

Conteúdo de hoje:

5.1 Proteção de sobrecorrente (apresentada na aula de 05/10)

5.2 Proteção de sobrecorrente direcional

5.2.1) Introdução e princípio operativo (apresentada na aula de 05/10)

5.2.2) Elementos de sobrecorrente direcional de fase e de terra

5.2.3) Aplicação a linhas de transmissão

5.3 Proteção de distância

5.3.1) Introdução (apresentada na aula de 05/10)

5.3.2) Aplicação a linhas de transmissão

5.3.3) Elementos de terra e de fase

5.3.4) Zonas de proteção

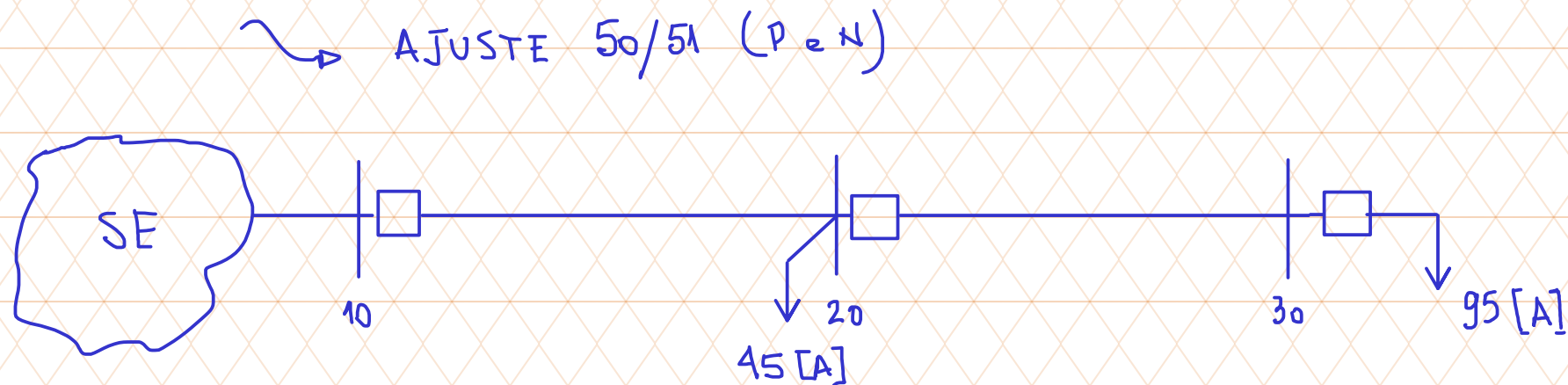
5.3.5) Ajustes

5.3.6) Fontes de erro na proteção de distância

5.4 Proteção diferencial (apresentada na aula de 05/10)

5.1 Proteção de sobrecorrente

Exemplo: ajuste da proteção de sobrecorrente de fase e de neutro (temporizada, de tempo definido e instantânea)



Os dados do curto-circuito são:

	10	20	30	
$I_{CC, MIN}$	1000	800	600	[A]
$I_{CC, MAX}$	3000	1500	1000	[A]

Os dados dos TCs são

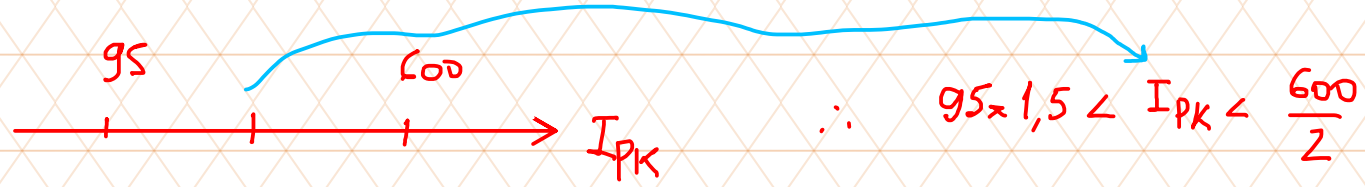
- TC na saída da barra 10 tem relação 100:5
- TC na saída da barra 20 tem relação 200:5
- TC na saída da barra 30 tem relação 200:5

Os dados de ajuste do R30

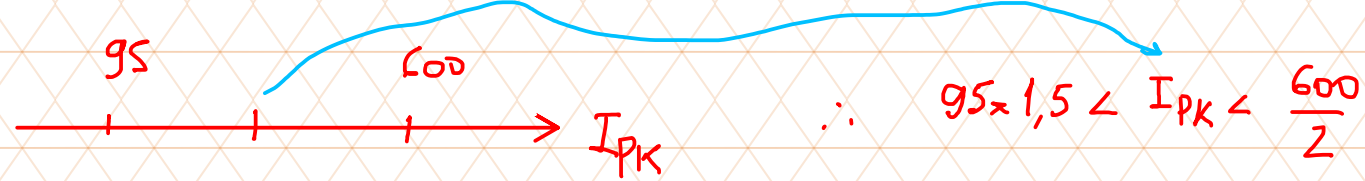
- MI é 0,5 e a curva IEEE muito inversa

I_{PK}

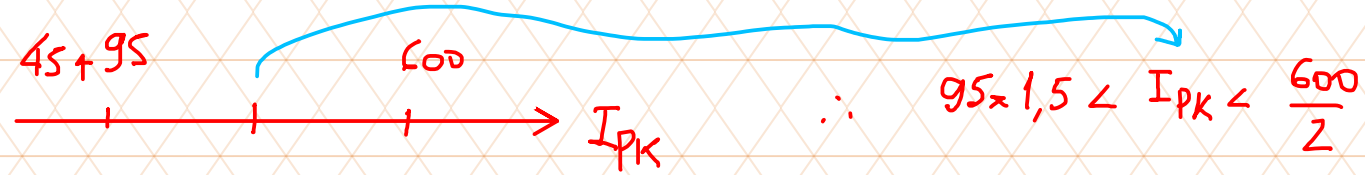
$R_{30} \rightarrow I_{PK} ?$



$R_{20} \rightarrow I_{PK} ?$



$R_{10} \rightarrow I_{PK} ?$



MT

$R_{30} \rightarrow MT = 0,5$ (arbitrário) dado pela equação $0,5 [s]$

$R_{20} \rightarrow t_{a, R_{20}} = t_{a, R_{30}} \left(\frac{1000}{40} \right)_{RTC} + \Delta t$

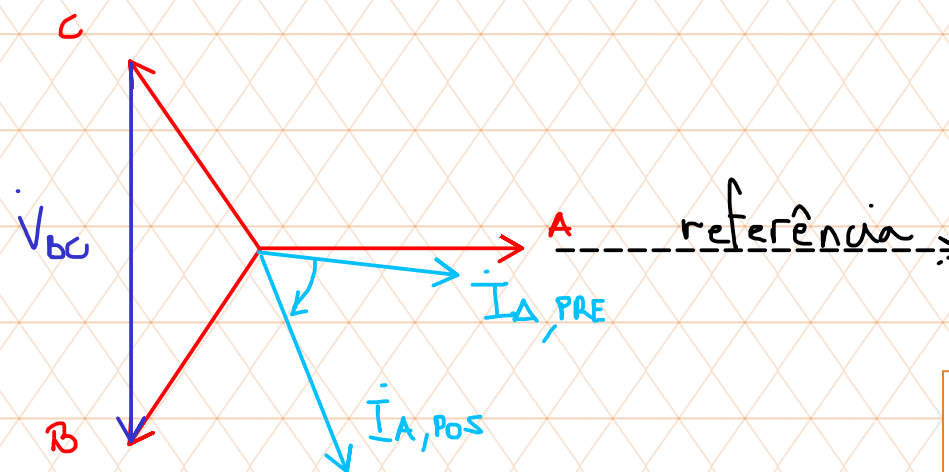
$R_{10} \rightarrow t_{a, R_{10}} = t_{a, R_{20}} \left(\frac{1000}{20} \right)_{RTC} + \Delta t$

5.2) Proteção de sobrecorrente direcional

5.2.2) Elementos de sobrecorrente direcional de fase e de terra

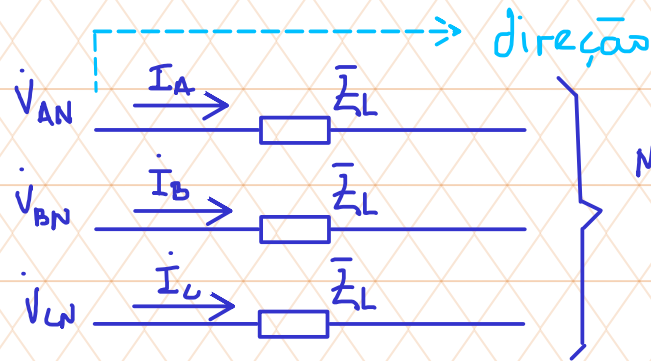
- Sobrecorrente direcional de fase

UNIDADE	DP	POL
A	\dot{I}_A	\dot{V}_{BC}
B	\dot{I}_B	\dot{V}_{CA}
C	\dot{I}_C	\dot{V}_{AB}



Cuidado! O fato de se ter escolhido uma tensão de polarização em quadratura com a corrente de fase não significa que o torque será máximo nessa condição, até porque a corrente de falta normalmente está atrasada em relação à tensão de fase da fase em falta (ou seja, atrasada em relação à corrente de carga).

Exemplo: Admitindo uma LT sem mútuas, como escolher o ângulo de máximo torque?



Modelo simplificado (sem mútuas): $\bar{Z}_L = |\bar{Z}_L| \angle 70^\circ$

✓ Curto trifásico: $I_{A,3\phi} = \frac{V_{AN}}{\bar{Z}_L} = \frac{|V_{AN}|}{|\bar{Z}_L|} \angle 90^\circ - 70^\circ$

✓ Curto fase-terra: $I_{A,\phi} = I_{A,3\phi}$

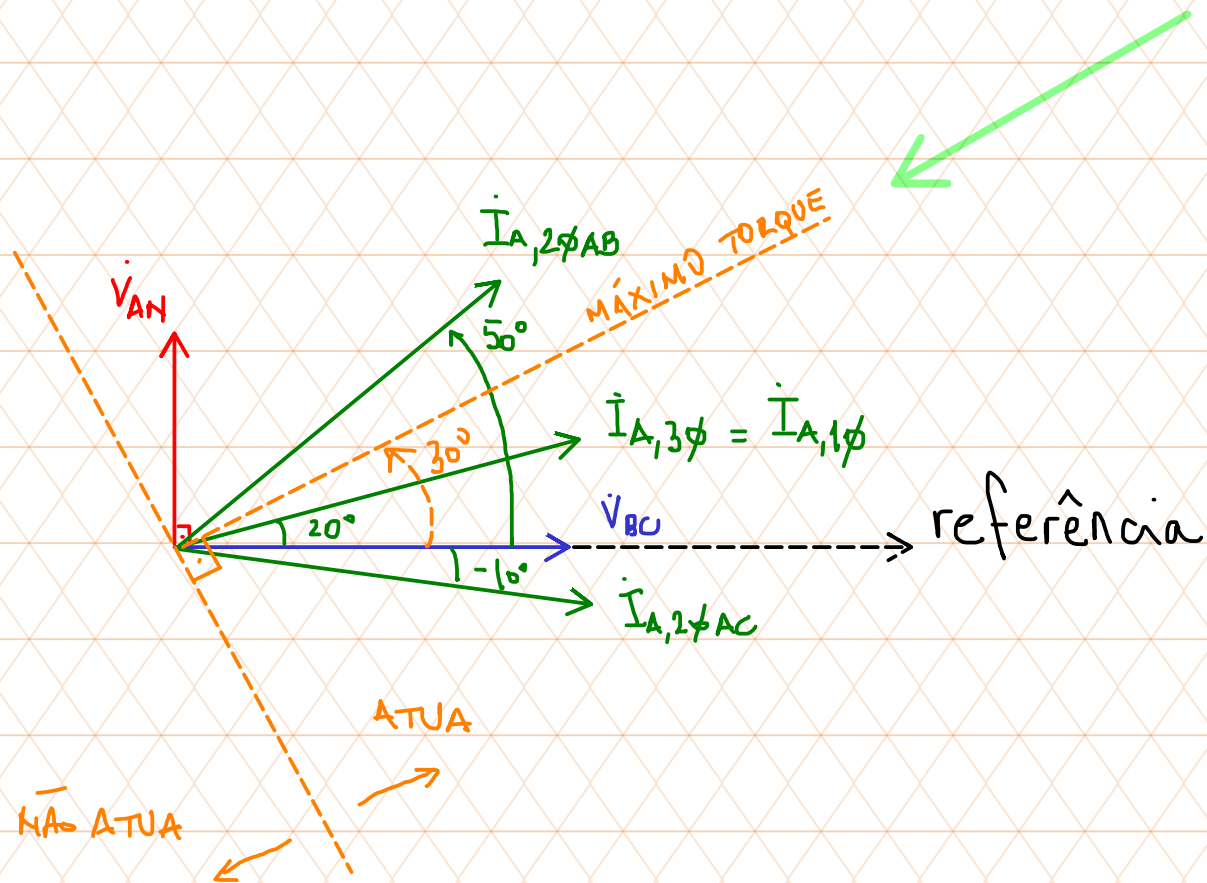
✓ Curto dupla-fase (AB): $I_{A,2\phi AB} = \frac{V_{AB}}{2\bar{Z}_L} = \frac{|V_{AB}|}{|2\bar{Z}_L|} \angle 120^\circ - 70^\circ$

✓ Curto dupla-fase (CA): $I_{A,2\phi CA} = \frac{-V_{CA}}{2\bar{Z}_L} = \frac{|V_{CA}|}{|2\bar{Z}_L|} \angle 60^\circ - 70^\circ$



curtos-circuitos

Diagrama fasorial:



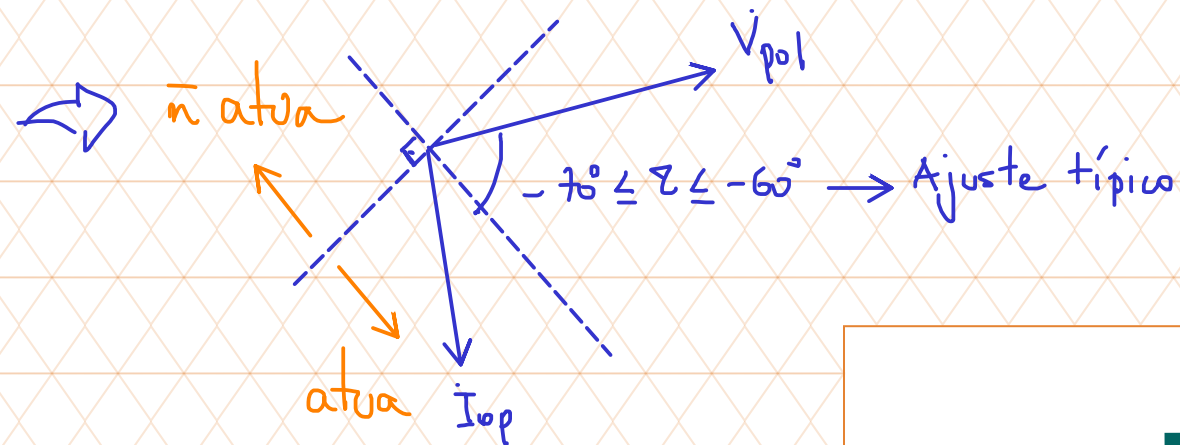
- Sobrecorrente direcional de terra (ANSI 67N)

A grandeza de operação da unidade ANSI 67N é a componente de sequência zero das correntes na linha monitorada:

$$I_{op} = \frac{1}{3} \{ I_a + I_b + I_c \}$$

Uma alternativa para a grandeza de polarização é a componente de sequência zero das tensões, com sinal trocado, ou uma corrente de terra, medida em algum aterramento disponível. No primeiro caso é necessária uma entrada de tensão e no segundo caso uma quarta entrada de corrente.

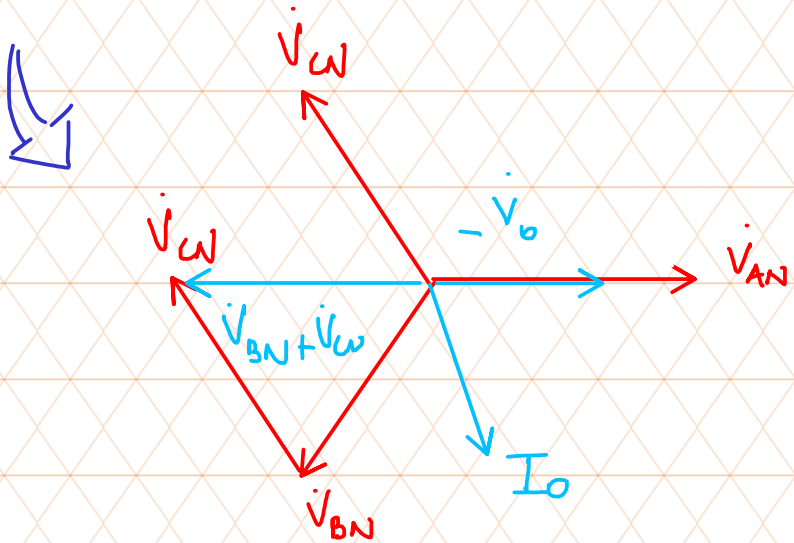
Alternativa 1: $V_{pol} = -\frac{1}{3} \{ V_{AN} + V_{BN} + V_{CN} \}$



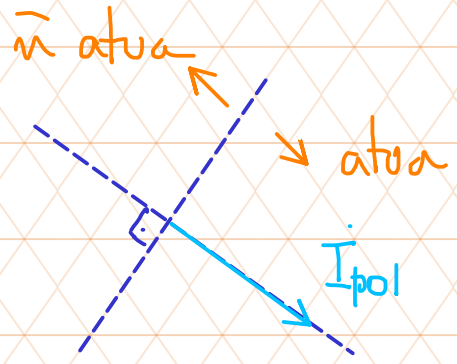
Obs: wrto $\phi-T$ (AN)

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_1 = \dot{I}_2 = \frac{\dot{V}_F}{\bar{Z}_0 + 2\bar{Z}_1} \sim 90^\circ \text{ atrasada em rela\u00e7\u00e3o a } \dot{V}_F$$

$$\dot{V}_0 = \frac{\dot{V}_{AN} + \dot{V}_{BN} + \dot{V}_{CN}}{3} \rightsquigarrow -\dot{V}_0 = \frac{-\dot{V}_{BN} - \dot{V}_{CN}}{3}$$



Alternativa 2:



Nesse caso: $\tau = 0^\circ$

5.2.3) Aplicação da função 67/67N em linhas de transmissão

Na proteção de LT, a função de proteção primária é a proteção de distância com teleproteção e função de proteção de retaguarda local é a função de sobrecorrente direcional. Sendo assim, três unidades de fase (ANSI 67) bloqueiam, ou não, as correspondentes unidades de sobrecorrente de fase (ANSI 50 e/ou 51).

Além disso, a unidade de neutro (ANSI 67N) bloqueia, ou não, a correspondente unidade de sobrecorrente de neutro (ANSI 50N e/ou 51N).

As unidades direcionais demandam a escolha da conexão e o ajuste do ângulo de máximo torque, que está relacionado com o ângulo da impedância série da linha de transmissão, ou com o ângulo da impedância de sequência positiva.

ATENÇÃO) Ajuste das funções de sobrecorrente de fase e de neutro em redes não radiais (50/51 e 50/51N)

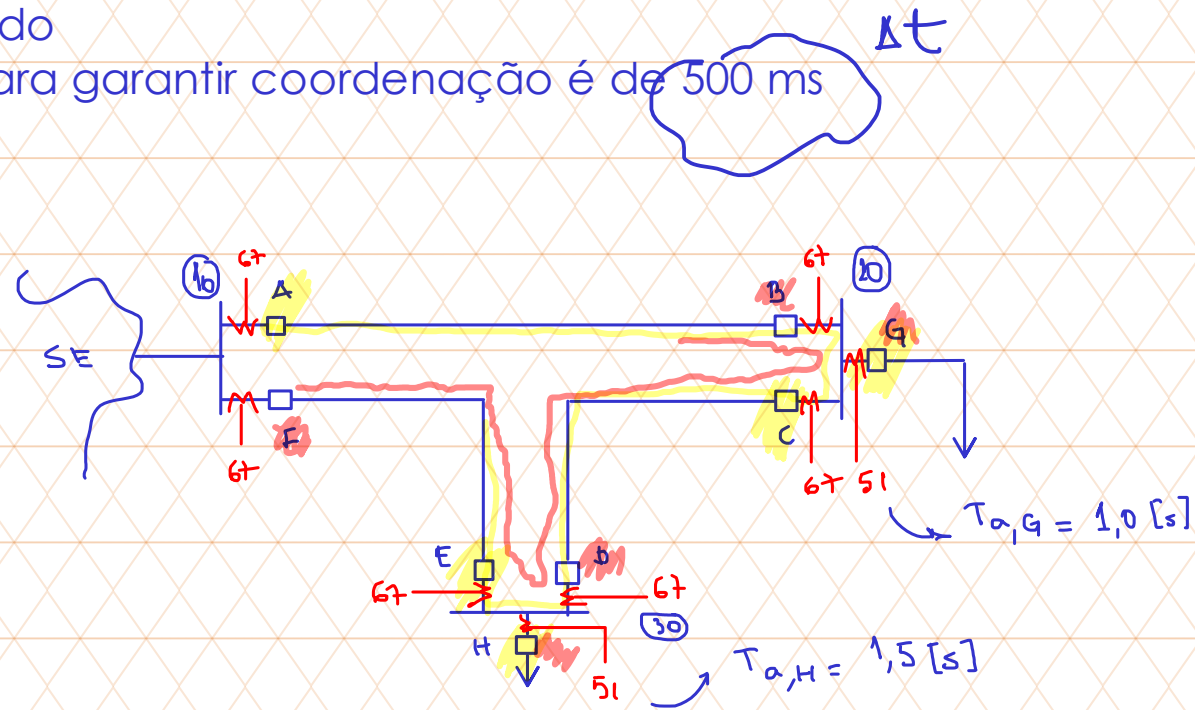
Para sistemas em malha, com diversas fontes, os ajustes das funções de sobrecorrente, que estão associadas às unidades direcionais, é mais complexo do que no caso radial.

Neste caso os IEDs são direcionais e as coordenações são múltiplas, para uma mesma barra, e ocorrem em mais de uma direção.

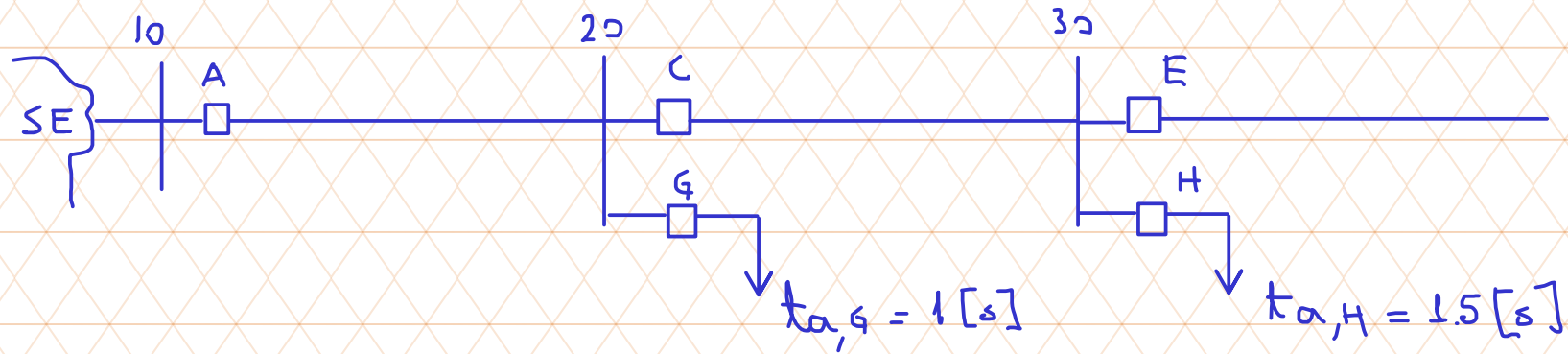
O processo se inicia abrindo-se a malha em um dado ponto e fazendo a coordenação em um dado sentido e depois no outro. Quando o sistema possui múltiplas fontes, normalmente se abre a rede no ponto de conexão da maior fonte. Esse processo é de tentativa e erro e pode demandar várias iterações.

Exemplo: dado o circuito em malha da figura, com apenas uma fonte, faça o ajuste da função de sobrecorrente considerando que

- Relés 67: tempo definido
- Relés 51: tempo definido
- Intervalo de tempo para garantir coordenação é de 500 ms



→ Passo 1: abre-se F:

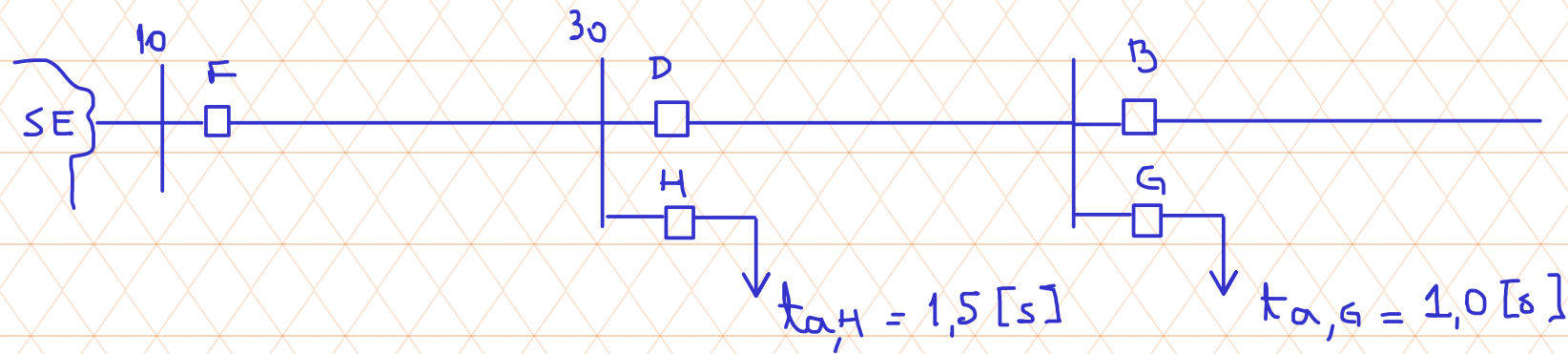


✓ Relé E (não coordena com ninguém) $\rightarrow t_{a,E} = 0,3 [s]$ (arbitrário)

✓ Relé C (coordena com E e H) $\rightarrow t_{a,C} = \Delta t + \max\{t_{a,E}; t_{a,H}\} = 2,0 [s]$

✓ Relé A (coordena com C e G) $\rightarrow t_{a,A} = \Delta t + \max\{t_{a,C}; t_{a,G}\} = 2,5 [s]$

→ Passo 2: abre-se A :



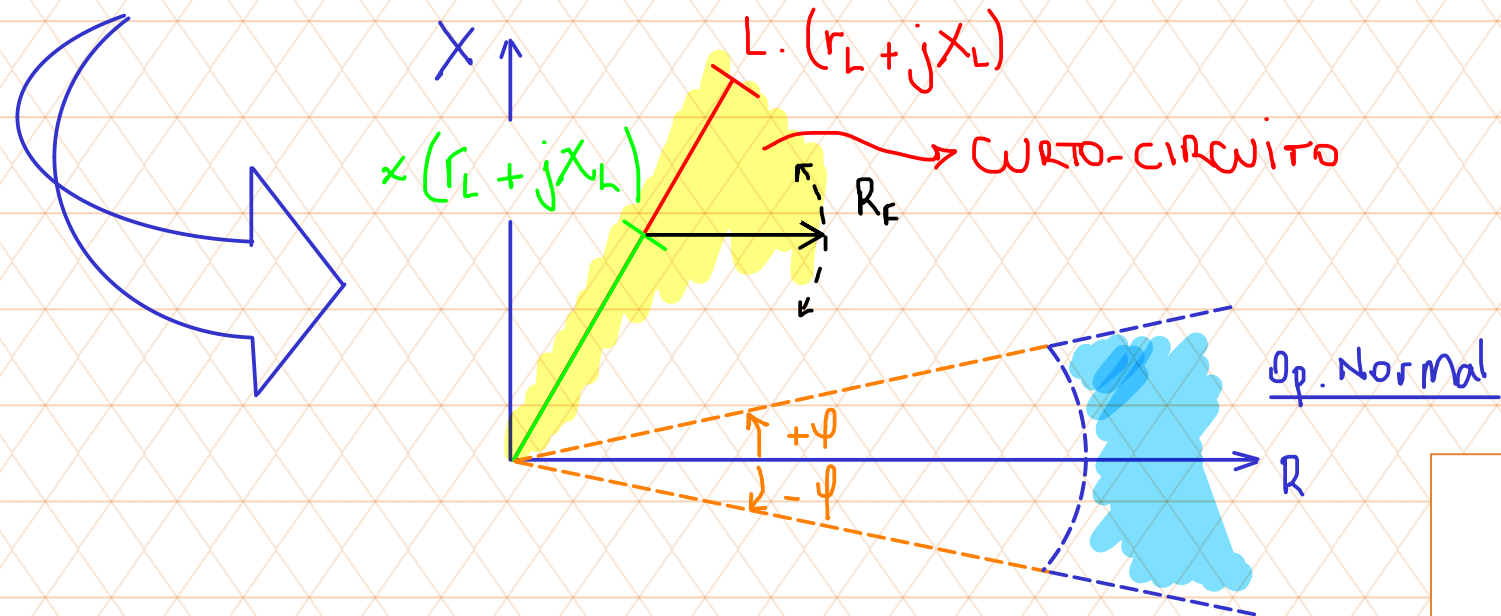
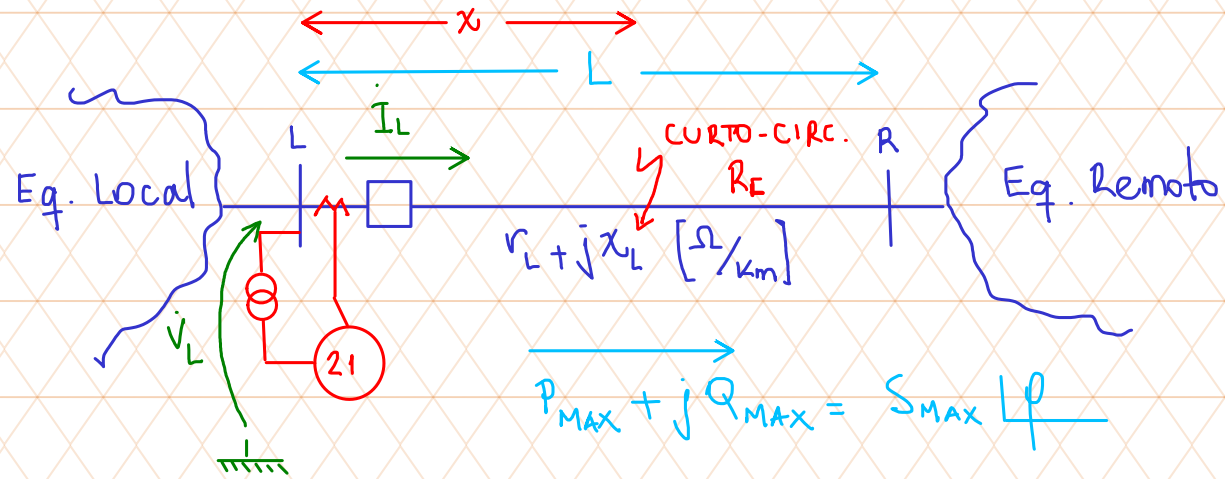
✓ Relé B (n coordena c/ ninguém) → $t_{a,B} = 0,3 [s]$ (arbitrário)

✓ Relé D (coordena c/ B e G) → $t_{a,D} = \Delta t + \max\{t_{a,B}; t_{a,G}\} = 1,5 [s]$

✓ Relé F (coordena c/ D e H) → $t_{a,F} = \Delta t + \max\{t_{a,D}; t_{a,H}\} = 2,0 [s]$

5.3 Proteção de distância

5.3.1 Introdução



5.3.2) Aplicação a linhas de transmissão

Em sistemas trifásicos é mais coerente utilizar componentes simétricas porque os circuitos resultantes são independentes entre si (são três circuitos monofásicos independentes).

Sendo assim, a função de distância calcula a impedância de sequência positiva do equipamento monitorado (p. ex. linha de transmissão) tomando como dados de entrada as tensões de fase e de linha e as correntes de linha.

Ou seja, é possível calcular a impedância de sequência positiva por meio de seis elementos: três elementos de terra e três elementos de fase.

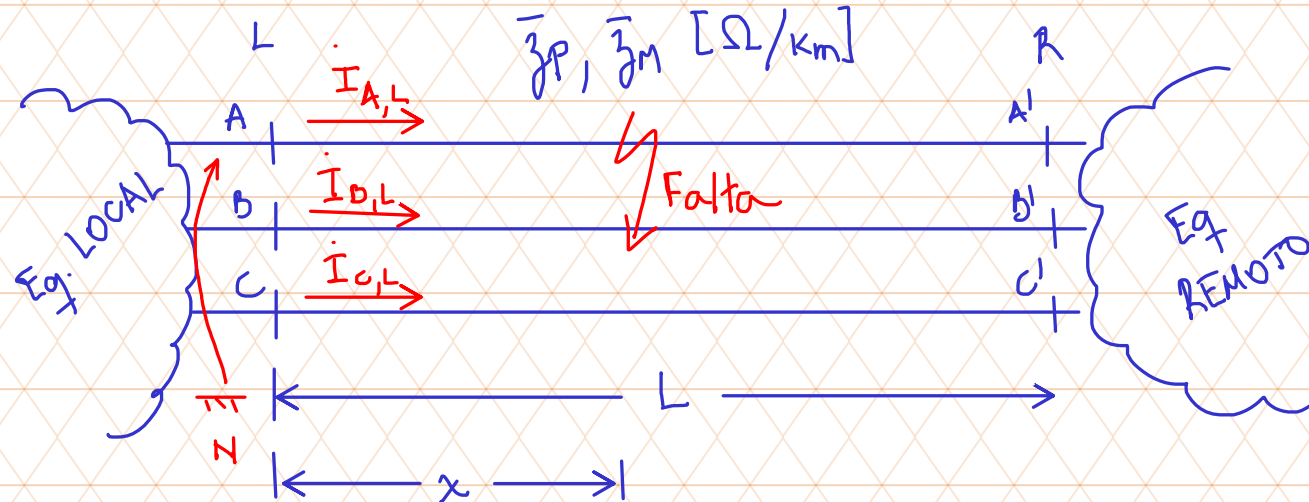
Assim como a função diferencial, que apresenta erros sob condições especiais, a função de distância também possui fontes de erro:

- Power swing (oscilação de potência provocada por mudanças topológicas no sistema elétrico) produz variações de frequência que introduzem erros nos cálculos dos fasores
- Close-in faults (faltas próximas à barra do TP) que levam a tensão a zero e introduzem erros significativos no cálculo da impedância
- Resposta dinâmica dos TI
- R_f introduz uma tensão no ponto de falta que pode ou não estar em fase com a corrente do terminal onde a função é instalada
- Equivalentes de Thevenin nos terminais local e remoto

5.3.3) Elementos de terra e de fase

Elementos de terra para o cálculo da impedância de sequência positiva: AN; BN e CN

Elementos de fase para o cálculo da impedância de sequência positiva: AB, BC e CA



Elemento de terra AN:
$$\dot{V}_{AN,L} = x \left\{ \bar{z}_P \cdot \dot{I}_{A,L} + \bar{z}_M [\dot{I}_{B,L} + \dot{I}_{C,L}] \right\} + \dot{V}_{AN,F} \quad (1)$$

Onde:
$$\dot{I}_{A,L} + \dot{I}_{B,L} + \dot{I}_{C,L} = \dot{I}_{0,L} \cdot 3 \rightsquigarrow \dot{I}_{B,L} + \dot{I}_{C,L} = 3\dot{I}_{0,L} - \dot{I}_{A,L} \quad (2)$$

Substituindo 2 em 1: $\dot{V}_{AN,L} = x \cdot \{ [\bar{z}_p - \bar{z}_m] \cdot \dot{I}_{AL} + 3\bar{z}_m \cdot \dot{I}_{0,L} \}$ (3)

Mas: $\bar{z}_1 = \bar{z}_p - \bar{z}_m$ e $\bar{z}_0 = \bar{z}_p + 2\bar{z}_m$ (4.1) e (4.2)

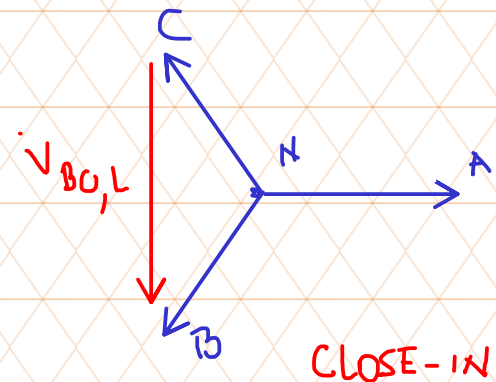
Substituindo 4 em 3: $\dot{V}_{AN,L} = x \cdot \bar{z}_1 \cdot \dot{I}_{AL} + x \cdot \left[\frac{\bar{z}_0 - \bar{z}_1}{3} \right] \cdot \dot{I}_{0,L} \cdot \frac{\bar{z}_1}{\bar{z}_1}$

Isolando $x \cdot \bar{z}_1 = \frac{\dot{V}_{AN,L}}{\dot{I}_{AL} + K \cdot \dot{I}_{0,L}}$, onde $K = \frac{\bar{z}_0 - \bar{z}_1}{\bar{z}_1}$

Para os demais elementos:

BN $\longrightarrow x \cdot \bar{z}_1 = \frac{\dot{V}_{BN,L}}{\dot{I}_{B,L} + K \cdot \dot{I}_{0,L}}$

CN $\longrightarrow x \cdot \bar{z}_1 = \frac{\dot{V}_{CN,L}}{\dot{I}_{C,L} + K \cdot \dot{I}_{0,L}}$



CLOSE-IN

$\dot{V}_{AN,L} = \frac{\dot{V}_{BC,L}}{\sqrt{3} |90^\circ}$

Qdo $\dot{V}_{AN,L} \downarrow \approx 0$

$$\text{Elementos de fase: } BC \longrightarrow \dot{V}_{BN,L} = x \left\{ \bar{z}_p \dot{I}_{B,L} + \bar{z}_m [\dot{I}_{A,L} + \dot{I}_{C,L}] \right\} + \dot{V}_{BN,F} \quad (1)$$

$$\dot{V}_{CN,L} = x \left\{ \bar{z}_p \dot{I}_{C,L} + \bar{z}_m [\dot{I}_{A,L} + \dot{I}_{B,L}] \right\} + \dot{V}_{CN,F} \quad (2)$$

Caso seja um curto-circuito franco BC em F, $\dot{V}_{BN,F} - \dot{V}_{CN,F} = 0$ ($R_F = 0$)
pode-se subtrair 2 de 1:

$$\dot{V}_{BN,L} - \dot{V}_{CN,L} = \underbrace{x \cdot \bar{z}_p}_{\text{red}} (\dot{I}_{B,L} - \dot{I}_{C,L}) - \underbrace{x \cdot \bar{z}_m}_{\text{red}} (\dot{I}_{B,L} - \dot{I}_{C,L})$$
$$x(\bar{z}_p - \bar{z}_m) = x \cdot \bar{z}_1$$

$$x \cdot \bar{z}_1 = \frac{\dot{V}_{BC,L}}{\dot{I}_{B,L} - \dot{I}_{C,L}}$$

Para os demais elementos:

$$AB \longrightarrow x \cdot \bar{y}_1 = \frac{\dot{V}_{AB,L}}{\dot{I}_{A,L} - \dot{I}_{B,L}}$$

$$CA \longrightarrow x \cdot \bar{y}_1 = \frac{\dot{V}_{CA,L}}{\dot{I}_{C,L} - \dot{I}_{A,L}}$$

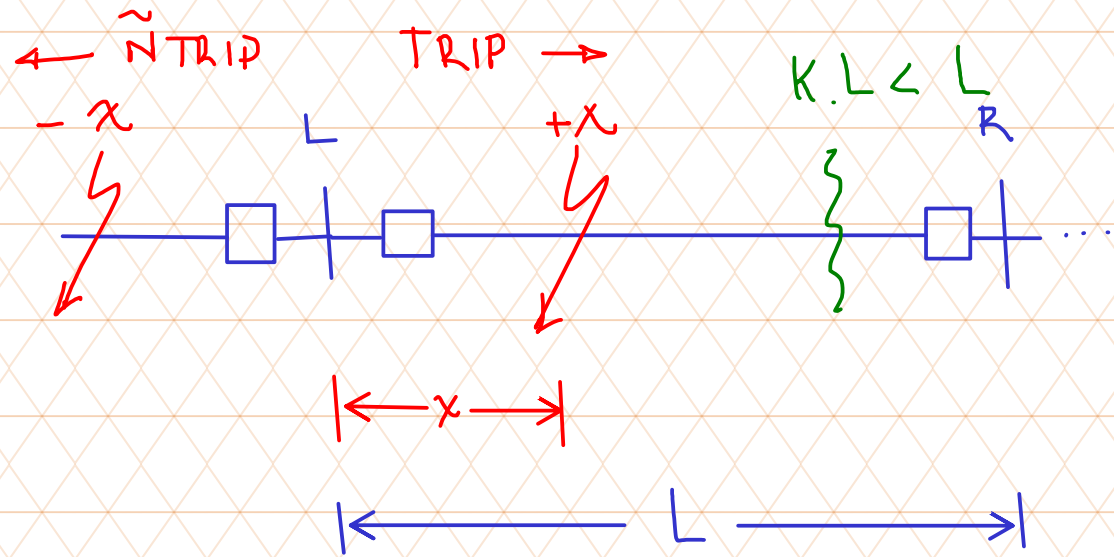
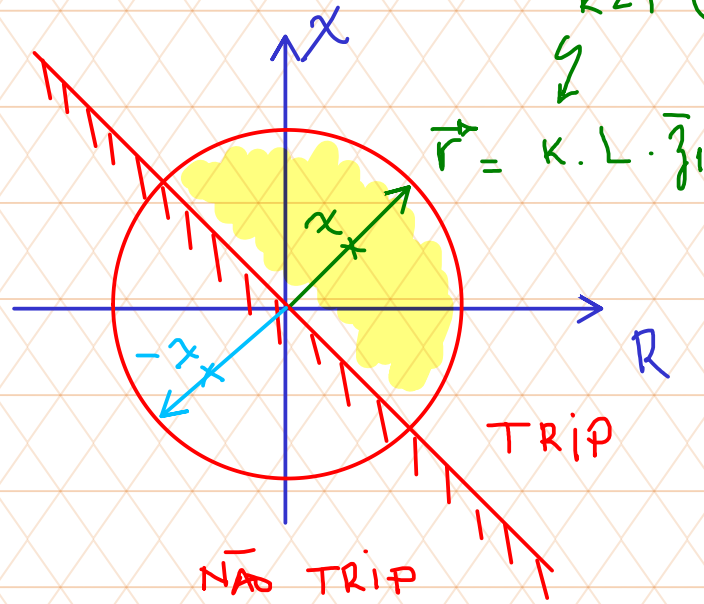
5.3.4) Zonas de proteção e ajustes

- Estão contidas no plano R-X: o número de zonas depende da filosofia de proteção
- São curvas fechadas no plano R-X: isso significa que a função de distância é unitária e que o comando de abertura do disjuntor é efetuado (instantaneamente ou de forma temporizada) se a impedância medida se encontra dentro dessa curva fechada
- As curvas devem ser definidas (posicionada e ajustada no plano R-X) de modo que todas as faltas no elemento protegido produzam valores de impedância que se encontrem dentro delas.

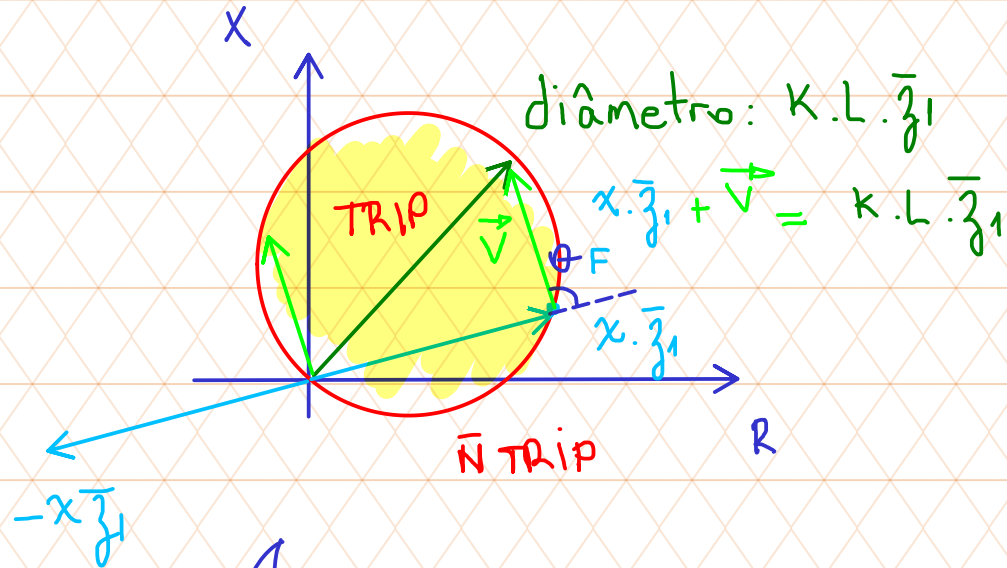
Existem diversas curvas características que são utilizadas em função do equipamento que se deseja proteger e das condições operativas do sistema elétrico em que ele está conectado.

5.3.4.1) Impedância

$K < 1$ (serve p/ evitar falhas de segurança devidas a erros nos TI)

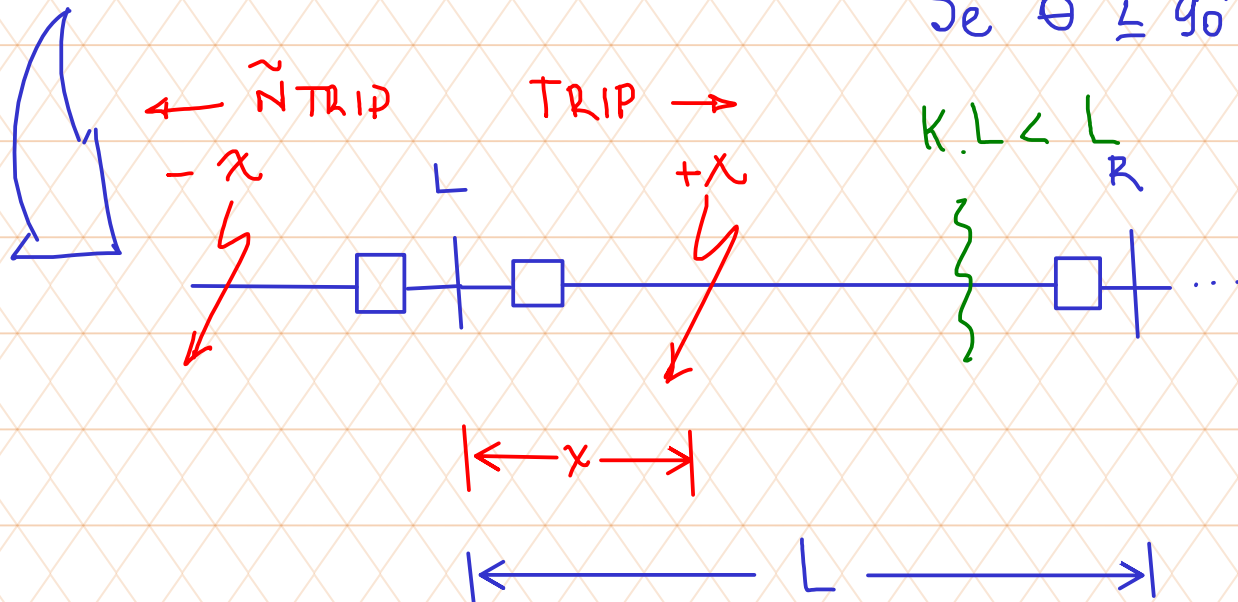


5.3.4.2) Mho

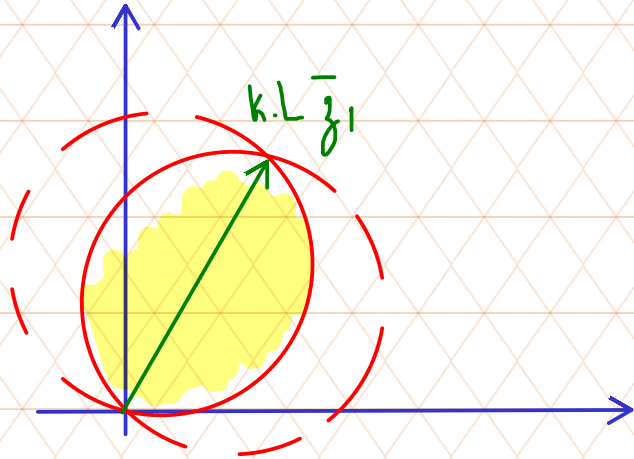


$$\arg \left\{ \frac{\vec{V}}{x.\bar{z}_1} \right\} = \theta$$

Se $\theta \leq 90^\circ \rightsquigarrow$ dentro do círculo \rightarrow TRIP

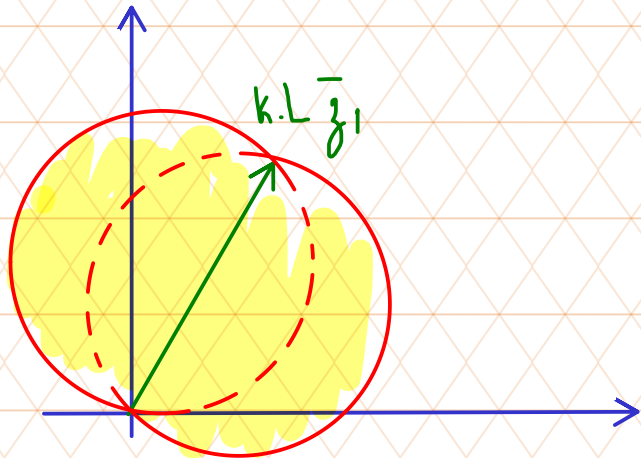


Curvas derivadas da Mho



→ $\theta < 90^\circ$: Lente

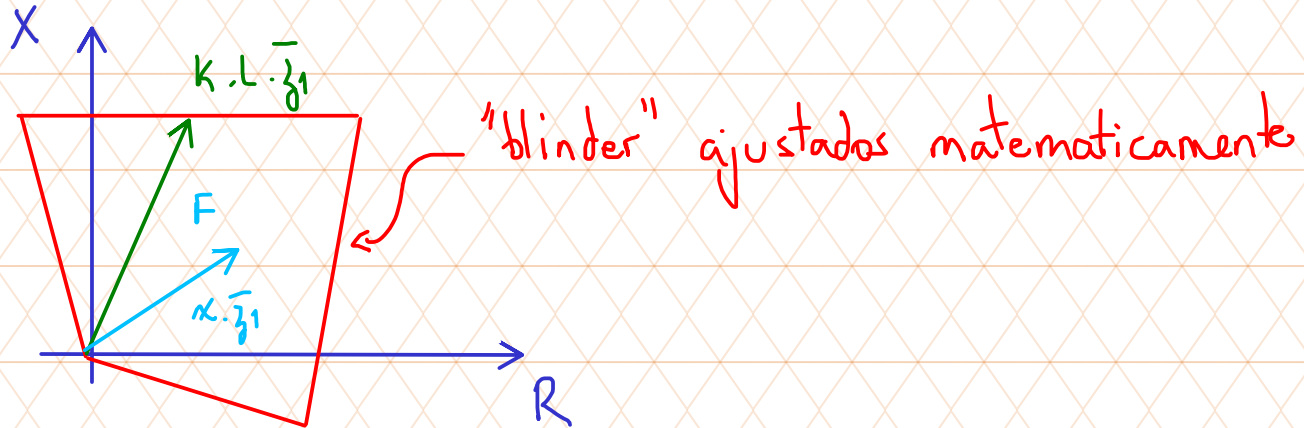
↳ linhas longas $R < X$
(R falta pequeno)



→ $\theta > 90^\circ$: tomate

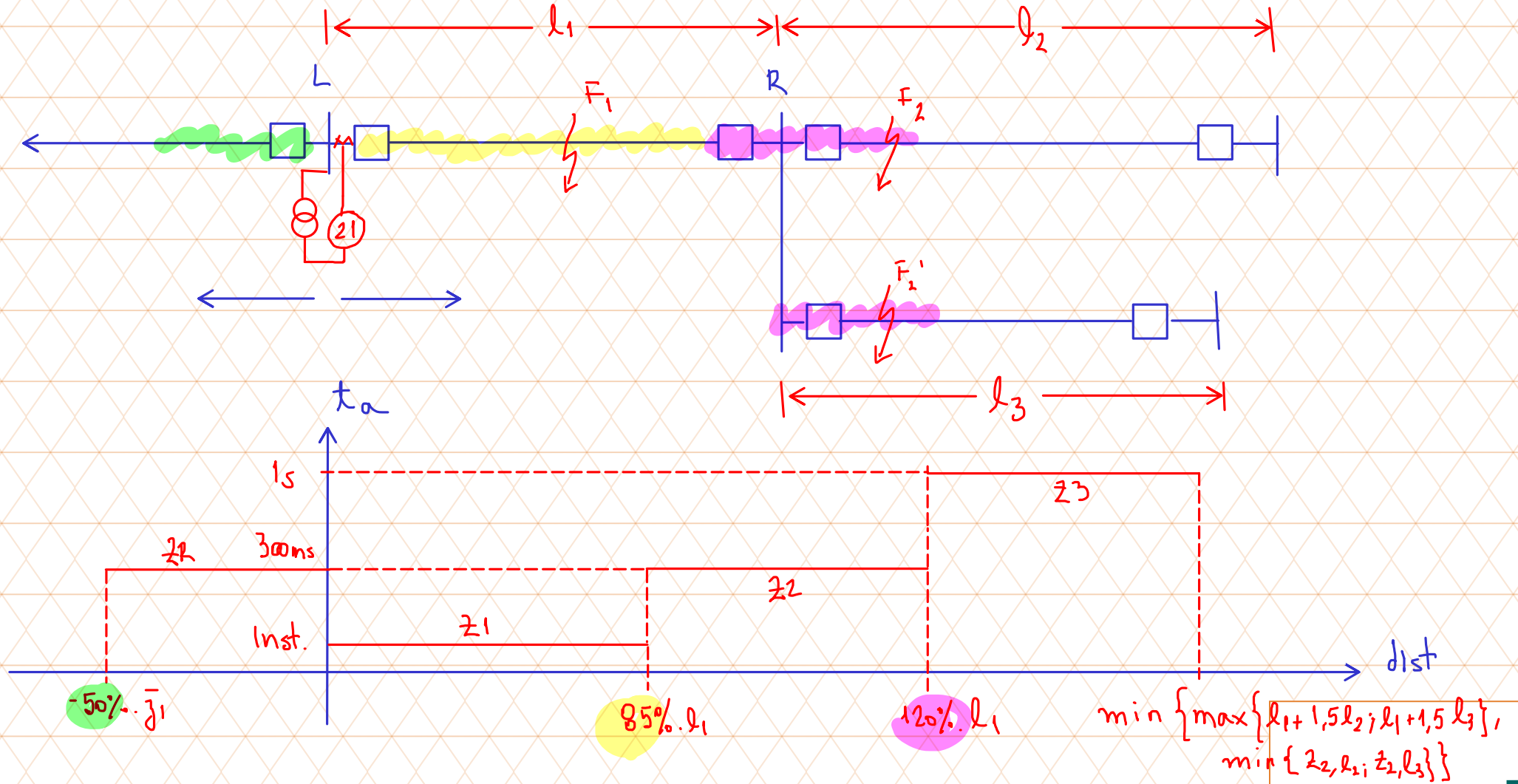
↳ linhas curtas ($R \sim X$)
(R falta maior)

5.3.4.3) Quadrilateral



Os ajustes da zona Mho são feitos para garantir proteção unitária para o equipamento protegido e proteção de retaguarda local e remota para os demais equipamentos. No entanto, os ajustes das zonas Mho dependem de teleproteção (que será abordada mais ao final do curso) e o que será apresentado a seguir desconsidera essa troca de informações (embora em muitos casos seja esse o ajuste, mesmo com a teleproteção).

5.3.5) Ajustes

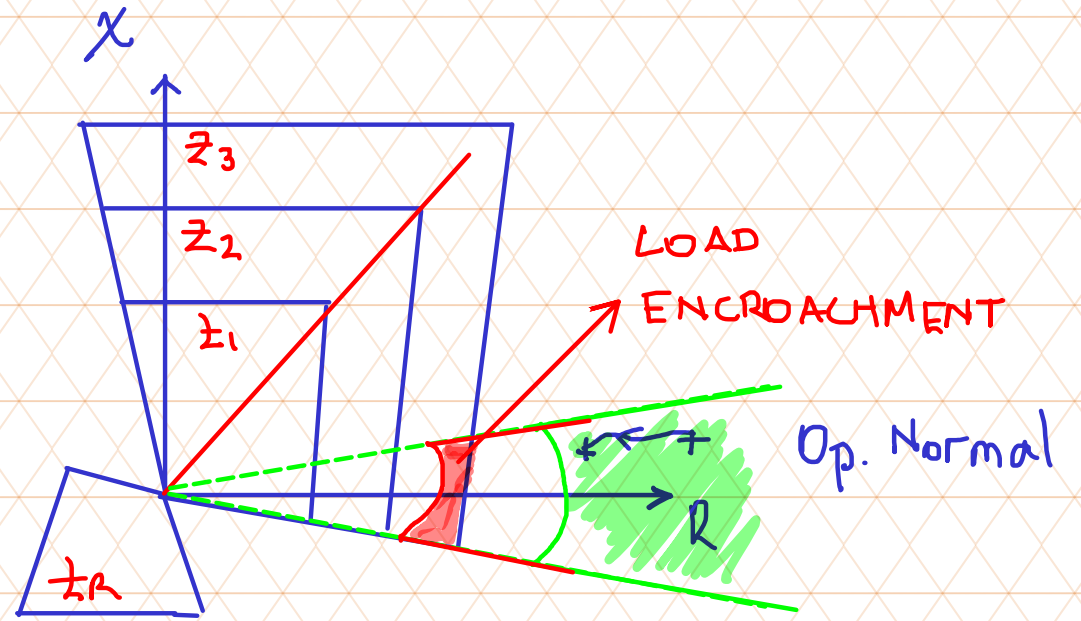
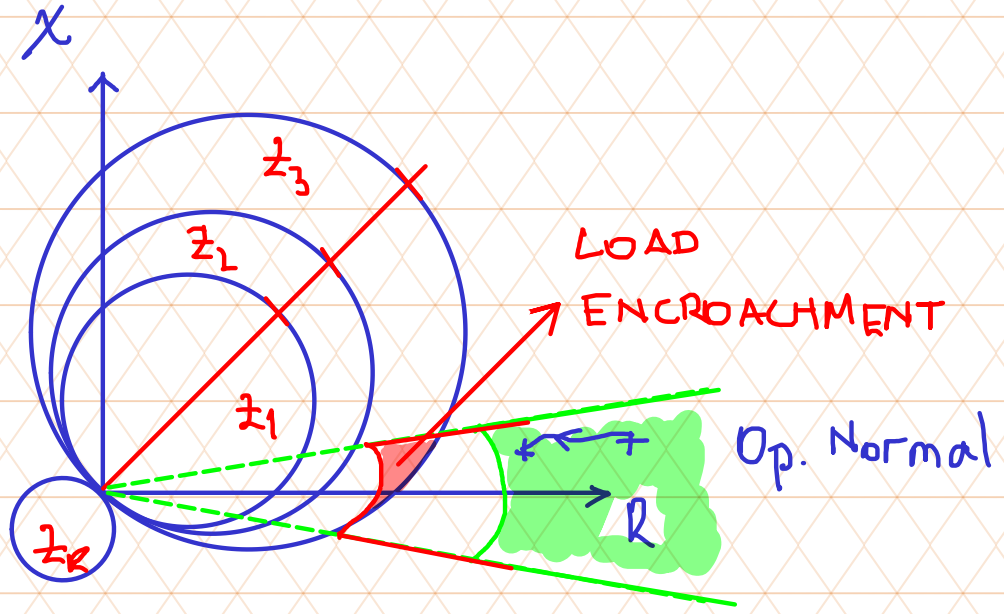


- zona primária (Zona 1 - Z1): protege até 85% da LT e atua sem atraso intencional (atuação instantânea)
- zona de retaguarda 2 (Zona 2 - Z2): protege até 120% da LT e atua com atraso intencional (tipicamente da ordem de 300ms)
- zona de retaguarda 3 (Zona 3 - Z3): protege 150% da maior linha a jusante da LT, limitada à superposição da Z2 da menor linha protegida a jusante e atua com atraso intencional (tipicamente da ordem de 1s)
- zona reversa (Zona R - ZR): protege -50% da linha com atraso intencional (tipicamente da ordem de 300ms)

Remota

Local

No plano
RX



5.3.6) Fontes de erro na proteção de distância

- Transformadores de instrumentação: erros na transformação; saturação do TC; resposta dinâmica do TPC

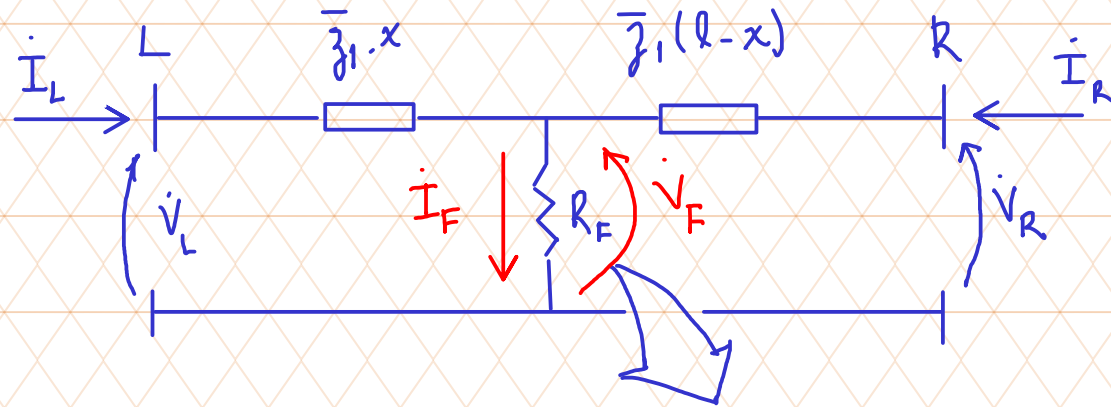
Modifica a energia do sinal de tensão (operação e segurança)

85%
Z₁

Reduz a magnitude da corrente (sub alcance)

- Erros de ruídos e/ou erros no processo de aquisição do sinal (SNR - signal-to-noise ratio: 40dB)
- Componente aperiódica, carregamento do sistema (load encroachment), oscilação de potência, resistência de defeito, faltas próximas (close-in) que resultam em tensões muito baixas e erros grandes (para corrigir esse problema se usa memória de tensão ou polarização cruzada)
- Limitações do próprio algoritmo que implementa a função de distância

Resistência de falta (arco elétrico ou arco elétrico e resistência de aterramento da torre)



Eq. de Warrington

$$\bar{z}_1 \cdot x = \frac{\dot{V}_L}{\dot{I}_L + K \cdot \dot{I}_{O_L} + \frac{R_F}{\bar{z}_1} \cdot \dot{I}_F} \approx \dot{I}_L + \dot{I}_R$$