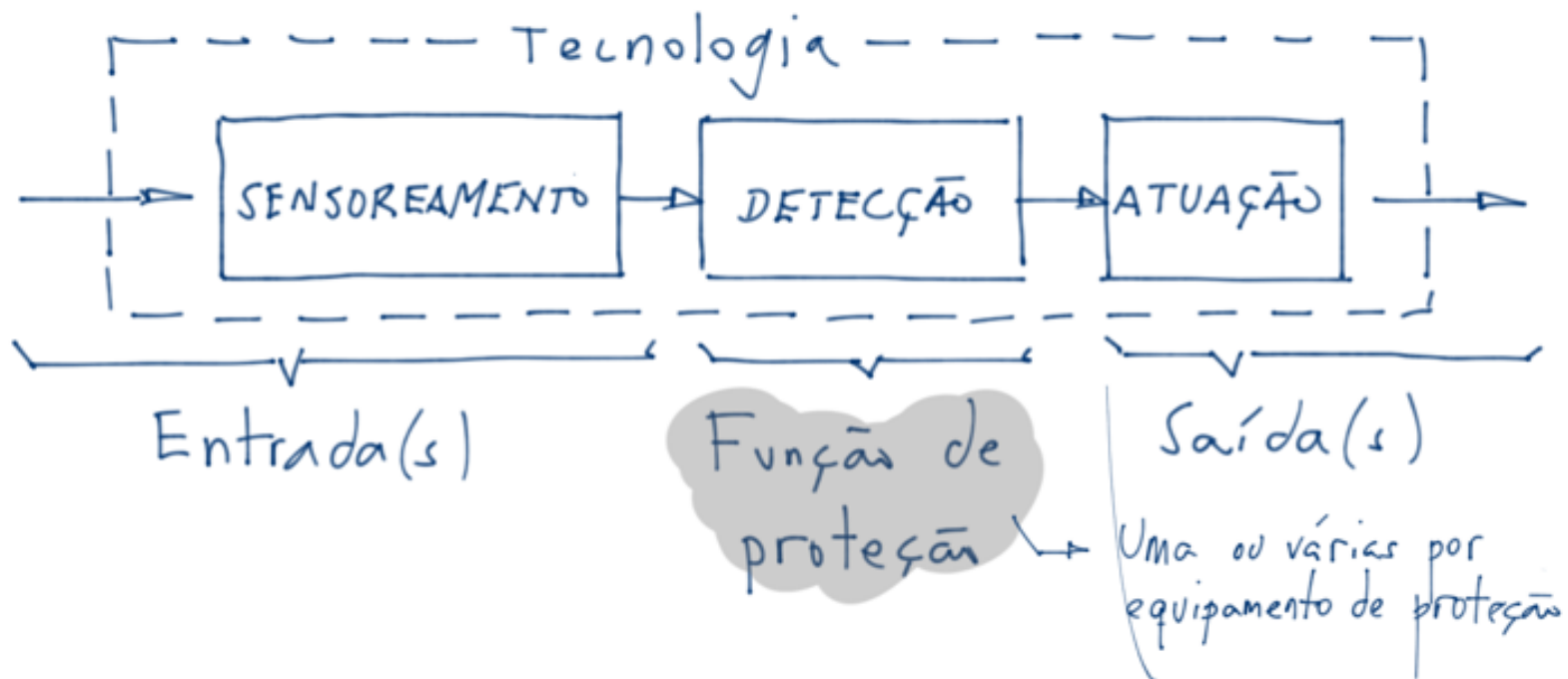


4. Princípios de operação do sistema de proteção

O diagrama a seguir ilustra um sistema de proteção:



4.1) Tecnologia

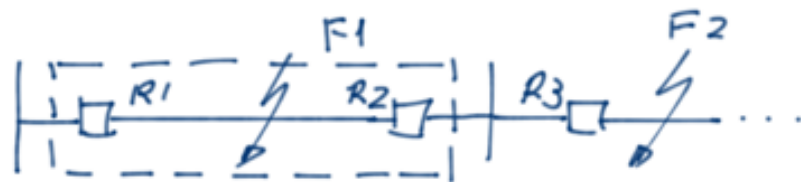
Quanto à tecnologia dos relés há três implantações distintas: eletromecânica; estática; e digital. Esta última vem evoluindo significativamente, com a agregação de múltiplas funcionalidades, canais de comunicação (e seus respectivos protocolos), tornando-se o que é conhecido como IED (Intelligent Electronic Device). Atualmente, vem se consolidando o termo CPC (Centralized Protection & Control) que agrega vários IEDs virtualizados em um hardware dedicado.

4.2) Entradas (sensoreamento)

Quanto às entradas, os dispositivos de proteção podem receber sinais de tensões, correntes, potências, frequências, pressões (p.ex. de óleo), etc.

De um modo geral, dispositivos de proteção podem ser projetados para detectar anormalidade nos sistemas elétricos, utilizando "virtualmente" qualquer grandeza que possa representar o fenômeno. No entanto, deve-se utilizar as grandezas que caracterizam única e exclusivamente o fenômeno, dentro da zona primária de proteção.

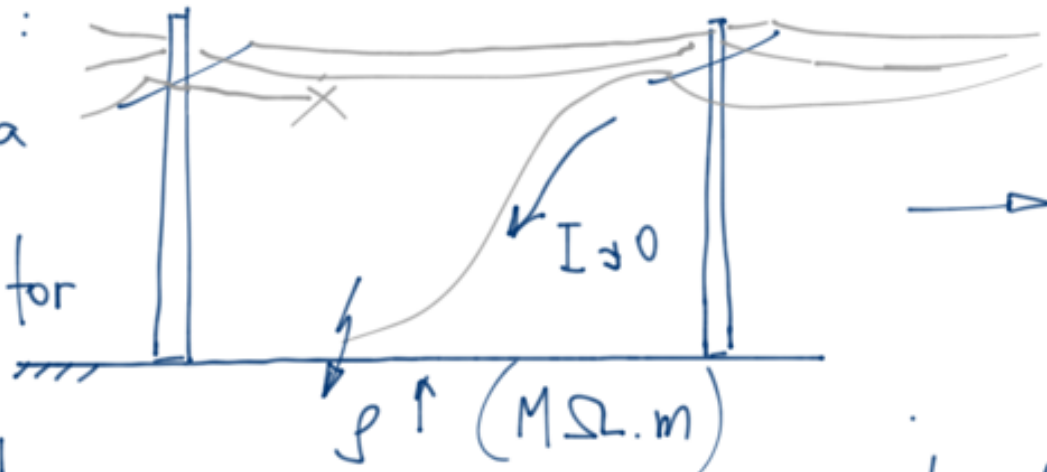
Ex 1:



↳ Ambos podem desligar para falta em F2 (é preciso direcionalidade para R2 e coordenação entre R1 e R3).

Ex 2:

queda
de
condutor



Nesse caso não é conveniente olhar para a corrente de ω Hz (observação de outras características)

4.3) Funções de proteção

A detecção (performance characteristic) consiste na inteligência do dispositivo de proteção. Tipicamente, a detecção está relacionada com o fenômeno que se pretende evitar. Os tipos são:

- a) Detecção de nível: sobrecorrente instantânea e temporizada (ANSI 50/51); sobretensão; subtensão.
- b) Diferencial: diferencial de corrente (para qualquer elemento).
- c) Comparação de ângulo: comparação entre o ângulo de fase de duas grandezas (p.ex sobrecorrente direcional)
- d) Impedância: cálculo da impedância a partir dos sinais de tensões e correntes.

4.3.1) Detecção de nível

A detecção de nível é o princípio de atuação mais simples. A função atua (i.e. percebe uma anormalidade no sistema) quando a grandeza observada ultrapassa um valor pré-fixado (função tipo "sobre") ou cai abaixo desse valor. (função tipo "sub").

a) Sobrecorrente

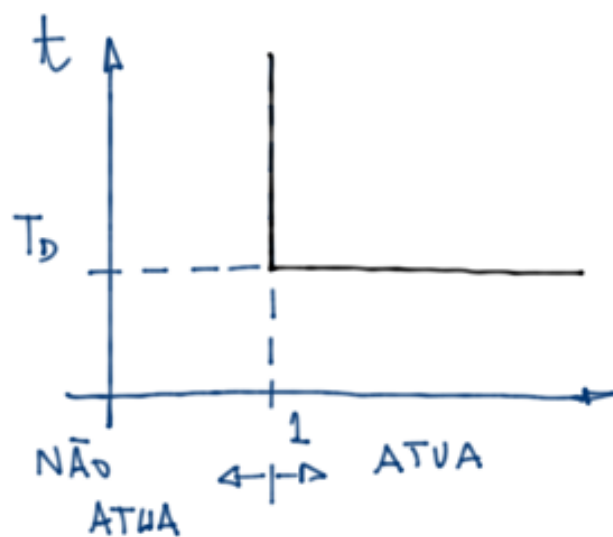
Esse tipo de proteção foi o primeiro a ser desenvolvido e, inicialmente, essa função era desempenhada por fusíveis (responsáveis simultaneamente pela detecção da anormalidade e pela isolação do defeito e o tempo de fusão é inversamente proporcional à magnitude da corrente. As desvantagens são:

- ✓ necessidade de substituição (fusíveis reserva em estoque e equipe qualificada); e
- ✓ Abertura monopolar.

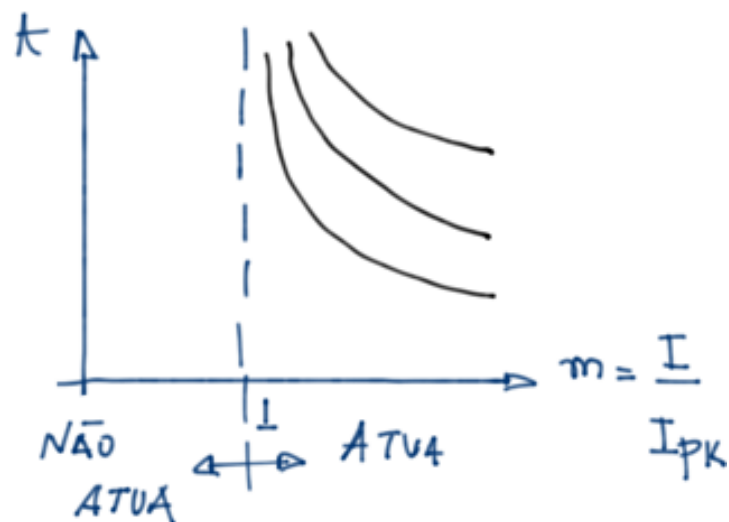
Para tentar resolver (minimizar) essas duas desvantagens foram desenvolvidos os dispositivos de proteção desacoplados do dispositivo primário (disjuntor) dando espaço à criatividade.

As funções de sobrecorrente são:

- i) Sobrecorrente instantânea: sem atraso intencional, número ANSI 50; e
- ii) Sobrecorrente temporizada: essa função pode ser classificada em função da característica "tempo de atuação x corrente", número ANSI 51



(ii.1) função 51 de tempo independente



(ii.2) função 51 de tempo inverso

Onde: I_{PK} é a corrente de atuação ou pickup (ajustável);
 T_D é o atraso para atuar (ajustável);
 m é o múltiplo da corrente de atuação.

As equações para a curva inversa são:

a) Norma IEEE: $T_a = MT. \left[\frac{A}{m.P-1} + B \right]$, onde

MT. é um multiplicador de tempo ajustável.

PARAMETROS	TIPO DE CURVA		
	EXTREMANENTE	MUITO	MODERAD.
A	28,2	19,61	0,0515
B	0,1217	0,491	0,1140
P	2	2	0,02

b) Norma IEC: $T_a = MT. \left[\frac{K}{m^E - 1} \right]$

PARAMETROS	TIPO DE CURVA			
	SHORT INVERSE	A	B	C
K	0,05	0,14	13,5	80
E	0,04	0,02	1	2

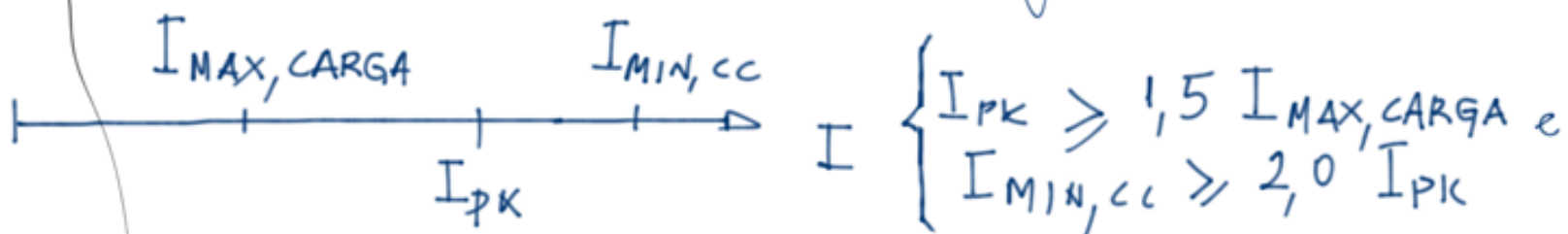
Os parâmetros ajustáveis para a função de sobrecorrente são:

✓ Sobrecorrente instantânea: I_{PK} (em termos da corrente secundária do TC)

✓ Sobrecorrente temporizada:

- I_{PK} e T_D p/ tempo definido;
- Tipo de curva, I_{PK} e MT para tempo inverso.

Para sobrecorrente temporizada (ANSI 51), o ajuste do I_{PK} é:



Para sobrecorrente instantânea não é possível obter seletividade por meio de temporização. Desta forma I_{PK} deve ser ajustada para que nenhuma falta a jusante do seu trecho sensibilize a função. Isso é feito de tal modo que:



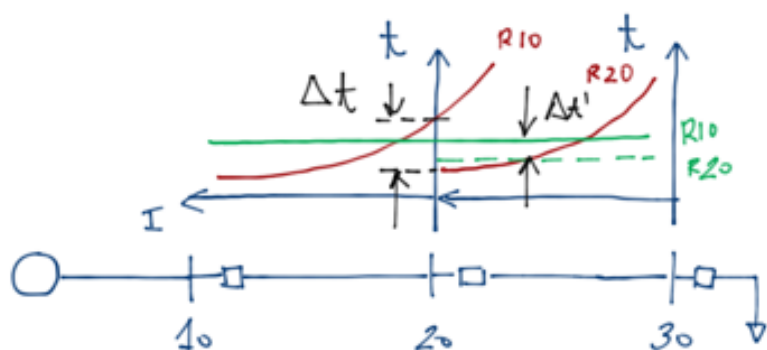
Atenção: essa função não irá proteger 100% do trecho

Onde: I_{CCMAX}^{20} é a corrente máxima de curto circuito na barra 20 (tipicamente 3 ϕ , com impedância de fonte baixa), vista pelos dois relés.

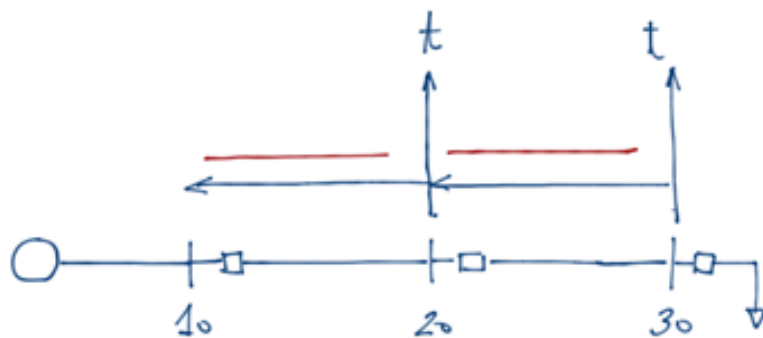
Logo: $I_{PK}^{10} \geq F.S. \times I_{CCMAX}^{20}$ Onde: $F.S.$ é tipicamente 1,25
↳ fator de segurança

Obs: em sistemas onde há maior incerteza nos dados e/ou menor frequência de revisões dos ajustes, pode-se utilizar um F.S. maior.

Na proteção TEMPORIZADA:



Na proteção INSTANTÂNEA

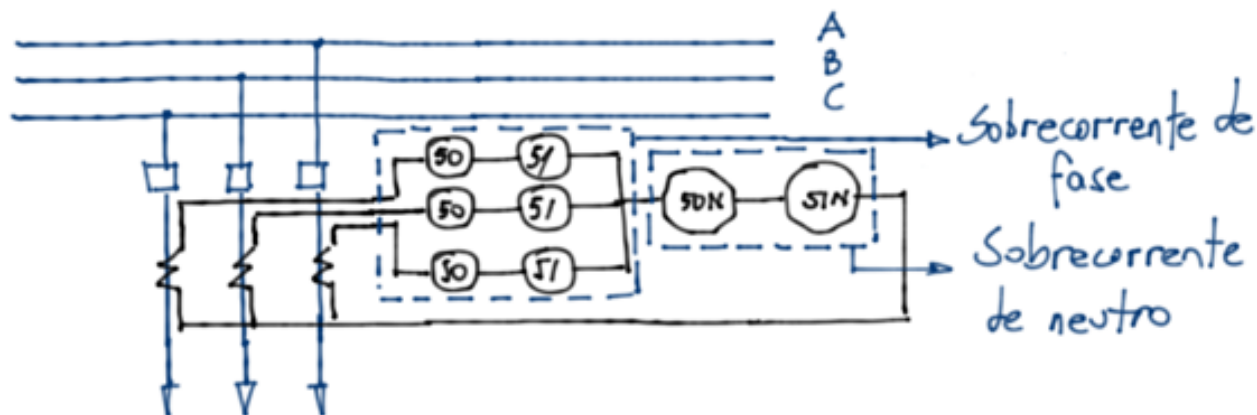


$$T_{a,R20}(I_{CCMAX,20}) + \Delta t = \Rightarrow 51 \text{ (tempo inverso)}$$

$$= T_{a,R10}(I_{CCMAX,20})$$

$$T_{a,R20} + \Delta t' = T_{a,R10} \Rightarrow 51 \text{ (tempo definido)}$$

Exemplo: proteção de sobrecorrente implementada com tecnologia eletrônica. (relés eletromecânicos monofuncionais)



Obs: A utilização de um dispositivo de proteção exclusivo para o neutro torna a proteção mais sensível (melhorando o dependability). Isso porque, em sistemas equilibrados I_{N30} e a proteção observa somente a corrente de falta.

Funções de sobrecorrente disponíveis nas IEDs

50/51P: ($p = \text{phase}$) $\rightarrow$ função de proteção de fase que monitora as três correntes de fase por meio de um ajuste único.

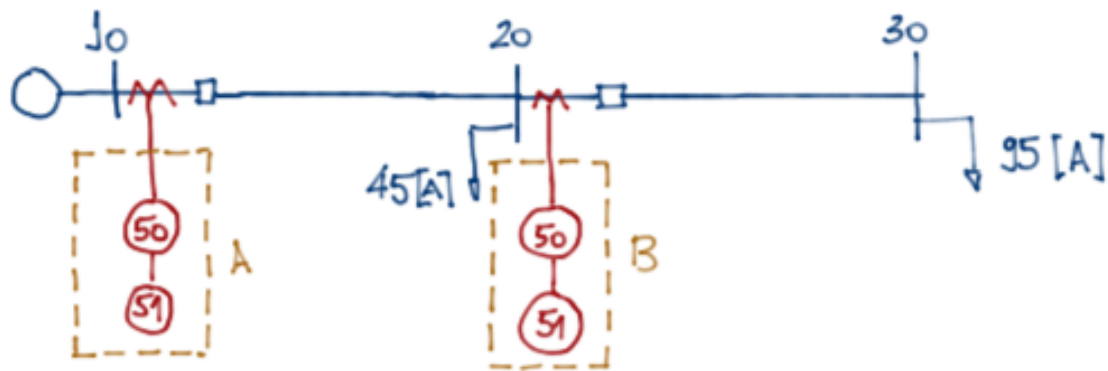
50/51N: ($n = \text{neutral}$) $\rightarrow$ função de proteção que monitora a soma das três correntes, por meio de um ajuste.

50/51Q $\rightarrow$ função de proteção que monitora sequência negativa (permite ajuste mais sensível para detectar curtos-circuitos dupla-fase).

Qual é a conveniência de se utilizar relés 50/51Q?

Em proteção de linhas de transmissão de alta e extra alta tensão, desequilibradas (p.ex. linhas não transpostas), a mútua de sequência zero pode dessensibilizar a proteção, nesse caso é vantagem utilizar essa função de proteção.

Exemplo: ajuste da proteção de sobrecorrente (ANSI 50/51)



Os dados de curto-circuito são:

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

- O TC conectado na saída da barra 10 tem relação 100:5
- O TC conectado na saída da barra 20 tem relação 200:5
- O TM do relé B é 0,5

Optou-se por utilizar a curva IEEE muito inversa: $T_A = \underbrace{\left(\frac{TD}{7}\right)}_{TM} \times \left[0,491 + \frac{19,61}{m^2 - 1}\right]$

Solução: AJUSTE DA FUNÇÃO 51

- Escolha da curva: a curva já foi definida
- Cálculo do I_{pk}
- Ajuste dos TMs de cada relé (o primeiro já foi escolhido)

✓ Relé B (RTC é 20:1)

⑥ - carga máxima: $95 \text{ [A]} \rightarrow I_{\text{carga, min}} = \frac{95}{20} = 4,5 \text{ [A]}$

- curto mínimo: $600 \text{ [A]} \rightarrow I_{\text{cc, min}} = \frac{600}{20} = 30 \text{ [A]}$

$$\text{Logo: } \left. \begin{array}{l} I_{pk} > K_1 \cdot I_{\text{carga, min}} \quad (1,5 \leq K_1 \leq 2,0) \\ K_2 \cdot I_{pk} < I_{\text{cc, min}} \quad (2,0 \leq K_2 \leq 3,0) \end{array} \right\} I_{pk} = 10 \text{ [A]} \text{ (atende aos dois critérios)}$$

O tempo de atuação desse relé para falta cuja corrente é máxima E comum aos relés que devem ser coordenados:

$$T_{a, 2B} (1500 \text{ [A]}) = 0,5 \times \left[0,491 + \frac{19,61}{\left(\frac{1500/20}{10} \right)^2 - 1} \right] = 0,42297 \text{ [s]}$$

✓ Relé A (RTC é 40:1)

- carga máxima: $(95+45) \text{ [A]} \rightarrow I_{\text{carga, máx}} = \frac{140}{40} = 3,5 \text{ [A]}$

- curto mínimo: $600 \text{ [A]} \rightarrow I_{\text{cc, min}} = \frac{600}{40} = 15 \text{ [A]}$

$$\text{Logo: } \left. \begin{array}{l} I_{pk} > K_1 \cdot I_{\text{carga, máx}} \quad (1,5 \leq K_1 \leq 2,0) \\ K_2 \cdot I_{pk} < I_{\text{cc, min}} \quad (2,0 \leq K_2 \leq 3,0) \end{array} \right\} I_{pk} = 7,0 \text{ (atende aos dois critérios)}$$

O tempo de atuação desse relé para falta cuja corrente é máxima E é comum ao relé a jusante, com o qual ele deve coordenar é:

$$T_{a,RA}(1500[A]) = T_{a,RB}(1500[A]) + \Delta T = MT \left(0,491 + \frac{19,61}{\left(\frac{1500/40}{7}\right)^2 - 1} \right)$$

$\swarrow$
 $0,5151$

$$\therefore MT = 1,1066$$

AJUSTE DA FUNÇÃO 50

a) Determinação da corrente de pickup

$$\checkmark \text{ Relé B: } I_{pk} \geq 1,25 \times \frac{1000}{20} = 62,5 [A]$$

$$\checkmark \text{ Relé A: } I_{pk} \geq 1,25 \times \frac{1500}{40} = 47 [A]$$

b) Sobretensão e subtensão

Em condições normais de operação, os níveis de tensão devem permanecer em uma faixa relativamente estreita (o valor típico definido na NR 414 da ANEEL fica entre 93% e 105%, isto é, de -7% a +5%).

Isto significa que tensões fora dessa faixa indicam situações anormais de operação:

- ✓ Sobretensões: rejeição de carga; atuação incorreta dos reguladores de tensão de geradores ou transformadores. A função de proteção contra sobretensões é a função ANSI 59.

- ✓ Subtensões: normalmente relacionada com faltas (curtos-circuitos). A função de proteção contra subtensões é a ANSI 27.

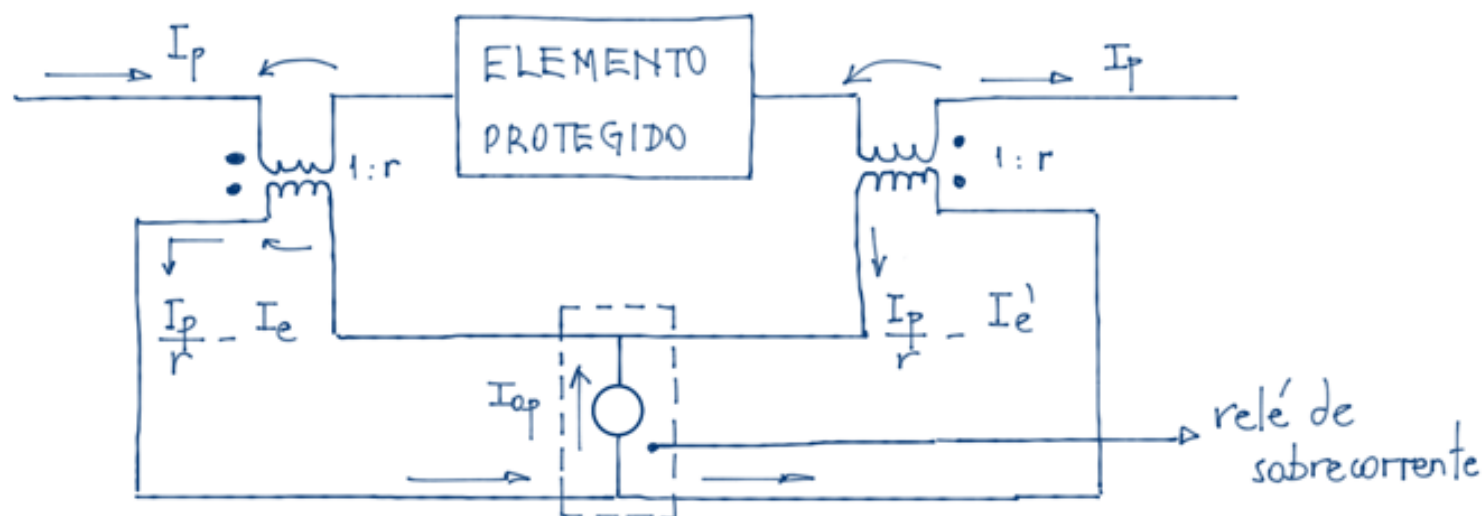
4.3.2) Proteção diferencial

A proteção diferencial (ANSI 87) é uma das técnicas mais eficientes e precisas para a proteção de equipamentos dos SEP. Nesse tipo de proteção, a posição dos TCs define com precisão a zona de proteção primária.

Ex: a proteção diferencial pode ser empregada, utilizando-se qualquer tipo

de tecnologia para os dispositivos de proteção. Utilizando a tecnologia eletromecânica, tem-se:

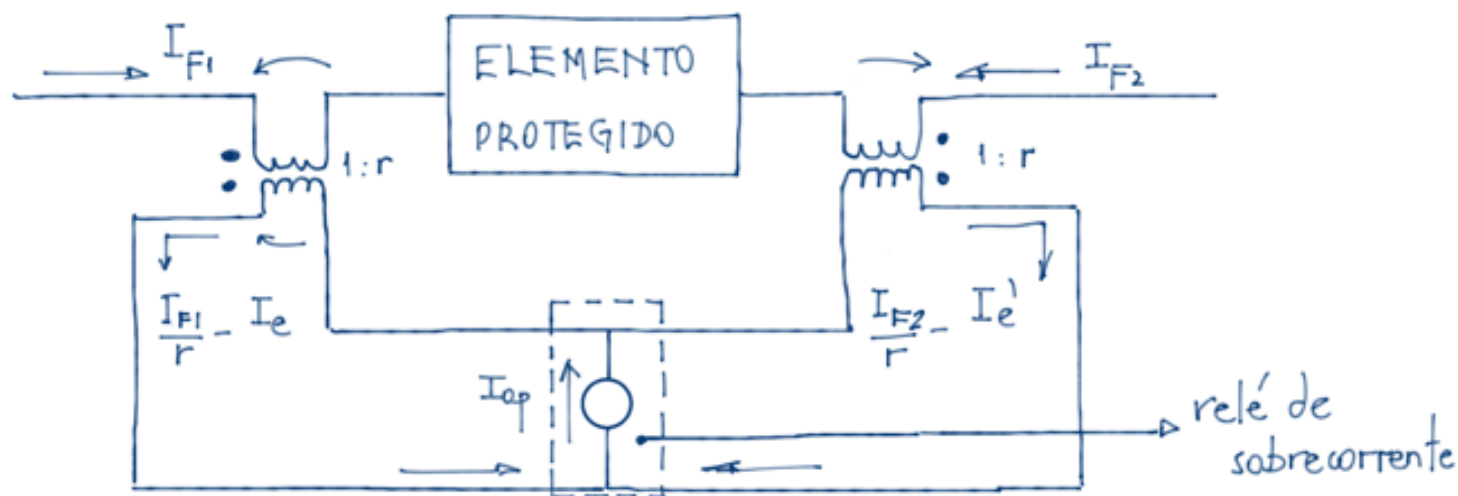
a) Operação normal



Onde: $I_{op} = I_e - I_e' \approx 0$ (não atua)

correntes de magnetização dos TCs

b) Falta dentro da zona

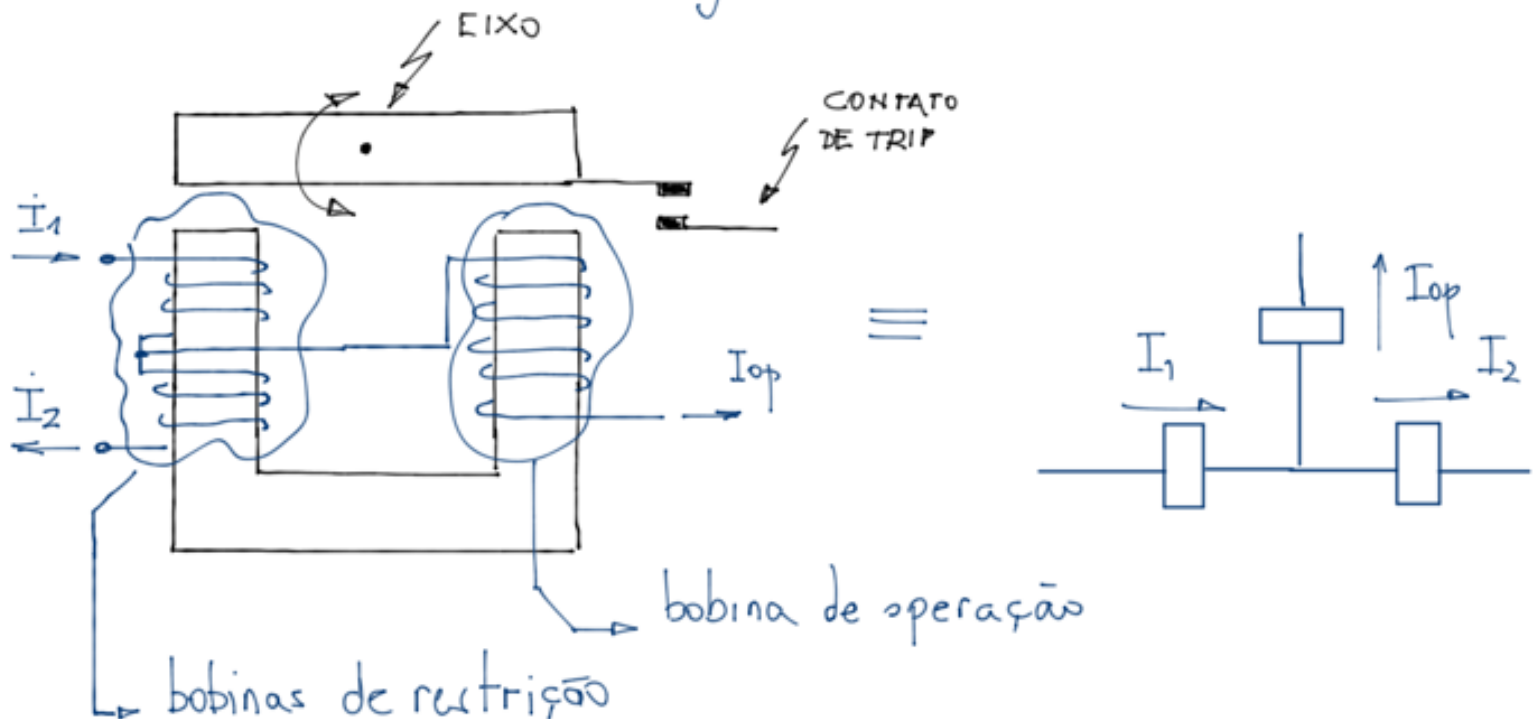


Neste caso: $I_{op} = \frac{I_{F1} + I_{F2}}{r} - (I_e + I_e') \gg 0$ (atua)

Embora seja uma função de proteção bastante precisa, podem ocorrer falhas de segurança, principalmente decorrente dos seguintes fatores:

- ✓ Saturação do TC: é a principal causa de erro porque resulta em uma corrente de operação elevada.
- ✓ Na proteção de transformadores: no caso específico desses equipamentos há outras fontes de erro (corrente de magnetização; mudança automática de TAP do trafo).

Para mitigar esses erros, normalmente a função 87 é implementada como uma função percentual. Para exemplificar essa função, pode-se observar o relé eletromecânico a seguir:



Para o relé atuar, o torque de operação deve ser maior do que o torque de restrição, isto é:

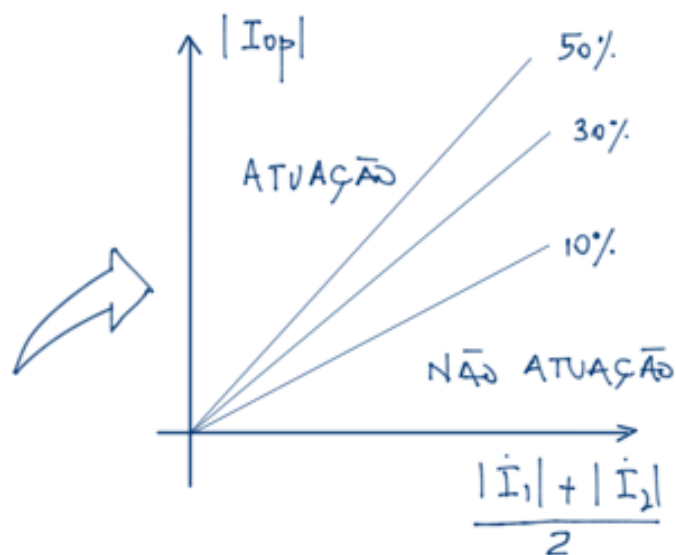
$$T_{\text{operação}} > T_{\text{restrição}}$$

$$K_1 |I_{op}| > K_2 (|I_1| + |I_2|)$$

$$|I_{op}| > \left(\frac{2K_2}{K_1} \right) \frac{|I_1| + |I_2|}{2}$$

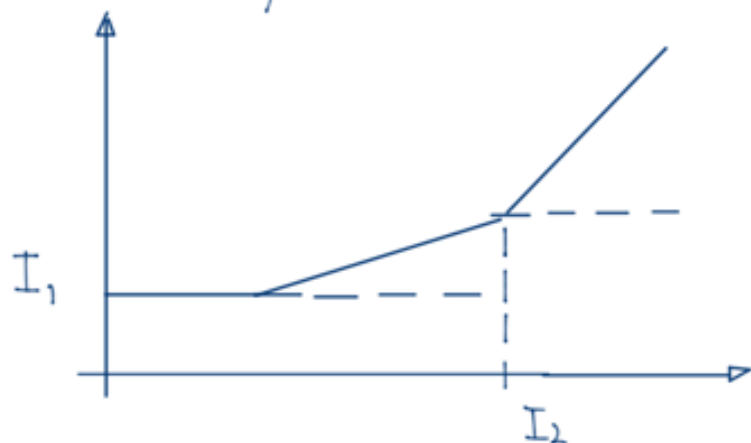
$$|I_1 - I_2| > K \cdot \frac{|I_1| + |I_2|}{2}$$

$\underbrace{\hspace{2cm}}$ $\underbrace{\hspace{2cm}}$
 corrente de operação corrente de restrição



Uma característica de 50% significa que uma corrente passageira (de restrição) de 10 [A] requer uma corrente de operação de 5 [A], para que o relé atue.

Nos relés digitais, existem dois cartões de entradas de corrente, a função diferencial pode ser mais elaborada.

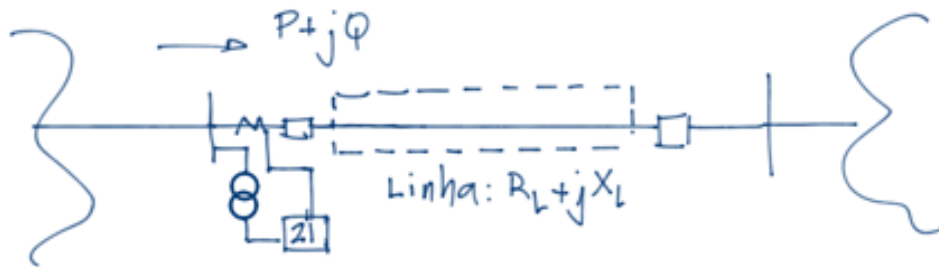


4.3.3) Proteção de distância (ANSI-21)

Baseia-se na impedância "vista" pelo relé, isto é, a relação entre o fasor de uma tensão e o fasor de uma corrente. Sendo assim:

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

A função de proteção de distância é usada para detectar faltas em linhas de transmissão e subexcitação ou perda de sincronismo em geradores (ANSI 40). A resposta dessa função é analisada no plano complexo R-X.

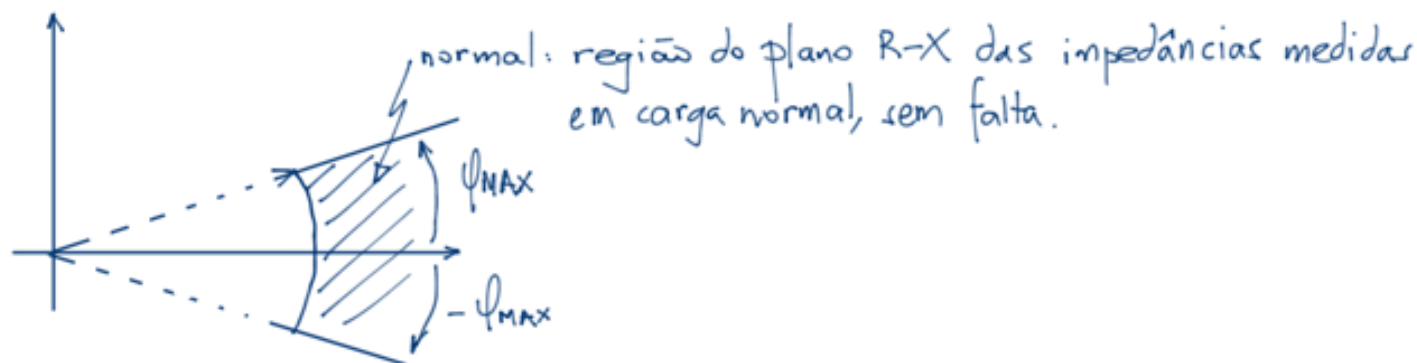


- a) Em condições normais: a menor impedância vista deve ocorrer com o maior carregamento.

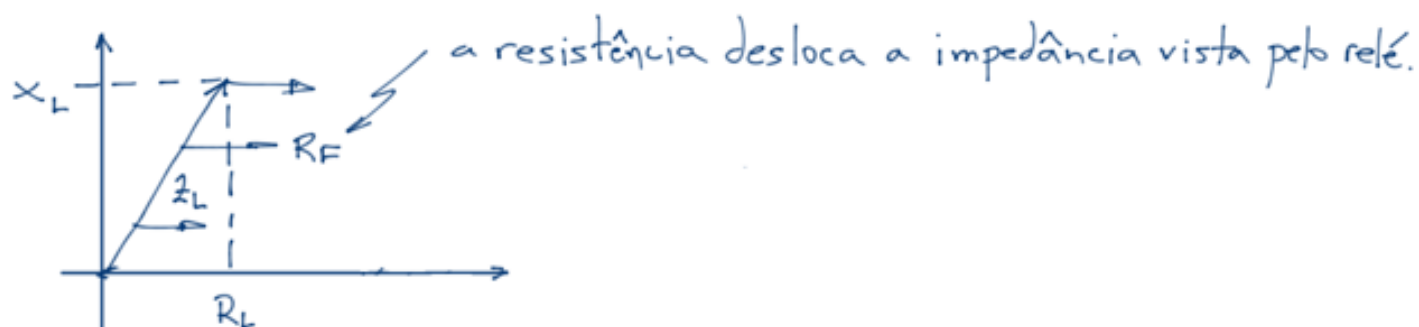
$$\bar{S} = P + jQ = S \angle \varphi \quad e \quad \bar{Z}_{VISTA} = \frac{\bar{V}^2}{\bar{S}^*} = \frac{V^2}{S} \angle \varphi$$

$$\therefore \bar{Z}_{MIN} = \frac{V^2}{S_{MAX}} \angle \varphi$$

No plano R-X:



b) Curto-circuito na linha: faltas ao longo da linha de transmissão com $R_F \neq 0$.



✓ Elementos de terra: (p.ex. AN): supondo $R_F = 0$
 $\nearrow = 0$

$$V_{AN} = \bar{z}_p \cdot x \cdot \dot{I}_A + \bar{z}_m \cdot x \cdot (\dot{I}_B + \dot{I}_C) + V_{AN, falta}$$

Onde: $\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 3 \dot{I}_0$, logo: $\dot{I}_B + \dot{I}_C = 3 \dot{I}_0 - \dot{I}_A$

Portanto: $V_A = x \cdot (\bar{z}_p - \bar{z}_m) \cdot \dot{I}_A + x \cdot \bar{z}_m \cdot 3 \cdot \dot{I}_0$

Dado que: $\bar{z}_p + 2\bar{z}_m = \bar{z}_0 \Rightarrow \bar{z}_m = \frac{\bar{z}_0 - \bar{z}_1}{3}$
 $\bar{z}_p - \bar{z}_m = \bar{z}_1$

$$\begin{aligned}\dot{V}_{AN} &= x \cdot \bar{z}_1 \cdot \dot{I}_A + x(\bar{z}_0 - \bar{z}_1) \cdot \dot{I}_0 \\ &= x \cdot \bar{z}_1 \cdot \dot{I}_A + \left(\frac{\bar{z}_0 - \bar{z}_1}{\bar{z}_1} \right) \cdot x \cdot \bar{z}_1 \cdot \dot{I}_0\end{aligned}$$

$$E: x \bar{z}_1 = \frac{\dot{V}_{AN}}{\dot{I}_A + K \cdot \dot{I}_0}, \text{ onde } K = \frac{\bar{z}_0 - \bar{z}_1}{\bar{z}_1} \text{ compensa a "m\u00fasua de seq. zero"}$$

✓ Elementos de fase: (p.ex. BC)

$$\begin{cases} \dot{V}_{BN} = x \cdot (\bar{z}_N \cdot \dot{I}_A + \bar{z}_P \cdot \dot{I}_B + \bar{z}_M \cdot \dot{I}_C) + \dot{V}_{B,f} \\ \dot{V}_{CN} = x \cdot (\bar{z}_M \cdot \dot{I}_A + \bar{z}_M \cdot \dot{I}_B + \bar{z}_P \cdot \dot{I}_C) + \dot{V}_{C,f} \end{cases}$$

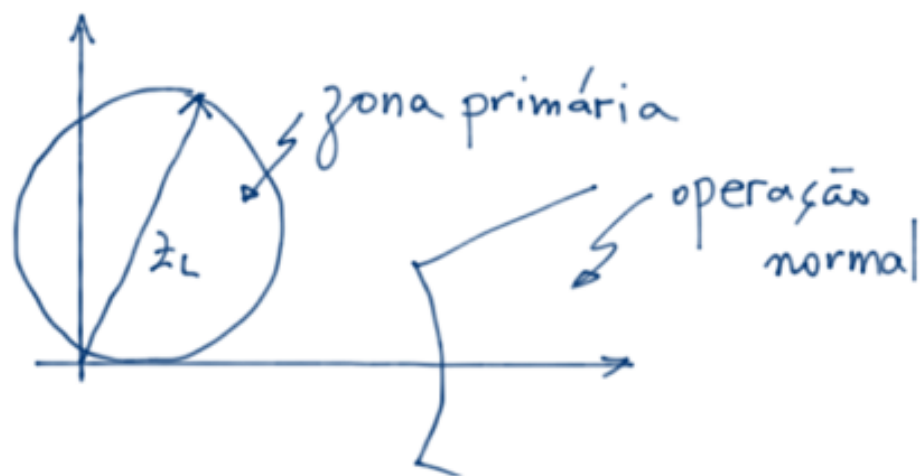
$$\dot{V}_{BN} - \dot{V}_{CN} = x \cdot (\bar{z}_P - \bar{z}_N) (\dot{I}_B - \dot{I}_C) \therefore x \bar{z}_1 = \frac{\dot{V}_{BN} - \dot{V}_{CN}}{\dot{I}_B - \dot{I}_C}$$

Portanto: elementos de terra: $\bar{z}_{AN}; \bar{z}_{BN}; \bar{z}_{CN}$
elementos de fase: $\bar{z}_{AB}; \bar{z}_{BC}; \bar{z}_{CA}$

c) Zona de prote\u00e7\u00e3o: diagrama R-X

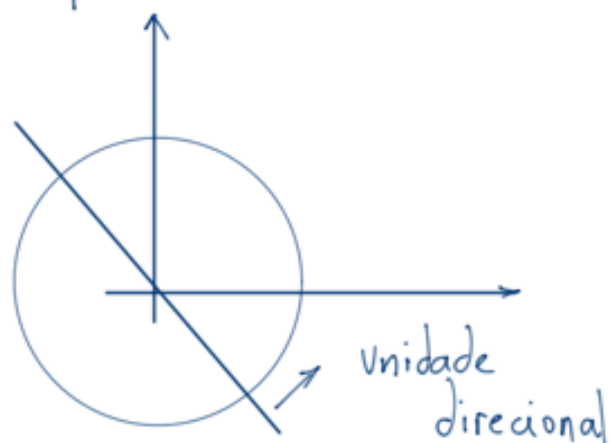
✓ A zona caracter\u00edstica do rel\u00e9 \u00e9 uma curva fechada e h\u00e1 falta se a imped\u00e2ncia medida se encontrar no interior dessa curva.

✓ A curva caracter\u00edstica deve ser posicionada (ajustada) para que todas as faltas na linha "caiam" no seu interior e que n\u00e3o haja sobreposi\u00e7\u00e3o com a regi\u00e3o de carga, para nenhuma condi\u00e7\u00e3o operativa.

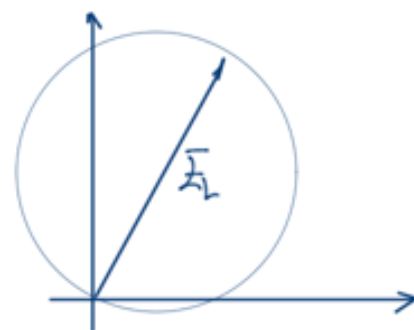


As características mais comuns para os relés de distância são:

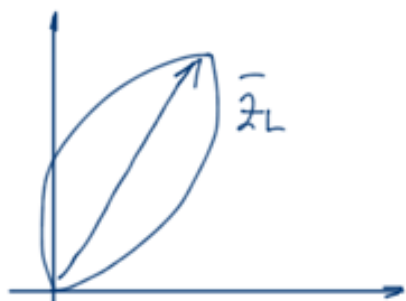
c.1) Impedância



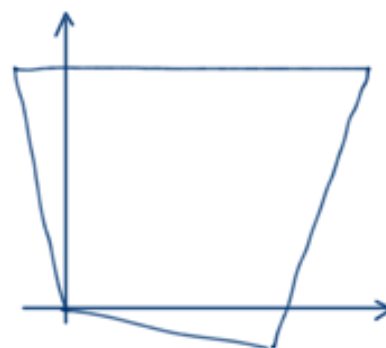
c.2) mho



c.3) Lente



c.4) Quadrilateral

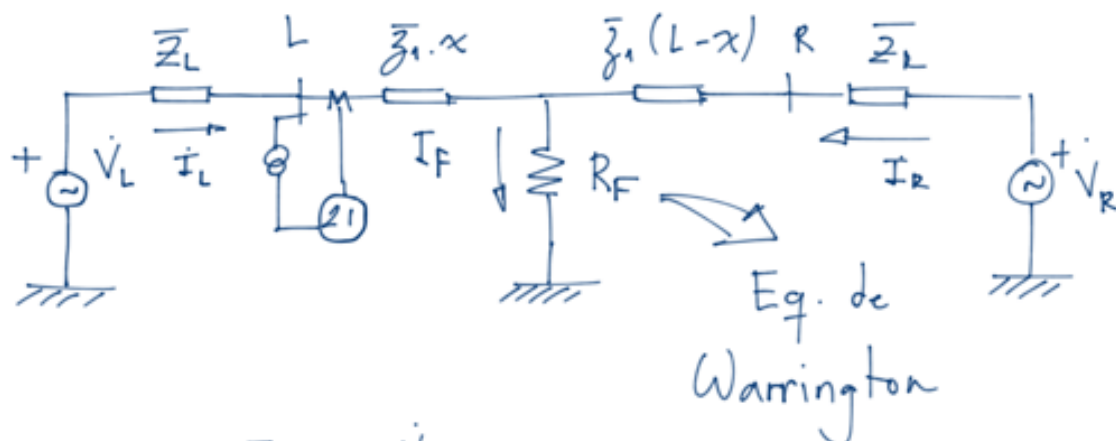


d) Ajuste das zonas de proteção

- ✓ zona 1: 85% da linha protegida $\rightarrow$ instantânea
- ✓ zona 2: 120% da linha protegida $\rightarrow \Delta t = 300 \text{ ms}$
- ✓ zona 3: 150% da maior linha a jusante da linha protegida acrescido da própria linha protegida, limitada à superposição da zona 2 da menor linha protegida à jusante. $\rightarrow \Delta t = 1 \text{ s}$
- ✓ zona reversa: - 50% da linha protegida

e) Fontes de erro na proteção de distância

- ✓ Fasoriais: componente aperiódica; oscilação de frequência, etc.
- ✓ TPs e TCRs: erro de medição
- ✓ R_F

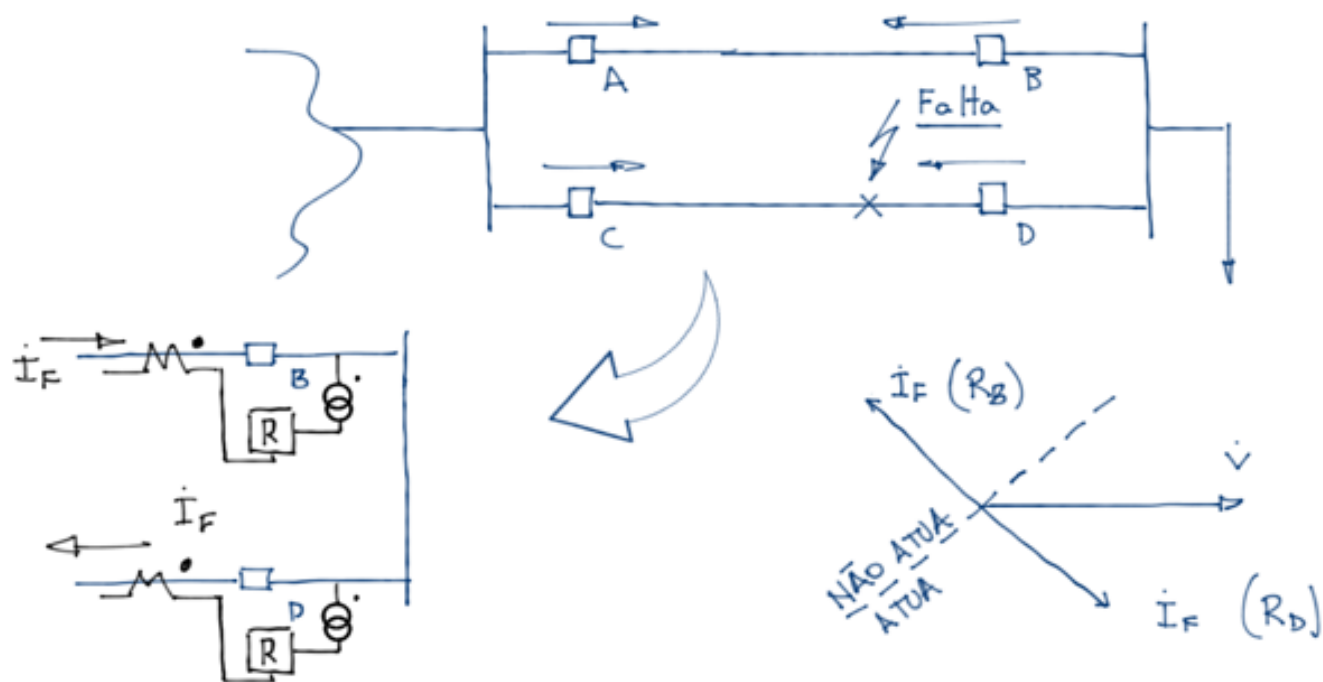


Sendo assim: $x \cdot \bar{Z}_1 = \frac{\dot{V}_L}{\dot{I}_L + K \cdot \dot{I}_{0L} + \frac{R_F \cdot \dot{I}_F}{\bar{Z}_1}}$ $\leftarrow$ deduzir p/ a fase A?

4.3.4) Comparação de fase

Esse tipo de proteção compara o ângulo de fase entre duas grandezas alternadas. Por exemplo, a função de proteção direcional de sobrecorrente (ANSI 67):

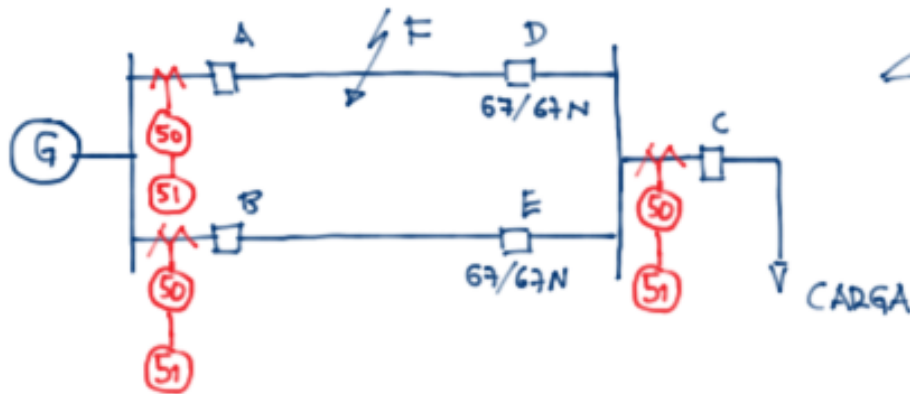
- ✓ Uma unidade direcional é normalmente usada em combinação com uma unidade de sobrecorrente, onde somente essa última é insuficiente para discriminar o ponto de ocorrência da falta (linhas em anéis, circuitos em paralelo, etc.)



A função comparação de ângulos também pode ser utilizado para discriminar a direção do fluxo de potência ativa em geradores ou motores (função ANSI 32).

a) Proteção de sobrecorrente direcional

A proteção de sobrecorrente direcional, eletromecânica, foi desenvolvida no final do século XIX para mitigar a deficiência de seletividade da proteção de sobrecorrente nos sistemas multiterminais e interligados que estavam surgindo naquele momento.

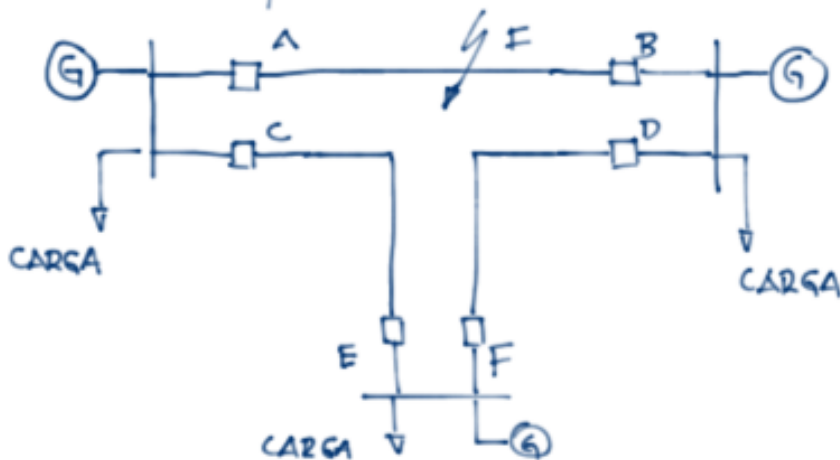


Utilizando somente as funções ANSI 50/51 não é possível obter seletividade. Falha em F produz a abertura de DJA e DJB

Neste caso (com os relés 67/67N) o relé A prevê retaguarda para o relé E, assim como o B prevê para o D.

Não é o melhor exemplo, porque 67/67N não dá seletividade nesse caso.

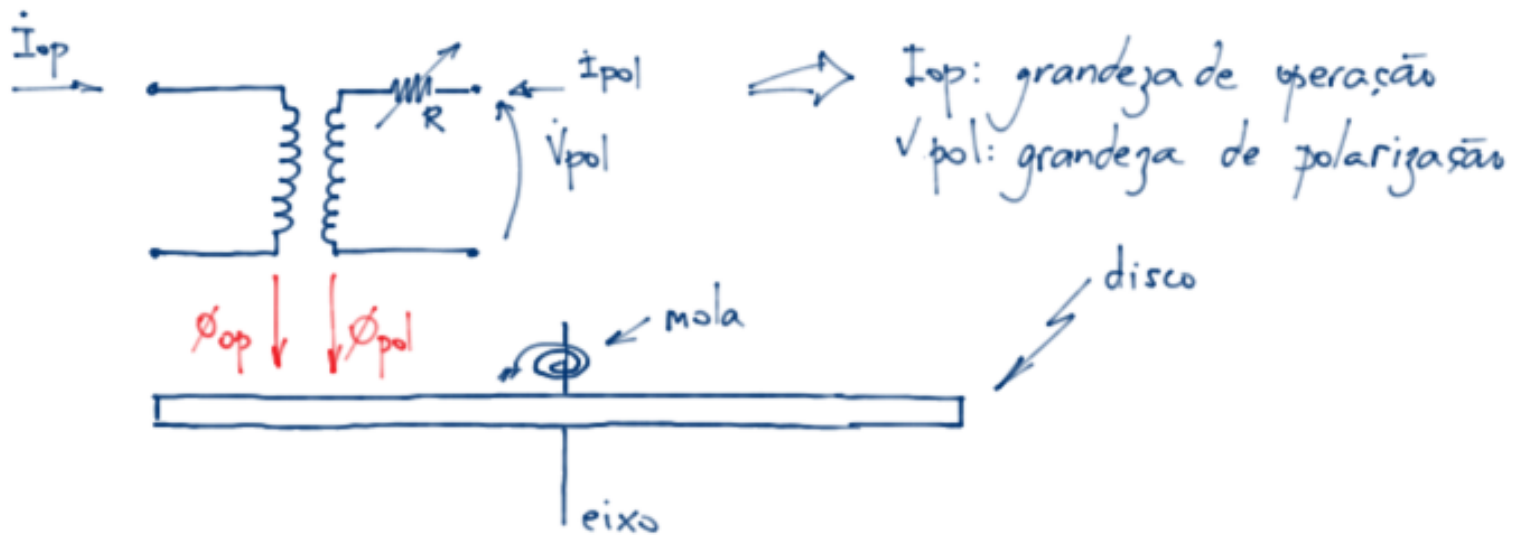
Outro exemplo:



Nesse caso fica evidente a necessidade de outro tipo de proteção, que não a ANSI 50/51. Em L.T. de alta e extra-alta tensão, tipicamente se usa a proteção de distância e a 67/67N como retaguarda local.

b) Princípio de funcionamento

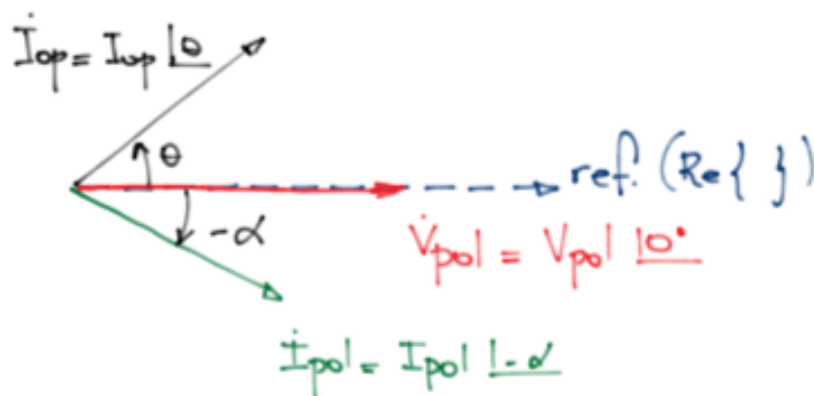
O princípio de funcionamento do relé direcional eletromecânico consiste no torque eletromecânico produzido pela interação entre duas densidades de fluxo geradas por duas grandezas elétricas alternadas: grandeza de operação; e grandeza de polarização.



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

$\hookrightarrow \sim K_1 \phi_{op}$
 $\hookrightarrow K_2 \phi_{pol}$

Fazendo o diagrama fasorial:

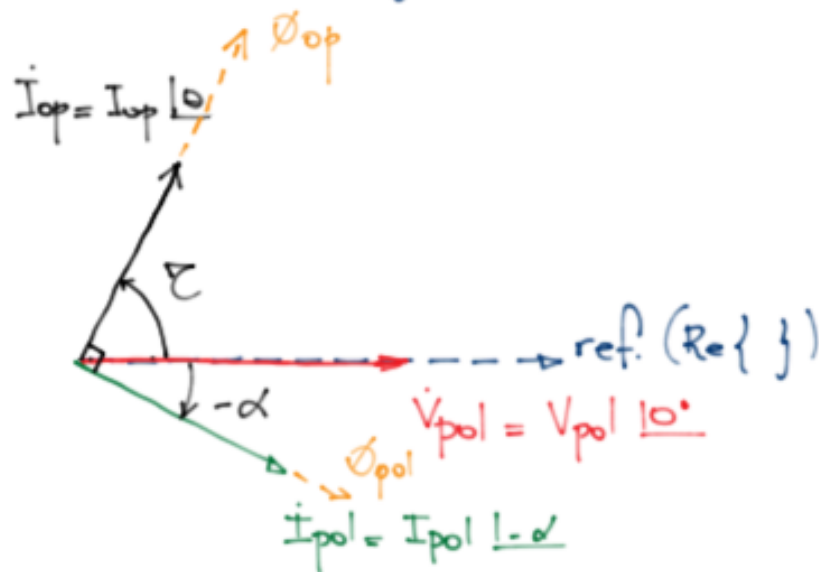


$\Rightarrow$ Neste caso, o torque no disco fica:

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

$\hookrightarrow$ vem da eq. de força de Lorentz

O torque será máximo quando a defasagem entre os fluxos (I_{op} e I_{pol}) for 90° . Isto ocorre quando a grandeza de operação estiver adiantada de um ângulo τ em relação à grandeza de polarização.



Neste caso, a equação de torque pode ser reescrita:

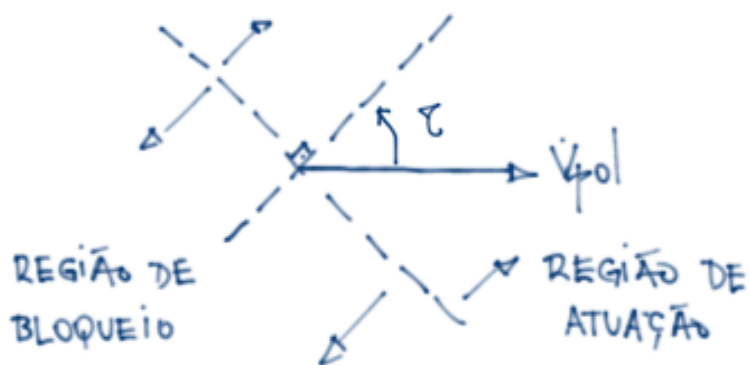
$$\tau - \alpha = 90$$

Logo:

Onde: τ é o ângulo de torque máximo e é ajustável nos relés de proteção.

$$\begin{cases} T = K_3 \phi_{op} \phi_{pol} \cdot \sin(\theta + 90 - \tau) \\ T = K_3 \phi_{op} \phi_{pol} \cdot \cos(\theta - \tau) \end{cases}$$

Na prática, isto significa:



c) Implementação na tecnologia digital

Os relés digitais usam o mesmo princípio, sendo que agora a implementação é realizada por software, através da seguinte equação:

$$\operatorname{Re} \{ I_{op}^* \cdot V_{pol.} \cdot \underline{1} \cdot \underline{Z} \} > 0$$

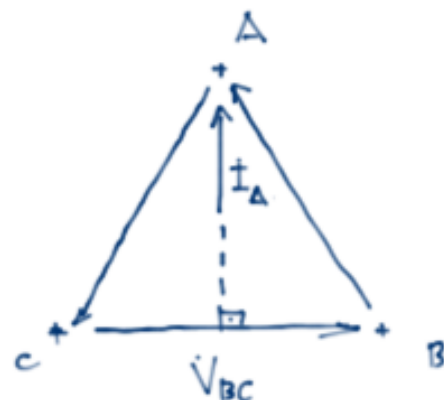
↳ é a grandeza de referência, portanto tem fase nula.

Na implementação via software, é possível implementar condições adicionais, para tornar a proteção mais confiável (security & dependability) e precisa. Por exemplo, para faltas próximas ao relé, que podem provocar o colapso da tensão de polarização, o relé digital utiliza uma MEMÓRIA da tensão, armazenada ANTES da ocorrência da falta, para não utilizar um sinal degradado.

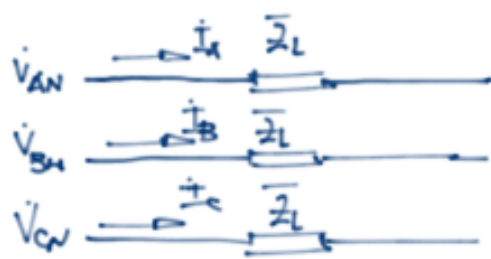
c.1.) Direcional de fase (ANSI 67)

Utilizam-se três unidades direcionais, uma para cada fase, que podem bloquear ou não a respectiva unidade de sobrecorrente de fase. Normalmente o sinal de polarização é de tensão, portanto, existem várias alternativas (mostrar os slides). A mais utilizada é a conexão 90° , também conhecida como quadratura.

UNIDADE	G. de Op.	G. de 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 a tensão de polarização em quadratura com a corrente da fase não significa que o torque será máximo nessa condição, até porque a corrente de falta normalmente está atrasada em relação à corrente de carga. Portanto:



Modelo simplificado da linha: $\bar{Z}_L = Z_L \angle 70^\circ$

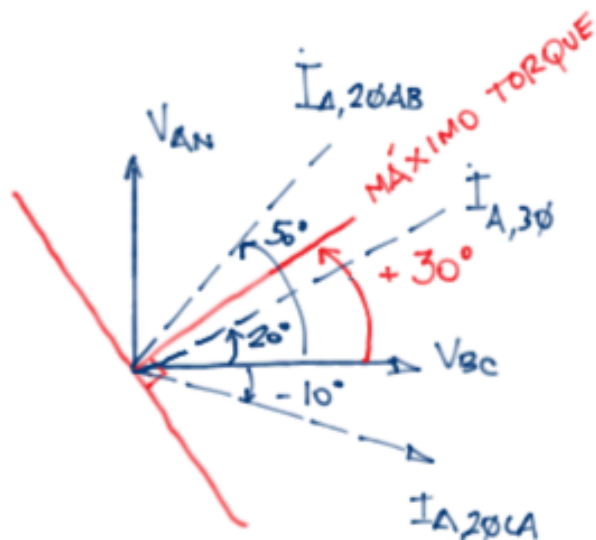
Neste caso:

$$\checkmark \text{ Curto } 3\phi: \dot{I}_{A,3\phi} = \frac{\dot{V}_{AN}}{\bar{Z}_L} = \frac{V_{AN}}{Z_L} \angle 90-70$$

$$\checkmark \text{ Curto } 1\phi: \dot{I}_{A,1\phi} = \dot{I}_{A,3\phi} = \frac{V_{AN}}{Z_L} \angle 20^\circ$$

$$\checkmark \text{ Curto } 2\phi (AB): \dot{I}_{A,2\phi AB} = \frac{\dot{V}_{AB}}{2\bar{Z}_L} = \frac{V_{AB}}{2Z_L} \angle 120-70$$

$$\checkmark \text{ Curto } 2\phi (CA): \dot{I}_{A,2\phi CA} = -\frac{V_{CA}}{2\bar{Z}_L} = \frac{V_{CA}}{2Z_L} \angle 60-70$$



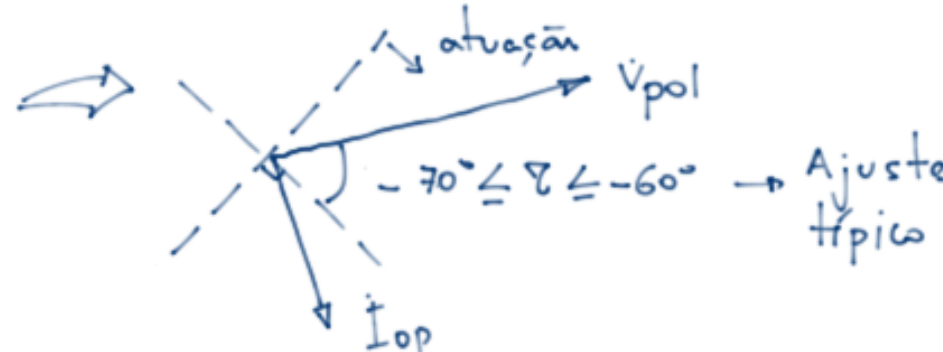
c2.) Direcional de terra (ANSI 67N)

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

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

A grandeza de polarização pode ser:

✓ A sequência zero das tensões, com sinal trocado:

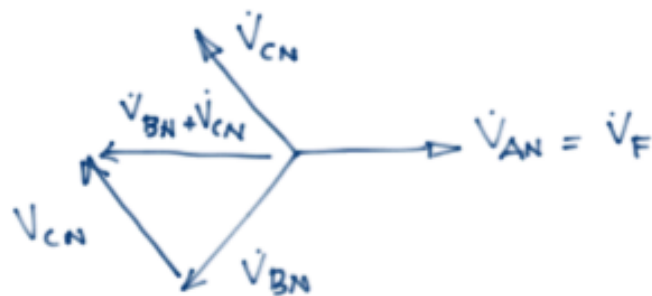
$$V_{pol} = -\frac{1}{3} \{ \dot{V}_{AN} + \dot{V}_{BN} + \dot{V}_{CN} \}$$


Ajuste típico

Obs: Curto ϕT (AN)

$$I_0 = I_1 = I_2 = \frac{\dot{V}_F}{Z_0 + 2Z_1} \sim 90^\circ \text{ atrasada em relação a } \dot{V}_F$$

$$-\dot{V}_0 = -\dot{V}_{BN} - \dot{V}_{CN}$$



✓ Corrente de terra (p.ex. a corrente no aterramento do transformador da subestação): nesse caso é necessária uma quarta entrada de corrente.



Neste caso $\tau = 0^\circ$ (posição de máxima sensibilidade)

d.) Aplicação da função 67/67N em linhas de transmissão

Na proteção de linhas de alta e extra alta tensão, a função de sobrecorrente direcional é comumente utilizada como retaguarda local, sendo a proteção de distância, a proteção principal.

As três unidades de fase (67) bloqueiam, ou não, as correspondentes unidades de sobrecorrente de fase (50 e 51).

Já a função direcional de neutro (67N) monitora a função de sobrecorrente de neutro (50N e 51N).

As unidades direcionais demandam a escolha da conexão e o ajuste do ângulo τ , que está relacionado com o ângulo da impedância série (ou de seq. positiva) da linha. As funções de sobrecorrente são ajustadas conforme discutido a seguir.

d.1) Ajustes das funções 50/51 e 50/51N em redes não radiais

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.

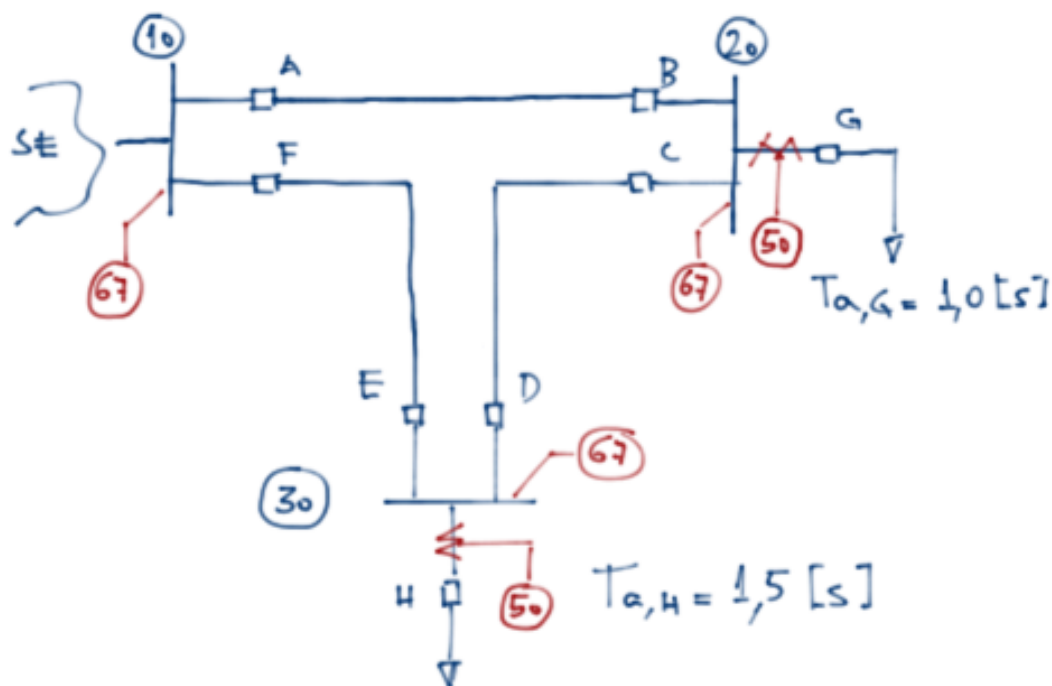
Neste caso, os relés são direcionais e as coordenações são múltiplas, para uma mesma barra, e ocorrem em mais de uma direção.

O processo é iniciado 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.

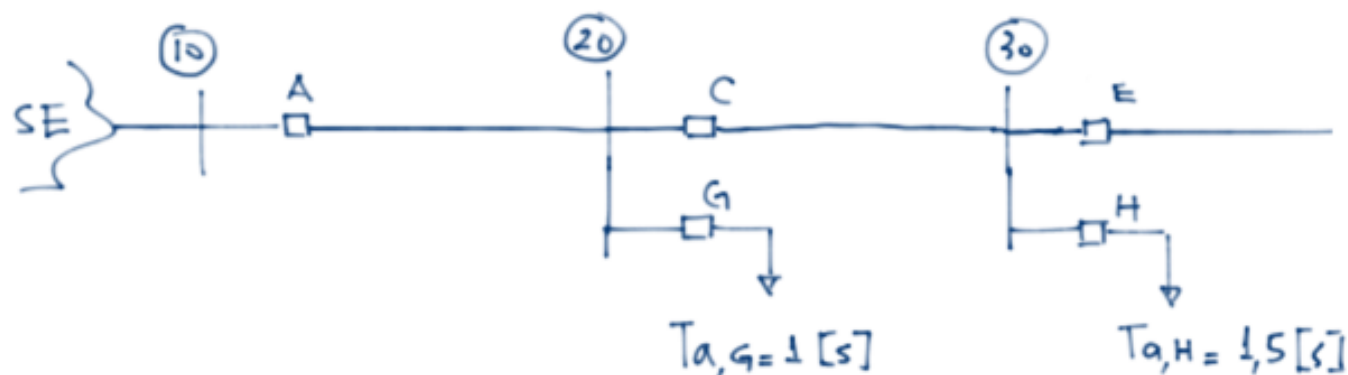
Esse processo é de tentativa e erro, e pode demandar várias iterações (atualmente existem linhas de pesquisa que desenvolvem métodos computacionais para o ajuste ótimo, utilizando ferramentas de otimização heurísticas e determinísticas).

Exemplo: dado o circuito em malha, com uma fonte, faça o ajuste das funções de proteção, considerando que:

- ✓ Relés 67: tempo definido
- ✓ Relés 50/51: tempo definido
- ✓ $\Delta T = 0,5 [s]$



→ Passo 1: Abre-se o disjuntor F, o sistema fica

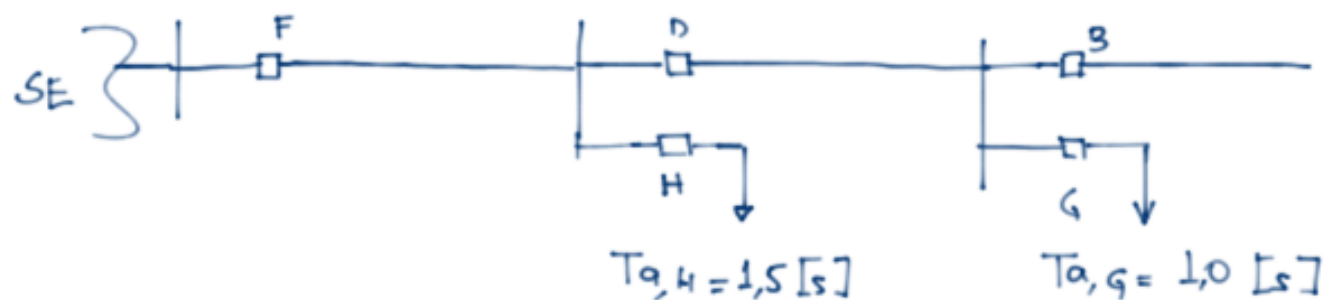


✓ Relé E: não coordena com ninguém → $T_{A,E} = 0,3 [s]$

✓ Relé C: coordena com E e H → $T_{A,C} = \max(T_{A,E}; T_{A,H}) + \Delta T = 2,0 [s]$

✓ Relé A: coordena com C e G → $T_{A,A} = \max(T_{A,C}; T_{A,G}) + \Delta T = 2,5 [s]$

→ Passo 2: Abre-se o disjuntor A e o sistema fica



✓ Relé B: não coordena com ninguém → $T_{A,B} = 0,3 [s]$

✓ Relé D: coordena com B e G → $T_{A,D} = \max(T_{A,B}; T_{A,G}) + \Delta T = 1,5 [s]$

✓ Relé F: coordena com D e H → $T_{A,F} = \max(T_{A,D}; T_{A,H}) + \Delta T = 2,0 [s]$