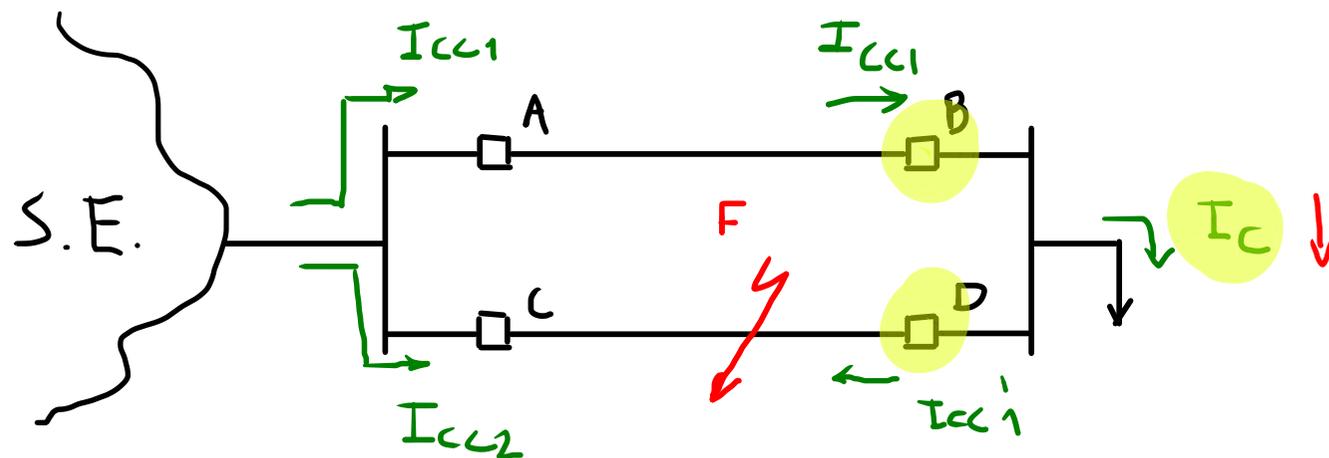


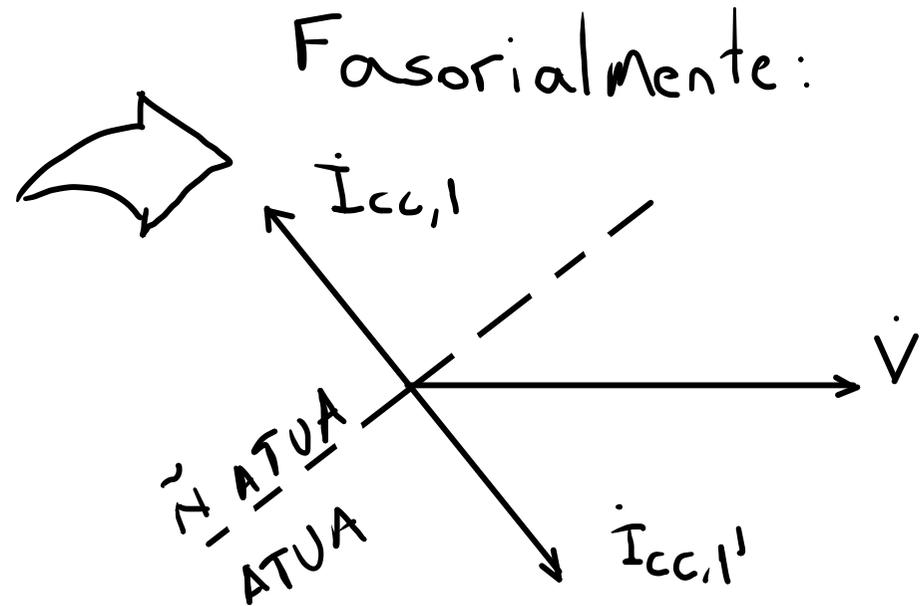
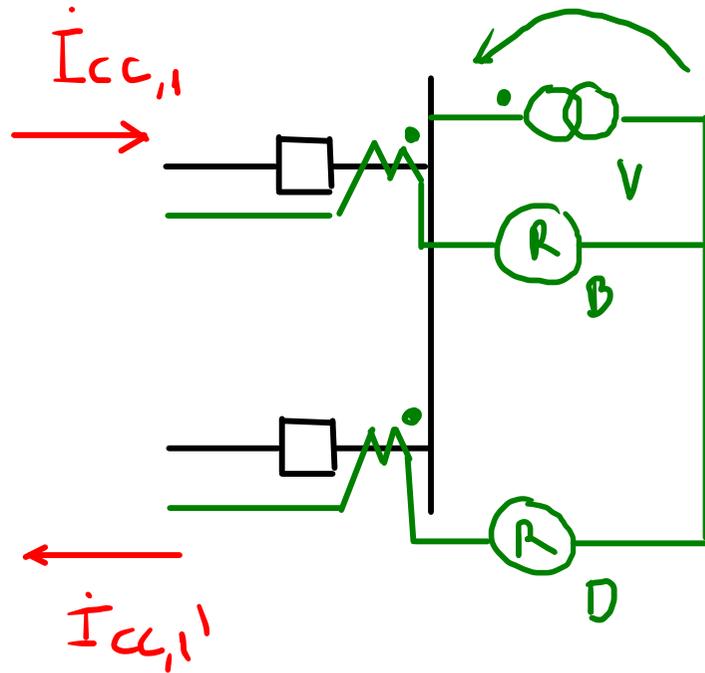
### 4.3.4) Comparação de fase

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



Não se esqueçam  
da presença no  
Edisciplinas

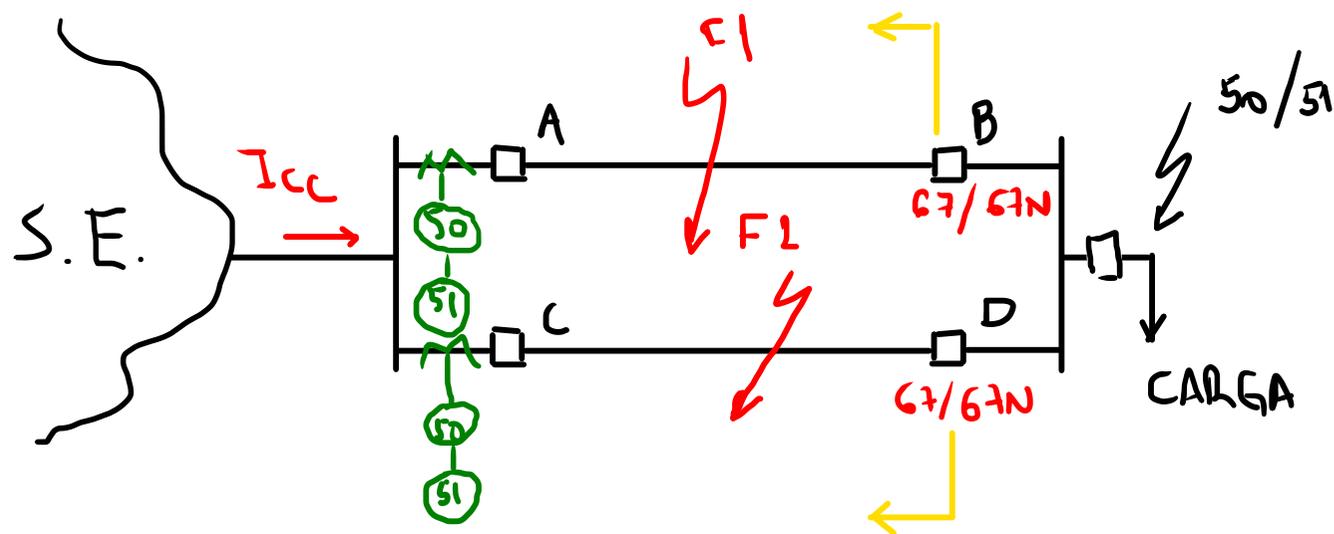
No exemplo dado, uma unidade direcional é normalmente utilizada em combinação com uma unidade de sobrecorrente, onde somente essa última é insuficiente para discriminar o ponto de ocorrência da falta (isso é bastante comum em redes em anel, circuitos em paralelo ou uma combinação de ambos).



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

### a) Proteção de sobrecorrente direcional

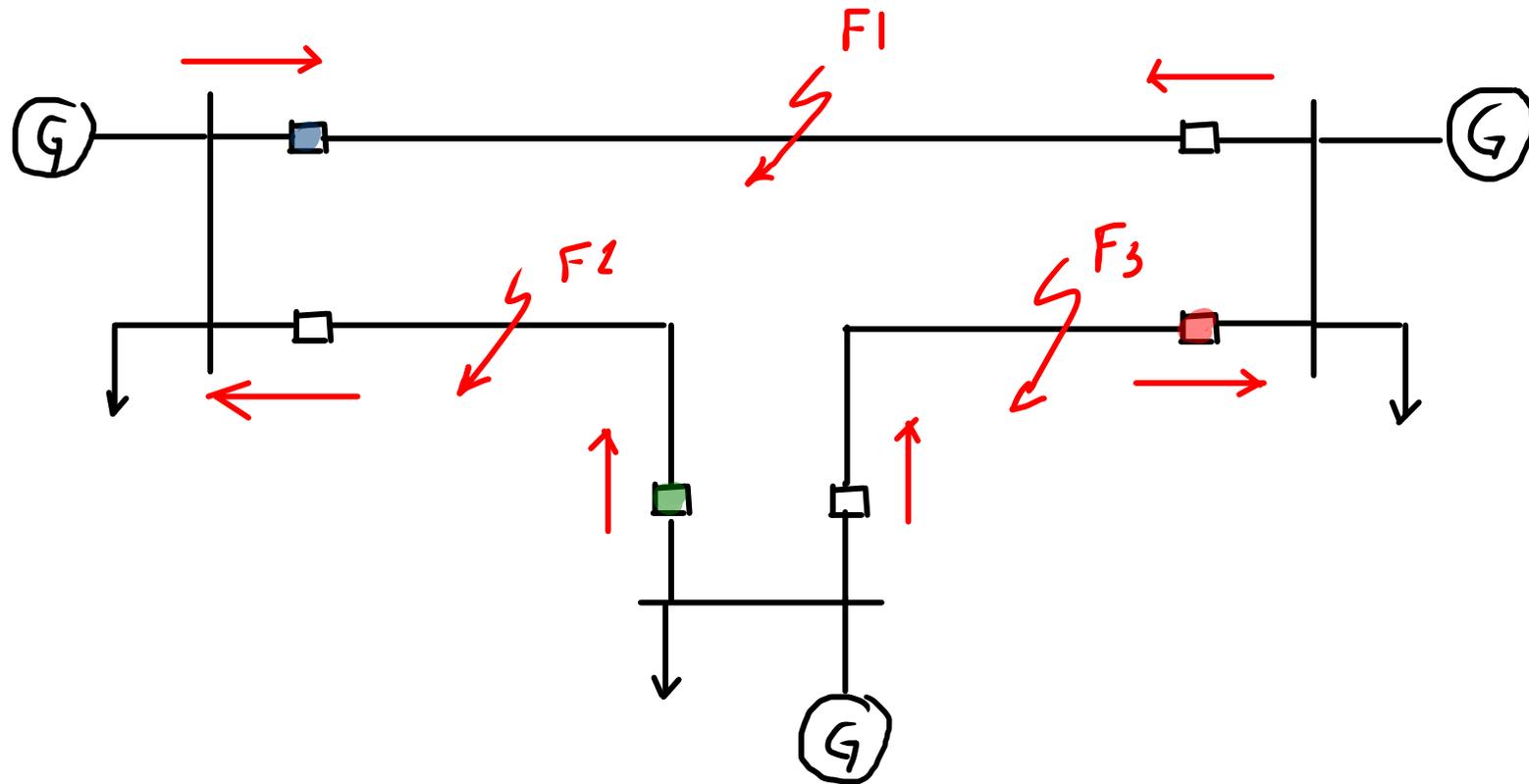
Foi desenvolvida, inicialmente na forma eletromecânica, no final do século XIX e início do século XX para mitigar a deficiência de seletividade da proteção de sobrecorrente em sistemas em malha ou em sistemas com linhas em paralelo.



Utilizando somente as funções 50/51  $\bar{n}$  é possível obter seletividade

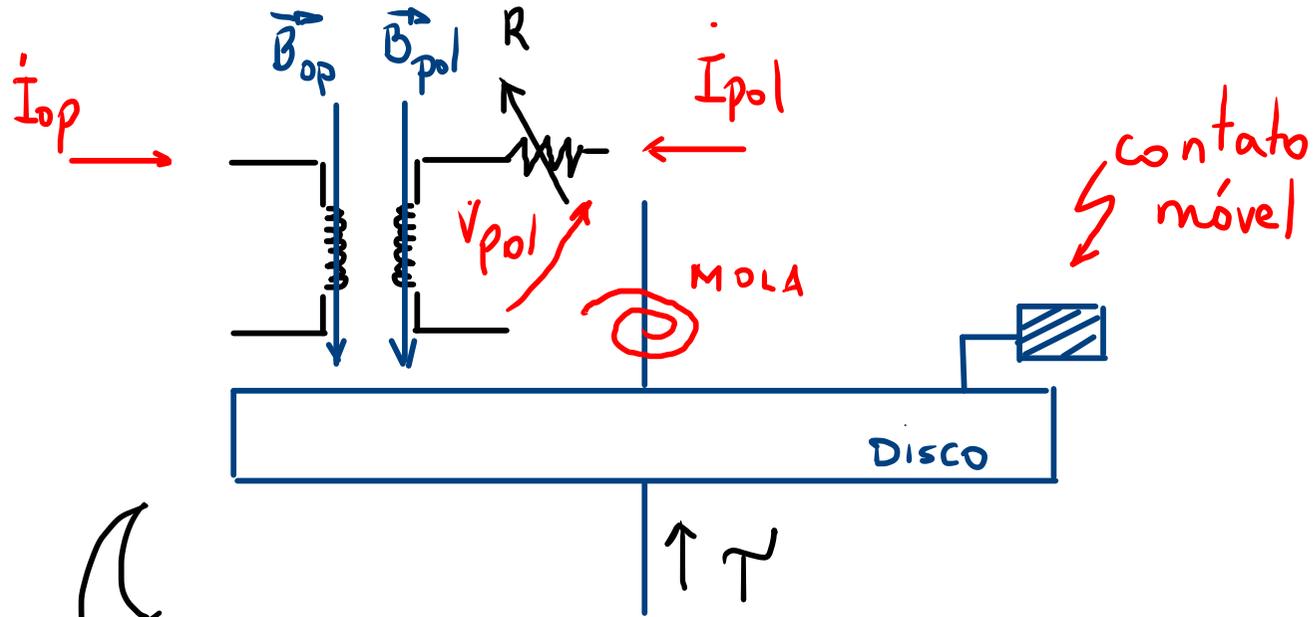
Nesse caso (com as funções 67/67N) o relé A provê retaguarda para o relé D e o relé C provê para o relé B.

Nos circuitos em malha:



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 como proteção primária e a proteção de sobrecorrente direcional como retaguarda local.

b) Princípio de funcionamento

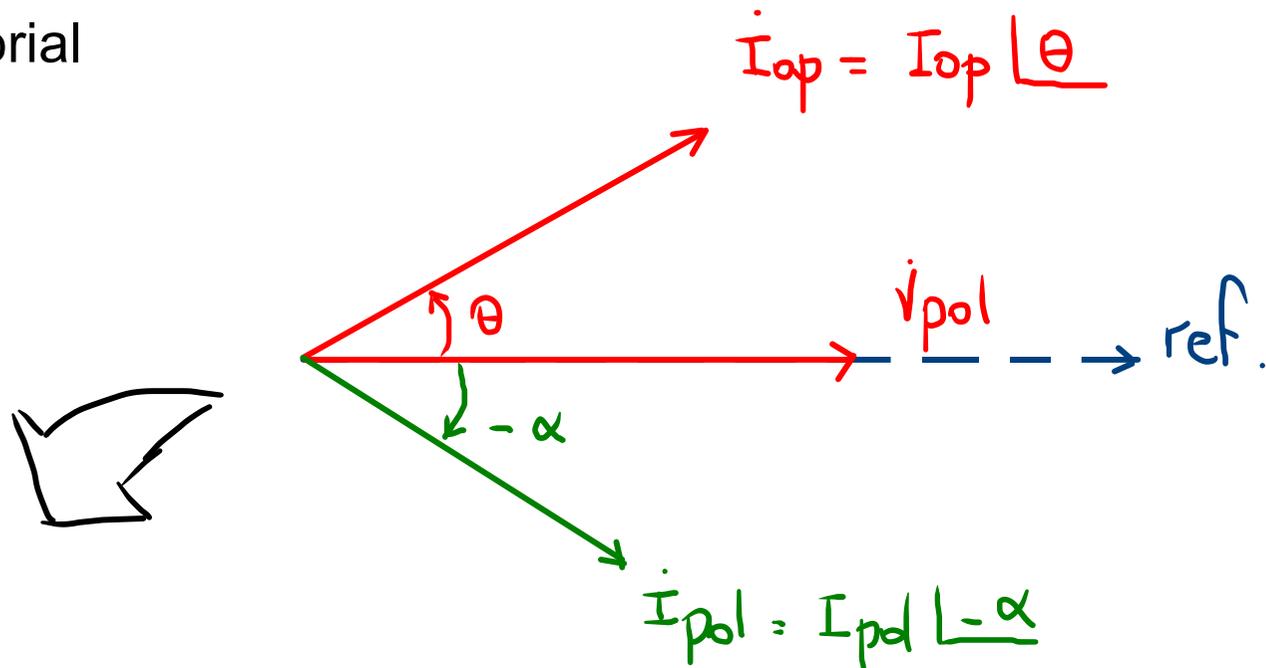


$i_{op}$  : grandeza de operação  
 $V_{pol}$  : grandeza de polarização

Onde:  $|\vec{B}_{op}| = B_{op} \cdot \cos(\omega t + \theta)$   
 $\hookrightarrow \sim K_1 \cdot \phi_{op}$

e  $|\vec{B}_{pol}| = B_{pol} \cdot \cos(\omega t - \alpha)$   
 $\hookrightarrow \sim K_2 \cdot \phi_{pol}$

Fazendo o diagrama fasorial



O princípio de funcionamento do relé direcional eletromecânico consiste no torque eletromecânico produzido pela interação entre duas densidades de fluxo (de operação e de polarização) que são geradas por duas grandezas elétricas: grandeza de operação (normalmente é uma corrente) e grandeza de polarização (normalmente é uma tensão).

Nesse caso, o torque no disco é dado por:

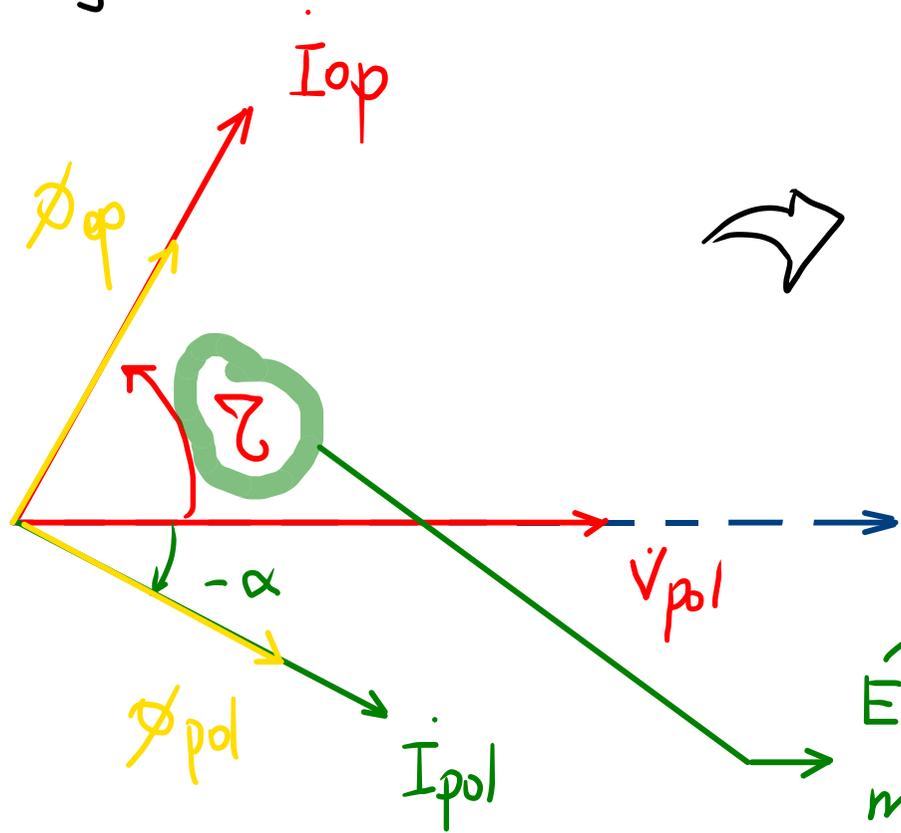
$$\vec{T} = K_3 \cdot \Phi_{op} \cdot \Phi_{pol} \cdot \text{sen}(\theta - \alpha) \cdot i(t) \cdot \frac{d\vec{l}}{dt}$$

Eq. de Lorentz:  $d\vec{F} = dq \cdot (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$

$$d\vec{F} = i_{op}(t) \cdot \underbrace{d\vec{l} \times \vec{B}_{pol}}_{\text{sen}}$$

O torque será máximo quando a defasagem entre os fluxos ( $i_{op}$  e  $i_{pol}$ ) for de  $90^\circ$ . Isto ocorre quando a grandeza de operação estiver adiantada de um ângulo  $\alpha$  em relação à grandeza de polarização.

E o diagrama fasorial fica:



Neste caso, a equação de torque pode ser reescrita em função de:

ref.

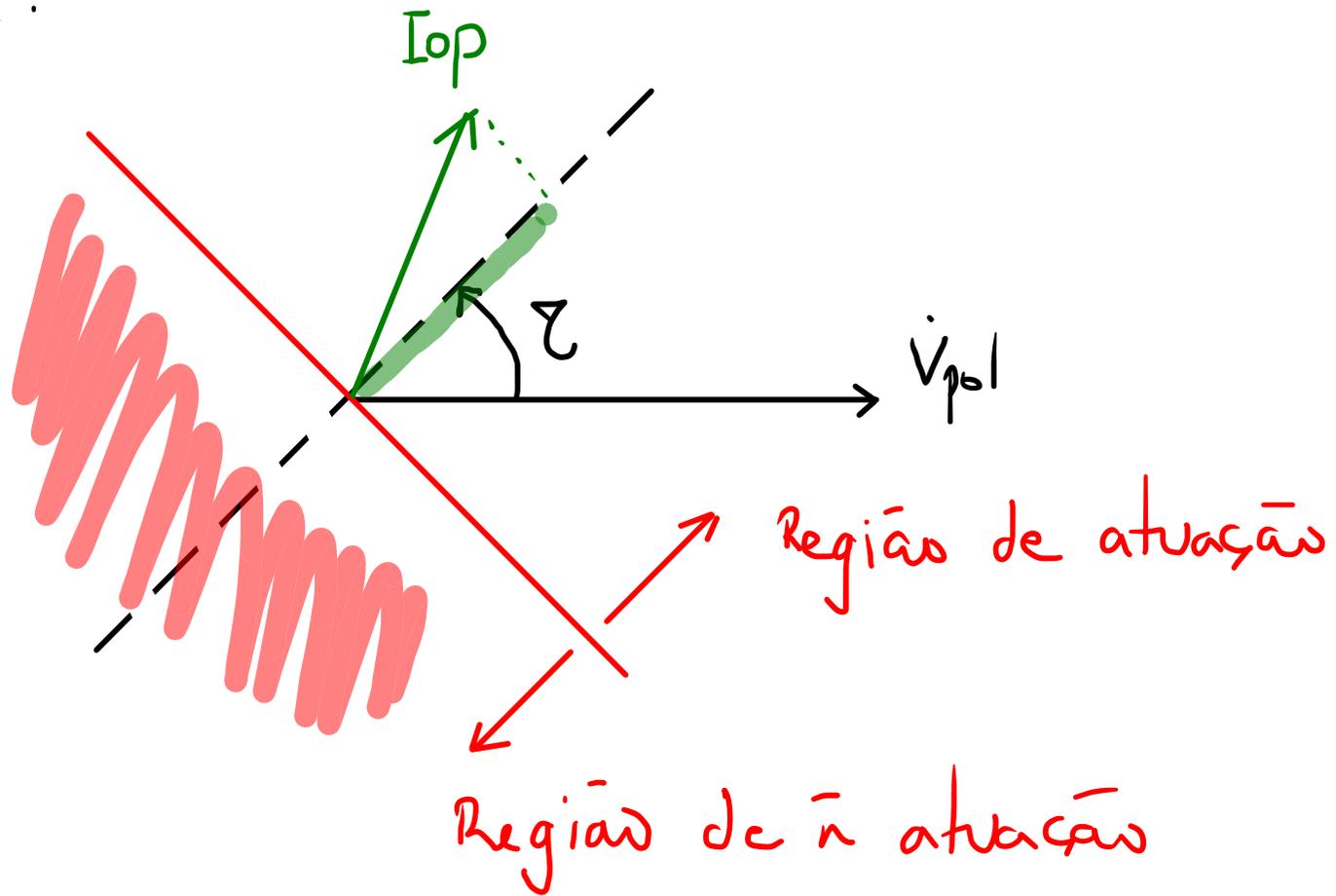
$$\tau - \alpha = 90^\circ$$

É chamado de ângulo de torque máximo e é ajustável

Então:

$$\tau = k_3 \phi_{op} \phi_{pol} \text{sen}(\theta + 90^\circ - \tau) = k_3 \cdot \phi_{op} \cdot \phi_{pol} \cdot \text{cos}(\theta - \tau)$$

Na prática:



### c) Implantação na tecnologia digital

Os relés digitais usam o mesmo princípio dos relés eletromecânicos, sendo que a implementação é realizada por firmware, através de uma equação como essa:

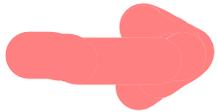
$$\operatorname{Re} \left\{ I_{op}^* \cdot V_{pol} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \right\} > 0$$

↳ Ten fase nula (referência)

Na implementação via firmware é possível utilizar condições adicionais para tornar a proteção mais confiável e precisa. Por exemplo, para faltas próximas ao ponto de instalação do relé, que podem produzir o colapso da tensão de polarização, pode-se utilizar uma memória de tensão armazenada ANTES da ocorrência da falta, para não utilizar um sinal degradado.

### c.1) Direcional de fase

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, e existem várias alternativas entre as grandezas de polarização de operação. A mais utilizada é a conexão de noventa graus.



Tipo de Conexão	Tipo de Unidade	Fase A		Fase B		Fase C		Máximo torque <sup>1</sup>
90°	30°	$V_{BC}$	$I_A$	$V_{CA}$	$I_B$	$V_{AB}$	$I_C$	Atrasadas de 60°
90°	45°	$V_{BC}$	$I_A$	$V_{CA}$	$I_B$	$V_{AB}$	$I_C$	Atrasadas de 45°
30°	0°	$V_{AC}$	$I_A$	$V_{BA}$	$I_B$	$V_{CB}$	$I_C$	Atrasadas de 30°
60°-Y	0°	$-V_{CN}$	$I_A$	$-V_{AN}$	$I_B$	$-V_{BN}$	$I_C$	Atrasadas de 60°
60°-Δ	0°	$V_{AC}$	$I_A - I_B$	$V_{BA}$	$I_B - I_C$	$V_{CB}$	$I_C - I_A$	Atrasadas de 60°

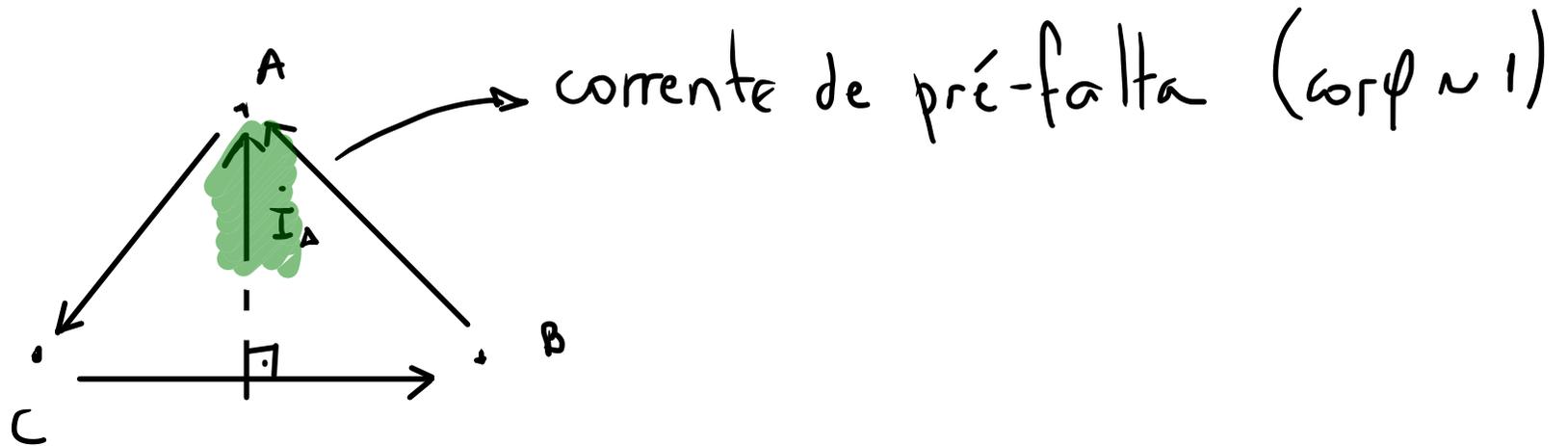
<sup>1</sup> Posição das grandezas de operação em relação às de polarização

Complexo  $90^\circ$



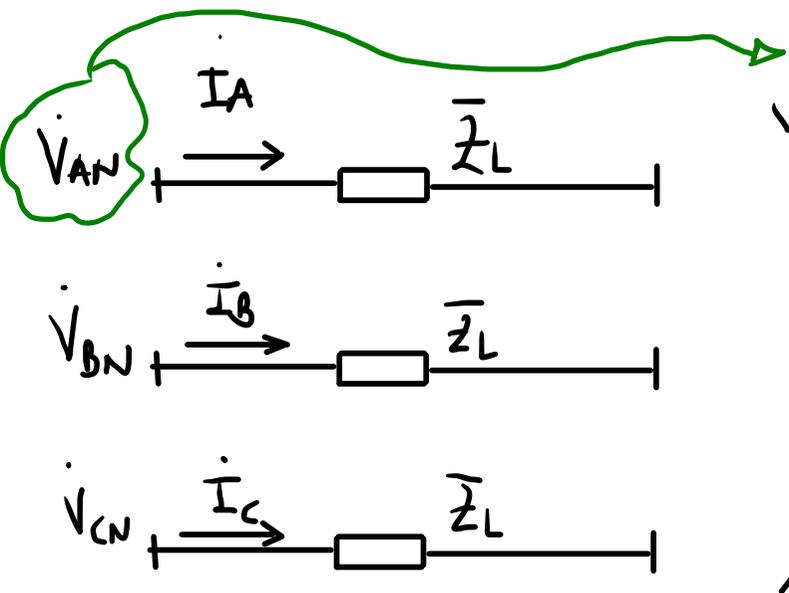
UNIDADE	Op.	POL.
A	$I_A$	$V_{BC}$
B	$I_B$	$V_{CA}$
C	$I_C$	$V_{AB}$

Fasorialmente



Cuidado!

O fato de se ter escolhido a tensão de polarização a  $90^\circ$  da corrente de operação não significa que o torque será máximo nessa condição: a corrente de falta normalmente está atrasada em relação à corrente de carga



$$\dot{V}_{AN} = |V_{AN}| \angle 90^\circ$$

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

As correntes de curto-circuito ficam:

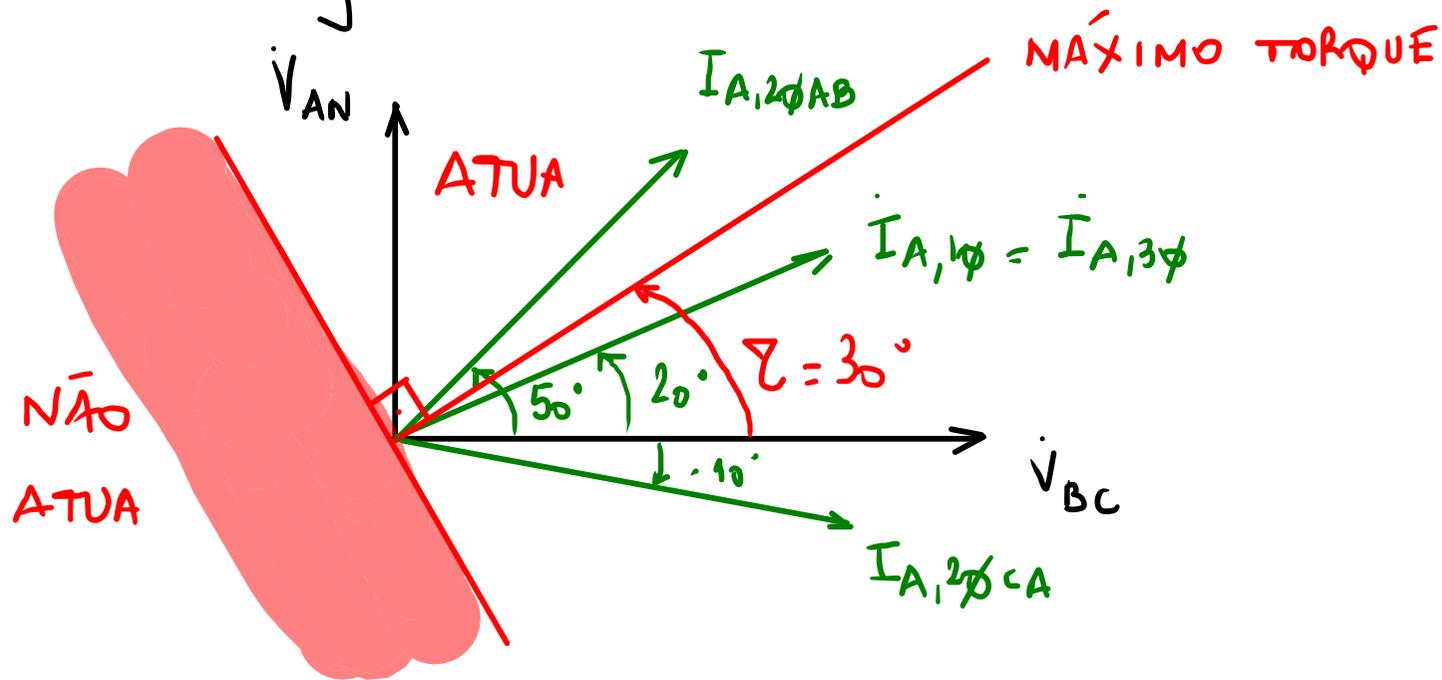
✓ Curto  $3\phi$ :  $\dot{I}_{A,3\phi} = \frac{\dot{V}_{AN}}{\bar{Z}_L} = \frac{V_{AN} \angle 90^\circ}{Z_L \angle 70^\circ}$

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

✓ **Curto 2φ (AB)** :  $\dot{I}_{A,2\phi AB} = \frac{\dot{V}_{AB}}{2\bar{Z}_L} = \frac{V_{AB}}{2Z_L} \underline{120-70^\circ}$

✓ **Curto 2φ (CA)** :  $\dot{I}_{A,2\phi CA} = \frac{-V_{CA}}{2\bar{Z}_L} = \frac{V_{CA}}{2Z_L} \underline{60-70^\circ}$

E o diagrama fasorial fica:



## c.2) Direcional de terra

A grandeza de operação da unidade direcional de terra (ANSI 67N) é a componente de sequência zero das correntes monitoradas. A grandeza de polarização pode ser: a sequência zero das tensões com o sinal trocado; ou a corrente de terra (por exemplo, **medida no aterramento** do transformador da subestação). Então:

$$\dot{I}_{op} = \frac{1}{3} \{ \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c \}$$

em fase

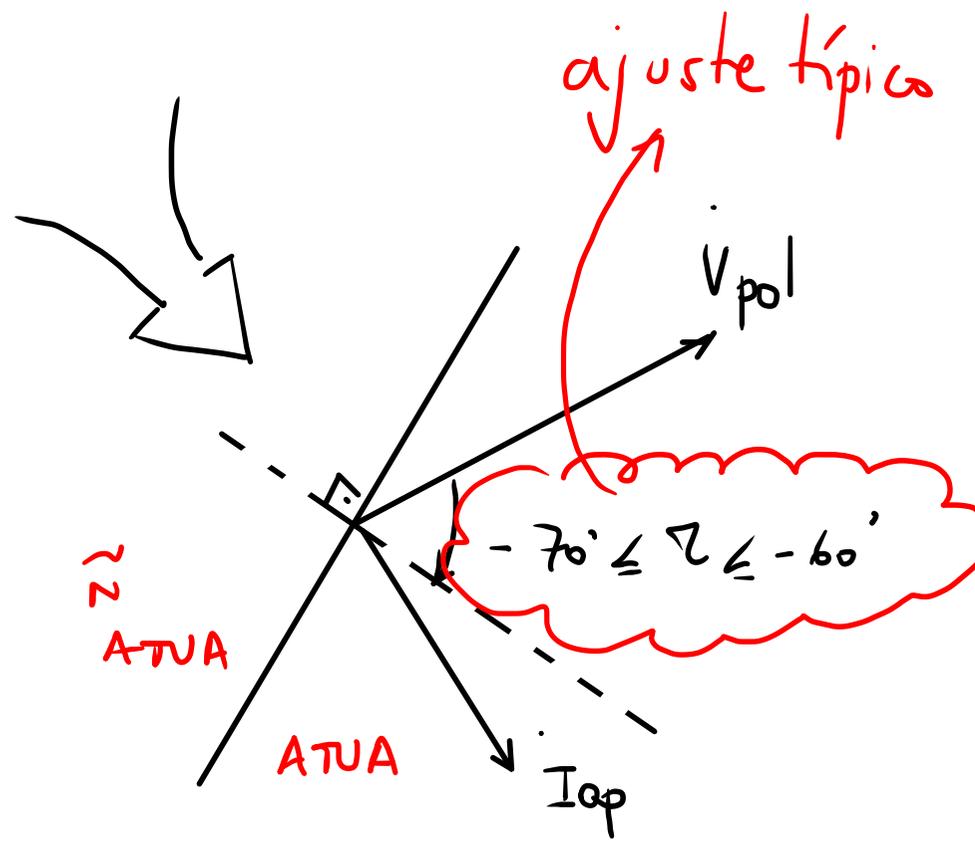
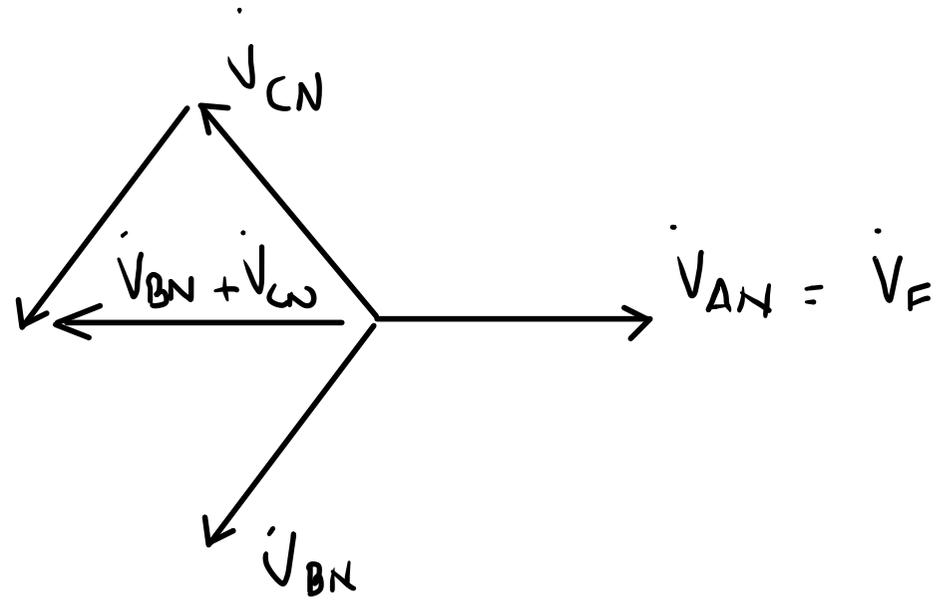
E :

$$\dot{V}_{pol} = -\frac{1}{3} \{ \dot{V}_{AN} + \dot{V}_{BN} + \dot{V}_{CN} \} \quad \text{ou} \quad I_{pol} = \dot{I}_N$$

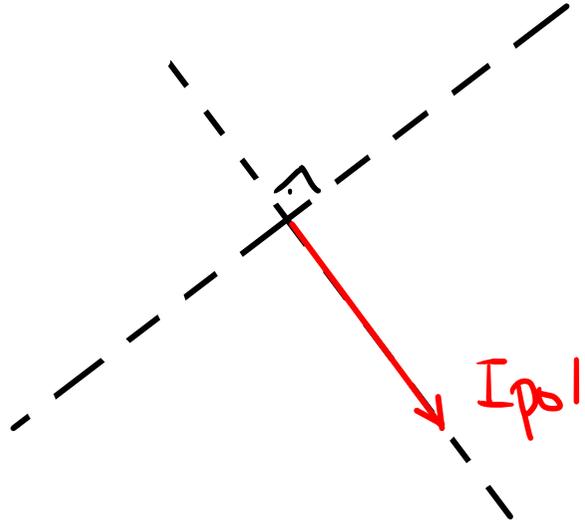
No primeiro caso:  $\omega r \ll \omega T$  :  $\dot{I}_0 \approx \dot{I}_1 = \dot{I}_2 = \frac{\dot{V}_F}{\bar{Z}_0 + 2\bar{Z}_1}$  ~ atraso de  $90^\circ$  em relação a  $\dot{V}_F$

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

Então



No segundo caso:



Neste caso  $\alpha = 0^\circ$  (posição de máximo torque)

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

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

As três unidades de fase (67) bloqueiam, ou não, as correspondentes unidades de sobrecorrente (50/51) e a unidade de neutro (67N) monitora as unidades de sobrecorrente de neutro(50/51N).

As unidades direcionais demandam a escolha das grandezas de polarização e operação (do tipo de conexão), a escolha do ângulo de torque máximo que está relacionada com o ângulo da impedância da linha (de sequência positiva e zero).

As funções de sobrecorrente requerem ajuste "especial".

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

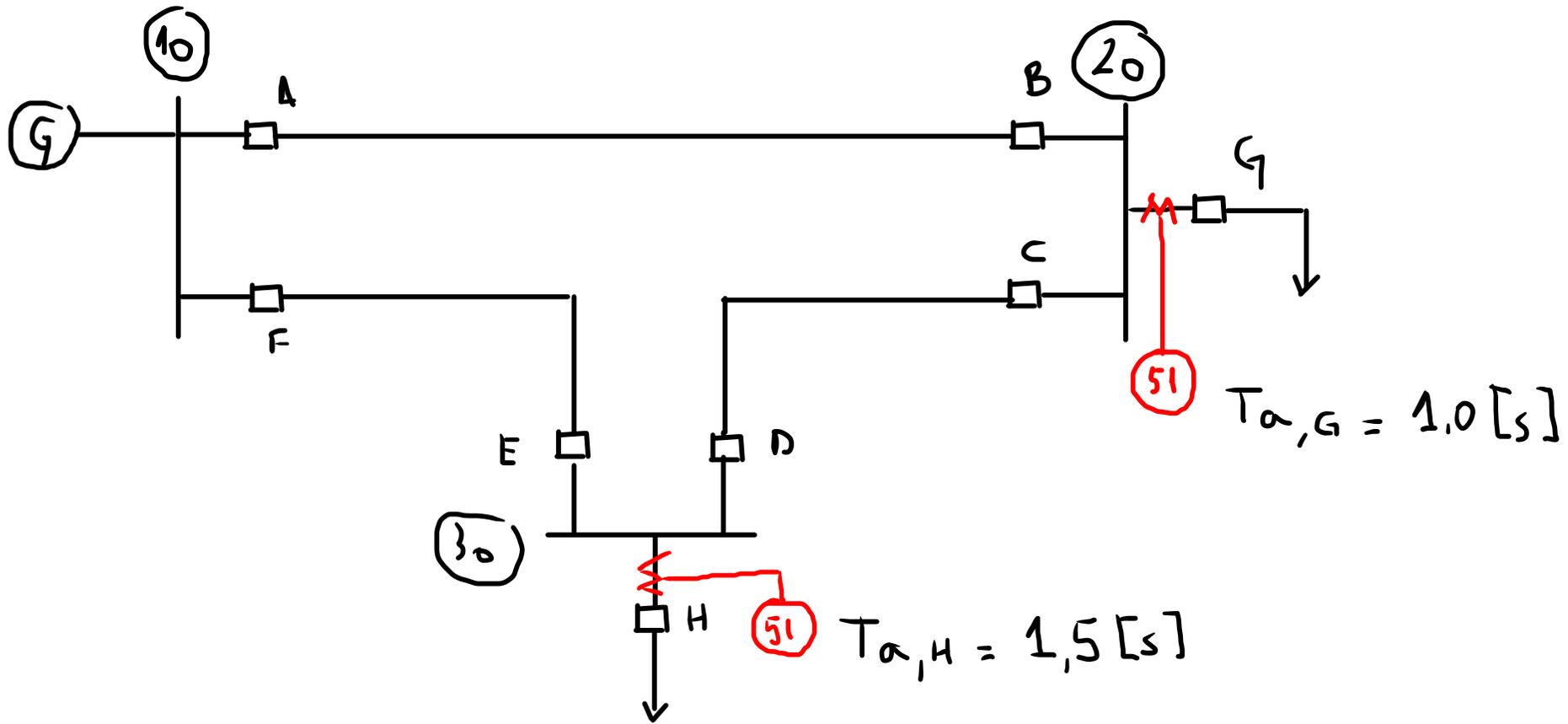
Para sistemas em malha, com diversas fontes, os ajustes das funções de sobrecorrente, que estão associadas às unidades direcionais, é mais complexo do que no caso radial.

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

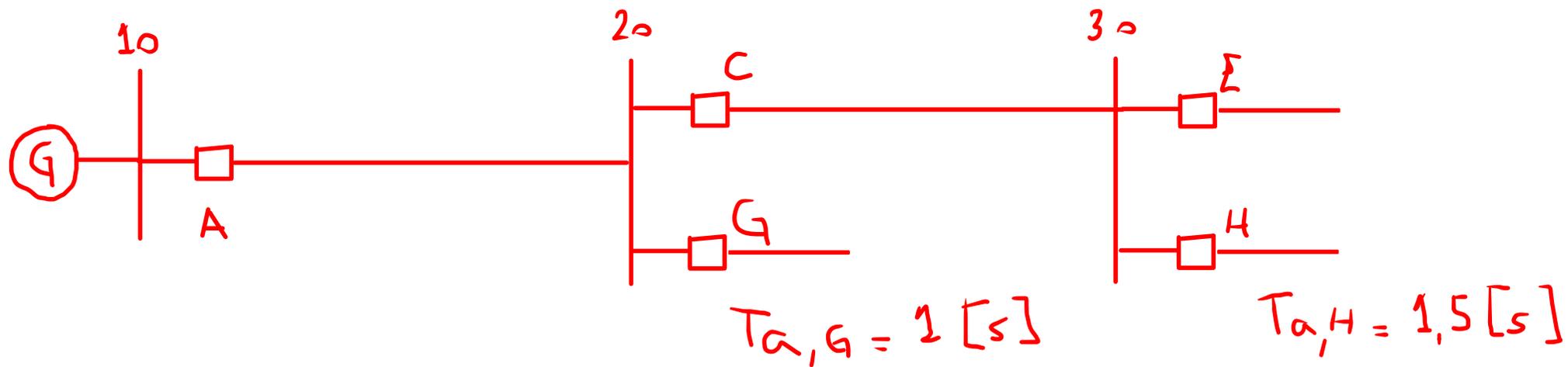
O processo é iniciado abrindo-se a malha em um dado ponto e fazendo-se a coordenação em determinado sentido e depois no outro. Quando o sistema possui múltiplas fontes, normalmente se abre a rede no ponto de conexão da maior fonte.

Esse processo é iterativo e pode ser solucionado utilizando-se algoritmos de otimização (heurísticos e determinísticos) que têm como função objetivo reduzir ao máximo os tempos de coordenação (ou tentativa e erro, utilizando a experiência do projetista).

Exemplo:  $\Delta t = 500 \text{ ms}$  / Tempo definido



→ Passo 1: Abre-se "F" e o sistema fica:

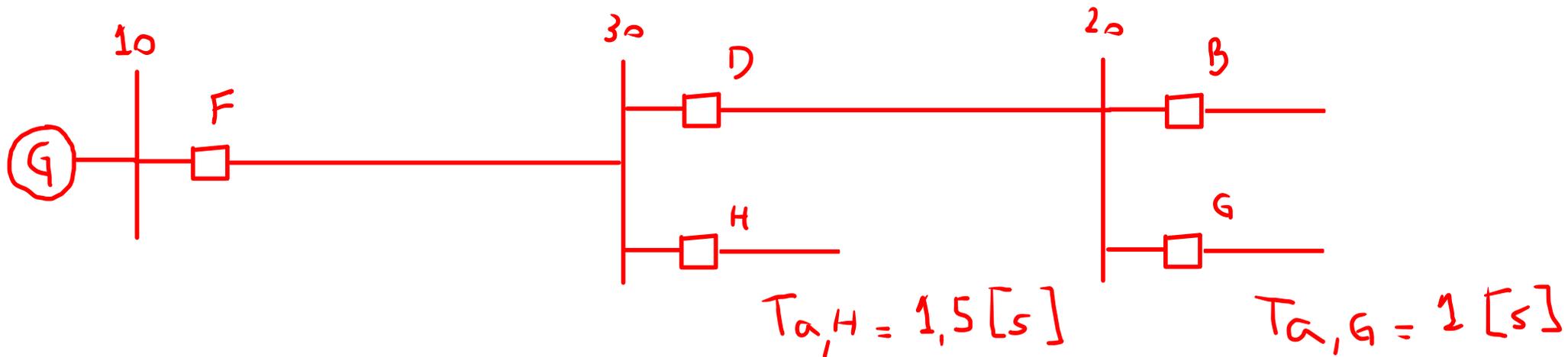


✓ Relé E: ã coordena q/ ninguém  $\leadsto T_{a,E} = 0,3 [s]$  (arbitrário)

✓ Relé C: coordena c/ E e H  $\leadsto T_{a,C} = \overbrace{0,5}^{\Delta t} + \max\{[T_{a,E}; T_{a,H}]\} = 2,0 [s]$

✓ Relé A: coordena q/ C e G  $\leadsto T_{a,A} = \overbrace{0,5}^{\Delta t} + \max\{[T_{a,C}; T_{a,G}]\} = 2,5 [s]$

→ Passo 1: Abre-se "A" e o sistema fica:



✓ Relé B: ã coordena c/ ninguém  $\leadsto T_{a,E} = 0,3 [s]$  (arbitrário)

✓ Relé D: coordena c/ B e G  $\leadsto T_{a,D} = \overbrace{0,5}^{\Delta t} + \max\{[T_{a,B}; T_{a,G}]\} = 1,5 [s]$

✓ Relé F: coordena c/ D e H  $\leadsto T_{a,F} = \overbrace{0,5}^{\Delta t} + \max\{[T_{a,D}; T_{a,H}]\} = 2,0 [s]$

---

Ajuste da proteção de sobrecorrente direcional

 Exemplo - Livro do Blackburn 

---

↖  
Material Adicional do  
Edisciplinas