

The background features a collage of three images related to power lines. On the left, a tower is silhouetted against a bright orange sunset. In the center, a semi-transparent grey rectangle contains a faded image of a tower. On the right, a tower stands in a green field under a blue sky with clouds. The title text is overlaid on the central grey rectangle.

# Relés de distância

*Trabalho Elaborado por:  
Bruno Miguel Martins Antunes  
Luís Gonçalo de Oliveira Silva*

# Relé

- Dispositivo cuja função é detectar a ocorrência de condições anormais de funcionamento de um S.E.E., dando ordem de abertura a disjuntores ou dando um aviso adequado.

# Relés de distância

- Realizam a comparação entre uma corrente  $I$  e uma tensão  $V$  medidas na mesma extremidade do elemento protegido;
- O quociente entre a tensão e a corrente resulta numa impedância ( $Z$ );

- Sendo:

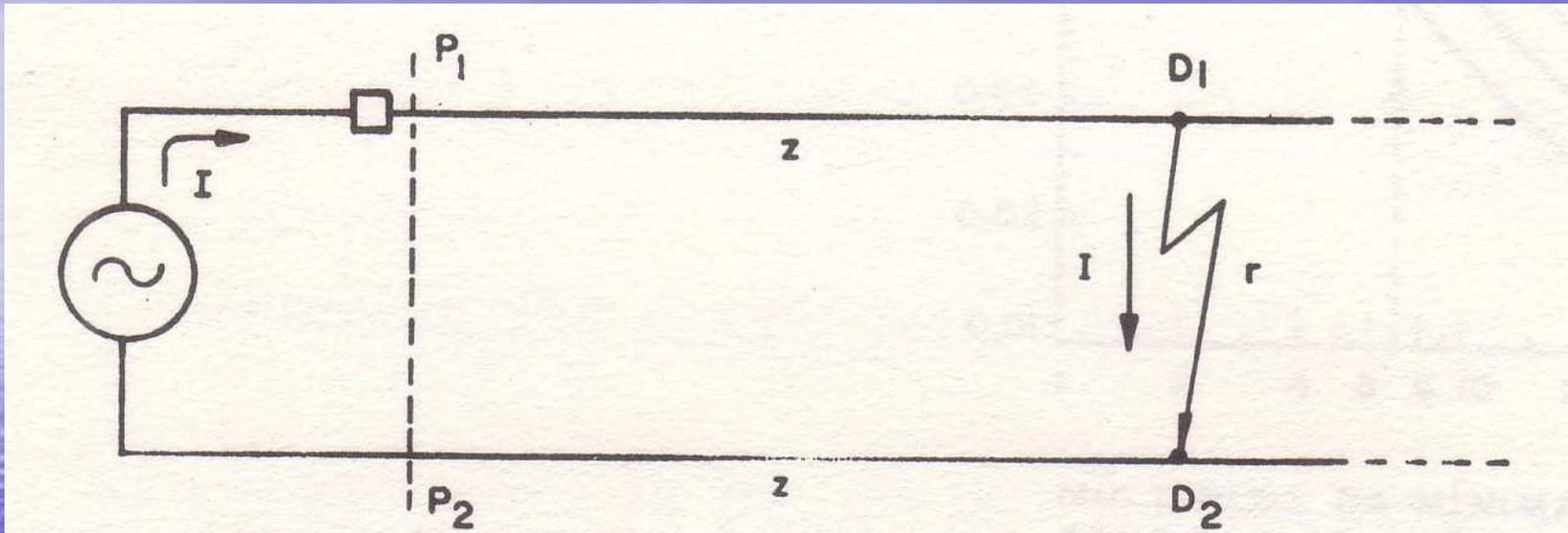
$$Z = \rho l \div s$$



- ☞ A distância desde o ponto onde o equipamento está instalado até ao local onde ocorreu o defeito é proporcional a  $Z$ .

# Relés de distância

- Exemplo do princípio de medição:



$$V_P = V_{P1} - V_{P2} = (V_{P1} - V_{D1}) + (V_{D1} - V_{D2}) + (V_{D2} - V_{P2})$$
$$= zI + rI + zI \quad \text{pois } r = 0$$

$$V_P = 2.z.I$$



$$2.z = \frac{V_P}{I}$$

# Relés de distância

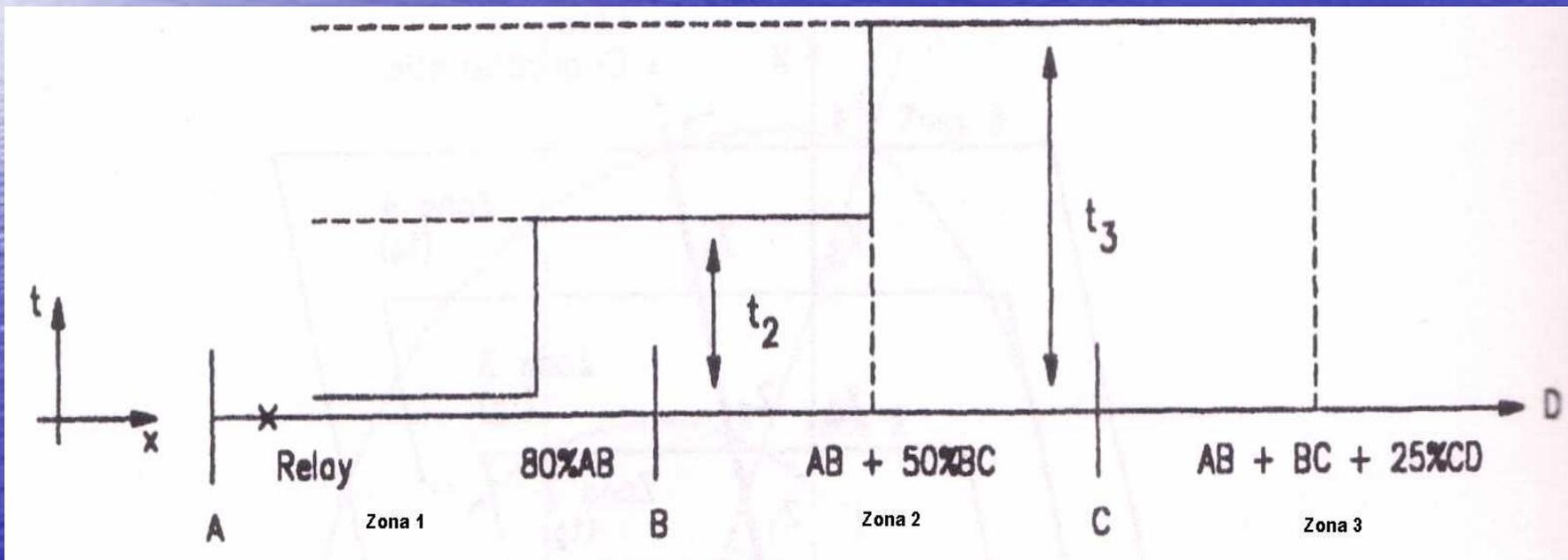
- São mais rápidos, selectivos e menos afectados pela variação da capacidade geradora, do que os relés de máximo corrente;
- A operação do relé não é afectada por variações de carga ou por variações de tensão, após defeito;
- O tempo de operação permanece aproximadamente constante;
- Não é afectado por variações de produção ou alterações da configuração do sistema.

# Relés de distância

- Causas perturbadoras na medição:
  - Insuficiência ou inexistência de transposição dos condutores da linha;
  - Variação da impedância das linhas em paralelo;
  - Erros dos transformadores de medida e de tensão;
  - Variações da temperatura ambiente;
  - Construção do relé.

# Regulação

- Usualmente são usadas 3 zonas de protecção na direcção do defeito;
- Cada zona tem um tempo de disparo diferente.



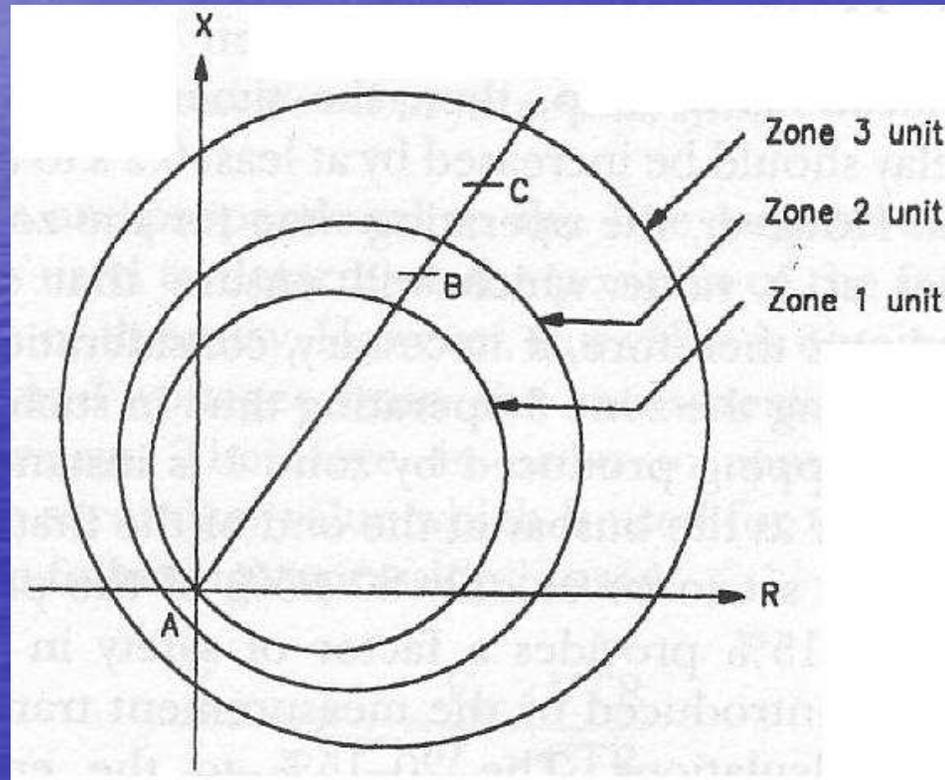
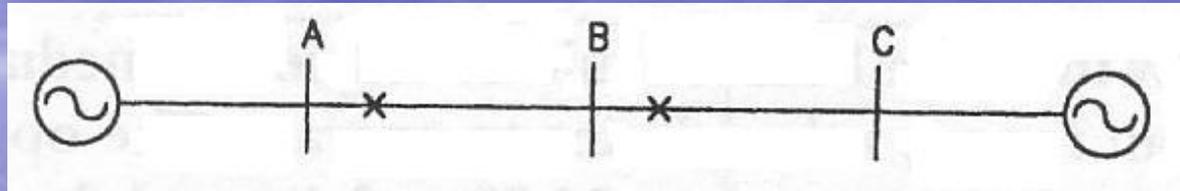
Zonas de protecção de relés de distância para um sistema radial

# Regulação

- Zona 1 – Deve proteger entre 80 e 85% do comprimento da linha onde está instalado;
  - A protecção deverá disparar instantaneamente a qualquer defeito.
- Zona 2 – Deve proteger o restante da linha a partir do ponto anterior e mais 50% da linha seguinte;
  - Tempo de disparo entre 0,25s e 0,4s.
- Zona 3 – Deve fazer a protecção total das zonas 1 e 2 e mais 25% da linha seguinte;
  - Tempo de disparo entre 0,6s e 1 s.

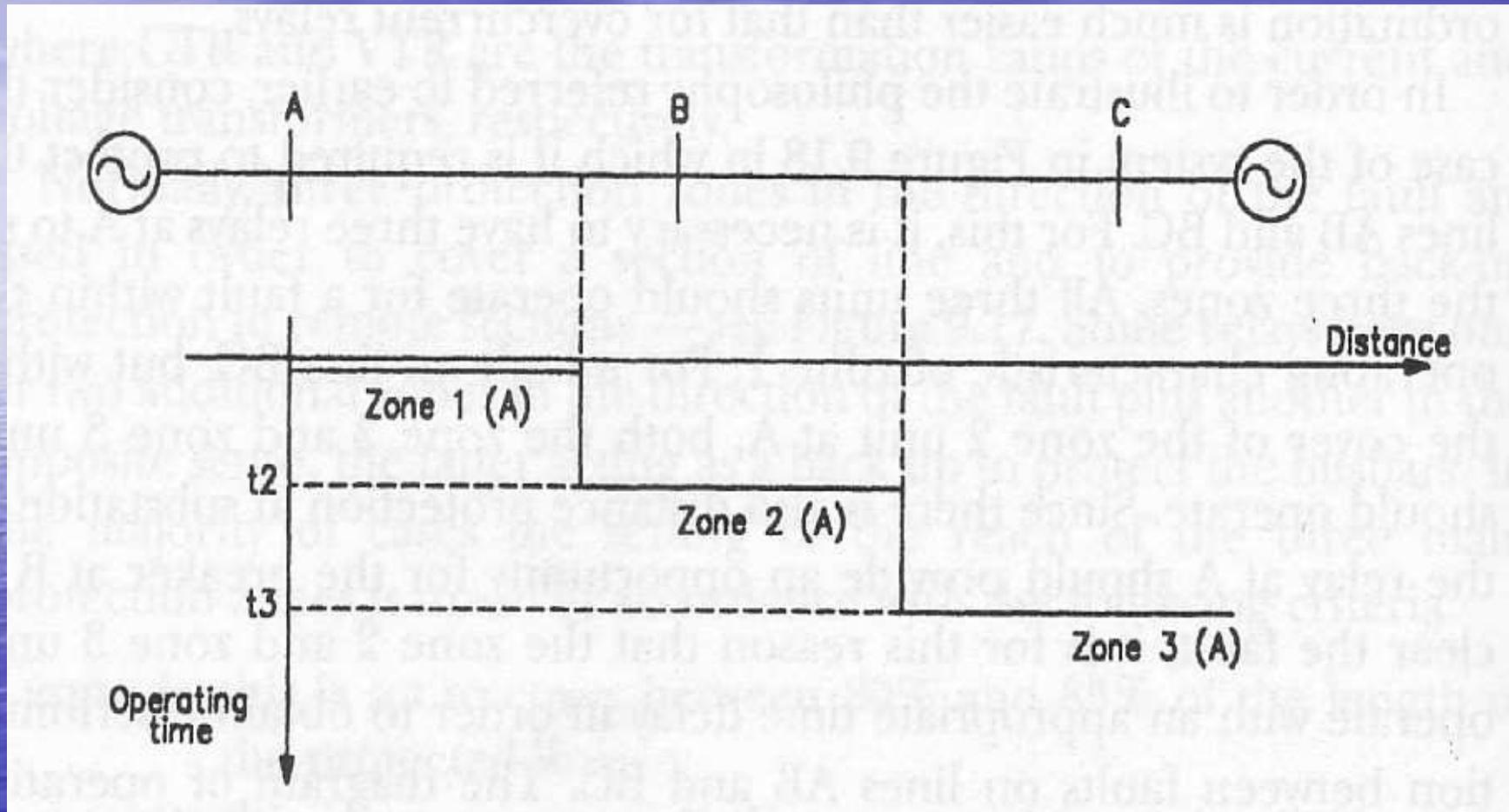
# Regulação

Exemplo:



Característica de operação da protecção de distância localizada em A

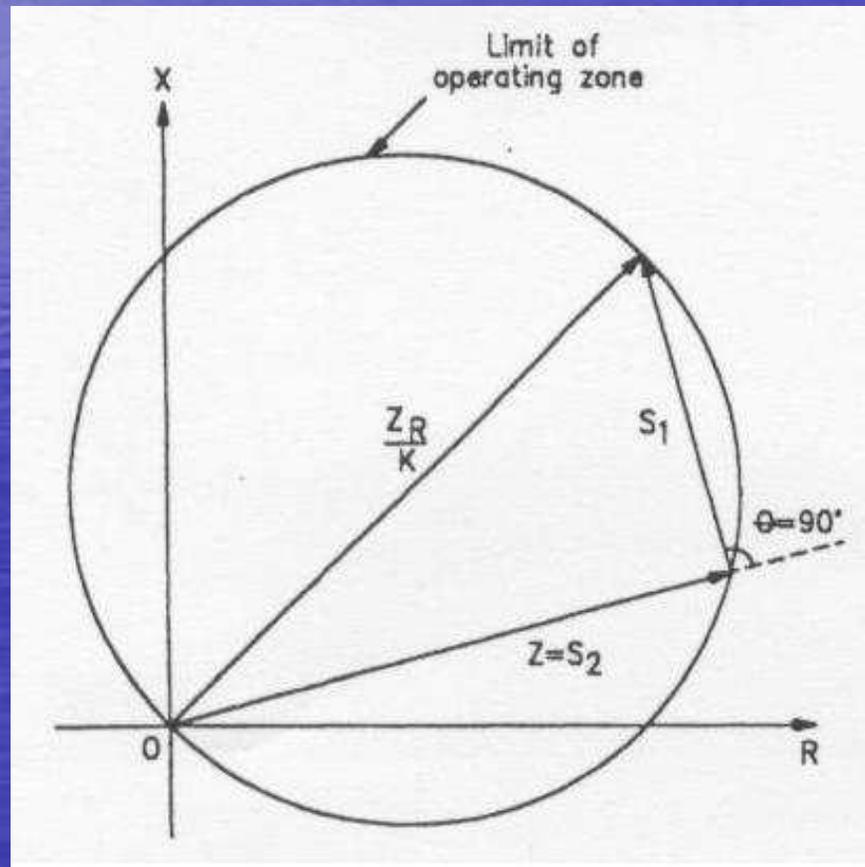
# Regulação



Tempos de operação da protecção de distância localizada em A

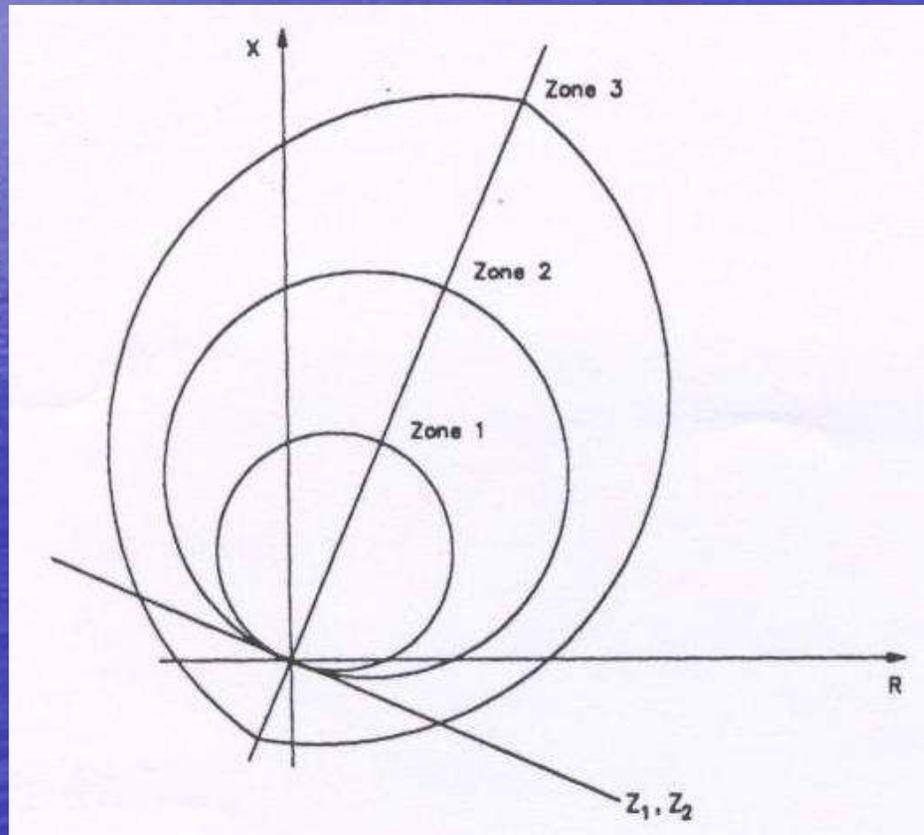
# Características de Operação

- Relé com característica circular:



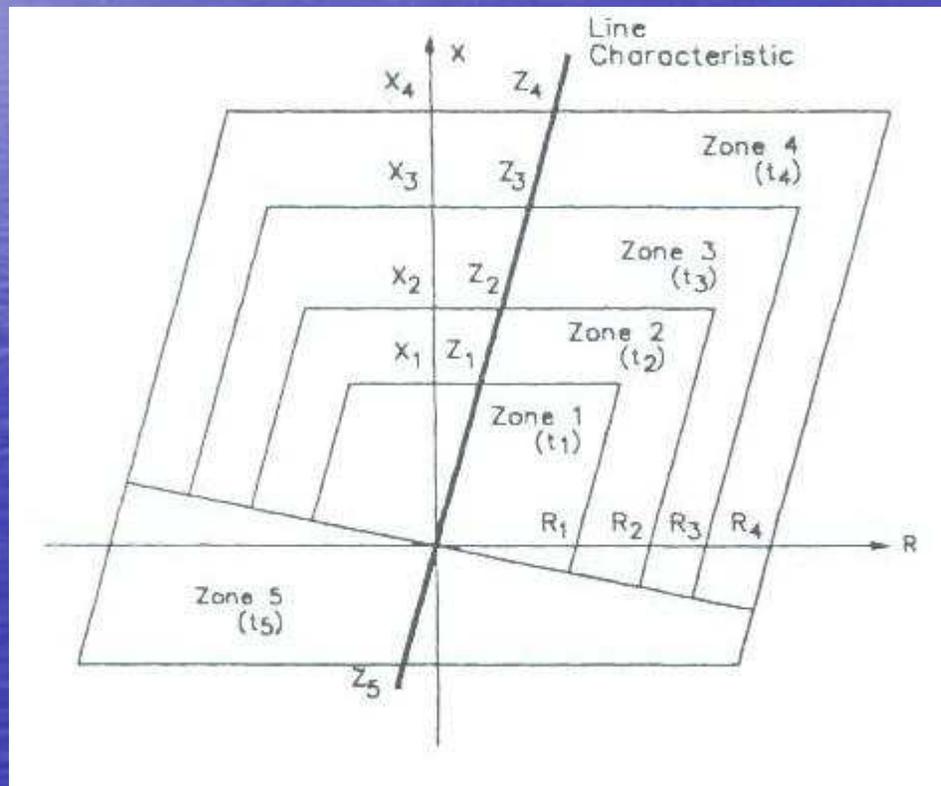
# Características de Operação

- Relé com característica de lente:



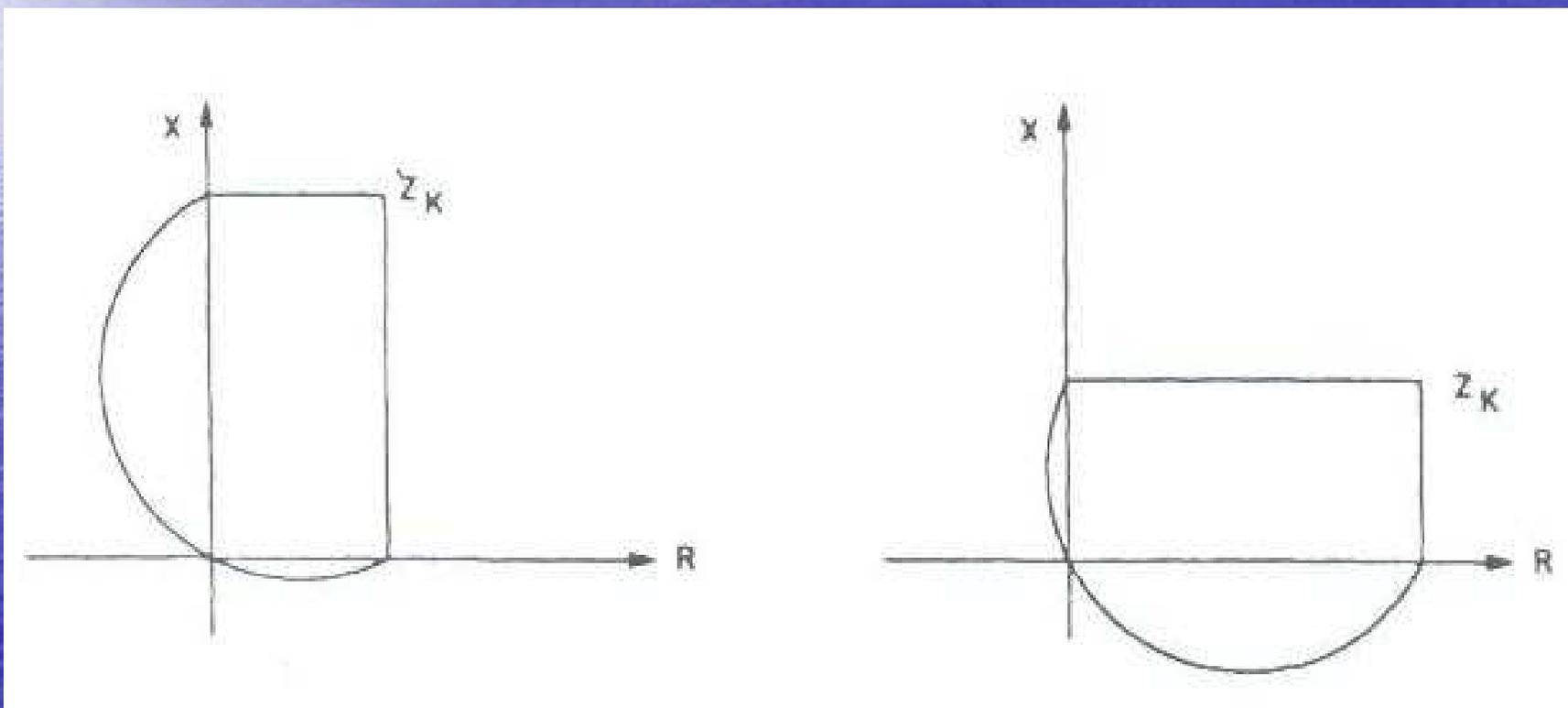
# Características de Operação

- Relé com característica poligonal:



# Características de Operação

- Relé com característica combinada:



# Relés de distância

Impedância aparente:

$$Z = \frac{U}{I}$$

Como obtê-la?

Tipos de relés:

- Relés de impedância ou ohm;
- Relés de reactância;
- Relés mho ou de admitância.

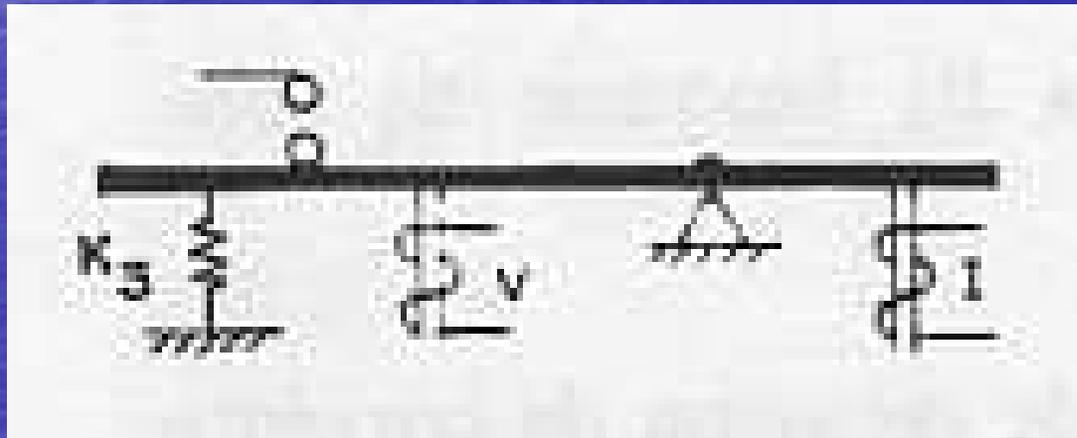
# Relés de impedância ou ohm

- Relé de máxima intensidade com binário resistente proporcional ao quadrado da tensão.
- Indicados para protecção de fase;
- Usados em linhas de comprimento médio;
- Funcionam mesmo que a corrente de curto circuito seja pequena;
- O tempo de disparo é independente do valor da corrente;
- Pouco sensíveis às oscilações do sistema;
- Exigem adicional unidade direccional;
- Mais afectados pela resistência de arco do que os relés de reactância e menos que os relés tipo mho;

# Relés de impedância ou ohm

- A equação do binário é dado por:

$$T = K_1 \cdot I^2 - K_2 \cdot U^2 - K_3$$

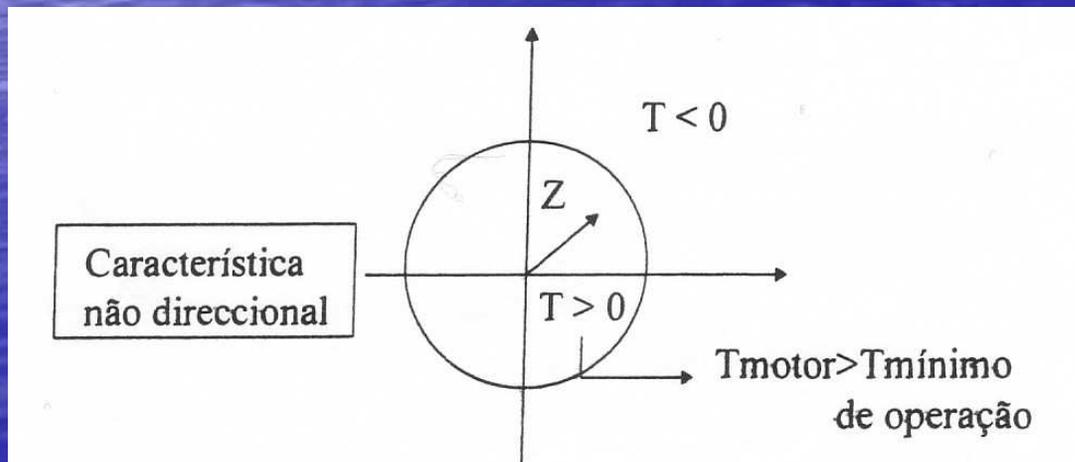


# Relés de impedância ou ohm

- No limiar de funcionamento do relé o binário resultante é nulo ( $T=0$ ), pelo que:

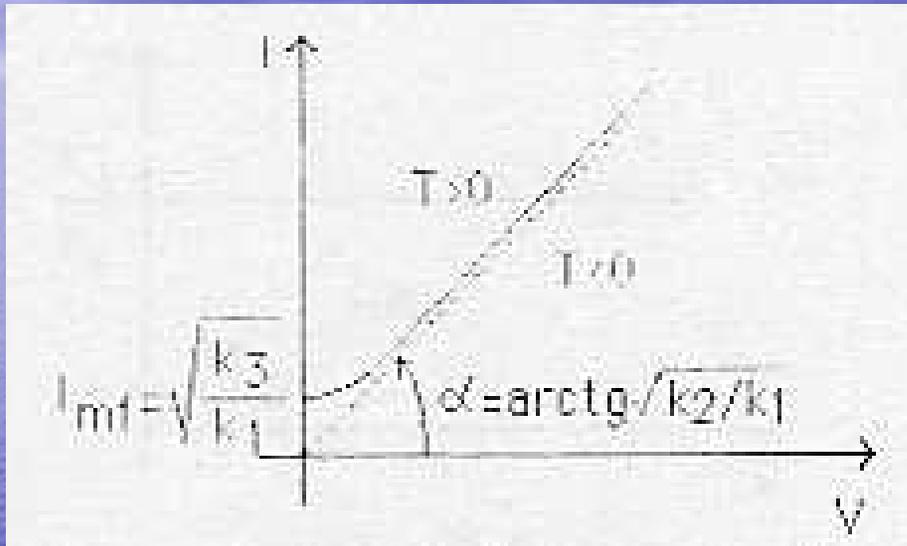
$$\frac{U^2}{I^2} = \frac{K_1}{K_2} - \frac{K_3}{K_2 \cdot I^2} \Leftrightarrow$$
$$\Leftrightarrow Z = \frac{U}{I} = \sqrt{\frac{K_1}{K_2} - \frac{K_3}{K_2 \cdot I^2}}$$

- No plano R-X e desprezando  $K_3/K_2 \cdot I^2$ , obtém-se:



# Relés de impedância ou ohm

- No plano U-I obtêm-se :



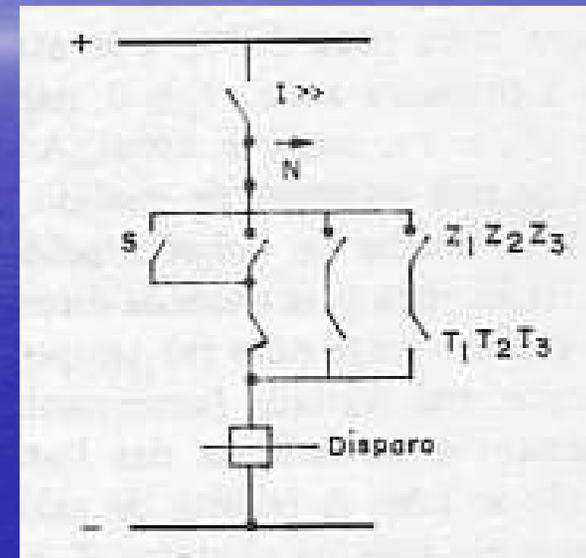
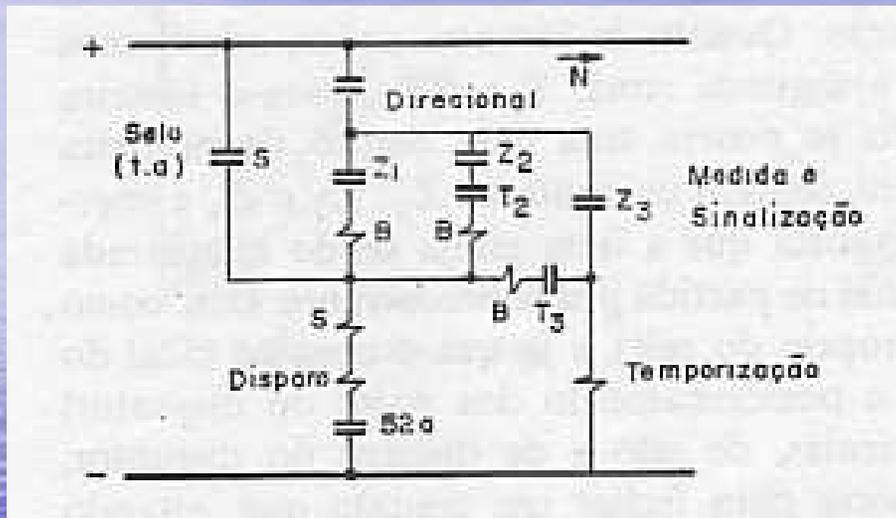
- O valor mínimo de operação ocorre quando  $U=0$  o que implica:

$$I_{min} = \sqrt{\frac{K_3}{K_1}}$$

- Para um valor de corrente muito baixo o relé não vai actuar mas raramente a operação deste se faz a correntes baixas.

# Relés de impedância ou ohm

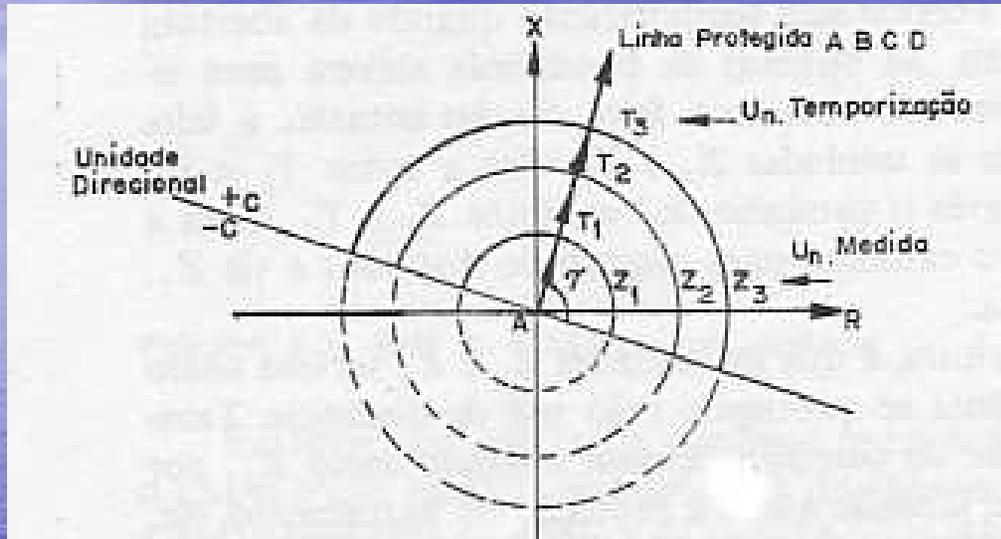
- Exemplo:



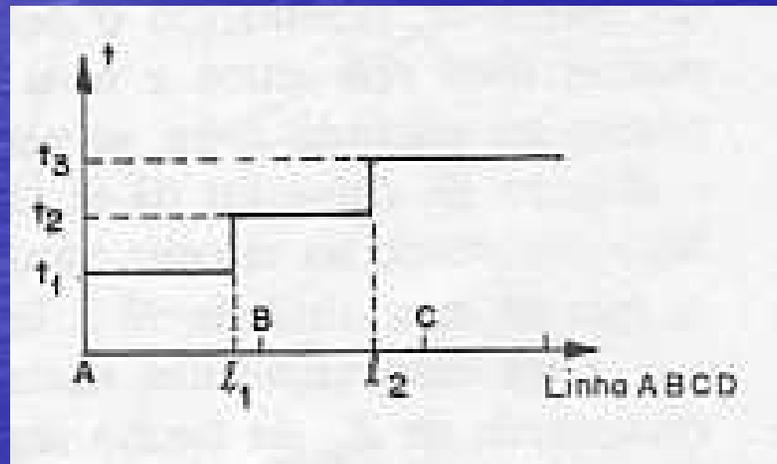
- As características de cada uma das três unidades são independentes e ajustáveis separadamente;
- Para um valor de impedância no interior de  $Z_1$  as três unidades vão actuar . A operação de  $Z_1$  e da unidade direccional irá fazer actuar o disjuntor num intervalo de tempo bastante curto;

# Relés de impedância ou ohm

- Esquemáticamente temos os seguintes diagramas no plano R-X:



- A característica de actuação temporal desta protecção é o seguinte:



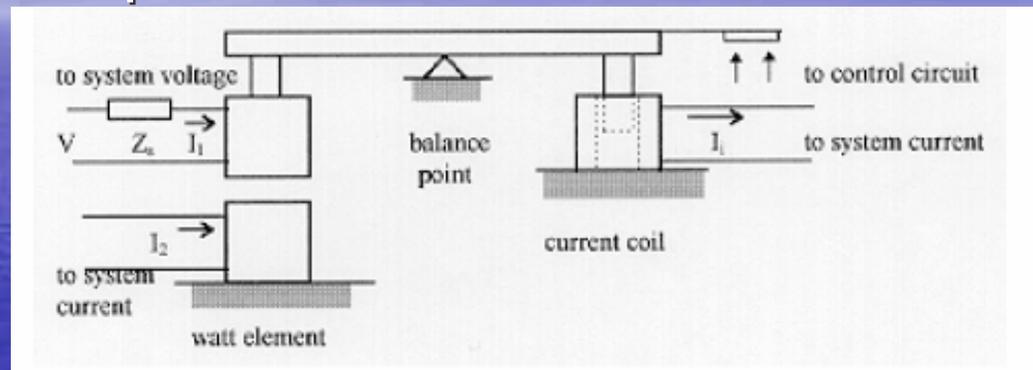
# Relé de Reactância

- É um relé de máximo de intensidade com restrição direccional;
- São particularmente indicados para a protecção de fase, em linhas de curto comprimento;
- Não são afectados pelos arcos eléctricos que se formam na altura do defeito;
- São utilizados na protecção contra defeitos à terra visto que a resistância de terra pode assumir valores muito variados;
- São bastante afectados pelas oscilações e também exigem adicional unidade direccional.

# Relé de Reactância

- A equação do binário é dado por:

$$T = K_1 \cdot I^2 - K_2 \cdot U \cdot I \cdot \text{sen}(\Theta) - K_3$$



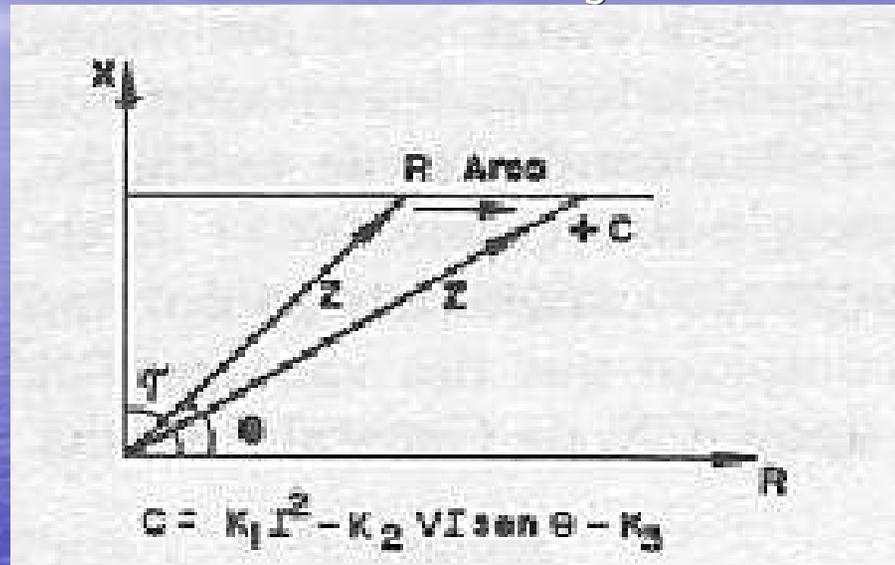
- O valor de  $\theta$  é definido como sendo positivo quando a corrente  $I$  está atrasada relativamente a tensão  $U$ ;
- No ponto de equilíbrio o Binário é nulo ( $T=0$ ) e portanto:

$$\begin{aligned} K_1 \cdot I^2 &= K_2 \cdot U \cdot I \cdot \text{sen}(\Theta) + K_3 \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow K_1 &= K_2 \cdot \frac{U}{I} \cdot \text{sen}(\Theta) + \frac{K_3}{K_2 \cdot I^2} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \frac{U}{I} \cdot \text{sen}(\Theta) &= Z \cdot \text{sen}(\Theta) = \frac{K_1}{K_2} - \frac{K_3}{K_2 \cdot I^2} \end{aligned}$$

# Relé de Reactância

- Desprezando o efeito de  $K_3$  então :

$$X = \frac{K_1}{K_2}$$



- Teremos então um relé apenas sensível ao valor de  $X$  (constante). Todos os pontos abaixo da característica de operação fazem o binário ser positivo e portanto dá-se actuação do relé;
- Este relé é portanto insensível a arcos de natureza resistiva associados ao defeito.

# Relé de Admitância (mho)

- É um relé direccional com restrição por tensão;
- Combina propriedades dos relés de impedância e direccionais;
- São indicados para a protecção de fase em linhas longas não envolvendo a terra, em particular para as de alta-tensão, sujeitas a sérias oscilações de potência;
- São bastante afectados pela resistência do arco voltaico;
- Actua apenas a jusante da zona de instalação;
- Alcance varia com o ângulo de defeito;
- Os mais selectivos.

# Relé de Admitância (mho)

- Relé com binário motor de indução e binário resistente proporcional ao quadrado da tensão;

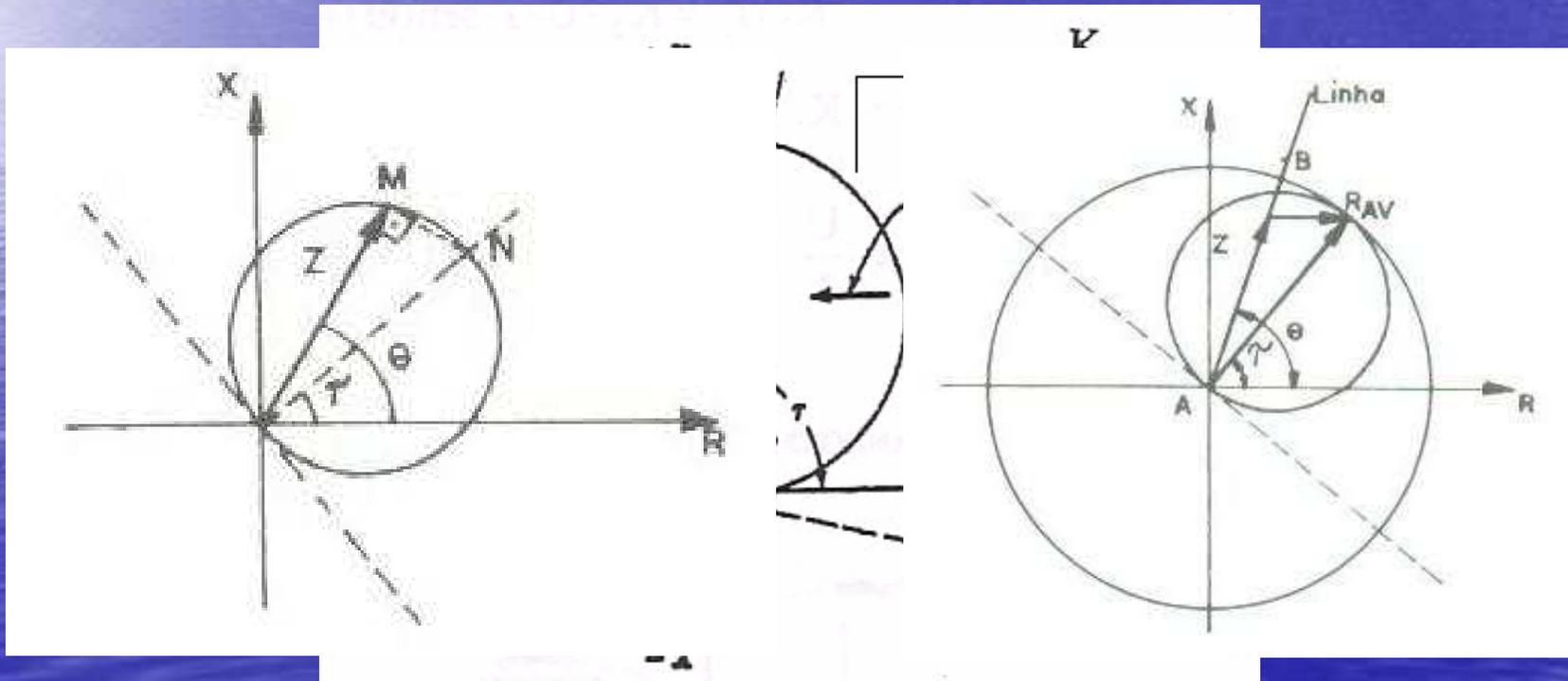
$$T = K_1 \cdot V \cdot I \cdot \cos(\Theta - T) - K_2 \cdot V^2 - K_3$$

- No limiar da operação ( $T=0$ ) e desprezando  $K_3$  teremos:

$$K_1 \cdot U \cdot I \cdot \cos(\Theta - \tau) = K_2 \cdot U^2 \Leftrightarrow$$
$$\Leftrightarrow \frac{K_1}{K_2} \cdot I \cdot \cos(\Theta - \tau) = \frac{U}{I} = Z$$

# Relé de Admitância (mho)

- No plano R-X teremos a equação de uma circunferência, fixando  $K_1, K_2$  e  $\tau$  de forma a que, para cada valor de  $\theta$  teremos um ponto  $(Z, \theta)$  sobre a circunferência;



- Estes relés possuem uma direccionalidade intrínseca.

# Relés de distância em linhas com compensação série

- As principais razões para a utilização da compensação série são:
  - Melhoria no equilíbrio da potencia reactiva;
  - Melhoria na estabilidade e desempenho do sistema;
  - Melhoria na capacidade de transmissão;
  - Melhoria na regulação de tensão;
  - Redução das perdas do sistema;

# Relés de distância em linhas com compensação série

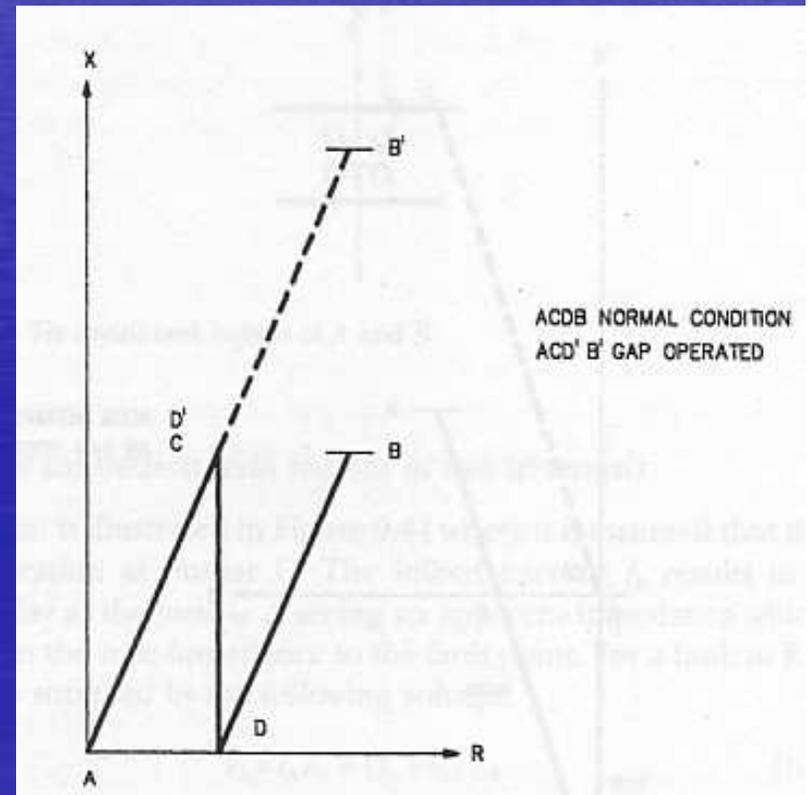
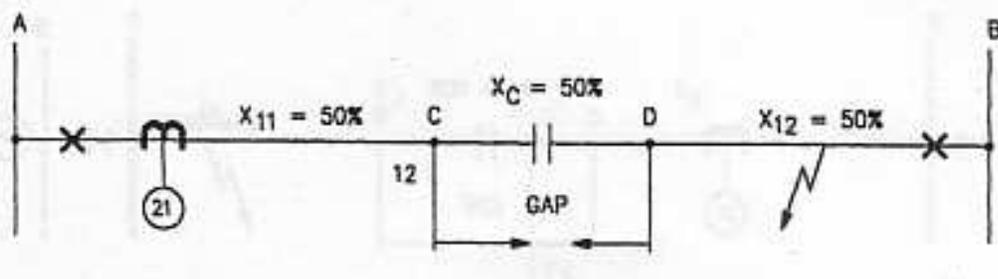
- O trânsito de potência activa entre dois pontos de um sistema poder ser dada por:

$$P = \frac{V_1 \cdot V_2 \cdot \sin(\theta_1 - \theta_2)}{X}$$

- A introdução de condensadores série reduz a reactância global da linha logo aumenta o trânsito de potencia activa;
- A quantidade de compensação é cotada em termos de percentagem, assumindo valores de compensação entre 20 a 70%.

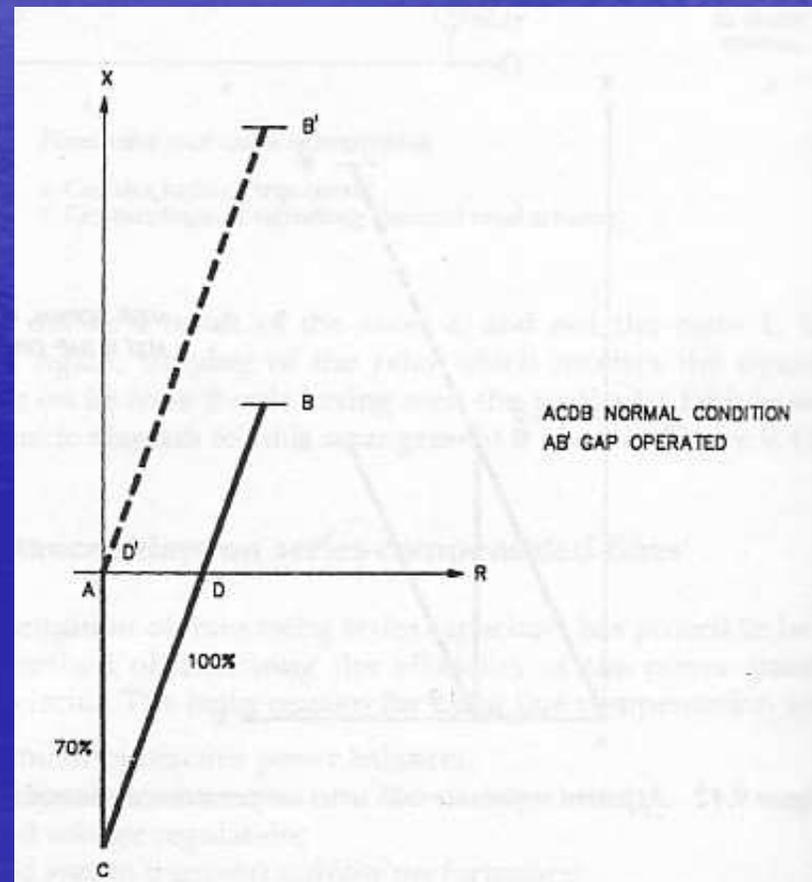
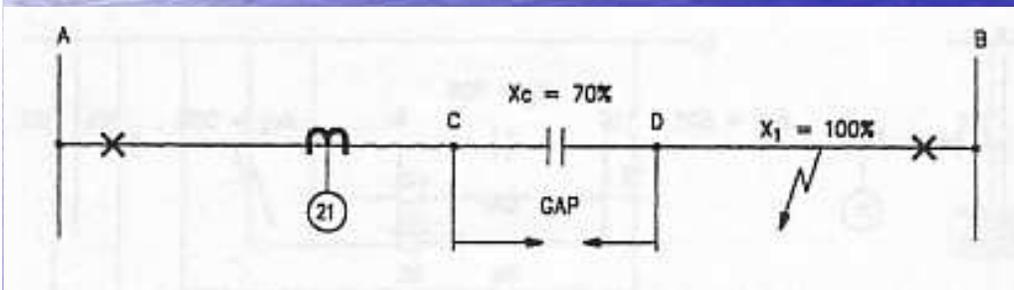
# Relés de distância em linhas com compensação série

- Desvantagens do uso de compensação:
  - Provoca alteração no valor da impedância vista pelo relé, o defeito pode parecer mais próximo;



# Relés de distância em linhas com compensação série

- O defeito pode parecer que está antes da localização do relé, pois este pode ver o defeito no sentido inverso.



# A resistência do arco eléctrico na protecção de distância

- Defeito franco (defeito resistivo):
  - A impedância vista pelo relé é igual à impedância do defeito. O relé funciona normalmente.
- Defeito não franco (não resistivo):
  - Envolve um arco eléctrico ou uma impedância. O relé apresenta problemas de funcionamento.

# A resistência do arco eléctrico na protecção de distância

- O efeito da resistência do arco é relevante para a definição das zonas de protecção;
- O efeito da resistência de arco pode ser calculada pela expressão:

$$R_{arco} = \frac{8750.(s+ut)}{I} \Omega$$

Em que:

s – Espaçamento entre condutores

u – Velocidade do vento

t – Tempo de actuação da protecção

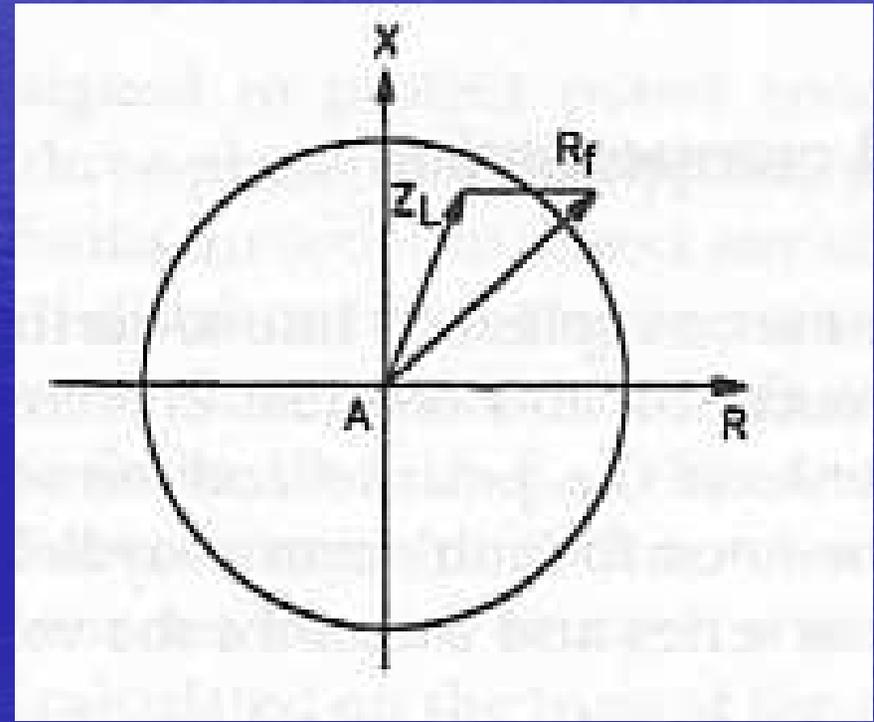
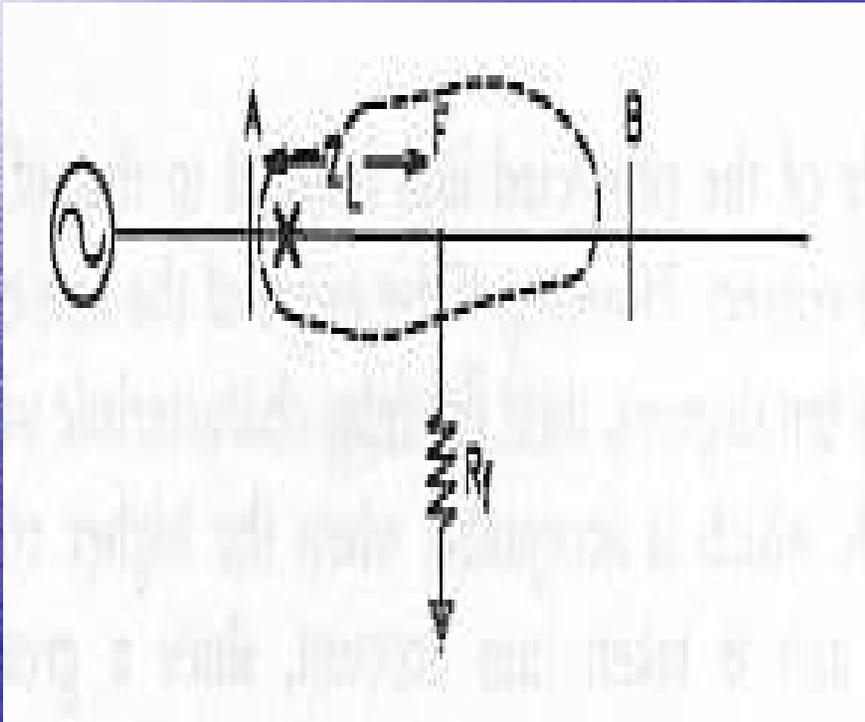
I – Corrente no defeito

$R_{arco}$  – Resistência do arco

- Pode-se constatar que o efeito da resistência do arco é mais relevante na extremidade mais afastada (ponto onde a corrente vista pelo relé é menor).

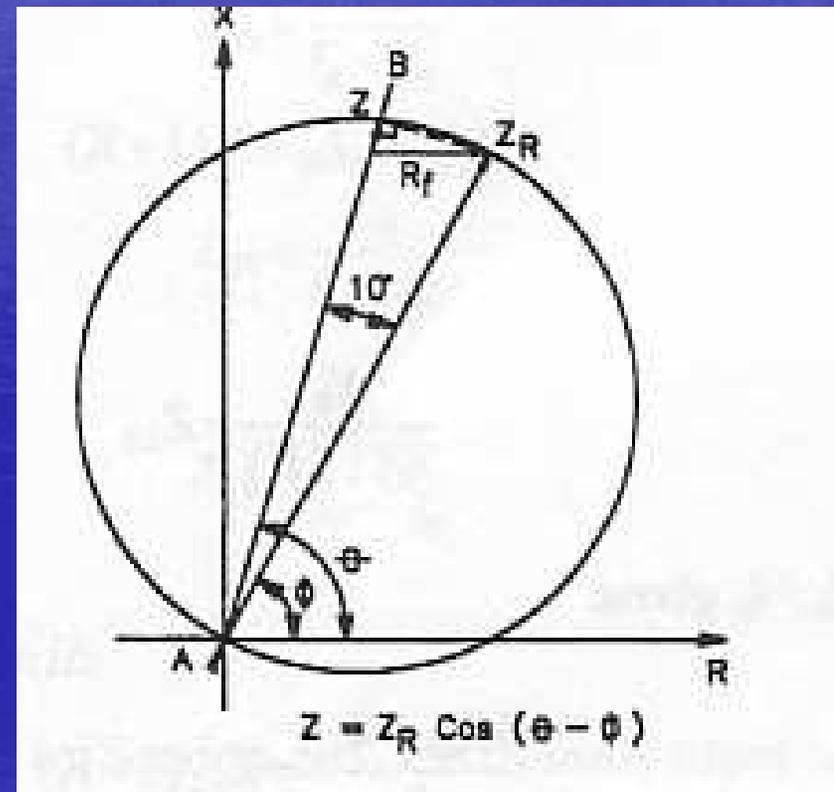
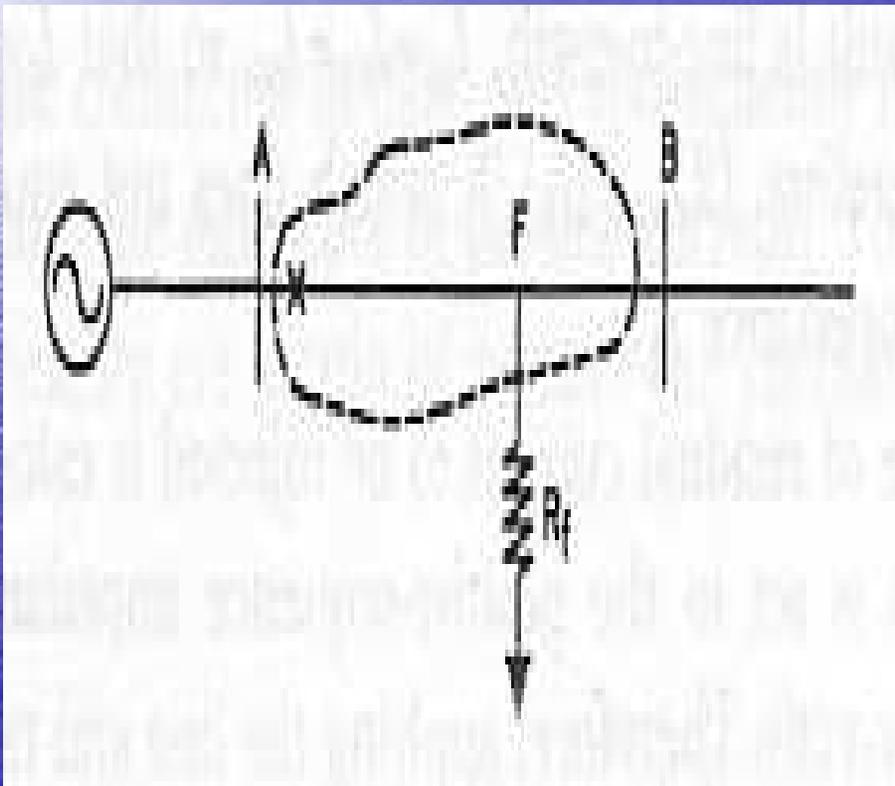
# A resistância do arco eléctrico na protecção de distância

- O alcance do relé é inferior devido à resistância do arco.



# A resistância do arco eléctrico na protecção de distância

- Ajuste de relés mho para efeitos com arco eléctrico.



# Operação dos relés na ausência de tensão

- Em situações em que  $U$  é próximo de zero a operação dos relés de distância está mal definida;
- Para um relé direccional no limiar da operação:

$$T=0 \Leftrightarrow U I \cos(\Theta - \gamma) = 0 \Rightarrow$$

Equação satisfeita por qualquer par de valores de  $I$ ,  $\theta$ , para  $U=0$ .

- Para um relé mho no limiar da operação:

$$T=0 \Leftrightarrow Z_{regulação} \cdot I \cos(\Theta - \gamma) = U \Rightarrow$$

Se  $U=0$  então o ângulo entre  $U$  e  $Z_{regulação}$  ( $\theta$ ) não pode ser determinado.

# Defeitos próximos do relé

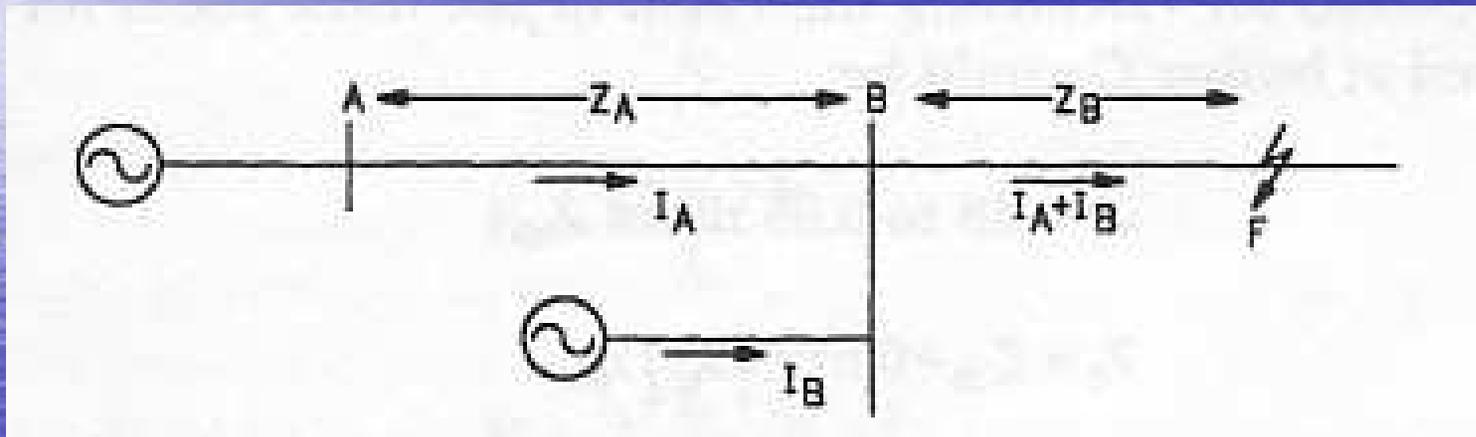
- A característica de operação do relé torna-se pobre em torno da origem, originando um problema;
- Perda de direccionalidade – poderão ocorrer erros na identificação do sentido de uma corrente de defeito.

## Como solucionar?

- Incluir um circuito que memorize a tensão pré-definida. A tensão é memorizada durante alguns ciclos;
- O circuito não é útil quando a linha está a ser carregada. Utiliza-se relés de máxima intensidade para proteger a linha de defeitos que ocorram na proximidade do relé.

# O efeito das potências injectadas nos relés de distância

- Deve-se ter em conta quando existem um ou mais geradores na zona de protecção do relé de distância;
- As potências injectadas podem contribuir para a corrente de defeito sem serem vistas pelo relé de distância.



$$V_A = I_A Z_A + (I_A + I_B) Z_B$$

$$\frac{V_A}{I_A} = Z_A + \left[ 1 + \frac{I_B}{I_A} \right] Z_B$$

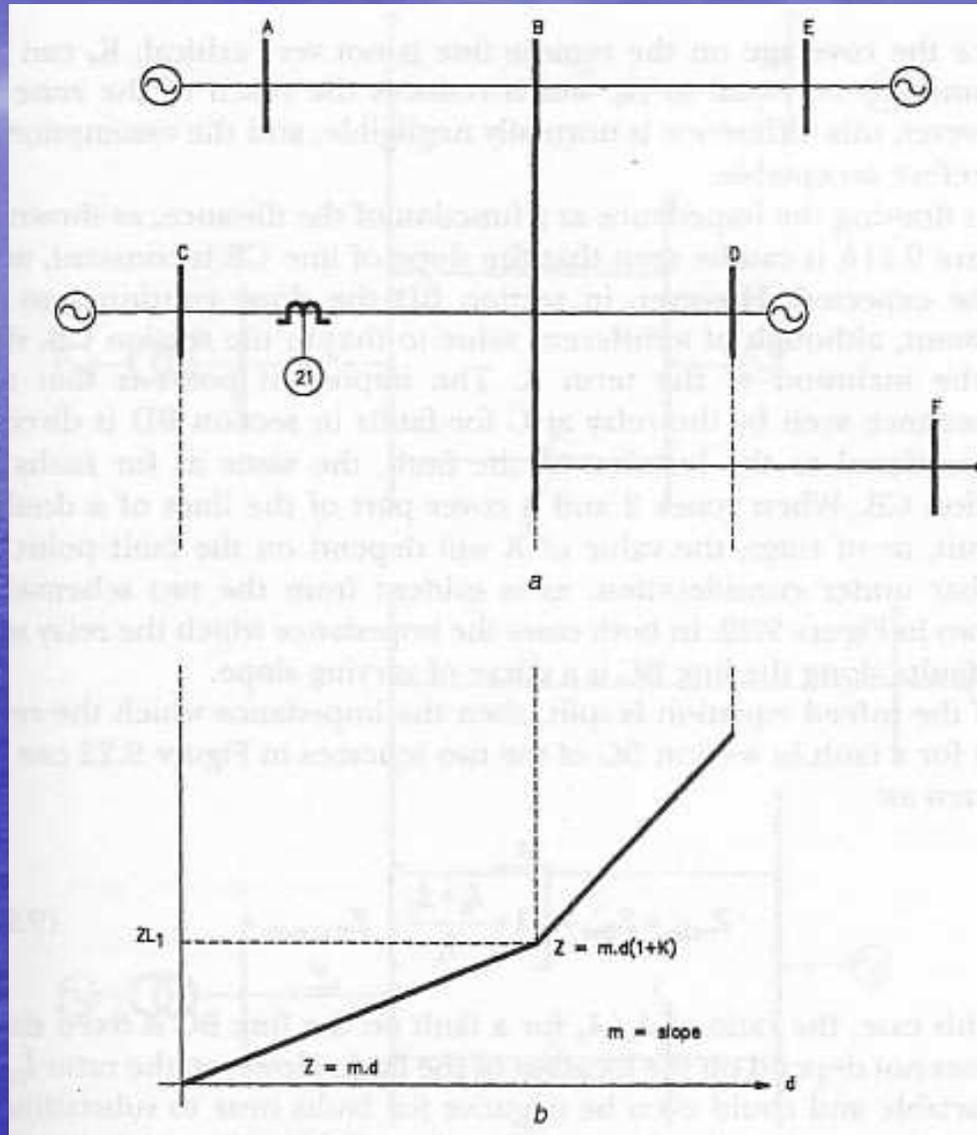
$$Z_{\text{relay}} = Z_A + (1 + K) Z_B$$

$$K = \frac{I_{\text{total infeed}}}{I_{\text{relay}}}$$

# O efeito das potências injectadas nos relés de distância

- Quando o gerador está em serviço:
  - A impedância vista pelo relé em A para um defeito depois do barramento B será muito maior;
  - A característica de protecção será reduzida, implicando que o comprimento de linha protegido seja também menor.
- Quando o gerador é retirado de serviço:
  - A impedância vista pelo relé em A para um defeito depois do barramento B será menor;
  - A característica de protecção será aumentada, implicando que o comprimento de linha protegido seja também maior.

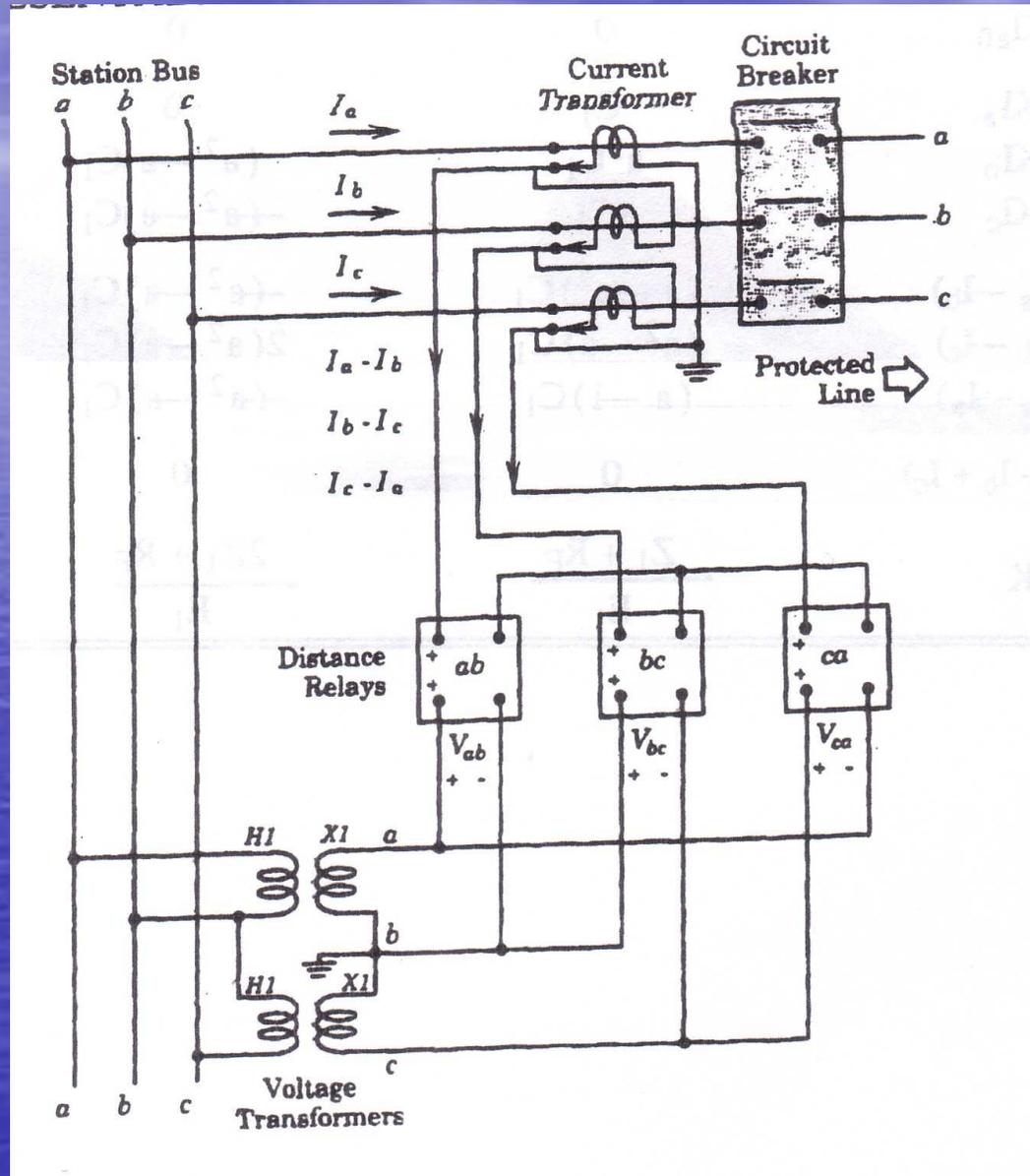
# O efeito das potências injectadas nos relés de distância



# Impedâncias vistas pelos relés

- Os relés de distância são concebidos para proteger o S.E. contra quatro tipos de defeitos básicos:
  - fase – fase;
  - trifásico;
  - fase – fase – terra;
  - fase – terra.
- Para detectar os defeitos o relé precisa de 6 unidades:
  - 3 unidades para detectar defeitos entre fases (R-S, S-T, T-R);
  - 3 unidades para detectar defeitos à terra (R-Terra, S-Terra, T-Terra).
- Dada a impossibilidade de uma selecção precisa das correntes e tensões de cada tipo de defeito, cada unidade recebe um factor independente dos outros para obter a operação requerida.

# Impedâncias vistas pelos relés



# Impedâncias vistas pelos relés

- Unidades fase:

- São ligadas em triângulo e recebem tensões entre linhas e a diferença das correntes nas linhas;
- A impedância medida pode ser dada por:

$$Z_{RS} = \frac{V_{RS}}{I_R - I_S}$$

$$Z_{TR} = \frac{V_{TR}}{I_T - I_R}$$

$$Z_{ST} = \frac{V_{ST}}{I_S - I_T}$$

- Unidades fase – terra

- São alimentadas por tensões fase – terra e pela combinação de correntes de fase e residuais;
- A impedância medida pode ser dada por:

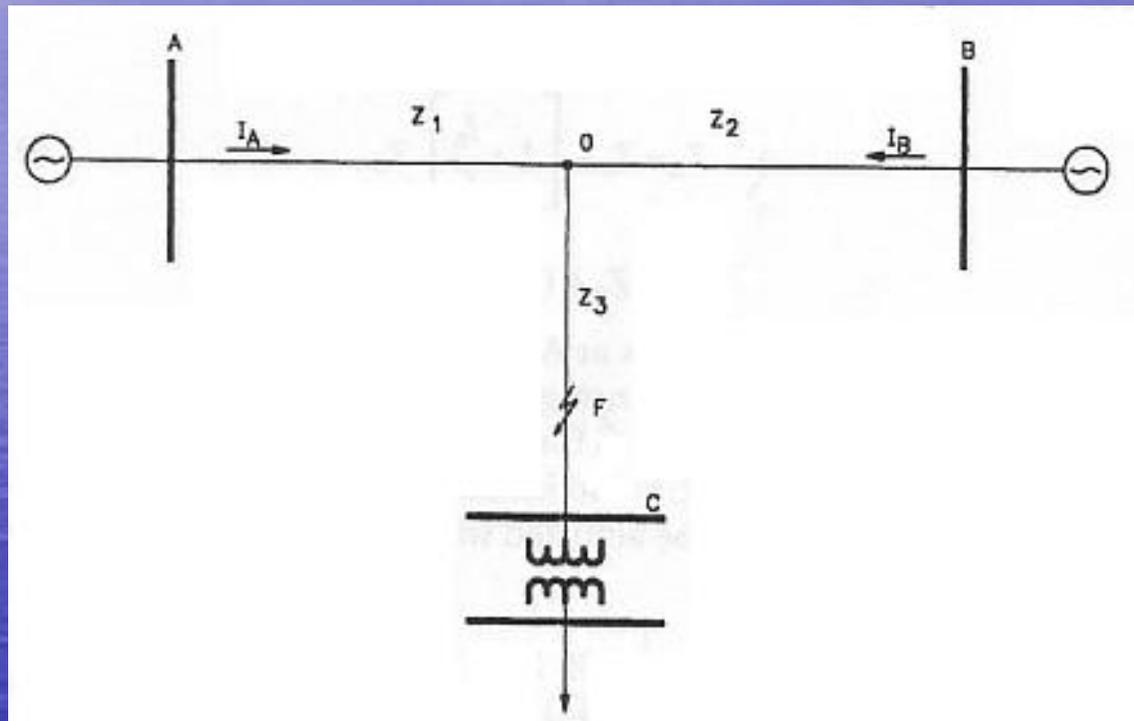
$$Z_R = \frac{V_R}{I_R + \frac{Z_0 - Z_1}{Z_1} I_0}$$

$$Z_S = \frac{V_S}{I_S + \frac{Z_0 - Z_1}{Z_1} I_0}$$

$$Z_T = \frac{V_T}{I_T + \frac{Z_0 - Z_1}{Z_1} I_0}$$

# Considerações técnicas na protecção de distância de circuitos em T

- Circuito em T com correntes injectadas em 2 terminais:



- A corrente injectada  $I_B$  faz com que o relé de distância situado em A, veja uma impedância maior que a verdadeira impedância no ponto de defeito.

# Considerações técnicas na protecção de distância de circuitos em T

- Quando ocorre um defeito em F a tensão no relé situado em A é:

$$V_A = I_A \cdot Z_1 + (I_A + I_B) \cdot Z_3$$

- A impedância aparente vista pelo relé situado em A é:

$$Z_A = \frac{V_A}{I_A} = Z_1 + \left[ 1 + \frac{I_B}{I_A} \right] \cdot Z_3$$



$$Z_A = Z_1 + (1 + K_A) \cdot Z_3$$

onde  $K_A$  é uma constante da corrente injectada no sistema;

- Em condições normais  $K_A$  é maior que 1;
- Impedância aparente vista pelo relé situado em A é maior que a impedância de defeito;
- O relé não atinge o alcance da zona de protecção ao longo da linha OC.

# Considerações técnicas na protecção de distância de circuitos em T

- Os relés situados em A e B devem ser ajustados de modo que:
  - Na zona 1 o alcance não ultrapasse os barramentos B e C para o relé situado em A, e os barramentos em A e C para o barramento situado em B.
- Para zona 1 do relé situado em A, este deve ser ajustado com o menor dos seguintes valores:

$$Z_1 = 0,85.Z_{AB} \quad Z_1 = 0,85.(Z_{AO} + Z_{OC})$$

- Deste modo, garante-se uma máxima cobertura nas secções OB e OC, sem a possibilidade de ultrapassar o alcance do relé situado em A, quando desaparece a corrente injectada  $I_B$ .

# Considerações técnicas na protecção de distância de circuitos em T

- Se existir corrente injectada  $I_B$  o alcance do relé será menor

Alteração da expressão

$$Z_I = 0.85 \left[ Z_{AB} + \left( 1 + \frac{I_B}{I_A} \right) \cdot Z_{OC} \right]$$

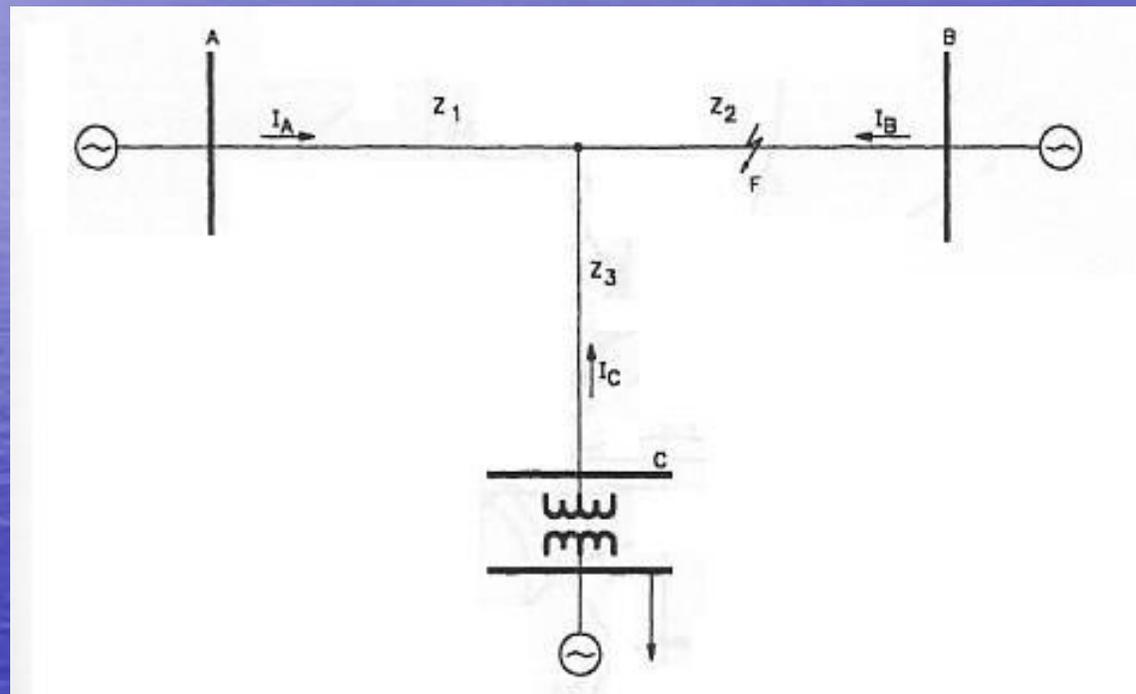
- Garante-se a protecção da linha OC, mas se o circuito em B abrir, o alcance da protecção tomará valores excessivos;

$$Z_{OC} \ll Z_{OB}$$

- O alcance do relé situado em A, que protege a secção OB, será muito menor comparado com o alcance que deveria existir se o esquema em T não existisse.

# Considerações técnicas na protecção de distância de circuitos em T

- Circuito em T com correntes injectadas em 3 terminais:



- Quanto maior é a potência produzida por fontes associadas aos terminais menos sensíveis são os relés em A e B.

# Considerações técnicas na protecção de distância de circuitos em T

- O relé situado em A vê a impedância aparente para um defeito em F como:

$$Z_A = \frac{V_A}{I_A} = Z_1 + \left[ 1 + \frac{I_C}{I_A} \right] Z_2$$

- O valor de  $Z_A$  é maior do que o valor actual da impedância ( $Z_1 + Z_2$ );



Diminuição do alcance do relé situado em A.

- No estabelecimento do relé situado em A os cálculos efectuados devem considerar o sistema actual de impedâncias e não considerar as correntes injectadas;

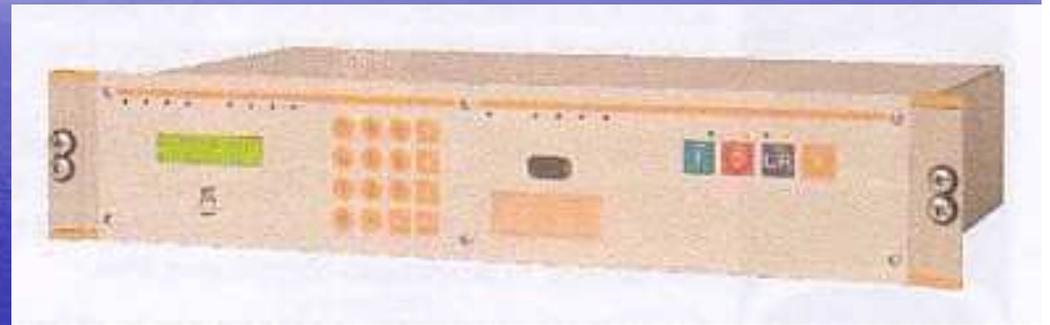


Evita que o alcance do relé seja ultrapassado nas situações em que podem estar abertos um ou mais terminais do circuito em T.

# Equipamentos digitais



REL 511\*2.5



PZ- 1000



# Ideias a reter / Conclusão

- Existem diferentes tipos de relés de distância com equações e curvas características próprias:
  - Relés de impedância ou ohm;
  - Relés de reactância;
  - Relés mho ou de admitância;
  - Relés mho completamente polarizados;
  - Relés de impedância modificada;
  - Relés de resistência;
  - Relés direccionais;
  - Relés com características poligonais;
  - Relés com características combinadas;
  - Relés com características de lente.

# Ideias a reter / Conclusão

- O princípio de funcionamento de um relé de distância baseia-se numa comparação entre uma tensão e uma corrente da qual resulta uma impedância que é proporcional ao comprimento da linha onde se encontra instalado;
- Não precisam de canal piloto;
- Apresentam tempos de actuação curtos o que leva a uma grande utilização na protecção de linhas;
- A regulação das protecções é efectuada com base em três zonas com alcances e tempos de actuação distintos;
- Existem diversas causas perturbadoras na medição da impedância (elemento fulcral para uma boa operação do relé);
- Com equipamentos digitais conseguem-se parametrizações mais precisas e eficazes, as quais permitem compensações intrínsecas que levam em conta erros inevitáveis para que se possa proceder a uma medida confiável.

Σ  
Σ  
H  
L