

Conteúdo de hoje:

4. Funções de proteção

4.1 Introdução

4.2 Detecção de nível

a) Sobrecorrente

b) Sobretensão e subtensão

4.3 Comparação de ângulo

4.4 Diferencial

4.5 Impedância (ou admitância)

5. Proteção de linhas de transmissão

5.1 Proteção de sobrecorrente

05/10/2022

4. Funções de proteção

4.1 Introdução

A detecção (performance characteristic) consiste na INTELIGÊNCIA do dispositivo de proteção. Tipicamente a detecção está relacionada com o fenômeno que se pretende isolar e os tipos de função são:

- a) Detecção de nível: sobrecorrente instantânea ou temporizada (ANSI 50/51), sobretensão, subtensão (ANSI 27), etc.
- b) Comparação de ângulo: comparação de fase entre duas grandezas, normalmente uma de polarização e outra de atuação (ANSI 67 - sobrecorrente direcional)
- c) Diferencial: "calcula" o somatório de correntes que entram na zona primária (deve ser nulo) e atua quando percebe o defeito (ANSI 87)
- d) Impedância (ou admitância): consiste no cálculo da impedância (ou admitância) vista do ponto de instalação dos transformadores de instrumentação

4.2) Detecção de nível

A detecção de nível é o princípio de atuação mais simples. A função é de apenas uma grandeza e atua quando essa grandeza ultrapassa um valor pré-fixado (função do tipo "sobre") ou cai abaixo de um valor pré-fixado (função do tipo "sub").

a) Sobrecorrente: foi a primeira função de proteção desenvolvida e, inicialmente, era desempenhada por fusíveis (a inteligência que detecta o curto-circuito se confunde com o equipamento que o isola). O fusível apresenta um tempo de atuação inversamente proporcional à magnitude da corrente que o atravessa e possui as seguintes desvantagens:

- Necessidade de substituição (peças sobressalentes e equipe treinada)
- Abertura monopolar (sem chance de religamento)

Para minimizar esses problemas foram desenvolvidos os primeiros relés eletromecânicos de proteção de sobrecorrente (instantânea e temporizada) que são independentes do dispositivo primário de manobra dos equipamentos primários. Isso proporcionou:

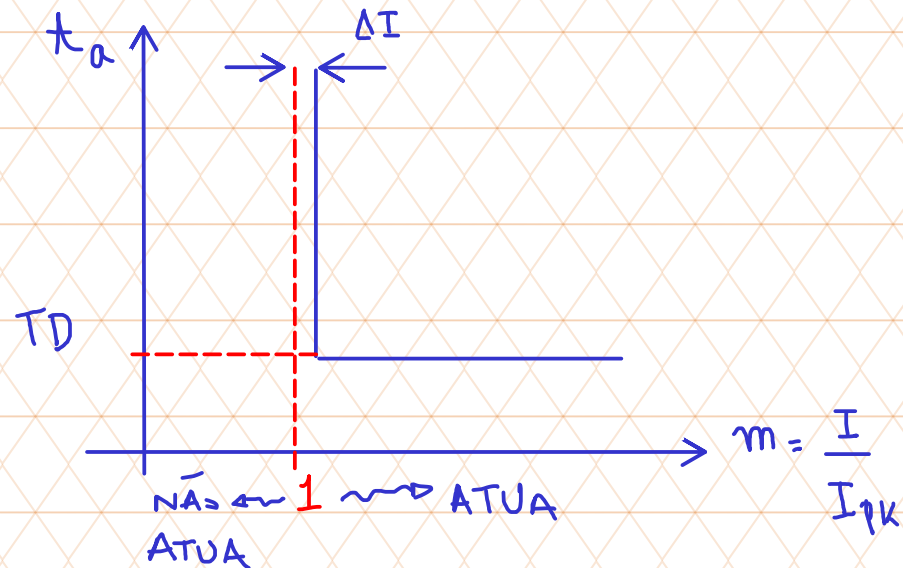
- Espaço para a criação de outras soluções ("The art and science of power system protection")
- Permitiu manobras monopolares (aumenta a chance de manutenção da estabilidade)

MASON

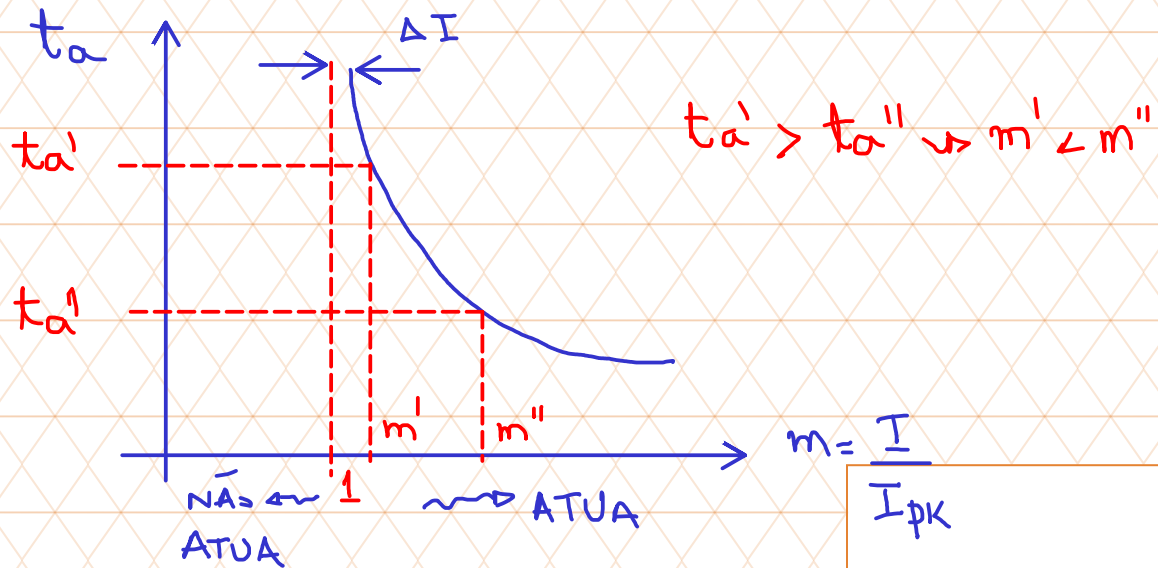
As principais funções de sobrecorrente são:

a.1) Sobrecorrente instantânea - SEM ATRASO INTENCIONAL (ANSI 50): essa função atua quando percebe a sobrecorrente, sem impor qualquer atraso ao contato de fechamento do disjuntor

a.2) Sobrecorrente temporizada (ANSI 51): há duas formas de se fazer a sobrecorrente temporizada. A primeira consiste na curva "tempo de atuação vs. corrente" em que aumento de corrente leva a redução do tempo de atuação (jargão é sobrecorrente de tempo inverso). A curva pode ser dada por funções padronizadas (ANSI ou IEC) e também por funções definidas pelos fabricantes. A segunda consiste na atuação temporizada por tempo definido a partir de um patamar de corrente.



Sobrecorrente de tempo definido



Sobrecorrente de tempo inverso

Onde:

I_{pk} : é a corrente de pickup associada com a máxima corrente de carga que o sistema estará sujeito e também à mínima corrente de curto-circuito (para garantir o ΔI)

↳ É uma grandeza escolhida arbitrariamente pelo engenheiro que discerne bem as situações de carga das situações de curto-circuito

T_D : é o atraso intencional, também ajustável

a.3) Funções de sobrecorrente implantadas nos IEDs

- 50/51P: é a função de sobrecorrente de fase que monitora as três correntes de forma independente, porém com o mesmo ajuste nas três
- 50/51N: é a função de proteção que monitora a soma das três correntes de fase (essa soma pode ser feita "analogicamente" pela medição com um TC de neutro ou digitalmente no próprio IED)
- 50/51Q: função de proteção que monitora a sequência negativa e permite ajustes mais sensíveis para a detecção de faltas dupla-fase

Obs.: a função de sobrecorrente de sequência negativa pode ser utilizada em linhas de transmissão (com o auxílio da função direcional) para aumentar a sensibilidade dos sistemas de proteção, porque quando essas linhas não são transpostas a mútua de sequência zero pode dessensibilizar a função de sobrecorrente de fase.

b) Subtensão e sobretensão

Em condições normais de operação, os níveis de tensão devem permanecer em patamares bem definidos (p. ex. na distribuição eles devem ficar entre 93% e 105% - NR414 da ANEEL). Isso significa que tensões fora desses patamares podem indicar situações anormais de operação.

- sobretensões: rejeição de carga, atuação incorreta de reguladores de tensão, controle inadequado de taps de transformadores, etc. A função de proteção contra sobretensões é a ANSI 59
- subtensões: normalmente relacionadas com curtos-circuitos (mas também com manobras). A função de proteção contra subtensões é a ANSI 27

4.3 Função direcional (comparação de fase)

a) Introdução

É uma função de proteção que compara o ângulo entre duas grandezas alternadas.

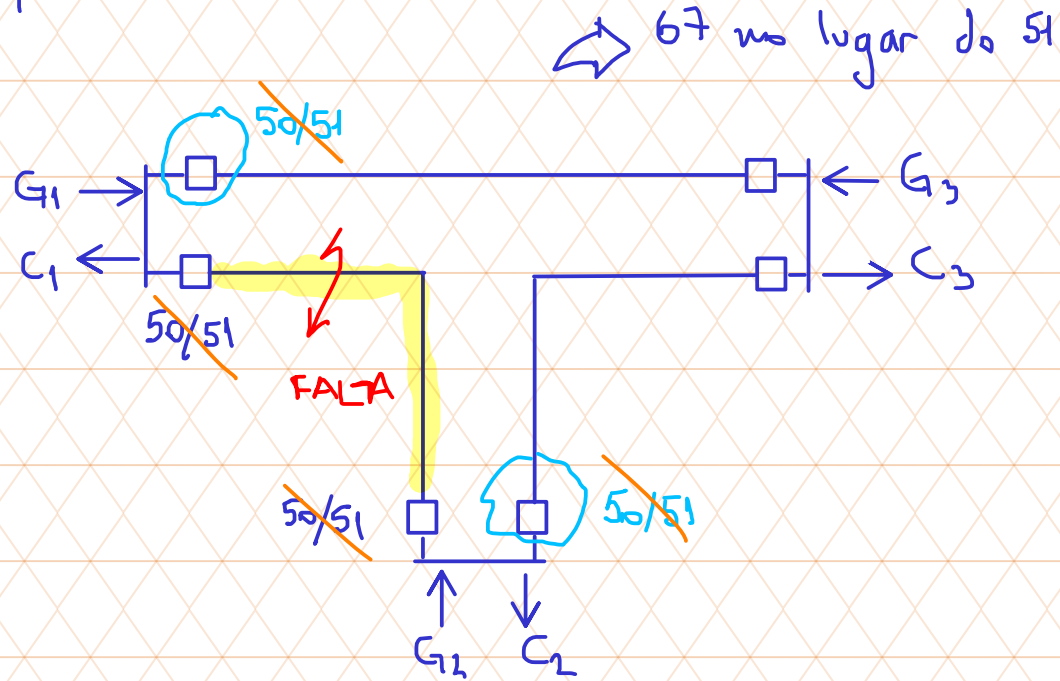
a.1) Função de sobrecorrente direcional (ANSI 67)

Normalmente é utilizada em combinação com uma unidade de sobrecorrente para discriminar o local de ocorrência da falta, quando a função de sobrecorrente sozinha é incapaz de fazê-lo. Isso ocorre em sistemas interligados, linhas em anéis, circuitos em paralelo, etc.

a.2) Função direcional de potência (ANSI 32)

A função de comparação de fase pode ser utilizada para discriminar a direção do fluxo de potência no caso de geradores ou motores.

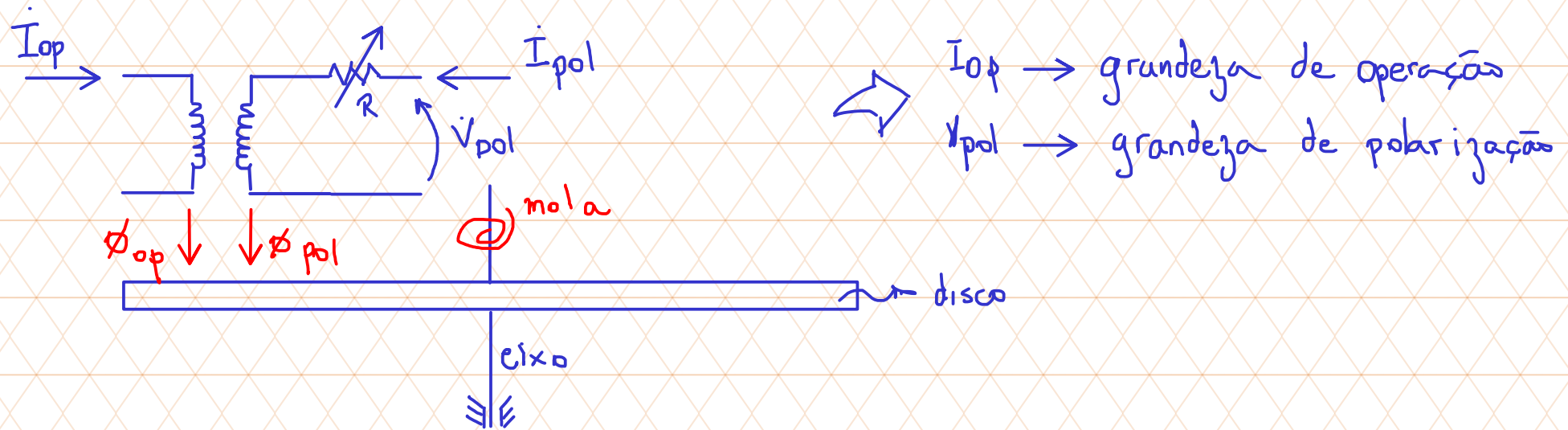
Exemplo



Nesse caso fica mais evidente a necessidade de utilização de comparação de fase, porque para um curto-circuito na LT assinalada, não só os disjuntores dessa LT podem abrir, mas também os disjuntores indicados em azul claro, porque as funções de sobrecorrente ali utilizadas "enxergam" a mesma corrente de defeito e podem ter os mesmos ajustes

b) Princípio de funcionamento

O princípio de funcionamento na tecnologia eletromecânica consiste no torque produzido pela interação entre duas densidades de fluxo produzidas por duas grandezas elétricas alternadas: grandeza de operação (caracteriza a falta) e grandeza de polarização (indica a diferença de fase entre ambas).

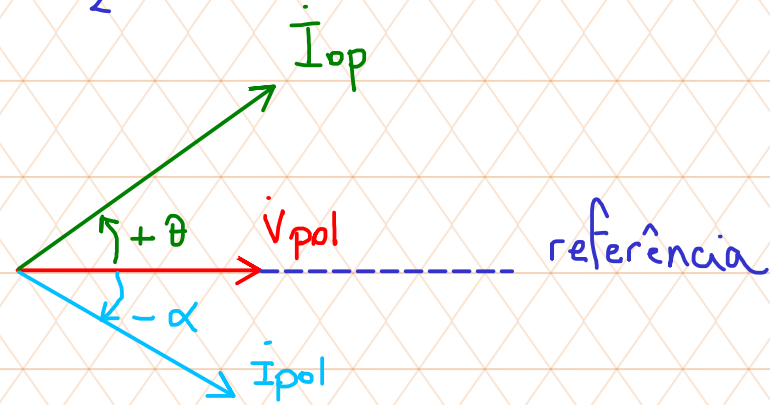


Onde: $|\vec{B}_{op}| = B_{op} \cos(\omega t + \theta)$ e $|\vec{B}_{pol}| = B_{pol} \cos(\omega t - \alpha)$

$\hookrightarrow K_1 \cdot \phi_{op}$

$\hookrightarrow K_2 \phi_{pol}$

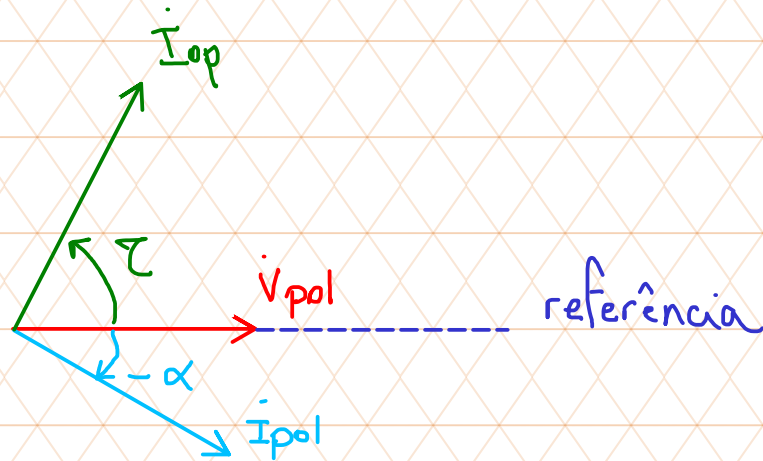
Fazendo o diagrama fasorial



Nesse caso, pode-se calcular o torque no disco como resultado da aplicação da Eq. de força de Lorentz:

$$\tau = K_3 \cdot \phi_{op} \phi_{pol} \cdot \sin(\theta - \alpha)$$

O torque será máximo quando a defasagem entre a grandeza de operação e a corrente de polarização (ATENÇÃO: não é a grandeza de polarização) for 90° . Admitindo que isso ocorra quando a grandeza de operação estiver adiantada de um ângulo τ da grandeza de polarização.



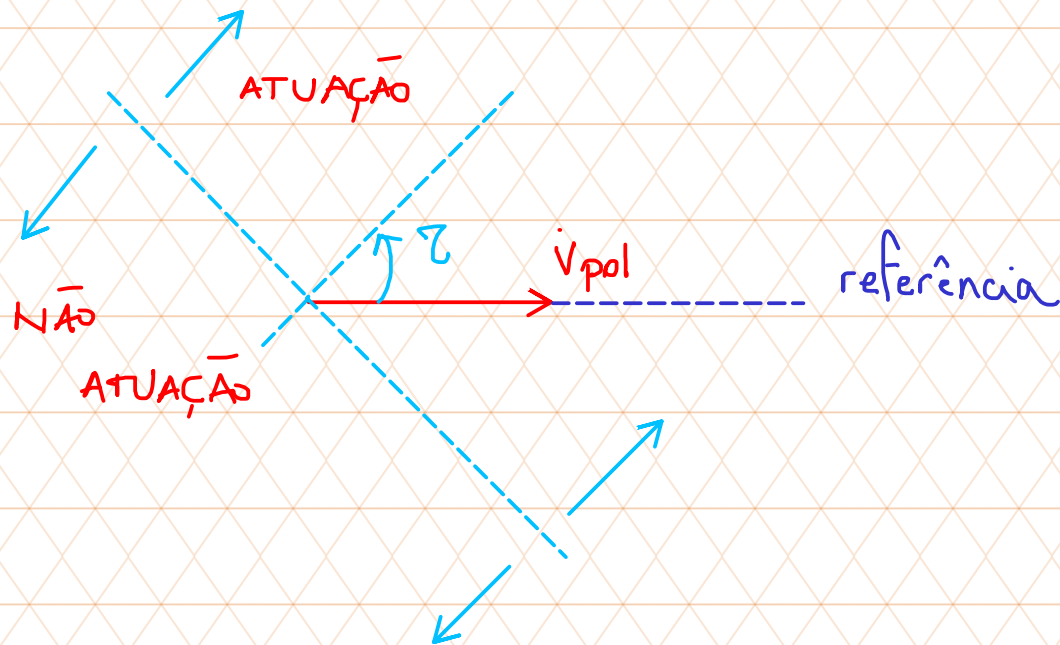
⇒ Nesse caso: $\tau - \alpha = 90^\circ$

↓
Ângulo de torque máximo

Reescrevendo a equação considerando τ :

$$\tau = K_3 \cdot \phi_{op} \cdot \phi_{pol} \cdot \text{sen}(\theta + 90 - \tau) \rightsquigarrow \tau = K_3 \cdot \phi_{op} \cdot \phi_{pol} \cdot \text{cos}(\theta - \tau)$$

Na prática, isso significa

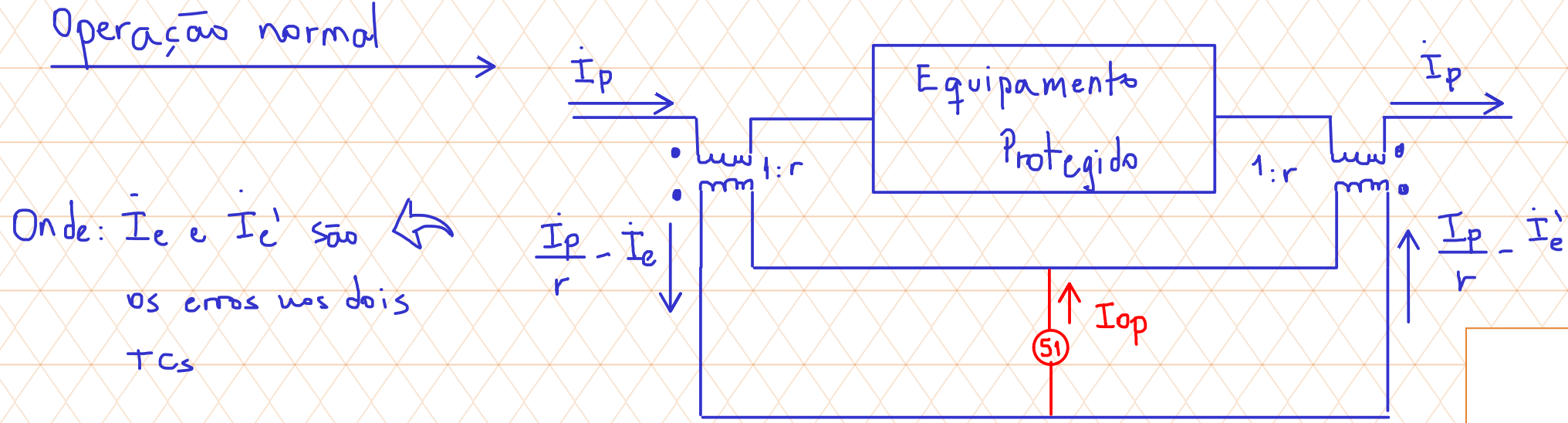


4.4) Função diferencial

a) Introdução

É uma proteção unitária por natureza, porque protege apenas o elemento dentro da sua zona primária. Essa função NÃO provê retaguarda para qualquer outra. Essa função é uma das mais precisas, seletivas e eficientes para a proteção dos equipamentos primários e nesse tipo de proteção a posição dos TCs define com precisão a zona de proteção primária (por isso ela é denominada unitária). O número ANSI é 87.

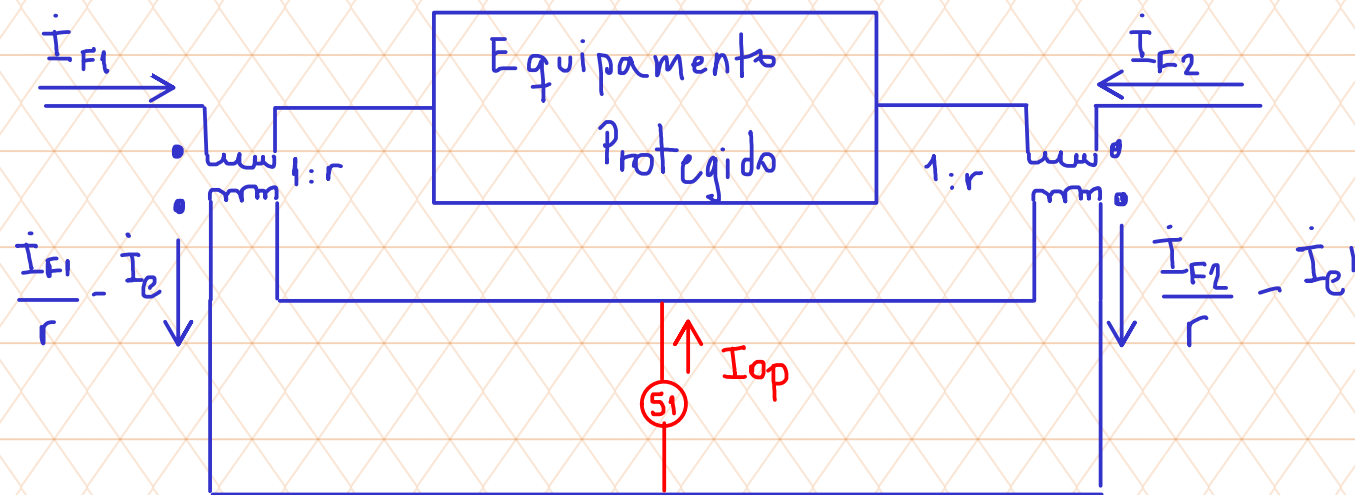
b) Princípio de operação e confiabilidade



Nesse caso:
$$I_{op} = \left(\frac{I_p}{r} - i_e \right) - \left(\frac{I_p}{r} - i_e' \right)$$

$I_{op} = i_e' - i_e \sim 0 \longrightarrow$ A função de sobrecorrente NÃO ATUA

falha no eq. protegido



Onde: i_e e i_e' são os erros nos dois TCs

Nesse caso:
$$I_{op} = \left(\frac{I_{F1}}{r} - i_e \right) + \left(\frac{I_{F2}}{r} - i_e' \right) \gg 0 \longrightarrow$$
 A função de sobrecorrente ATUA

Embora a proteção diferencial seja bastante precisa e seletiva, podem ocorrer falhas de segurança e falhas de operação:

Falhas de segurança:

Ocorrem quando eventos externos produzem leituras distintas nos TCs que circunscrevem a zona primária. Essas leituras podem ser decorrentes de:

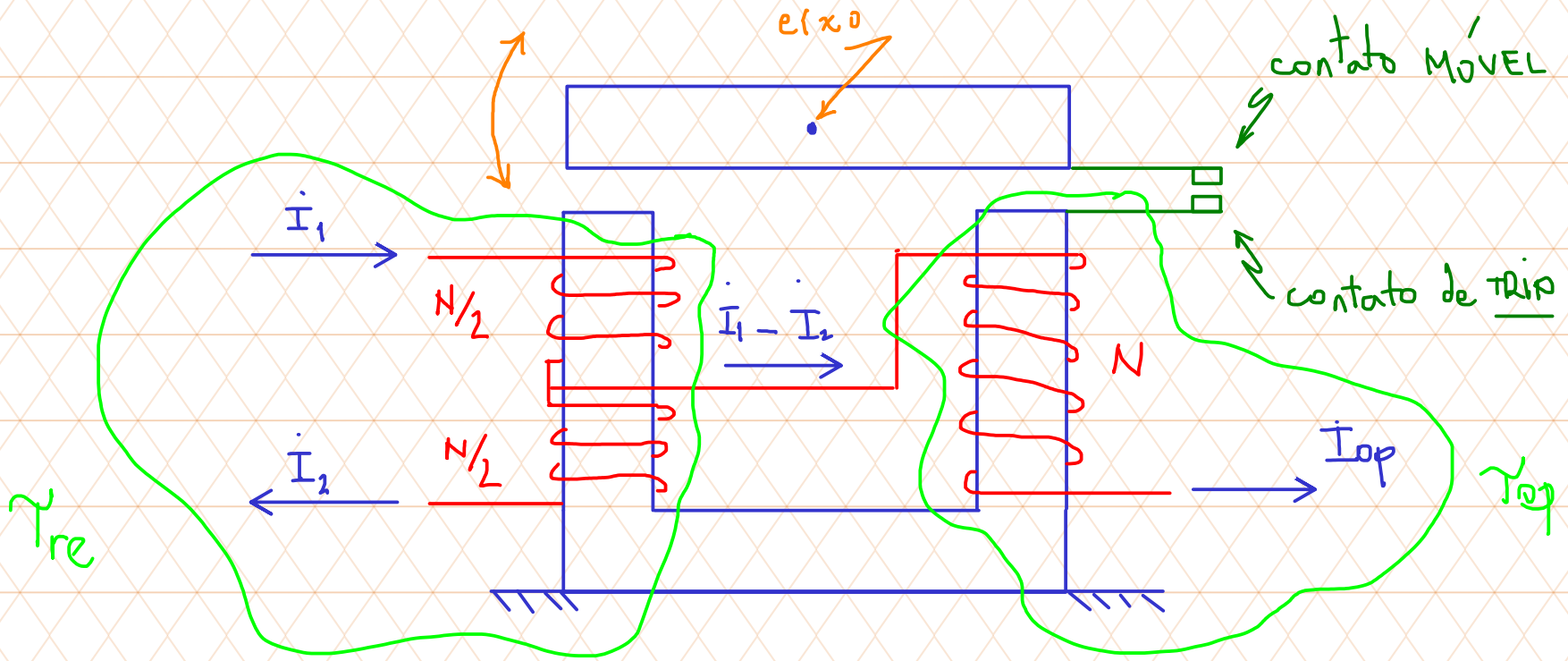
- Saturação de um dos TCs para eventos externos (a saturação normalmente ocorre em apenas um dos TCs)
- Inrush de transformadores, ou carga fria (tipicamente são fenômenos que envolvem componentes harmônicas que não a fundamental)
- Mudança automática de tap de transformador (normalmente esse equipamento é protegido pela função diferencial) que altera as correntes medidas por um dos TCs
- Corrente capacitiva nas LTs (em especial nas linhas longas e de alta ou extra-alta tensão)

Falhas de operação:

Ocorrem normalmente quando a falta é do tipo "alta impedância" porque essas faltas usualmente resultam em correntes de falta pequenas e portanto, pequenas correntes de operação.

c) Implementação como função percentual

Para mitigar os erros decorrentes de saturação de TC, corrente de magnetização (inrush e carga fria), correntes de deslocamento em LTs (correntes capacitivas), etc, a função ANSI 87 é implementada como uma função diferencial percentual.

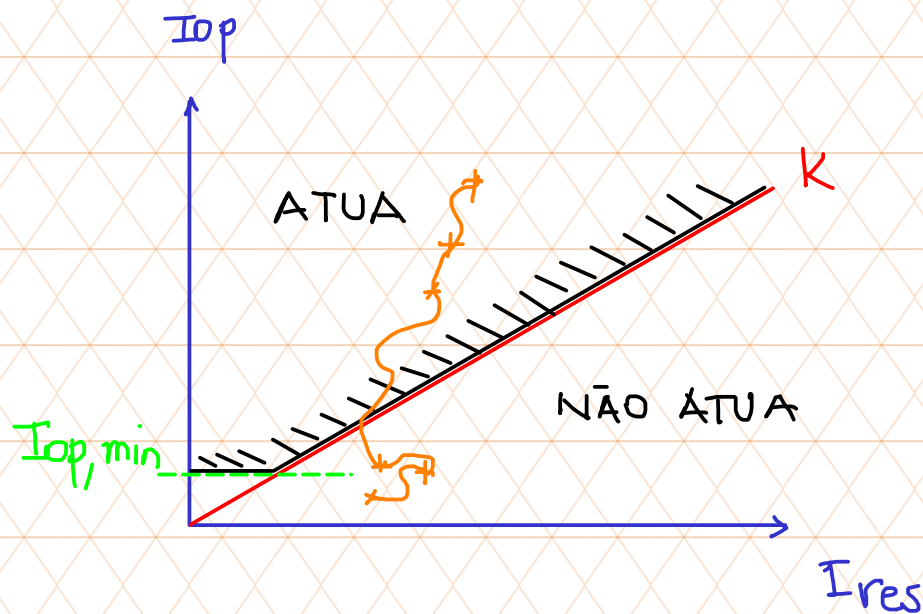


função diferencial percentual implementada no relé eletromecânico

Para que o relé atue, o torque de operação deve ser maior do que o torque de restrição:

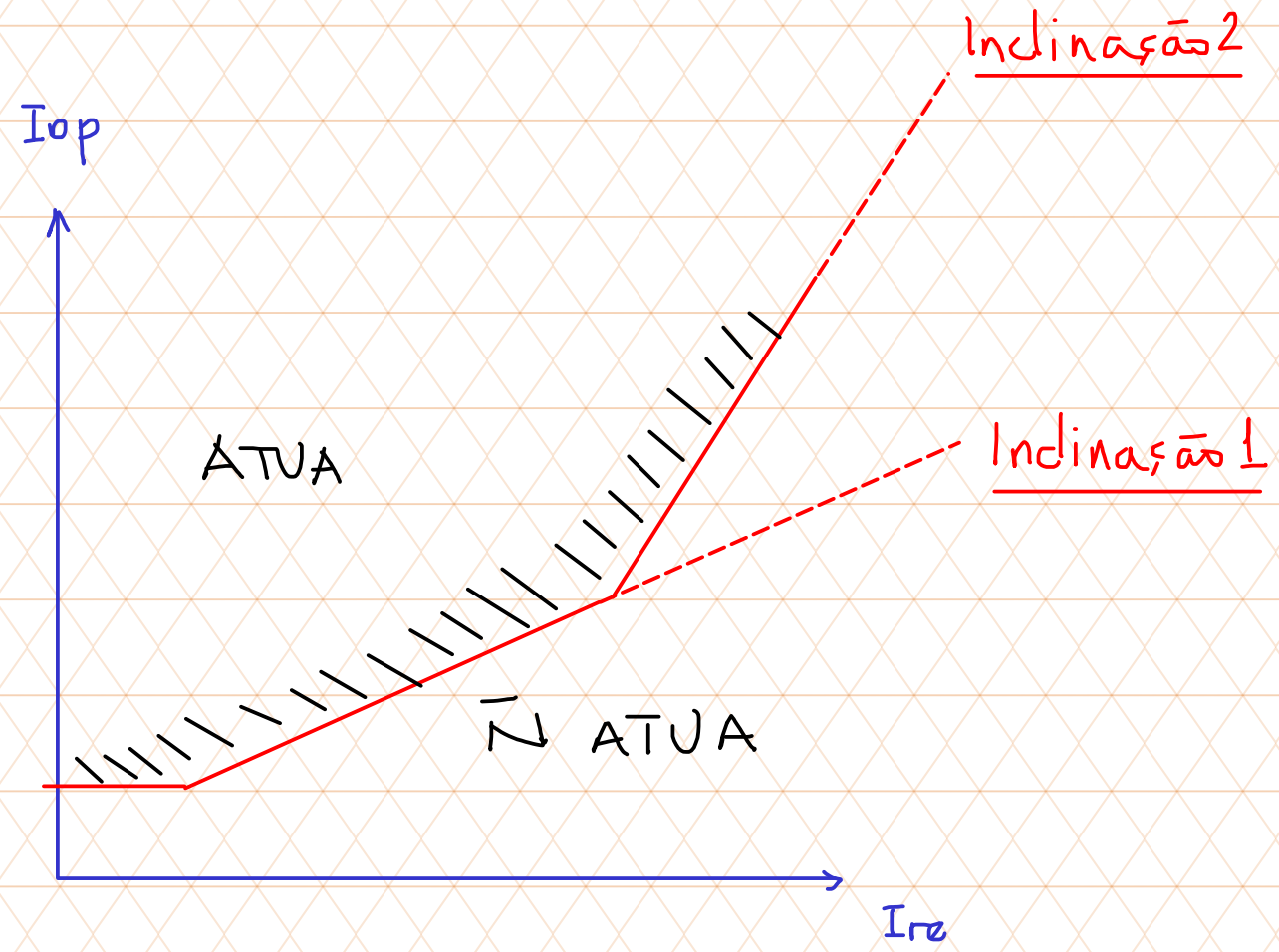
$$T_{op} > T_{res}$$
$$K_1 |I_{op}| > K_2 \{ |I_1| + |I_2| \}$$
$$K_1 |I_1 - I_2| > 2 K_2 \cdot \left\{ \frac{|I_1| + |I_2|}{2} \right\}$$

$$|I_1 - I_2| > \underbrace{\frac{2 K_2}{K_1}}_k \left\{ \frac{|I_1| + |I_2|}{2} \right\}$$



Uma característica "k" de 50% significa que uma corrente passante (de restrição) de 100 [A] requer uma corrente de operação de 50 [A] para que o relé atue. Nos relés digitais (IEDs) existem funções com perfis variáveis

Por exemplo



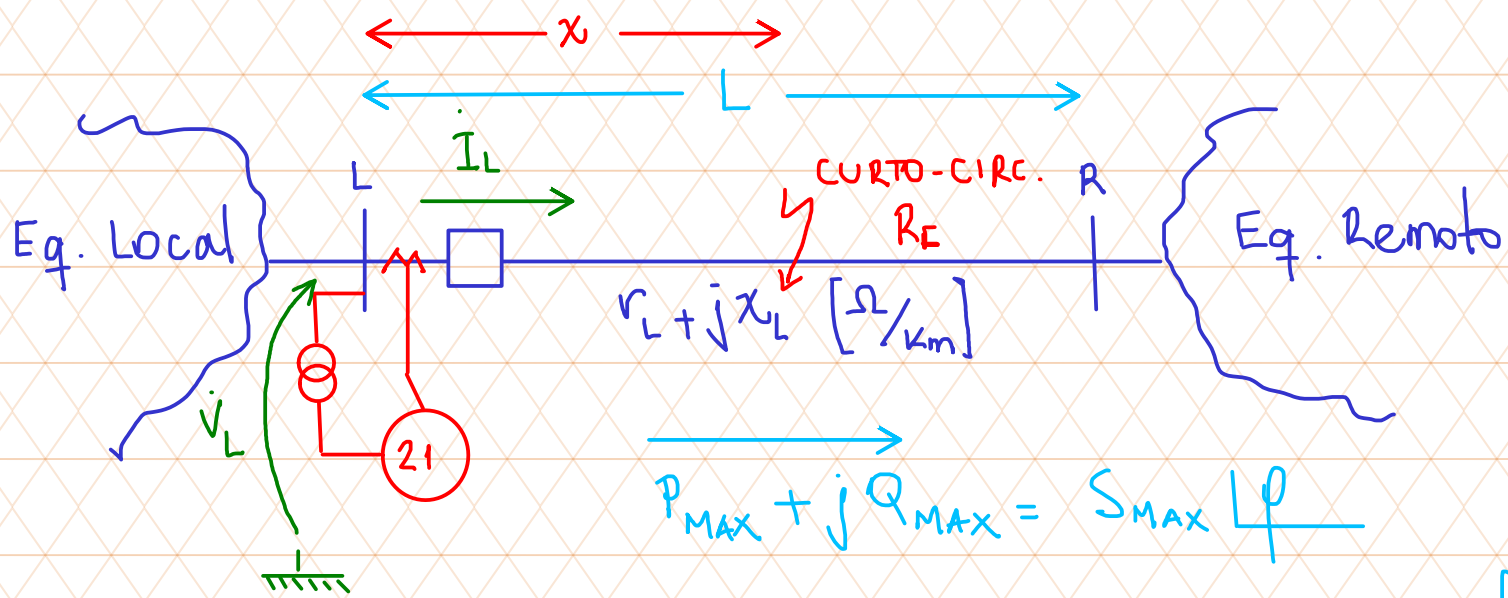
4.5) Função de distância

a) Introdução

A função de distância se baseia na impedância "vista" pelo IED, que é definida pelo ponto de instalação dos transformadores de instrumentação. A impedância é calculada como a razão entre tensão e corrente fasoriais.

$$\bar{Z}_{vista} = \frac{\bar{V}}{\bar{I}} = R + jX$$

A função de distância (ANSI 21) pode ser usada para detecção de falhas em linhas de transmissão, subexcitação de geradores síncronos, reatores (em especial em reatores com núcleo de ar), etc. A resposta dessa função é analisada no plano complexo (comumente chamado de Plano R-X).



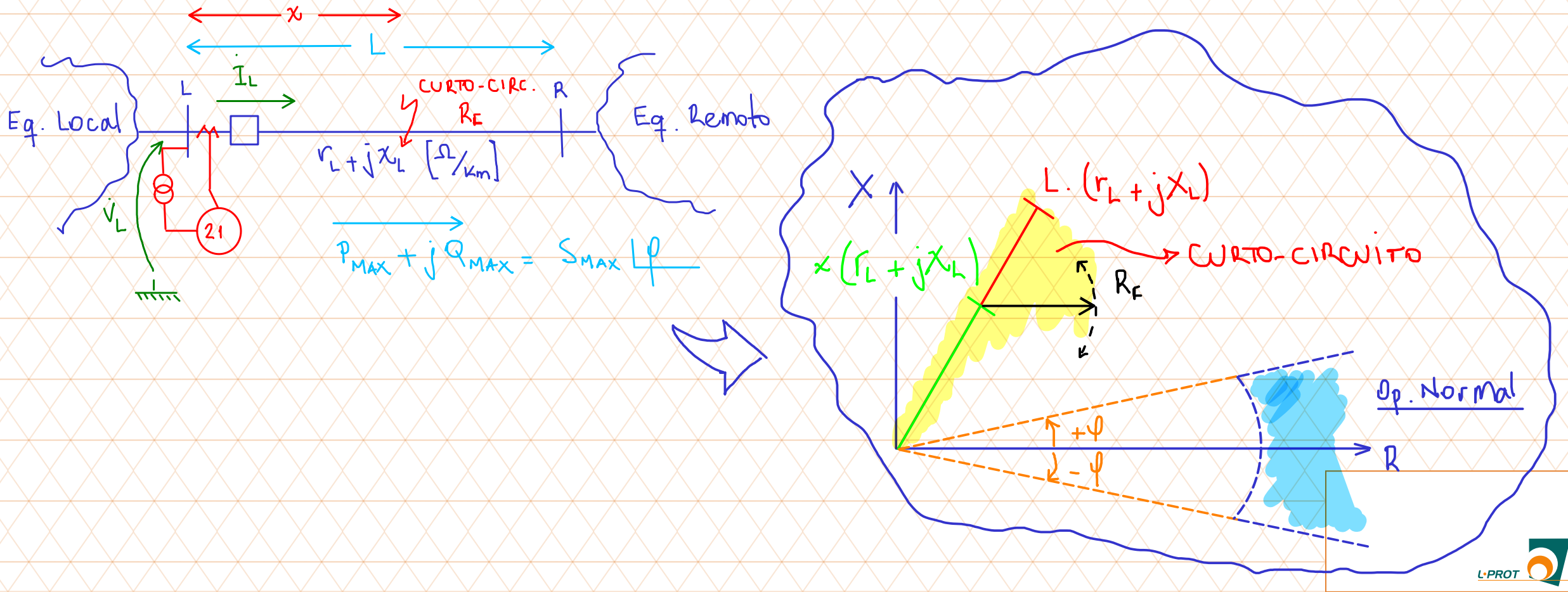
Em operação normal: $\dot{V}_L = (r_L + jx_L) \cdot L \cdot \dot{I}_L + \dot{V}_R$ → fluxo de potência

Admitindo que $|\dot{V}_L| = |\dot{V}_R| = V$ para o carregamento máximo, tem-se:

$$\bar{Z}_{VISTO, MIN} = L \cdot (r_L + jx_L) + \frac{V^2}{S_{MAX}} L_p$$

Para um curto-circuito a uma distância "x", com resistência R_F , tem-se

$$\bar{Z}_{\text{VISTO}, x} = x \cdot (r_L + jx_L) + R_F$$



b) Função de distância em sistemas de transmissão mutuamente acoplados

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.

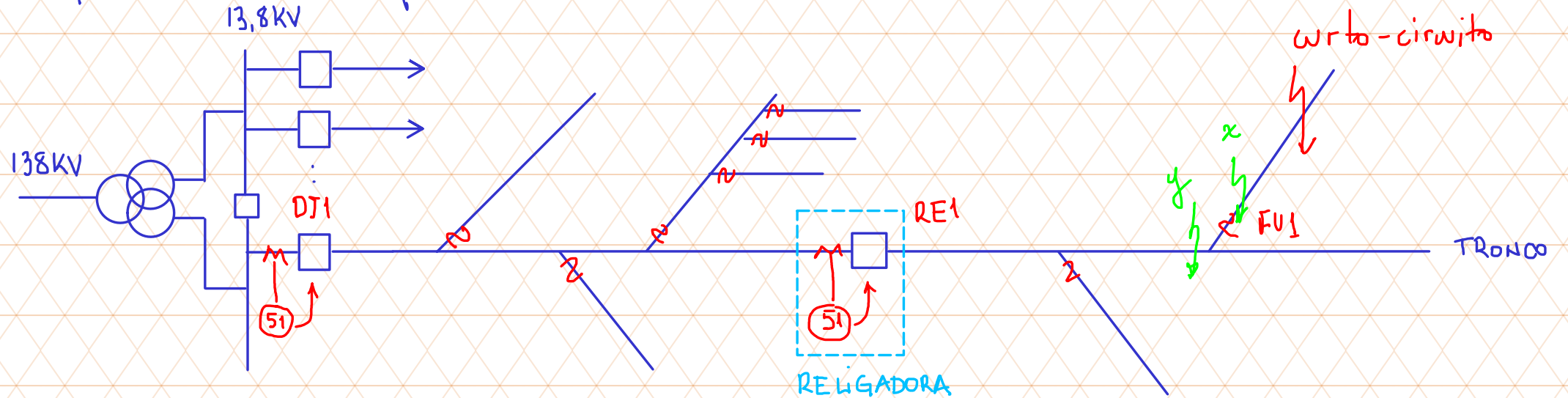
Assim como a função diferencial, que apresenta erros sob condições especiais, a função de distância também possui fontes de erro:

- 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 (erros de transformação, saturação de TC, resposta do TPC)
- 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
- Contribuição dos equivalentes de Thevenin nos terminais local e remoto
- Componente aperiódica nos sinais de corrente

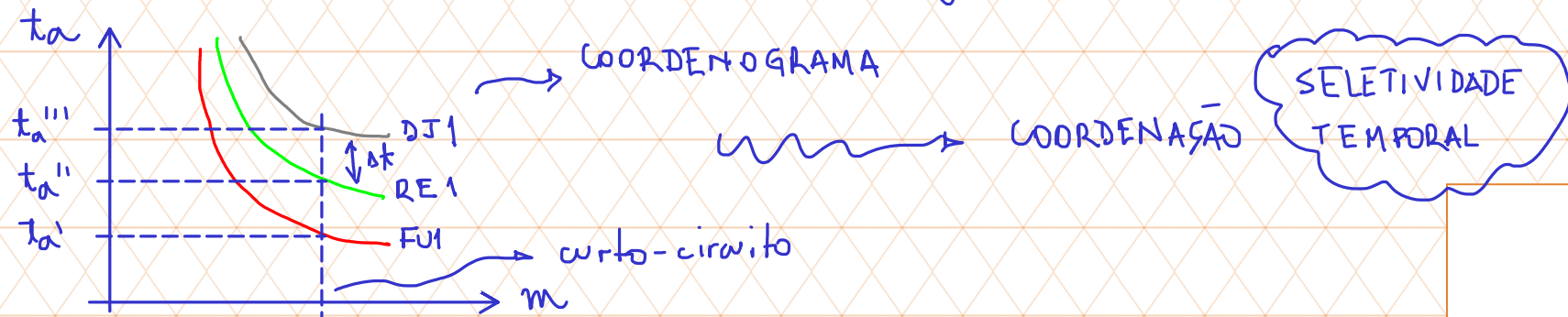
5. Proteção de linhas de transmissão

5.1 Proteção de sobrecorrente

Supondo ANSI 51 (tempo inverso) em um alimentador de distribuição

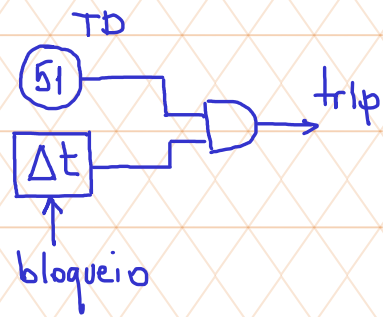
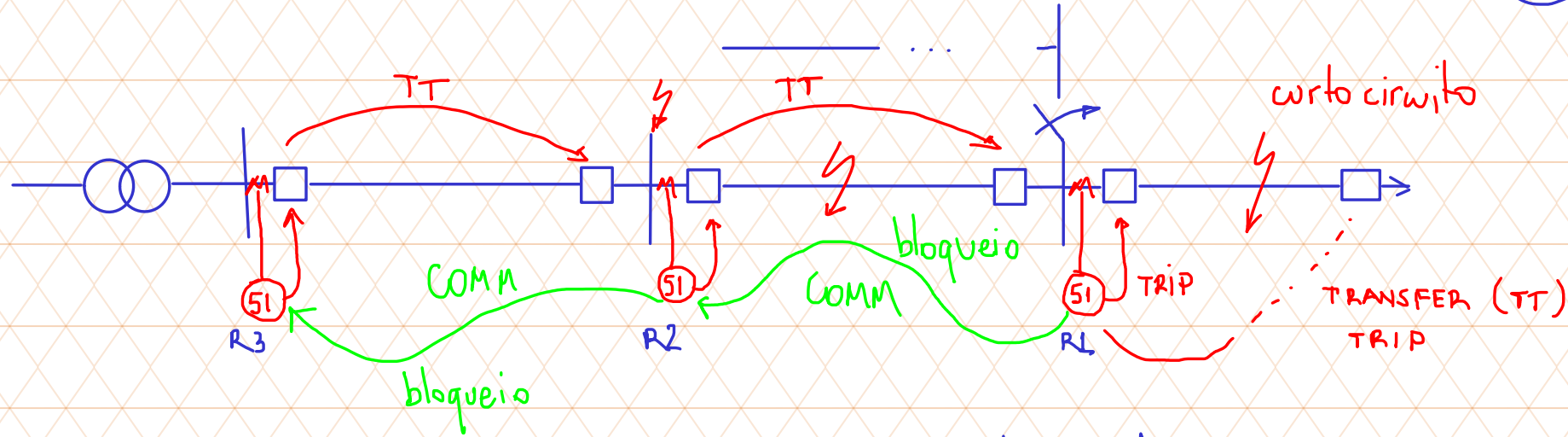


As curvas tempo x corrente dos dispositivos que "enxergam" o curto-circuito são:



Supondo ANSI 51 (tempo definido): em ambientes industriais

(SELETIVIDADE)
LÓGICA



$$\Delta t > TD$$

- ✓ TD garante coordenação pq R1, R2 e R3 percebem o curto circuito, mas existe um tempo mínimo para que o bloqueio seja ativado
- ✓ Se após Δt o curto-circuito persistir (51 está ativo ainda), ocorre o trip do respectivo disjuntor

A proteção de sobrecorrente de tempo inverso possui curvas padronizadas:

- Tipicamente o fabricante do equipamento oferece uma família de curvas própria
- Família de curvas da IEEE (ANSI)
- Família de curvas da IEC

a) Família de curvas da IEEE (ANSI)

$$t_a = \text{MT} \left\{ \frac{A}{m^p - 1} + B \right\}$$

Diagram illustrating the components of the ANSI family of curves equation:

- K.TD is labeled as "multiplicador" (multiplier).
- K.TD is also labeled as "time dial".
- MT is highlighted in yellow in the original image.

Onde
MT é um multiplicador de tempo ajustável,
que serve para coordenar um conjunto
de curvas dessa família.

Parâmetros	tipo de curva		
	extremamente inversa	muito inversa	moderadamente inversa
A	28,2	19,61	0,0515
B	0,1217	0,491	0,1140
p	2	2	0,02

A escolha do tipo de curva dentro da família leva em consideração a variação da corrente de curto-circuito ao longo do caminho série a ser protegido. Quanto menor for essa variação, mais inversa tem que ser a curva para se garantir a seletividade e a coordenação entre as proteções primárias e de retaguarda.

b) Família de curvas da IEC

$$t_a = MT \left\{ \frac{k}{m^E - 1} \right\}$$

Onde

MT é um multiplicador de tempo ajustável que serve para coordenar um conjunto de curvas dessa família.

Parâmetros	Tipo de curva			
	short inverse	A	B	C
K	0,05	0,14	13,5	80
E	0,04	0,02	1	2

a.3) Ajustes das funções de sobrecorrente instantânea e temporizada

- Sobrecorrente instantânea:

Apenas a escolha da corrente de pickup (tipicamente em termos de valores secundários do TC) para garantir coordenação e seletividade entre todos os elementos que estão em série

- Sobrecorrente de tempo definido:

Escolha da corrente de pickup usando critérios semelhantes aos da sobrecorrente instantânea, e também escolha do tempo de atuação (TD). Quando o ajuste envolve seletividade lógica os critérios são aqueles já apresentados (corrente de pickup que garante discernimento entre corrente máxima de carga e mínima de curto-circuito e TD que garante que a mensagem de bloqueio seja lida por quem deve ser bloqueado).

- Sobrecorrente de tempo inverso: *escolha arbitrária do cliente/projetista*

- Tipo de curva dentro da família
- Escolha da corrente de pickup
- Cálculo do MT para garantir coordenação

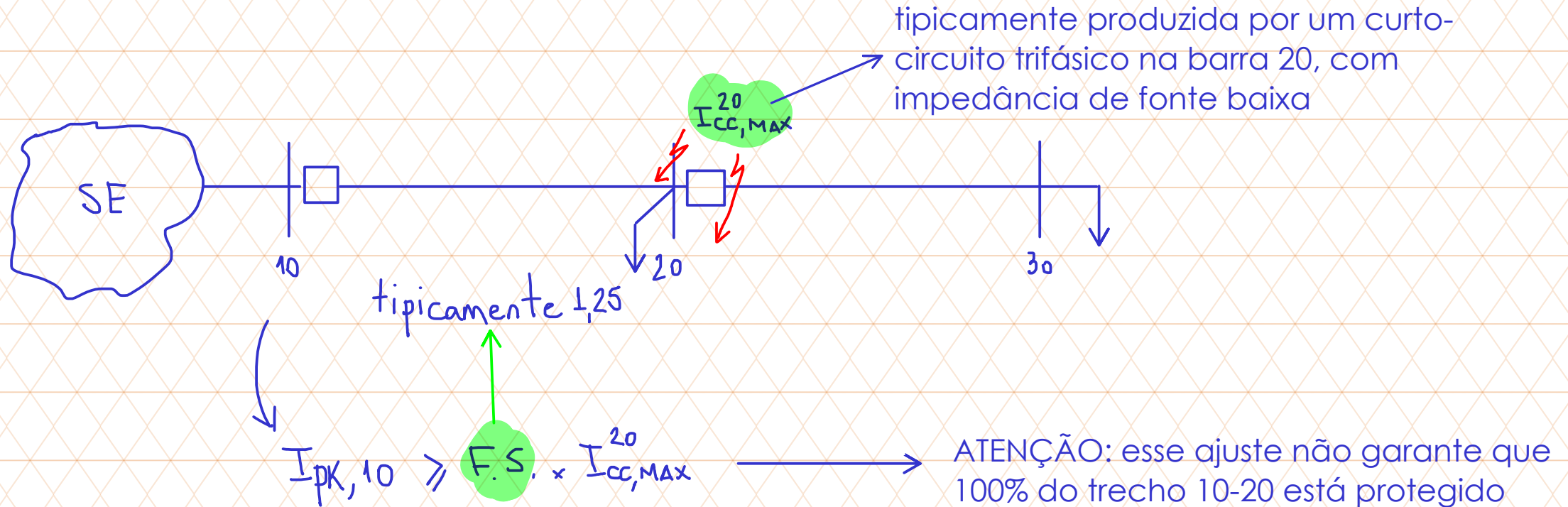
- Sobrecorrente de tempo inverso (cont.)

O ajuste da função de sobrecorrente de tempo inverso é feito em três etapas:

- Escolha da curva (família e tipo), que deve ser igual para todos os equipamentos de modo a evitar falhas de coordenação. O tipo de curva depende da impedância dos trechos que se pretende proteger, isto é, impedâncias pequenas que implicam correntes de curto-circuito próximas em todas as barras demandam tipos de curva mais inversos para garantir coordenação.
- Cálculo da corrente de pickup
- Ajuste dos multiplicadores de tempo (MT) de cada função de sobrecorrente, de modo a garantir coordenação. Para o ajuste da função mais a jusante, escolhe-se o menor MT possível e para as demais, deve-se escolher um multiplicador de tempo que satisfaça o critério de coordenação de tempo para atuação das funções (principal e retaguarda remota)

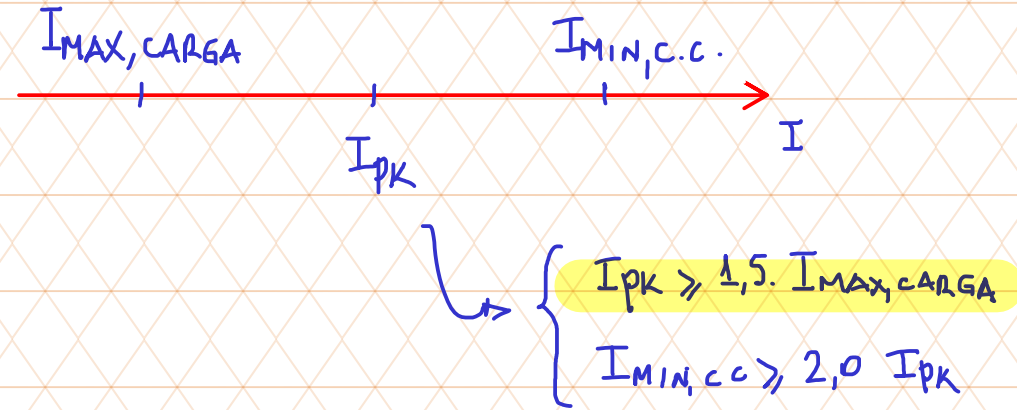
Escolha da corrente de pickup:

- Sobrecorrente instantânea: nesse caso, a corrente de pickup deve ser ajustada para que nenhuma falta na zona a jusante da zona primária sensibilize essa função. Isso porque não é possível obter seletividade temporal.



obs.: em sistemas onde há maior incerteza nos dados e/ou menor frequência de revisões, pode-se optar por utilizar um FS maior do que 1,25.

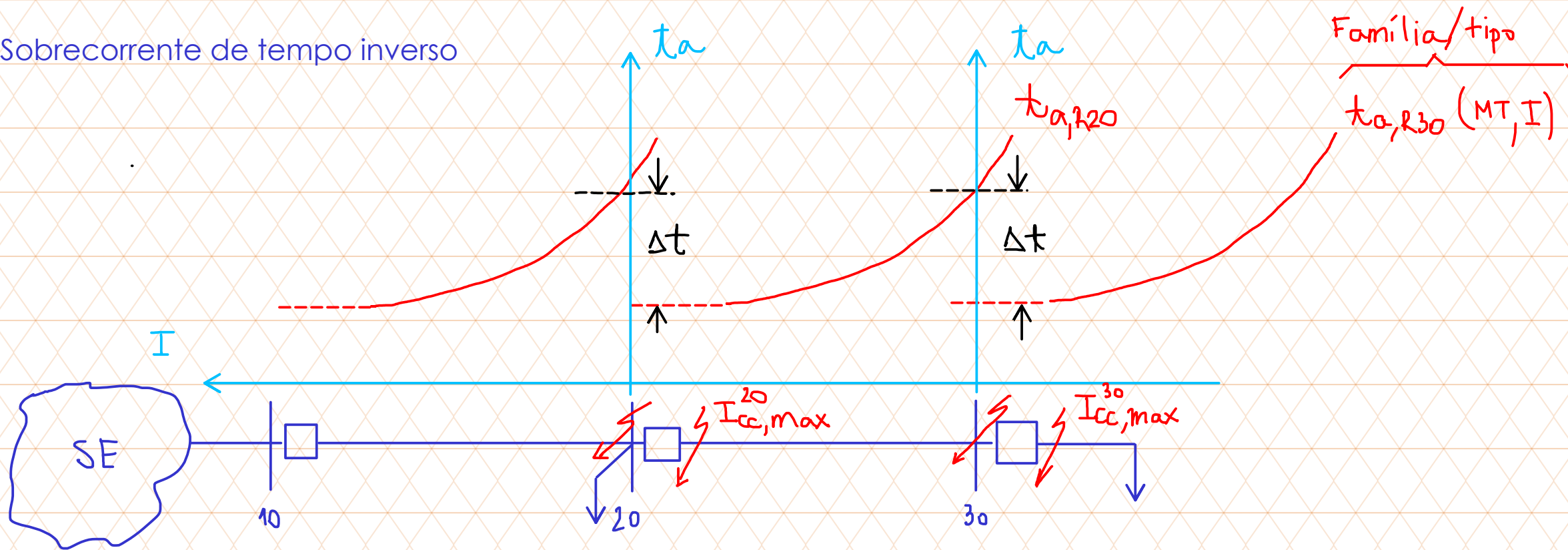
- Sobrecorrente de tempo inverso: para se obter seletividade por meio de temporização é necessário escolher uma corrente de pickup capaz de discernir a máxima corrente de carga da mínima corrente de curto-circuito. Tipicamente:



Se não for possível satisfazer simultaneamente as duas condições, deve-se optar por uma situação onde há mais falhas de segurança (I_{pk} mais próximo da corrente máxima de carga) ou mais falhas de operação (I_{pk} mais próximo da mínima corrente de curto-circuito), em função do tipo de confiabilidade que se deseja

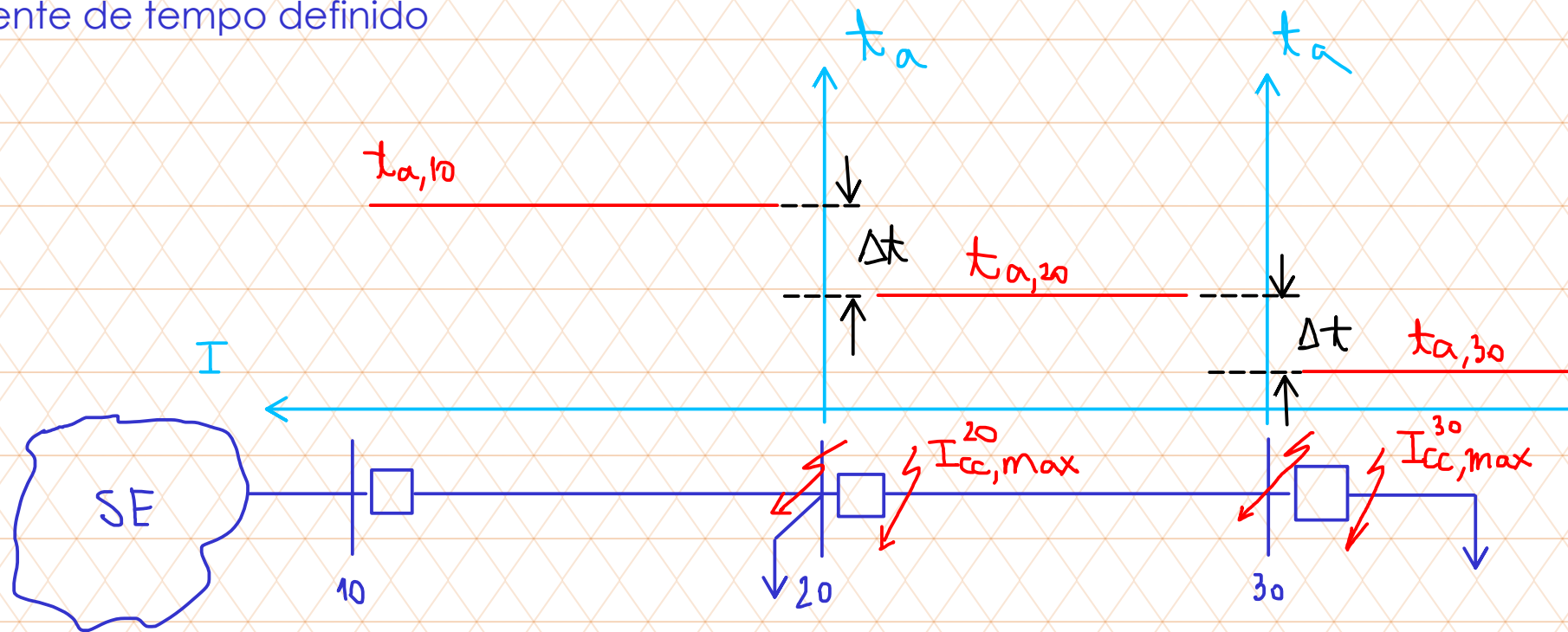
A coordenação da função de sobrecorrente temporizada fica:

- Sobrecorrente de tempo inverso



$\Delta t \leadsto$ tempo mínimo de coordenação, que garante que a função responsável pela detecção do defeito tenha comandado seu respectivo disjuntor e ele tenha isolado corretamente o defeito

- Sobrecorrente de tempo definido

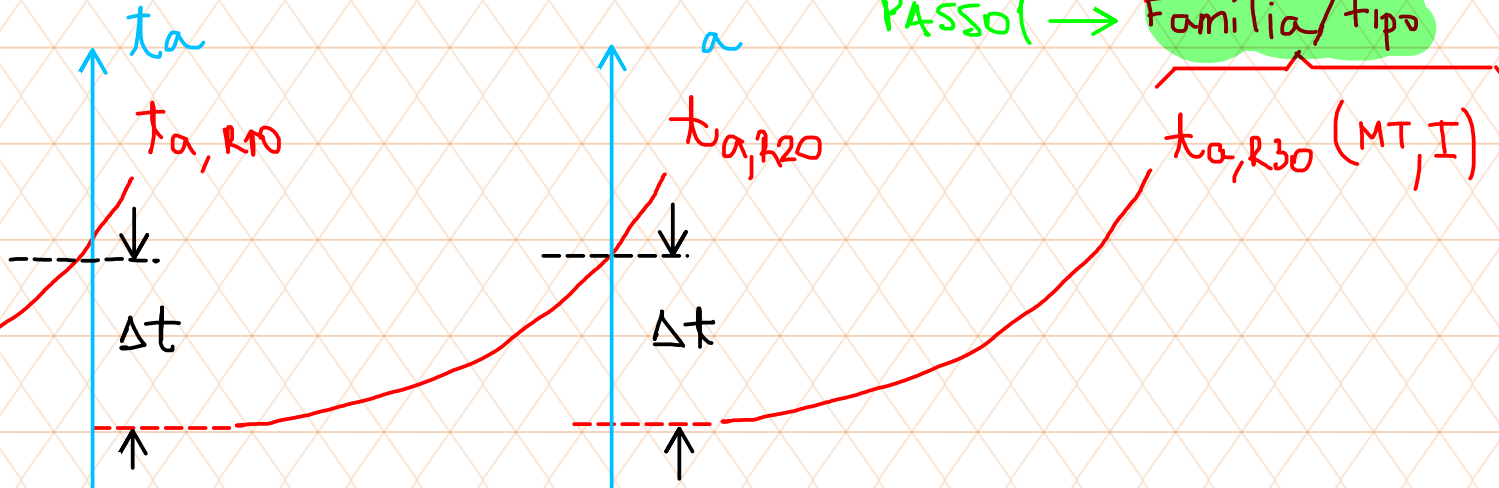


Então, a coordenação da função de sobrecorrente de tempo definido implica aumento do tempo de atuação a medida que o curto-circuito se aproxima da subestação, isto é, quanto maior a corrente de carga maior é o tempo de atuação (isso não é bom para o sistema elétrico).

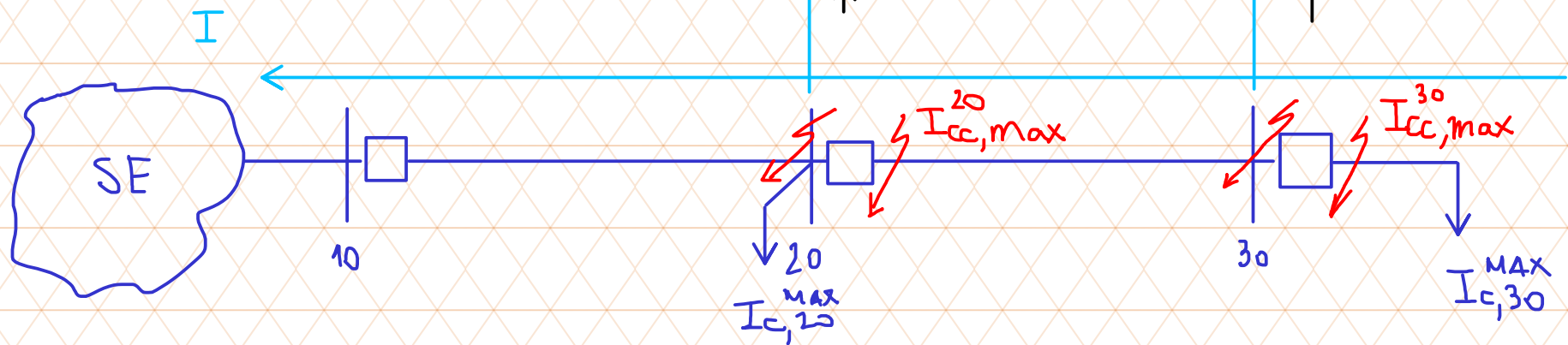
- Exemplo

BARRA	I _{cc}	
	MIN	MAX
10	I _p	I _x
20	I _q	I _y
30	I _r	I _z

PASSO 1 → Família/tipo

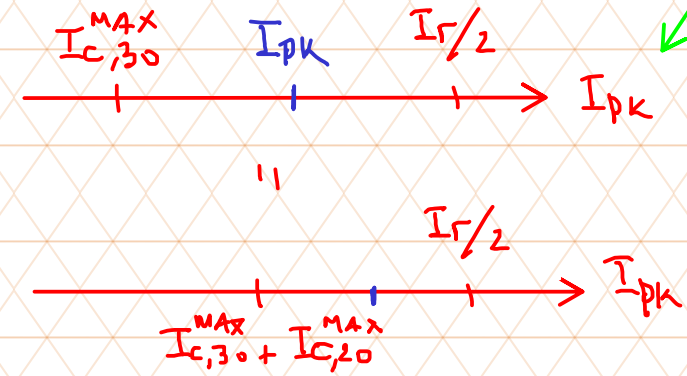


ta,R30 (MT, I)



PASSO 2

$$\begin{cases} I_{PK,R30} \geq 1,5 \cdot I_{C,30}^{MAX} ; I_{PK,R30} \leq I_r/2 \\ I_{PK,R20} \geq 1,5 \cdot I_{C,30}^{MAX} ; I_{PK,R20} \leq I_r/2 \\ I_{PK,R10} \geq 1,5 \cdot \{I_{C,30}^{MAX} + I_{C,20}^{MAX}\} ; I_{PK,R10} \leq I_r/2 \end{cases}$$



✓ $t_{a,R30}(I) \rightsquigarrow$ MT (mínimo) \longrightarrow Escolha

$$t_{a,R20}(I_{cc,max}^{30}) = t_{a,R30}(I_{cc,max}^{30}) + \Delta t \rightarrow \text{Cálculo de MT}$$

$$t_{a,R10}(I_{cc,max}^{20}) = t_{a,R20}(I_{cc,max}^{20}) + \Delta t \rightarrow \text{Cálculo de MT}$$

coordenação

A utilização de um dispositivo de proteção exclusivo para o neutro torna a proteção mais sensível, melhorando o dependability. Isso porque em sistemas trifásicos e equilibrados, usualmente a corrente de neutro é próxima de zero e a proteção observa somente a corrente de falta (para faltas que envolvam a terra).

No caso do ajuste da corrente de pickup para as unidades de neutro, toma-se o maior desequilíbrio como o limite inferior do cálculo da corrente de pickup e a mínima corrente de curto-circuito para os curtos-circuitos que envolvam a terra.