

PROTECÇÕES DE DISTÂNCIA DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA A MUITO ALTA TENSÃO *

PROTECÇÃO DAS LINHAS A 220 kV DA COMPANHIA NACIONAL DE ELECTRICIDADE

A bibliografia relativa a protecções de distância encontra-se espalhada por numerosos artigos especializados, em geral, em língua inglesa. Desta forma, o seu estudo torna-se, por vezes, difícil não só pela dificuldade de obter esses artigos, como também de os ordenar. No presente trabalho o autor pretende fazer uma coordenação acessível dos conceitos fundamentais relativos às protecções de distância que permita, não só uma fácil familiarização com estes assuntos, como também constitua uma base e uma referência na nossa língua para a publicação de trabalhos mais especializados.

1 — Introdução

Nas redes de transporte e distribuição de energia eléctrica, um dos elementos de grande importância para o seu bom funcionamento e exploração económica, é constituído, sem dúvida, pelas protecções das linhas. De facto, os curto-circuitos provocados pelos fenómenos naturais, ou por deficiência e envelhecimento de materiais, originam os mais diversos tipos de defeitos independentes, na maioria dos casos, da qualidade e concepção dos elementos que constituem a rede. Por outro lado, a actuação indevida ou imprópria das protecções pode, por vezes, em redes complexas com grandes transportes de energia, provocar oscilações de potência e fenómenos de instabilidade que tenham como consequência um disparo parcial ou total da rede.

Para complemento do panorama de protecções convém ainda ter em atenção que, na exploração de uma rede de produção e distribuição de energia, os elementos que a constituem, (geradores, transformadores, linhas e cargas), estão sujeitos a tomarem todos os valores e arranjos que, por assim dizer, possamos imaginar, donde resulta que, numa mesma linha, a existência de um mesmo defeito na rede conduz, por vezes, a correntes de curto-circuito diferentes de caso para caso, não só em valor absoluto mas também em sentido.

Daqui resultou, à medida que se foram desenvolvendo as redes de transmissão de energia, a necessidade de uma participação cada vez maior das protecções, a que se foram exigindo sucessivamente maiores possibilidades e que conduziriam às actuais protecções de distância. Estas protecções, e como o seu nome indica, actuam em função da distância a que se deu o curto-circuito sendo a distância medida em unidades de impedância ou reactância. As protecções deverão ser sensíveis, selectivas e rápidas. Fundamentalmente as suas missões são as seguintes:

1.º — Dar ordem de disparo o mais rapidamente possível quando o defeito a eliminar estiver dentro da sua zona de operação;

- 2.º — Bloquear a ordem de disparo, se o defeito estiver ao seu alcance mas fora da sua zona de actuação e aguardar que as protecções correspondentes o eliminem. Se, porém, ao fim de um tempo previamente determinado o curto-circuito continuar, por avaria das protecções ou disjuntores que tinham a seu cargo a sua eliminação, a protecção em causa deverá ainda, e como recurso, dar ordem de disparo.
- 3.º — Bloquear o disparo no caso de oscilações de potência, durante um período de tempo julgado suficiente para a obtenção de um novo estado de equilíbrio. Findo esse tempo, se a oscilação de potência se mantiver, dar ordem de disparo.

2 — Relés de medida

Os relés para medida da distância utilizam, em geral, uma combinação dos seguintes momentos:

- a) — Momento proporcional ao quadrado da tensão eficaz;
b) — Momento proporcional ao quadrado da corrente eficaz;
c) — Momento proporcional a $VI \cos \varphi$.

A equação geral terá, por consequência, a seguinte expressão:

$$T = \pm K_1 V^2 \pm K_2 I^2 \pm K_3 VI \cos (\varphi - \alpha) \pm K_4 \quad (1)$$

Em que:

K_1, K_2, K_3 — representam constantes dos relés,

K_4 — representa o momento da mola antagonista que se considera normalmente constante e desprezível,

φ — o ângulo entre os vectores tensão e corrente.

A operação do relé tem lugar, evidentemente, para $T > 0$.

Vejam agora, a partir da equação geral (1) as equações que resultam para os relés mais usuais.

2.1 — RELÉS DE IMPEDÂNCIA

Fazendo na equação (1) $K_1 < 0$, $K_2 > 0$ e $K_3 = 0$, temos:

$$T = -K_1 V^2 + K_2 I^2$$

Daqui se conclui que ao momento produzido pelo elemento de corrente se opõe o relativo ao elemento de tensão.

* A conclusão deste trabalho será apresentada no próximo número.

Na condição limite de operação, $T = 0$, temos:

$$K_1 V^2 = K_2 I^2 \quad (2)$$

ou

$$Z = \sqrt{\frac{K_2}{K_1}} = \text{constante} \quad (3)$$

A característica deste relé no plano RX , como se conclui da equação (3), é uma circunferência de centro na origem e de raio igual a $\sqrt{\frac{K_2}{K_1}}$, fig. 1.

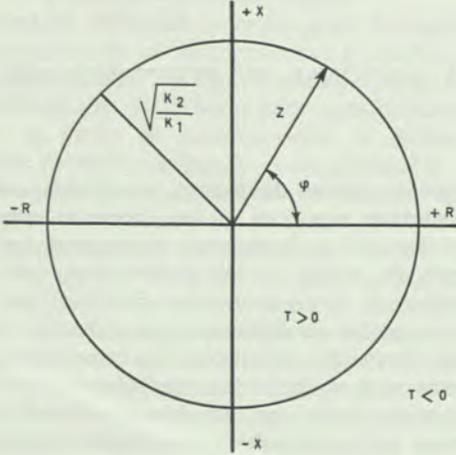


Fig. 1

O relé operará sempre que a extremidade do vector Z se encontre dentro do círculo. Como é evidente, o tempo da operação deste relé é mais lento nas vizinhanças de

$Z = \sqrt{\frac{K_2}{K_1}}$, por ser menor o seu momento.

A curva de operação em função do tempo tem o aspecto indicado na fig. 2 a tracejado. Na prática, porém, considera-se a curva a cheio. Esta simplificação de representação utiliza-se igualmente em todos os relés de medida de distância.

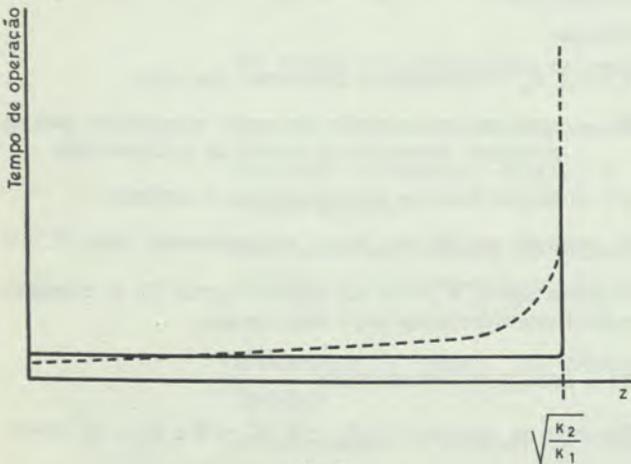


Fig. 2

Este relé, como se verifica pela equação (3) e fig. 1, não tem características direccionais pelo que se torna necessário, por uma questão de selectividade, acoplá-lo com um outro relé direccional.

Por vezes, e para certos fins especiais, torna-se necessário deslocar a sua característica como se indica por exemplo na fig. 3. Este artifício consegue-se introduzindo no elemento

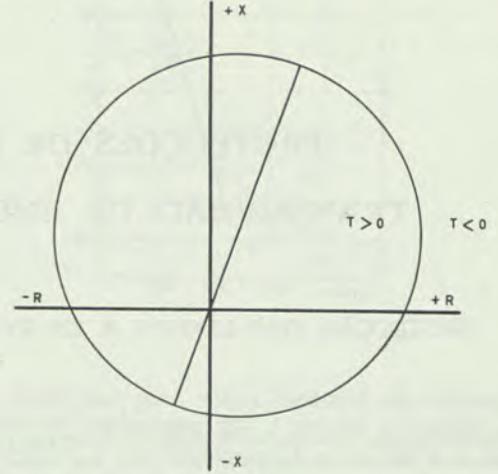


Fig. 3

de tensão da equação (2) uma tensão adicional proporcional à intensidade da corrente. A equação (2) toma agora o aspecto seguinte:

$$K_1 (V + K I)^2 = K_2 I^2$$

2.2 — RELÉ DE REACTÂNCIA

Se na equação geral (1) fizermos $K_1 = 0$, $K_2 > 0$ e $K_3 < 0$, teremos

$$T = K_2 I^2 - K_3 V I \cos(\varphi - \alpha)$$

Na condição limite de $T = 0$ esta equação toma o aspecto:

$$K_2 I^2 = K_3 V I \cos(\varphi - \alpha)$$

ou

$$\frac{K_2}{K_3} = Z \cos(\varphi - \alpha) \quad (4)$$

A equação (4) representa-nos uma recta à distância $\frac{K_2}{K_3}$ da

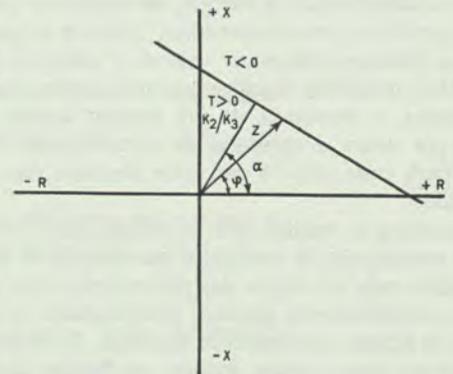


Fig. 4

origem fig. 4. No caso particular, porém, de $\alpha = 90^\circ$ a equação (4) toma a expressão

$$\frac{K_2}{K_3} = Z \text{ sen } \varphi = X \quad (5)$$

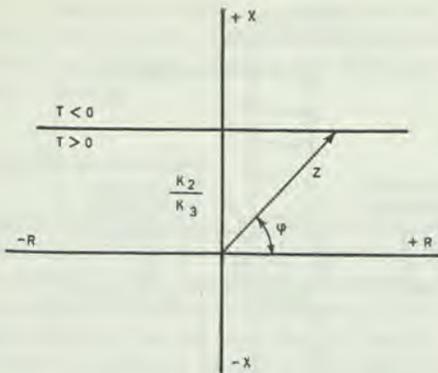


Fig. 5

Na fig. 5 encontra-se representada, no plano RX , esta recta. A extremidade do vector Z desloca-se ao longo da recta para os vários valores de φ . O relé operará sempre que a ordenada de vector Z seja inferior a K_2/K_3 . A designação de relé de reactância, é devida ao facto da sua operação depender exclusivamente da reactância do circuito. Na prática, e devido à constante K_4 que se desprezou, os relés não apresentam uma característica perfeitamente recta. A fig. 30, em anexo, mostra curvas reais destes relés obtidas no Laboratório de Ensaios da Companhia Nacional de Electricidade. Convém, no entanto, desde já notar que somente uma parte desta característica, e do quadrante positivo, tem interesse para efeitos de protecção.

Ver-se-á mais adiante que este relé não pode ser utilizado sozinho como protecção de distância, visto que a sua zona de operação entre a recta de ordenada K_2/K_3 e o eixo dos RR estende-se teoricamente de $+\infty$ a $-\infty$, podendo englobar a extremidade do vector Z correspondente a estados de carga normais. Desta forma, torna-se necessário limitar a sua zona de operação como será indicado mais adiante. A operação do relé, independente da resistência óhmica do circuito, tem muito interesse na protecção das linhas curtas de pequena resistência óhmica. De facto, pretendendo-se que o relé meça a distância ao ponto do curto-circuito, se a resistência óhmica da linha é muito pequena comparada com a resistência do defeito, que, de mais a mais, é variável de caso para caso, a sua introdução na avaliação da medida irá causar um erro grosseiro. Os relés de reactância resolvem perfeitamente este problema tornando a medida de distância independente do valor da resistência do arco.

A fig. 6 representa o esquema geral das ligações de um relé deste tipo. O condensador C tem por fim dar ao ângulo α o valor de 90° .

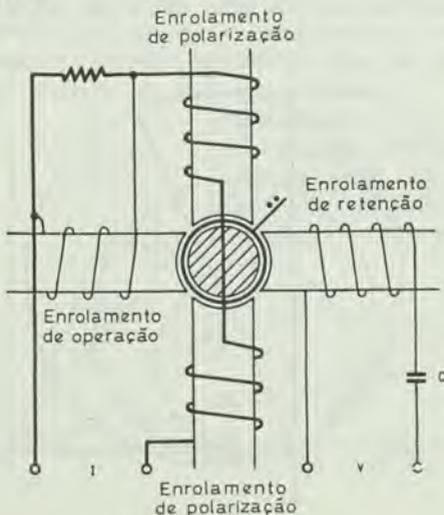


Fig. 6

2.3 — RELÉ MHO

Se na equação geral (1) fizermos $K_1 < 0$, $K_2 = 0$ e $K_3 > 0$, obtemos

$$T = -K_1 V^2 + K_3 V I \cos(\varphi - \alpha)$$

Na condição limite para $T = 0$, teremos

$$K_1 V^2 = K_3 V I \cos(\varphi - \alpha) \quad (6)$$

ou

$$Z = \frac{K_3}{K_1} \cos(\varphi - \alpha) \quad (7)$$

Esta equação representa uma circunferência passando pela origem e de diâmetro igual a K_3/K_1 , fig. 7. Os centros destas circunferências encontram-se todos numa mesma recta fazendo um ângulo α com eixo dos RR .

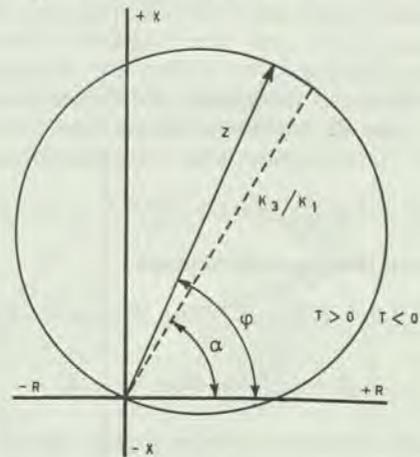


Fig. 7

O relé operará sempre que a extremidade do vector caia dentro do círculo. Este relé tem a vantagem, além de ser direccional, de ter a sua zona de operação no plano RX bastante limitada ao contrário do que se verifica para o relé de reactância.

A designação de relé mho e por simples convenção, é devida ao facto da sua característica no plano das admitâncias ser uma recta semelhante ao relé de reactância no plano das reactâncias.

Em certos casos a que adiante se fará referência, há necessidade de deslocar a característica do relé mho, como mostra a fig. 8. Este deslocamento consegue-se com a introdução

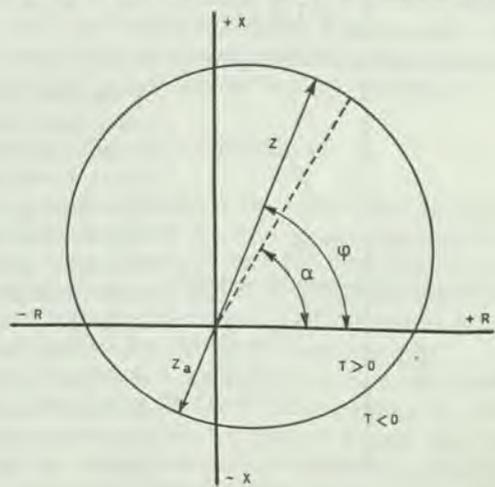


Fig. 8

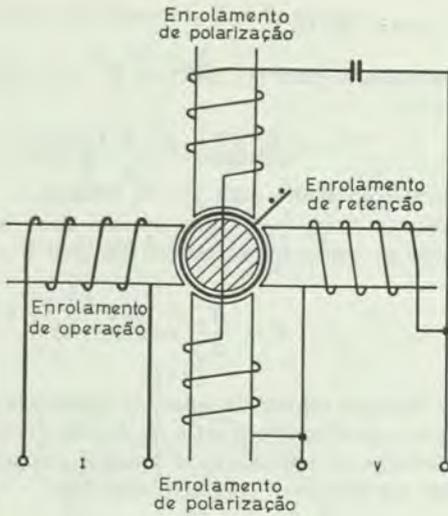


Fig. 9

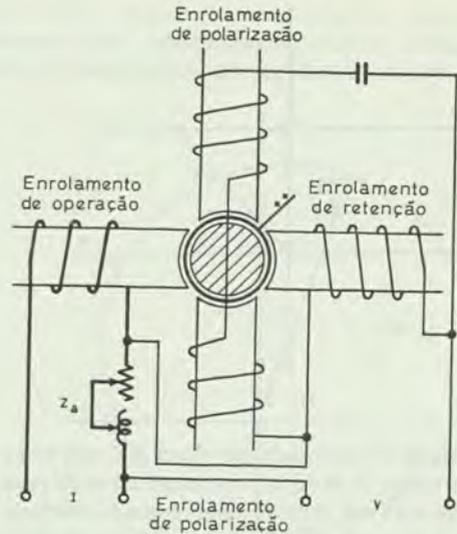


Fig. 10

no valor da tensão da equação (6), de um termo proporcional ao valor da intensidade da corrente.

A equação (6) toma, neste caso, a seguinte forma

$$(K_1 V + I Z_a)^2 = K_3 (V + I Z_a) \cdot I \cos(\varphi - \alpha)$$

Simplificando esta equação obtemos:

$$K_1 (Z + Z_a)^2 = K_3 (Z + Z_a) \cos(\varphi - \alpha)$$

$$Z = \frac{K_3}{K_1} \cos(\varphi - \alpha) - Z_a \quad (8)$$

As figuras 9 e 10 representam os circuitos de um relé mho, correspondentes respectivamente às equações (7) e (8). Na fig. 31, em anexo, estão representadas curvas de um relé mho obtidas no Laboratório de Ensaios da Companhia Nacional de Electricidade.

3 — Relés direccionais

Nas protecções de distância e como complemento dos relés de medida, torna-se necessário, por vezes, a utilização de unidades direccionais. A unidade direccional obtém-se da equação geral (1) fazendo $K_1 = K_2 = 0$ e $K_3 > 0$.

A equação toma então o aspecto

$$T = K_3 V I \cos(\varphi - \alpha) \quad (9)$$

Na condição limite teremos

$$K_3 V I \cos(\varphi - \alpha) = 0 \quad (10)$$

Esta condição só é satisfeita para $\varphi - \alpha = \pm 90^\circ$.

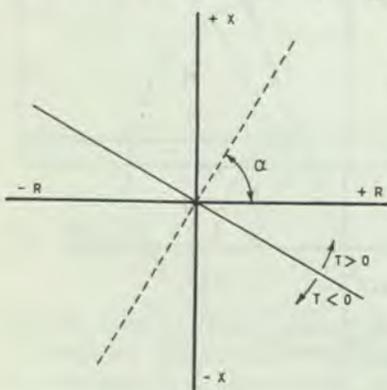


Fig. 11

A equação (10) representa uma recta que passa pela origem, fig. 11. O relé operará somente quando o vértice do vector Z se encontrar acima da recta definida pela equação.

Em todos os casos vistos até aqui, considerou-se desprezível o efeito da constante K_4 relativa ao momento da mola que tende

a desoperar o relé. Este facto é absolutamente razoável não só pelo pequeno valor desta constante, como também porque as considerações feitas em nada alteram as conclusões a que se chegou. No caso presente, porém, se atribuirmos a K_4 um valor conveniente e negativo, a característica do relé modifica-se profundamente embora mantendo-se direccional. Com efeito, se entrarmos com esta constante na equação (9), teremos:

$$T = K_3 V I \cos(\varphi - \alpha) - K_4$$

ou, na condição limite

$$K_3 V I \cos(\varphi - \alpha) = K_4$$

Atendendo a que $I = V/Z$, temos

$$\frac{V^2}{Z} \cos(\varphi - \alpha) = \frac{K_4}{K_3}$$

ou

$$Z = \frac{K_3}{K_4} V^2 \cos(\varphi - \alpha)$$

Esta equação representa-nos um número infinito de círculos para cada valor de V , fig. 12. Os centros destes círculos encontram-se todos sobre a recta que faz um ângulo α com o eixo dos RR .

Convém notar que este relé embora semelhante na forma da sua característica ao relé mho, não é um relé mho. Aqui

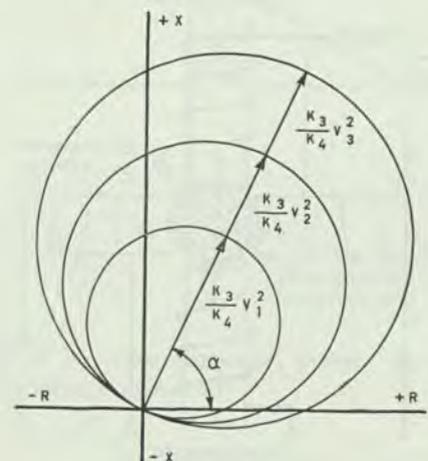


Fig. 12

o seu raio é função da tensão, ao passo que no relé *mho* é constante e igual a K_2/K_1 . Este relé não pode ser utilizado para medida de distância visto a sua zona de operação variar com a tensão.

4 — Protecções de distância

As protecções de distância na sua generalidade são constituídas essencialmente por um ou mais elementos de medida, um temporizador, relés auxiliares e quando necessário possuem também elementos direccionais e de arranque. Além disso, dispõem de um transformador com várias tomadas a fim de ajustar a tensão conveniente ao comprimento de linha a proteger. O arranjo e número de todos estes relés varia de construtor para construtor e mesmo nalguns casos as suas características aparecem com ligeiras variantes. No caso mais simples existem três elementos de medida por fase, destinados a cobrirem distâncias diferentes e escalonadas no tempo por intermédio do temporizador. Somente o primeiro ou o primeiro e parte do segundo destes elementos se destinam a cobrir a linha que o relé tem a missão de proteger. Os restantes elementos destinam-se a protecção de reserva de outras linhas e, por vezes, também da própria linha. Os relés de medida, neste caso, encontram-se alimentados directamente pelas tensões e intensidades que necessitam para a sua operação, isto é, tensões compostas e diferenças de correntes para os curto-circuitos entre fases, tensões simples e corrente homopolar para os curto-circuitos monofásicos. Desta forma, são necessárias duas protecções de distância por terminal de linha: uma para curto-circuitos envolvendo mais que uma fase e outra para curto-circuitos monofásicos. Uma protecção deste tipo dispõe, em geral, de 18 relés de medida.

Certos fabricantes, porém, constroem protecções com um único relé de medida e três relés de arranque do tipo impedância. Neste caso, e consoante o número de relés de arranque que operam, assim os enrolamentos do relé de medida são comutados para as alimentações correspondentes. Quanto aos escalões o temporizador vai também proceder a uma comutação, de molde a alimentar o relé com as tensões correspondentes aos diversos comprimentos de linha a proteger.

No presente artigo, e por simplicidade, consideramos o caso geral das protecções americanas que estão equipadas com três relés de medida por fase correspondentes a três distâncias diferentes.

Antes, porém, de entrarmos propriamente no estudo das protecções, convém analisar o que se passa no plano RX quando há um curto-circuito.

Consideremos a fig. 13 em que a recta AB nos apresenta no plano RX a impedância de uma linha entre a subestação A e a subestação B .

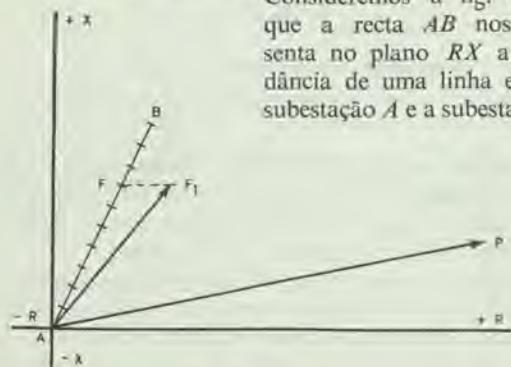


Fig. 13

Neste plano o ponto P representa a extremidade do vector Z visto de A para um estado normal de carga. Suponhamos que em dado momento se deu um curto-circuito na linha a uma distância de A , por exemplo, igual a 70% do seu comprimento total ou seja, no ponto F . Para o relé localizado na subestação A a impedância vista por ele é agora a impedância da linha até ao ponto F mais a resistência ôhmica do defeito. Se o valor da resistência do defeito for representado no plano pelo segmento FF_1 , a impedância vista por este relé será AF_1 . Isto é, em virtude do curto-circuito, o ponto P deslocou-se para F_1 ou F , consoante exista ou não resistência do defeito.

De uma maneira geral, e no estudo que se segue, considera-se que a impedância de curto-circuito vista por um relé terá o seu vértice dentro de uma área limitada do lado esquerdo pela impedância da linha e com a configuração aproximada da fig. 14. Convém verificar que, se o nosso relé for, por exemplo, um relé *mho* e se se encontrar regulado para a medida AB , uma parte da área a que se fez referência ficará fora do círculo. Na fig. 14 esta área, BCC_1 , está representada a tracejado. Inclinando a característica do relé, como no caso da circunferência a tracejado e aumentando o seu diâmetro, reduz-se o erro de medida.

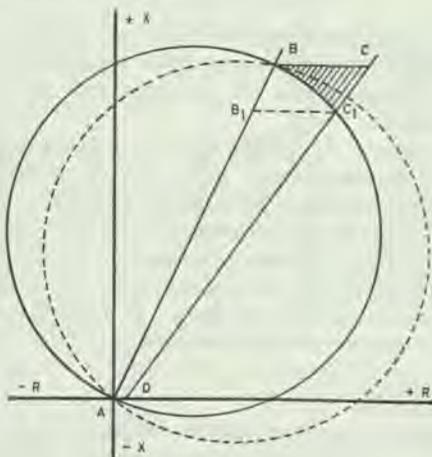


Fig. 14

Além disto, convém ter também em atenção que a precisão de medida dos relés de distância varia, consoante os fabricantes, entre $\pm 10\%$ a $\pm 20\%$. Desta forma, o relé terá que ser regulado para 90% a 80% do comprimento da linha, a fim de não se correr o risco de ele actuar em curto-circuitos que se dêem no início de linhas adjacentes. Este facto dos relés terem que ser regulados para um comprimento de 80% a 90% da linha tem vários inconvenientes que só podem ser completamente eliminados com a utilização de circuitos-pilotos a que adiante se fará referência.

4.1 — PROTECÇÕES DE IMPEDÂNCIA

As protecções de impedância são constituídas, em geral, por três relés de impedância Z_1 , Z_2 e Z_3 correspondentes à primeira, segunda e terceira zonas e por um temporizador com dois contactos de temporizações independentes T_1 e T_2 . Como este relé não é direccional, torna-se necessário incorporar-lhe também um elemento direccional UD .

Consideremos agora a fig. 15 a) em que estão indicadas quatro subestações A , B , C e D . Os números 1, 2, ..., 6 representam os conjuntos relé e disjuntor. Vamos ver o que se passa com o relé que comanda o disjuntor 1. Suponhamos que AA_1 representa 80% do comprimento da linha ou seja

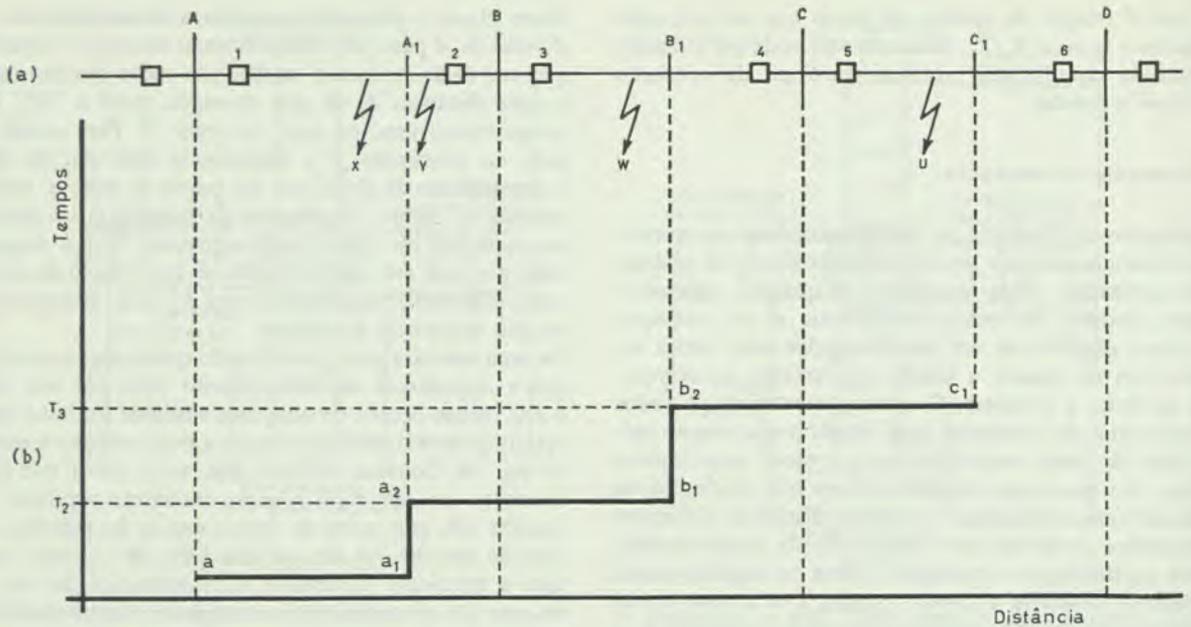


Fig. 15

a distância máxima a proteger pelo relé 1. Desta forma, o relé deverá operar instantaneamente neste troço conforme se indica no diagrama de escalonamento fig. 15 b) pelo segmento aa_1 .

No comprimento $A_1 B_1$, por razões que agora não interessa considerar, foi estabelecida uma zona de protecção de reserva ao fim do tempo T_2 , segundo escalão, a que corresponde no diagrama de escalonamento o segmento $a_2 b_1$. Para o terceiro escalão as coisas passam-se de forma semelhante. Na fig. 16 encontram-se representadas no plano RX as impedâncias das linhas AB , BC e CD , bem como as carac-

bobina BD de disparo do disjuntor fig. 17. Se o curto-circuito se der no ponto Y , operam apenas os relés Z_2 e Z_3 . O relé temporizador T , cujo arranque é dado por um contacto auxiliar do relé Z_3 , inicia a contagem do tempo e, ao fim de t_2 segundos, fecha o seu contacto T_2 que estabelece o circuito de disparo do disjuntor.

Se o curto-circuito se der no ponto W as operações são semelhantes simplesmente o contacto T_2 não deverá chegar a fechar visto que compete ao disjuntor 3 eliminar o defeito. Se este, porém, e por avaria não o fizer, ao fim de t_2 segundos ele será eliminado por intermédio do disjuntor 1.

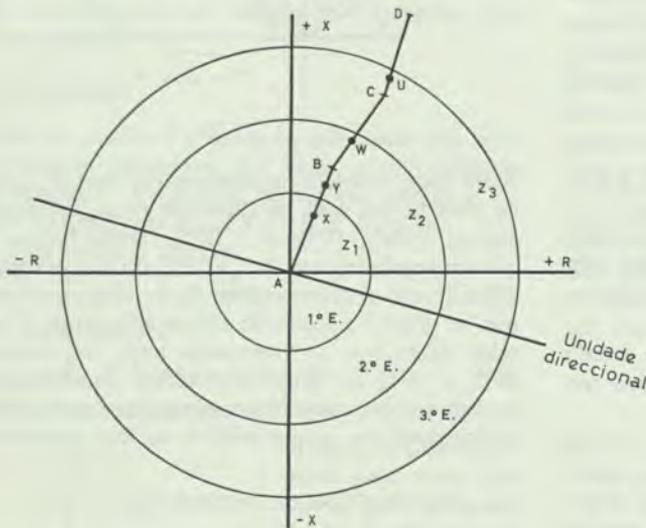


Fig. 16

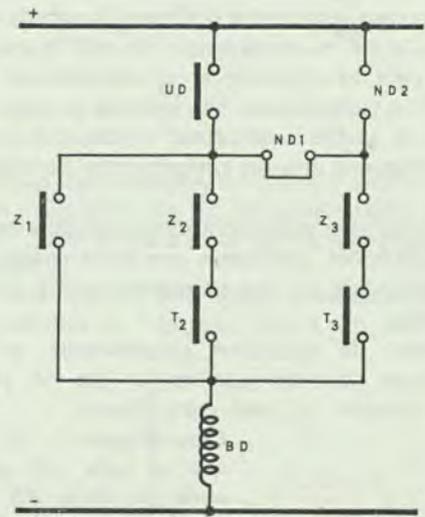


Fig. 17

terísticas de operação do relé correspondentes aos três escalões e na fig. 17 o circuito simplificado do relé de impedância.

O relé UD , correspondente ao elemento direccional, operará para todos os curto-circuitos na direcção AD .

Suponhamos agora que um curto-circuito se dá no ponto X das figs. 15 a) e 16. Como este ponto está dentro da zona correspondente ao 1.º escalão, os relés Z_1 , Z_2 e Z_3 da protecção 1 operam, mas só primeiro estabelece o circuito da

Para um curto-circuito no ponto U compete ao disjuntor 5 a sua eliminação em 1.º escalão. Se ele falhar, há o recurso do disjuntor 3 em 2.º escalão e se este falhar, temos como último recurso o disjuntor 1 no 3.º escalão.

Casos há em que interessa que o 3.º escalão não seja direccional, isto é, que, como recurso, actue não só na direcção AB como também em sentido contrário. Para isso há que retirar, fig. 17, o curto-circuito ND_1 e pôr em curto-circuito os terminais ND_2 .

4.2 — PROTECÇÃO DE REACTÂNCIA

A protecção de reactância é constituída por dois relés de reactância para o 1.º e 2.º escalões, um relé *mho* e um temporizador. O relé *mho* desempenha uma função tripla, de unidade direcciona, 3.º escalão e limitador de zona de operação.

Por vezes esta protecção dispõe de um único relé de reactância para o 1.º e 2.º escalão. A mudança de escalão é feita por comutação das tensões de alimentação deste relé, comandada pelo contacto do temporizador de zona de operação. É corrente também denominar o relé *mho* do 3.º escalão por relé de arranque.

O diagrama deste relé encontra-se representado na fig. 18 e o esquema de princípio na fig. 19. O seu funcionamento é semelhante ao já descrito no parágrafo anterior.

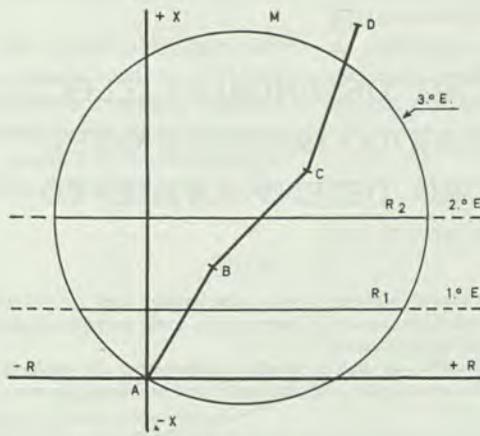


Fig. 18

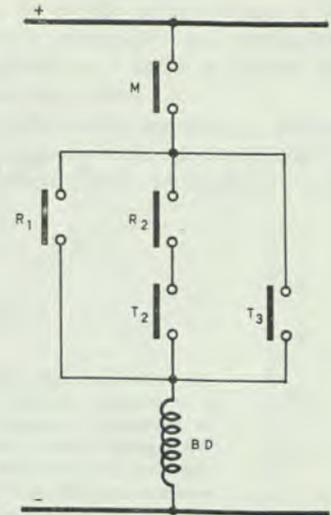


Fig. 19

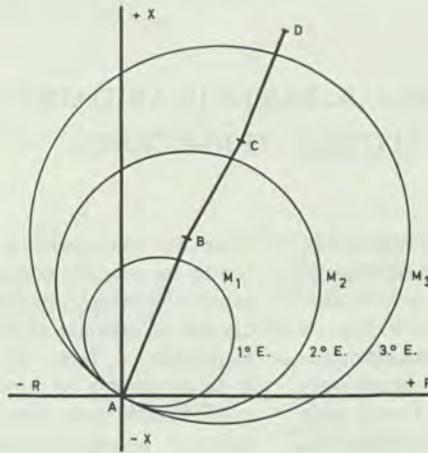


Fig. 20

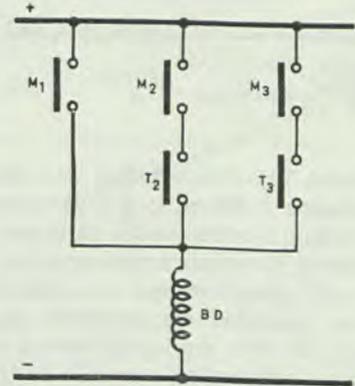


Fig. 21

4.3 — PROTECÇÃO MHO

As protecções com relés *mho* são constituídas por três relés *mho* M_1 , M_2 e M_3 e um temporizador.

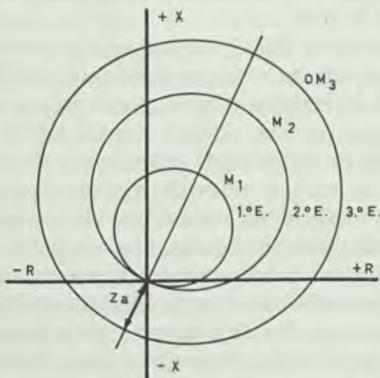
As fig. 20 e 21 mostram respectivamente as características desta protecção no plano RX e o diagrama de ligações. O funcionamento desta protecção é em tudo semelhante ao descrito para as protecções de impedância.

Por razões diversas, porém, em função de cada caso particular, há por vezes vantagem de deslocar a característica referente ao relé M_3 . São correntes protecções *mho* em que

o relé M_3 se apresenta deslocado como se mostra na fig. 22 a), b) e c). Neste caso, este relé é normalmente referenciado pela designação OM_3 .

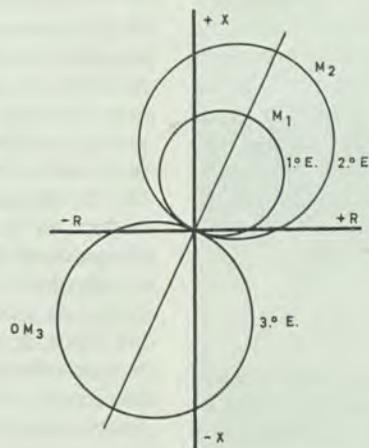
FERNANDO NOBRE RIBEIRO GOMES
Engenheiro electrotécnico (I.S.T.)

CHEFE DE SERVIÇOS DO LABORATÓRIO DE ENSAIOS
DA COMPANHIA NACIONAL DE ELECTRICIDADE



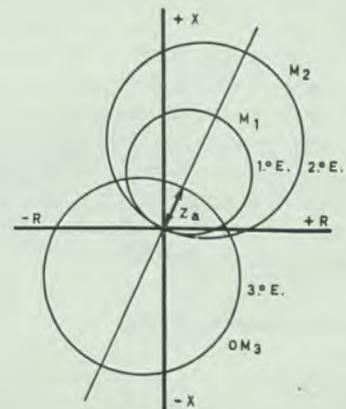
Deslocada

(a)



Invertida

(b)



Invertida e deslocada

(c)

Fig. 22