



UFPR



TE 131

Proteção de Sistemas Elétricos

Capítulo 4 – Proteção de
transformadores de
Potencia



1. Introdução

- O transformador de potência é um dos equipamentos mais caros numa subestação de um sistema elétrico;
- A sua importância vital exige que ele tenha uma alta confiabilidade para evitar interrupções de energia elétrica;
- O custo básico de um transformador de potência pode ser estimado por uma fórmula empírica que se segue:

$$C = 19.800S^{0,75} + 1,55NBI^{1,75}$$

Onde:

C = custo em dólares;

S = potência nominal em MVA;

NBI = nível básico de isolamento em kV.

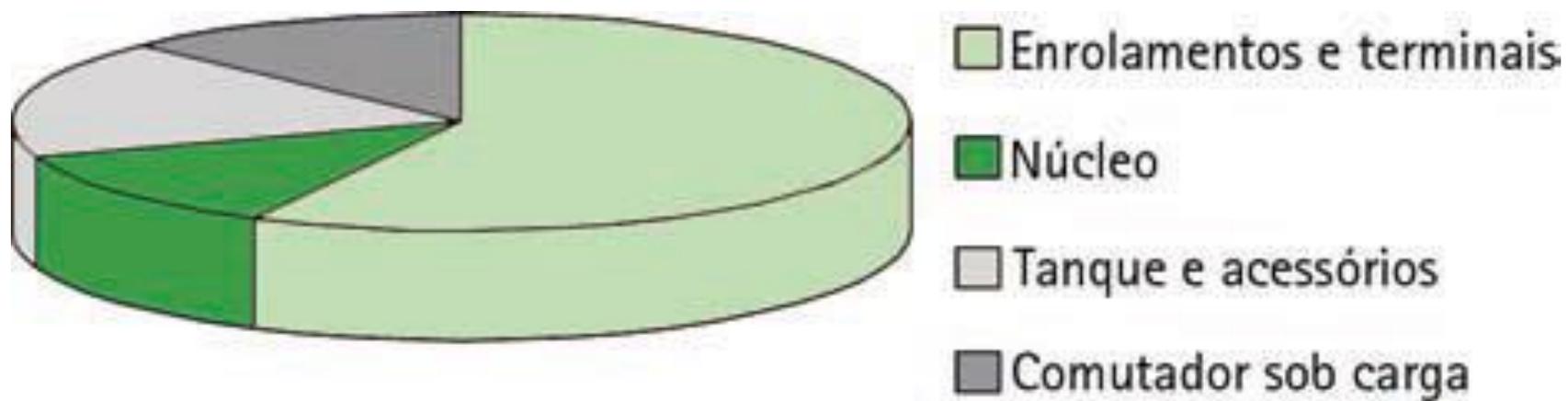
- Um projeto adequado e materiais de alta qualidade utilizados na sua fabricação, aliado a um sistema de proteção com relés adequados são condições básicas para a operação de um transformador.

- 
- A falta de manutenção e a operação fora de suas especificações contribuem para ocorrências de falhas;
 - Se o transformador operar sob condições de sobrecarga ou sobtensão por um período prolongado, ou exposto a um número excessivo de altas correntes em decorrência de curtos-circuitos externos, a isolação vai se deteriorando a tal ponto de favorecer a ocorrência de curtos-circuitos.

2. Falhas em transformadores

- Geralmente as falhas em transformadores são classificadas em seis categorias:
 - Falhas de enrolamento e nos terminais;
 - Falhas no núcleo;
 - Falhas no tanque e nos acessórios do transformador;
 - Falhas no comutador de taps sob carga;
 - Condições operacionais anormais;
 - Falhas externas sustentadas ou não eliminadas.

Estatísticas de faltas em transformadores.



2.1 – Condições que levam um transformador a sofrer danos

A. Queda da isolação

A queda de isolação fatalmente resulta num curto-circuito, causando graves danos nos enrolamentos e no núcleo. A queda de isolação pode ser provocada por:

- Sobre-temperatura;
- Contaminação do óleo;
- Descarga corona na isolação;
- Sobretensões transitórias;
- Força eletromagnética causada por altas correntes.

B. Deterioração da isolação

- A deterioração da isolação é uma função do tempo e da temperatura. O transformador pode estar sendo submetido a operar sob as mais variadas condições, portanto, é muito difícil a previsão de sua vida útil;
- No caso de um transformador submetido a uma excessiva temperatura melhorar a ventilação ou diminuir a carga são providências que evitam o envelhecimento precoce da isolação.

C. Sobreaquecimento devido a sobre-excitação

- De acordo com as normas, os transformadores deverão ser capazes de entregar correntes nominais a uma tensão aplicada de até 105 % da tensão nominal.
- Quando um transformador é submetido para operar com tensão acima da nominal ou frequências muito baixas, o seu núcleo trabalha sobre-excitado.
- A sobre-excitação não é um defeito do transformador, mas uma condição operativa anormal do sistema elétrico de potência.
- A sobre-excitação provoca um aumento dramático da corrente de excitação. Para uma sobretensão de 20 % a corrente de excitação aumenta cerca de 10 vezes a corrente de excitação normal.

D. Óleo contaminado

- O óleo num transformador constitui um meio de isolamento elétrico e também um meio de resfriamento, portanto, a sua qualidade é primordial;
- A rigidez dielétrica é a propriedade mais importante do óleo e se ela for reduzida pelas impurezas, umidade, etc., a deterioração da isolamento ocorrerá fatalmente;
- O nível do óleo também deve ser monitorado constantemente, pois, a sua queda causa também a redução da isolamento.

E. Redução da ventilação

- O sistema de ventilação forçada deve estar funcionando perfeitamente. Caso ocorra alguma falha neste sistema, deve-se tomar providencias imediatas para evitar o sobreaquecimento.

3. Esquemas de proteção de transformadores de potência

- Os dispositivos de proteção são aplicados em componentes de um sistema de potência para:
 - isolar o equipamento sob falta do restante do sistema para minimizar a interrupção da energia elétrica;
 - limitar danos no equipamento sob falta.
- Curtos-circuitos internos em transformadores quase sempre provocam correntes de baixa intensidade, o que torna imprescindível a aplicação de reles de alta sensibilidade.

Detecção elétrica das faltas

Proteção por fusíveis

- Fusíveis são bastante utilizados para proteção de transformadores, apesar de apresentarem certas limitações;
- Fusíveis são dispositivos adequados para proteção contra curtos-circuitos externos (correntes passantes), mas não são adequados para curtos-circuitos internos ou sobrecargas demoradas.
- Não existe uma regra rígida, mas em geral adota-se o fusível para transformadores de potência abaixo de 10,0 MVA.



- As curvas características *tempo x corrente* devem ser corrigidas para temperatura ambiente e corrente de carga segundo condições de operação e pelo uso de fatores de correção apropriados, fornecidos pelo fabricante.
- Um critério de aplicação do fusível seria não utilizá-lo para cargas maiores do que 65 % da corrente mínima de fusão. Este limite reduz a temperatura de operação do fusível, permitindo uma sobrecarga de curta duração nos transformadores (casos emergenciais) e estabelecer alguma base para fatores de correção para corrente de carga pré-falta.
- A corrente máxima de carga não deve exceder a corrente nominal do conjunto chave/elo fusível.

Proteção de sobrecorrente

- Relés de sobrecorrente (ou fusíveis) podem ser usados para a proteção dos transformadores de pequena capacidade, inclusive para faltas internas;
- Já nos transformadores maiores podem atuar como proteção de retaguarda para relés diferenciais ou relés de pressão;
- É bastante comum utilizar também relés térmicos como proteção de sobrecarga do transformador.

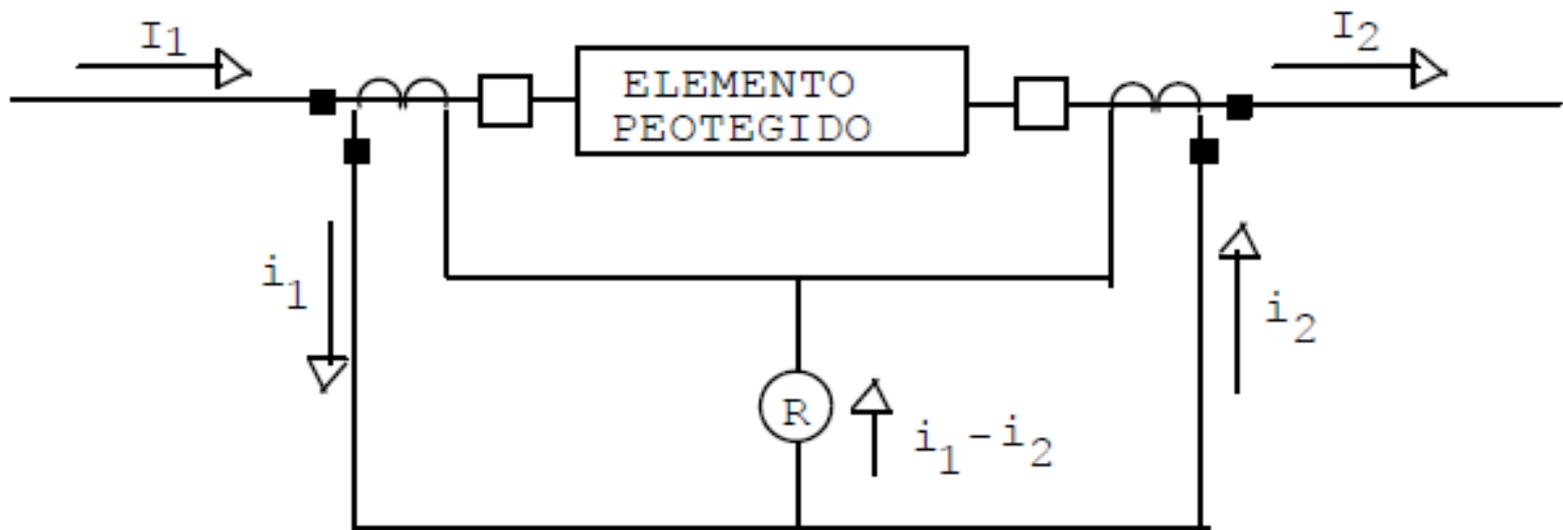
- Relés de sobrecorrente podem proporcionar um esquema de proteção relativamente barato, simples e confiável, entretanto, desde que este tipo de relé não permite ajustes sensíveis e operação rápida não se recomenda utiliza-los como proteção principal em instalações importantes;
- Os ajustes nos relés de sobrecorrente em transformadores envolvem um compromisso entre os requisitos de operação e proteção. O ajuste de *pick-up* de relés de sobrecorrente deve ser suficientemente alto para permitir sobrecargas da ordem de 200 % a 300 % da corrente nominal por algum período de tempo.

- O *trip* instantâneo, se usado, deve ter o seu ajuste de operação para um valor maior do que o máximo valor da corrente de curto-circuito passante (curto-circuito trifásico no lado de baixa do transformador).

Proteção Diferencial

- A proteção diferencial é baseada na primeira lei de Kirchhoff aplicada a proteção de equipamentos e dispositivos do sistema elétrico.
- A proteção diferencial faz a comparação entre a corrente que entra e a que sai de um equipamento e se esta diferença for superior ao ajuste da proteção, o equipamento, dispositivo ou circuito é considerado estar sob falta e medidas serão adotadas por esta proteção.

- Veja o esquema simplificado deste principio na figura:



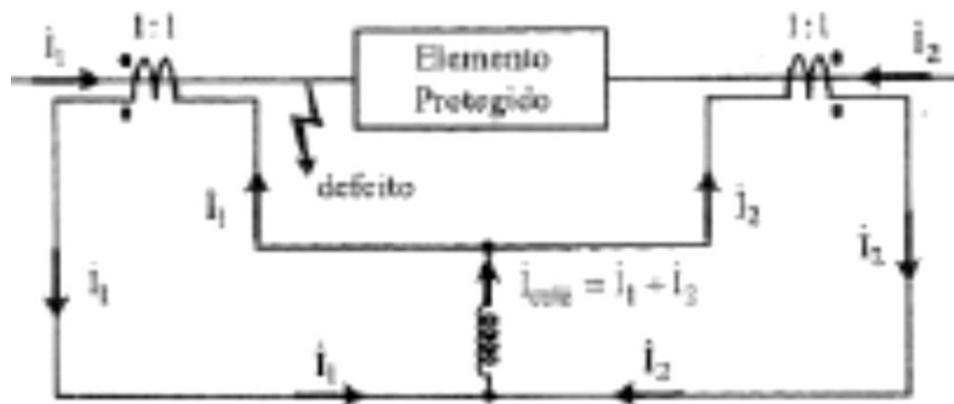
- Pelo esquema da figura, vemos que a proteção diferencial tem uma zona de proteção delimitada pelos TC. Este elemento protegido pode ser um gerador, transformador, motor ou uma linha de transmissão;
- Esta proteção pode ser empregada em sistemas configurados em radial ou anel;
- Se a diferença de corrente entre I_1 e I_2 ultrapassar o seu valor de ajuste, o relé 87 manda abrir os disjuntores, geralmente nos dois extremos do equipamento. Ou seja:

- O dispositivo de proteção vai atuar do seguinte modo:
 - Se $I_{\text{entrada}} = I_{\text{saída}}$, a corrente $I_{\text{relé}} = 0$, e o relé não atua, isto é, o elemento protegido não apresenta defeito;
 - Se $I_{\text{entrada}} - I_{\text{saída}} \leq I_{\text{ajuste}}$, a proteção não atua porque a diferença de corrente é menor que a corrente de ajuste do relé;
 - Se $I_{\text{entrada}} - I_{\text{saída}} > I_{\text{ajuste}}$, a proteção atua porque a diferença de corrente é maior que a corrente de ajuste do relé. Neste caso há um defeito no elemento protegido.

- A proteção diferencial só deve operar para faltas internas a sua zona de proteção (área delimitada pelos TC), qualquer corrente fora desta área não deve causar sua;
- Basicamente qualquer relé pode desempenhar a função 87;
- Se o elemento protegido for um transformador ou qualquer equipamento que tenha níveis de tensão diferentes entre as zonas de proteção, as correntes I_1 e I_2 serão determinadas pela relação de transformação do elemento protegido e cujas diferenças deveram ser compensadas pelas relações de transformação dos TC.

Relé diferencial de sobrecorrente

- É simplesmente um relé de sobrecorrente 50 ou 51 ligado na configuração diferencial.
- Para um curto fora da zona protegida, não importando se o sistema esta em anel ou radial haverá a mesma corrente nos dois lados da zona de proteção e o rele não opera.
- Se o curto for interno a zona protegida, para um sistema em anel, haverá a inversão da corrente I_2 alimentando o curto. Sendo em um sistema radial, a corrente I_2 tenderá a zero;
- Seja como for haverá uma corrente diferencial que provocará a atuação do relé 87.



DEFEITO INTERNO A ZONA PROTEGIDA

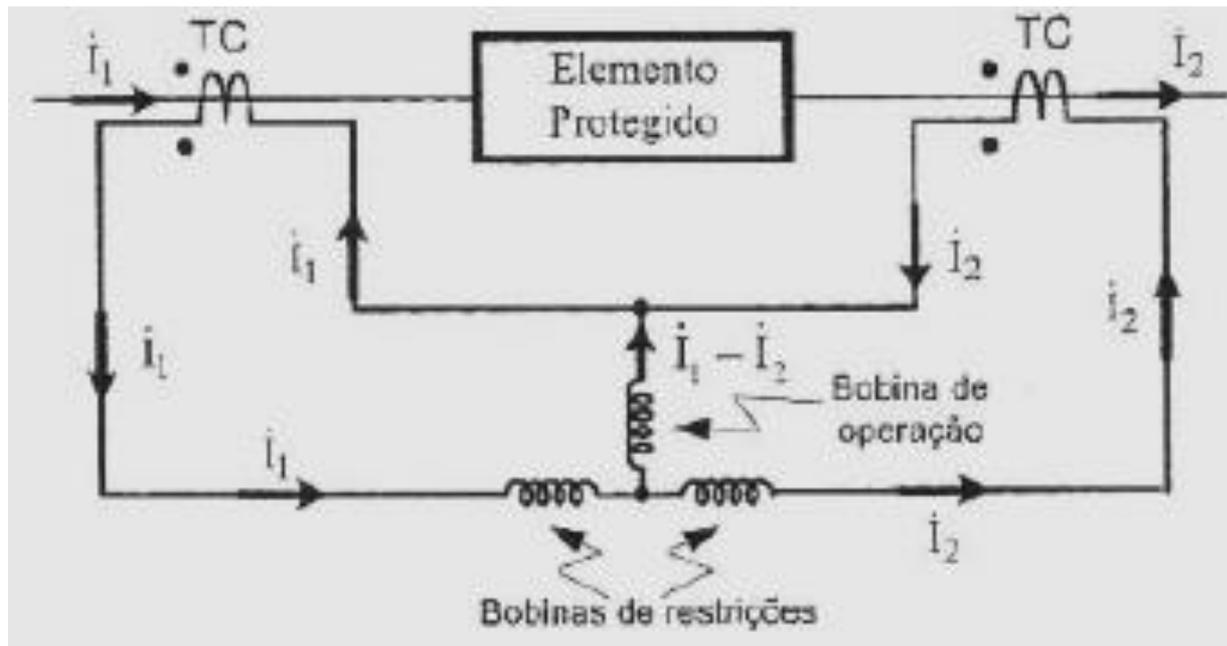


DEFEITO EXTERNO A ZONA PROTEGIDA

- Este tipo de ligação utilizando relé de sobrecorrente na configuração diferencial apresenta problemas quando da ocorrência de elevado curto-circuito fora da zona seletiva, porem muito próximo dos TC. Isto se deve a vários fatores, tais como:
 - Não ser perfeito o casamento entre os TC;
 - Saturação dos TC;
 - Carregamento dos TC;
 - A existência de corrente residual inerente aos equipamentos;
 - Correntes de *inrush*;
 - Correntes harmônicas.

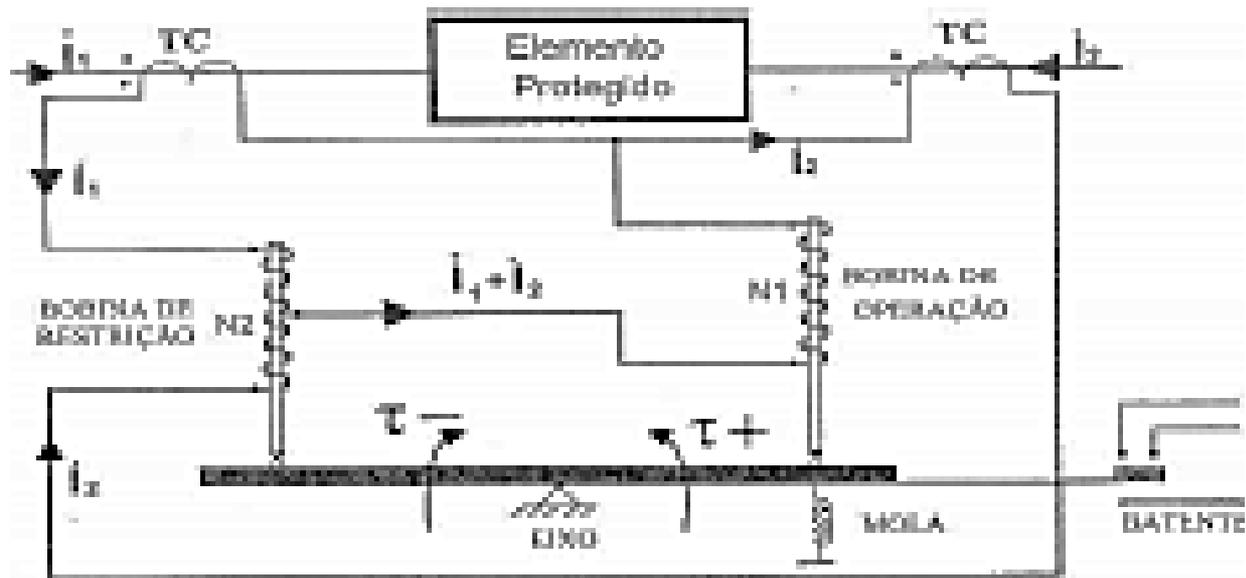
Relé diferencial percentual

- Na figura abaixo temos uma estrutura em balanço para estudarmos o princípio de atuação do relé diferencial percentual.

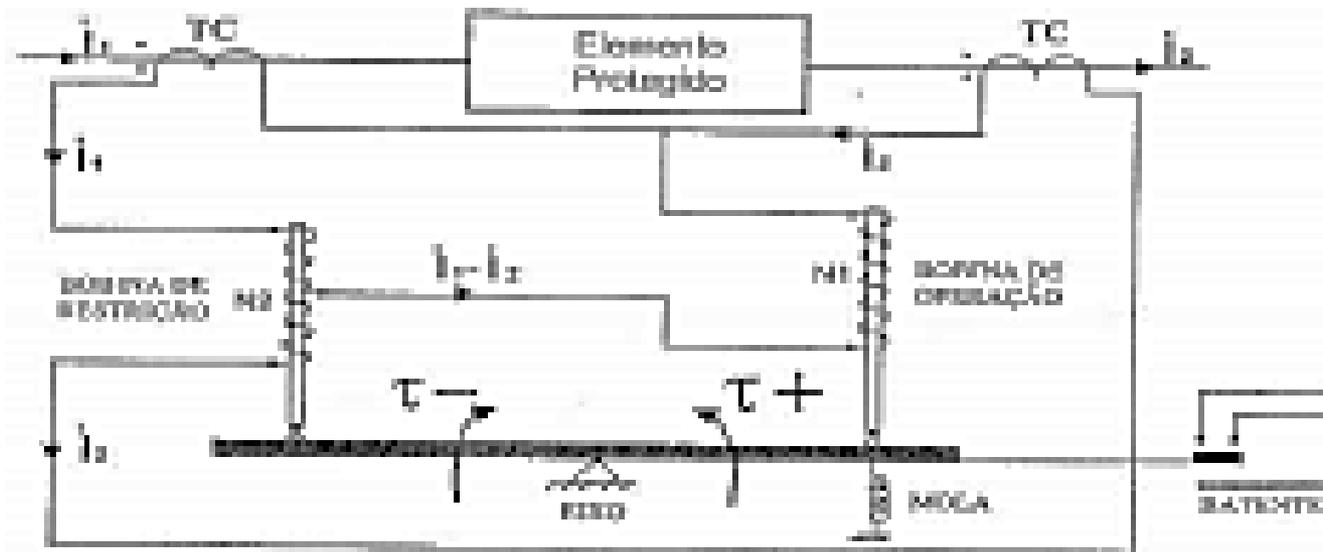


- O esquema de proteção diferencial percentual apresentado pela figura anterior baseia-se na interação de duas bobinas, que são:
 - Bobina de restrição, que tem uma derivação central. O campo magnético produzido nesta bobina de restrição atua atraindo um embolo, produzindo um torque negativo, isto é, contrário ao torque de operação;
 - Bobina de operação, cujo campo magnético atrai um embolo que produz o torque positivo.

- Com corrente normal ou uma falta fora da zona de proteção, as correntes passantes em cada metade da bobina de restrição geram campos que se somam, produzindo um forte torque negativo. Já na bobina de operação o torque será reduzido, pois se tem $I_1 - I_2$ atuando na bobina de operação, causando o baixo torque de operação;
- Com a situação de falha interna, temos a inversão da corrente I_2 . Isto causa campos discordantes na bobina de restrição e um baixo torque de restrição (negativo). Já na bobina de operação teremos elevado campo magnético, produzindo um forte torque de operação (positivo) levando o relé a atuar, fechando os contatos.



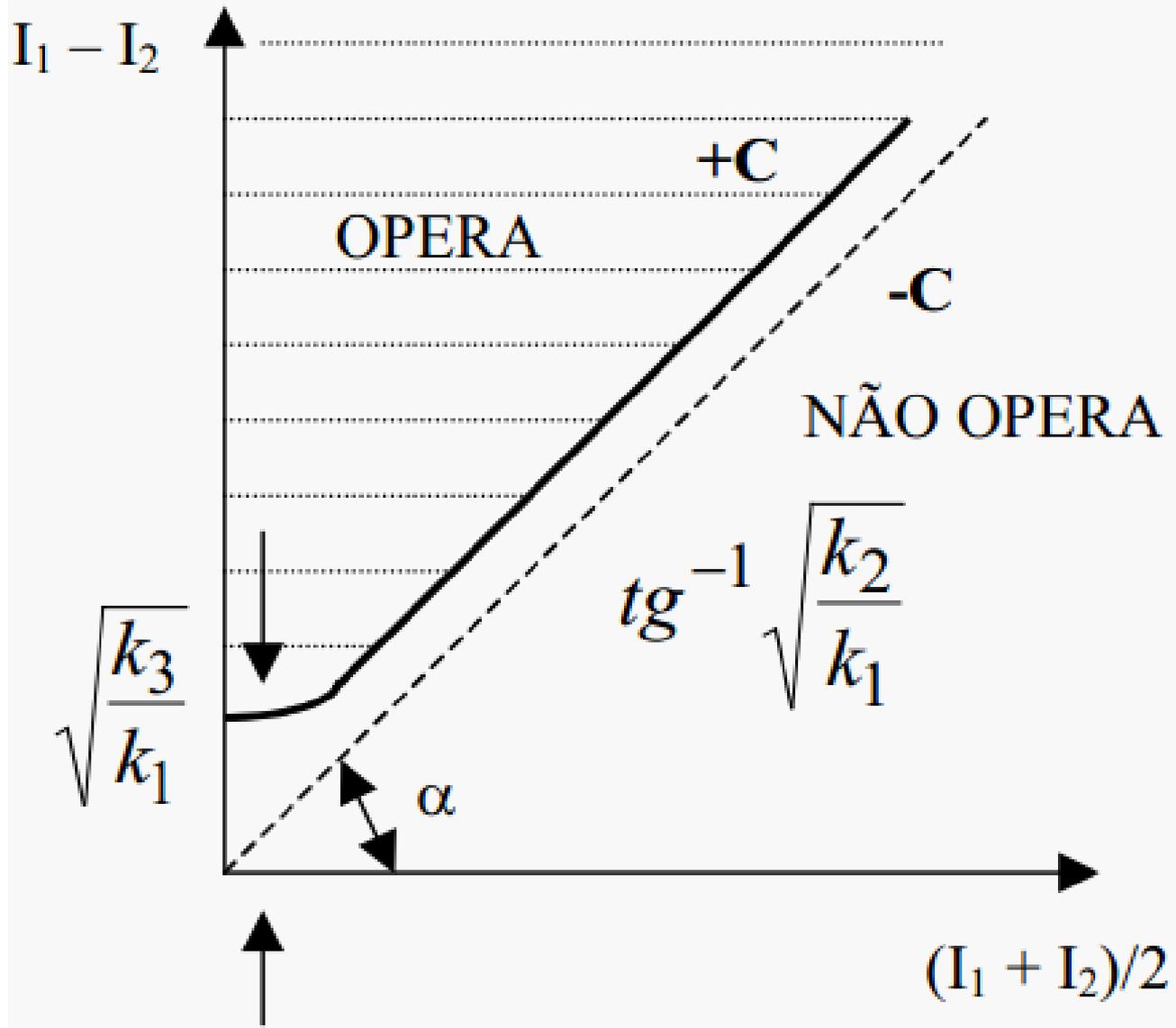
DEFEITO INTERNO A ZONA PROTEGIDA



DEFEITO EXTERNO A ZONA PROTEGIDA

- **Resumindo:** para defeitos internos temos um alto torque de restrição e enfraquecimento do torque de operação; para uma falha interna temos um alto torque de operação e enfraquecimento do torque de restrição;
- Na bobina de restrição, age a seguinte corrente: $I_{restrição} = \left| \frac{I_1 + I_2}{2} \right|$
- Na bobina de operação, age a seguinte corrente: $I_{operação} = |I_1 - I_2|$
- O torque é dado por: $\tau = K_1(I_1 - I_2)^2 - K_2\left(\frac{I_1 + I_2}{2}\right)^2$

- $I_1 - I_2 = \frac{I_1 + I_2}{2} \sqrt{\frac{K_1}{K_2}}$ é equação de uma reta tipo $y=ax$, Fazendo $a = \sqrt{\frac{K_1}{K_2}}$
- Assim, o gráfico desta equação será uma reta cuja a inclinação será dada por $a = \text{tag}\alpha = \sqrt{\frac{K_1}{K_2}}$, que é chamada de inclinação ou slope da reta de limiar de operação do relé 87;
- O efeito da mola de restrição do rele só aparecerá para baixas correntes. Neste caso a reta não passa mais pela origem mais tem um pequeno desvio.

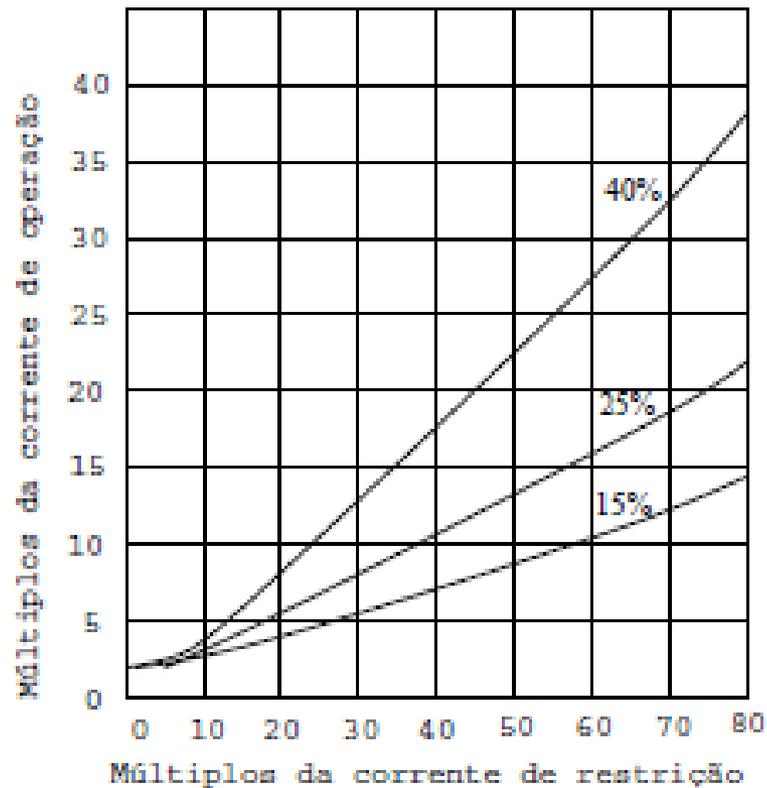


- Para o relé diferencial percentual, devem-se fazer dois ajustes:
 - Ajuste da declividade (slope). Que pode ser:
 - 5 a 25% para máquinas síncronas;
 - 10 a 45% para transformadores de potência.

Deve-se observar que se a declividade for de 25%, que corresponde a $\text{tg } \alpha = 0,25$ e $\alpha = \text{arctg}0,25 = 14,04^\circ$. Quanto maior a declividade, menor é a sensibilidade do relé.

- Ajuste do valor inicial de *pick-up* para compensar o efeito da mola de restauração, seu valor mínimo é limitado por $\sqrt{\frac{K_3}{K_1}}$, em que K_3 representa o efeito da mola.

- Em geral são disponibilizados três tapes de inclinação percentual, conforme se observa na figura abaixo. Tanto a corrente de restrição quanto a corrente diferencial são dadas em função do múltiplo da corrente do circuito.



○ Na utilização da proteção diferencial os TC's devem compensar as seguintes diferenças numéricas das correntes primárias e secundárias do transformador. Assim, algumas regras devem ser seguidas:

1. As ligações dos TC's devem seguir as mesmas sequencias das marcas de polaridade das bobinas primárias e secundárias do transformador;
2. Os terminais dos TC's com marcas de polaridade devem se conectar às bobinas de restrição do relé 87;
3. Dimensionar os TC's de modo que as correntes secundárias que passam pelas bobinas de restrições sejam iguais em módulo e ângulo, ou seja $i_{ps} = i_{ss}$.

- As regras 1 e 2 fazem com que as correntes que passam nas bobinas de restrição estejam em fase, e para garantir que os módulos sejam iguais, deve-se fazer

$$I_{ps} = I_{ss}$$

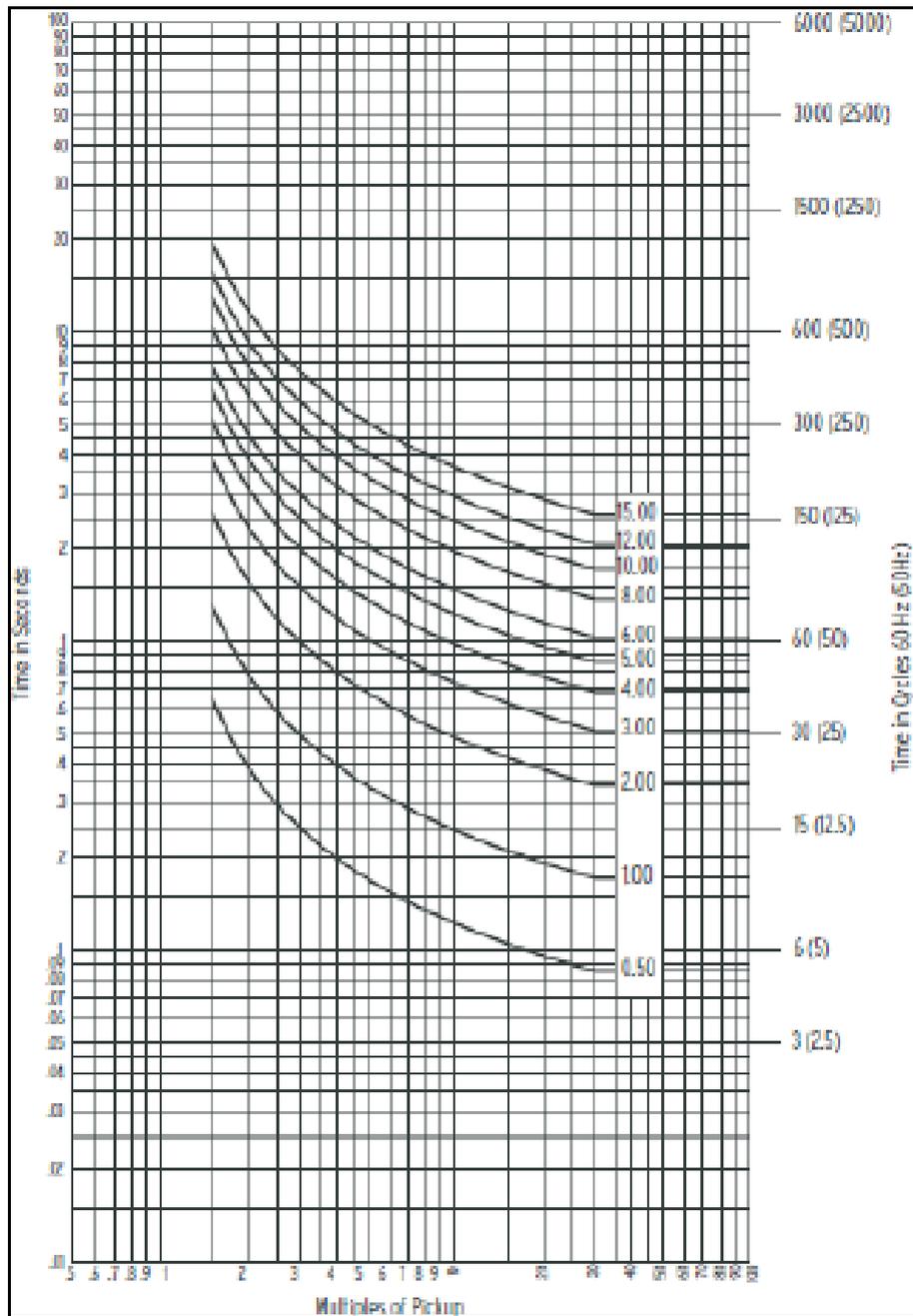
$$\frac{I_p}{RTC_p} = \frac{I_s}{RTC_s} \rightarrow \frac{I_p}{RTC_p} = \frac{aI_p}{RTC_s}$$

$$RTC_s = a \cdot RTC_p$$

- Assim, desconsiderando-se os erros de cada TC, na operação normal do transformador e em caso de defeitos fora da zona protegida pelos dois TC's, a corrente que passa pela bobina de operação do relé 87 é nula.

- Desta forma, para se parametrizar um relé diferencial é necessário obter os seguintes parâmetros:
 - Corrente diferencial;
 - Corrente de restrição;
 - Declividade da reta;
 - Ajuste da sensibilidade (30% da corrente do tap de referência);
 - Unidade instantânea ((8 x a corrente do tap de referencia)

- Alguns ajustes típicos de um relé diferencial de sobrecorrente temporizado pode ser assim:
 - Declividade da curva em 25%;
 - Tempo de operação do relé em 100 ms para 3 vezes a corrente de operação;
 - Corrente de operação em 70% da corrente nominal;
 - Ajuste da unidade instantânea acima da corrente de magnetização;



Relé SEL 387



Exercício 1

- Seja um transformador monofásico de 10 MVA, 138/13,8 kV, cujo o TC do primário possui uma relação 100:5, que alimenta uma carga de 8280 kVA com fator de potencia de 0,8 indutivo. O que acontece com um relé 87 que tem ajuste de 2 A e declividade de 25%, na ocorrência de um defeito interno de 200 A no trafo operando a vazio.

4. Transformadores Trifásicos

- O transformador trifásico opera como se fosse 3 transformadores monofásicos, podendo ser constituído por:
 - Banco de transformadores monofásicos;
 - Transformador trifásico, montado sobre um mesmo núcleo magnético, que pode ser:
 - Núcleo envolvido;
 - Núcleo envolvente.
- Podendo ser também de dois, três ou mais enrolamentos.

- A forma de ligação do transformador trifásico, em cada lado do enrolamento, pode ser:
 - Em estrela (\mathbf{Y});
 - Em delta (Δ);
 - Em zig-zag.
- Destas ligações resultam as mais diversas combinações que dependem do sistema elétrico adotado.

Proteção Diferencial de Transformadores Trifásicos

- A produção diferencial 87 no transformador trifásico efetua-se fase a fase do mesmo modo como apresentado anteriormente, podendo-se adotar qualquer ligação Δ ou Y nos secundários dos TCs da proteção diferencial;
- Entretanto, o mais utilizado é a ligação em Y quando os transformadores de potencia produzem rotação angular nas suas correntes de entrada e saída.

- Cuidado em especial deve ter no trafo Δ -Y, porque as correntes de linha do lado Δ estão adiantadas ou atrasadas 30° em relação às correntes de linha do lado Y;
- O deslocamento angular produz dois problemas:
 - Diferenças nas correntes no relé diferencial 87, que dependendo do seu ajuste pode operar para as condições de carga do transformador;
 - Defasamento nas correntes das bobinas de restrição do relé 87, prejudicando a sua característica de desempenho.

- Na operação normal do sistema elétrico, as correntes nas bobinas de restrição do relé diferencial devem estar em fase, com mesmo módulo e ângulo, desse modo os TCs devem compensar a:
 - Relação de transformação do transformador;
 - Rotação angular provocada pelo trafo Δ -Y.
- Nos enrolamentos do lado primário ou secundário dos transformadores de potência ou dos TCs, ligados em Δ , as correntes na linha estão defasadas $\pm 30^\circ$ e tem módulo $\sqrt{3}$ vezes maior que as correntes na fase do Δ .

- A regra fundamental para o funcionamento do relé 87 é que na condição normal de operação ou de curto-circuitos trifásicos, fora da zona de proteção, seja atendida pela expressão:

$$\dot{I}_{\text{Bobina de restrição1}} = \dot{I}_{\text{Bobina de restrição2}}$$

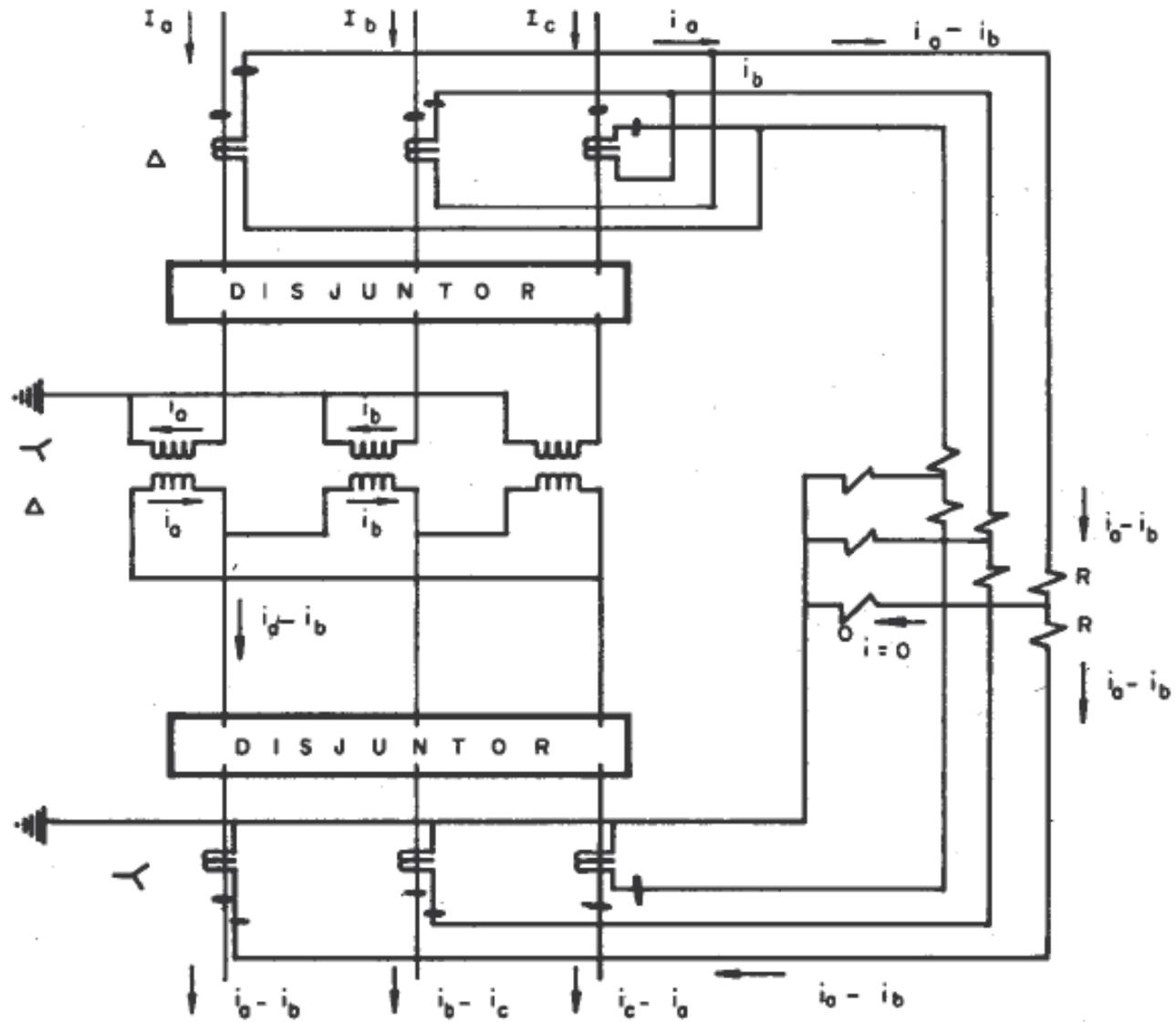
- Se a condição da expressão acima não for satisfeita o sistema de proteção diferencial tem erro, isto é, existe corrente passando na bobina de operação do relé 87, que deve ser compensada pelo ajuste da sensibilidade do relé.

Transformadores Δ -Y

- No trafo Δ -Y, as correntes de linha do lado Δ estão defasadas de 30° em relação à corrente de linha do lado Y;
- Os TCs deverão ser dimensionados e conectados de modo que suas ligações secundárias compensem as relações de transformações diferentes e os deslocamentos angulares, de modo que nas bobinas de restrição do relé 87 cheguem correntes elétricas em fase.

- Para entender estas condições, segue-se a regra:
 - Os secundários dos TC's deverão ser conectados em Y no lado Δ do trafo de potencia;
 - Os secundários dos TC's deverão estar conectados em Δ no lado Y do transformador de potência.

Conexão do transformador		Conexão do TC	
Primário	Secundário	Primário	Secundário
Estrela Aterrada	Delta	Delta	Estrela
Delta	Delta	Estrela	Estrela
Estrela	Estrela Aterrada	Delta	Delta
Delta	Estrela Aterrada	Estrela	Delta



- Assim, a corrente na fase do secundário do TC ligado em Δ será $\sqrt{3}$ vezes menor que a corrente de linha que será conectada na bobina de restrição;
- Desta maneira para se calcular o TC que será conectado em Δ deve-se proceder da seguinte maneira:

$$TC = \frac{I_{\text{primário}}}{\frac{I_{\text{secundário}}}{\sqrt{3}}} = \sqrt{3} \cdot \frac{I_{\text{primário}}}{5}$$

Exercício 2

Determinar os ajustes de um relé de proteção diferencial instalado no trafo de 60 MVA, 138/13,8 kV. O trafo é dotado dos seguintes Tapes: 136-138~142 kV. O lado de alta tensão está ligado em triangulo e o lado de média tensão está ligado em estrela com o ponto neutro aterrado.

5. Proteção de Transformadores – Visão Geral

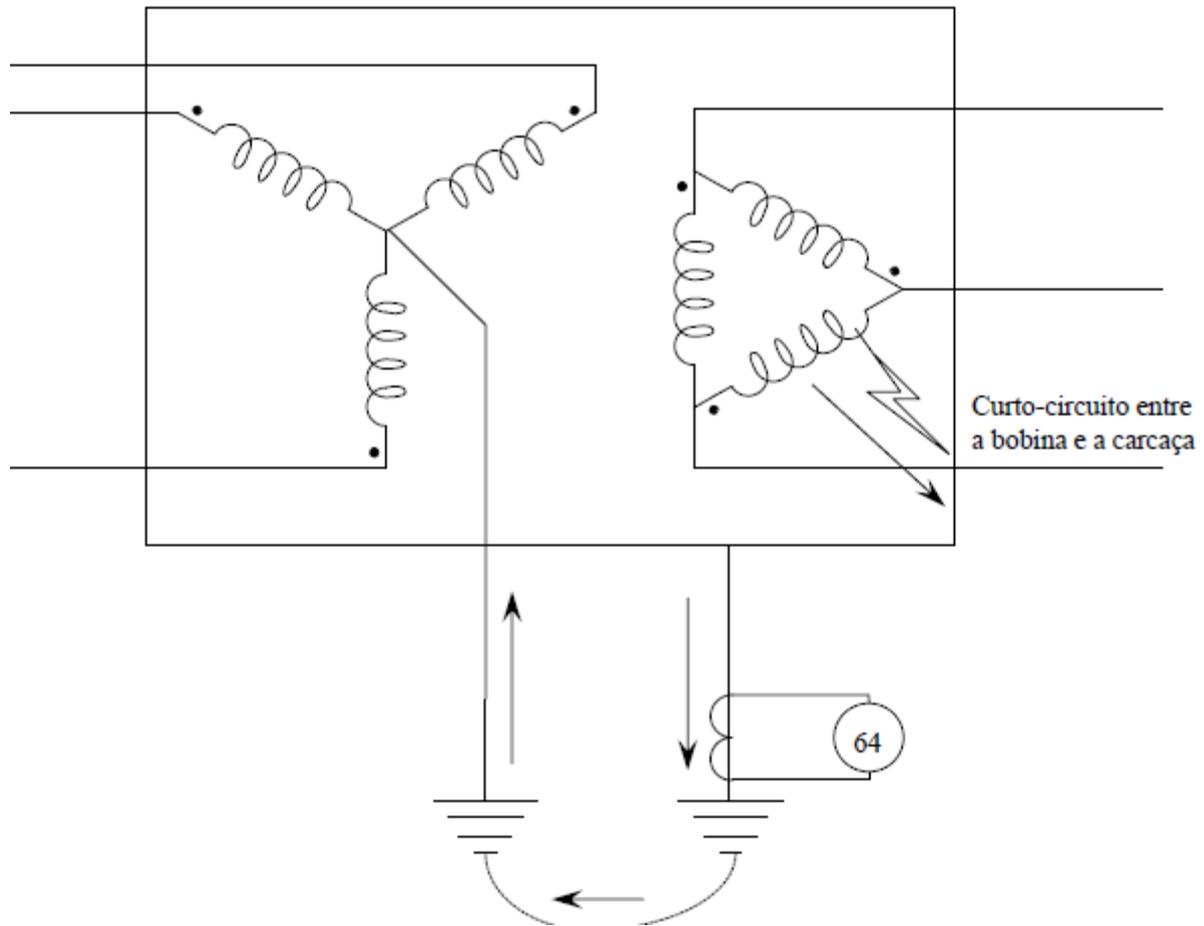
- Os problemas relacionados a transformadores descritos nas seções anteriores demandam algum meio de proteção. A tabela a seguir resume os problemas e as possíveis formas de proteção que podem ser utilizadas;
- É normal para um relé moderno prover todas as funções de proteção necessárias num único módulo, em contraste com os eletromecânicos que requerem vários relés completos com interligações e TCs com carga nominal mais elevada.

5.1 Proteção contra descargas atmosféricas

- Para-raios em ambos os lados do trafo contra descargas atmosféricas do tipo indireta;
- Para descargas diretas, hastes tipo Franklin ou cabos guarda;
- Para proteção de sobretensões sustentadas, internas ao SEP, deve-se utilizar relés de sobretensão, função 59.

5.2 Proteção Tanque-Terra

- Também conhecida como proteção de Howard;
- Se o tanque do transformador for nominalmente isolado da terra (uma resistência de isolação de 10 ohms é suficiente) a proteção de falta a terra pode ser obtida ligando-se um relé ao secundário de um transformador de corrente, cujo primário encontra-se conectado entre o tanque e a terra.



5.3 Dispositivos de Alívio de Pressão e Óleo

- A forma mais simples de dispositivo de alívio de pressão é o amplamente usado disco de flange (*frangible disc*) que normalmente fica localizado ao final do tubo de alívio de óleo, tal qual uma protuberância no topo do tanque de transformador;
- O surto de óleo causado por uma falta séria rompe o disco, permitindo então que o óleo seja descarregado rapidamente.



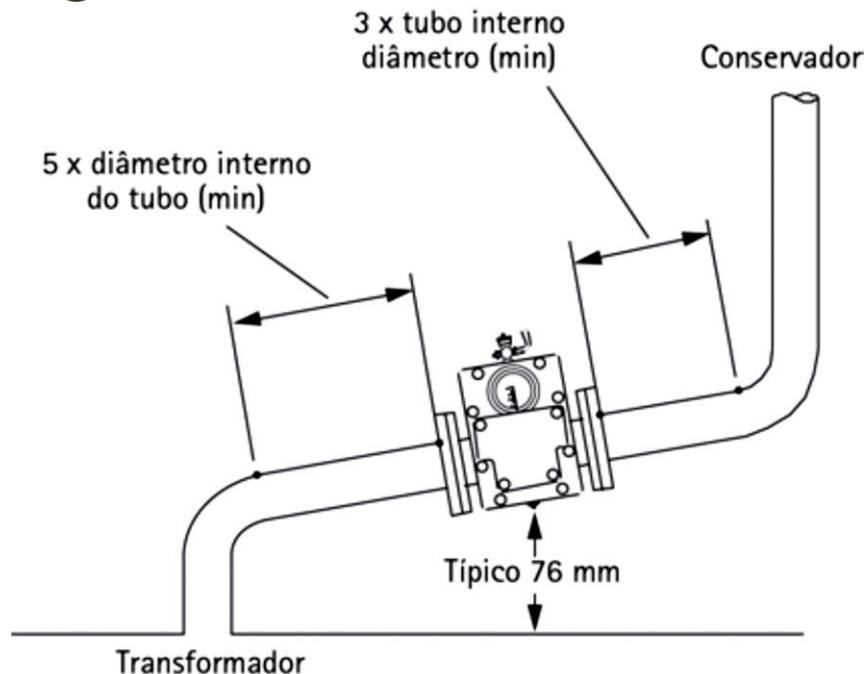
Transformador de 15.000 kVA
Mais Energia para a região



5.4 Proteção de Buchholz (Função 63)

- O Relé Buchholz constitui um dos principais acessórios de segurança e proteção utilizados em transformadores de potência isolados à óleo e dotados de tanque de expansão;
- O Relé Buchholz tem por finalidade supervisionar continuamente o transformador, visando detectar situações anormais de formação de gases e a presença de fluxo do óleo isolante.

- É fornecido em todos transformadores equipados com um conservador, sendo normalmente instalado dentro de uma carcaça que intercepta o tubo para o conservador, como na Figura.







- Um relé Buchholz típico apresenta dois conjuntos de contatos, sendo que um é destinado a operar em acumulações lentas de gás, enquanto o outro atua em grandes deslocamentos de volume de óleo, no caso de uma falta interna severa.
- Um alarme é gerado quando da atuação no primeiro conjunto de contatos, enquanto o segundo grupo é normalmente ligado diretamente ao relé de abertura do disjuntor.

- O dispositivo produzirá um alarme para as seguintes condições de falta, todas elas de baixo grau de urgência:
 - Pontos quentes (*hot spots*) no núcleo devido a curto-circuito na isolação do laminado;
 - Falha de isolamento em parafuso do núcleo;
 - Defeitos em juntas;
 - Faltas entre espiras ou outras faltas em enrolamento envolvendo somente injeção de baixa potência;
 - Perda de óleo devido a vazamento.

- Quando ocorre uma falta severa no enrolamento tem-se um surto de óleo, que provoca o deslocamento da bóia inferior do relé, causando assim o desligamento do transformador;
- Essa ação acontecerá para:
 - Todas as faltas severas em enrolamento para a terra ou entre fases;
 - Perda de óleo, desde que permitido continuar até um nível perigoso.

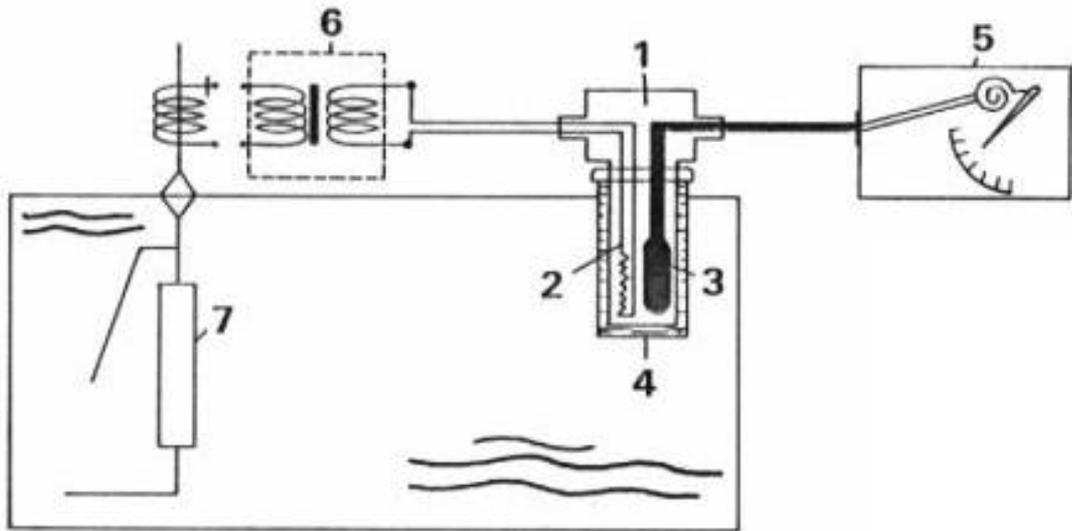
- Por causa de sua resposta universal a faltas internas ao transformador, algumas das quais de difícil detecção por outros meios, o relé de Buchholz é indispensável, se considerado como proteção principal ou como um suplemento a outros esquemas de proteção.

5.5 Proteção Contra Sobrecarga (Função 49) – Imagem Térmica

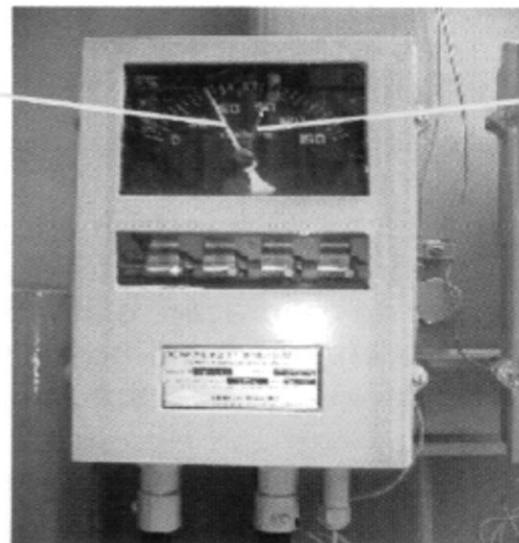
- Proteção do isolante dos enrolamentos contra estragos causados pelo aquecimento inadmissível provocado por sobrecargas prolongadas;
- Normalmente existe um termômetro nos transformadores no topo do óleo que através de um tubo capilar pode acionar:
 - contato que faz atuar o alarme;
 - contato para ligar os ventiladores;
 - contato para ligar as bombas de circulação de óleo;

○ **Imagem térmica:**

- Indica a temperatura do ponto mais quente no enrolamento;
- O aumento da temperatura provoca a expansão de um bulbo de mercúrio que leva ao acionamento de uma mola que move um ponteiro;
- Quando a temperatura atinge um limite máximo os contatos fecham-se e caso a temperatura seja muito elevada pode ser necessário retirar o transformador de serviço.



Ponteiro móvel



Ponteiro fixo

5.6 Proteção Contra Incêndio

- Proteger a vida das pessoas;
- Proteger a propriedade;
- Continuar a operação.

○ Parede tipo corta-fogo

- A parede tipo corta-fogo deve apresentar as seguintes dimensões para transformadores e reatores de potência (ver
- Figura):
 - para transformadores, a altura deve ser de 0,4 m acima do topo do tanque conservador de óleo;
 - para reatores de potência, a altura deve ser de 0,6 m acima do topo do tanque;
 - o comprimento total da parede deve, no mínimo, ultrapassar o comprimento total do equipamento protegido em 0,6 m;
 - distância livre mínima de separação física, entre a parede e o equipamento protegido, deve ser de 0,5 m.

