

PROTEÇÕES DE DISTÂNCIA EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

Resumo

Este artigo apresenta uma revisão didático-técnica das proteções de distância (ANSI 21) aplicadas a linhas de transmissão em sistemas de energia elétrica. São abordados os fundamentos de medição da impedância aparente, a coordenação das zonas de proteção, as características no plano R-X, os métodos de polarização, os esquemas de teleproteção, o bloqueio de oscilações de potência (PSB), o encobrimento por carga e os principais critérios de parametrização.

Complementarmente, discutem-se práticas recomendadas pelas normas IEEE e pelos guias ENTSO-E, bem como considerações modernas associadas a relés numéricos, redes fortemente interligadas e elevada penetração de geração renovável. O objetivo é fornecer uma síntese clara, rigorosa e coerente, útil para engenheiros de proteção e estudantes envolvidos no estudo, projeto e ensaio de proteções de distância em sistemas AC.

1. Introdução

As proteções de distância (ANSI 21) constituem, desde há várias décadas, um dos pilares da proteção de linhas de transmissão em sistemas de energia elétrica. Baseiam-se na medição da impedância aparente entre o terminal do relé e o local do defeito, permitindo determinar se este se encontra dentro do alcance configurado e assegurando uma atuação seletiva e rápida.

Apesar da maturidade da filosofia, a sua relevância tem vindo a aumentar devido à digitalização das subestações, à crescente integração de geração renovável e ao reforço da interligação entre redes. Estes fatores introduzem novos desafios, como a redução da corrente de curto-circuito disponível, variações significativas no sentido do fluxo de potência e a necessidade de maior coordenação dinâmica

entre terminais. Nessas condições, a escolha da característica (mho ou quadrilateral), o método de polarização, a estratégia de teleproteção e a utilização de funções de bloqueio de oscilações de potência (PSB) assumem um papel determinante na segurança operacional.

Este artigo tem um carácter didático-técnico e procura sistematizar os fundamentos essenciais e as práticas de parametrização adotadas internacionalmente. A Secção 2 resume a terminologia usada; as secções seguintes apresentam o princípio de funcionamento, a coordenação de zonas, as características no plano R-X, a polarização, a teleproteção, o PSB, o encobrimento por carga e um exemplo numérico aplicado. As conclusões sintetizam recomendações práticas para projeto, comissionamento e ensaio de proteções de distância em redes modernas.

2. Quadro de terminologia

Conforme a Tabela 1, sintetiza-se a terminologia usada nas secções seguintes.

Tabela 1. Quadro de terminologia usado no artigo

Português (PT)	Inglês
Barramento	Bus / Busbar
Defeito	Fault
Proteção	Protection
Alcance	Reach
Impedância aparente	Apparent impedance
Zonas (1, 2, 3)	Zones

3. Princípio de funcionamento

A proteção de distância mede a impedância aparente:

$$Z_{ap} = \frac{V}{I}$$

Quando Z_{ap} fica abaixo do alcance configurado Z_{alc} , considera-se defeito interno e emite-se comando de abertura. Esta definição é canónica e encontra-se nos manuais de relés e obras de referência [1, 2].

A Figura 1 mostra o esquema típico de medição e localização do defeito ao longo da linha.

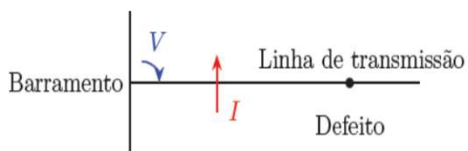


Figura 1. Esquema do princípio de funcionamento do relé de distância

4. Zonas de proteção e coordenação

Adota-se a prática consolidada [3, 4]: Zona 1 (80 %–85 % da linha, atuação instantânea), Zona 2 (restante da linha e parte adjacente, atraso 0,3 s–0,5 s) e Zona 3 (proteção de reserva (backup), atraso 0,8 s–1,0 s).

A Figura 2 ilustra a coordenação temporal típica das zonas em função do alcance, conforme guias IEEE/ENTSO-E [3, 4].

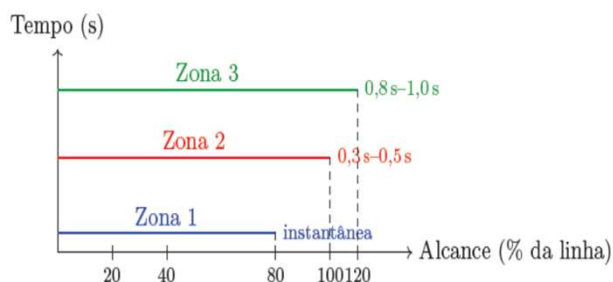


Figura 2. Diagrama tempo-alcance das zonas 1–3

5. Curvas características no plano R–X

As duas famílias mais usadas são a *mho* e a *quadrilateral*. A *mho* é naturalmente direcional; a *quadrilateral* é mais robusta à resistência de arco e permite exclusões retangulares (p. ex., carga) [5, 2].

A Figura 3 compara regiões de operação. Em linhas longas, a *mho* é comum; em linhas curtas/urbanas, a *quadrilateral* é muitas vezes preferida [5].

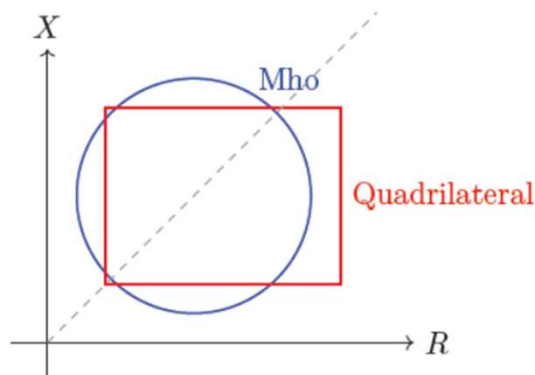


Figura 3. Curvas no plano R–X: mho (círculo) e quadrilateral (retângulo)

Conforme a Tabela 2, resumem-se diferenças de forma, direcionalidade e aplicação [2].

Tabela 2. Comparação entre as características mho e quadrilateral

Critério	Mho	Quadrilateral
Forma	Círculo	Retângulo
Direcionalidade	Natural	Requer polarização
Resistência de arco	Mais sensível	Mais robusta
Uso típico	Linhas longas	Linhas curtas/urbanas

6. Polarização

A autopolarização usa a tensão da fase em defeito (degrada com $V \rightarrow 0$) como vetor de referência.

Em defeitos próximos do terminal protegido, a queda de tensão pode ser muito elevada, tornando a característica mais sensível a erros de medição e a transitórios de tensão.

A polarização cruzada utiliza tensões de fases sãs para construir o vetor de referência e é, por isso, mais robusta em defeitos monofásicos e em condições de tensão deprimida na fase em defeito. Nos relés numéricos modernos é frequente a utilização de polarização mista (combinação de auto e polarização cruzada), com pesos diferentes em função do tipo de defeito e da qualidade da tensão medida.

Outra prática comum é a utilização de *voltage memory*, em que o relé “recorda” o fasor de tensão pré-defeito durante um intervalo típico de 1–3 ciclos. Esta funcionalidade ajuda a manter uma referência de polarização estável durante a depressão transitória de tensão associada ao defeito, reduzindo disparos indevidos ou perda de sensibilidade.

Em redes fracas ou com elevada penetração de geração renovável (com reduzida contribuição de corrente de curto-circuito), a escolha e parametrização da polarização assumem um papel ainda mais crítico, sendo recomendada a validação dos ajustes por simulação e por ensaios secundários [3, 1].

7 Teleproteção

Esquemas de teleproteção permitem coordenar disparos entre terminais de uma linha, utilizando canais de comunicação dedicados (fibras óticas, PLC, rádio, etc.), de forma a acelerar a eliminação de defeitos internos e a evitar atuações indevidas em defeitos externos [3, 4].

Na prática, destacam-se quatro famílias principais:

- **PUTT** (*Permissive Underreach Transfer Trip*): a Zona 1 *underreach* em cada terminal envia um sinal permissivo para o extremo oposto. O disparo tripolar rápido só ocorre quando há simultaneamente atuação local e sinal remoto, assegurando seletividade;
- **POTT** (*Permissive Overreach Transfer Trip*): utiliza normalmente uma Zona 2 *overreach* como elemento piloto. A lógica permissiva permite acelerar a eliminação de defeitos em toda a linha, mantendo no entanto um critério direcional e de coordenação com proteções adjacentes;
- **DCB** (*Directional Comparison Blocking*): cada terminal transmite um sinal de bloqueio em defeitos externos (sentido inverso). Na ausência de bloqueio remoto, o disparo interno é permitido, sendo um esquema intrinsecamente seguro;

- **DCUB** (*Directional Comparison Unblocking*): semelhante ao DCB, mas em que a perda do sinal de bloqueio remoto é interpretada como condição permissiva após determinadas verificações de segurança.

Os esquemas permissivos (PUTT/POTT) privilegiam a rapidez de eliminação de defeitos internos, enquanto os esquemas de bloqueio (DCB/DCUB) privilegiam a segurança contra disparos indevidos. A escolha do critério e dos tempos de supervisão deve considerar a fiabilidade do canal de comunicação, a filosofia de coordenação da empresa e as recomendações dos guias IEEE/ENTSO-E [3, 4].

8 Power Swing Blocking (PSB)

Durante oscilações de potência estáveis, a trajetória R–X vista pelo relé cruza lentamente a característica de distância, podendo, em princípio, entrar na região de disparo. O *Power Swing Blocking* (PSB) distingue estes casos de defeitos reais, bloqueando temporariamente a função de distância enquanto a oscilação é detetada [1, 3].

Tipicamente, o relé utiliza um elemento de deteção de oscilações de potência (*Power Swing Detection*, PSD), baseado na velocidade com que o ponto (R,X) atravessa pares de *blindings* (ou anéis temporizados). Trajetórias lentas entre *blindings* são interpretadas como oscilações de potência, ativando o PSB; cruzamentos rápidos são associados a defeitos e não devem ser bloqueados.

Em muitos relés numéricos, o PSB é complementado com funções de *out-of-step tripping* (OOST), que permitem desligar seletivamente partes do sistema em situações de perda de sincronismo, após um critério temporizado de segurança. Neste caso, distingue-se entre *blindings* de bloqueio (para PSB) e *blindings* de disparo (para OOST), com zonas e tempos cuidadosamente coordenados.

A Figura 4 ilustra a distinção entre oscilações (trajetórias lentas entre *blindings*) e defeitos reais (cruzamento rápido) [1].

A parametrização adequada do PSB é crucial em sistemas fortemente interligados, de forma a evitar disparos indevidos durante oscilações inter-área e, ao mesmo tempo, garantir a atuação correta em defeitos verdadeiros.

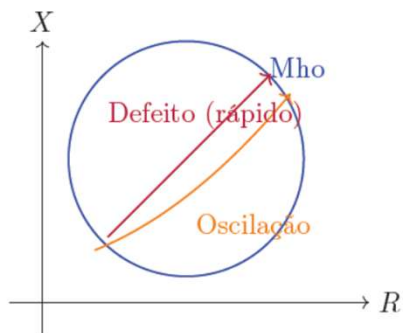


Figura 4. Diagrama R-X ilustrando o *Power Swing Blocking* (PSB), e a interação com as zonas do relé e *blinders*

9 Encobrimento por carga (*Load Encroachment*)

Linhas muito carregadas podem fazer com que o ponto (R,X) correspondente à carga se aproxime da região de disparo da proteção de distância, sobretudo em situações de baixa tensão e elevado ângulo de carga. Nesses casos, a característica de distância pode “ver” a carga pesada como se fosse um defeito resistivo.

Para mitigar este problema, os relés modernos implementam *load encroachment*, isto é, uma região explícita no plano R-X reservada à carga, que é excluída da característica de disparo.

Em características quadrilaterais, esta exclusão é particularmente flexível, permitindo definir um retângulo de carga em torno do ponto de operação previsto (tipicamente com base em estudos de fluxo de potência) [2, 5, 4].

A Figura 5 mostra, de forma qualitativa, a região de carga em relação às características mho e quadrilateral.

A definição adequada dos limites de *load encroachment* deve considerar:

- o carregamento máximo admissível da linha (incluindo sobrecargas de curta duração);
- variações de tensão e de fator de potência em exploração normal e em contingência;
- a coordenação com outras funções (sobrecorrente, sobrecarga térmica, controlo de tensão).

Um dimensionamento demasiado conservador da região de carga pode reduzir a sensibilidade a defeitos de elevada resistência, enquanto um dimensionamento demasiado agressivo aumenta o risco de disparos indevidos em linhas fortemente carregadas. Daí a importância de suportar os ajustes em estudos de rede e em recomendações de normas e guias internacionais [4].

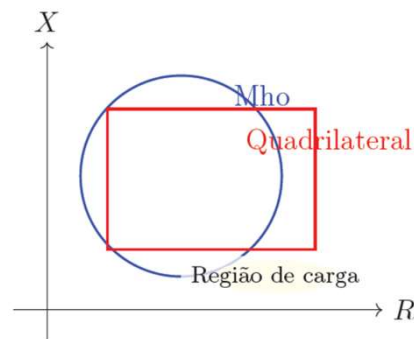


Figura 5. Região de encobrimento por carga (*Load Encroachment*)

10 Exemplo numérico

Linha de 100 km com impedância própria:

$$Z' = 0,2 + j 0,8 \, \Omega/km$$

Considere-se um defeito a 60 km do terminal protegido:

$$Z_{linha}^{(60)} = 60 \times Z' = (12 + j 48) \, \Omega$$

Admita-se que o resto da rede visto a partir do outro terminal é representado por uma impedância equivalente:

$$Z_{resto} = 20 + j 80 \, \Omega$$

A impedância aparente vista pelo relé, em presença de *infeed* remoto, pode ser aproximada por:

$$Z_{ap} = \frac{Z_{linha}(d) \cdot Z_{resto}}{Z_{linha}(d) + Z_{resto}} \approx (7,5 + j 30,0) \Omega$$

Se o relé utilizar $|Z'|$ como base para a conversão de impedância em distância, a distância aparente ao defeito é:

$$d_{ap} = \frac{|Z_{ap}|}{|Z'|} \approx 37,5 \text{ km}$$

isto é, cerca de 37,5% do comprimento da linha, apesar de o defeito real se encontrar a 60 km.

Este subalcançe aparente decorre da partilha de corrente entre a linha e o resto da rede (*infeed* remoto), sendo um efeito bem conhecido na parametrização de proteções de distância.

O exemplo ilustra a importância de considerar os equivalentes de rede nos estudos de coordenação e na definição dos alcances das Zonas 1–3, sobretudo em sistemas com múltiplas alimentações e fortes interligações [1, 2].

11 Conclusões

A proteção de distância mantém-se como uma função essencial na proteção de linhas de transmissão, assegurando a deteção e eliminação seletiva de defeitos. A escolha da característica (*mho* ou *quadrilateral*), do método de polarização, da filosofia de teleproteção e das exclusões de carga deve adequar-se à topologia da rede, ao regime de defeitos esperado e às condições de exploração (carregamento, geração distribuída, interligações).

Recomenda-se a implementação de esquemas de teleproteção e de bloqueio de oscilações de potência (PSB), bem como, quando adequado, de funções de *out-of-step tripping* (OOST), em consonância com as boas práticas descritas nos guias IEEE/ENTSO-E [3, 4].

A validação dos parâmetros e tempos de atuação deve ser suportada por estudos de curto-circuito, simulações dinâmicas e ensaios (de tipo e de rotina), incluindo testes secundários com os relés numéricos [6].

Nos sistemas modernos, a digitalização das subestações e a integração de geração renovável trazem novos desafios à proteção de distância: fontes com fraca contribuição de corrente de defeito, variação do sentido de fluxo de potência e topologias mais dinâmicas. Torna-se, por isso, relevante explorar ajustes adaptativos, o uso de medições sincronizadas (PMUs) e funções avançadas de supervisão, de forma a melhorar a coordenação dinâmica das zonas de proteção e a robustez em cenários fora da filosofia clássica. Em síntese, este artigo consolidou fundamentos clássicos e práticas recomendadas, fornecendo uma referência técnica e didática para o projeto, parametrização e ensaio de proteções de distância em sistemas modernos de energia elétrica.

Referências

- [1] S. H. Horowitz, A. G. Phadke, and J. K. Niemira, *Power System Relaying*, 4th ed. Chichester: Wiley, 2014.
- [2] J. L. Blackburn and T. J. Domin, *Protective Relaying: Principles and Applications*, 4th ed. Boca Raton: CRC Press, 2014.
- [3] IEEE Guide for Protective Relay Applications to Transmission Lines, IEEE Std. IEEE Std C37.113-2015, 2015. [Online]. Available: <https://standards.ieee.org/ieee/C37.113/5387/>
- [4] ENTSO-E, “Best protection practices for hv and ehv ac transmission systems,” ENTSOE, Tech. Rep., 2018. [Online]. Available: https://www.entsoe.eu/Documents/SOC%20documents/Best_protection_practices_for_HV_EHV_AC_transmission_system.pdf
- [5] E. O. S. III and B. Kasztenny, “Distance protection: Why have we started with a circle, does it matter, and what else is out there?” in 71st Annual Conference for Protective Relay Engineers (CPRE). College Station, TX, USA: IEEE, 2018. [Online]. Available: <https://selinc.com/api/download/121655/>
- [6] V. Lacković, “Distance protection of electrical power systems,” <https://www.pdh-pro.com/wp-content/uploads/2018/11/EE-03-903.pdf>, 2017, Continuing Education and Development, Inc.