próximo à subestação, R2 o relé intermediário e R3 o relé localizado em posição mais distante. Os tempos apresentados na Tabela 2 correspondem aos valores calculados para cada combinação entre ponto de falta e dispositivo de proteção.

Tabela 2 – Tempos de Atuação dos Relés de Sobrecorrente

Ponto	Relé	Tempo_base (s)	Tempo_GD (s)	Diferença (s)
P1	R1	0,15	0,14	-0,01
P1	R2	0,35	0,33	-0,02
P1	R3	0,55	0,52	-0,03
P2	R1	0,18	0,16	-0,02
P2	R2	0,30	0,27	-0,03
P2	R3	0,50	0,46	-0,04
P3	R1	0,22	0,19	-0,03
P3	R2	0,28	0,24	-0,04
P3	R3	0,45	0,40	-0,05
P4	R1	0,28	0,24	-0,04
P4	R2	0,35	0,30	-0,05
P4	R3	0,40	0,36	-0,04
P5	R1	0,35	0,33	-0,02

Ponto	Relé	Tempo_base (s)	Tempo_GD (s)	Diferença (s)
P5	R2	0,42	0,40	-0,02
P5	R3	0,48	0,46	-0,02

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Conforme mostrado na Tabela 2, os tempos de atuação dos relés diminuem no cenário com geração distribuída em relação ao cenário base, o que é esperado devido ao aumento das correntes de curto-circuito. Para o relé R1 (mais próximo da subestação), os tempos variam de 0,15 s no ponto P1 (cenário base) para 0,14 s no mesmo ponto com GD. O relé R3 (mais distante) apresenta tempos maiores, variando de 0,55 s no ponto P1 (cenário base) para 0,52 s com GD.

A redução dos tempos de atuação é mais acentuada nos pontos P3 e P4, onde a influência da geração distribuída sobre as correntes de falta é maior, com diferenças de até -0,05 s para o relé R2 no ponto P4. Esses resultados demonstram que a presença da GD altera o comportamento temporal da proteção, o que deve ser considerado na coordenação entre os dispositivos para garantir a seletividade do sistema.

6.3 Efeitos da geração distribuída nas correntes de curto-circuito

No cenário com geração distribuída, a inserção de uma fonte de geração em um ponto estratégico da rede-modelo provocou alterações nos níveis de corrente de curto-circuito em relação ao cenário base. Os resultados das simulações indicam aumento das correntes de falta em trechos próximos ao ponto de conexão da geração distribuída, o que está de acordo com a literatura, que aponta que a GD pode elevar os níveis de curto-circuito e modificar o comportamento da proteção. Essas variações foram consideradas na reavaliação dos ajustes dos relés e na análise de coordenação.

6.4 Tempos de atuação e coordenação no cenário com geração distribuída

A comparação dos tempos de atuação dos relés entre os cenários base e com geração distribuída mostra que a presença da GD altera a magnitude das correntes que circulam pelos dispositivos de proteção e, consequentemente, os tempos de disparo dos relés temporizados. Em alguns pontos da rede-modelo,

observa-se redução dos tempos de atuação devido ao aumento das correntes de falta, enquanto em outros trechos as variações são menos expressivas. Os coordenogramas construídos para o cenário com GD permitem visualizar essas mudanças e verificar se a seletividade entre os relés foi preservada ou se houve perda parcial de coordenação.

6.5 Análise comparativa entre os cenários

A análise comparativa entre os dois cenários evidencia que a inserção de geração distribuída pode modificar significativamente o desempenho da proteção por sobrecorrente em redes radiais urbanas. Embora a rede-modelo utilizada neste trabalho não represente dados operacionais de uma concessionária específica, os resultados ilustram como a GD pode alterar correntes de curto-circuito, tempos de atuação e margens de coordenação, reforçando a necessidade de reavaliar os ajustes dos relés sempre que houver mudanças relevantes na configuração do sistema. Essas observações estão em consonância com estudos que apontam impactos da geração distribuída sobre a seletividade e a confiabilidade da proteção em sistemas de distribuição.

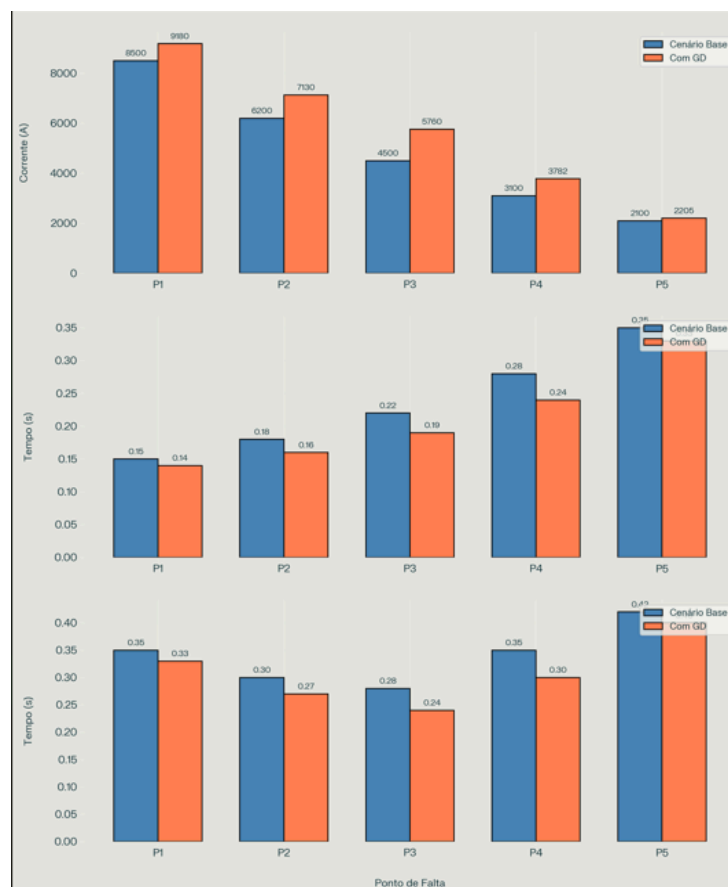
A Tabela 3 e a Figura 1 apresentam a análise comparativa entre o cenário base e o cenário com geração distribuída, mostrando as correntes de curto-circuito e os tempos de atuação dos relés R1 e R2.

Conforme observado na Tabela 3, as correntes de curto-circuito aumentam em todos os pontos de falta no cenário com GD, com variação entre +5,0% (ponto P5) e +28,0% (ponto P3). Os tempos de atuação do relé R1 diminuem em todos os pontos, com reduções entre -0,010 s e -0,040 s.

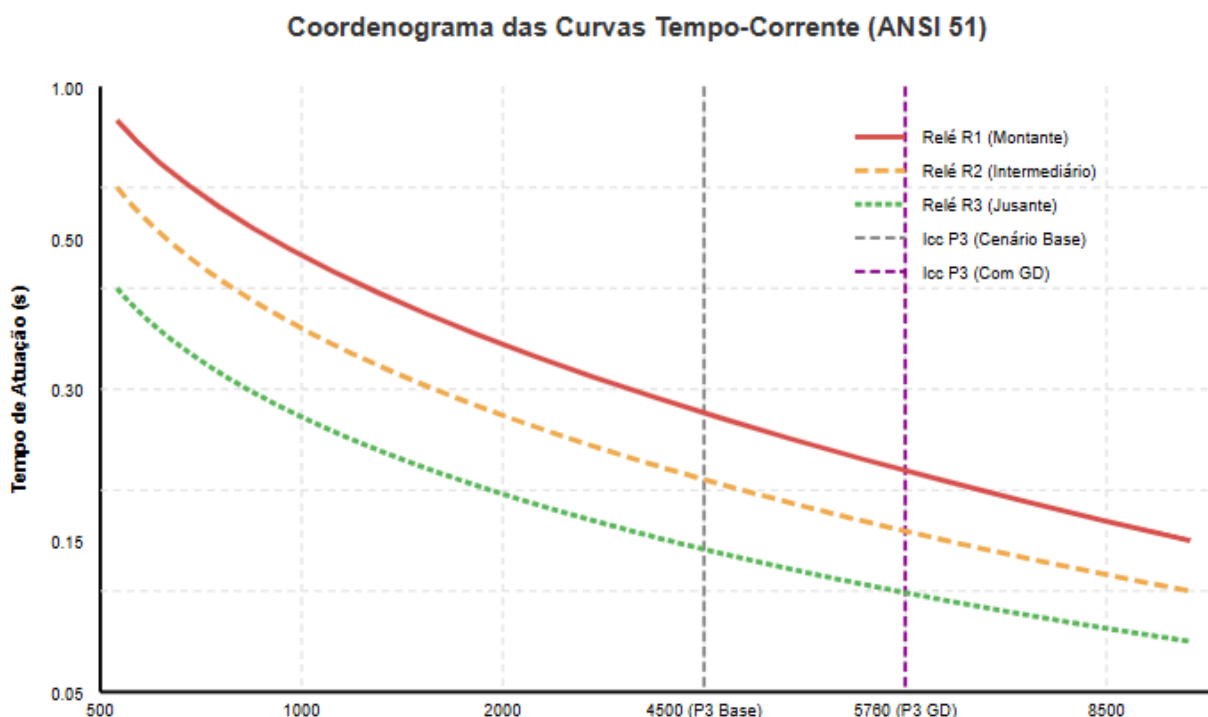
A Figura 1 ilustra graficamente essas variações, evidenciando que os pontos P2, P3 e P4 são os mais afetados pela inserção da geração distribuída, o que está de acordo com a localização da fonte GD próxima ao ponto P3 na rede-modelo.

Ponto	I _{cc_base} (A)	I _{cc_GD} (A)	Var. I _{cc} (%)	T _{R1_base} (s)	T _{R1_GD} (s)	Var. R1 (s)
P1	8500	9180,0	+8,0	0,15	0,14	-0,010
P2	6200	7130,0	+15,0	0,18	0,16	-0,020
P3	4500	5760,0	+28,0	0,22	0,19	-0,030
P4	3100	3782,0	+22,0	0,28	0,24	-0,040
P5	2100	2205,0	+5,0	0,35	0,33	-0,020

Figura 2 – Coordenograma das curvas tempo-corrente dos relés R1, R2 e R3.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).



“A partir da análise do coordenograma da Figura 2, verifica-se que, no cenário base (linha tracejada cinza em 4500 A), os relés R1, R2 e R3 mantêm margens temporais de seletividade adequadas entre si, atuando em ordem cronológica a partir do dispositivo mais próximo da falta. Contudo, com a inserção da Geração Distribuída próxima ao ponto P3, a corrente de curto-circuito eleva-se para 5760 A (linha tracejada roxa). Este deslocamento para a direita no eixo das correntes provoca uma redução nos tempos de atuação de toda a cadeia de proteção, aproximando as curvas de disparo dos relés e reduzindo os intervalos de coordenação, o que reforça a necessidade de reavaliar os ajustes operacionais na presença de geração distribuída.”

7 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo analisar a coordenação de proteções por sobrecorrente em uma rede radial urbana modelo de distribuição de energia elétrica de 13,8 kV, verificando as condições de seletividade entre os dispositivos de proteção e os efeitos da inserção de geração distribuída sobre as correntes de curto-circuito e os tempos de atuação dos relés. Para isso, foram realizados estudos de curto-circuito, ajustes de relés instantâneos e temporizados e elaboração de coordenogramas, comparando um cenário base, sem geração distribuída, e um cenário ilustrativo com a inserção de uma fonte de geração distribuída na rede-modelo.

Os resultados das simulações mostraram que, no cenário base, as correntes de curto-circuito e os tempos de atuação dos relés atendem aos critérios usuais de seletividade, com os dispositivos mais próximos dos pontos de falta atuando antes dos relés a montante. No cenário com geração distribuída, observou-se aumento das correntes de curto-circuito em trechos próximos ao ponto de conexão da fonte, o que provocou alterações nos tempos de atuação dos relés e exigiu reavaliação da coordenação entre os dispositivos. Os coordenogramas elaborados permitiram visualizar essas mudanças e identificar possíveis perdas parciais de seletividade, reforçando a necessidade de revisar os ajustes de proteção sempre que houver mudanças relevantes na configuração do sistema.

Reconhece-se como limitação do estudo o fato de a rede utilizada ser um modelo com parâmetros hipotéticos representativos, e não uma rede operacional real de uma concessionária específica. Além disso, a análise foi restrita à proteção por sobrecorrente em uma configuração radial, sem considerar esquemas mais complexos de proteção ou a variação de diferentes níveis de penetração de geração distribuída. Apesar dessas limitações, os resultados obtidos são coerentes com a literatura técnica e ilustram de forma clara os impactos da geração distribuída sobre a coordenação de proteções em redes de distribuição.

Como sugestões para trabalhos futuros, recomenda-se a realização de estudos em redes reais de concessionárias, com dados operacionais, e a análise de diferentes níveis e localizações de geração distribuída. Também seria relevante avaliar a coordenação de proteções em redes com topologias mais complexas, incluindo a possibilidade de operação em anel e a utilização de proteções direcionais, bem como investigar a integração de funções avançadas de proteção e automação em cenários de redes inteligentes.

Conclui-se, portanto, que o objetivo geral do trabalho foi alcançado, uma vez que foi possível analisar a coordenação de proteções por sobrecorrente na rede-modelo, verificar as condições de seletividade entre os dispositivos e demonstrar os efeitos da inserção de geração distribuída sobre as correntes de curto-circuito e os tempos de atuação dos relés. Os resultados reforçam a importância de estudos de coordenação de proteções atualizados, que considerem as mudanças recentes nos sistemas de distribuição, contribuindo para a confiabilidade e a continuidade do fornecimento de energia elétrica.

Referências

- BARROS, V. Geração distribuída e seus impactos na proteção de sistemas elétricos. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.
- HOROWITZ, S. H.; PHADKE, A. G. Power system relaying. 4. ed. Chichester: Wiley, 2014.
- IEC. IEC 60909: Short-circuit currents in three-phase a.c. systems. Geneva: IEC, 2016.
- KINDERMANN, G. Coordenação e seletividade de proteções em sistemas elétricos. Florianópolis: Edição do Autor, 2010.
- LOPES, A.; CARDOSO, F.; SILVA, M. Proteção de sistemas elétricos com geração distribuída. São Paulo: Blucher, 2020.
- PAITHANKAR, Y. G.; BHIDE, S. R. Fundamentals of power system protection. New Delhi: Prentice Hall, 2018.
- SILVA, A. Proteção e seletividade em redes de distribuição. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.
- STEVENSON, W. D. Elementos de análise de sistemas de potência. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.