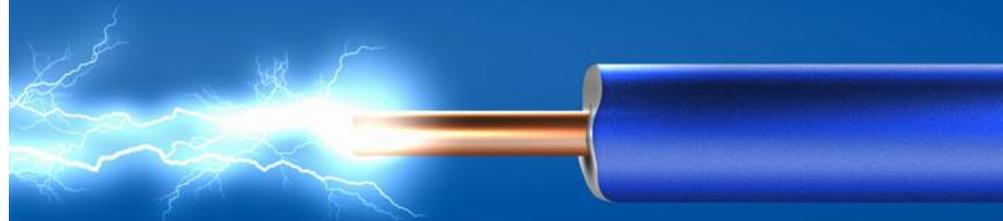




# TE 973 Proteção de Sistemas Elétricos



## Capítulo 1 – Introdução à proteção de sistemas elétricos

# 1. Sistema elétrico de potencia

- A utilização de energia elétrica exige a instalação de um complexo sistema de geração, transmissão e distribuição de energia;
- No Brasil:
  - Hidrelétricas;
  - Transmissão em níveis elevados de tensão como 138, 230, 345, 440, 500 e 750 kV CA e  $\pm$  600 kV CC;
  - Subestações (SE's) abaixam a tensão através de transformadores para níveis de distribuição primária 13,8, 25 kV, etc.
  - Redes MT alimentam transformadores que baixam a tensão para 380/220 V ou 220/127 V, ou seja distribuição secundária.

A finalidade de um sistema de potencia é distribuir energia elétrica para uma multiplicidade de pontos e uso em diversas aplicações. Tal sistema deve ser projetado e operado para entregar esta energia obedecendo três requisitos básicos: Qualidade, confiabilidade e economia, que apesar de serem relativamente antagônicos é possível conciliá-los, utilizando conhecimentos técnicos e bom senso.

# Horizonte 2024



## About This Map »

Click on the links below to switch layers on and off.

### EXISTING LINES

-  345-499 kV ?
-  500-699 kV ?
-  700-799 kV ?
-  1,000 kV (DC) ?

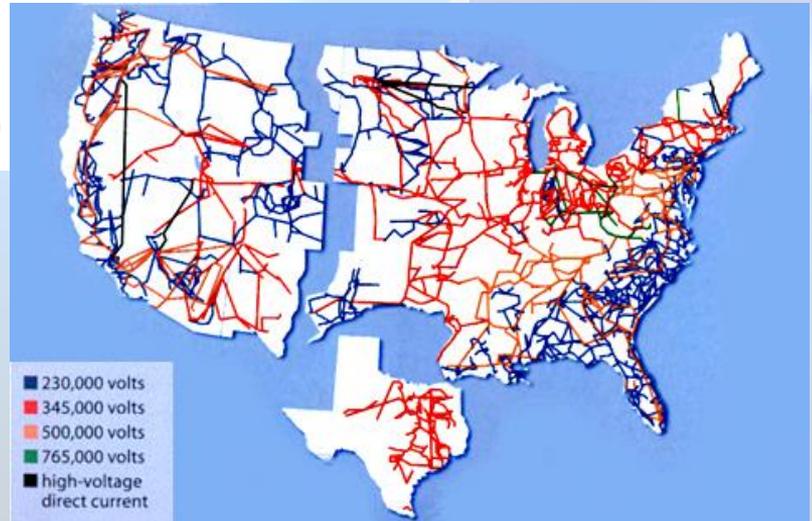
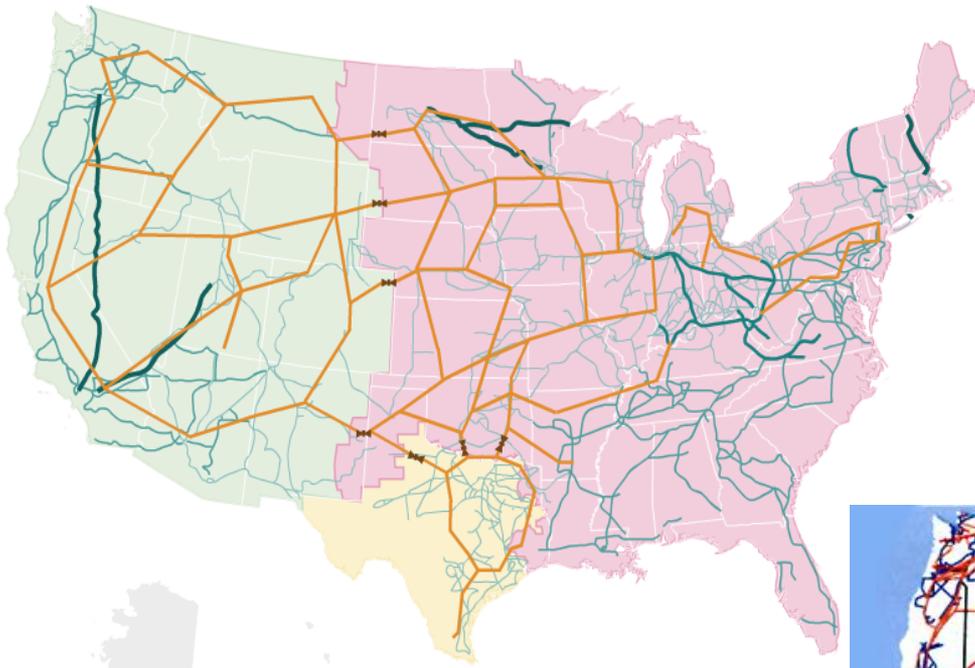
### PROPOSED LINES

-  New 765 kV ?
-  AC-DC-AC Links ?

### INTERCONNECTIONS

Major sectors of the U.S. electrical grid

-  Eastern
-  Western
-  Texas (ERCOT)



- O sistema elétrico deve obedecer aos padrões legais preestabelecidos pelo governo para fornecimento adequado de energia elétrica na quantidade e qualidade requeridos:

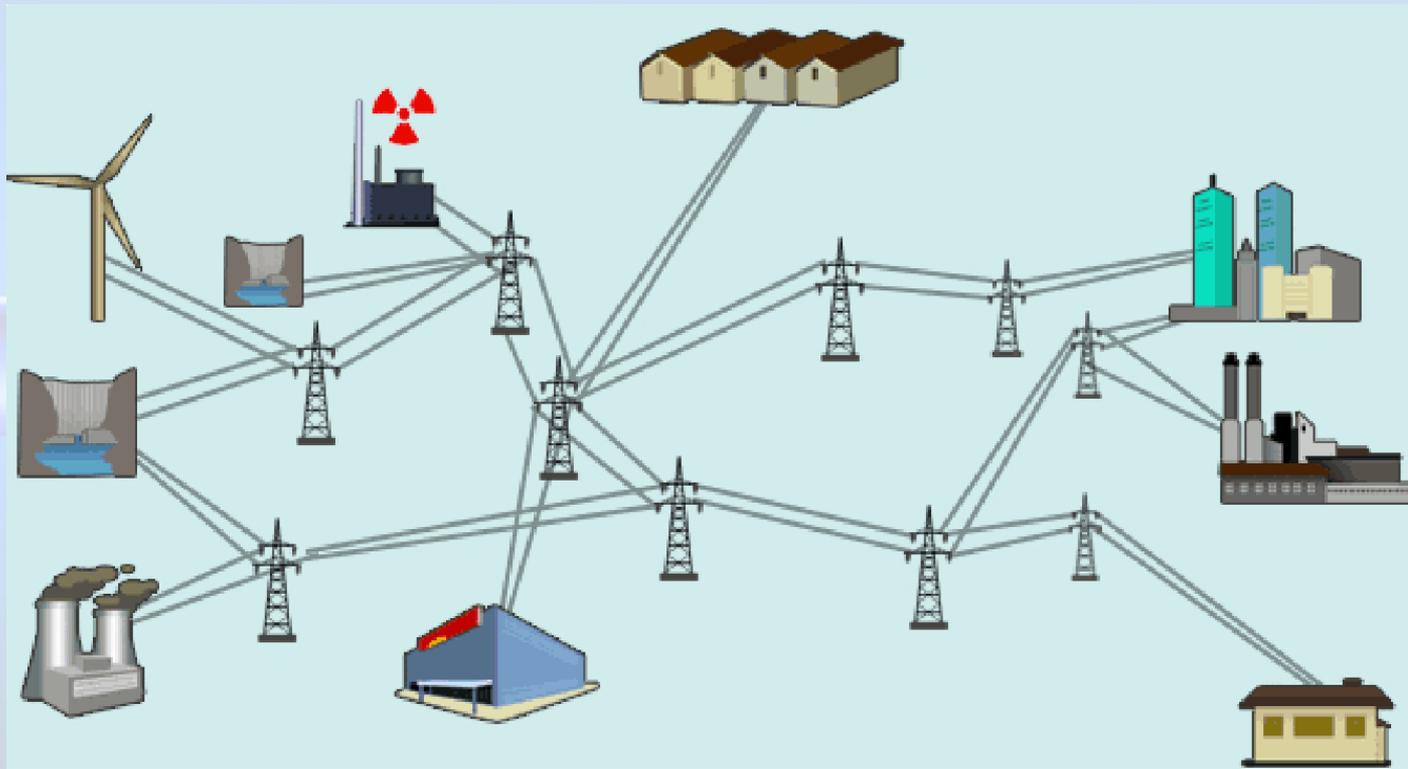
- [Aneel – Prodist Módulo 8](#)
- [ONS - Submódulo 2.8](#)

- O risco da ocorrência de uma falha considerando-se um componente isoladamente é pequeno, entretanto, globalmente pode ser bastante elevado, aumentando também a repercussão numa área considerável do sistema, podendo causar o que comumente é conhecido como *blackout*.

30/08/2016 17h32 - Atualizado em 30/08/2016 20h51

## **Falha em linha de transmissão no TO afeta energia elétrica em 12 estados**

Problema foi registrado entre subestações de duas cidades no Tocantins. Segundo companhia de energia do TO, redes foram afetadas por queimada.



- Fatores internos e externos podem provocar falhas. Uma falha é qualquer estado anormal de um sistema.
- Em geral, as falhas são constituídas de curtos-circuitos e/ou circuitos abertos.
- Devido a própria natureza do sistema elétrico de potencia, é impossível tornar o sistema elétrico imune à perturbações, defeitos e falhas diversas



- Condições anormais resultam em:
  - interrupções no fornecimento de energia elétrica;
  - podem ocasionar danos aos componentes do sistema.
- Esquemas de proteção são planejados para receberem as informações das grandezas elétricas do sistema (V, A, Hz, etc), em tempo real, de forma a atuarem sempre que condições anormais ocorram.

## 2. Curto-circuitos

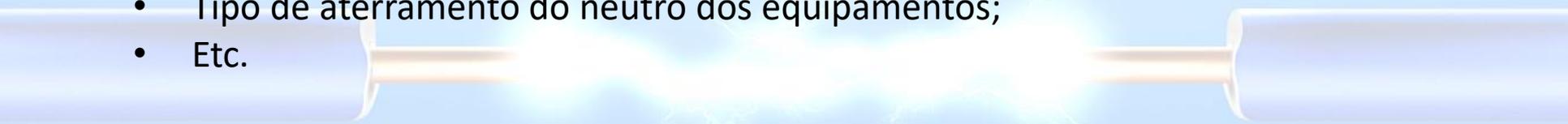
As perturbações mais comuns e também as mais severas que incidem em sistema elétrico de potência são os curtos-circuitos, que ocorrem em decorrência da ruptura da isolação entre as fases ou entre a fase e terra.

O curto-circuito é uma redução inesperada no caminho percorrido pela corrente, ou seja, uma redução da impedância, causando aumento da corrente, que pode provocar danos térmicos e mecânicos aos equipamentos envolvidos.

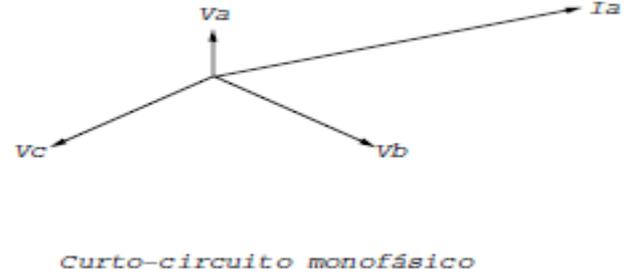
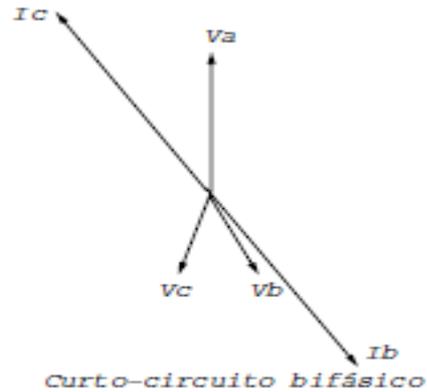
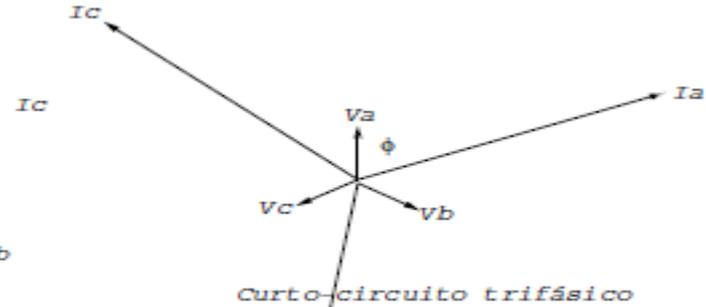
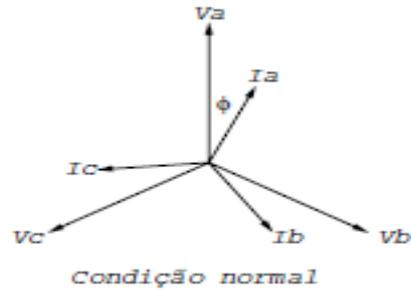
A magnitude da corrente de curto-circuito depende de vários fatores, tais como:

- Tipo de curto-circuito;
- Capacidade do sistema de geração;
- Topologia da rede elétrica;
- Tipo de aterramento do neutro dos equipamentos;
- Etc.

Vale frisar que a magnitude de uma corrente de curto-circuito, ao contrário da corrente de carga, independe da potência da carga, mas da potência do gerador. Isto é, tanto maior será a corrente de curto, quanto maior for a potência que o sistema poderá fornecer.



# Tipos de curtos-circuitos:



A determinação das correntes de curto-circuito de um sistema são importantes para:

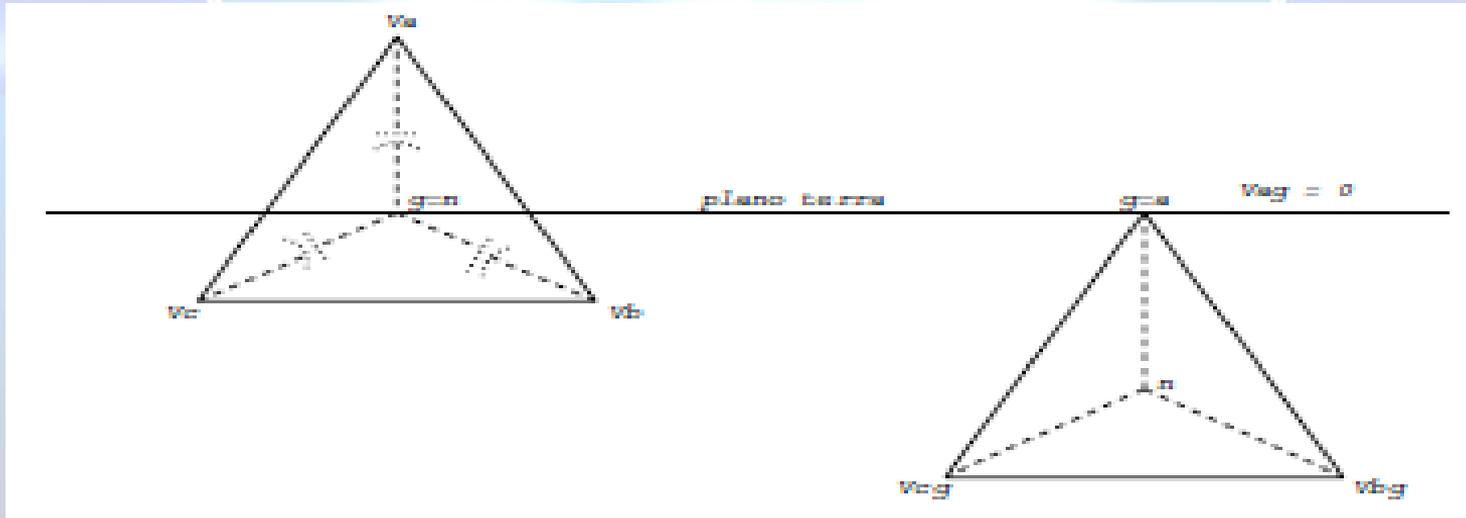
- Dimensionamento e seleção de relés de proteção;
- Determinação da capacidade de interrupção de disjuntores;
- Determinação da máxima corrente de suportabilidade de equipamentos (cabos, trafos, barras, etc);
- Coordenação da proteção;
- Cálculo de esforços mecânicos e estruturais;
- Etc.

## Sistemas de aterramento:

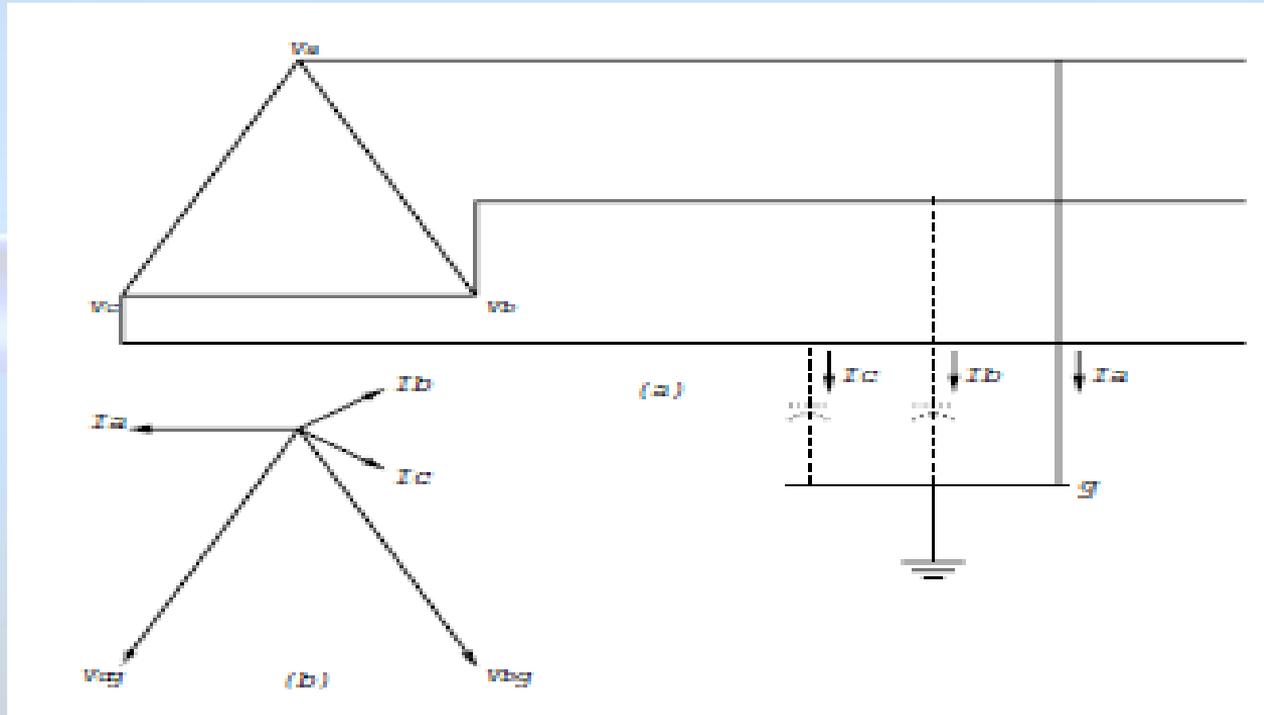
O sistema de aterramento afeta significativamente tanto a magnitude como o ângulo da corrente de curto-circuito à terra. Existem três tipos de aterramento:

- Sistema não aterrado (neutro isolado);
- sistema aterrado por impedâncias;
- sistema efetivamente aterrado.

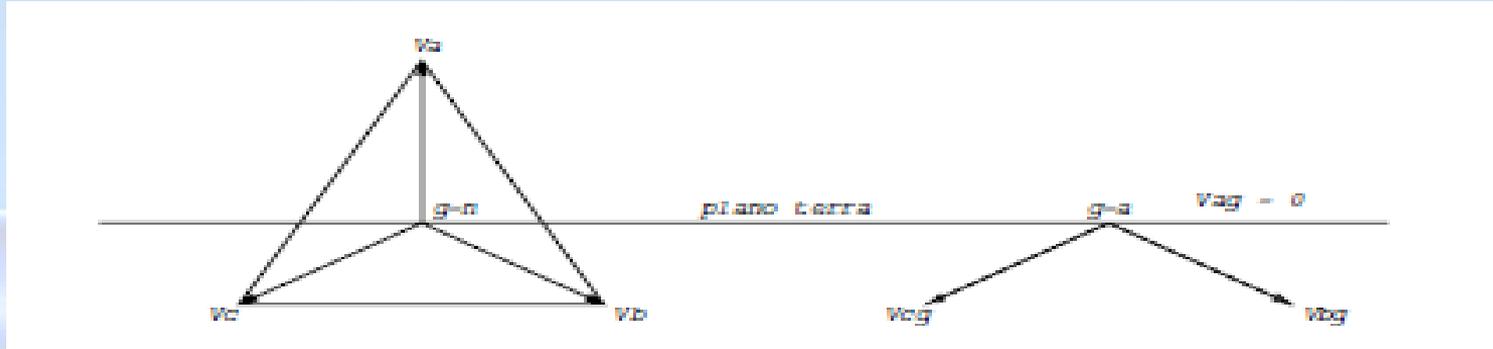
No sistema não aterrado existe um acoplamento à terra através de uma capacitância *shunt* natural. Num sistema simétrico, onde as três capacitâncias a terra são iguais, o neutro (n) fica no plano terra (g), e se a fase A, por exemplo, for aterrada, o triângulo se deslocará conforme mostrado na Figura .



Curto-circuito monofásico em sistema não aterrado:



Curto-circuito monofásico em sistema aterrado:



Conclui-se que as magnitudes das fases são podem variar de 1,0 pu a 1,73 pu.

## Vantagens e desvantagens do sistema não aterrado:

- A corrente de curto-circuito para a terra é desprezível e se auto extingue na maioria dos casos, sem causar interrupção no fornecimento de energia elétrica;
- É extremamente difícil detectar o local do defeito;
- As sobretensões sustentadas são elevadas, o que impõe o uso de para-raios com tensão fase-fase;
- O ajuste dos relés de terra e a obtenção de uma boa seletividade são tarefas bastante difíceis.

## Vantagens e desvantagens do sistema efetivamente aterrado:

- A corrente de curto-circuito para terra é elevada e o desligamento do circuito afetado é sempre necessário;
- Consegue-se obter excelente sensibilidade e seletividade nos relés de terra;
- As sobretensões sustentadas são reduzidas, o que permite o uso de para-raios com tensões menores.

# As consequências dos curtos-circuitos

- A corrente de curto-circuito, de acordo com a lei de Joule, provoca dissipação de potencia na parte resistiva do circuito provocando aquecimento. No ponto da falta este aquecimento e o formato do arco podem provocar destruição do material, dependendo de  $I_{cc}$  e de  $t$ . Portanto, para uma dada corrente de curto-circuito, o tempo  $t$  deve ser o menor possível para reduzir os danos.



# As consequências dos curtos-circuitos

- A queda de tensão no momento de um curto-circuito provoca graves transtornos aos consumidores. O torque dos motores é proporcional ao quadrado da tensão, portanto, no momento de um curto-circuito o funcionamento destes equipamentos pode ser seriamente comprometido.
- Cargas como sistemas de iluminação, sistemas computacionais e sistemas de controle em geral são sensíveis as quedas de tensão.

# As consequências dos curtos-circuitos

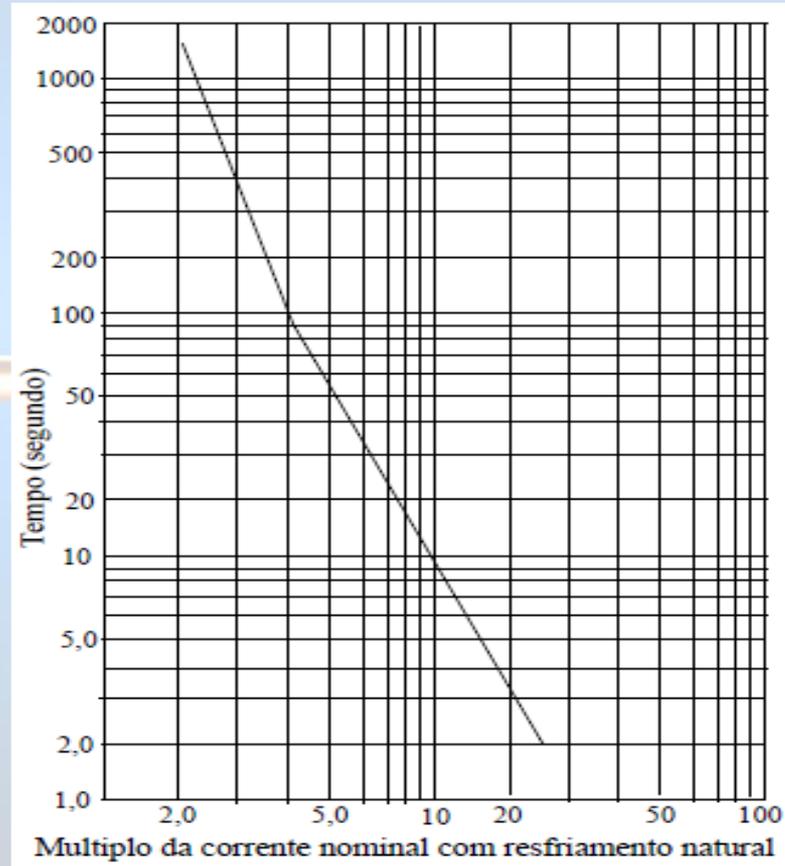
- Provoca instabilidade na operação do sistema de geração e ressonância subsíncrona;
- Desligamentos de geradores podem provocar sobrecargas.



# 3. Condições anormais de operação

- **Sobrecarga em equipamentos:** é causada pela passagem de um fluxo de corrente acima do valor nominal. A corrente nominal é a máxima corrente permissível para um dado equipamento continuamente. A sobrecarga frequente em equipamentos acelera a deterioração da isolação, causando curtos-circuitos.

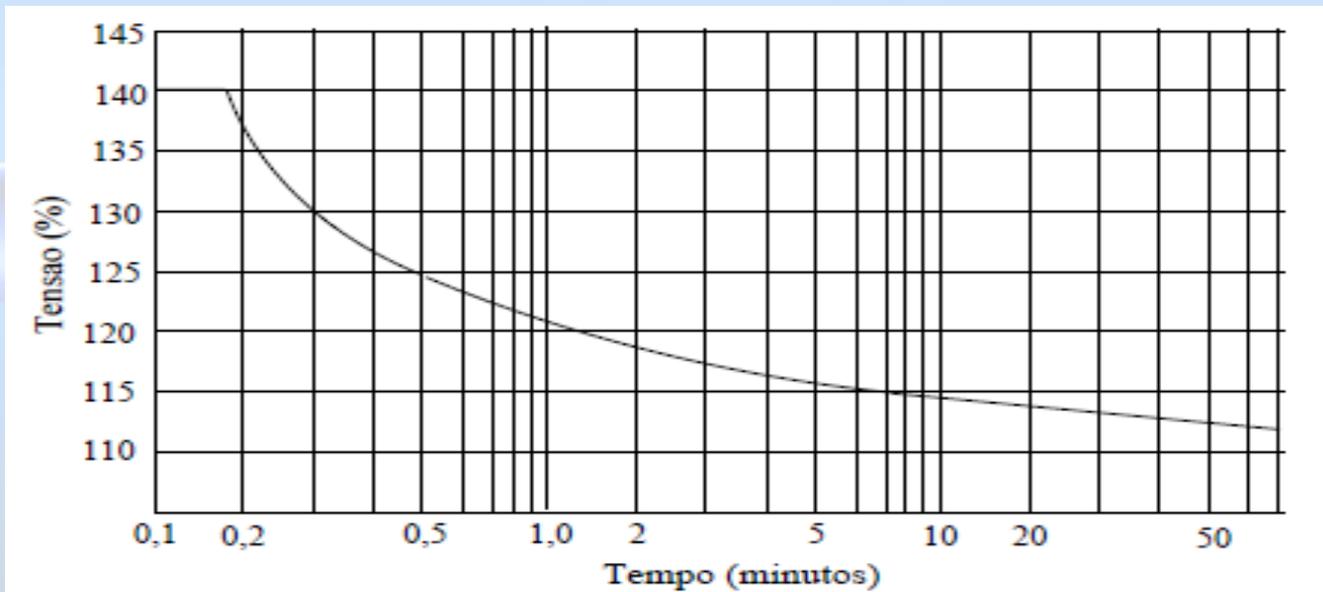
# Curva de sobrecarga de um transformador



# Condições anormais de operação

- **Subfrequência e sobrefrequência:** são causadas por grande desequilíbrio entre geração e carga.
- **Sobretensão:** é provocada pela súbita retirada da carga. Neste caso, os geradores (hidrogeradores em especial) disparam e as tensões nos seus terminais podem atingir valores elevados que podem comprometer as isolações dos enrolamentos. Em sistemas de extra alta tensão a sobretensão pode surgir através do efeito capacitivo das linhas de transmissão.

## Curva de sobretensão de um transformador



## 4. Objetivos dos sistemas de proteção

- A proteção de qualquer sistema elétrico é feita com o objetivo de diminuir ou evitar risco de vida e danos materiais, quando ocorrer situações anormais durante a operação do mesmo.
- A proteção deve eliminar o defeito o mais rápido possível, de modo a deixar o menor número possível de consumidores sem energia elétrica.

## Funções básicas de um sistema de proteção são:

- Salvar a integridade física de operadores, usuários do sistema e animais – vidas não tem preço;
- Evitar ou minimizar danos materiais – os custos envolvidos são muito elevados;
- Alertar a operação e manutenção de rede;
- Retirar de serviço um equipamento ou parte do sistema que se apresente defeituoso – desperdício de energia;
- Assegurar a continuidade da alimentação – satisfação do consumidor;
- Diminuir despesas com manutenção corretiva;
- Melhorar índices como DEC (duração de interrupção equivalente por consumidor) e FEC (frequência de interrupção equivalente por consumidor).

# 5. Propriedades básicas de um sistema de proteção

A eficácia de um esquema de proteção é tanto maior quanto melhor forem atendidos os seguintes princípios:

- **Rapidez de operação:** menor dano ao equipamento defeituoso com consequente diminuição do tempo de indisponibilidade e menor custo de reparo.
- **Seletividade e coordenação:** a área de interrupção deve ficar restrita ao mínimo necessário para isolar completamente o elemento defeituoso, ou seja, um curto-circuito em um ponto do sistema não deve afetar outras partes.

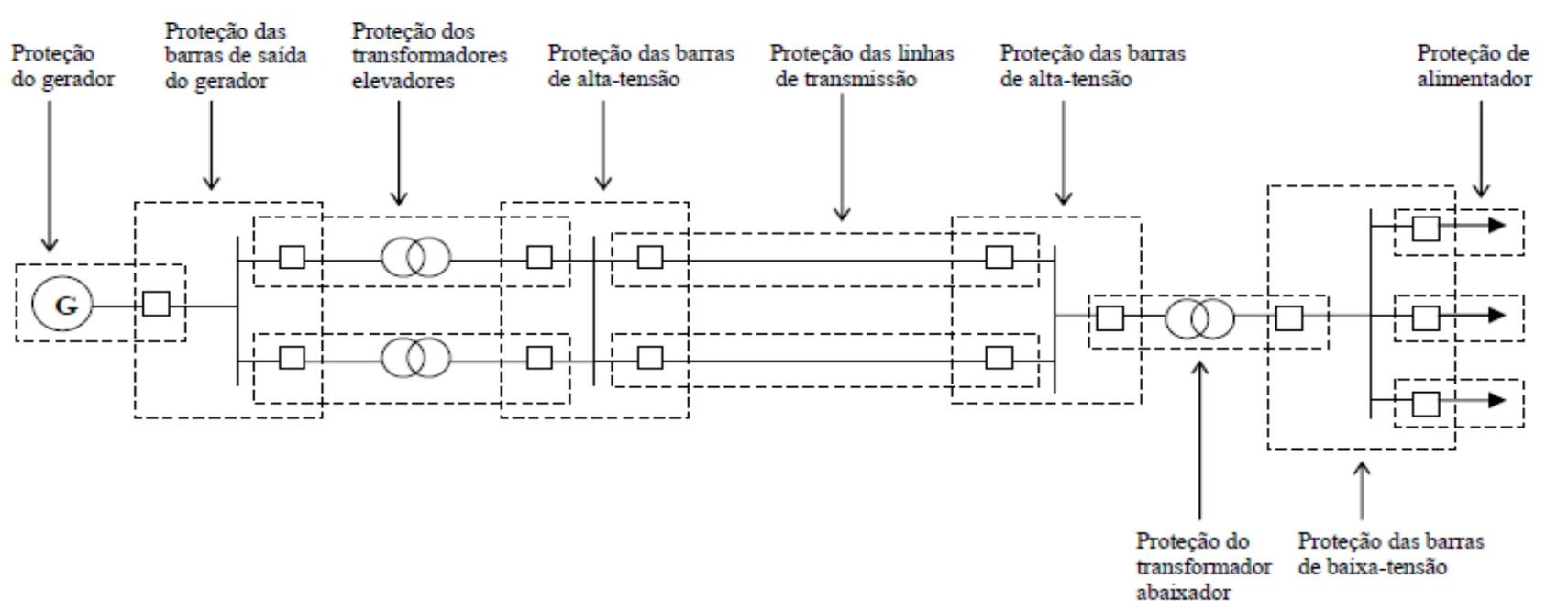
- **Confiabilidade:** probabilidade do sistema de proteção funcionar com segurança e corretamente, sob todas as circunstâncias;
- **Sensibilidade:** um sistema de proteção deve responder às anormalidades com menor margem possível de tolerância entre a operação e não operação dos seus equipamentos. Por exemplo, um relé de 40 A com 1% de tolerância é mais sensível do que outro de 40 A com 2%.
- **Segurança:** pronta atuação dos esquemas de proteção diminui os efeitos destrutivos dos curtos-circuitos, aumentando a segurança pessoal.
- **Automação:** o elemento de proteção deve atuar na falta e retornar sem auxílio humano

# 6. Níveis de atuação de um sistema de proteção

De modo geral, a atuação de um sistema de proteção se dá em três níveis:

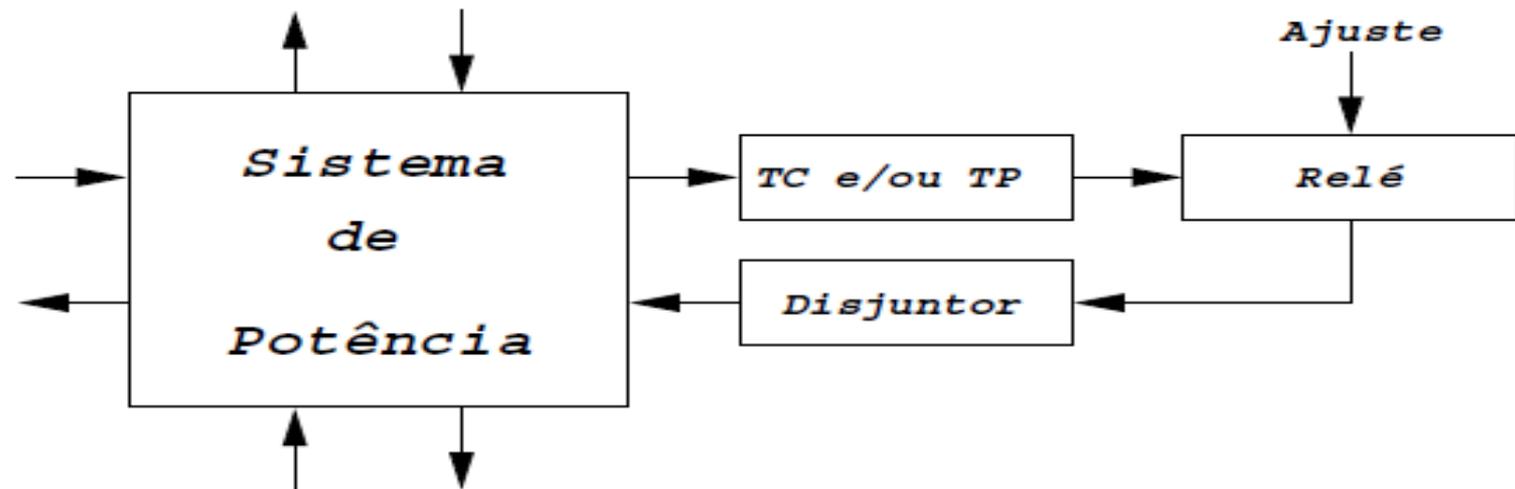
- **Proteção principal** : Em caso de falta dentro da zona protegida, é quem deverá atuar primeiro.
- **Proteção de retaguarda** : é aquela que só deverá atuar quando ocorrer falha da proteção principal.

- **Proteção auxiliar** : é constituída por funções auxiliares das proteções principal e de retaguarda, cujos os objetivos são sinalização, alarme, temporização, intertravamento, etc.

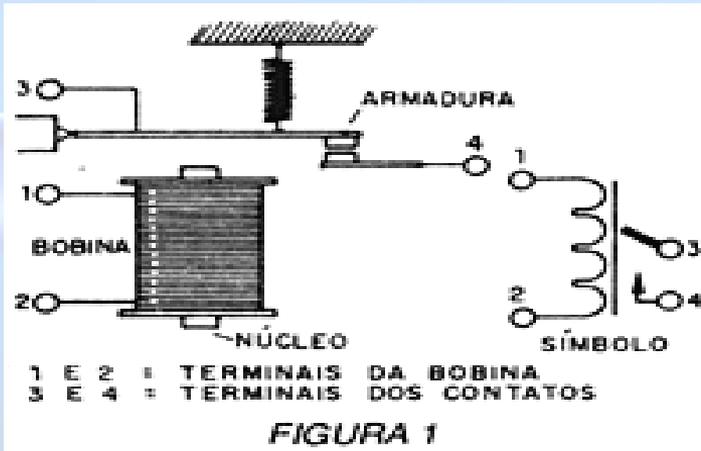


# 7. Principais Elementos

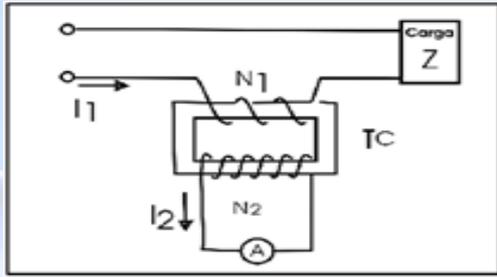
Relé: <i>elemento detector-comparador e analisador</i>	
Transformadores para instrumentos: <i>transdutores de corrente e tensão</i>	TC 
	TP 
Disjuntor e chaves interruptoras: <i>elemento de interrupção</i>	
Outros:	Cabeamento, chaves seccionadoras motorizadas, fusíveis, etc.



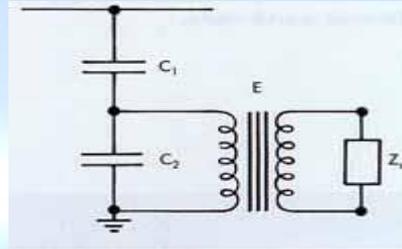
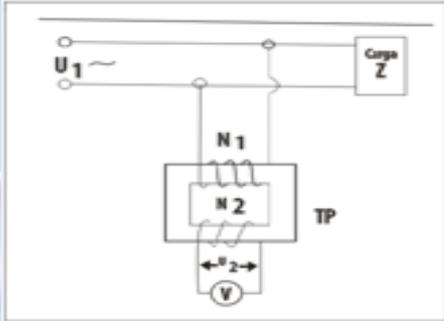
- Relés



- Transformadores de corrente



- Transformadores de potencial



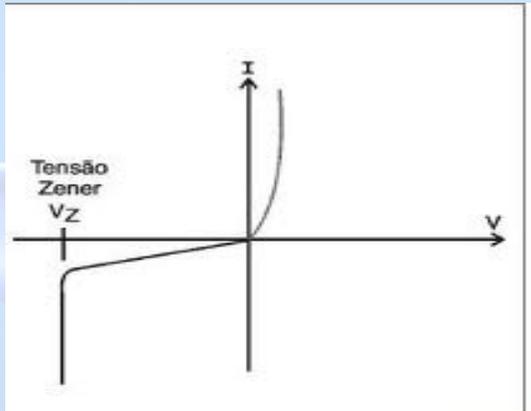
- Disjuntores e chaves



# Proteção contra descargas atmosféricas diretas



- Outros



- Subestação



# 8. Análise generalizada da proteção

Basicamente em um sistema encontram-se os seguintes tipos de proteção:

- Proteção contra condições anormais em parâmetros elétricos (*a que iremos enfatizar nesse estudo*) feita por relé e fusíveis;
- Proteção contra incêndio;
- Contra descargas atmosféricas e surtos de manobra (para-raios).

## Principais considerações de um estudo de proteção:

- **Elétricas:** equipamentos e sistema;
- **Econômicas:** custo de equipamentos *versus* custo da proteção;
- **Físicas:** facilidades de manutenção, locais de acomodação (relés, transdutores, etc.), distâncias (cabearamento e carga dos transdutores), etc.

# 9. Tipos de proteção dos sistemas elétricos

## A) Proteção de sobrecorrente

- Sobrecorrentes são os eventos mais comuns e que submetem os equipamentos elétricos ao maior estresse. Classificadas em:

## A.1) Sobrecargas

- Variações moderadas da corrente do sistema elétrico;
- Limitadas em módulo e tempo não trazem maiores danos;
- Quando ultrapassam os limites, devem ser retiradas do sistema;
- Principal tipo de proteção são os relés térmico;
- Também são usados relés eletromecânicos, eletrônicos e digitais com temporizações moderadas.

## A.2) Curto-Circuitos

- Variações extremas da corrente do sistema elétrico;
- Se não forem limitadas em módulo e tempo danificam os componentes elétricos pelos quais são conduzidos;
- Devem atuar entre 50 e 1000 ms dependendo do caso – velozes;
- Equipamentos de manobra devem ter capacidade de interrupção adequada e capacidade de fechamento em curto circuito.
- Fusíveis são os mais utilizados em BT e MT (distribuição), enquanto os relés são os mais empregados para o sistema de potencia (LT's, SE's e UG's)

## B) Proteção de sobretensão

- Basicamente, as sobretensões do SEP nunca devem superar 110% da tensão nominal de operação.
- Podem ter diferentes origens:
  - Descargas atmosféricas;
  - Chaveamentos;
  - Curto-circuitos monopolares.



## **B.1) Descargas atmosféricas**

- Podem envolver uma ou mais fases;
- Podem gerar sobretensões de forma direta ou indireta;
- Redes de distribuição são mais afetadas devido ao baixo grau de isolamento;
- Para evitar-se descargas diretas são usados blindagens como: cabos guarda ou para-raios de haste instalados nas estruturas das SE's;
- Nas cidades, edificações e outras estruturas auxiliam na blindagem;
- Porém não impedem a indução.

## **B.1) Descargas atmosféricas**

- Devido às capacitâncias naturais do sistema, descargas próximas às redes elétricas podem induzir grandes sobretensões;
- Sobretensões induzidas são mais comuns que as diretas;
- São protegidas com uso de para-raios de linha e supressores de surto como centelhadores, varistores e diodo Zener;
- Para ondas com tempo longo de decaimento há os relés de sobretensão.

## B.2) Chaveamento

- Decorre na maioria das vezes pela rejeição de grande blocos de carga e desligamento intempestivo de LT's;
- Também podem ser oriundas de chaveamentos de bancos de capacitores, ressonâncias, energização de trafos e LT's, etc;
- A proteção deve desconectar as fontes de geração e bancos de capacitores mais próximos da ocorrência;
- Ajustes seletivos dos relés;

## C) Proteção de subtensão

- Proteger máquinas elétricas;
- Retirada de grandes geradores por perda de estabilidade;
- Relés são aplicados para atuarem com  $V < 0,8 V_N$  por período de aproximadamente 2 seg.

## D) Proteção de Frequência

- Perda de grandes blocos de carga alteram rotação das máquinas;
- Alteração na velocidade das máquinas podem ocasionar aquecimento e vibrações;
- Até  $\pm 2$  Hz, a proteção não deve atuar para períodos inferiores a 2s;
- A proteção de frequência opera para uma faixa entre 25 e 70 Hz.

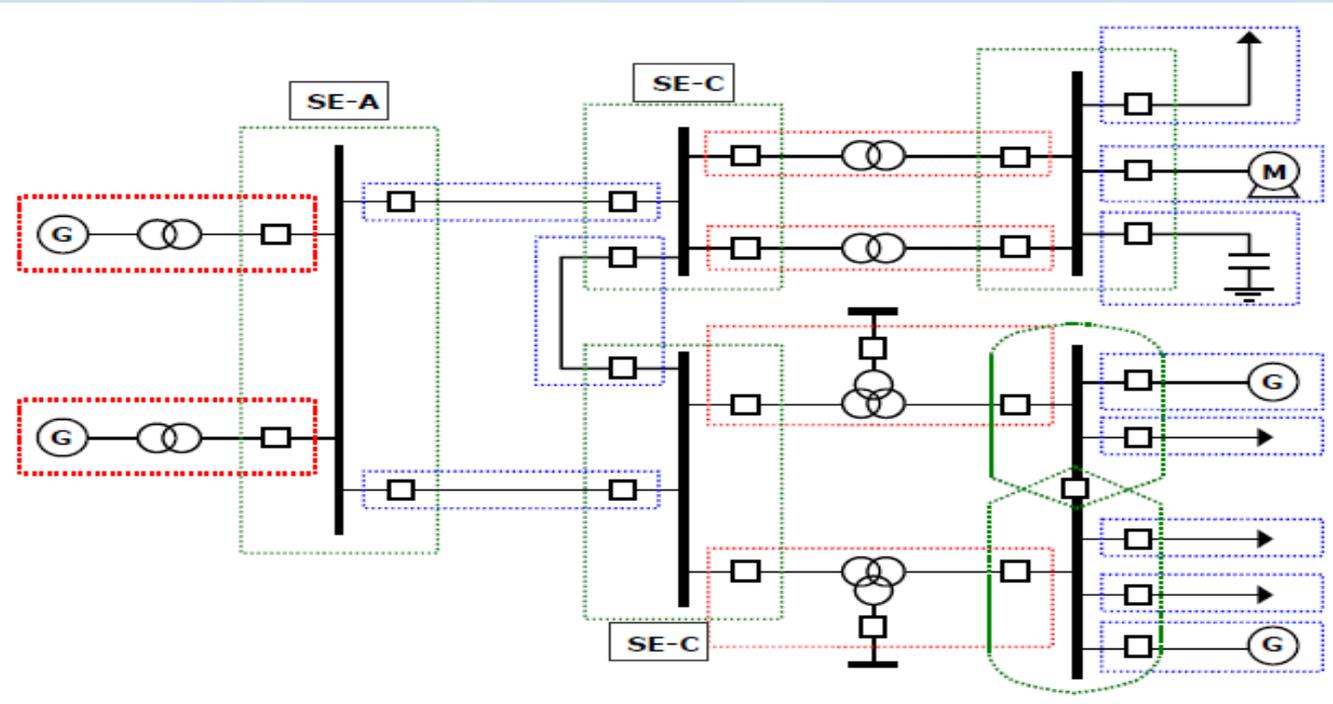
## **E) Proteção de sobre-excitação**

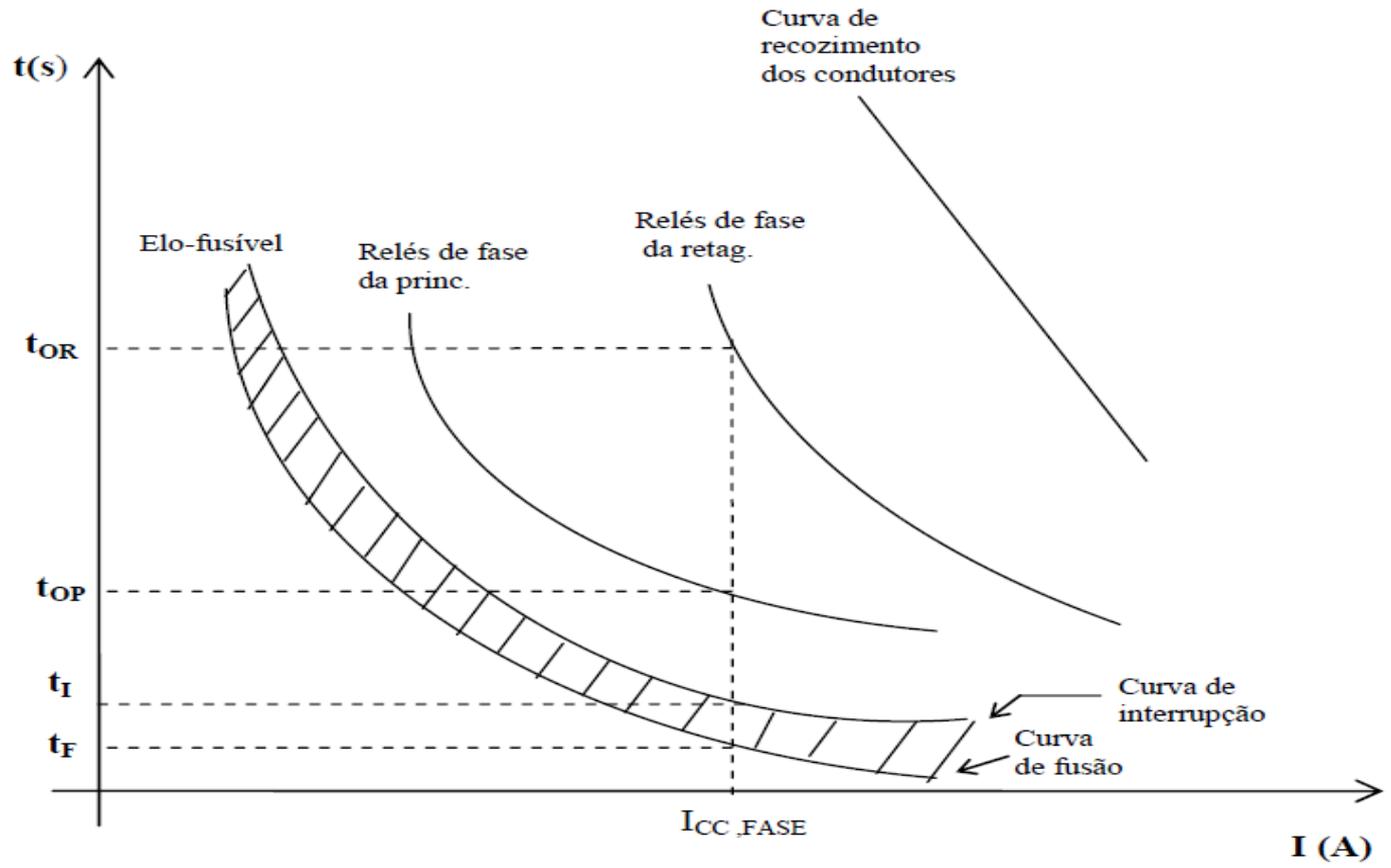
- Níveis de indução muito elevados causam saturação do núcleo de geradores e transformadores;
- Elevação das correntes parasitas e temperatura;
- Normalmente indicada para sistemas ilhados e de baixo nível de curto-circuito.

# 10. Seletividade

Característica de atuar os dispositivos de maneira seletiva priorizando a desenergização somente da parte do circuito afetado, criando as zonas de proteção. Há três casos a considerar:

- Relé principal (primeira linha);
- Relé de retaguarda ou de socorro;
- Relé auxiliar.





## ***Seletividade amperimétrica***

- Princípio de que as correntes de curto-circuito aumentam à medida que o ponto de defeito se aproxima da fonte de suprimento;
- Mais empregada em circuitos de BT e de distribuição em que as impedâncias são altas;
- Utilização de fusíveis;
- Corrente de ajuste do primeiro elemento a montante do defeito deve ser menor que a corrente  $I_{cc}$  do local;
- Proteção a montante da proteção principal deve ter valores superiores.

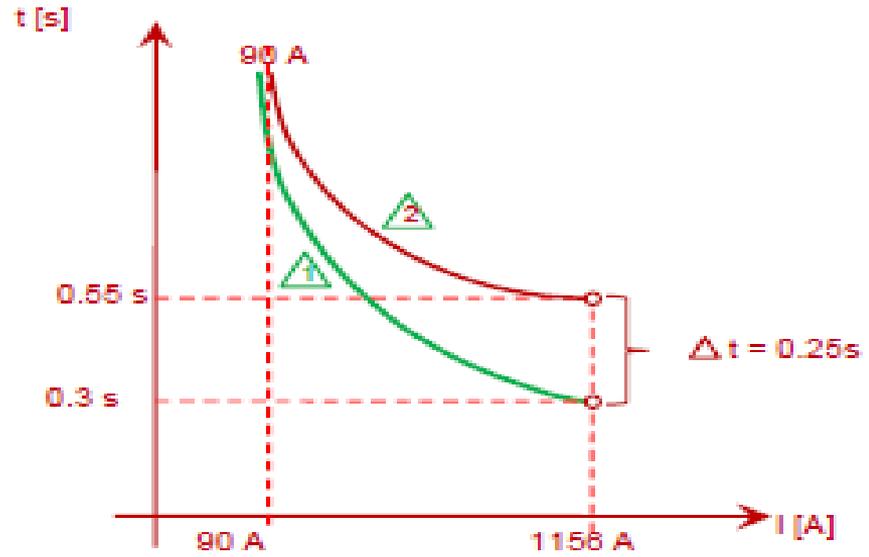
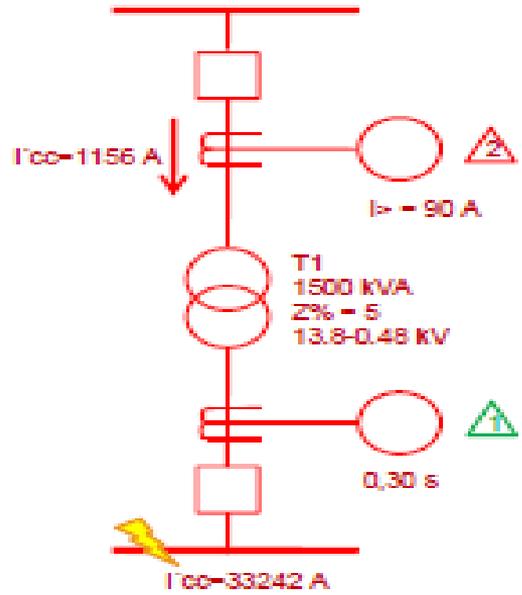
## ***Seletividade cronométrica***

- Consiste em retardar uma proteção instalada a montante para que aquela instalada a jusante tenha tempo suficiente para atuar eliminando a falta;
- A diferença entre P1 e P2 devem corresponder ao tempo de abertura do disjuntor acrescido de um tempo de incerteza, entre 200 e 400 ms;
- Desvantagem de conduzir a tempos de atuação bastante elevados – limites térmicos e dinâmicos de equipamentos;

## *Seletividade cronométrica*

- Em função do tipo de dispositivo utilizado, as seguintes combinações de proteção podem ser encontradas nos sistemas elétricos:
  - Fusível em série com fusível
  - Fusíveis em série com relés temporizados;
  - Relés temporizados em série entre si; e
  - Relés temporizados e relés instantâneos.

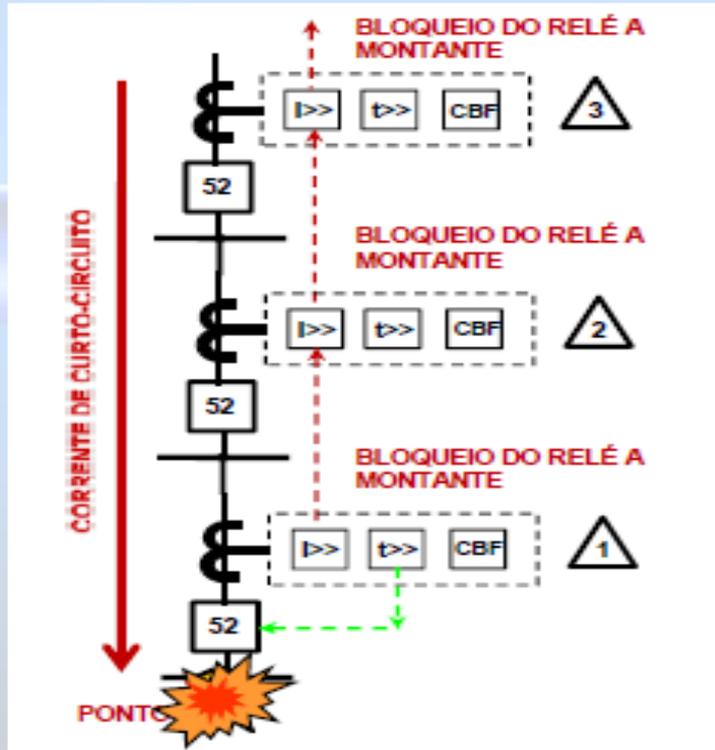
# Seletividade cronométrica



## ***Seletividade lógica***

- Conceito mais moderno;
- Combina proteção de sobrecorrente com esquema de comunicação, de forma a obter tempos extremamente reduzidos;
- Mais facilmente aplicada em sistemas radiais;
- Elimina os inconvenientes dos esquemas amperimétricos e cronométricos;

# Seletividade lógica



$$T_{A1} = T_{p1} + T_{d1}$$

$$T_{A2} = T_{p1} + T_{d1} + T_{b1}$$

# 11. Zonas de proteção

- Uma zona de proteção é estabelecida ao redor de cada elemento do sistema, com vistas à seletividade, pelo que disjuntores são colocados na conexão de cada dois elementos.



- O contorno de cada zona define uma porção do sistema de potência, tal que, para uma falha em qualquer local dentro da zona, o sistema de proteção responsável por aquela zona atua de modo a isolar tudo o que está dentro do restante do sistema.
- Como a desenergização em condições de falta é feita por disjuntores, é claro que deve ser inserido um disjuntor em cada ponto onde é feita a conexão entre o equipamento do interior da zona com o restante do sistema. *Em outras palavras, os disjuntores ajudam a definir os contornos da zona de proteção.*

- Outro aspecto importante é que as zonas vizinhas sempre se sobrepõem. Esta sobreposição é necessária, pois, sem ela, uma pequena parte do sistema entre as zonas vizinhas, por menor que fosse, ficaria sem proteção.
- Por outro lado, se ocorrer uma falha dentro da zona de superposição, uma porção muito maior do sistema de potência, correspondente a ambas as zonas envolvidas na superposição, seria isolada e colocada fora de serviço. Para minimizar esta possibilidade, a região de superposição é feita a menor possível.

