



UFPR




TE 131

Proteção de Sistemas Elétricos

Capítulo 1 – Introdução à
proteção de sistemas
elétricos

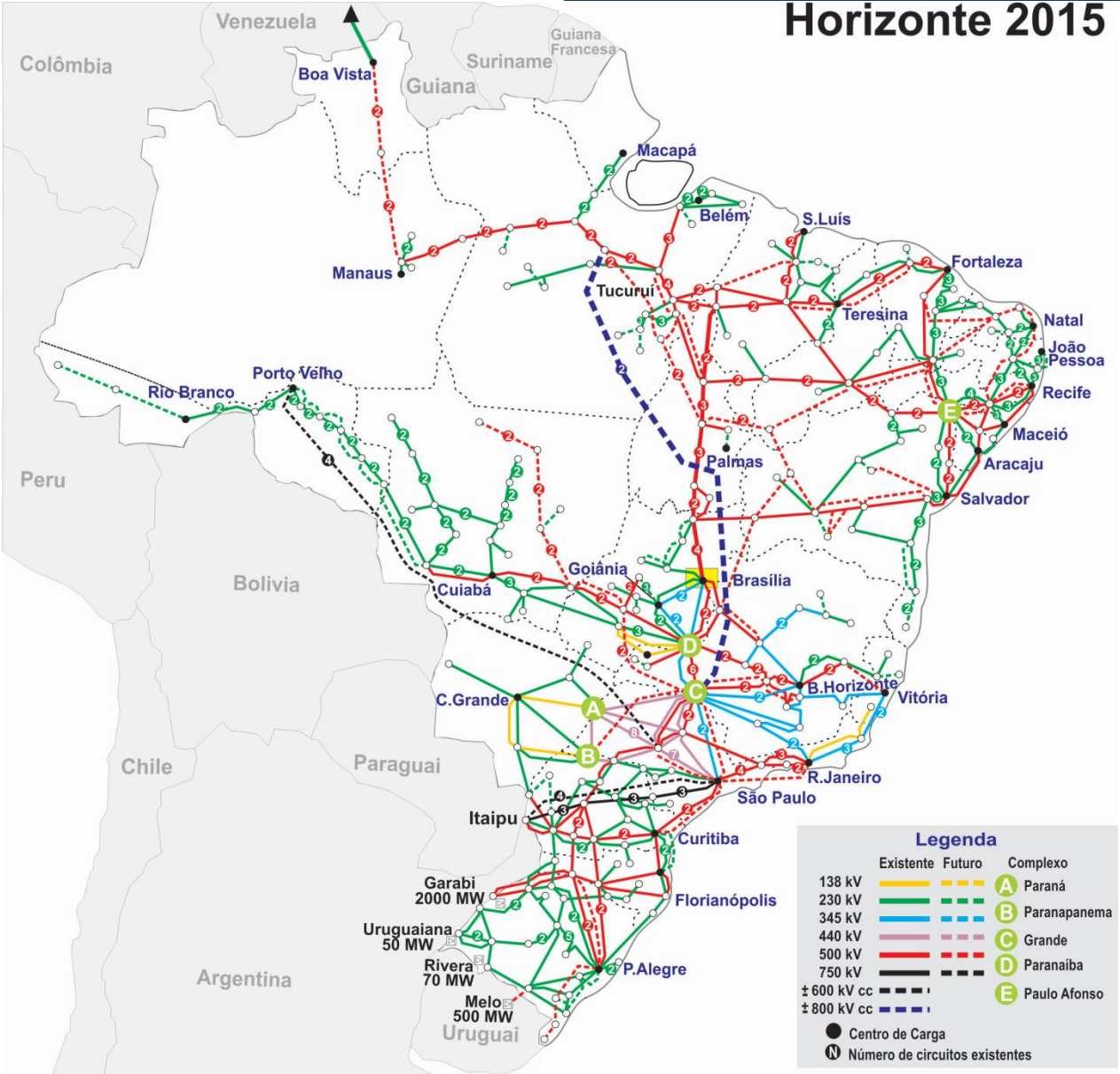
1. Sistema elétrico de potencia

- 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 ± 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, para diversas aplicações. Tal sistema deve ser projetado e operado para entregar esta energia obedecendo dois requisitos básicos: Qualidade e economia, que apesar de serem relativamente antagônicos é possível conciliá-los, utilizando conhecimentos técnicos e bom senso.

Horizonte 2015



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) [?](#)

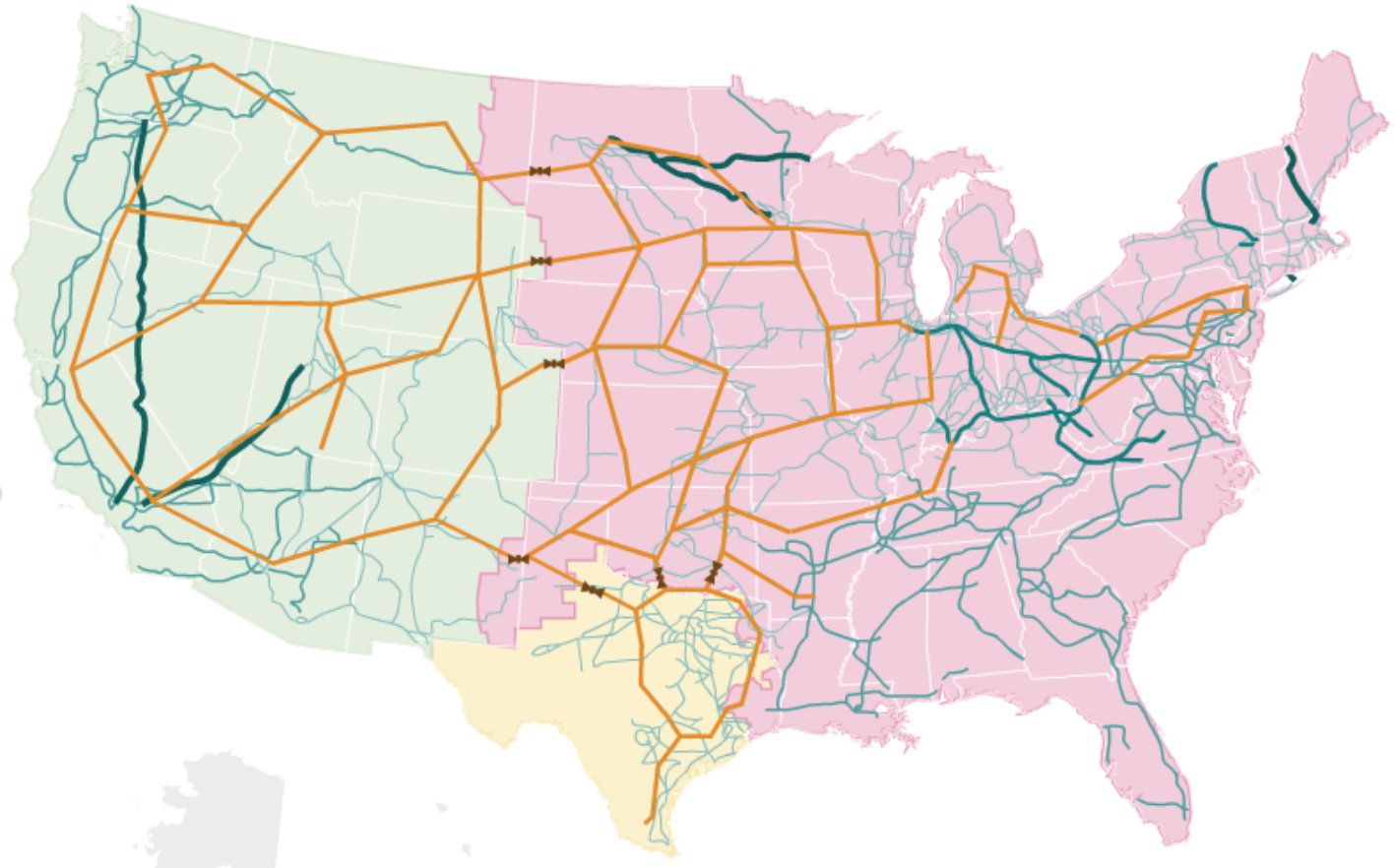
PROPOSED LINES

-  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.

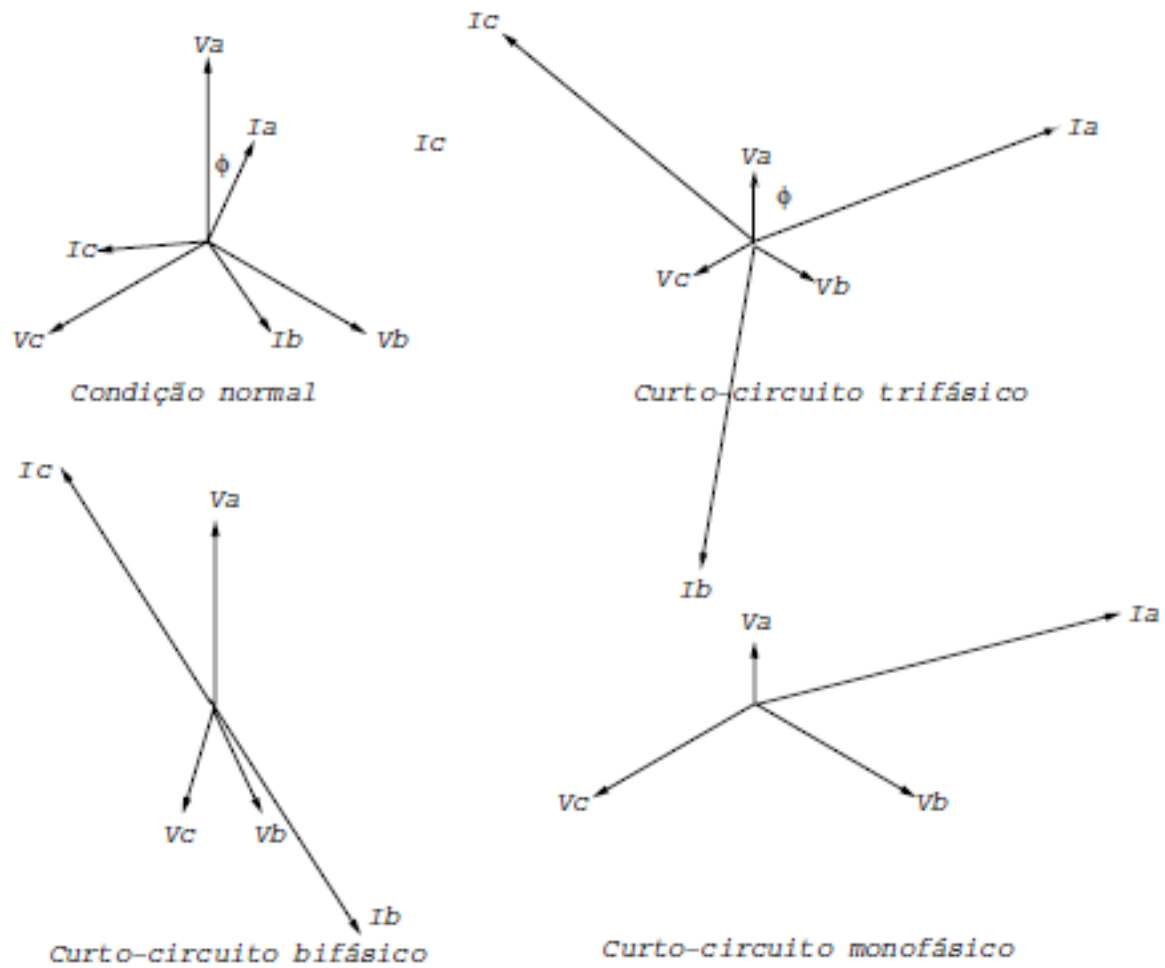


A magnitude da corrente de curto-circuito depende de vários fatores, tais como:

- 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:

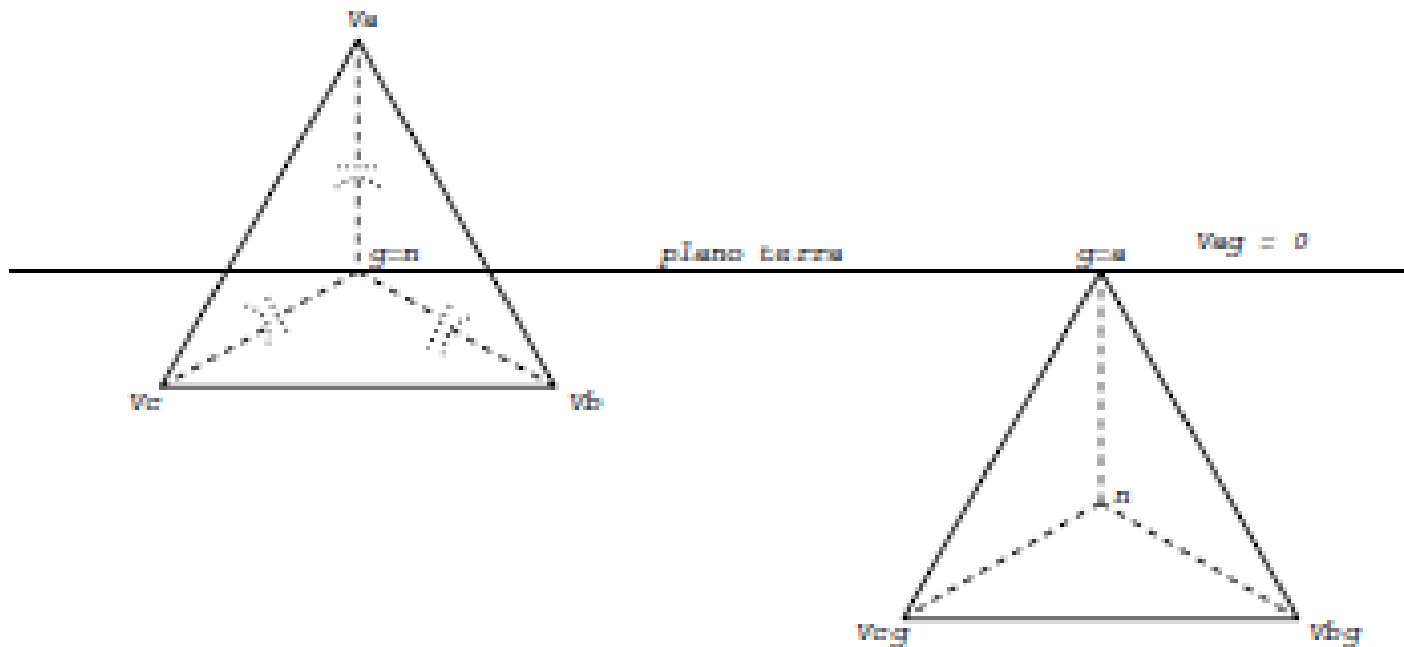
- Dimensionamento e seleção de relés de proteção;
- Determinação da capacidade de interrupção de disjuntores;
- Determinação da máxima corrente de suportabilidade de equipamentos (cabos, trafos, barras, etc);
- Coordenação da proteção;
- Calculo de esforços mecânicos e estruturais;
- Etc.

Sistemas de aterramento:

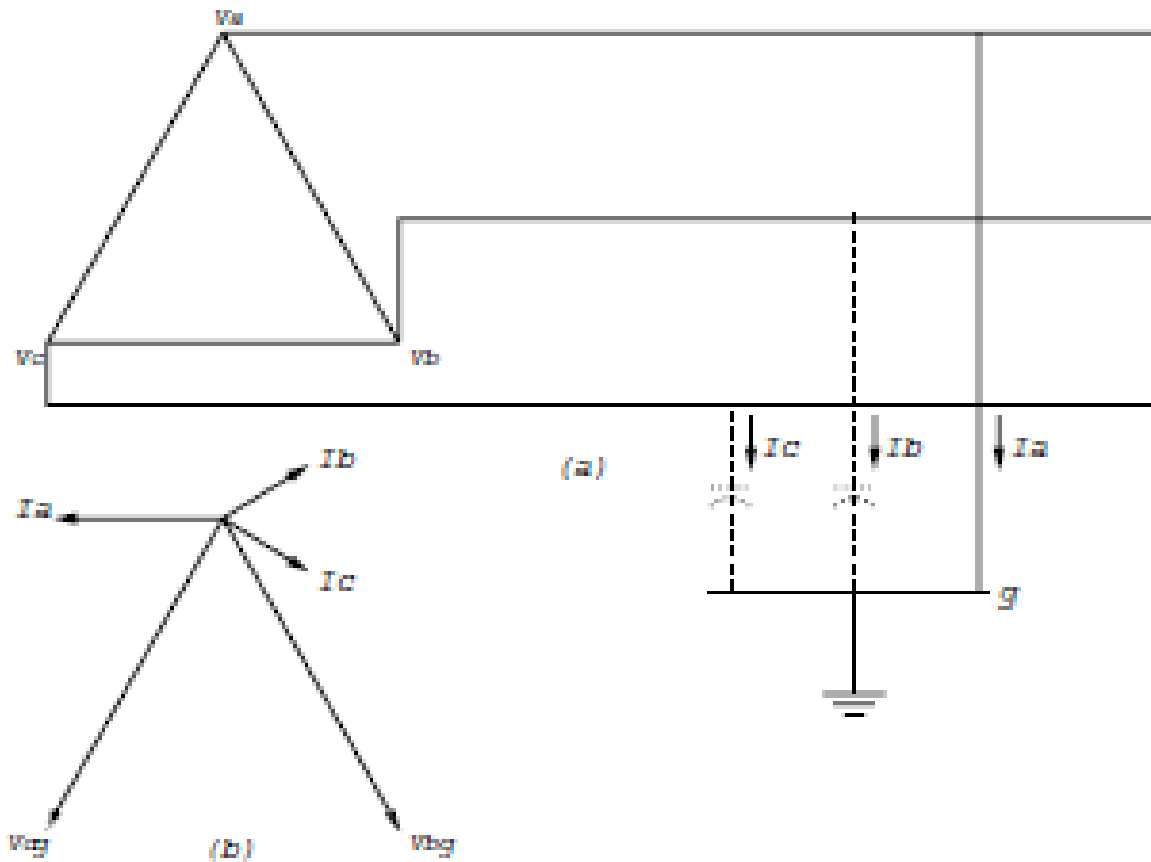
O sistema de aterramento afeta significativamente tanto a magnitude como o ângulo da corrente de curto-circuito à terra. Existem três tipos de aterramento:

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

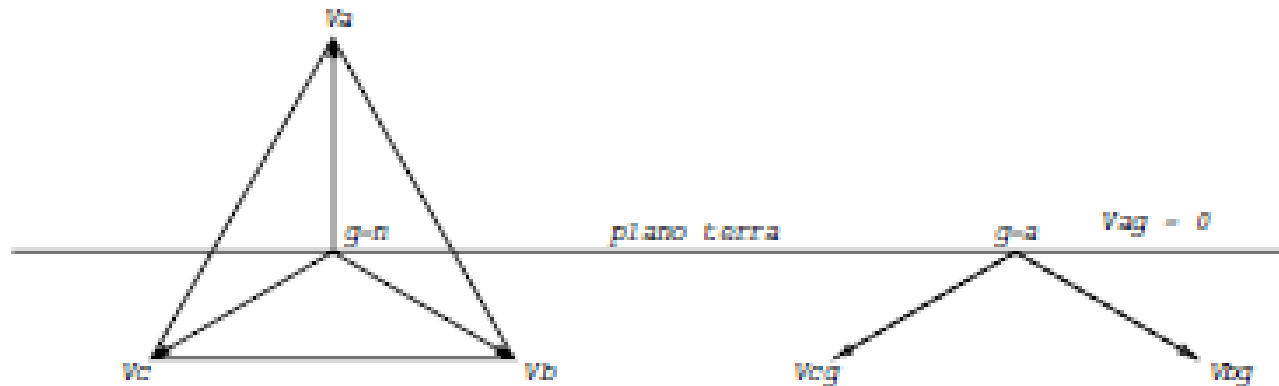
No sistema não aterrado existe um acoplamento à terra através da capacitância *shunt* natural. Num sistema simétrico, onde as três capacitâncias a terra são iguais, o neutro (n) fica no plano terra (g), e se a fase A, por exemplo, for aterrada, o triângulo se deslocará conforme mostrado na Figura .



Curto-circuito monofásico em sistema não aterrado:



Curto-circuito monofásico em sistema aterrado:



Conclui-se que as magnitudes das fases sãs 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-ráios com tensões menores.

As consequências dos curtos-circuitos

- A corrente de curto-circuito, de acordo com a lei de Joule, provoca a dissipação de potencia na parte resistiva do circuito provocando aquecimento. No ponto da falta este aquecimento e o formato do arco podem provocar uma destruição que pode ser de grande monta, dependendo de I_{cc} e de t . Portanto, para uma dada corrente de curto-circuito, o tempo t deve ser 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 particularmente sensíveis as quedas de tensão.

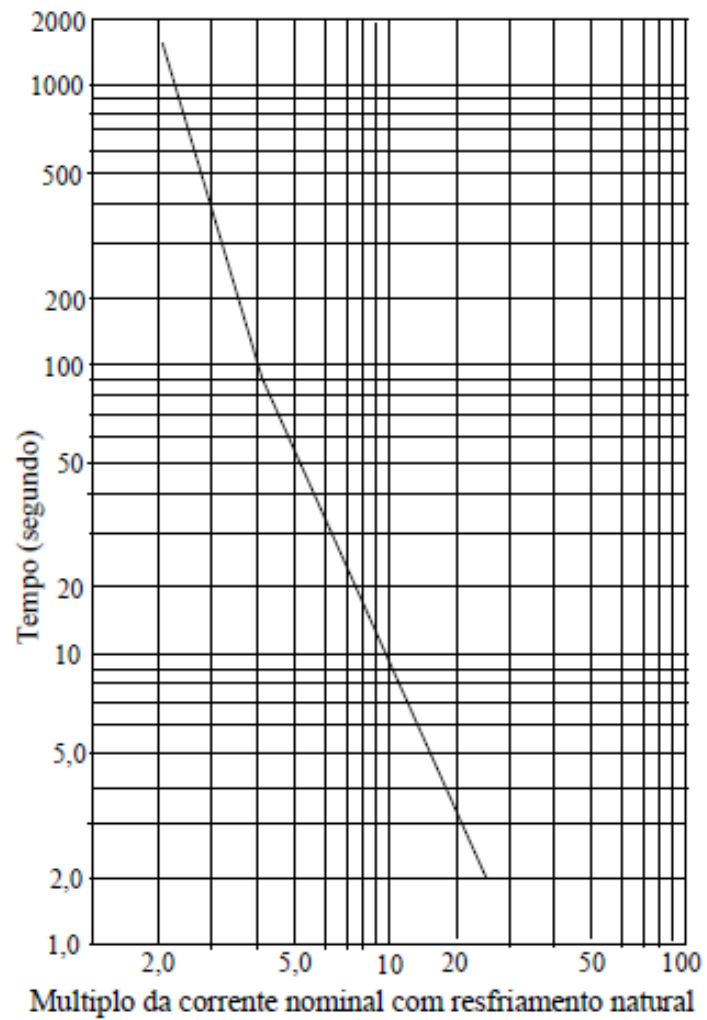
As consequências dos curtos-circuitos

- Outra grave consequência de uma queda abrupta da tensão é o distúrbio que ela provoca na estabilidade da operação paralela de geradores. Isto pode causar a desagregação do sistema e a interrupção de fornecimento para os consumidores.
- As mudanças rápidas na operação do sistema elétrico, provocadas pelo desequilíbrio entre a geração e a carga, após a retirada do circuito sob falta, podem causar sub ou sobretensões, sub ou sobrefrequências, ou ainda sobrecargas. Isto pode provocar algumas condições anormais.

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.

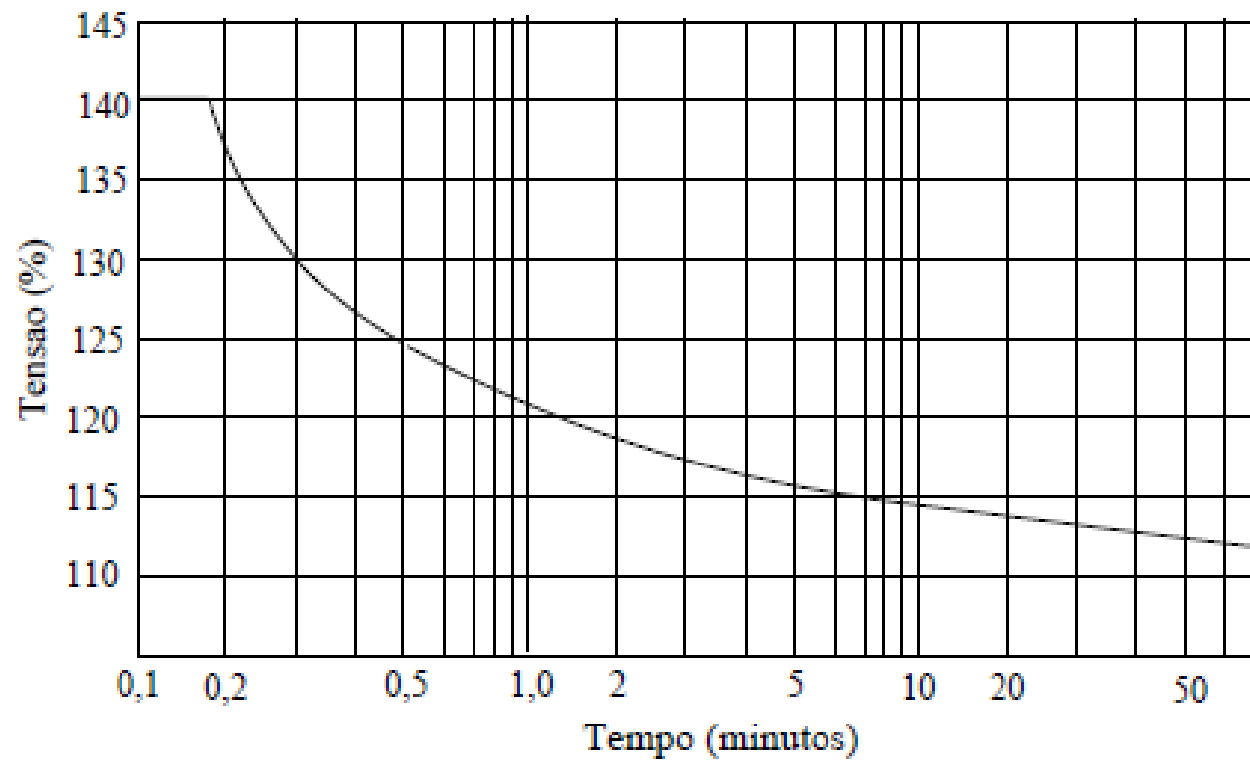
Curva de sobrecarga de um transformador



Condições anormais de operação

- Subfrequência e sobrefrequência: são causadas pelo súbito desequilíbrio significativo entre a geração e a 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 sobtensão pode surgir através do efeito capacitivo das linhas de transmissão.

Curva de sobretensão de um transformador



3. 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.

- Para atenuar os efeitos das perturbações, o sistema de proteção deve:
 - Assegurar, o melhor possível, a continuidade da alimentação;
 - Salvaguardar, vidas, material e as instalações da rede.
- Para cumprir seus objetivos:
 - deve alertar os operadores;
 - isolar (retirar de serviço) trechos defeituosos do sistema.
 - se há, por exemplo, um curto-circuito: proteger e evitar o agravamento dos danos aos equipamentos principais e/ou reflexos sobre toda a rede.

Resumindo, as **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;
- Retirar de serviço um equipamento ou parte do sistema que se apresente defeituoso – desperdício de energia;
- Melhorar a continuidade do serviço – 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)

4. 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.

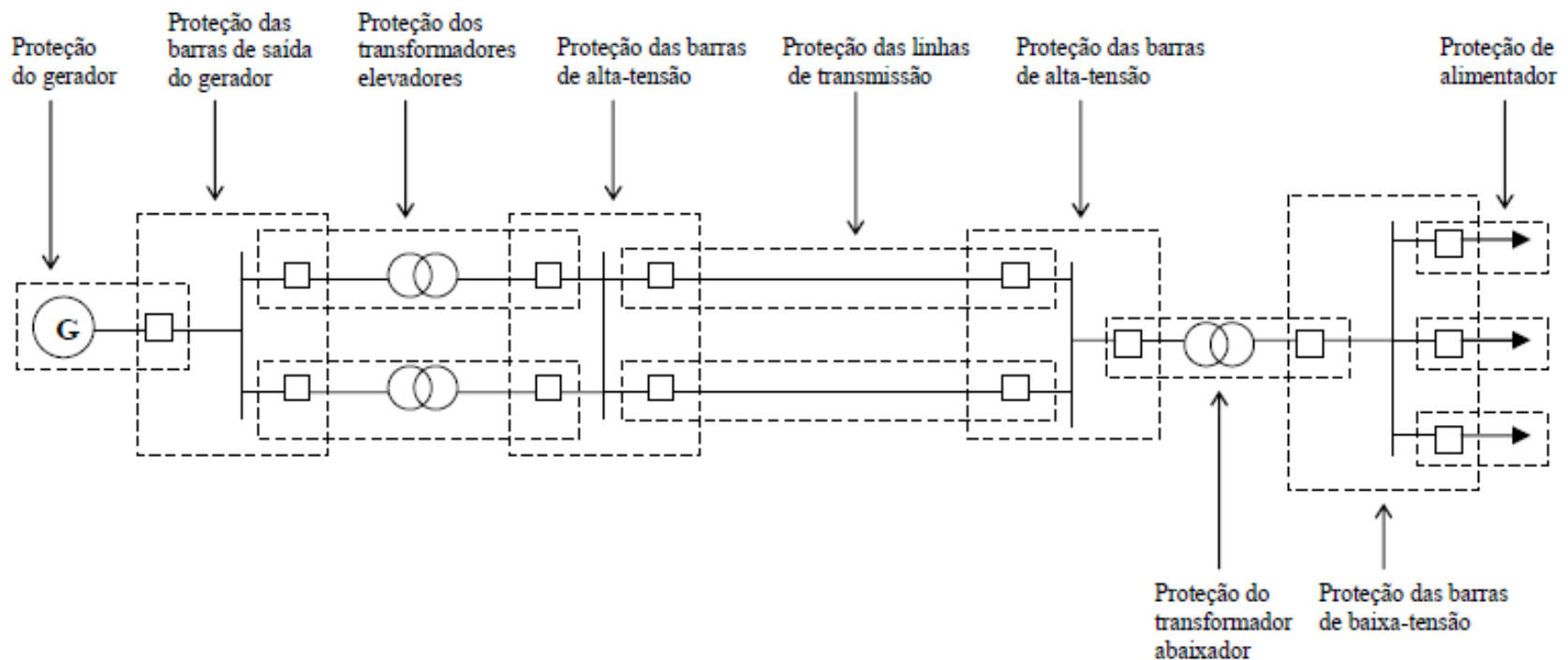
- **Confiabilidade:** probabilidade do sistema de proteção funcionar com segurança e corretamente, sob todas as circunstâncias;
- **Sensibilidade:** um sistema de proteção deve responder às anormalidades com menor margem possível de tolerância entre a operação e não operação dos seus equipamentos. Por 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

5. Níveis de atuação de um sistema de proteção





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

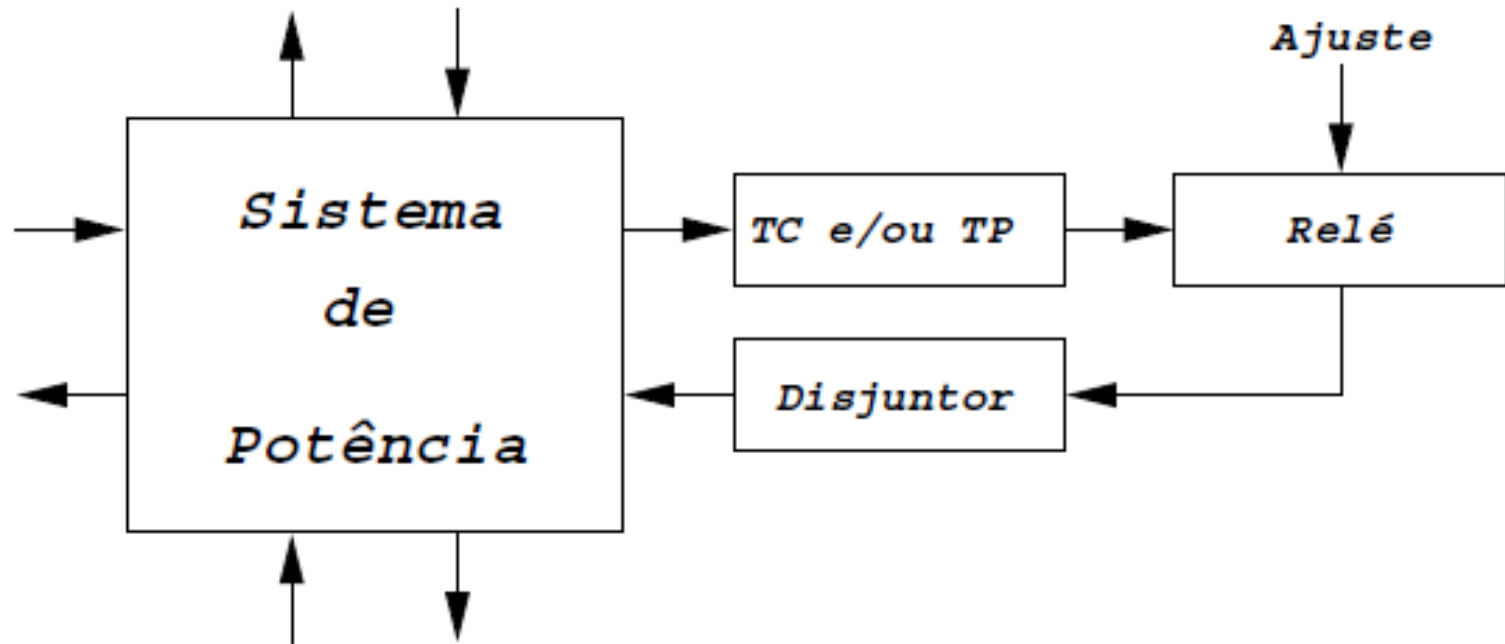
- **Proteção principal** : Em caso de falta dentro da zona protegida, é quem deverá atuar primeiro.
- **Proteção de retaguarda** : é aquela que só deverá atuar quando ocorrer falha da proteção principal.

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

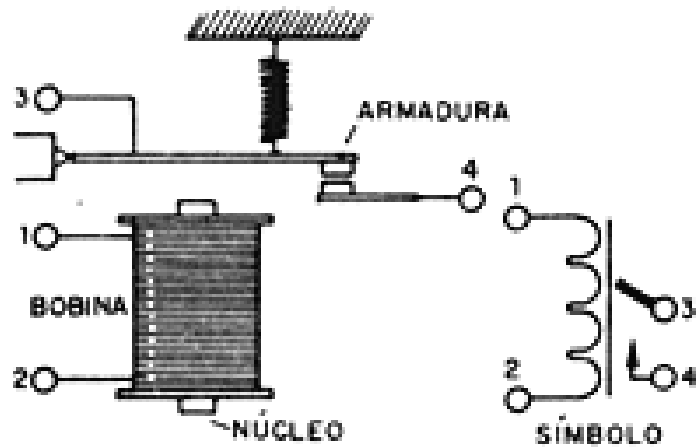


6. Principais Elementos

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

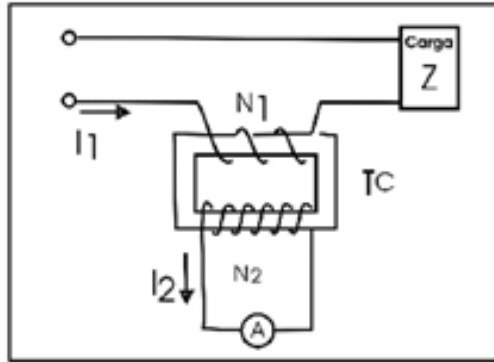


1 E 2 = TERMINAIS DA BOBINA
3 E 4 = TERMINAIS DOS CONTATOS

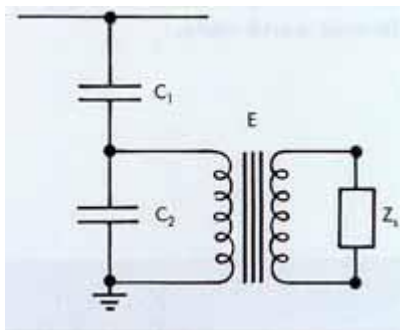
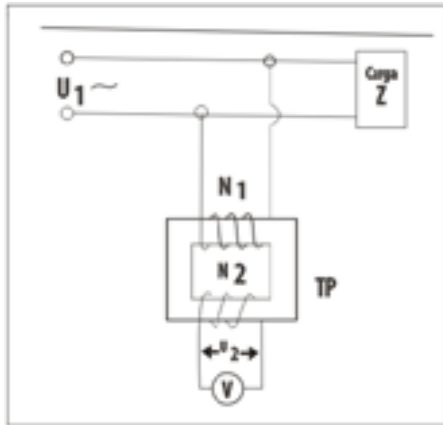
FIGURA 1



● Transformadores de corrente



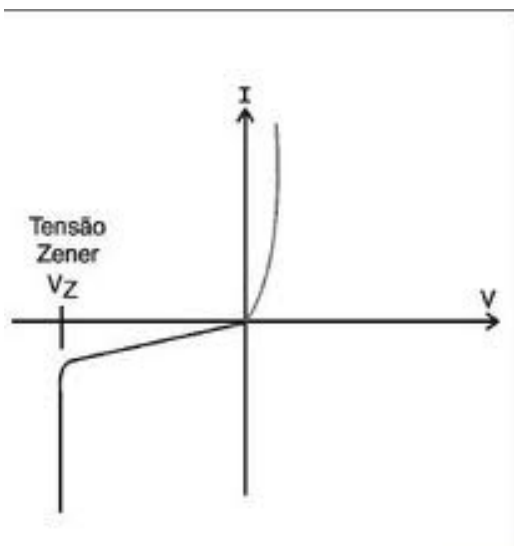
Transformadores de potencial



Disjuntores e chaves



● Outros



Relé Óptico



● Subestação



7. Análise generalizada da proteção

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

- Pelos relés ou releamento (*a que iremos enfatizar nesse estudo*) e por 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 (cabramento e carga dos transdutores), etc.

8. Tipos de Relés

- **Relé primário:** Pode ser conectado diretamente ao circuito que protegem e não necessitam de fonte auxiliar. Podem requerer certo tipo de manutenção como os relés fluidodinâmicos.
- **Relé secundário:** amplamente empregados nas instalações de médio e grande porte. Custos sensivelmente mais elevados, necessitam de transformadores redutores e alimentação auxiliar CC ou CA.

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.

Proteção contra descargas atmosféricas diretas



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 próximas 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 $V < 0,8V_n$ por período de aproximadamente 2s.

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 ± 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 ferro de geradores e transformadores;
- Elevação das correntes parasitas e temperatura;
- Normalmente indicada para sistemas ilhados e de baixo nível de curto-circuito.

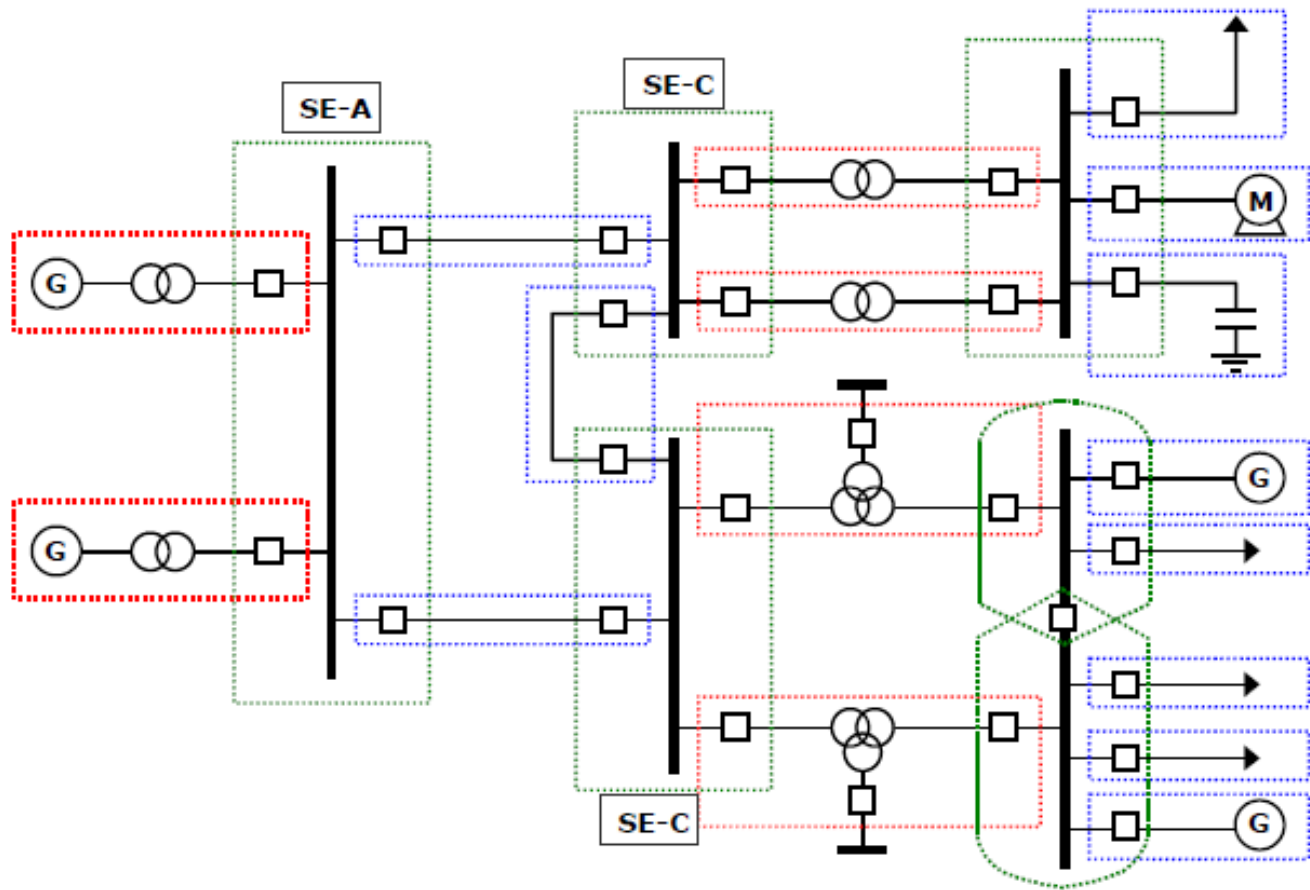
10. Seletividade

Característica de atuar os dispositivos de maneira a desenergizar somente parte do circuito afetado criando as zonas de proteção. Há três casos a considerar:

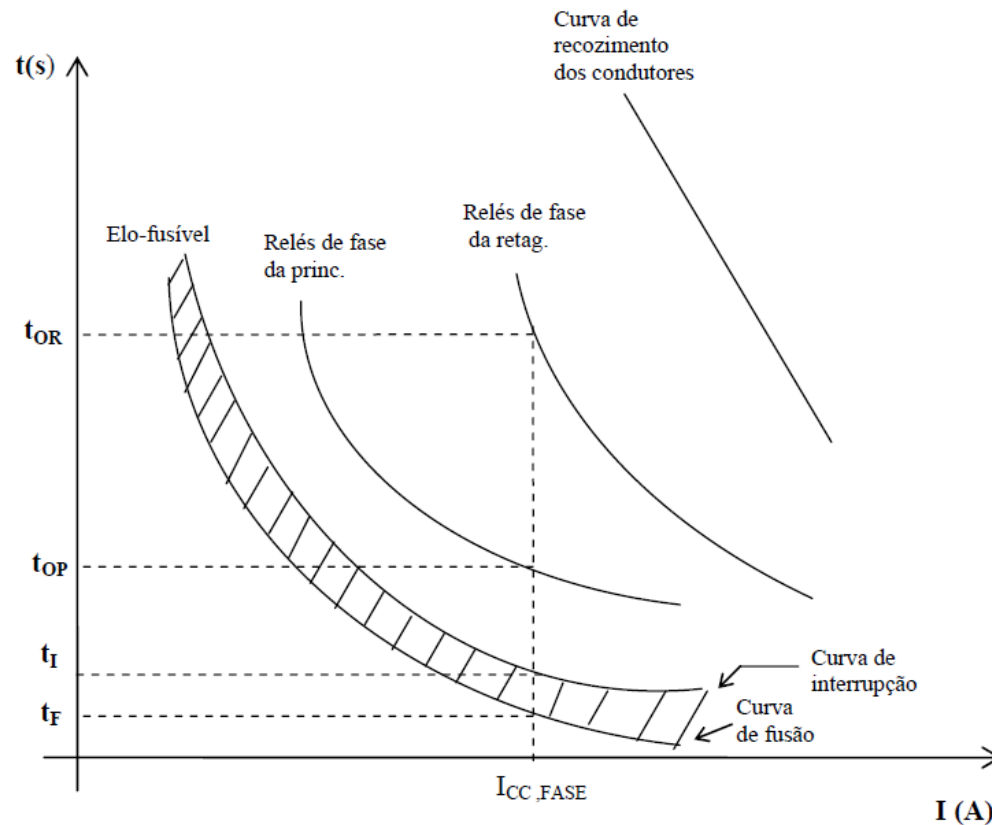
- Relé de primeira linha;
- Relé de retaguarda ou de socorro;
- Relé auxiliar.

- **Relé de primeira linha:** é aquele em que uma zona de proteção separada é estabelecida ao redor de cada elemento do sistema, com vistas à seletividade. É o sistema principal de remoção de faltas, com o máximo possível de rapidez, porém, desenergizando a menor parcela possível do sistema.

- **Relé de retaguarda ou de socorro:** atua na manutenção do relé principal ou falha deste. Por motivos econômicos só é usado para determinados elementos do circuito e somente contra curto-circuito. Deve ser usado devido a possibilidade de ocorrer falhas na corrente ou tensão fornecidas ao relé principal, erros na fonte de corrente de acionamento do disjuntor, no circuito ou no mecanismo de disparo do disjuntor, falha de relés, etc. Mesmo com a presença deste relé é importante que haja manutenção da proteção como um todo.



- **Relé auxiliar:** tem funções de multiplicador de contatos, sinalização, temporização, etc.



Seletividade amperimétrica

- Principio 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 , geralmente

$$I_{P1} \leq 0,8I_{cc}.$$

- Proteção a montante de P1 deve ter valores superiores a I_{cc}

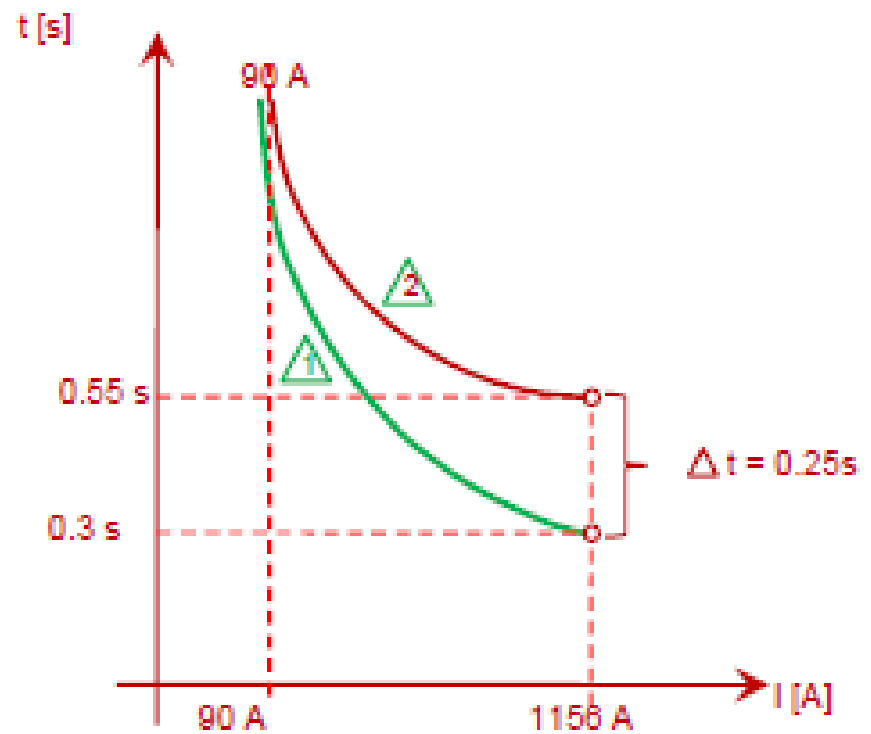
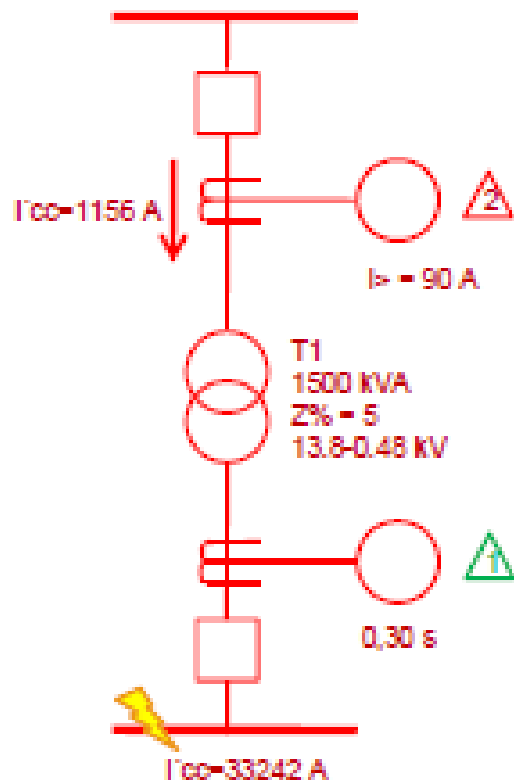
Seletividade cronométrica

- 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.

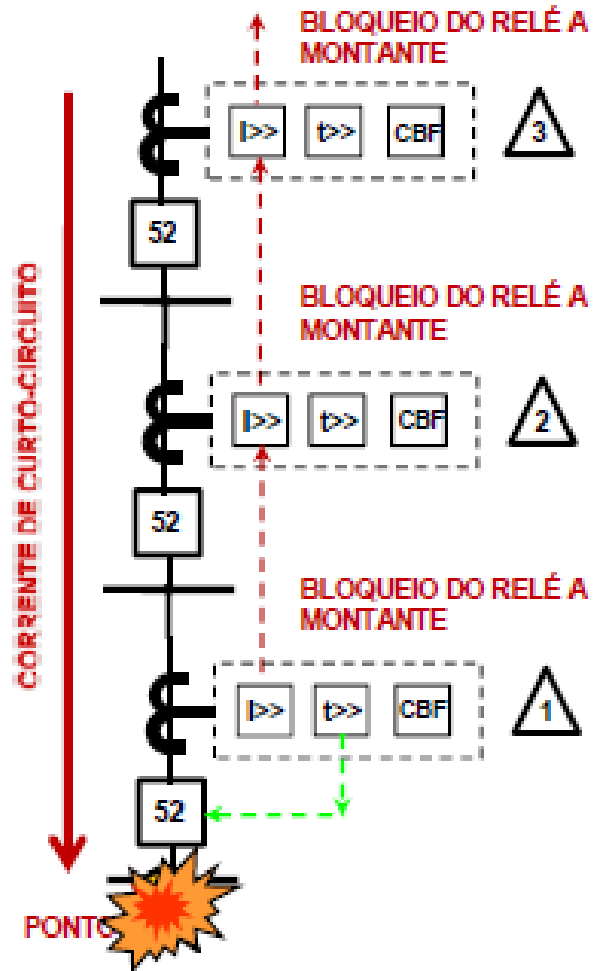
Seletividade cronométrica



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;
- Tempo de atuação da proteção entre 50 a 100 ms
- Tempos de atuação do disjuntor entre 50 e 100 ms;
- Tempo de bloqueio entre 100 e 200 ms.

Seletividade l3gica

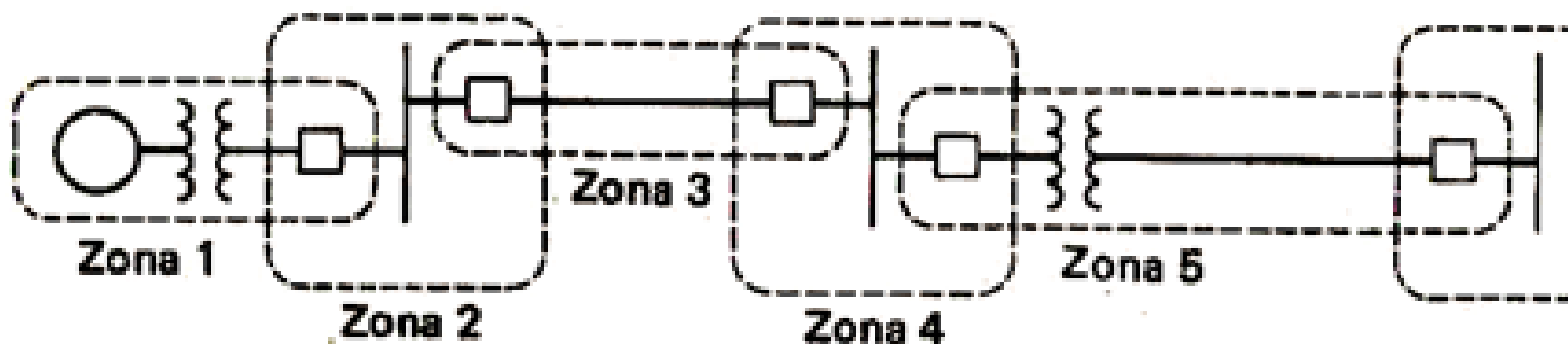


$$T_{A1} = T_{p1} + T_{d1}$$

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

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.

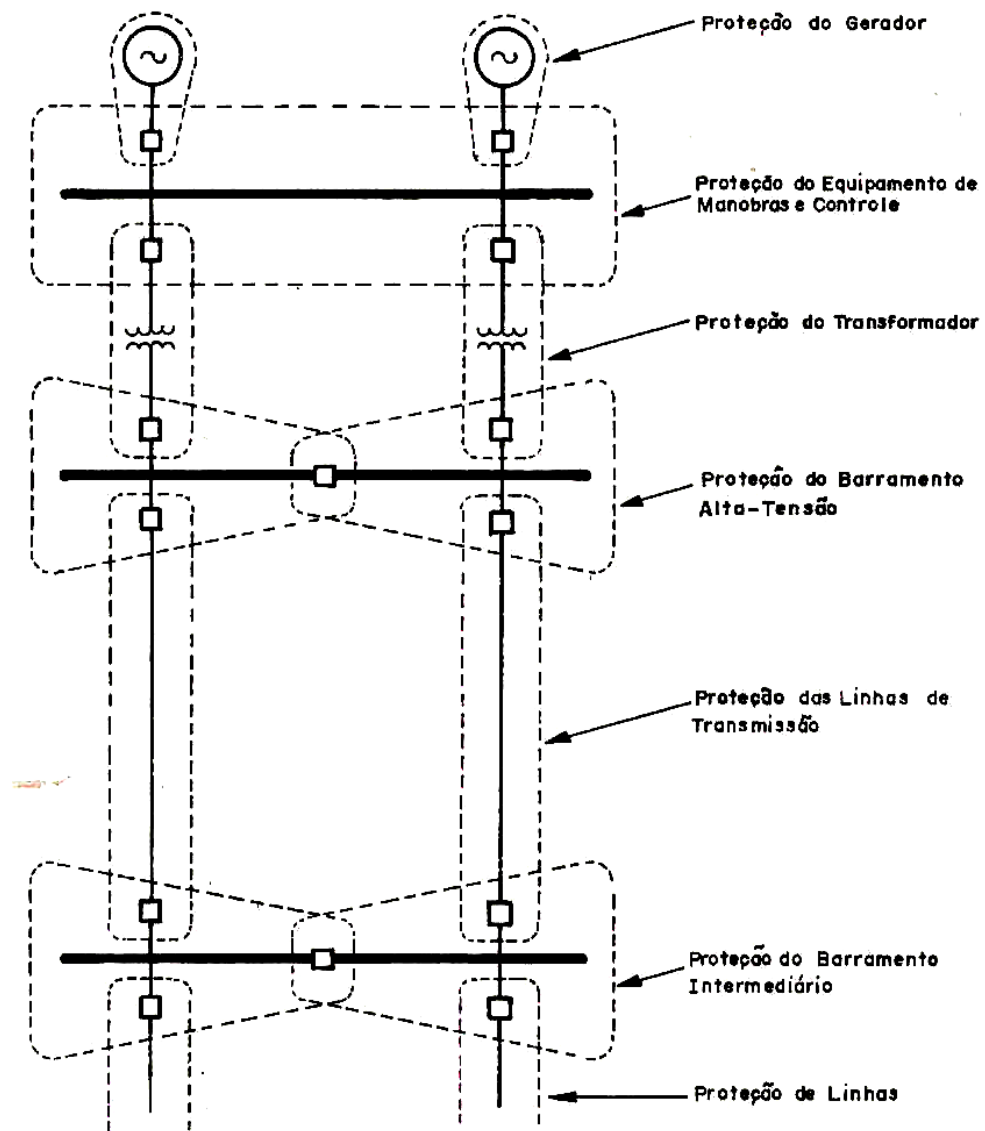


FIGURA 1.2 Zonamento da proteção