

## **FILOSOFIA DA PROTEÇÃO ELÉTRICA**

*Prof. Carlos Alberto Mohallem Guimarães, Ph.D.  
Universidade Federal de Itajubá  
Departamento de Eletrotécnica - Instituto de Engenharia Elétrica*

### **1. Introdução**

#### **1.1 A proteção deve:**

- Garantir da melhor maneira possível a continuidade do serviço
- Salvar os equipamentos e a rede

#### **1.2 Três tipos de proteção**

- Contra incêndio
- Relés + disjuntores, fusíveis
- Contra descargas atmosféricas

#### **1.3 Considerações para o estudo de uma proteção**

- Elétricas
- Econômicas
- Físicas

#### **1.4 Proteção bem projetada, minimiza-se:**

- Custo de reparação
- Propagação do defeito
- Tempo de parada
- Agastamento de relações
- Custo (0,5 a 5% do equipamento protegido)

#### **1.5 Duas situações distintas:**

- Falta, que é a perda do meio básico de isolamento - curto circuito
- Condições anormais

#### **1.6 Condições anormais (perigosas):**

- Sobrecarga - correntes acima do máximo permissível
- Sobretensões
- Oscilações de potência
- Rejeição de carga

### 1.7 Conseqüências:

- Destruição do isolamento
- Danos mecânicos
- Choques elétricos
- Perda de sincronismo
- Perda de estabilidade

### 1.8 Fatores importantes a considerar

- Tempo de permanência da falta
- Com ou sem permissão de religamento
- Religamento normal ou de alta velocidade

### 1.9 Prevenção de falhas elétricas

- Utilizar isolamento adequado (coordenação)
- Baixa resistência de pé de torre
- Projetos mecânico e civil adequados (animais, poluição, vandalismo)
- Práticas apropriadas de operação e manutenção

### 1.10 Características gerais dos equipamentos de proteção

- Não atuar para defeitos fora da sua zona
- Se há defeito na zona, operar corretamente

### 1.11 Funções de proteção

- Principal - Ex.: diferencial (87); distância (21)
- Secundária - Ex.: localizador de defeito; oscilografia
- Retaguarda - Ex.: sub-sobretensão (27/59); sobrecorrente (50/51)
- Auxiliar - Ex.: relé de bloqueio (86); direcional (67)

### 1.12 Moderação dos efeitos das falhas

Não é economicamente viável tentar eliminar todas as falhas, pois muita coisa não depende do projetista. Diminuir a severidade das falhas é mais lógico.

- **Meios que moderam os efeitos imediatos**
  - impedância de aterramento
  - capacidade geradora
  - impedância série
  - esforços mecânicos e térmicos
- **Dispositivos que desligam o elemento defeituoso**
  - disjuntores + relés
  - fusíveis
  - religadores

### 1.7 Conseqüências:

- Destruição do isolamento
- Danos mecânicos
- Choques elétricos
- Perda de sincronismo
- Perda de estabilidade

### 1.8 Fatores importantes a considerar

- Tempo de permanência da falta
- Com ou sem permissão de religamento
- Religamento normal ou de alta velocidade

### 1.9 Prevenção de falhas elétricas

- Utilizar isolamento adequado (coordenação)
- Baixa resistência de pé de torre
- Projetos mecânico e civil adequados (animais, poluição, vandalismo)
- Práticas apropriadas de operação e manutenção

### 1.10 Características gerais dos equipamentos de proteção

- Não atuar para defeitos fora da sua zona
- Se há defeito na zona, operar corretamente

### 1.11 Funções de proteção

- Principal - Ex.: diferencial (87); distância (21)
- Secundária - Ex.: localizador de defeito; oscilografia
- Retaguarda - Ex.: sub-sobretensão (27/59); sobrecorrente (50/51)
- Auxiliar - Ex.: relé de bloqueio (86); direcional (67)

### 1.12 Moderação dos efeitos das falhas

Não é economicamente viável tentar eliminar todas as falhas, pois muita coisa não depende do projetista. Diminuir a severidade das falhas é mais lógico.

- **Meios que moderam os efeitos imediatos**
  - impedância de aterramento
  - capacidade geradora
  - impedância série
  - esforços mecânicos e térmicos
- **Dispositivos que desligam o elemento defeituoso**
  - disjuntores + relés
  - fusíveis
  - religadores

- **Meios que tornam a perda menos grave**
  - circuitos alternativos
  - capacidade de reserva
  - religamento automático
  
- **Manutenção da tensão e estabilidade**
  - comutadores sob carga
  - regulação automática de geradores
  - banco de capacitores
  - capacitores série
  - dispositivos Facts

A proteção por relés é um dos múltiplos aspectos do planejamento, tendo como objetivo, minimizar danos causados pelas falhas e melhorar o serviço ao consumidor. Por isso a proteção deve ser considerada nos primeiros estágios do planejamento (isto inclui o controle e a comunicação). Isto a custo relativamente baixo.

### **1.13 Função dos relés de proteção**

- Detectar a falta
- Comandar o disjuntor
- Localizar a falta

### **1.14 Parâmetros envolvidos**

- Magnitude de tensão e corrente
- Ângulo de fase
- Potência
- Impedância
- Frequência
- Duração
- Taxa de variação de uma grandeza
- Harmônicos
- movimento de óleo
- Pressão de gás
- Outros

### **1.15 Qualidades requeridas para a proteção**

- Sensibilidade - perceber nuâncias na variação das grandezas
- Seletividade - selecionar o trecho em falta, depende da filosofia
- Velocidade - tempo entre medição e tomada de decisão
- Confiabilidade - resposta correta mesmo parado há muito tempo

### 1.16 Conjunto protetor

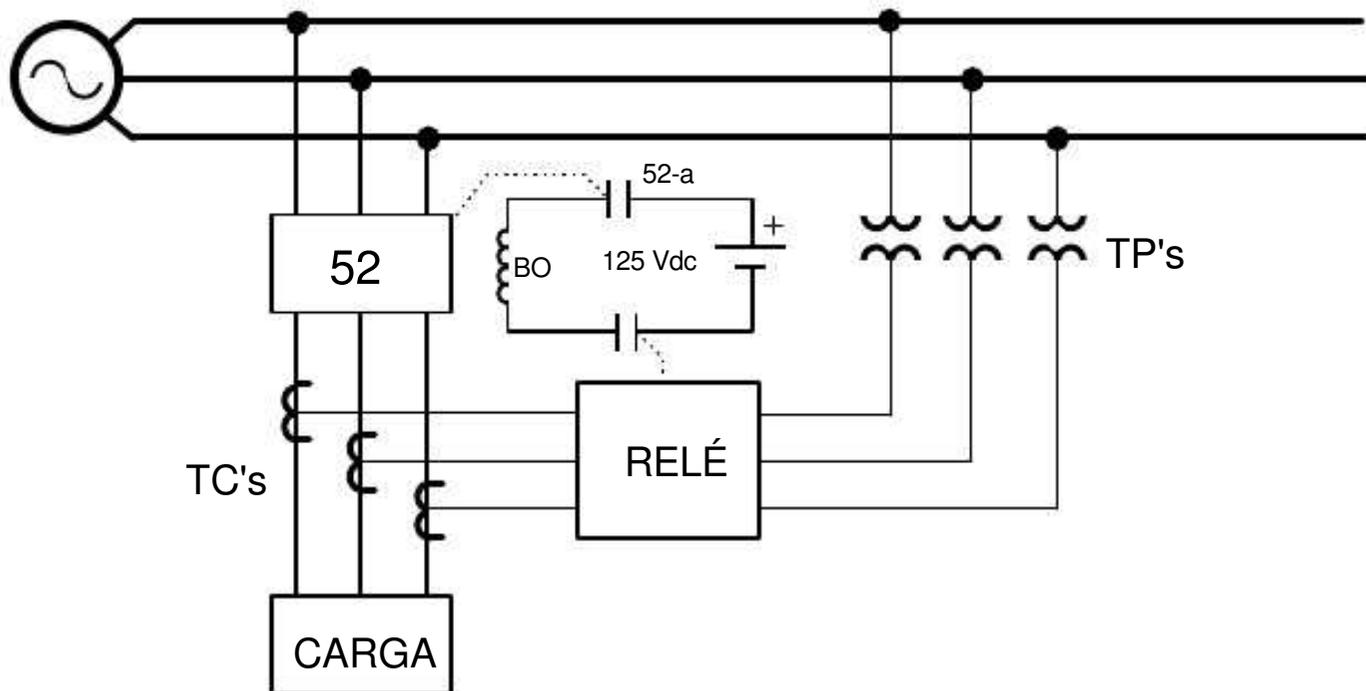


Figura: Relé + disjuntor + TP's + TC's

### 2. Tratamento estatístico de defeitos:

Em relação ao tipo de falta

Falta	Porcentagem
Fase - Terra	81 %
Fase - Fase	10 %
Fase - Fase - Terra	6 %
Trifásica sem Terra	1,5 %
Trifásica com Terra	1,5 %

Em relação ao equipamento protegido

Equipamento	Porcentagem
Linha de Transmissão	69,7 %
Distribuição	9,2 %
Barramentos	6,7 %
Geradores	4,7 %
Outros Equipamentos	2,6 %
Sistemas Externos	1,0 %
Consumidor	0,4 %
Outra	5,7 %

Em relação à causa

Causa	Porcentagem
Fenômenos Naturais	50,2 %
Falha de Equipamento	12,0 %
Falha humana	9,0 %
Falha operacional	8,5 %
Outras causas	20,3 %

### 3. Zonas de Atuação

Em geral a filosofia de aplicações de relés de proteção divide o sistema de potência em zonas de proteção, de maneira a se obter uma atuação seletiva e coordenada dos relés. Alguns autores chamam a atenção para o fato de que essas zonas de proteção podem ser estabelecidas por dois métodos: Sistemas gradados no tempo e Sistemas unitários. Ambos, de qualquer modo, estabelecendo critérios de seletividade. A figura a seguir exemplifica as zonas de atuação da proteção. Nota-se nesta figura que as partes constantes das zonas de proteção são:

- Geradores ou bloco gerador - transformador
- Barramentos
- Transformadores
- Linhas de Transmissão (subtransmissão e distribuição)
- Equipamentos (banco de capacitores, reatores, motores, outros)

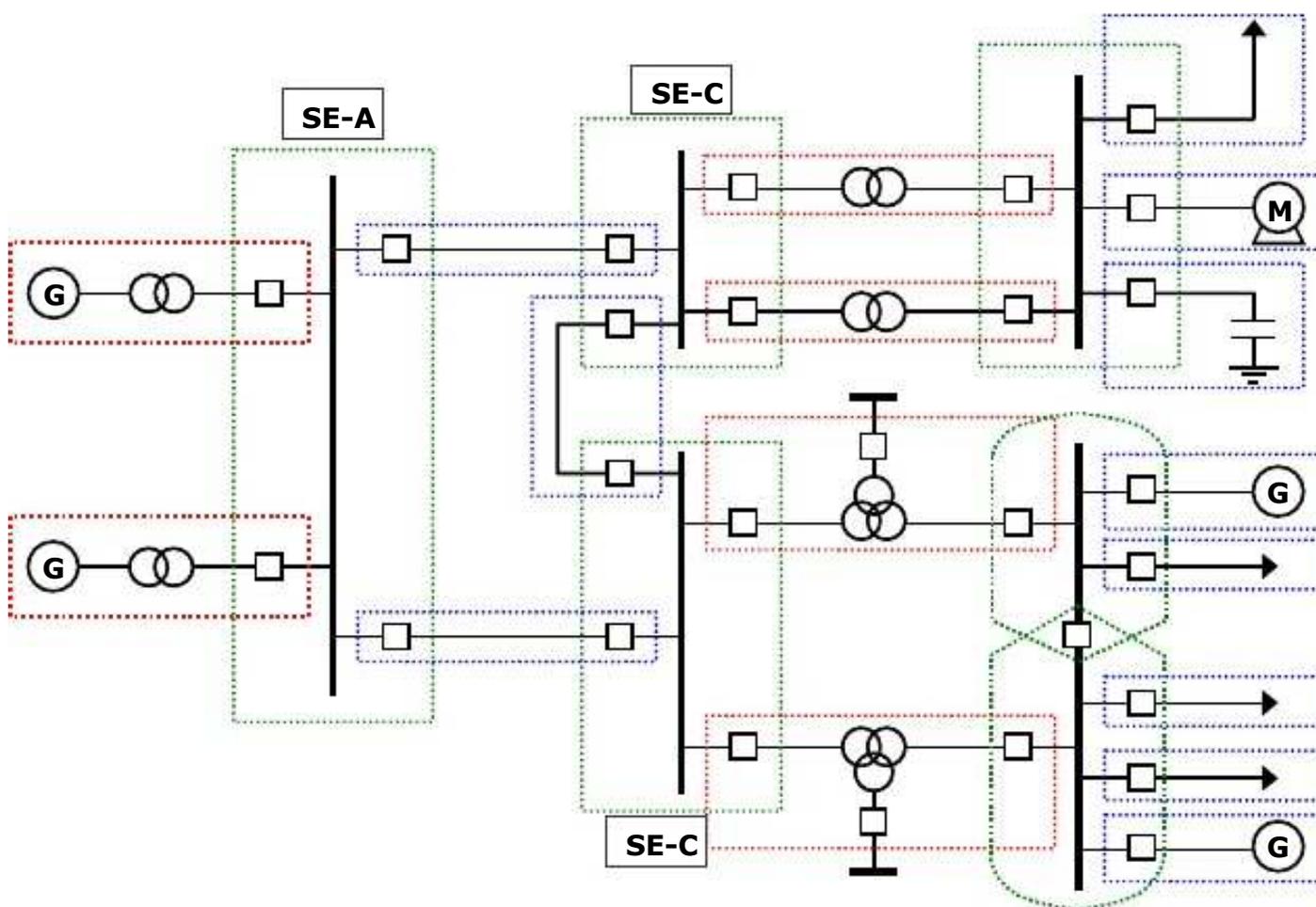


Figura: Zonas de Proteção

A definição do início e término de cada zona pode ser estabelecida de duas maneiras diferentes que dependem do particular arranjo da subestação bem como da localização física dos TC's.

Existência de sobreposição de cobertura sobre o disjuntor com um TC de cada lado.

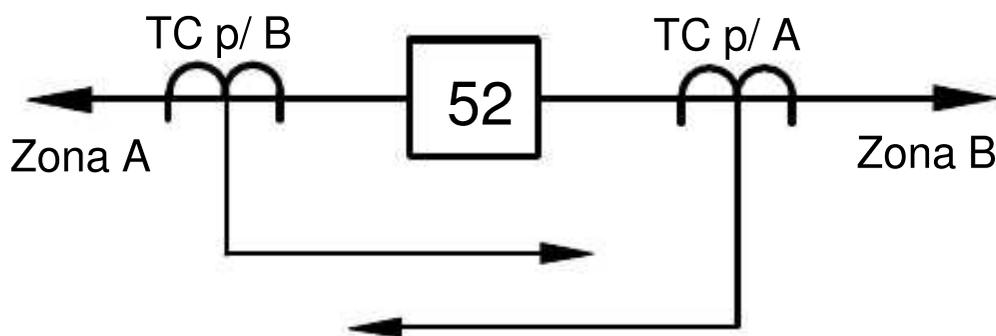


Figura: Início e término de zona de proteção

Sem sobreposição de cobertura sobre o disjuntor, TC's apenas de um lado.

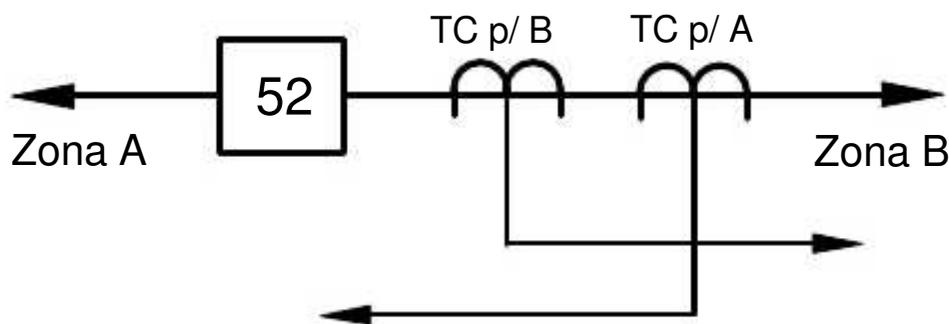


Figura: Início e término de zona de proteção

No primeiro caso, a confiabilidade do sistema de proteção é maior, no entanto, a seletividade estará comprometida em caso de uma falta no disjuntor sobreposto. O leitor poderá analisar o esquema abaixo e tirar suas conclusões.

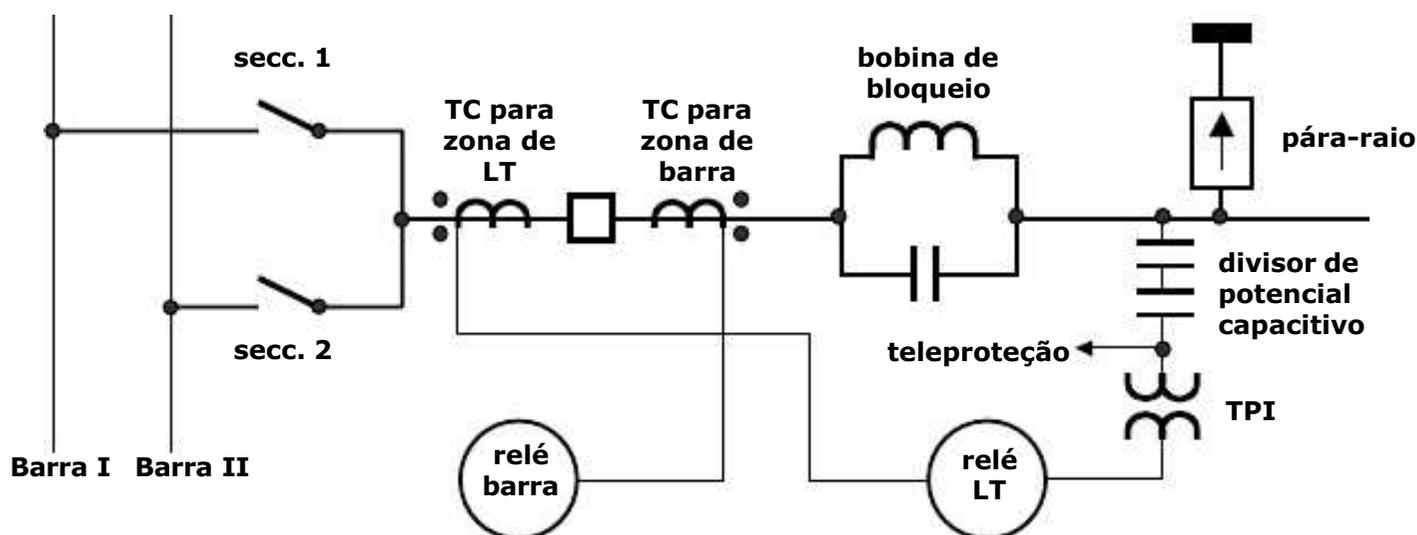


Figura: Arranjo Barra Dupla - disjuntor simples

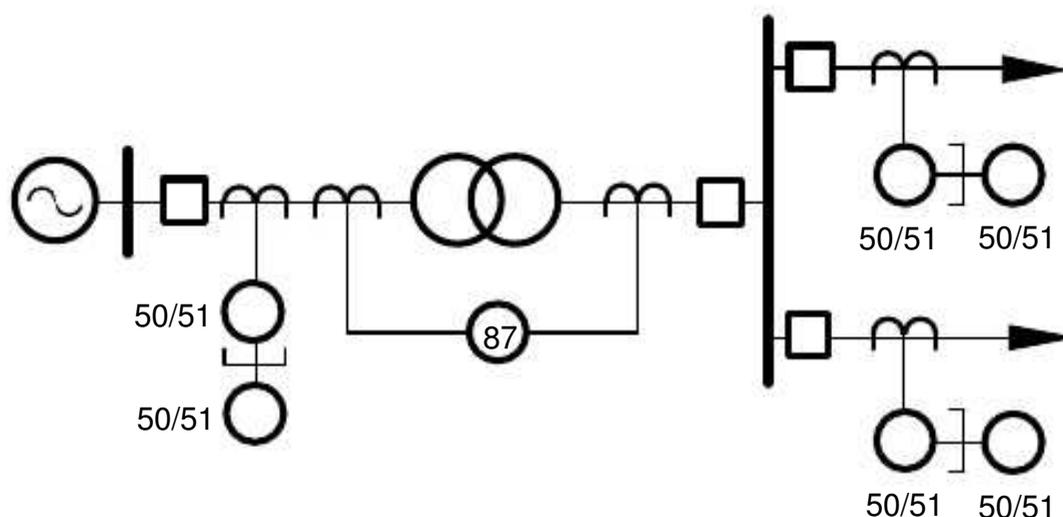
#### 4. Níveis de proteção

Em geral, principalmente nos circuitos de AT e EAT, os equipamentos e dispositivos são protegidos por uma proteção principal e outra de retaguarda (*back-up*), cuja finalidade é fazer a supervisão da operação da proteção principal.

As proteções principais, além de seletivas, são naturalmente mais rápidas que as de retaguarda, pois estas são ajustadas de modo a garantir que a principal atue em primeiro lugar, sendo literalmente equacionada obedecendo a critérios pré-estabelecidos de coordenação. Uma segunda finalidade associada à proteção de retaguarda diz respeito a se prover supervisões de regiões especiais, onde a proteção principal, eventualmente, pode não oferecer total cobertura, devido principalmente a limitação de equipamentos e/ou de seus posicionamentos, bem como, limitações em níveis de ajuste de relés, como por exemplo, limites de alcance, intensidades, temporizações, etc.

A proteção de retaguarda poderá estar próxima do equipamento ou circuito protegido (*back-up* local) ou em um ponto remoto (*back-up* remoto).

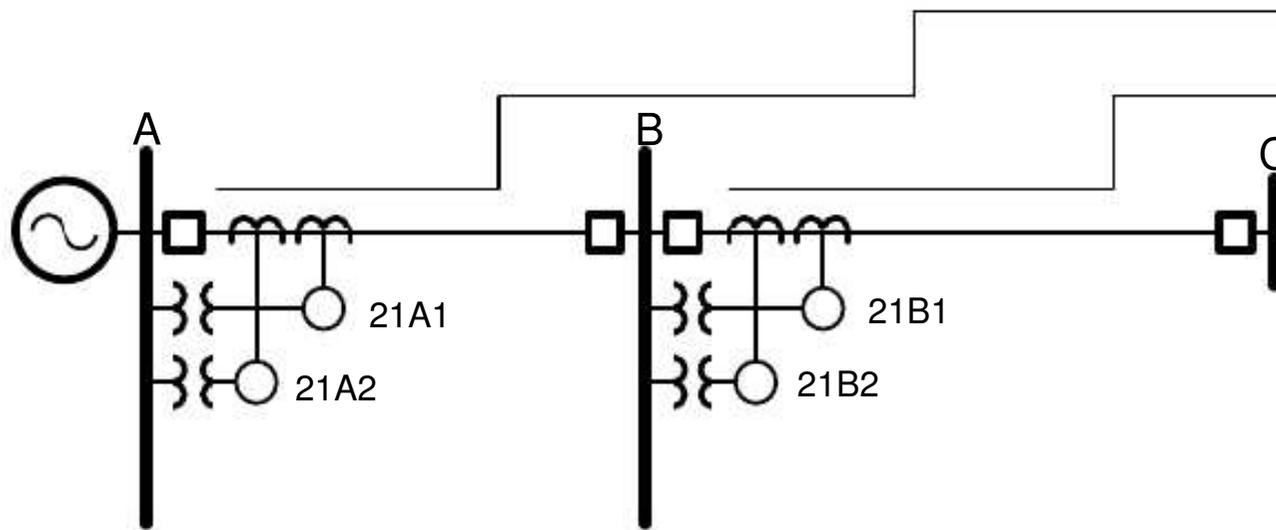
Na figura seguir, para um defeito interno no transformador, o relé 87 (diferencial) é considerada a proteção principal, pois possui uma atuação instantânea e é seletivo. Os relés de sobrecorrente 50/51, do lado AT do transformador são considerados como proteção de retaguarda tanto para defeitos no transformador como nos alimentadores 1 e 2 de saída da subestação. Estes relés são considerados como proteção de retaguarda local para defeitos no transformador ou alimentadores.



**Figura: Proteção principal e de retaguarda**

Para sistemas de EAT, é usual a utilização de duas proteções de distância (21) com desempenhos similares e muitas vezes com relés iguais, isto é, uma proteção duplicada. Essas proteções, comumente denominadas de principal e alternativa ou primária e secundária, têm por objetivo uma maior confiabilidade e segurança no desempenho da proteção instalada. Recomenda-se usualmente, sempre que possível, conectar essas proteções a TP's e TC's com a mínima interdependência entre si. Embora sejam funções distintas, muitas vezes a proteção de retaguarda se confunde com a alternativa e vice-versa, chegando até causar polêmicas a respeito. Note-se que, na figura a seguir, as proteções 21A1 e 21B1 são consideradas proteções primárias e ainda 21A2 e 21B2 são as alternativas. Nestas

circunstâncias, para defeitos no trecho BC (além dos TC's) as proteções principais são 21B1 e 21B2, pois possuem ação rápida (20 a 80 ms) e são seletivos. Os relés 21A1 e 21A2 são considerados de retaguarda pois possuem atuação temporizada (400 ms) e não são seletivos, pois desligam o trecho AB sem defeito. Os relés 21A1 e 21A2 são considerados proteções de retaguarda remotas para defeitos no trecho BC.



**Figura: Proteção principal e de retaguarda / primária e secundária**

## RELÉS DE PROTEÇÃO

### 1. Normas aplicáveis

- NBR 8769 / 8926 / 9029 / 9030
- ANSI C37.90
- BS 142
- IEC 255
- Outras

### 2. Classificação

- Relés de proteção (50/51 - 87 - 21 - 27/59 - 46 - 63P - etc)
- Relés de monitoração (26 - 49 - 63G - 40 - 64 - etc)
- Relés de programação (48 - etc)
- Relés de regulação (27/59 - 90 - etc)
- Relés auxiliares (86 - 67 -74 - etc)

### 3. Sub-classificação

- Grandeza física de atuação: tensão, corrente, potência, impedância temperatura pressão, fluxo, etc.
- Construção: mecânico, eletromecânico, eletrônico, térmico, etc.
- Função: sobrecorrente, sobretensão, impedância, direcional, distância, potência, bloqueio etc.
- Importância: principal, secundária, auxiliar, retaguarda, alternativa, etc.
- Posição dos contatos: NA, NF.
- Temporização: instantâneo, tempo definido, tempo inverso.
- Aplicação: geradores, motores, transformadores, linhas, barramentos, etc.
- Tipo construtivo: hinged, plunger, disco de indução, copo de indução, wattimétrico, térmico, estáticos (analógico, digital, numérico).
- Outra.

### 4. Conceituação

#### Atuação

- Pick-up
- Drop-out
- Reset ratio

#### Codições operativas

- Temperatura
- Altitude
- Variação da tensão de alimentação
- Capacidade da condução dos contatos
- Surge Withstand Capability - SWC

#### Regime térmico de um relé

- Máxima corrente suportável em um intervalo de tempo
- Ex.:  $50 \times I_N$  em 1s ou  $10 \times I_N$  continuamente

### Consumo próprio ou carregamento

- Volt-Ampère para o maior tape
- Serve para especificação de TP's e TC's
- Grande redução em função dos estáticos (BP =  $1 \text{ M}\Omega$ ; BC =  $0,1\Omega$ )

## 5. Identificação das funções: Tabela ANSI (resumo)

- 1 - Elemento mestre
- 2 - Relé de temperatura de partida ou fechamento
- 3 - Relé de verificação ou intertravamento
- 4 - Contator ou relé mestre
- 5 - Dispositivo de parada
- 6 - Disjuntor de contato ou chave de partida
- 7 - Disjuntor de circuito anódico
- 8 - Dispositivo de intertravamento
- 9 - Dispositivo de inversão
- 10 - Chave de seqüência de unidade
- 11 - Transformador de controle (potência)
- 12 - Dispositivo de sobrevelocidade
- 13 - Dispositivo de rotação síncrona
- 14 - Dispositivo de subvelocidade
- 15 - Dispositivo equalizador de velocidade e freqüência
- 16 - Dispositivo de controle de carga para bateria
- 17 - Chave de derivação ou descarga
- 18 - Dispositivo acelerador ou desacelerador
- 19 - Relé ou contator de transição entre partida e velocidade normal
- 20 - Válvula operada eletricamente
- 21 - Relé de distância
- 22 - Contator ou disjuntor equalizador
- 23 - Disjuntor controlador de temperatura
- 24 - Disjuntor contator ou seccionadora interligadora de barras
- 25 - Dispositivo de sincronização ou verificação de sincronismo
- 26 - Dispositivo térmico (termômetros, termostato)
- 27 - Relé de subtensão
- 28 - Detetor de chama
- 29 - Seccionadora
- 30 - Relé anunciador
- 31 - Dispositivo de excitação separada
- 32 - Relé direcional de potência
- 33 - Chave de posição
- 34 - Dispositivo mestre de seqüência
- 35 - Dispositivo de operação ou curto circuito de anel coletivo
- 36 - Dispositivo de polaridade ou de tensão polarizada
- 37 - Relé de sucorrente ou de subpotência
- 38 - Dispositivo de proteção do mancal
- 39 - Controlador de condições mecânicas
- 40 - Relé de campo
- 41 - Chave do disjuntor de campo
- 42 - Disjuntor de serviço
- 43 - Chave seletora ou transferência
- 44 - Relé de partida
- 45 - Controlador de condições atmosféricas
- 46 - Relé de corrente de inversão de fase ou desequilíbrio de corrente
- 47 - Relé de seqüência de fase de tensão

- 48 - Relé de seqüência incompleta
- 49 - Relé térmico
- 50 - Relé de sobrecorrente instantâneo
- 51 - Relé de sobrecorrente temporizado
- 52 - Disjuntor de corrente alternada
- 53 - Relé de excitatriz ou gerador de CC
- 54 - Disjuntor de CC de alta velocidade
- 55 - Relé de fator de potência
- 56 - Dispositivo ou relé de aplicação de campo
- 57 - Dispositivo de curto circuito ou de aterramento
- 58 - Relé de falta de retificação
- 59 - Relé de sobretensão
- 60 - Relé de equilíbrio de tensão
- 61 - Relé de equilíbrio de corrente
- 62 - Relé de temporização
- 63 - Relé de pressão de líquido ou gás - relé de vácuo
- 64 - Relé de proteção de terra
- 65 - Regulador de velocidade
- 66 - Dispositivo de estágio de memória
- 67 - Relé de sobrecorrente direcional
- 68 - Relé de bloqueio
- 69 - Dispositivo de controle permissivo
- 70 - Reostato operado eletricamente
- 71 - Relé de nível de gás ou líquido
- 72 - Disjuntor para circuito CC
- 73 - Contator de resistor de carga
- 74 - Relé de alarme
- 75 - Mecanismo para mudança de posição
- 76 - Relé de sobrecorrente em circuito de CC
- 77 - Transmissor de pulso
- 78 - Relé de perda de sincronismo
- 79 - Relé de religamento em circuito CA
- 80 - Relé de fluxo de líquido ou gás
- 81 - Relé de freqüência
- 82 - Relé de religamento em circuito CC
- 83 - Relé de controle ou transferência automática
- 84 - Mecanismo de operação
- 85 - Relé receptor de onda portadora
- 86 - Relé de bloqueio de religamento
- 87 - Relé diferencial
- 88 - Motor auxiliar ou motor gerador
- 89 - Seccionadora CA
- 90 - Dispositivo regulador
- 91 - Relé direcional de tensão
- 92 - Relé direcional de tensão e potência
- 93 - Contador de variação de campo
- 94 - Relé de desligamento ou permissão de desligamento
- 95 - Chave de transferência
- 96 - **99** Futuras aplicações

## 6. Identificação das funções: Tabela ANSI (completa)

## NORMA ASA-C-37-2 “NÚMEROS DE IDENTIFICAÇÃO E FUNÇÕES DOS DISPOSITIVOS ELÉTRICOS DA PROTEÇÃO, REGULAÇÃO E CONTROLE”

Nº do função	Denominação	Função
1	Elemento Mestre <i>Master Element</i>	Responsável pelo início de uma operação, podendo ser uma chave de controle, um relé de tensão, uma chave de bóia, etc. que atua diretamente ou através de outro dispositivo, tal como relé de tempo, para colocar ou retirar um equipamento de operação.
2	Relé Temporizado de Partida ou Fechamento <i>Time Delay Starting or Closing Relay</i>	Opera para dar temporização desejada antes ou depois de um ponto de operação, numa seqüência de manobra ou num sistema de relés de proteção.
3	Relé de Verificação ou Intertravamento <i>Checking or Interlocking Relay</i>	Opera em função da posição de outros dispositivos ou em função de certas condições predeterminadas atingidas por um equipamento, permitindo então que uma seqüência de operações especificadas continue ou se interrompa, ou então funcione como elemento de verificação da posição dos ditos dispositivos ou das condições atingidas pelo equipamento.
4	Contator ou Relé Mestre <i>Master Contactor or Relay</i>	Geralmente controlado pelo elemento mestre nº 1 (ou equivalente) e pelos dispositivos de proteção, fecha ou abre o circuito de controle necessário para colocar um equipamento em operação sob condições desejadas ou para retirá-lo de operação em condições anormais.
5	Dispositivo de Parada <i>Stopping Device</i>	Retira um equipamento de operação, mantendo-o nesta posição.
6	Disjuntor, Contator ou Chave de Partida <i>Starting Circuit Breaker or Switch</i>	Liga uma máquina à sua fonte de alimentação.
7	Disjuntor de Circuito Anódico <i>Anode Circuit Breaker</i>	É utilizado no circuito de placa de retificador de potência, com a finalidade primária de interromper o circuito do retificador no caso de ocorrência de um arco de retorno
8	Chave de controle de potência <i>Control Power Switch</i>	Liga ou desliga a fonte de potência fornecida ou recebida por um barramento ou equipamento de controle.
9	Dispositivo de Inversão <i>Reversing Device</i>	Inverte o campo de uma máquina ou desempenha quaisquer outras funções de inversão.
10	Chave de Seqüência de unidades <i>Unit Sequence Switch</i>	Usada em equipamentos constituídos por diversas unidades, para variar a seqüência na qual as diversas unidades são colocadas ou retiradas de serviço.
11	Transformador de Controle <i>Control Power Transformer</i>	Serve como fonte de tensão para alimentação dos dispositivos de controle em corrente alternada.
12	Dispositivo de Sobrevelocidade <i>Overspeed Device</i>	Ligado diretamente à máquina rotativa, opera para a velocidade acima de um valor pré-fixado.

<b>13</b>	Dispositivo de Velocidade Síncrona <i>Synchronous Speed Device</i>	Opera aproximadamente à velocidade síncrona da máquina. NOTA: é geralmente um dispositivo, tal como: chave centrífuga, relé de escorregamento de frequência, relé de tensão, relé de sobrecorrente, etc..
<b>14</b>	Dispositivo de Subvelocidade <i>Underspeed Device</i>	Opera para velocidade da máquina da máquina abaixo de um valor pré-fixado.
<b>15</b>	Dispositivo Equalizador de velocidade ou Frequência <i>Speed or Frequency Matching Device</i>	Opera de modo a ajustar e conservar a velocidade ou frequência de uma máquina ou sistema iguais ou aproximadamente iguais àquelas de uma outra máquina, fonte geradora ou sistema.
<b>16</b>	Dispositivo de Controle de Carga de Bateria <i>Battery Charging Control Device</i>	Carrega a bateria, com controle automático de tensão. NOTA: é normalmente um grupo motor gerador ou retificador.
<b>17</b>	Chave de Derivação ou Descarga <i>Shunting or Discharge Device</i>	Abre ou fecha um circuito colocado em paralelo com qualquer componente de um equipamento (exceto resistores), tal como o campo ou armadura de uma máquina, um capacitor ou um reator. NOTA: não se incluem aqui os dispositivos que efetuam paralelos necessários à partida de uma máquina (como os dispositivos 6, 42 ou seus equivalentes), e excluído também o dispositivo 73 que serve para ligar ou desligar resistores.
<b>18</b>	Dispositivo Acelerador ou Desacelerador <i>Accelerating or Decelerating Device</i>	Fecha ou provoca fechamento de circuitos que são utilizados para aumentar ou diminuir a velocidade de uma máquina.
<b>19</b>	Relé ou Contator de Transição entre Partida e a Velocidade Normal <i>Starting to Running Transition Contactor or Relay</i>	Opera para transferir as ligações da máquina, da condição de partida para a de funcionamento normal.
<b>20</b>	Válvula Operada Eletricamente <i>Valve</i>	Válvula operada por solenóide ou por motor, e destinada à utilização em tubulações de vácuo, ar, gases, óleo, água ou similares. NOTA: A função válvula pode ser indicada por meio de palavras que a descrevam como “freio ou redução de pressão”, inseridas no título que a define, por exemplo, “válvula de freio operada eletricamente”.
<b>21</b>	Relé de Distância <i>Distance Relay</i>	Opera quando a impedância, admitância ou reatância de um circuito protegido diminui (ou aumenta) em relação a um valor pré-fixado. NOTA: Na ausência de números simbólicos para a definição dos outros tipos de relés de distância (o relé de impedância nada mais é que um caso particular de relé de distância), o nº 21 é normalmente utilizado para representar qualquer tipo de relé pertencente ao grupo de relés de distância. Ao lado do símbolo deverá ser acrescentada simbologia adicional como exemplificado abaixo: 21 r - relé de distância tipo reatância 21 mho - relé de distância tipo admitância 21 z - relé de distância tipo impedância

<b>22</b>	Contator ou Disjuntor Equalizador <i>Equalizer Circuit Breaker or Contactor</i>	Controla, abre ou fecha as ligações de equalização ou o balanço da corrente de campo de uma máquina ou do equipamento de regulação em instalação dotada de diversas unidades.
<b>23</b>	Dispositivo Controlador de Temperatura <i>Temperature Regulating Device</i>	Atua no sentido de elevar ou baixar a temperatura de uma máquina, equipamento ou meio ambiente, quando a sua temperatura ficar inferior ou superior a valores predeterminados.
<b>24</b>	Disjuntor, Contator, ou Seccionadora de Interligação de Barras <i>Bus Tie Circuit Breaker Contactor or Switch</i>	Interliga ou isola barras
<b>25</b>	Dispositivo de Sincronismo ou Verificação de Sincronismo <i>Synchronising or Synchronism-Check Device</i>	Atua de forma a permitir ou provocar o paralelismo de dois circuitos, quando ambos estão dentro de limites pré-fixados de tensão, frequência e ângulo de fase.
<b>26</b>	Dispositivo Térmico <i>Apparatus Thermal Device</i>	Opera em desejados valores de temperatura no equipamento onde está aplicado
<b>27</b>	Relé de Subtensão <i>Undervoltage Relay</i>	Opera para tensão abaixo do valor predeterminado
<b>28</b>	Detector de Chama Flame Detector	Indica a presença de chama em equipamentos, tais como, uma turbina a gás ou caldeira a vapor.
<b>29</b>	Seccionadora <i>Isolating Circuit Breaker, Contactor or Switch</i>	Fecha ou abre circuitos sem carga.
<b>30</b>	Relé Anunciador <i>Annunciator Relay</i>	É rearmado manualmente e dá certo número de indicações visuais distintas, quando da atuação de dispositivos de proteção, podendo ainda ser utilizado para efetuar uma operação de bloqueio.
<b>31</b>	Dispositivo de Excitação Separada <i>Separate Excitation Device</i>	Liga um circuito, como o do campo paralelo de um conversor síncrono, a uma fonte de excitação separada durante a seqüência de partida; ou energiza os circuitos de excitação e ignição de um retificador de potência.
<b>32</b>	Relé de Direcional de Potência <i>Directional Power Relay</i>	Atua quando um determinado valor de potência flui numa determinada direção, ou quando há inversão de potência devido a um arco de retorno nos circuito de placa ou de catodo de um retificador de potência.
<b>33</b>	Chave de posição <i>Position Switch</i>	Fecha ou abre seus contatos quando o dispositivo principal, ou peça do equipamento, que não tenha número de função, atinge uma determinada posição (exemplo: chaves auxiliares de disjuntores, etc.)
<b>34</b>	Dispositivo Mestre de Seqüência <i>Master Sequence Device</i>	É uma chave de múltiplos contatos que fixa a seqüência de operação do dispositivo principal durante a partida ou parada, ou durante outra seqüência de operação.
<b>35</b>	Dispositivo de Operação de Escovas ou Curto Circuito de Anel Coletor <i>Brush Operating or Slip Ring Short Circuiting Device</i>	É utilizado para levantar, abaixar ou deslocar as escovas de uma máquina ou para curto-circuitar seus anéis coletores ou para engatar ou desengatar os contatos de um retificador mecânico.

<b>36</b>	Dispositivo de Polaridade ou Dispositivo de Tensão Polarizada <i>Polarity or Polarizing Voltage Device</i>	Opera ou permite a operação de um outro dispositivo apenas em uma polaridade desejada, ou verifica uma tensão polarizada em um equipamento.
<b>37</b>	Relé de Subcorrente ou de Subpotência <i>Under Current or Under Power Relay</i>	Opera para valores de corrente ou potência abaixo de um valor pré-fixado.
<b>38</b>	Dispositivo de Proteção de Mancais <i>Bearing Protective Device</i>	Opera para valores excessivos de temperatura nos mancais.
<b>39</b>	Controlador de Condições Mecânicas <i>Mechanical Condition Monitor</i>	Opera em condições mecânicas anormais (exceto aquela associadas aos mancais sob função 38), tais como vibração excessiva, excentricidade, expansão, choque, falha de vedação, etc..
<b>40</b>	Relé de Campo <i>Field Relay</i>	Opera para um valor de corrente de campo da máquina abaixo do normal, ou para um valor excessivo da componente reativa da corrente da armadura da máquina C.A., indicando excitação baixa no campo.
<b>41</b>	Chave ou Disjuntor de Campo <i>Field Circuit Breaker, Contactor or Switch</i>	Opera para aplicar e/ou retirar a excitação de uma máquina.
<b>42</b>	Disjuntor de Serviço <i>Running Circuit Breaker or Contactor</i>	Sua principal função é ligar uma máquina à sua fonte de tensão de serviço, após ter sido conduzida à velocidade desejada.
<b>43</b>	Chave Seletora ou de Transferência <i>Manual Transfer or Selector Device</i>	Operada manualmente transfere o circuito de controle para modificar o plano de operação do equipamento de manobra ou de alguns dos dispositivos.
<b>44</b>	Relé de Partida <i>Unit Sequence-Starting Contactor or Relay</i>	Opera num sistema constituído de várias unidades, de forma a colocar em funcionamento uma determinada unidade, no caso de falha ou impossibilidade de operação da unidade que normalmente a precederia.
<b>45</b>	Monitor de Condições Atmosféricas <i>Atmospheric Condition Monitor</i>	Opera na ocorrência de condições atmosféricas anormais, tais como, gases nocivos, misturas explosivas, fumaça ou fogo.
<b>46</b>	Relé de Corrente de Seqüência Negativa ou de Corrente de Inversão de Fase <i>Reverse Phase or Phase Balance Current Relay</i>	Opera quando as correntes polifásicas são de seqüência inversa de fase ou quando são desequilibradas que possuem componentes de seqüência negativa de fase acima de um dado valor.
<b>47</b>	Relé de Tensão de Seqüência de Fase <i>Phase Sequence Voltage Relay</i>	Opera com um valor predeterminado de tensão polifásica na seqüência de fase desejada.
<b>48</b>	Relé de Seqüência Incompleta <i>Incomplete Sequence Relay</i>	Retorna o equipamento à posição normal ou desligado e o bloqueia se a seqüência normal de partida, operação ou parada não é devidamente completada dentro de um tempo pré-determinado.

<b>49</b>	Relé Térmico para Máquina ou Transformador <i>Machine or Transformer Thermal Relay</i>	Opera quando a temperatura da máquina, transformador de potência ou retificador de potência excede a um valor pré-determinado.
<b>50</b>	Relé de Sobrecorrente Instantâneo <i>Instantaneous Overcurrent or Rate Rise Relay</i>	Opera instantaneamente para uma corrente acima de um valor pré-determinado.
<b>51</b>	Relé de Sobrecorrente temporizado em circuito C.A. <i>A.C. Time Over Current Relay</i>	Opera com uma característica de tempo definido ou uma característica de tempo inverso, quando a corrente ultrapassa o valor pré-fixado, em circuito de corrente alternada.
<b>52</b>	Disjuntor de Corrente Alternada <i>A.C. Circuit Breaker</i>	Fecha ou abre circuitos de potência de C.A. em quaisquer condições de operação.
<b>53</b>	Relé de Excitatriz ou do Gerador de C.C. <i>Exciter or D.C. Generator Relay</i>	Aumenta a excitação do campo de máquinas de C.C. durante a partida ou opera quando a tensão da máquina atinge um valor pré-fixado.
<b>54</b>	Disjuntor C.C. de Alta Velocidade <i>High Speed D.C. CircuitBreaker</i>	Inicia a redução de corrente no circuito principal de C.C. em 0,01 s ou menos, após a ocorrência de uma sobrecorrente
<b>55</b>	Relé de Fator de Potência <i>Power Factor Relay</i>	Opera para fatores de potência acima ou abaixo de um valor pré-fixado.
<b>56</b>	Dispositivo ou Relé de Aplicação de Campo <i>Field Application Relay</i>	Controla automaticamente a aplicação da excitação do campo para um motor de C.A. em um determinado ponto do ciclo de escorregamento.
<b>57</b>	Dispositivo de Curto-Circuito ou de Aterramento <i>Short Circuit or Grounding Device</i>	Opera de modo a curto-circuitar ou aterrar um circuito, sob a ação de um impulso manual ou automático
<b>58</b>	Relé de Falha de Retificação <i>Rectification Failure Relay</i>	Opera quando uma ou mais placas de um retificador de potência falha no disparo.
<b>59</b>	Relé de Sobretensão <i>Overvoltage Relay</i>	Opera para uma tensão acima de um valor pré-fixado.
<b>60</b>	Relé de Equilíbrio de Tensão <i>Voltage Balance Relay</i>	Opera quando a diferença entre as tensões de dois circuitos excede a um valor pré-fixado.
<b>61</b>	Relé de Equilíbrio de Corrente <i>Current Balance Relay</i>	Opera quando a diferença entre as correntes de dois circuitos excede a um valor pré-fixado.
<b>62</b>	Relé de Temporização <i>Time Delay Stopping or Opening Relay</i>	Opera em combinação com dispositivos que iniciam a retirada de serviço, parada ou abertura de circuitos em uma seqüência automática, bem como em um sistema de relés de proteção.
<b>63</b>	Relé de Pressão de Líquido ou Gás ou Relé de Vácuo <i>Liquid or Gas Pressure or Vacuum Relay</i>	Opera para um dado valor de pressão de líquido ou gás, ou para uma dada taxa de variação destes valores. Ex.: Relé Buchhols

<b>64</b>	Relé de Proteção à Terra (Relé de Carcaça) <i>Ground Protective Relay</i>	Opera em caso de defeito à terra no isolamento da máquina, transformador ou outro equipamento ou ainda em caso de descargas em máquinas de corrente contínua. Esta função no entanto não se aplica aos dispositivos que são ligados no residual ou neutro do secundário dos transformadores de corrente conectados em um circuito de um sistema normalmente aterrado.
<b>65</b>	Regulador de Velocidade <i>Governor</i>	É um conjunto de equipamentos de controle fluídicos, elétricos ou mecânicos usados para regulação do fluxo de água, vapor ou outro agente para máquina motriz, com finalidade de regulação de velocidade.
<b>66</b>	Dispositivo de Estágios ou de Memória <i>Notching or Jogging Device</i>	Permite um número especificado de operações com intervalo de tempo pré-fixado, energização periódica de um circuito, acelerações e desacelerações intermitentes de uma máquina para posicionamento mecânico.
<b>67</b>	Relé de Sobrecorrente Direcional <i>A.C. Directional Overcurrent Relay</i>	Opera para um dado valor de sobrecorrente fluindo num sentido pré-fixado.
<b>68</b>	Relé de Bloqueio <i>Blocking Relay</i>	É um dispositivo que sob condições determinadas, fornece o sinal piloto para bloqueio da abertura de equipamentos de uma linha de transmissão no caso de defeitos externos à linha ou em outros equipamentos, ou ainda trabalha em conjunção com outros dispositivos para bloquear a abertura ou o religamento de algum equipamento no caso de falta de sincronismo com perda de estabilidade (out-of-step tripping) ou oscilação de potência sem perda de estabilidade (out-of-step blocking).
<b>69</b>	Dispositivo de Controle Permissivo <i>Permissive Control Device</i>	Tem geralmente duas posições, operado manualmente, em uma posição permite o fechamento de um disjuntor ou a colocação de um equipamento em operação e na outra posição evita que o disjuntor ou equipamento seja operado.
<b>70</b>	Reostato <i>Rheostat</i>	Usado para variar a resistência de um circuito em resposta a algum meio de controle elétrico.
<b>71</b>	Relé de Nível de Gás ou Líquido <i>Liquid or Gas Level Relay</i>	Opera para determinados valores de nível de gás ou líquido ou para taxas de variação destes valores.
<b>72</b>	Disjuntor para Circuito de Corrente Contínua <i>D.C. Circuit Breaker</i>	Fecha ou abre circuitos de potência de C.C. em quaisquer condições de operação.
<b>73</b>	Contator de Resistência de Descarga <i>Load-Resistor Contactor</i>	É utilizado para inserir ou colocar em paralelo num circuito, uma dada resistência de limitação, desvio ou indicação, ou ainda, para acionar o interruptor de uma resistência de aquecimento, ou uma lâmpada, ou ainda para retirar, ou colocar no circuito de um retificador de potência ou outra máquina, um resistor de carga regenerativa.
<b>74</b>	Relé de Alarme <i>Alarm Relay</i>	Usado para operar um sinal de alarme sonoro e/ou visual.

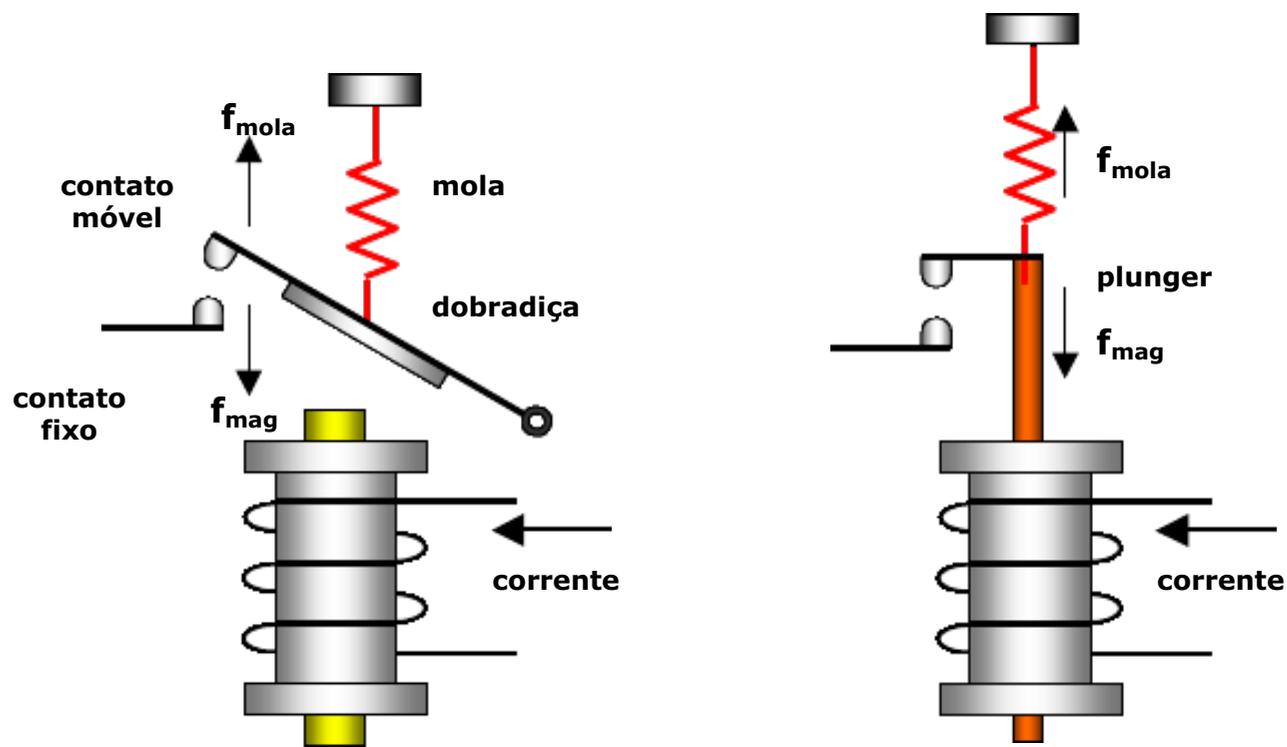
<b>75</b>	Mecanismo para Mudança de Posição <i>Position Changing Mechanism</i>	Utilizado num disjuntor do tipo móvel, para colocá-lo ou retirá-lo das posições, ligado, desligado e de teste.
<b>76</b>	Relé de Sobrecorrente em Circuito de Corrente Contínua <i>D.C. Overcurrent Relay</i>	Opera quando a corrente, em um circuito de corrente contínua, excedo o valor pré-fixado.
<b>77</b>	Transmissor de Pulso <i>Impulse Transmitter</i>	Usado para gerar ou transmitir pulsos, através de um circuito de telemedição ou fio piloto, para um dispositivo de recepção ou indicação remota.
<b>78</b>	Relé de Perda de Sincronismo <i>Phase Angle Measuring Relay</i>	Opera para um pré-determinado valor do ângulo de fase entre tensões ou entre correntes ou ainda entre tensão e corrente.
<b>79</b>	Relé de Religamento em Circuito de Corrente Alternada <i>A.C. Reclosing Relay</i>	Opera para controlar o religamento e o bloqueio de um interruptor ou religador de circuito de corrente alternada.
<b>80</b>	Relé de Fluxo de Líquido ou Gás <i>Liquid or Gas Flow Relay</i>	Opera para dados valores de fluxo de líquido ou gás ou taxas de variação dos mesmos.
<b>81</b>	Relé de Freqüência <i>Frequency Device</i>	Opera para um determinado valor de freqüência (que pode ser superior ou inferior à freqüência nominal do sistema - "over/under frequency"), ou ainda, uma determinada taxa de variação na freqüência.
<b>82</b>	Relé de Religamento em Corrente Contínua <i>D.C. Reclosing Relay</i>	Opera para controlar o religamento e o bloqueio de um interruptor de circuito de corrente contínua.
<b>83</b>	Relé de Controle Seletivo <i>Selective Control or Transfer Contactor or Relay</i>	Opera para selecionar automaticamente certas fontes ou condições em um equipamento ou ainda para realizar automaticamente uma operação de transferência.
<b>84</b>	Mecanismo de Operação <i>Operating Mechanism</i>	É um mecanismo elétrico completo, incluindo motor de operação, chaves de posição, etc., para um comutador de derivações, regulador de indução ou algum aparelho similar o qual não tem número de função.
<b>85</b>	Relé Receptor de Onda Portadora (Carrier) ou do Fio Piloto <i>Carrier or Pilot Wire Receiver Relay</i>	É um dispositivo cuja operação é efetuada ou impedida por um sinal emitido em conexão com um sistema de proteção constituído por relés direcionais que operam com onda portadora ou fio piloto de corrente contínua.
<b>86</b>	Relé de Bloqueio <i>Locking-out Relay</i>	Opera eletricamente, com rearme manual ou elétrico, de modo a desligar e bloquear um equipamento no caso de ocorrência de condições anormais.
<b>87</b>	Relé Diferencial <i>Differential Protective Relay</i>	Opera em função da diferença proveniente do desequilíbrio existente entre duas ou mais correntes ou outras grandezas elétricas quaisquer, medidas nos pontos extremos da área protegida.
<b>88</b>	Motor Auxiliar ou Motor- Gerador <i>Auxiliary Motor or Motor-Gener.</i>	É usado para operação de equipamentos auxiliares tais como: bombas, ventiladores, excitadores, amplificadores magnéticos rotativos, etc..
<b>89</b>	Seccionadora de Carga <i>Line Switch</i>	Utilizada para interromper ou isolar circuitos de potência em carga. Comandada eletricamente ou possuindo acessórios elétricos.

<b>90</b>	Dispositivo de Regulação <i>Regulating Device</i>	Atua de forma a regular a um certo valor, ou dentro de certos limites, grandezas tais como tensão, corrente, potência, velocidade, frequência, temperatura, e carga em máquinas, linhas de interligação ou outros equipamentos.
<b>91</b>	Relé Direcional de Tensão <i>Voltage Directional Relay</i>	Opera quando a tensão através de um disjuntor aberto ou de um contator excede um dado valor em sentido pré-fixado.
<b>92</b>	Relé Direcional de Tensão e Potência <i>Voltage or Power Directional Relay</i>	Permite ou provoca a ligação de dois circuitos quando a diferença de tensão entre eles excede um dado valor em um sentido predeterminado e causa o desligamento entre os dos circuitos quando a potência escoa entre eles e excede de um dado valor no sentido oposto.
<b>93</b>	Contator de Variação do Campo <i>Field Changing Contactor</i>	Aumenta ou diminui em um passo o valor da excitação de campo de uma máquina.
<b>94</b>	Relé de Desligamento ou de Permissão de Desligamento <i>Tripping or Trip-Free Relay</i>	Abre um disjuntor, contator ou equipamento, ou permite o imediato desligamento por outros dispositivos, ou evita o imediato religamento de um interruptor de circuito, que no caso abriria automaticamente mesmo que o circuito de fechamento fosse mantido ligado.
<b>95 a 99</b>	Uso específico	Usados somente em aplicações específicas em instalações individuais onde nenhum número de 01 a 94 seja adequado

## RELÉS DE SOBRECORRENTE DE INDUÇÃO (50/51)

### RELÉS INSTANTÂNEOS TIPO ATRAÇÃO MAGNÉTICA (TIPO DOBRADIÇA OU TIPO PLUNGER)

Sejam os relés instantâneos mostrados abaixo:



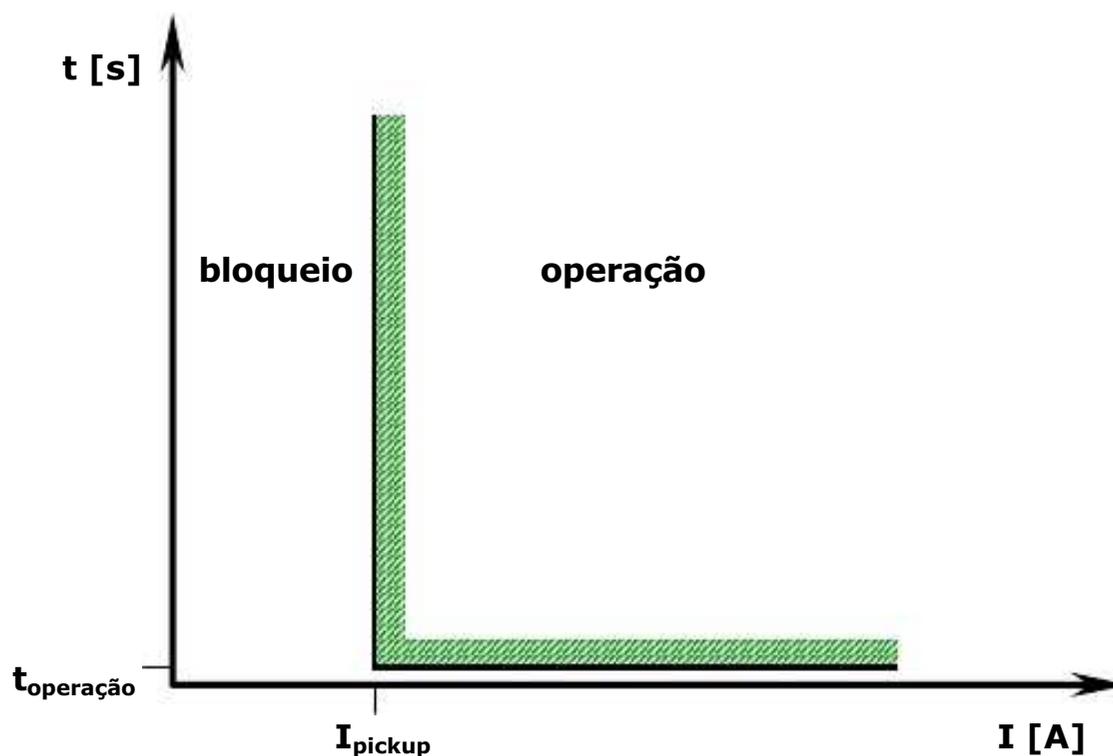
**Figura relé tipo dobradiça e tipo plunger.**

O princípio básico desses relés é vencer o efeito da atração mola. Uma vez superado conjugado de pick-up, começa-se o trajeto do contato fixo em direção ao móvel, com força cada vez mais intensa, pois, uma vez que a força de atração é proporcional ao quadrado da distância, ela aumenta muito mais rapidamente a medida em que a distância diminui, tornando esses dispositivos muito rápidos.

A equação de conjugados desse tipo de função é dada por:

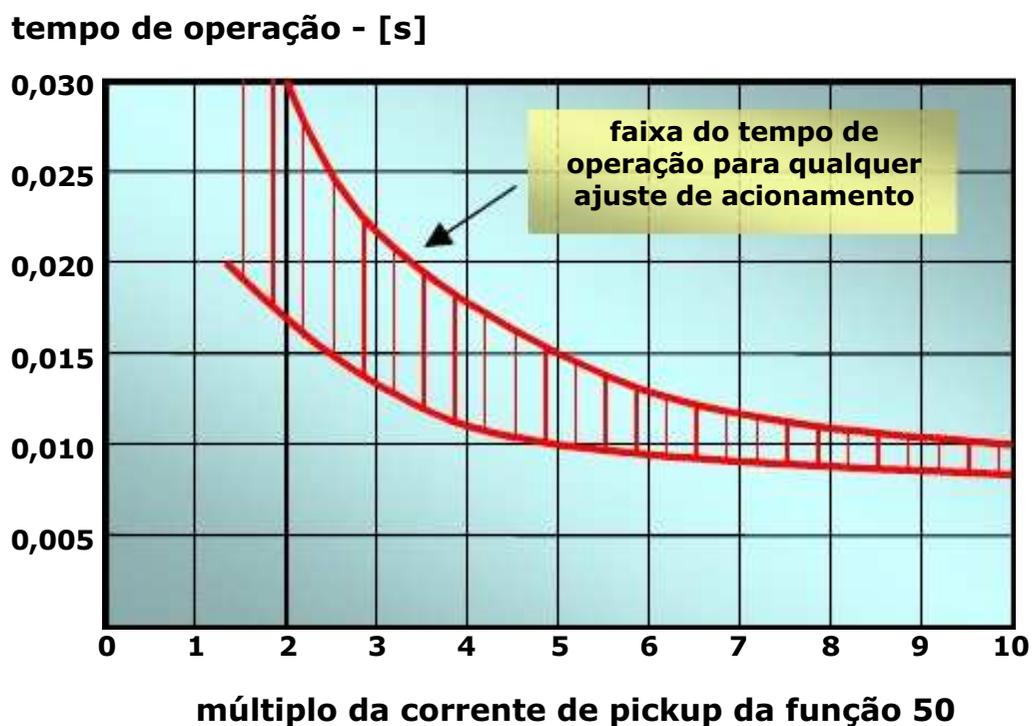
$$C_T = K \cdot I^2 - C_{MOLA}$$

A característica de operação bloqueio dessas unidades é mostrada na figura abaixo:



**Figura: característica de operação - bloqueio dos relés instantâneos (por exemplo, função 50).**

Na verdade, os relés comerciais apresentam algum atraso na atuação de suas funções instantâneas. Desta forma, próximo do *pickup* os valores de tempo são incertos, conforme mostra a figura abaixo:



**Figura: característica operação - bloqueio real de uma função 50 comercial.**

Os relés de tempo definido, a princípio, utilizam a mesma filosofia da função instantânea para dar partida a um temporizador. Assim, uma vez a função instantânea tendo partido, contabiliza-se um tempo fixo até a atuação dos contatos. A figura a seguir mostra a característica de operação bloqueio de uma função de tempo definido.

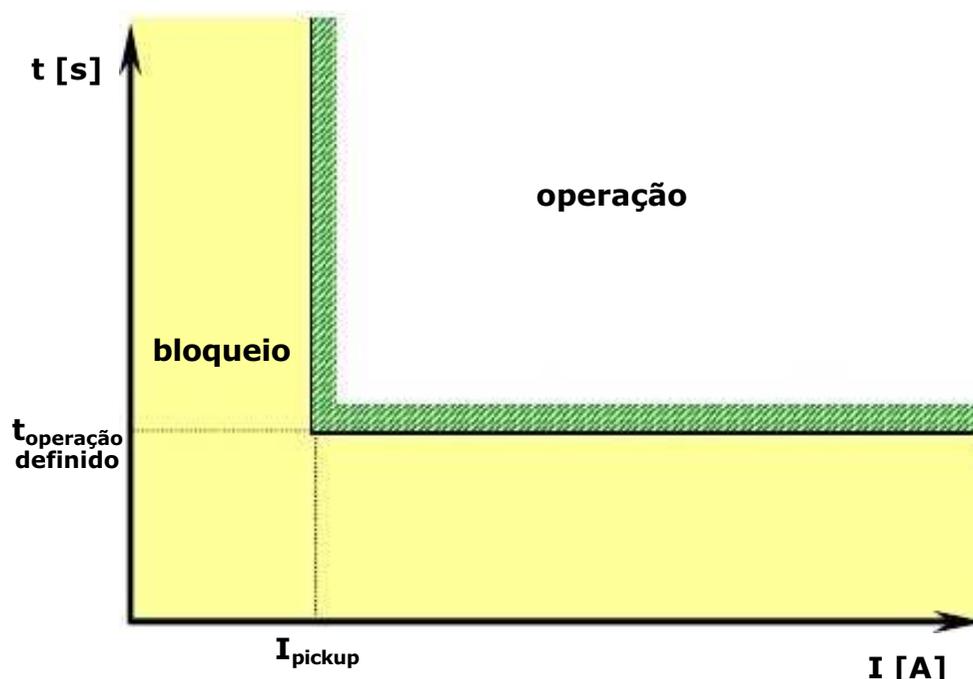


Figura: função de proteção de tempo definido.

### RELÉS DE TEMPO INVERSO

Em eletricidade, todos os dispositivos apresentam uma certa suportabilidade devido ao efeito térmico da corrente. Normalmente este fenômeno está associado ao que chamamos  $I^2 \cdot t$ , expressão que mostra a proporcionalidade quadrática inversa da corrente em função do tempo. Assim, para um mesmo tempo, temos uma corrente máxima associada, a qual o equipamento estará em seu limite térmico operacional. A curva que define este fenômeno é chamada de curva inversa, pois, quando plotada em um gráfico ( $I \times t$ ) percebe-se a proporcionalidade inversa entre essas duas grandezas, conforme mostra a figura a seguir.

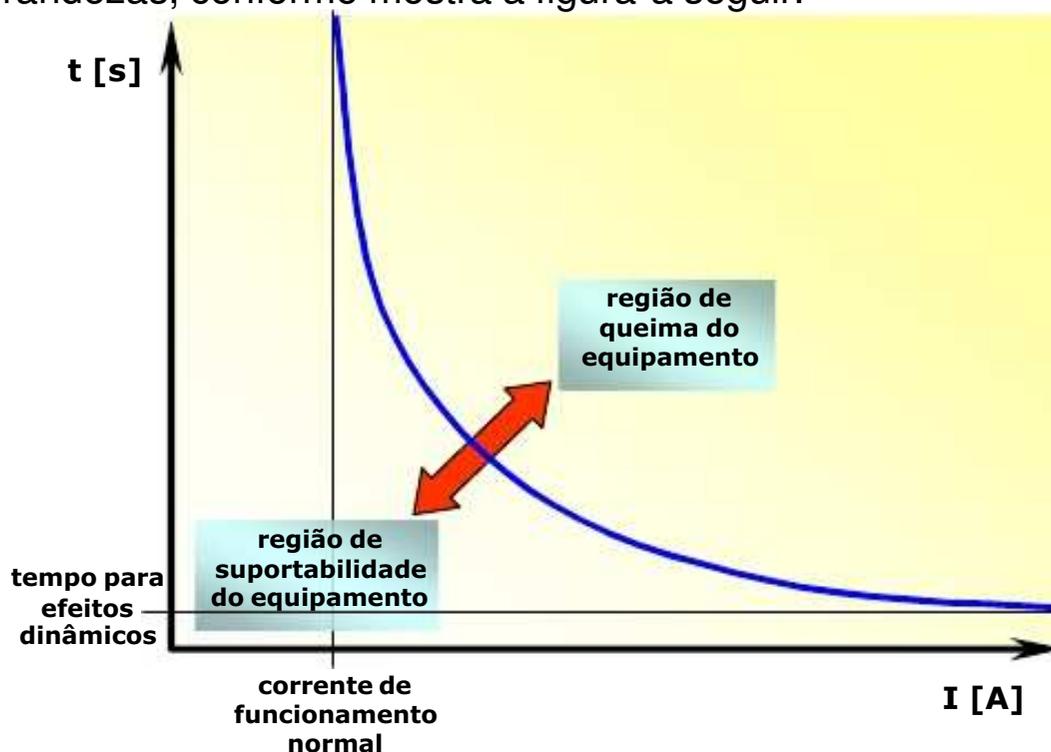


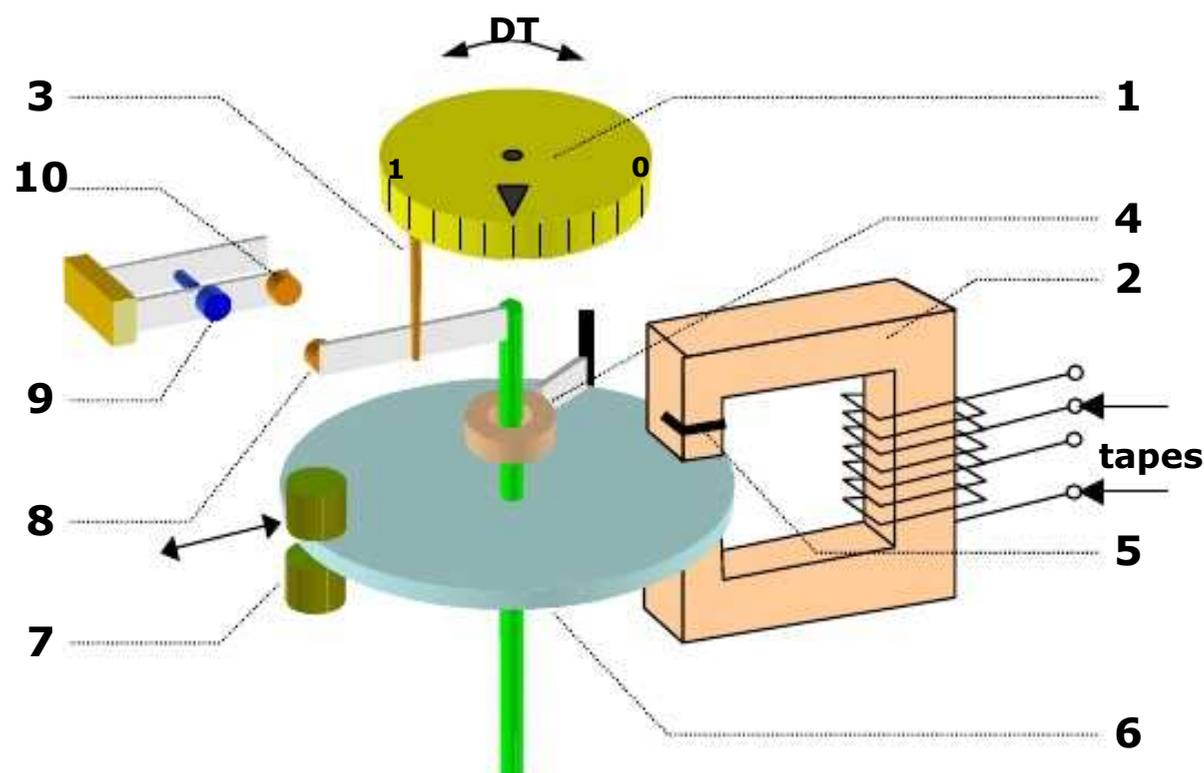
Figura: curva  $I^2 t$  de suportabilidade de equipamentos elétricos.

Para proteger um tal equipamento, precisa-se de um dispositivo de proteção que possa acompanhar essa característica de suportabilidade. Neste sentido, destacam-se algumas observações:

- a curva do relé deverá ficar abaixo da curva térmica do equipamento, guardando-se uma certa folga de tempo entre a curva  $I^2t$  e a curva do relé;
- em nenhum ponto as curvas  $I^2t$  e a do relé poderão se cruzar;
- evita-se deixar muita folga de tempo entre as duas curvas. Devido a desligamentos desnecessários, a superproteção é tão inadequada quanto a subproteção.

Desde os primórdios da eletricidade, sabia-se deste comportamento dos equipamentos elétricos, razão pela qual desenvolveu-se o relé de sobrecorrente de tempo inverso (51 ANSI), para atender adequadamente à proteção.

O princípio de funcionamento do relé 51 eletromecânico é mostrado na figura a seguir:



**Figura: relé 51 eletromecânico**

onde:

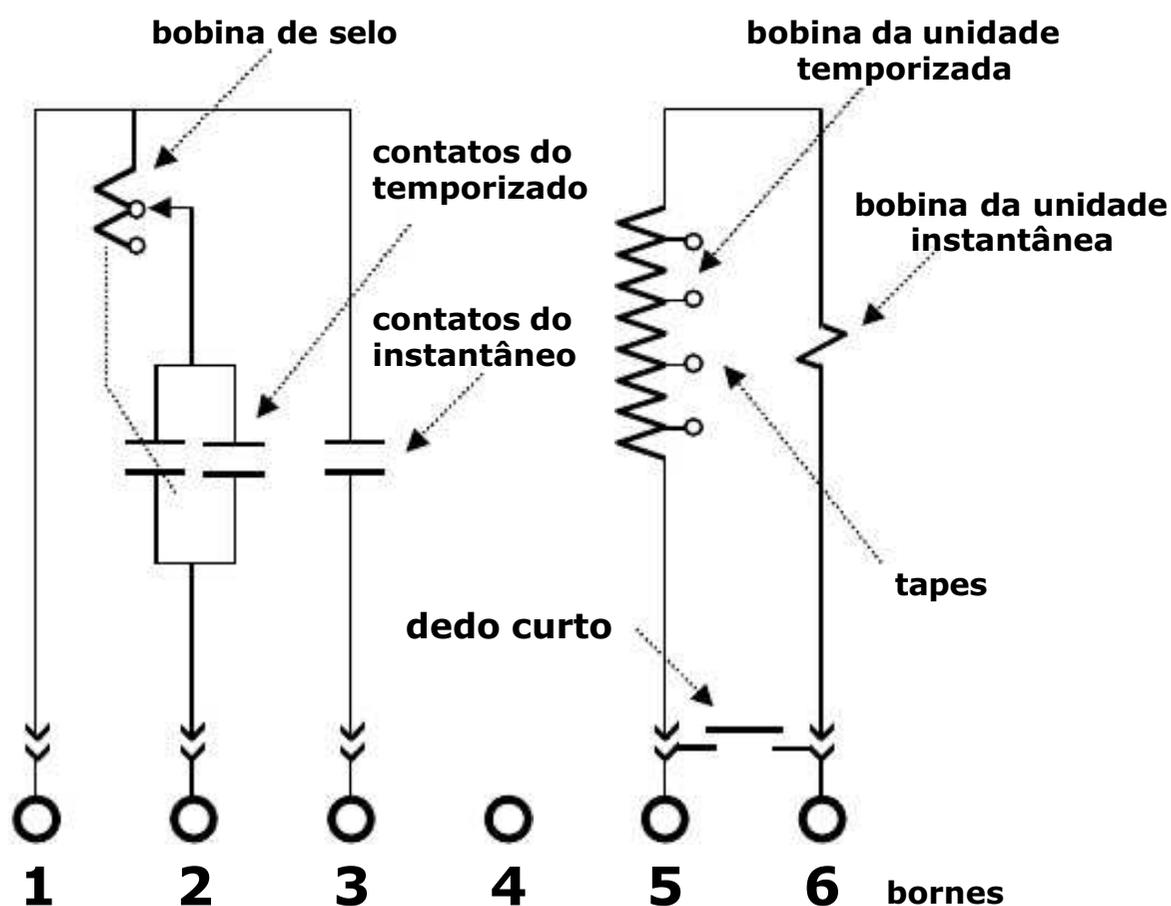
1. ajuste de DT (dispositivo de tempo)
2. ajuste de tape da bobina de corrente
3. batente do contato móvel (posição ajustável pelo DT)
4. mola antagônica (torção ajustável)
5. anel de defasagem
6. disco de alumínio
7. ímã permanente
8. contato móvel
9. ajuste da posição do contato fixo (parafuso)
10. contato fixo

Sendo o torque eletromagnético maior que o efeito da mola, o disco partirá com velocidade constante até que o contato móvel encoste no contato fixo. Dependendo da posição do ímã permanente, a velocidade poderá ser maior ou menor fazendo com que os contatos se toquem mais cedo ou mais tarde.

Uma vez retirada a corrente da bobina, o disco volta à sua posição original, fazendo com que o contato móvel volte para o seu batente. Estando esse batente mais avançado (DT pequeno) ou mais recuado (DT grande) em relação ao contato fixo, o disco demorará menos ou mais tempo respectivamente para que os contatos se encostem para a mesma corrente aplicada.

A corrente mínima para a partida do disco é chamada de corrente de pick-up ( $I_{PICKUP}$ ) cujo valor deve coincidir com o valor ajustado no tape da bobina de corrente.

Como exemplo, é visto o diagrama elétrico interno de um relé eletromecânico bastante conhecido (IAC 51 da GE).



**Figura: diagrama elétrico de um relé eletromecânico.**

A bobina da unidade temporizada é responsável pelo torque motorizante do disco e possui vários tapes, no caso particular do relé tratado, esses tapes em ampéres são:

- 4 - 5 - 6 - 10 - 12 - 16 ou
- 1,5 - 2 - 2,5 - 3 - 4 - 5 - 6 ou
- 0,5 - 0,6 - 0,8 - 1,0 - 1,2 - 1,5 - 2.

Faixa que deve ser escolhida na especificação. Felizmente, os modernos relés numéricos permitem uma seleção mais ampla de tapes, por exemplo de 0,1 A a 10,0 A em passos de 0,1 A.

Em série com essa primeira bobina, existe a bobina da unidade instantânea que, para o relé em questão, o valor de  $I_{PICKUP-50}$  instantâneo é ajustável continuamente na faixa de 10 - 40 A ou 20 - 80 A, conforme especificação.

Nesse relé, os bornes 1 e 3 são as saídas do contato da unidade instantânea ao passo que os bornes 1 e 2 são as saídas do contato temporizado.

Normalmente, quando a unidade instantânea não estiver propositalmente bloqueada, curto circuita-se os bornes 2 e 3.

A bobina de selo, juntamente com seu contato, propicia uma maior capacidade de condução de corrente para o comando de abertura do disjuntor devido aos contatos temporizados serem peças frágeis. Além disso, providenciam o selo desses contatos. Para o relé em questão, a bobina de selo tem 2 tapes: 0,2 ou 2,0 A para atuação.

O dedo curto é um contato que se fecha quando se retira o pente de conexão do relé, fazendo com que o secundário do TC que alimenta os bornes 5 e 6 fiquem curto-circuitados nesse momento. a figura a seguir mostra uma família de curvas temporizadas.

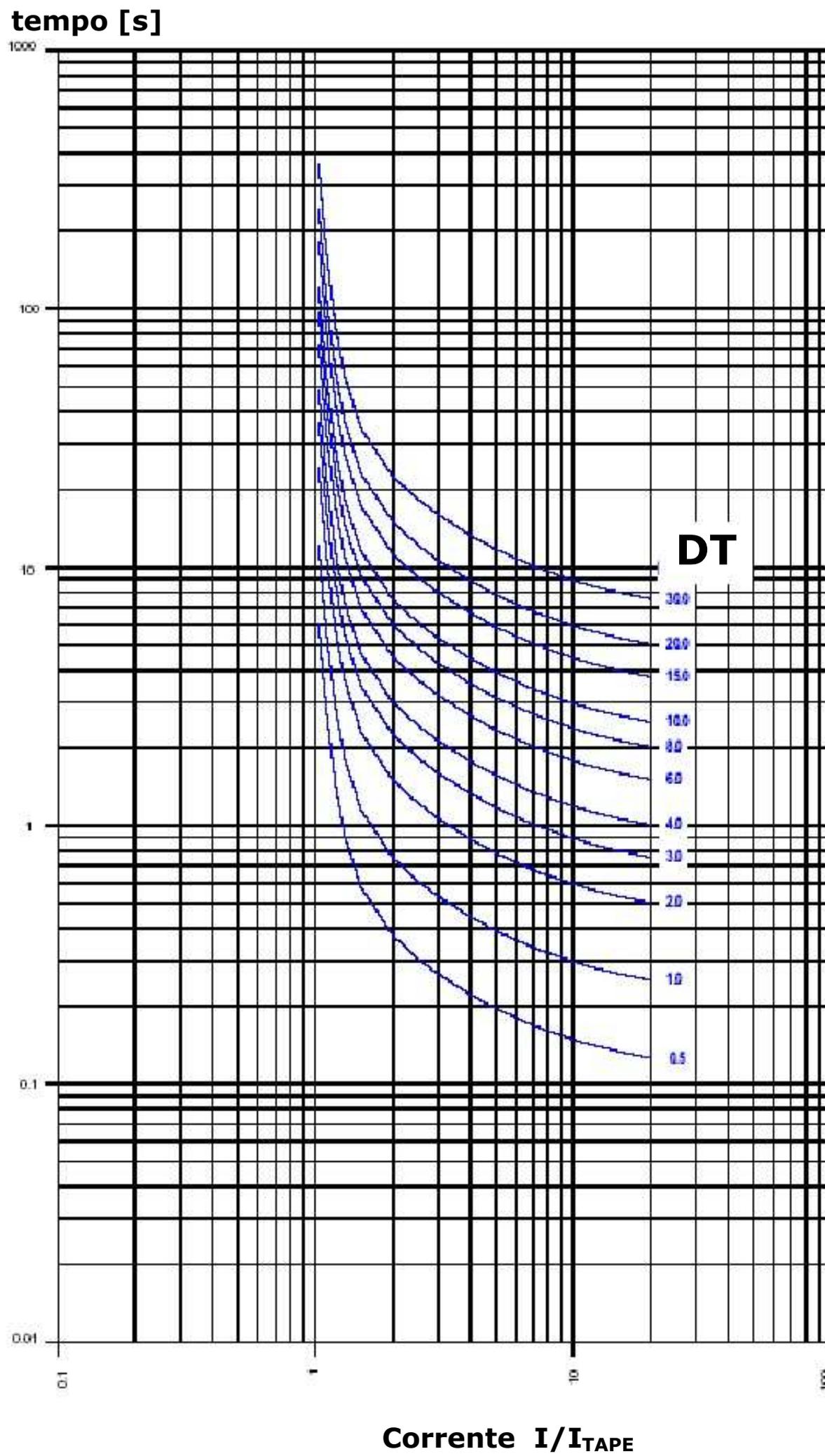


Figura: curvas temporizadas para o relé IAC51. (padrão GE)

## CONEXÕES DOS RELÉS DE SOBRECORRENTE

### RELÉS DE FASE

#### Conexão 3 x 0

Protegem equipamentos e sistemas contra curtos circuitos, exercendo o controle do tempo que tais sistemas ou equipamentos podem ficar submetidos a esses valores elevados de corrente (observa-se os limites térmicos admissíveis e respeita-se a coordenação seletiva entre os demais dispositivos de proteção).

A alimentação desses relés é feita normalmente através de uma conexão estrela aterrada dos TC's, cujas correntes secundárias de cada fase, alimentam as correspondentes relés.

A figura a seguir mostra o esquema 3 x 0, que é constituído por 3 relés de fase e nenhum de neutro.

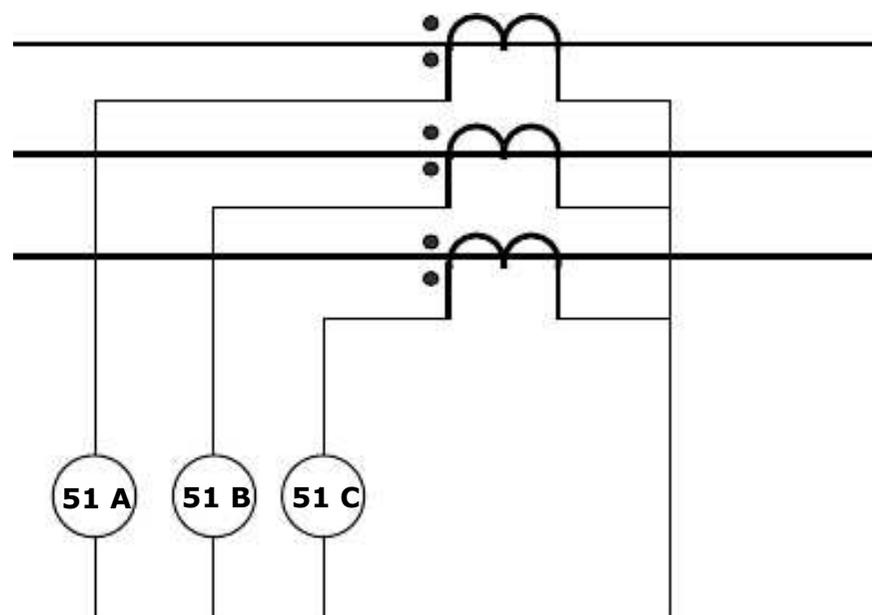
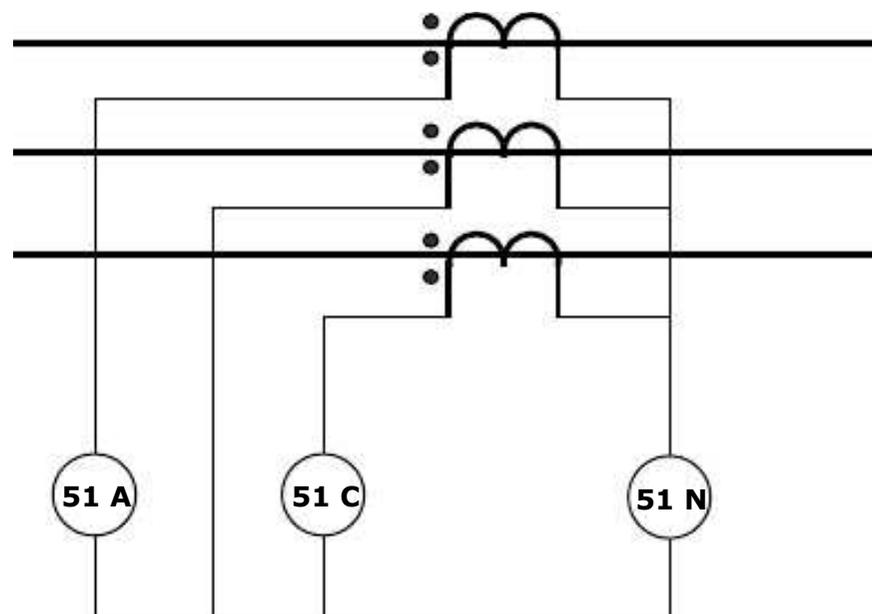


Figura: conexão 3 x 0 de relés de sobrecorrente.

### Conexão 2 x 1

Em algumas instalações industriais mais simples, é usual encontrarmos apenas dois relés de fase e um de neutro, conhecido como conexão 2 x 1, conforme mostra a figura a seguir.



**Figura: conexão 2 x 1 de relés de sobrecorrente.**

Desvantagens da conexão 2 x 1:

- confiabilidade menor para curtos bifásicos, pois nem sempre há redundância;
- na manutenção de um relé, o sistema ficará sem proteção completa;
- desequilíbrio originado pelas diferentes cargas impostas aos TC's fazendo com que uma certa corrente flua pelo neutro. Neste caso o relé de neutro deve ser dessensibilizado.

### RELÉS DE TERRA

São destinados a proteger o sistema contra faltas à terra. Esses valores de falta podem ser controlados através das resistências de aterramento instaladas no sistema, de forma que em geral, tais correntes são relativamente baixas, impondo menor solicitação térmica aos equipamentos envolvidos.

Para a proteção de sobrecorrente de neutro, existem três configurações bastante usuais:

- Conexão residual (conexão 3 x 1)
- Relé de neutro
- Conexão "Ground Sensor"

### 1. Conexão residual (conexão 3 x 1)

A figura a seguir mostra essa conexão:

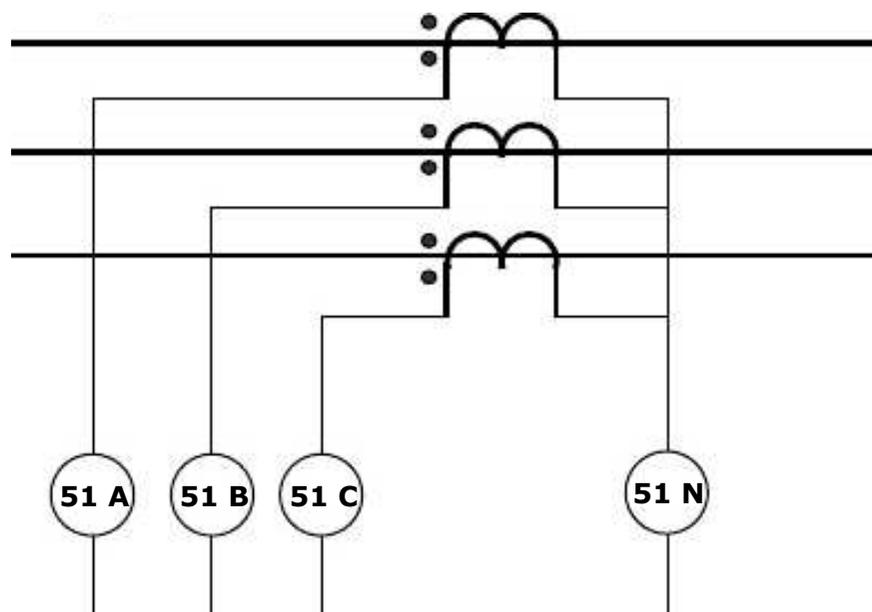


Figura: conexão residual (conexão 3 x 1).

Deve-se observar que durante um curto circuito fase-terra no sistema, a corrente secundária do TC que alimenta o relé não corresponde diretamente  $I_{\text{PRIMÁRIA}} / \text{RTC}$  conforme era de se esperar. Isso ocorre devido à parcela desviada para a magnetização dos TC's das outras duas fases não envolvidas no curto, conforme mostra a figura a seguir. Isso implica em uma desensibilização do relé residual 51N comparativo aos dois outros esquemas.

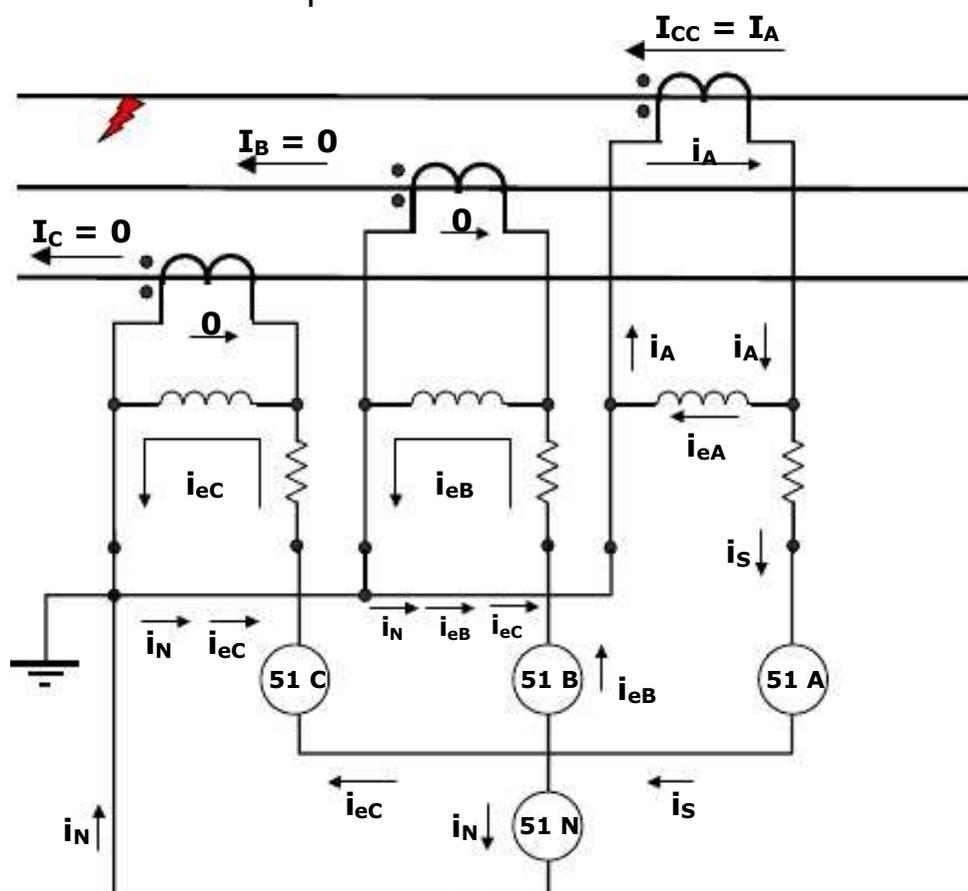
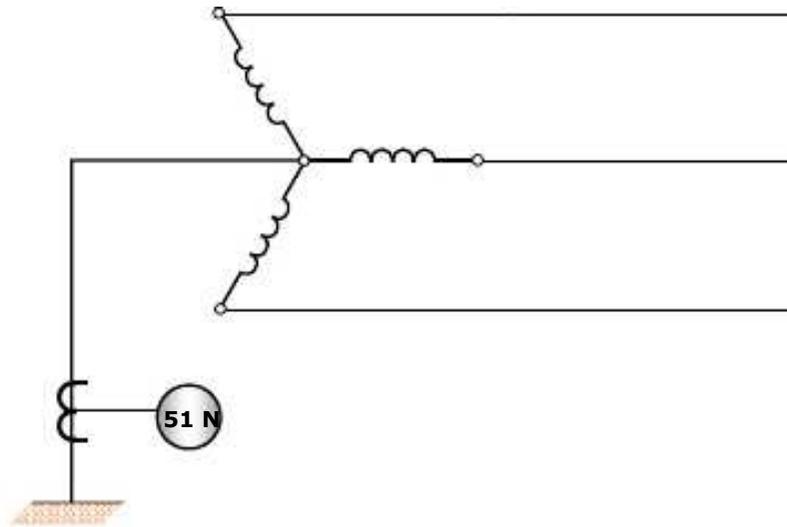


Figura: conexão residual: problema do desvio de corrente.

## 2. Relé de neutro

A figura a seguir mostra essa conexão:

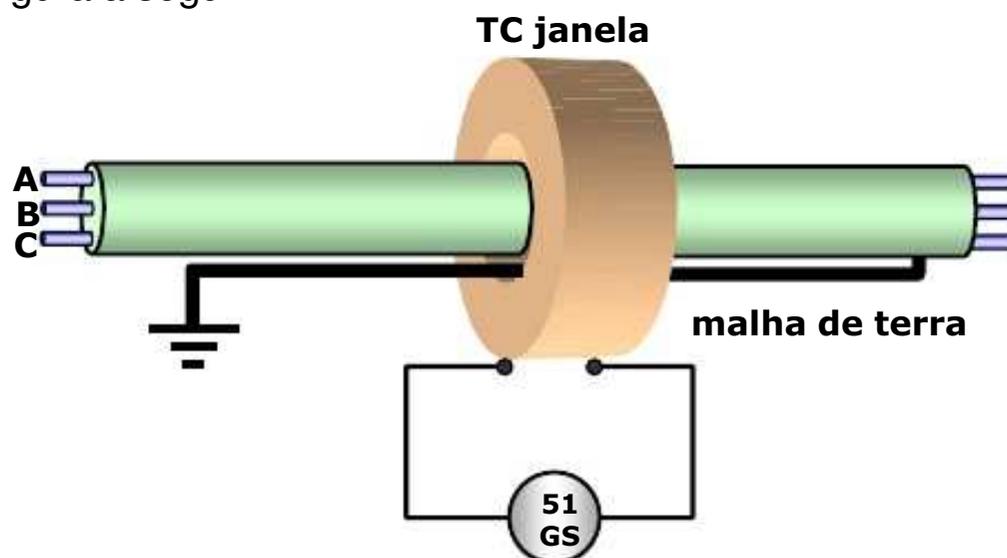


**Figura: relé de neutro.**

A RTC deve ser escolhida em função do nível de curto circuito fase terra esperado e em consequência disso, a sensibilidade da proteção fica como tal definida.

## 3. Conexão “Ground Sensor”

Seja a figura a seguir:



**Figura: conexão “Ground Sensor”**

Esta conexão é mais limitada em suas aplicações e normalmente exige uma delicada análise dos valores de correntes e impedâncias entre o relé e o TC que o alimenta. ( $50-5\text{ A}$ ;  $12,5\text{ VA}$ ;  $I_{\text{PICKUP}} = 0,5\text{ A}$ ;  $Z = 4\Omega \Rightarrow I_{\text{PRIMÁRIA}} = 5\text{ A}$ ).

A escolha de uma ou outra conexão, é função da sensibilidade exigida, do tipo de equipamento protegido, do custo envolvido, dos níveis de corrente circulantes, etc..

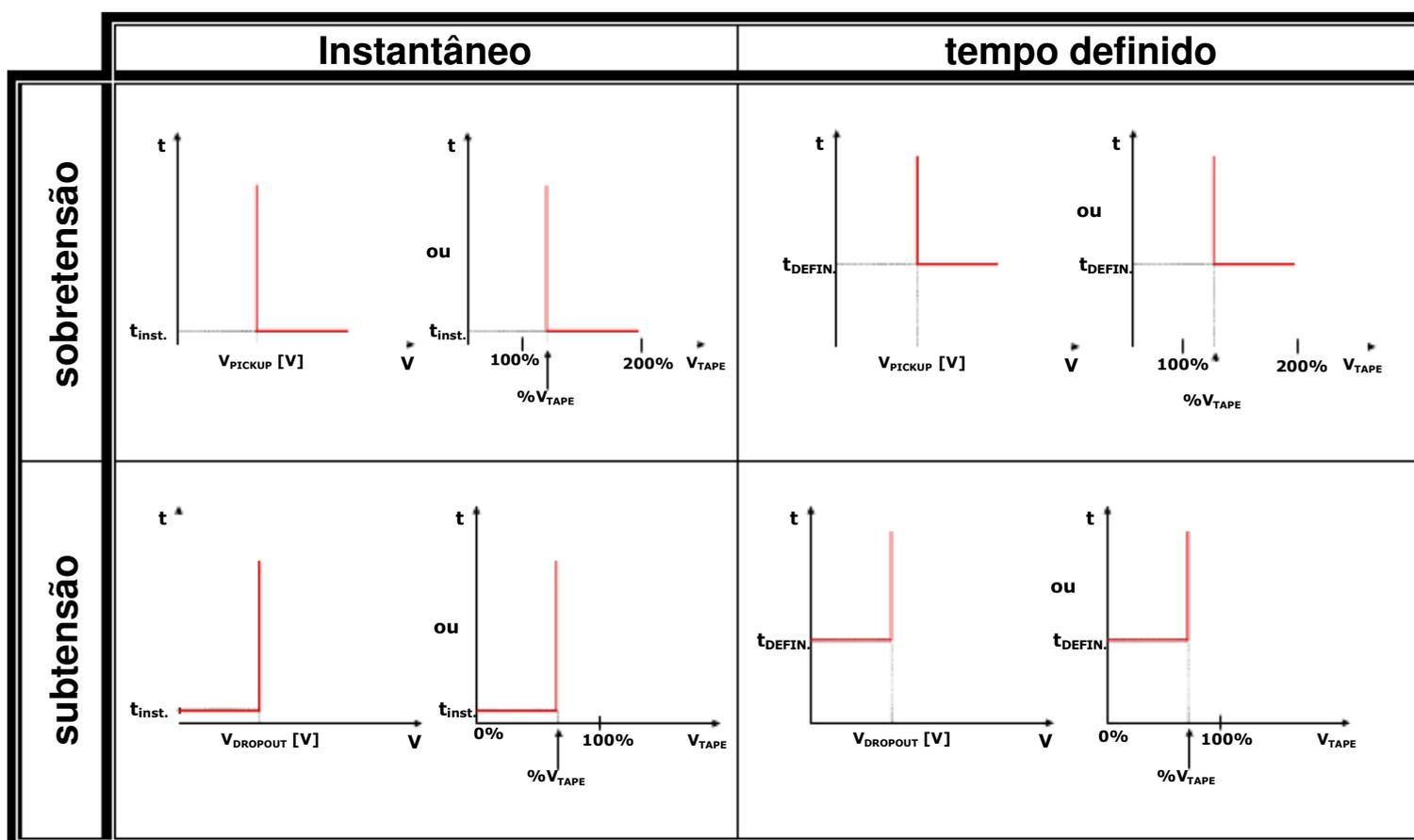
**RELÉS DE SUB E SOBRETENSÃO (27/59)**

Há basicamente três tipos de relés de sub e sobretensão ne que diz respeito ao tempo de operação:

- tempo instantâneo;
- tempo definido e;
- tempo inverso.

Uma vez atingido o pickup no relé de sobretensão, ou dropout no relé de subtensão, os relés instantâneos deverão operar com um pequeno atraso, definido pelo fabricante, normalmente alguns ciclos. Alguns relés instantâneos possuem o ajuste de pickup ou dropout da tensão sendo em percentagem da tape utilizado. Outros relés instantâneos possuem unicamente o valor de pickup ou dropout em volts diretamente.

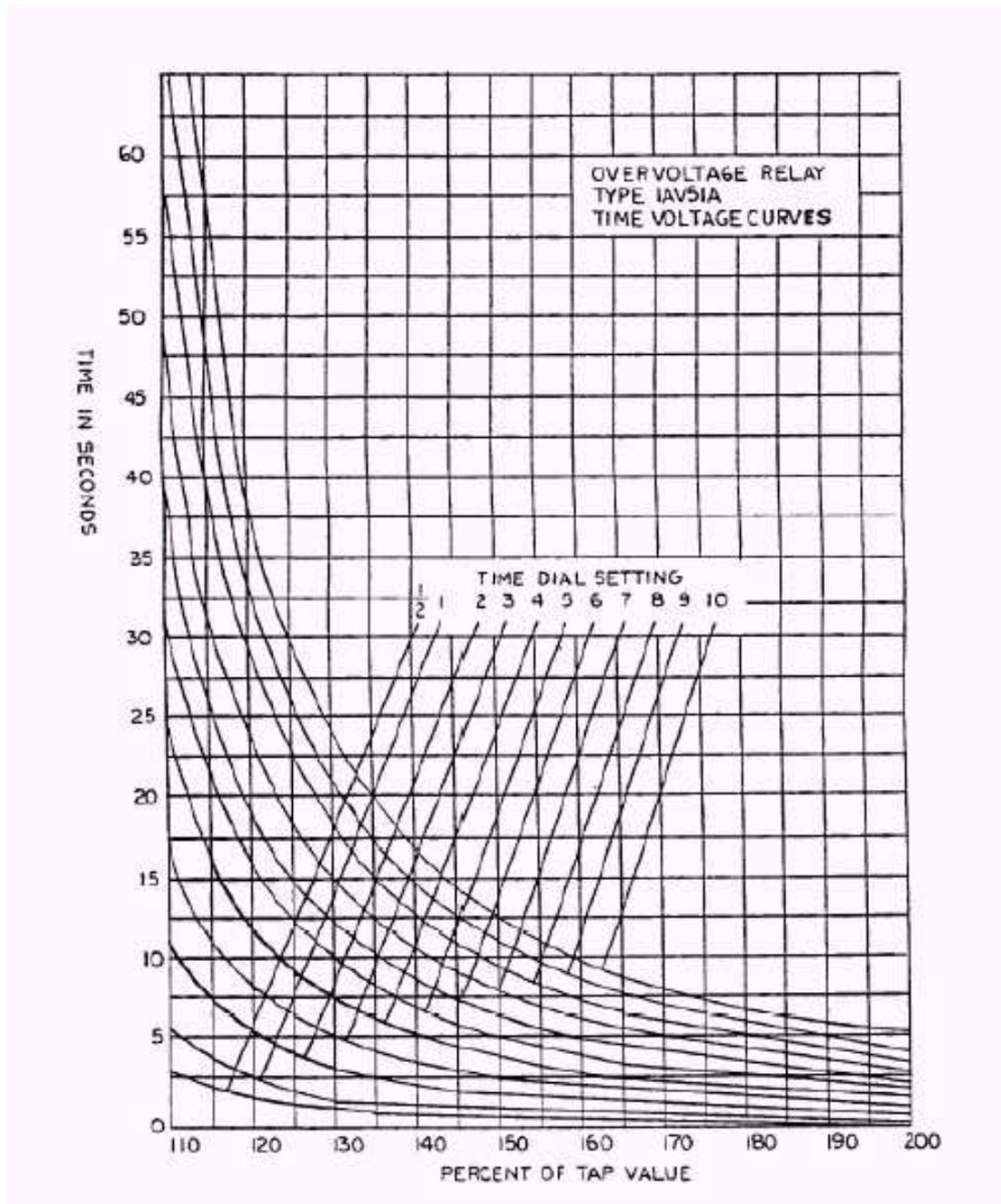
Os relés de tempo definido (filosofia europeia) operam da mesma forma que os instantâneos porém com uma temporização definida através de um dispositivo de tempo. A seguir são mostradas as características dos relés instantâneos e de tempo definido.



**Figura: relés de sub ou sobretensão instantâneos ou de tempo definido**

Os relés de sub ou sobretensão de tempo inverso (filosofia americana) normalmente possuem o dropout ou o pickup em função de uma percentagem do valor de tape utilizado e suas características possuem forma similar as do relé de sobrecorrente. Na pratica, é mais comum encontrar os relés de tensão de tempo definido.

A seguir é mostrada a característica típica de um relé de sobretensão de tempo inverso



**Figura: características do relé de sub ou sobretensão de tempo inverso.**

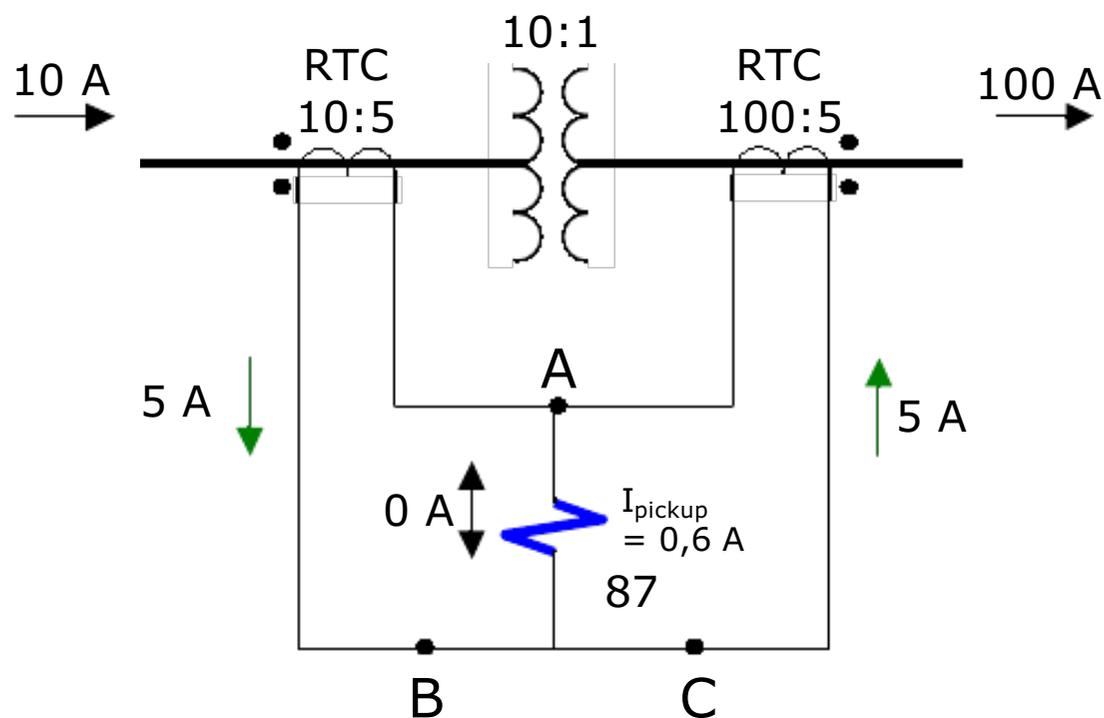
Esse tipo de relé deve permitir três ajustes, a saber:

- Dial de tempo DT (0 a 10; 0 a 1; ou 0 a 100%, conforme fabricante);
- Pickup ou Dropout em % da  $V_{TAPE}$ ;
- Tapa de tensão:  $V_{TAPE}$ .

### RELÉ DIFERENCIAL (87)

A seguir, será abordado o princípio de funcionamento do relé diferencial. Essa abordagem será baseada no dispositivo eletromecânico, cuja filosofia de aplicação estende-se para os dispositivos eletrônicos analógicos e numéricos.

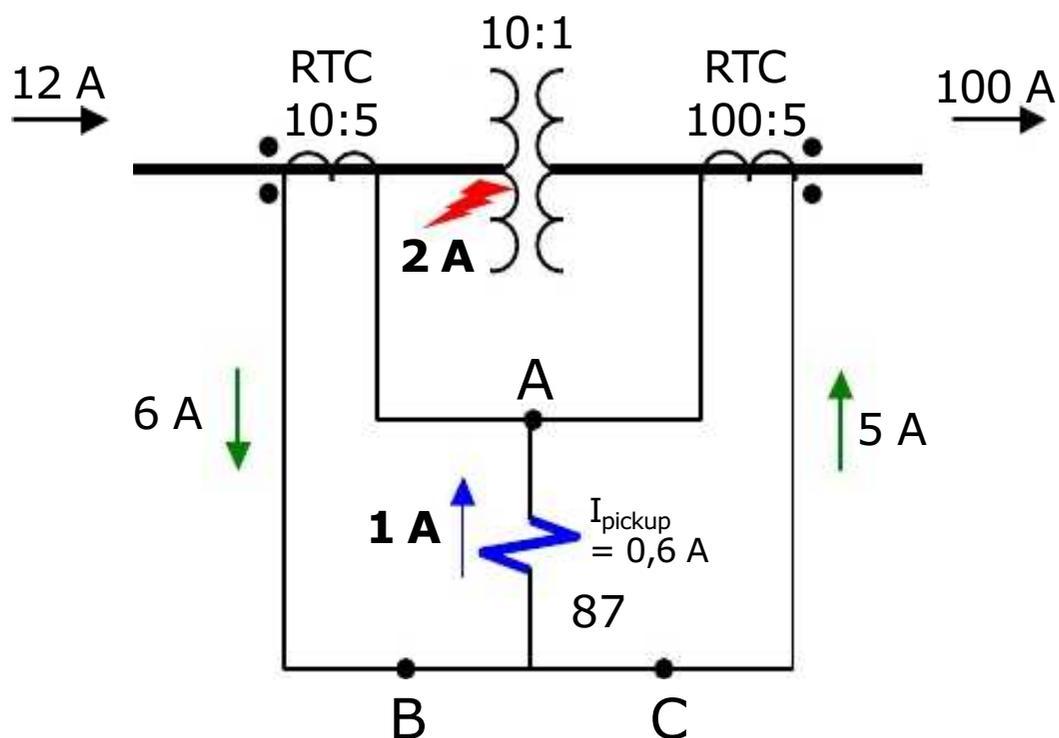
Para uma análise preliminar, seja proteger um transformador com uma unidade diferencial amperimétrica:



**Figura: relé diferencial amperimétrico**

Inicialmente, o TC do lado de alta fornece 5 A no sentido indicado, igualmente, o mesmo valor é fornecido pelo TC do lado da baixa. Da maneira em que a unidade 87 está ligada, toda a corrente que chega ao ponto B é levada ao ponto C, não havendo nenhuma parcela desviada para a bobina de operação do 87. Nesta situação, o relé não opera.

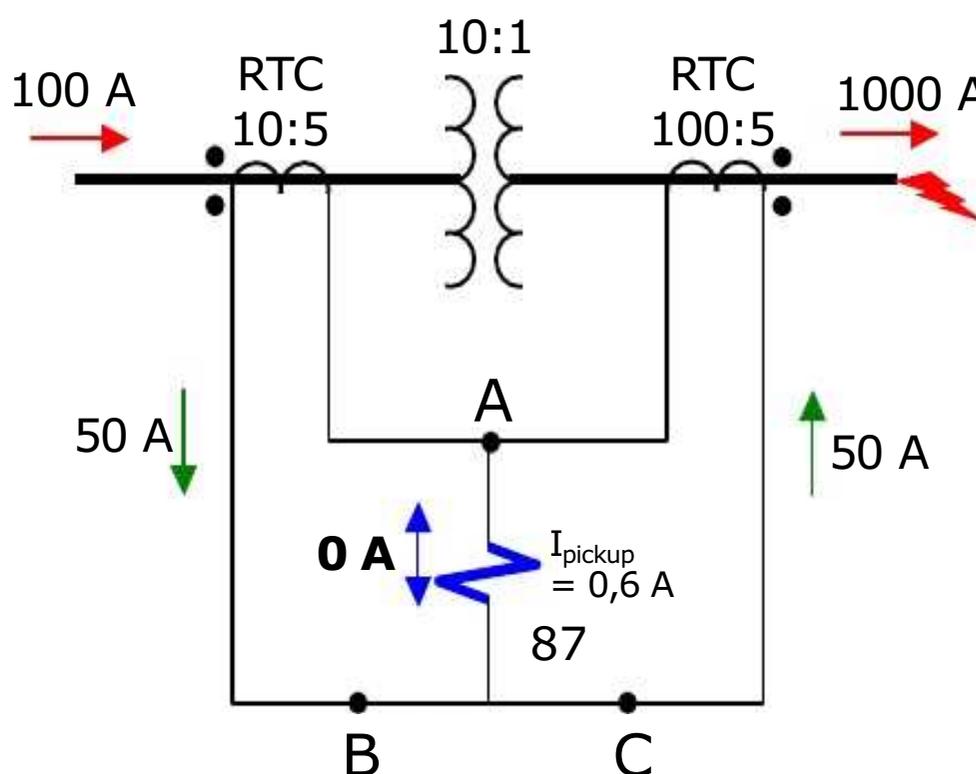
Suponhamos, em seguida, que haja algum desvio de corrente dentro da zona protegida pela unidade diferencial, ou seja, entre os dois TC's, como mostra a figura a seguir. Percebe-se que, nesta nova situação, uma parcela de corrente será desviada em direção à bobina de operação fazendo o relé operar. Igualmente suponhamos que o *pickup* do relé esteja ajustado em um valor inferior à corrente diferencial, por exemplo,  $I_{pickup} = 0,6 A$  e  $I_{diferencial} = 1,0 A$ .



**Figura: relé diferencial amperimétrico atuando**

Pelo exemplo mostrado na figura anterior, percebe-se que para um desvio relativamente pequeno de 2 A no lado de alta do transformador, provocou um aumento na corrente no secundário do TC, passando de 5 para 6 A. Como, do outro lado, o da baixa, permaneceu os mesmo 5 A, a diferença de 1 A obrigatoriamente passará pela bobina de operação da unidade 87, fazendo-o operar.

Por outro lado, suponhamos uma falta relativamente elevada fora da zona protegida, por exemplo, 10 vezes a corrente nominal, como mostra a figura a seguir:



**Figura: relé diferencial amperimétrico bloqueado**

Percebe-se que, nesta nova situação, a unidade 87 de forma correta não operaria, pois a corrente diferencial seria nula. Isto mostra que o princípio da unidade diferencial é altamente seletivo, distinguindo-se pequenas faltas dentro da zona protegida e sendo praticamente insensível para faltas externas à zona.

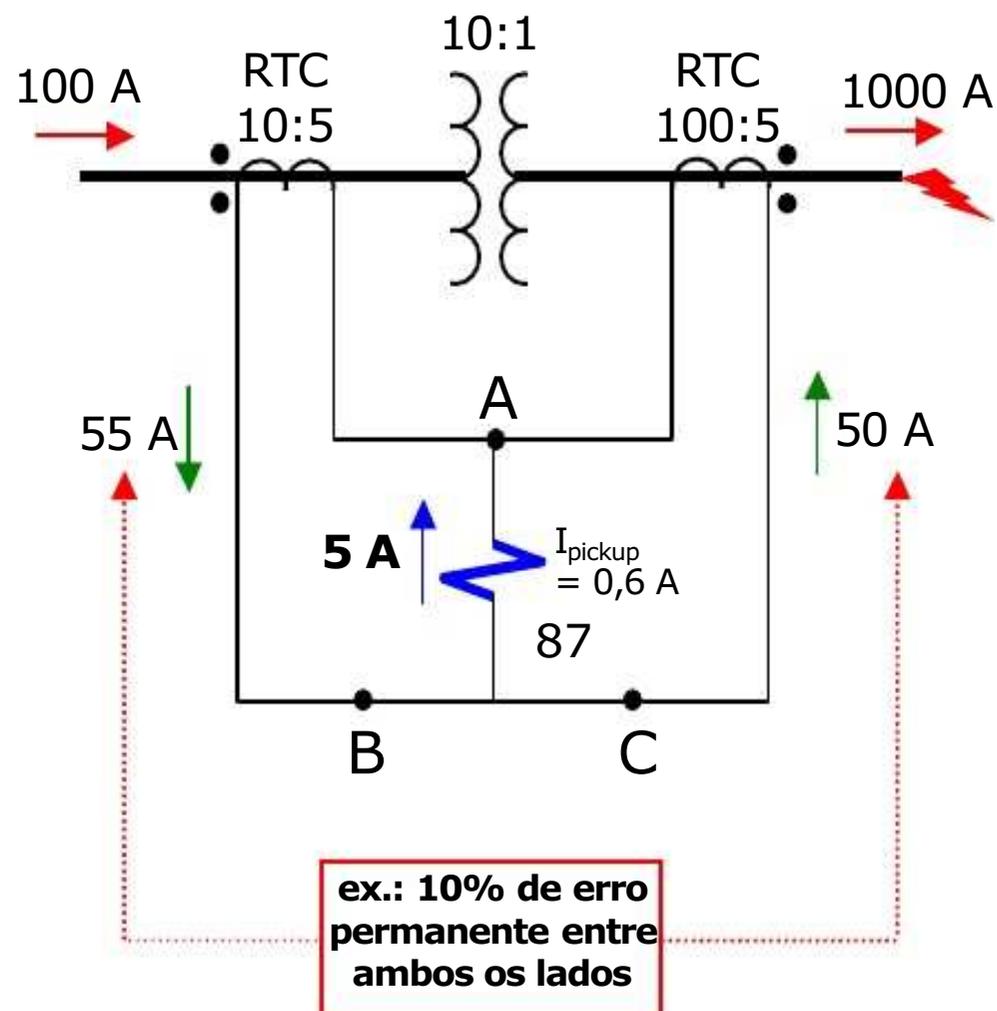
Porém, esta alta sensibilidade, associada a uma alta seletividade, poderá ser um problema para a unidade diferencial, pois, isto poderá levá-la a operar ou bloquear indevidamente para as seguintes situações:

- casamento imperfeito dos TC's;
- erro de transformação dos TC's;
- saturação desigual dos TC's;
- erro do transformador de potência;
- existência de comutador de tapes dentro da zona de proteção;
- indução de correntes parasitas na cablagem;
- impedâncias secundárias diferentes para cada TC (comprimentos dos cabos);
- transformador de potência multicircuitos;
- outros fatores.

Todos esses fatores levam a um desequilíbrio na diferença de correntes, podendo levar o relé a uma operação ou bloqueios incorretos.

Para mostrar a gravidade do problema, suponhamos que exista um erro de 10% entre a corrente que chega de um lado do relé (ponto B) em relação ao outro lado do relé (ponto C). Desta forma, em condições nominais, sem falta (como na primeira figura) existiria permanentemente uma corrente diferencial de 0,5 A circulando na bobina de operação, fato que nos levaria a ajustar o pickup da bobina em um valor imediatamente acima a esta corrente de circulação, como mostrado no exemplo,  $I_{pickup} = 0,6$  A seria suficiente.

Porém, nesta situação de ajuste de 0,6 A, ocorrendo uma elevada falta externa, por exemplo, 10 vezes a corrente nominal, a nova distribuição de corrente seria como mostrada na figura a seguir, levando a unidade 87 a operar indevidamente.

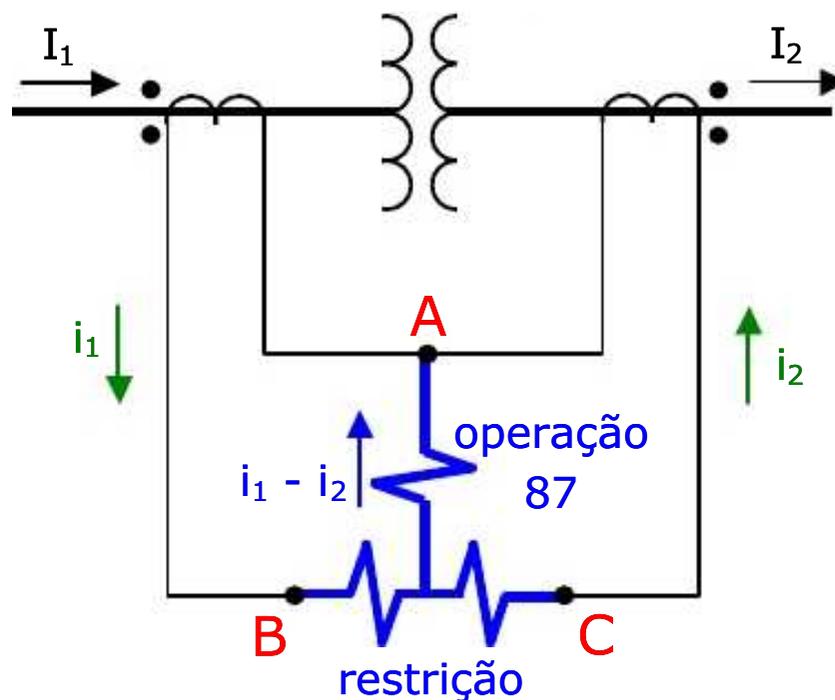


**Figura: relé diferencial opera indevidamente para falta externa**

Uma solução para o problema seria desensibilizar a unidade de operação elevando o nível de pickup. No exemplo mostrado, esse ajuste deveria ser superior a 5 A, para o relé não operar para faltas externas. Tal solução se mostra, de certa forma, inadequada, pois, uma grande zona cega (*blind-spot*) estaria sendo criada dentro da zona de proteção coberta pelo relé. Em outras palavras, com o aumento do nível de pickup do relé, para certas faltas de pequeno valor dentro do transformador, o relé não seria mais capaz de detectá-las. Assim, seriam reduzidas duas das maiores virtudes do relé 87 que é a sua sensibilidade face às pequenas faltas dentro da zona protegida e a sua insensibilidade para faltas externas, ou seja, sua inerente seletividade.

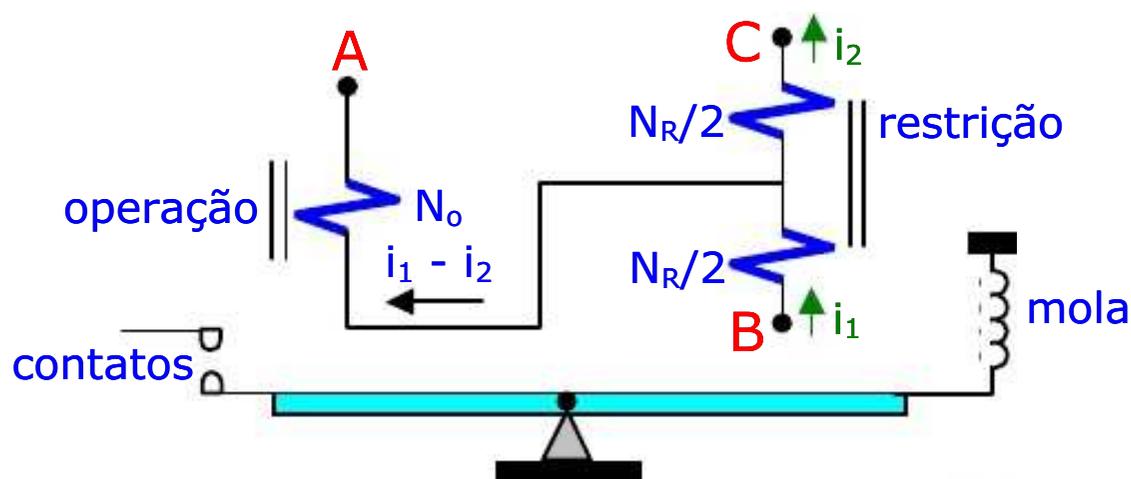
A fim de evitar tais inconvenientes, utiliza-se o **relé diferencial percentual** que tem como finalidade desensibilizar, de forma controlada, a unidade amperimétrica de operação, para que ela não opere devido aos fatores mencionados. A filosofia da unidade diferencial percentual é criar um pickup variável em função da corrente passante no relé. Entende-se como corrente passante (*through current*), como a média das correntes que entra e sai do relé.

Seja a unidade diferencial percentual mostrada na figura a seguir:



**Figura: relé diferencial percentual**

O princípio de funcionamento da unidade diferencial percentual pode ser entendido a partir da balança de conjugados, como mostrado na figura a seguir.



**Figura: balança de conjugados (modelo de funcionamento)**

- a bobina de operação de  $N_0$  espiras age no sentido de fechar os contatos;
- a bobina de restrição de  $N_R$  espiras age no sentido de abrir os contatos;
- a mola age no sentido de abrir os contatos.

O conjugado na balança pode ser escrito como:

$$C_{TOTAL} = C_{OPERAÇÃO} - C_{RESTRICÇÃO} - C_{MOLA}$$

Passando a expressão em função da força magneto motriz (ampéres espiras) do circuito magnético, tem-se:

$$C_{TOTAL} = k_1 \cdot [ N_0 \cdot (i_1 - i_2) ]^2 - k_2 \cdot \left( \frac{N_R}{2} i_1 + \frac{N_R}{2} i_2 \right)^2 - C_{MOLA}$$

Onde  $k_1$  e  $k_2$  são constantes de proporcionalidade. Como  $N_O$  e  $N_R$  são constantes, a expressão pode ser escrita como:

$$C_{TOTAL} = k'_1 \cdot (i_1 - i_2)^2 - k'_2 \cdot \left( \frac{i_1 + i_2}{2} \right)^2 - C_{MOLA}$$

Ou ainda:

$$C_{TOTAL} = k'_1 \cdot i_O^2 - k'_2 \cdot i_R^2 - C_{MOLA}$$

Onde:

- $i_O$  é chamada de corrente de operação  $\Rightarrow i_O = i_1 - i_2$
- $i_R$  é chamada de corrente de restrição  $\Rightarrow i_R = \frac{i_1 + i_2}{2}$

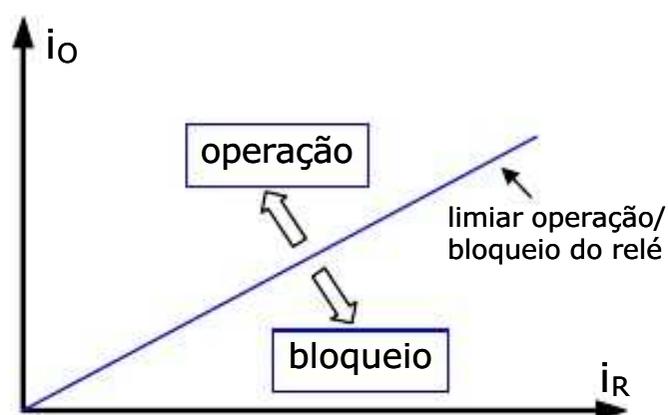
Para o levantamento da característica de operação supõe-se inicialmente duas condições:

- despreza-se o efeito de mola ( $C_{MOLA} = 0$ );
- verifica-se o limiar de operação ( $C_{TOTAL} = 0$ ).

Então:

$$0 = k'_1 \cdot i_O^2 - k'_2 \cdot i_R^2 - 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{i_O}{i_R} = \sqrt{\frac{k'_2}{k'_1}} = \text{constante}$$

A equação anterior é do tipo  $y = ax$ , ou seja, uma reta que passa pela origem, conforme mostra a figura a seguir:



**Figura: característica operação/bloqueio do relé diferencial percentual sem efeito de mola**

A partir da característica mostrada na figura anterior, defini-se a declividade do relé (*slope*) que é dada por:

$$\text{Declividade \%} = \frac{i_O}{i_R} \times 100\%$$

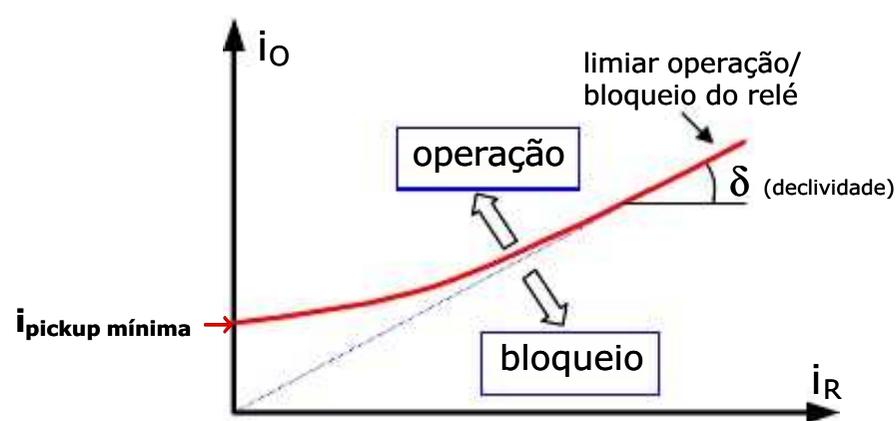
Para considerar o efeito da mola, acha-se inicialmente o ponto que, para a corrente de restrição igual a zero, qual seria a corrente de operação para fechar os contatos do relé (chamada de corrente de pickup mínima), ou seja, o limiar de operação:

$$0 = k'_1 \cdot i_O^2 - 0 - C_{\text{MOLA}}$$

$$i_{O \text{ MIN}} = \sqrt{\frac{C_{\text{MOLA}}}{k'_1}} = \text{constante} = i_{\text{pickup mínima}}$$

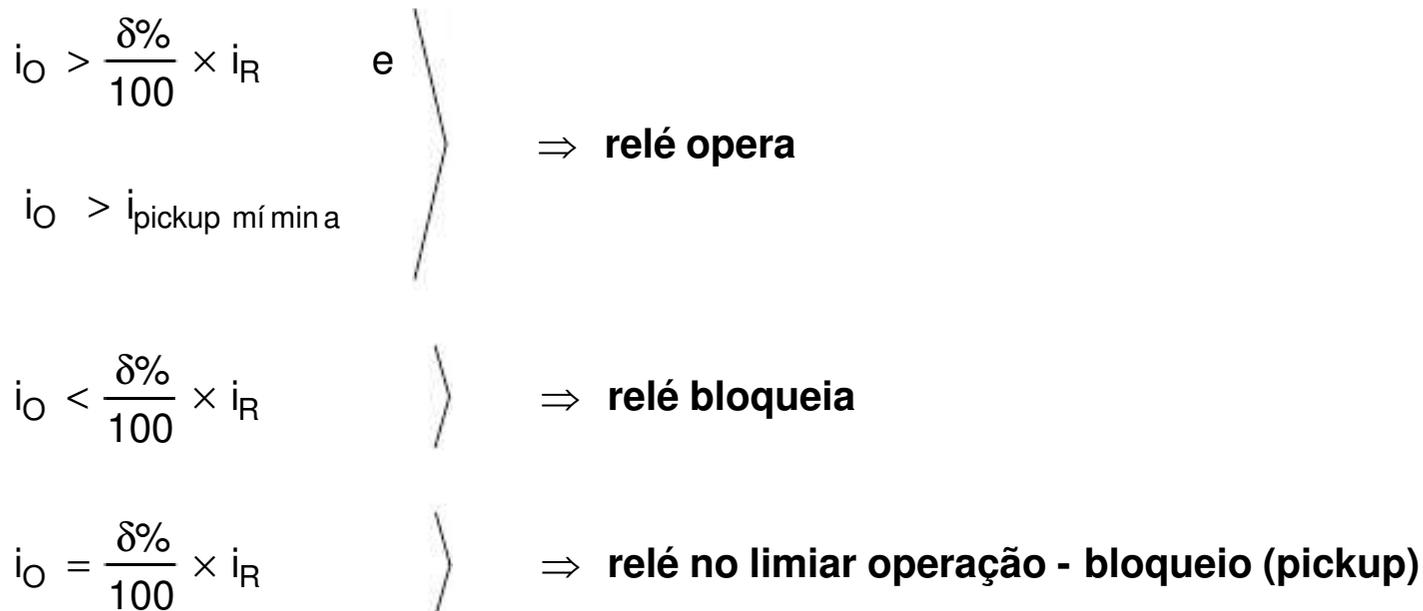
A corrente de *pickup* mínima ( $i_{O \text{ MIN}}$ ) é aquela necessária para vencer exclusivamente o efeito de mola na ausência da corrente de restrição ( $i_R$ ). A mola é utilizada para evitar que o relé opere com baixas correntes presentes no circuito primário, como por exemplo a corrente a vazio de transformadores. No caso dos relés eletromecânicos, evita-se também a operação indevida face a trepidações mecânicas que possam ocorrer com o relé.

À medida que a corrente de restrição aumenta, para o fechamento dos contatos do relé, necessita-se uma maior corrente de operação. Dessa forma, uma vez que o conjugado de mola é um valor constante e pequeno face aos conjugados de restrição e de operação na presença de altas correntes, este efeito de mola tende a desaparecer. Colocando-se o efeito de mola superposto à característica operação/bloqueio do relé, obtém-se uma nova característica, conforme mostra a figura a seguir:



**Figura: característica operação/bloqueio do relé diferencial percentual com efeito de mola**

Assim, concluí-se que:



### Considerações:

#### 1) Bloqueio por 2º harmônico

Quando se energiza um transformador, a corrente primária inicial (inrush) é elevada, tipicamente entre 6 a 10  $I_{nominal}$  o que levaria, sem dúvida, à operação do relé diferencial, visto que o secundário poderia estar a vazio, ou mesmo em carga nominal. Para solucionar esse inconveniente, no relé diferencial para transformadores, existem duas possibilidades. A primeira, já há longo tempo em desuso, é provocar um bloqueio proposital durante um tempo de 100 ms, até que o efeito de magnetização inicial transitória desapareça. A segunda consiste no bloqueio da unidade de operação a partir de uma forte restrição harmônica.

A corrente de inrush do transformador é rica em segundo harmônico (tipicamente a corrente de segundo harmônico em inrush  $\rightarrow I_{2h} > 20\% I_{fundamental}$ ). Assim, através de um circuito seletivo sintonizado, a corrente total de operação é separada em duas componentes, a corrente fundamental e a corrente de segundo harmônico. Apenas o sinal fundamental é enviado à bobina de operação, ao passo que o segundo harmônico é re-injetado na bobina de restrição fortalecendo este efeito.

Tipicamente, o ajuste de 2º harmônico de um relé diferencial para transformador é parametrizado em 20%. Isso significa que se, na corrente de operação, o conteúdo deste harmônico for superior a 20% da fundamental o relé deverá permanecer bloqueado, ao passo que se for inferior, o relé não sofrerá restrições para a sua operação.

Cabe ressaltar ainda que as faltas em sistemas elétricos são pobres em segundo harmônico, fato que indica que o relé não sofrerá bloqueio indevido em decorrência de restrição de segundo harmônico, ficando livre para operar.

#### 2) Bloqueio por 5º harmônico

Quando um transformador de potência está em plena carga e, devido a uma falta, ocorre uma rejeição de carga, a tensão no transformador tende a se elevar. Como os transformadores de potência são projetados para trabalhar muito próximos ao

joelho de saturação, uma elevação de tensão no primário, tendo o secundário a vazio (devido à rejeição), provoca uma corrente de magnetização (corrente a vazio) elevada. Essa corrente elevada de um lado do transformador, juntamente com uma corrente nula do outro lado, poderia levar o relé à operação indevida, pois a falta não é no transformador.

Para solucionar esse inconveniente, utiliza-se o mesmo princípio daquele usado para o segundo harmônico, porém, agora com o quinto harmônico. A corrente de magnetização de um transformador de potência em estado de saturação é rica em terceiro e quinto harmônicos. Como, na maioria dos casos dos transformadores trifásicos, o terceiro harmônico não chega ao relé diferencial, adota-se o quinto harmônico de corrente para provocar o bloqueio do relé. O valor percentual utilizado neste caso é tipicamente o mesmo que para o segundo harmônico, ou seja, 20%.

### 3) Funcionamento de um relé eletromecânico clássico (BDD-15, GE)

As figuras e o texto seguintes irão mostrar o funcionamento de um relé semi-estático da GE em que se tem a restrição por harmônicos.

Inicialmente, este relé possui em sua entrada um transformador de corrente diferencial e um transformador de corrente de restrição. O transformador de restrição possui os dois primários (enrolamentos de entrada e saída) um oposto ao outro, além de possuir tapes, conforme adota a filosofia americana.

A saída 1 1' do transformador de operação fornece uma corrente que, em seguida, é filtrada para a separação da componente fundamental da componente harmônica. Apenas o sinal de 60 Hz é encaminhado à bobina de operação, o restante (componente contínua e harmônicos) é enviado à bobina de restrição.

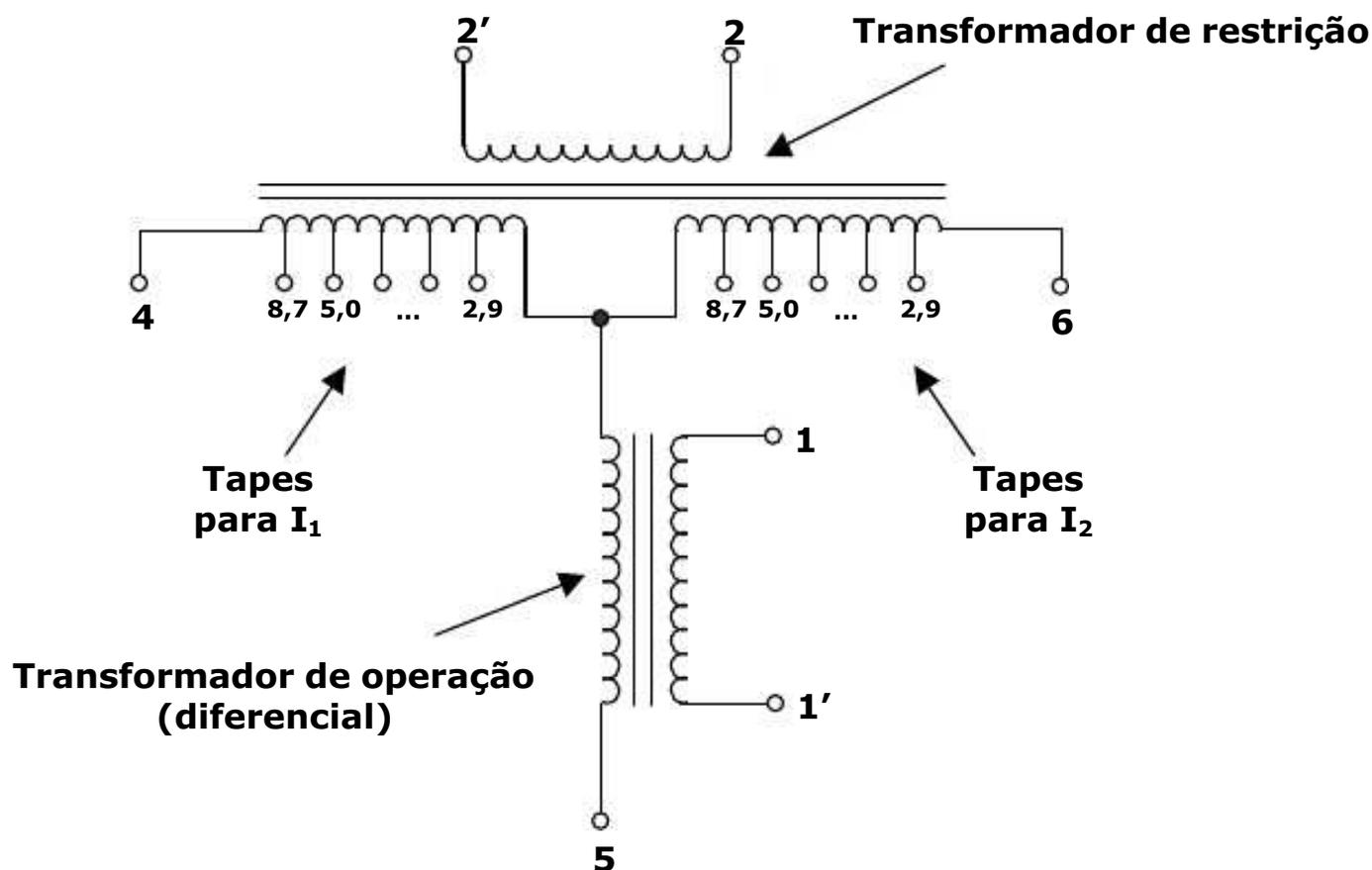
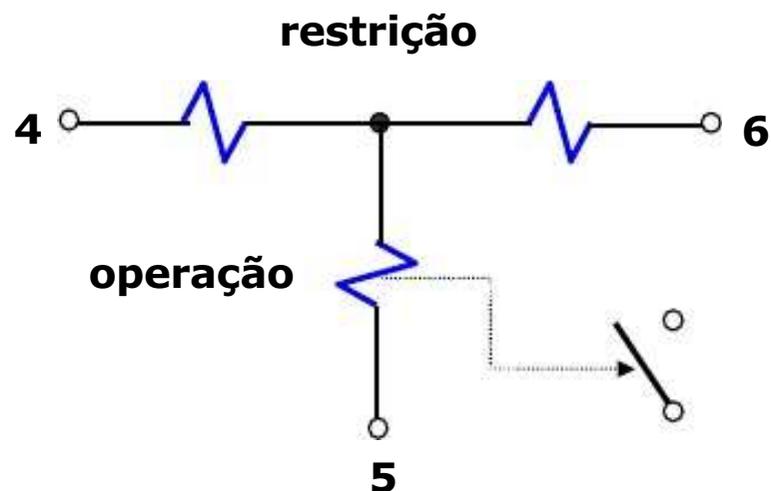


Figura: composição real das bobinas de operação e restrição de um relé (BDD-15 GE).

O circuito da figura anterior pode ser resumido em:



**Figura: circuito equivalente para o relé diferencial eletromecânico.**

Antes de se chegar à bobina de operação, a corrente de operação ( $i_o$ ) é devidamente separada em duas partes, apenas a componente de 60 Hz que segue em direção à bobina de operação e o sinal restante, ou seja, componente contínua e harmônicos, que é desviado de volta à bobina de restrição. Para este propósito, são utilizados respectivamente dois filtros sintonizados, um passa banda de primeira ordem sintonizado em 60 Hz (filtro de ressonância série) e um rejeita banda, também de primeira ordem e sintonizado em 60 Hz (filtro de ressonância paralela).

O relé diferencial possui ainda um elemento de sobrecorrente instantâneo para a corrente de operação (total) que é normalmente ajustado em  $8 \times I_{\text{nominal}}$ . Essa unidade tem basicamente dois propósitos, o primeiro é promover um rápido desligamento, mais rápido que a própria unidade diferencial, no caso de uma falta intensa interna à zona de proteção, onde se possa ter a contribuição de ambos os lados do transformador, como por exemplo em sistemas interligados; o segundo é proteger a própria unidade diferencial das altas correntes que possam circular nos circuitos a jusante. Caso essa unidade venha a operar por algum motivo, é porque uma falta de alta intensidade ocorreu no trecho protegido. Há casos em que o usuário prefere bloquear a unidade de sobrecorrente instantânea para não perder coordenação com outras proteções.

Existe ainda um elemento chamado “thyrite” que trabalha como resistência não linear (pára-raios) para provocar um curto circuito no circuito de operação e acionar mais rapidamente a unidade de sobrecorrente instantânea, protegendo assim o circuito a jusante, que são os filtros.

Quanto aos circuitos de operação e de restrição do relé diferencial, eles trabalham como mostram as figuras seguintes:

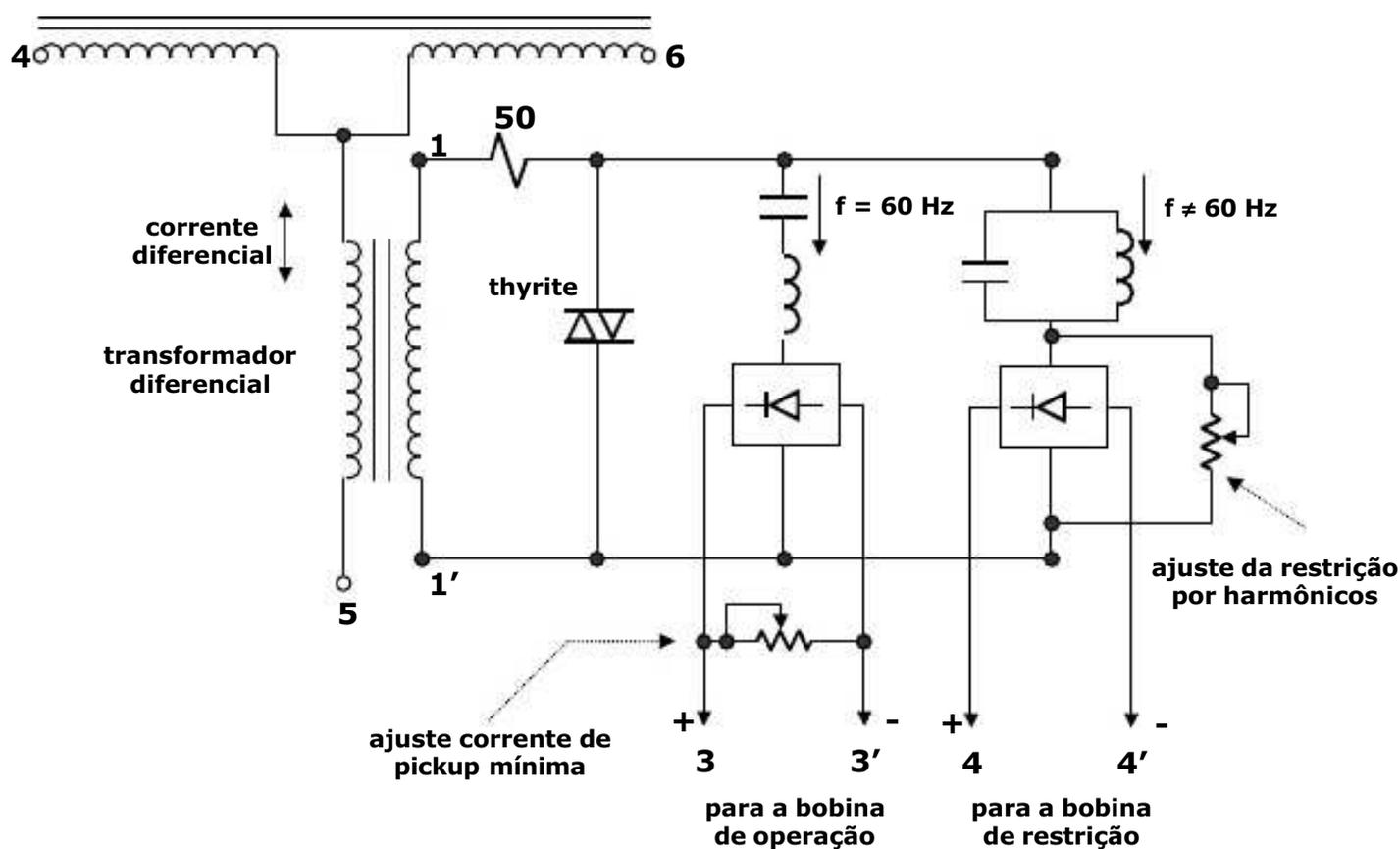


Figura: unidade de operação com a separação do sinal para a restrição por harmônicos e do sinal fundamental para a operação.

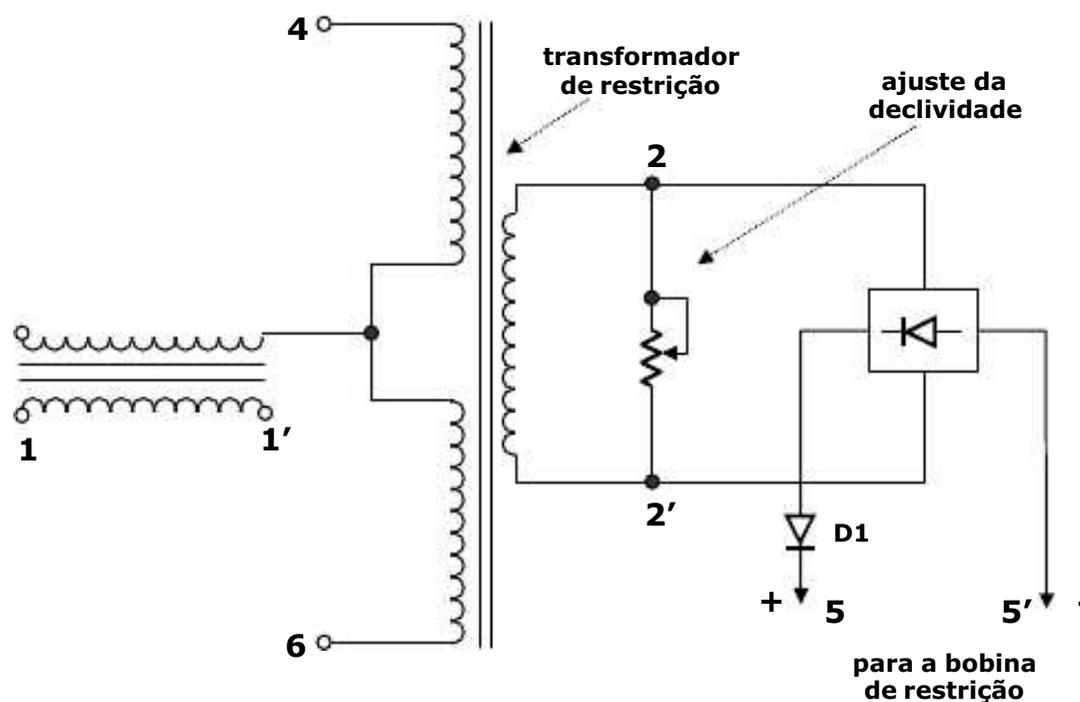


Figura: unidade de restrição do relé diferencial eletromecânico.

A função do diodo D1 da unidade de restrição é tornar os circuitos de calibração independentes entre si.

A balança diferencial onde está montada a bobina de restrição e a bobina de operação tem o seguinte aspecto:

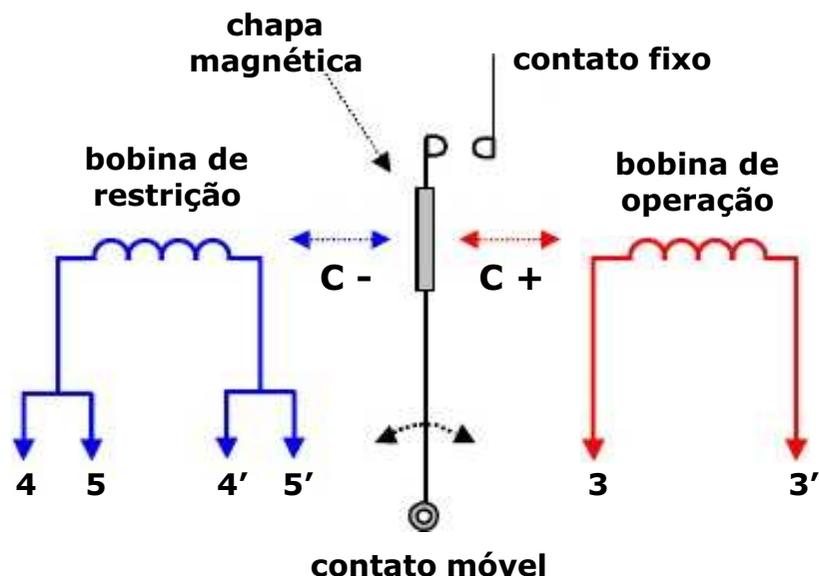


Figura: balança diferencial.

Quando há o desequilíbrio, tanto a bobina de operação quanto a de restrição recebem as informações, mas o contato móvel só irá em direção daquela que produzir o maior conjugado, ou seja, quando a corrente na bobina de operação for maior que a da bobina de restrição ou vice-versa. Resumidamente, a figura a seguir mostra um diagrama em blocos do relé diferencial percentual com restrição por harmônicos.

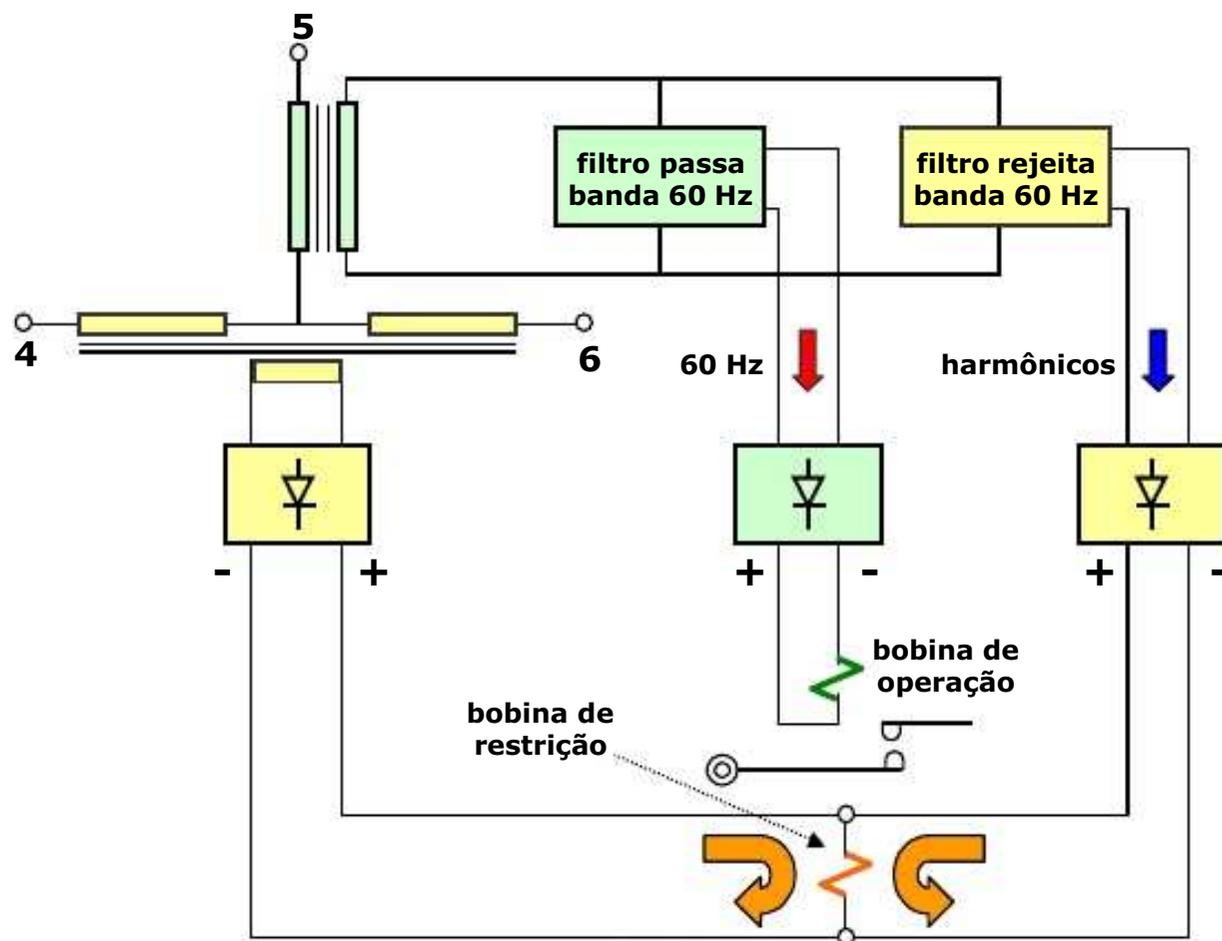


Figura: diagrama do relé diferencial com restrição por harmônicos.

A seguir, como exemplo, apresenta-se o diagrama interno do relé diferencial BDD-15 da GE.

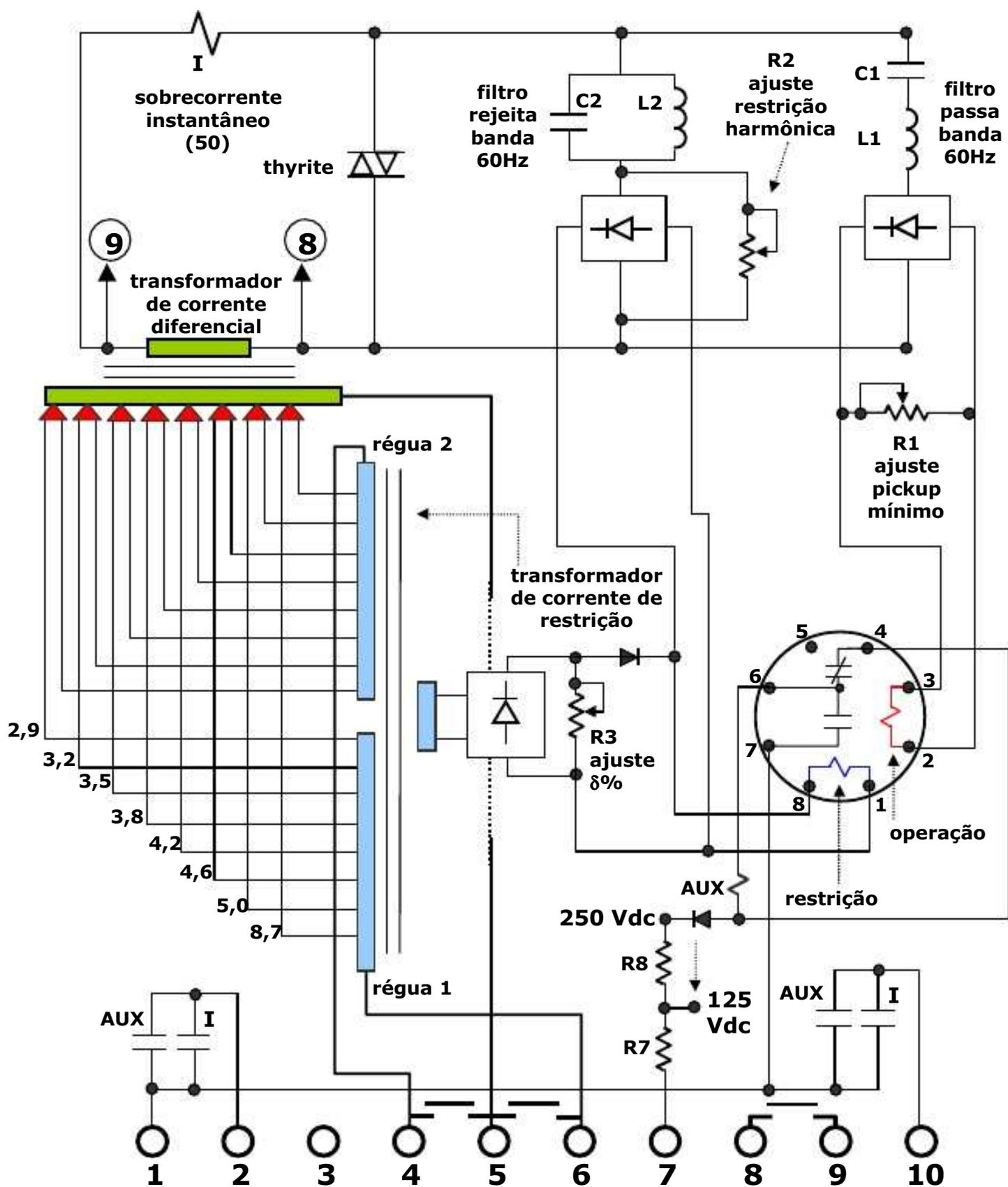


Figura: relé diferencial eletromecânico BDD-15 da GE.

## EXERCÍCIO SOBRE PROTEÇÃO DIFERENCIAL

### **PROPOSTA**

Proteger um transformador com proteção diferencial, que possui os seguintes dados:

- Dois enrolamentos
- Potência de 20 MVA
- Tensão 138 - 34,5 kV
- $\Delta$ -Y<sub>aterrado</sub>
- Corrente a vazio = 3% I<sub>N</sub>

Escolher RTC's, declividade e corrente de pick-up.

As correntes de TC's normalizadas são:

- Secundária: 5 A
- Primária: 5 - 10 - 15 - 20 - 25 - 30 - 40 - 50 - 60 - 75 - 100 - 125 - 150 - 200 - 250 - 300 - 400 - 500 - 600 - 800 - 1000 - 1200 - 1500 - 2000 - 3000 - 4000 - 5000 - 6000 - 8000 A

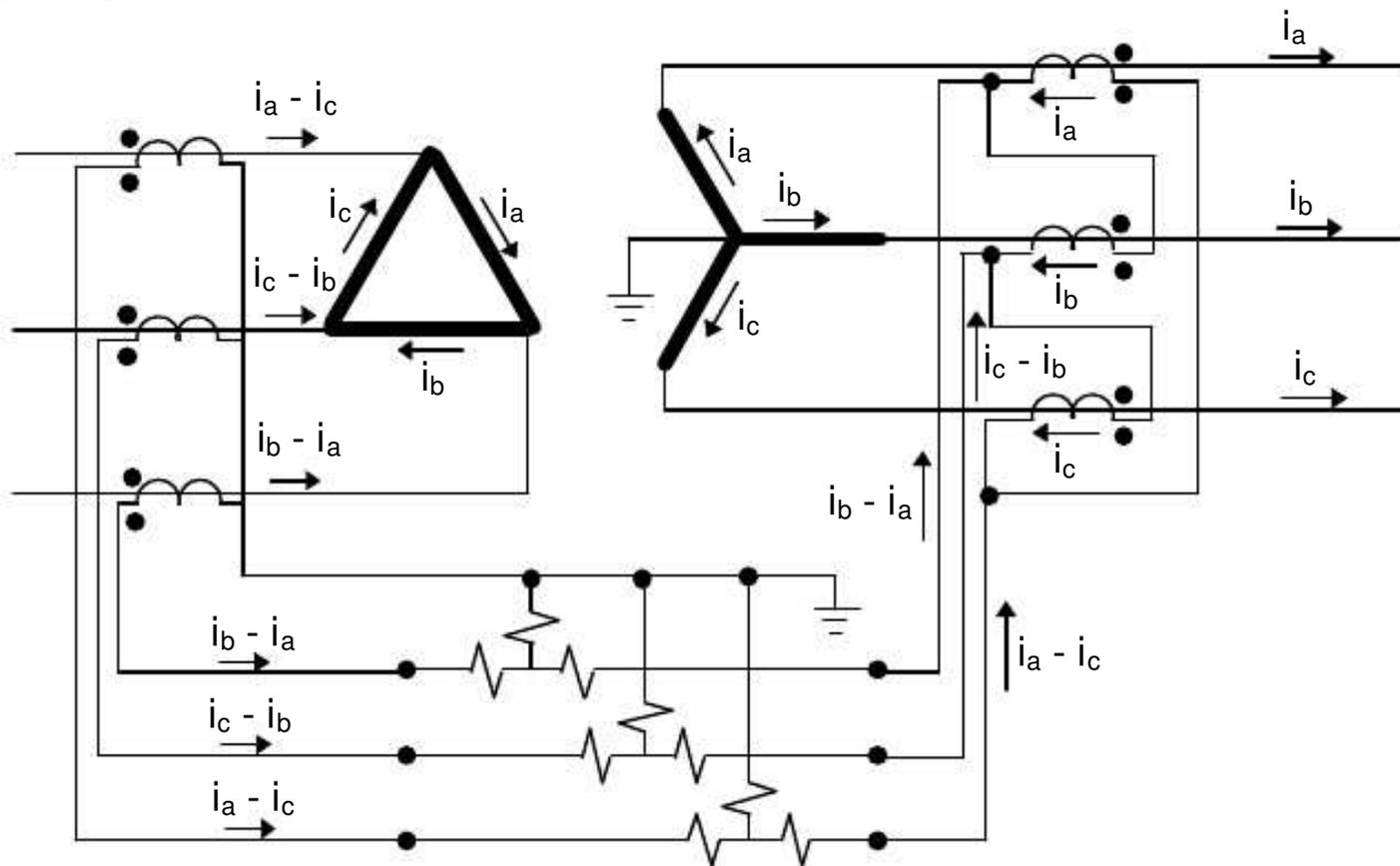
### SOLUÇÃO

Dependendo do fabricante, do tipo de relé, podem existir várias soluções para a proteção do transformador em questão.

- A primeira seria a utilização da filosofia americana em que a correção de ângulo de defasamento é feita através da conexão adequada dos TC's (em estrela ou delta) e a correção de módulo é feita por seleção de tapes nos relés (2,9 - 3,2 - 3,5 - 3,8 - 4,2 - 4,6 - 5,0 - 8,7 A).
- A segunda solução, de acordo com a filosofia europeia, consiste em conectar os TC's em estrela em ambos os lados do transformador, bem como utilizar relés com tapes fixos em 5 A (ou 1 A) e fazer toda a correção de ângulo de defasamento e módulo através de TC's auxiliares.
- A terceira opção consiste em utilizar relés numéricos que fazem a correção de módulo e ângulo internamente, através da parametrização do relé.

**Primeira opção:**

Seja a figura abaixo



Para os dados em questão tem-se:

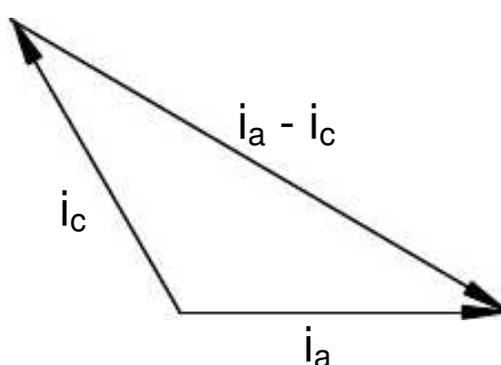
$$\text{Corrente Nominal Primária} = I_{NP} = \frac{20 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 138 \cdot 10^3} = 83,7 \text{ A}$$

Escolhe-se: RTC (primário) = 100 - 5

$$\text{Corrente Nominal Secundária} = I_{NS} = \frac{20 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 34,5 \cdot 10^3} = 335 \text{ A}$$

Escolhe-se: RTC (secundário) = 400 - 5

Devido os TC's do secundário estarem conectados em delta, a composição da corrente ficaria da seguinte forma:



Produzindo os seguintes valores de corrente

$$I_o = 7,25 - 4,19 = 3,06 \text{ A} \quad I_R = \frac{7,25 + 4,18}{2} = 5,72 \text{ A}$$

Desta forma a declividade mínima exigida em regime permanente seria:

$$\delta\% = \frac{I_o}{I_R} 100\% = \frac{3,06}{5,72} 100\% = 53\% \quad \Rightarrow \quad \text{O que é inviável !}$$

Poderíamos, em uma primeira instância, aumentar a relação dos TC's secundários para reduzir a corrente de 7,25 A para 4,18 A para poder anular a corrente de operação ( $I_o$ ) em regime permanente. A relação ideal do TC secundário seria:

$$\text{RTC (otimizada)} = \text{RCT(original)} \times \frac{7,25}{4,18} = 138,8 : 1 = 694 - 5$$

Como não existe esta relação, nem mesmo 700 - 5, segundo a norma, tentemos a relação mais próxima, 600 - 5 = 120 : 1.

A corrente no delta se torna 2,790 A e a corrente vinda do relé igual a 4,83 A.

E as novas  $I_o$  e  $I_R$  bem com a declividade mínima em regime permanente podem ser calculadas:

$$I_o = 4,83 - 4,18 = 0,65 \text{ A} \quad I_R = \frac{4,83 + 4,18}{2} = 4,50 \text{ A}$$

Desta forma a declividade mínima exigida em regime permanente seria:

$$\delta\% = \frac{I_o}{I_R} 100\% = \frac{0,65}{4,50} 100\% = 14,4\% \quad \Rightarrow$$

**O que é melhor, porém continua elevado !**

### Utilização de tapes do relé

Voltemos ao caso original com TC's secundários de relação 400 - 5. Nesta situação,  $I_1 = 4,18 \text{ A}$  e  $I_2 = 7,25 \text{ A}$ . No caso do relé diferencial possuir tapes, que pode ser o caso de relés com a filosofia americana ou relés numéricos, deve-se escolhê-los adequadamente da seguinte forma:

**Relés numéricos:** escolher os tapes de entrada ( $I_1$ ) e saída ( $I_2$ ) com os valores que mais se aproximam da realidade.

**Relés clássicos:** normalmente esses relés possuem uma faixa de tapes tanto para a entrada ( $T_1$ ) como para a saída ( $T_2$ ) com os valores -

$$T_1 \text{ ou } T_2 = 2,9 / 3,2 / 3,5 / 3,8 / 4,2 / 4,6 / 5,0 / 8,7$$

Por outro lado, tem-se a seguinte relação de correntes:

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{7,25}{4,18} = 1,7344$$

A tabela abaixo mostra todas as possibilidades das relações de tapes ( $T_1/T_2$  ou  $T_2/T_1$ ) do relé diferencial clássico:

		TAPE $T_1$							
		2,9	3,2	3,5	3,8	4,2	4,6	5,0	8,7
T	2,9	1	1,1034	1,2069	1,3103	1,4483	1,5862	1,7241	3,0000
	3,2	1,1034	1	1,0938	1,1875	1,3125	1,4375	1,5625	2,7187
P	3,5	1,2069	1,0938	1	1,0857	1,2000	1,3143	1,4286	2,4857
	3,8	1,3103	1,1875	1,0857	1	1,1053	1,2105	1,3158	2,2895
E	4,2	1,4483	1,3125	1,2000	1,1053	1	1,0952	1,1905	2,0714
	4,6	1,5862	1,4375	1,3143	1,2105	1,0952	1	1,0870	1,8913
T <sub>2</sub>	5,0	1,7241	1,5625	1,4286	1,3158	1,1905	1,0870	1	1,7400
	8,7	3,0000	2,7187	2,4857	2,2895	2,0714	1,8913	1,7400	1

A relação  $T_2/T_1$  que mais se aproxima a  $I_2/I_1$  é 1,7400, que vem dos tapes:

$$T_2 = 8,7 \text{ e } T_1 = 5,0$$

O “*mismatch*” (descasamento entre as relações) é dado por:

$$\text{Mismatch\%} = \frac{\left| \frac{I_2}{I_1} - \frac{T_2}{T_1} \right|}{\text{menor delas}} \times 100\% = \frac{|1,7344 - 1,7400|}{1,7344} \times 100\% = 0,32\%$$

Neste caso, a utilização dos referidos tapes é adequada para o propósito do casamento das correntes de entrada e saída do relé diferencial, ou seja, Tape 5,0 para a corrente  $I_1$  de 4,18 A e Tape 8,7 para a corrente  $I_2$  de 7,25 A.

A escolha da declividade do relé deve levar em conta vários fatores:

- Mismatch % (no exemplo é igual a 0,32%)
- Erro dos TC's % (classes 2,5 ou 10%)
- Uso de comutadores sob carga (variação em % tipicamente  $\pm 10\%$ )
- Erro de transformação do transformador principal (em %, que é função da sua impedância interna e da corrente de carga)
- Uso de transformadores de três enrolamentos

Tipicamente os relés diferenciais clássicos para transformadores possuem três declividades:  $\delta\% = 15; 25$  ou  $45\%$ . A soma dos erros supra relacionados fornecem uma base para a escolha de uma das declividade do relé, que deve ser imediatamente superior ao erro encontrado. A rigor, os erros relacionados são os

máximos tolerados nos equipamentos, portanto a soma destes erros é um procedimento bastante conservador. Ainda, se os dois TC's erram no mesmo sentido, sob o ponto de vista do relé, os seus erros são compensados mutuamente. Para um maior rigor de procedimento, recomenda-se a analisar as piores situações de erros para a escolha adequada da declividade do relé. Para o transformador do exemplo, uma vez que não possuem comutadores sob carga e é do tipo dois enrolamentos,  $\delta = 15\%$  ou  $25\%$  seriam adequados.

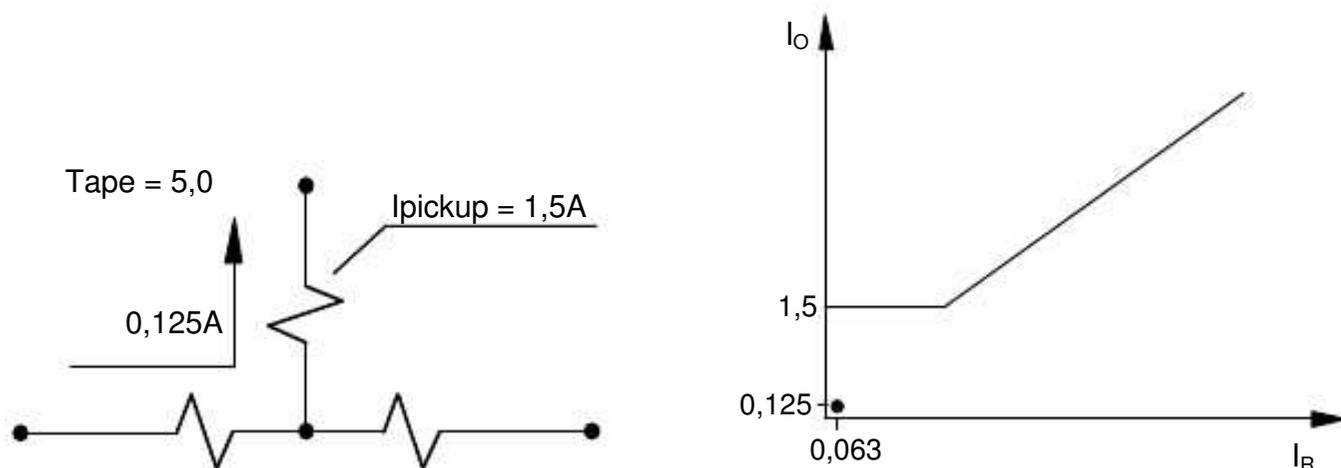
### Verificação da corrente a vazio

A corrente a vazio de um transformador não deve levar o relé diferencial a operar. Como essa corrente do transformador é 0,03 pu, e o ajuste de pick-up do relé é tipicamente 30% da corrente de tape, vejamos o que acontecerá.

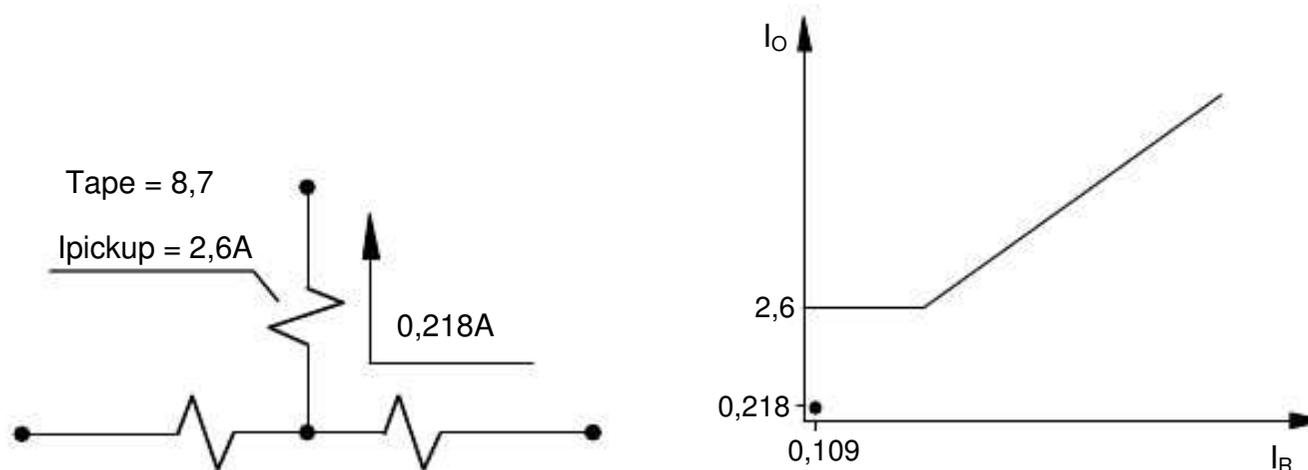
30% de 5,0A = 1,5A  
 30% de 8,7A = 2,6A

3% de 4,18 = 0,125A  
 3% de 7,25 = 0,218A

A figura abaixo mostra a localização das correntes acima no plano  $I_O \times I_R$ .



### Alimentação da alta para a baixa



## **Alimentação da baixa para a alta**

### **Utilização de transformadores de corrente compensadores**

Uma das técnicas utilizadas sobretudo pelos fabricantes europeus é a compensação dos erros de módulo e fase através de TC's compensadores. A seguir é mostrada uma tabela de um TC de compensação típico, com as possíveis relações e os tapes a serem utilizados. Este TC é monofásico e assim, necessita-se três unidades para o banco trifásico.

A título de exercício, é proposto ao leitor repetir o exemplo anterior, porém, utilizando os TC's de compensação. Desta forma, pede-se:

- redesenhar o circuito com os TC's tomando-se cuidado com a polaridade de conexão. Lembrar ainda que a conexão dos TC's principais é feita em estrela para ambos os lados.
- definir os tapes e a relação dos TC's

**TRANSFORMADOR AUXILIAR DE COMPENSAÇÃO  
PARA RELÉS DIFERENCIAIS**

(Transformador eletricamente isolado para circuitos a 5 e 10 A)

Relação	Terminais Primários	Terminais Secundários	Conectar os terminais				Número de Espiras
0,1765	AD	EO	BC	FI	KL	MN	3 - 17
0,1818	CD	AM	BE	FI	JL		2 - 11
0,1875	AD	EO	BC	FL	MN		3 - 16
0,2000	AD	EO	BC	FI	KN		3 - 15
0,2143	AD	EO	BC	FN			3 - 14
0,2222	CD	LO	MN				2 - 9
0,2308	AD	EO	BC	FK	IN		3 - 13
0,2500	AK	EO	BC	DI	FL	MN	4 - 16
0,2667	CM	EO	DL	FI	KN		4 - 15
0,2727	AD	EO	BC	FM	IN	KL	3 - 11
0,2857	AK	EO	BC	DI	FN		4 - 14
0,3000	AD	IO	BC	KL	MN		3 - 10
0,3077	CM	EO	DL	FK	IN		4 - 13
0,3333	AM	EO	BC	DL	FI	KN	5 - 15
0,3571	AM	EO	BC	DL	FN		5 - 14
0,3750	AD	IO	BC	KN			3 - 8
0,3847	AM	EO	BC	DL	FK	IN	5 - 13
0,4000	DF	IO	AE	BC	KL	MN	4 - 10
0,4286	AM	EO	BC	DI	FN	KL	6 - 14
0,4444	AK	LO	BC	DI	MN		4 - 9
0,4545	DF	AO	BI	CE	KL	MN	5 - 11
0,5000	BF	CO	AE	DI	KL	MN	6 - 12
0,5385	EF	AO	BC	DI	KL	MN	7 - 13
0,5454	BF	CO	AE	KL	MN		6 - 11
0,5556	DF	LO	CE	MN			5 - 9
0,5714	CM	EF	DL				4 - 7
0,5833	EF	CO	DI	KL	MN		7 - 12
0,6000	BF	IO	AE	KL	MN		6 - 10
0,6250	AM	IO	BC	DL	KN		5 - 8
0,6364	EF	AO	BI	KL	MN		7 - 11
0,6667	AF	CO	BE	DI	KL	MN	8 - 12
0,7000	EF	IO	IL	MN			7 - 10
0,7143	AM	NO	BC	DL			5 - 7
0,7273	AF	CO	BE	DL	MN		8 - 11
0,7500	BF	IO	AE	KN			6 - 8
0,7778	EF	LO	MN				7 - 9
0,8000	AF	IO	BE	KL	MN		8 - 10
0,8182	CF	AO	BI	DE	KL	MN	9 - 11
0,8333	AM	KO	BC	DL	IN		5 - 6
0,8571	AM	EF	BC	DI	KL		6 - 7
0,8750	EF	IO	KN				7 - 8
0,8889	AF	LO	BE	MN			8 - 9
0,9000	CF	IO	DE	KL	MN		9 - 10
1,0000	AF	IO	BC	DE	KL	MN	10 - 10

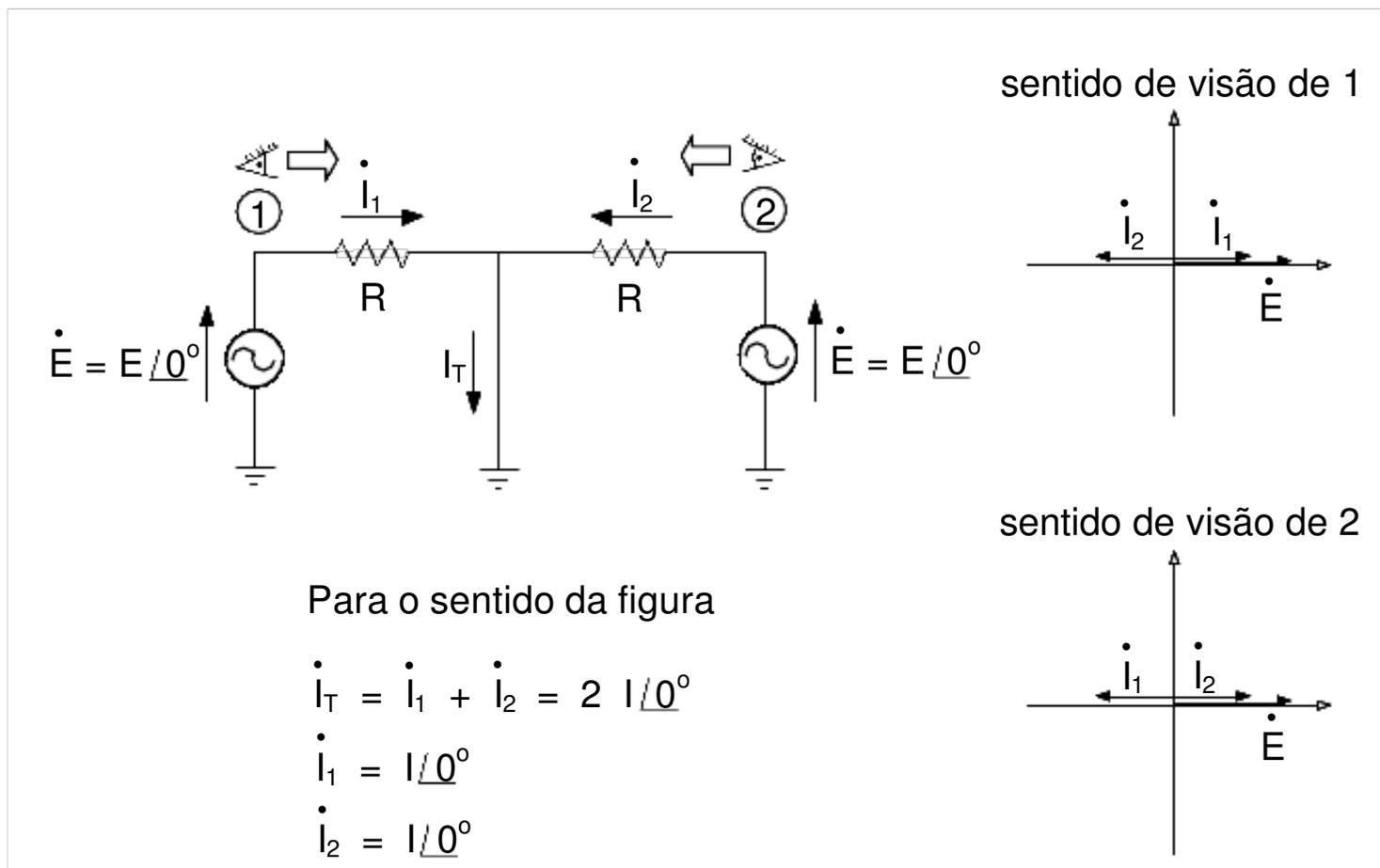
Tipo: 4AM51 70-7AA (Siemens)

## RELÉS DIRECIONAIS (67)

### 1. NOÇÃO DE DIRECIONALIDADE

Sejam as figuras a seguir:

Suponhamos um sistema para o qual se tem duas resistências iguais, sendo alimentadas por duas fontes também iguais, o que produzirá duas correntes de mesmo valor e de mesmo ângulo de fase com relação à tensão:



**Figura 1: Visão de dois observadores para um circuito resistivo.**

Apesar das correntes possuírem os mesmos módulo e ângulo, inclusive se somando no condutor central comum, o observador 1 enxerga a corrente  $I_1$  se afastando e a corrente  $I_2$  se aproximando. O contrário se passa com o observador 2. Desta forma, em termos de referência para os observadores, pode-se traçar o diagrama vetorial à direita para denotar as diferentes visões dos observadores.

Seja agora duas impedâncias cada qual com um certo ângulo. As correntes produzidas por essa topologia podem ser vistas, por um lado, no fluxo de corrente no circuito mostrado pelas equações à esquerda, por outro lado, no sentido de observação dos observadores 1 e 2, conforme os diagramas à direita.

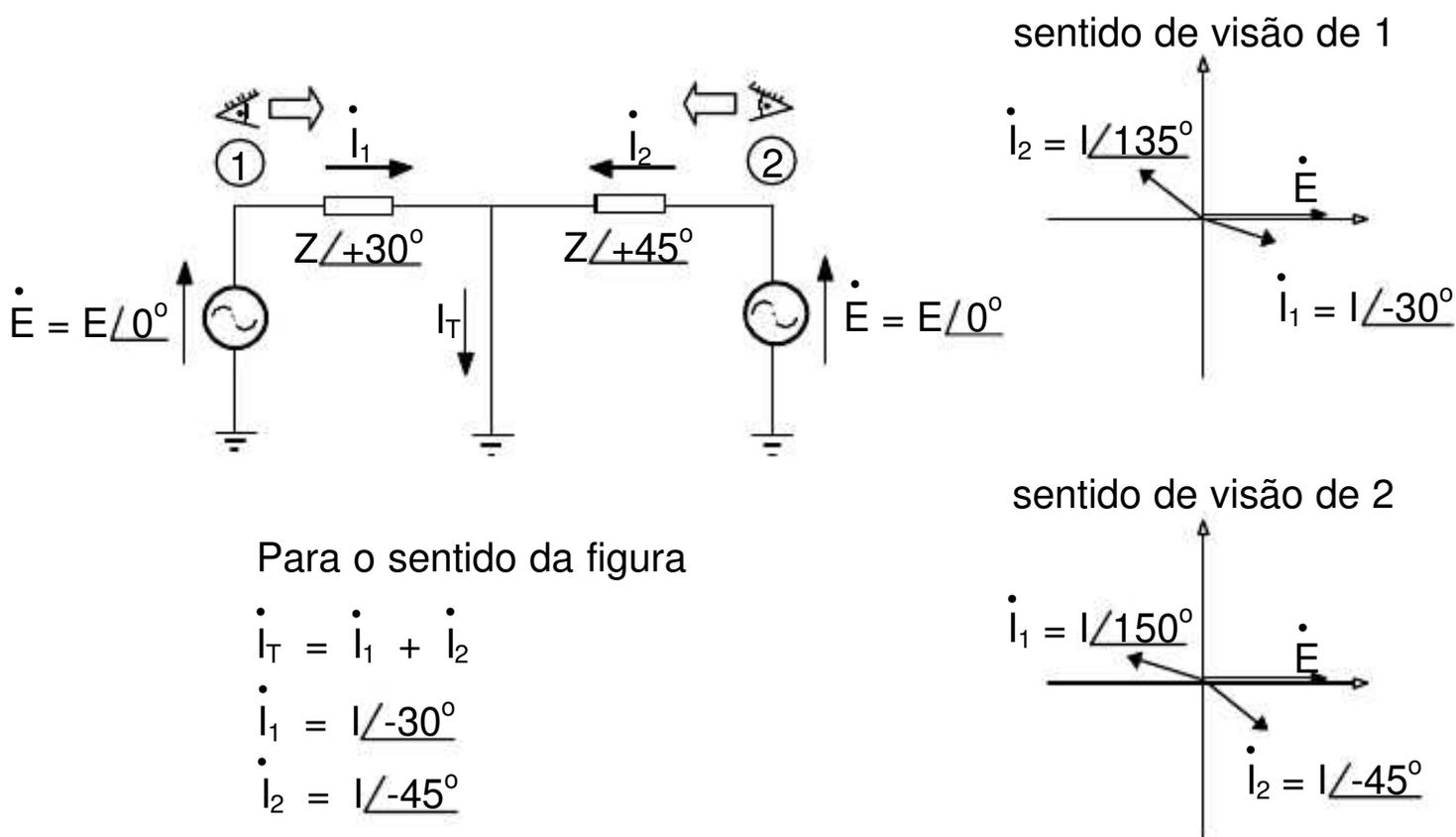


Figura 2: Visão de dois observadores para um circuito com impedâncias.

## 2. O RELÉ DIRECIONAL

### 2.1 Balança de torques de uma unidade direcional

O relé direcional (nº ANSI 67) é basicamente composto de uma balança de torques, na qual no lado da operação (que produz conjugado positivo, no sentido de fechar os contatos) tem-se um elemento direcional e no lado de bloqueio (para abrir os contatos) tem-se uma mola, conforme a figura 3 a seguir:

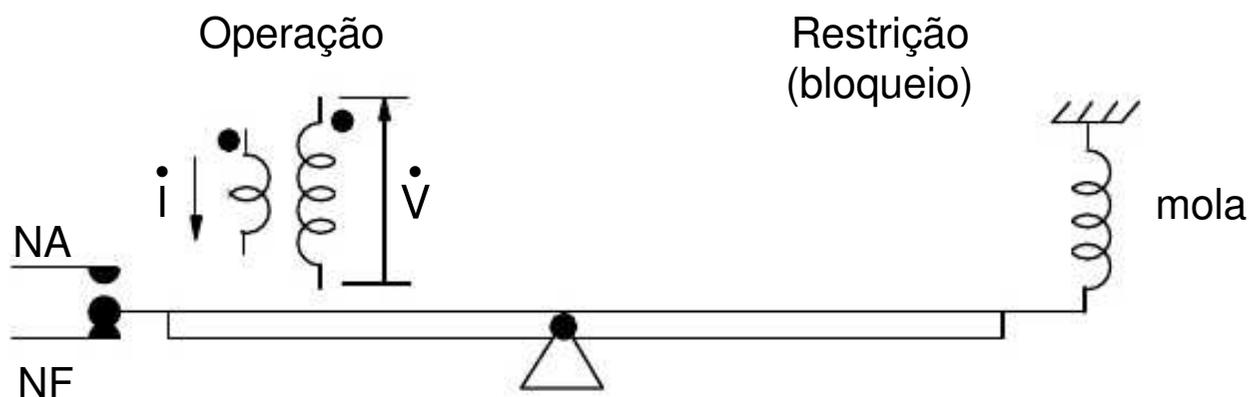


Figura 3: Balança de torques para o relé direcional 67

A equação de torques deste relé é dada por:

$$T = K V I \cos(\theta - \tau) - K_{MOLA}$$

Onde,

T é o torque resultante na balança - se "+" o relé opera, se "-" o relé bloqueia)

K é uma constante de proporcionalidade

V é o valor eficaz da tensão na bobina de potencial

$\theta$  é o ângulo de defasamento entre a tensão e a corrente

$\tau$  é o ângulo de máximo torque do relé

A qual será deduzida a seguir.

### 2.2 Relé direcional tipo copo de indução

Seja a figura:

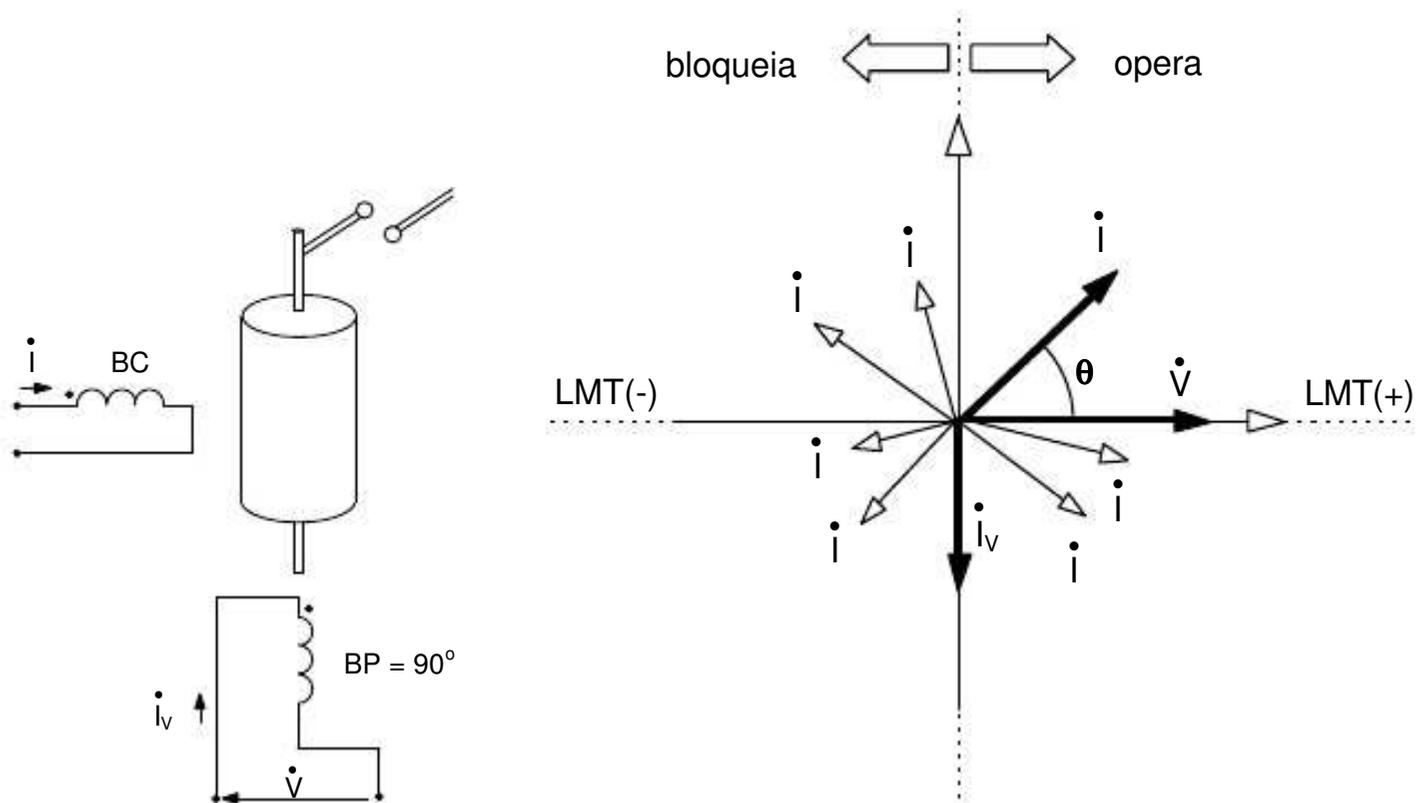


Figura 4: Relé tipo copo de indução sem compensação na bobina de potencial

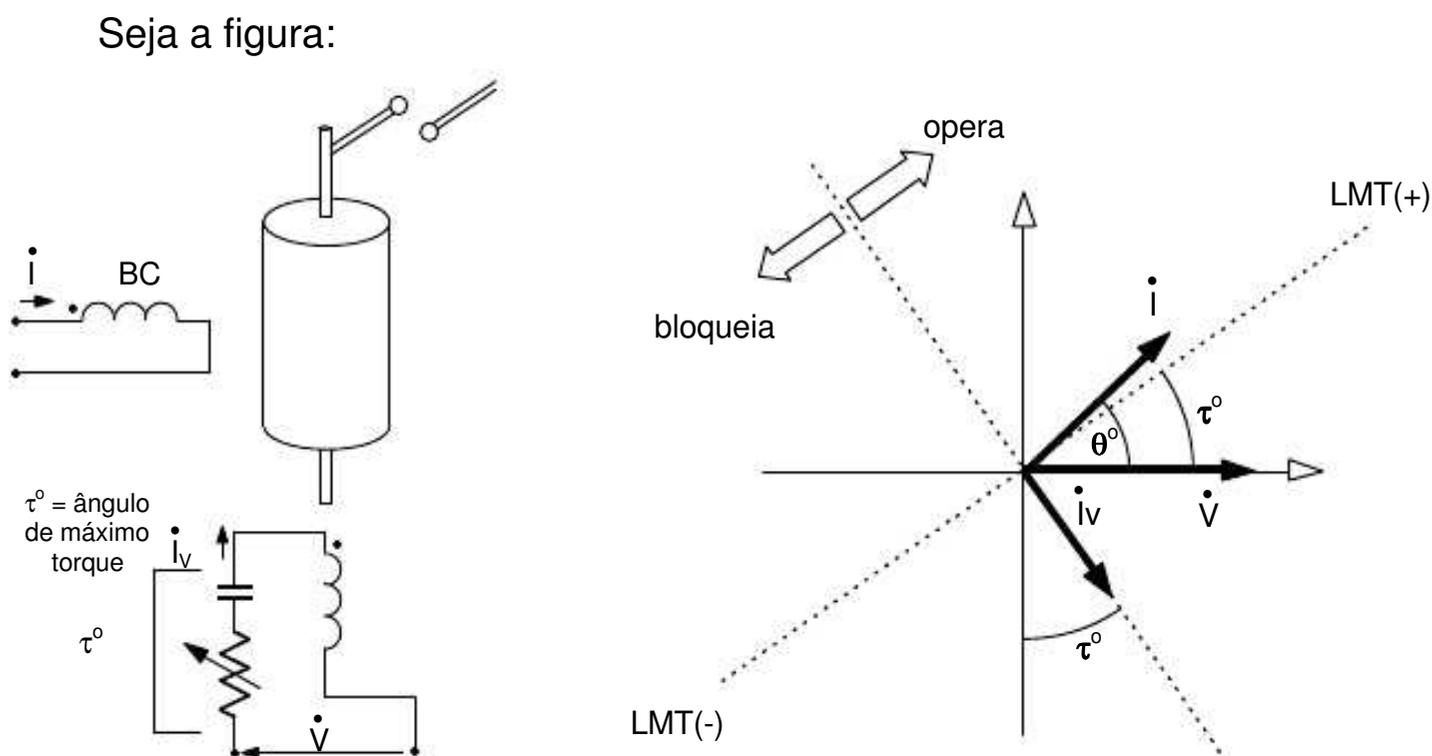
$$T = K' I_v I \sin \left( \overset{\wedge}{\dot{I}} - \overset{\wedge}{\dot{I}_v} \right) = K' I_v I \sin \left( \overset{\wedge}{\dot{I}} - (-90^\circ) \right) = K' I_v I \sin \left( \overset{\wedge}{\dot{I}} + 90^\circ \right)$$

$T = K V I \cos(\theta)$

OBS:

1. A corrente de carga  $\dot{I}$  pode assumir qualquer posição no plano
2. O torque máximo ocorre quando  $\theta = 0$ ; ou melhor, quando  $\dot{I} - \dot{I}_V = 90^\circ$

Incluamos agora uma impedância capacitiva no circuito de potencial, de tal forma a alterar positivamente o ângulo da corrente deste circuito.



**Figura 5: Relé tipo copo de indução com compensação na bobina de potencial**

O que resulta em:

$$T = K V I \cos (\theta - \tau)$$

Provocando, desta forma, o deslocamento angular do linha do plano de operação - bloqueio do relé em  $\tau^\circ$ , bem como da linha de máximo torque LMT, pois, esta é sempre ortogonal àquela.

- Quando T for positivo  $\Rightarrow$  ocorre o fechamento dos contatos - operação
- Quando T for negativo  $\Rightarrow$  ocorre a abertura dos contatos - bloqueio
- Quando T for zero  $\Rightarrow$  contatos no limiar - *pick-up*

### 3. REPRESENTAÇÃO UNIFILAR DO RELÉ DIRECIONAL

A figura a seguir mostra a conexão unifilar de um relé direcional em um sistema elétrico. Igualmente, observa-se que o sentido de visão deste relé está indicado na figura.

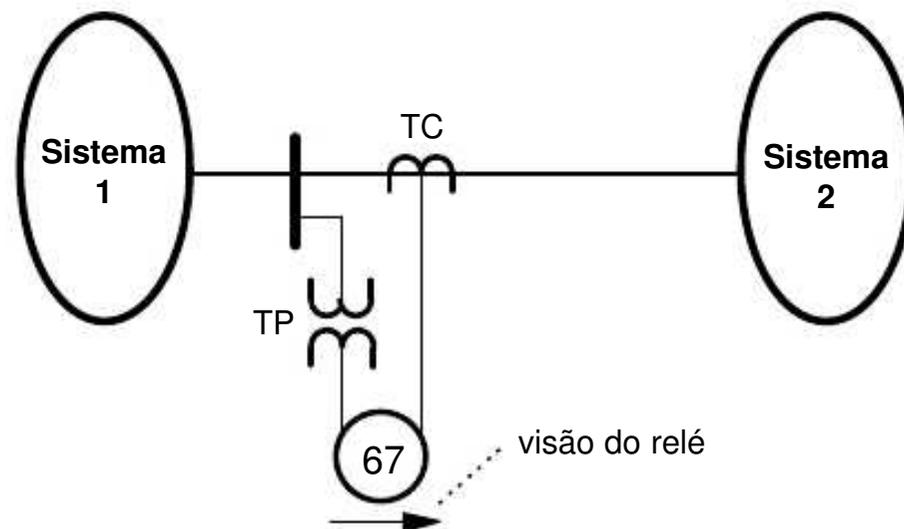


Figura 6: Representação unifilar do relé direcional 67

### 4. OBSERVAÇÕES SOBRE O RELÉ DIRECIONAL

#### 4.1 Inversão do plano de operação - bloqueio

Existem basicamente três possibilidades de inversão do plano de operação - bloqueio do relé direcional:

a) Troca do contato NA pelo NF:

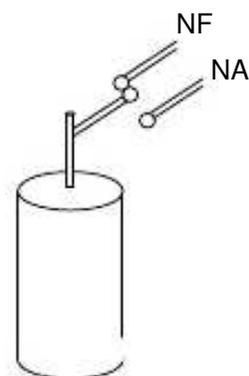


Figura 6: troca de contatos NA por NF

Nesta situação deve-se verificar a influência do *pick-up* ou do *drop-out* no desempenho da seletividade, uma vez que o relé 67 normalmente vem associado a outros relés para uma formação de um esquema seletivo.

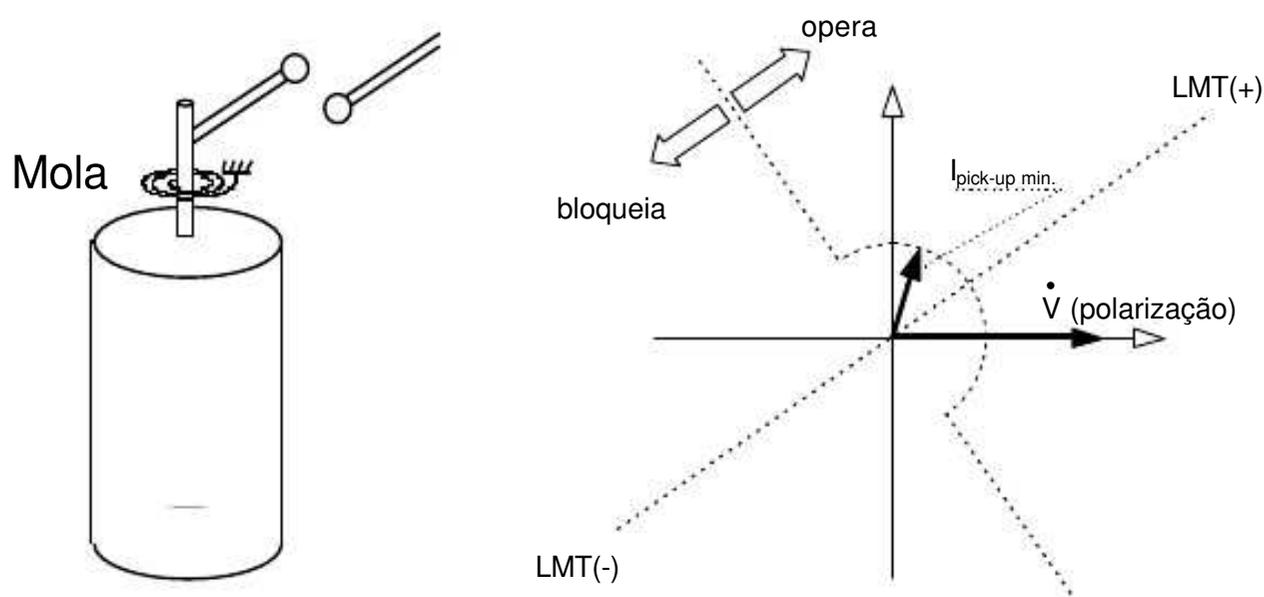
b) Inversão da polaridade da bobina de potencial

c) inversão da polaridade da bobina de corrente

## 4.2 Efeito de mola

Normalmente, o papel de uma mola em relé eletromecânico (ou de uma constante negativa na equação de torques em um relé numérico) tem por finalidade reduzir a sensibilidade do relé para que ele não opere em situação de baixos sinais. De uma certa forma, a mola está associada ao *pick-up* / *drop-out* do relé.

Sendo assim a mola provoca uma área de bloqueio maior devido ao aparecimento de uma corrente de pick-up mínima ( $I_{pick-up\ min.}$ ), conforme mostra a figura a seguir.



**Figura 7: Efeito da mola em relé direcional**

A equação de torques fica:

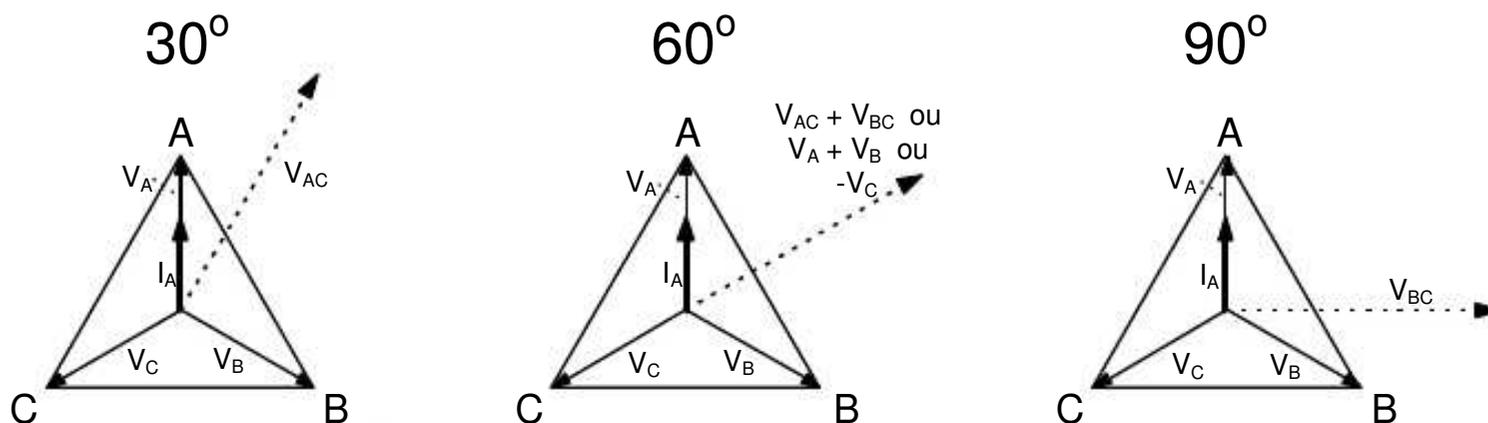
$$T = K V I \cos (\theta - \tau) - K_{MOLA}$$

## 4.3 Tipos de polarização

Existem basicamente três tipos de polarização de um relé direcional 67:  
30° - 60° - 90°

Cada qual possui suas vantagens e inconvenientes. Normalmente, a polarização mais usada é a 90° pelo fato de uma vez tomada uma certa fase como referência (por exemplo fase A) as tensões das outras duas (fases B e C) são usadas para a polarização e assim sucessivamente para as outras fases. Além de se obter o ângulo de polarização mais adequado para a maioria dos casos de curto circuito, uma vez ocorrendo um problema na fase de referência (fase A por exemplo) as outras duas (B e C) estão supostamente sãs, não prejudicando, desta forma, a polarização do relé.

A figura a seguir mostra como obter os três tipos de polarização, tomando como referência, por exemplo, a fase A.



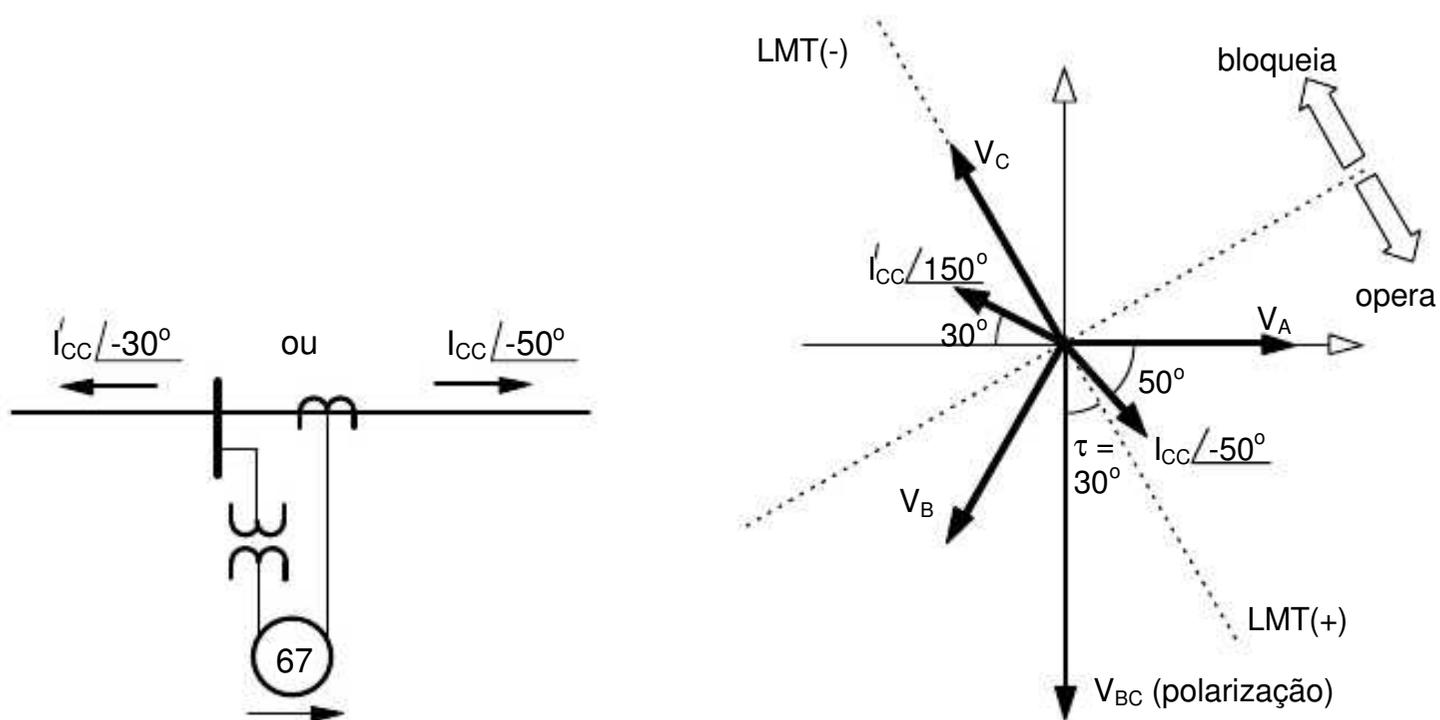
**Figura 8: Polarizações 30°, 60° e 90° (quadratura) tomando a fase A como exemplo**

A tabela a seguir mostra as combinações para a polarização de relés direcionais, para as três fases.

Fase	Sinal	Conexão 30°	Conexão 60°	Conexão 90°
<b>A</b>	atuação	$I_A$	$I_A$	$I_A$
	polarização	$V_{AC}$	$V_{AC} + V_{BC}$	$V_{BC}$
<b>B</b>	atuação	$I_B$	$I_B$	$I_B$
	polarização	$V_{BA}$	$V_{BA} + V_{CA}$	$V_{CA}$
<b>C</b>	atuação	$I_C$	$I_C$	$I_C$
	polarização	$V_{CB}$	$V_{CB} + V_{AB}$	$V_{AB}$

**5. EXEMPLO DE APLICAÇÃO 1**

- Desenhar o diagrama fasorial do relé 67, polarizado em quadratura, com ângulo de máximo torque igual a 30°;
- Plotar no mesmo gráfico uma corrente de falta indutiva  $I_{CC} \overline{-50^\circ}$ , no sentido de visão do relé;
- Idem para  $I'_{CC} \overline{-30^\circ}$  no sentido contrário de visão do relé ( $I'_{CC} \overline{-30^\circ + 180^\circ}$ ).



**Figura 9: Exemplo de aplicação do relé direcional (mostrado para fase A)**

Obs: A linha de máximo torque é marcada a partir da tensão de polarização mais o ângulo de máximo torque. Em seguida, a  $90^\circ$  da LMT, é traçada a linha de separação dos semi-planos operação e bloqueio.

## 6. EXEMPLO DE APLICAÇÃO 2

Em uma subestação recebedora de uma grande indústria foram instalados relés direcionais na conexão indicada na figura 10 (polarização  $-30^\circ$ , não usual). Na mesma figura encontram-se indicados o sentido de visão do relé, as correntes de carga e de defeito externo. Pede-se:

- Traçar o diagrama fasorial das ligações, mostrando as zonas de operação e bloqueio do relé, sendo dado o ângulo de máximo torque  $\tau = 45^\circ$ .
- Para um curto circuito externo com corrente atrasada de  $45^\circ$ , no mesmo sentido de visão do relé, pergunta-se se o relé operará. O que fazer para garantir a operação?
- Como se comporta o relé para uma carga com fator de potência 0,8 indutivo (ângulo de defasamento =  $-36,7^\circ$ ).
- Plotar a característica do relé polarizado em quadratura ( $90^\circ$ ) e verificar o seu desempenho de operação - bloqueio para as correntes de carga e de falta mencionadas.

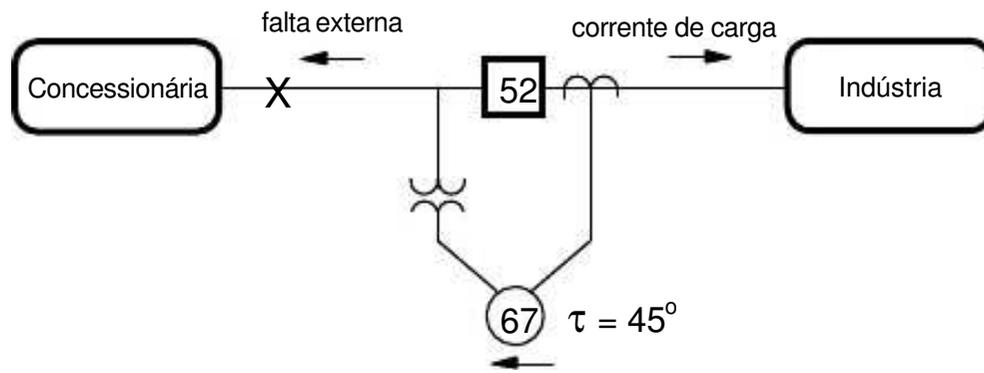


Figura 10-a: Unifilar da conexão do relé direcional do exemplo

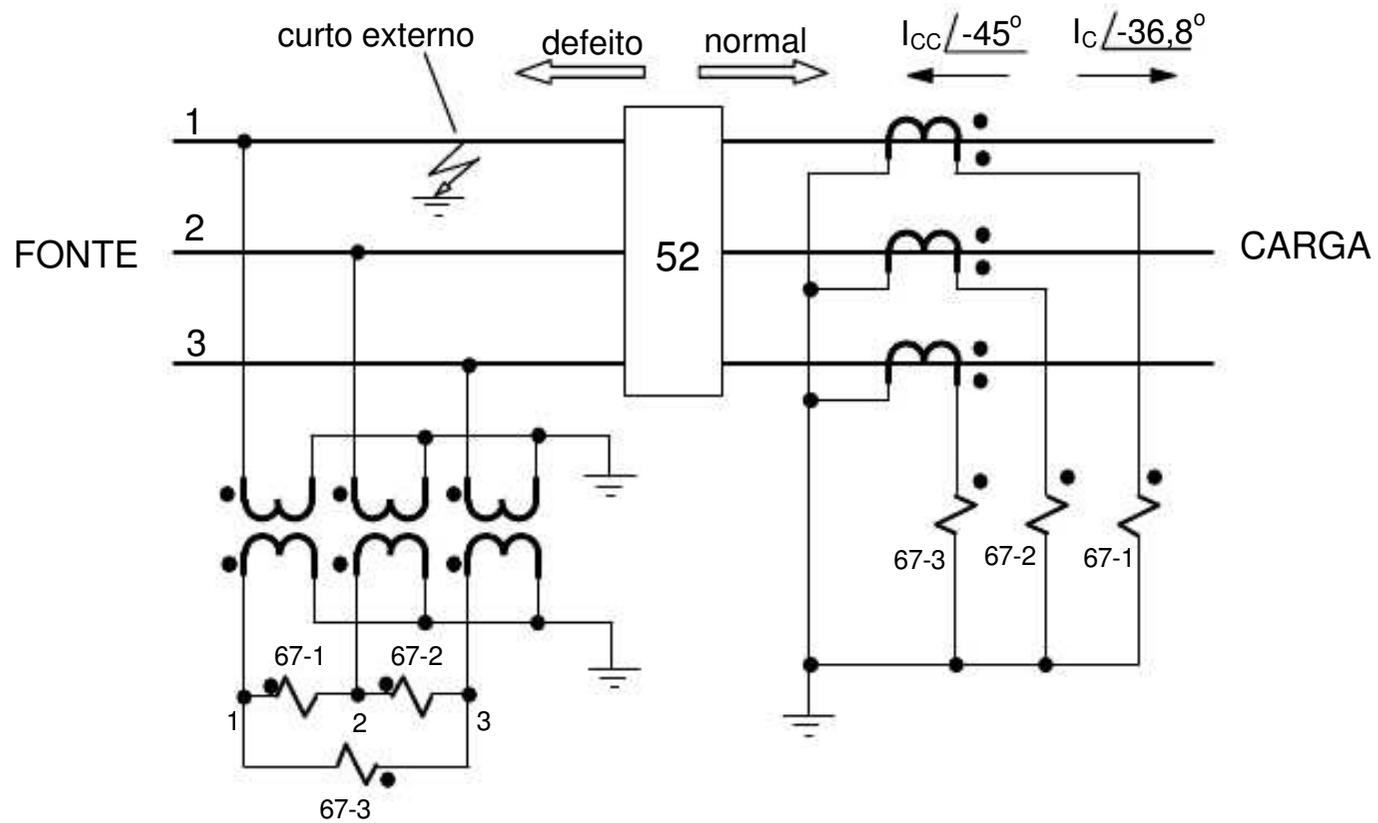


Figura 10-b: Trifilar da conexão do relé direcional do exemplo

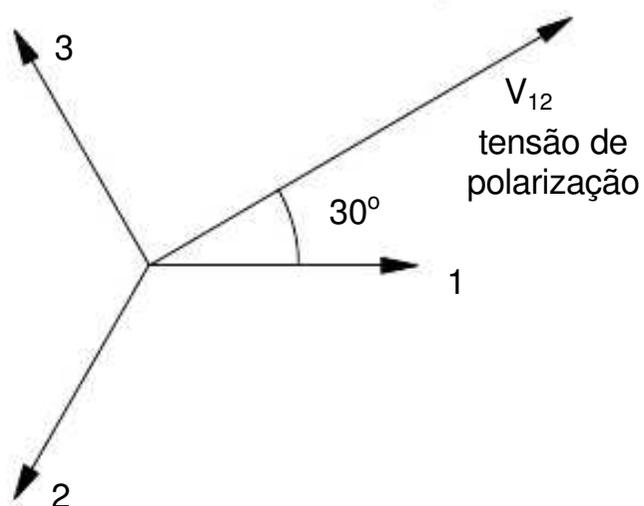


Figura 10-c: Jogo trifásico de tensões.

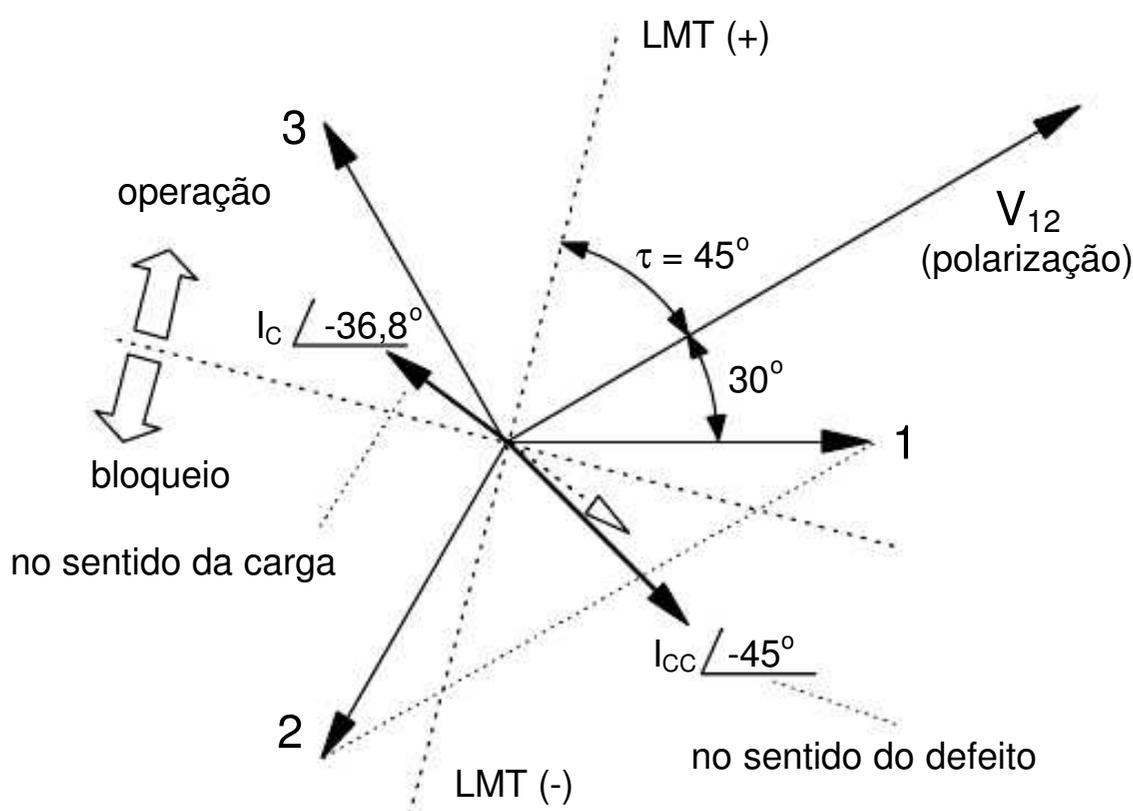
**SOLUÇÃO**

a) A partir do jogo de tensões 1 - 2 - 3, tem-se que as unidades 67 estão polarizadas da seguinte forma:

Unidade	Bobina de Tensão	Bobina de Corrente
67-1	$V_{12}$	$I_1$
67-2	$V_{23}$	$I_2$
67-3	$V_{31}$	$I_3$

Tomando a fase A como exemplo, o diagrama é montado com segue -

- A partir da tensão  $V_{12}$ , conta-se  $45^\circ$  ( $\tau$ ) no sentido anti-horário e plota-se a LMT, sendo o sentido (+) indicado na figura a seguir.
- Colocar as correntes, tomando-se cuidado com o sentido de visão do relé (lembrar que a corrente que está no sentido contrário de visão do relé deve ser deslocada de  $180^\circ$ ).



**Figura 11: Diagrama vetorial com do relé direcional (unidade 67-1) polarizado de acordo com a figura 10**

b) No diagrama da figura 11 a corrente de falta foi plotada, no sentido de visão do relé. Percebe-se que  $I_{CC}$  caiu no semi-plano de bloqueio. Portanto, para um curto circuito externo com uma corrente a  $45^\circ$  atrasada o relé não operará. Para garantir a operação do relé em tal situação, alguns procedimentos podem ser adotados separadamente ou em conjunto:

- inversão do plano operação - bloqueio do relé como salientado no texto anterior;
- polarizar a bobina de potencial com outro ângulo;
- escolher um novo ângulo de máximo torque.

c) A corrente  $I_C$  de uma carga com fator de potência indutivo 0,8 ( $\varphi = -36,8^\circ$ ) foi plotada no diagrama da figura 11. Deve-se notar que esta corrente foi deslocada de  $180^\circ$  pois está no sentido de visão contrário do relé. Percebe-se ainda que o fasor da corrente fica muito próximo da linha operação - bloqueio do relé (mas no semi-plano de operação), o que, além do relé ficar operado, é inseguro ficar nessa região de indecisão por se tratar de uma carga normal.

d) A conexão  $90^\circ$  com um ângulo de máximo torque  $45^\circ$ , se apresenta como uma solução adequada para o problema, como mostra a figura 12:

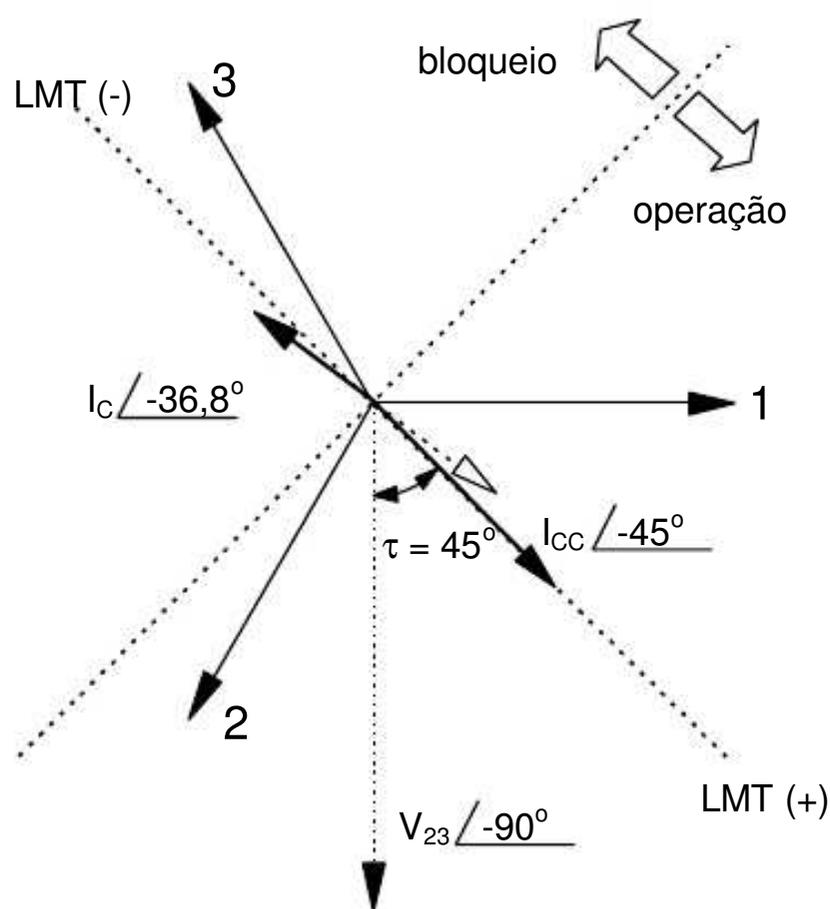


Figura 12: Relé 67 com polarização  $90^\circ$  (quadratura).

**Obs. finais sobre relés direcionais (67):**

1. A polarização em quadratura é a mais utilizada nos relés direcionais 67. Com isso, consegue-se o deslocamento suficiente na característica de operação / bloqueio do relé, que, associado ao ângulo de máximo torque, faz com que a LMT (+) venha a cair exatamente sobre a corrente que se deseja a operação do relé. Além disso, as tensões utilizadas na polarização (por exemplo na polarização do relé da fase A, são utilizadas as tensões VB e VC) são pouco afetadas quando de uma falta na própria fase, fato que não prejudica o desempenho do relé.
2. Para ajustar a característica de operação/bloqueio do relé 67:
  - inicialmente, defini-se o sentido de visão do relé no diagrama unifilar (isto definirá o sentido das polaridades dos TC's, TP's, bobinas de potencial e bobinas de corrente);
  - em seguida, plota-se todas as correntes que deverão fluir pela rede: correntes de carga indutiva, capacitiva, sentido esquerda para direita, sentido direita para esquerda, correntes de falta no sentido de visão do relé, correntes de falta em sentido contrário à visão do relé, etc;
  - uma vez plotadas as correntes para as quais o relé deverá fechar os contatos e as correntes para as quais ele deverá permanecer com os contatos abertos. Defini-se a característica operação/bloqueio que é a a reta que separa um grupo de correntes (para contato fechado) do outro grupo (para contato aberto);
  - a partir da característica op/bl plotada, defini-se a LMT a 90 graus da caract. op/bl. Com isso, escolhe-se a polarização mais adequada (30, 60 ou 90 graus) e ângulo de máximo torque do relé, para que a LMT (+) caia sobre o conjunto de correntes em que os contatos do relé devem fechar.
3. As vezes, a separação em dois semiplanos (operação/ bloqueio) não é suficiente para separar o conjunto de correntes que fechará contato do conjunto que mantém contato aberto. Desta forma, pode-se unir dois relés 67 (duas características op/bl) para formar uma região angular de operação (e não uma reta de 180 graus). Os contatos dos dois relés são postos em série (como um função lógica "E") para definir o novo plano angular de operação/ bloqueio.

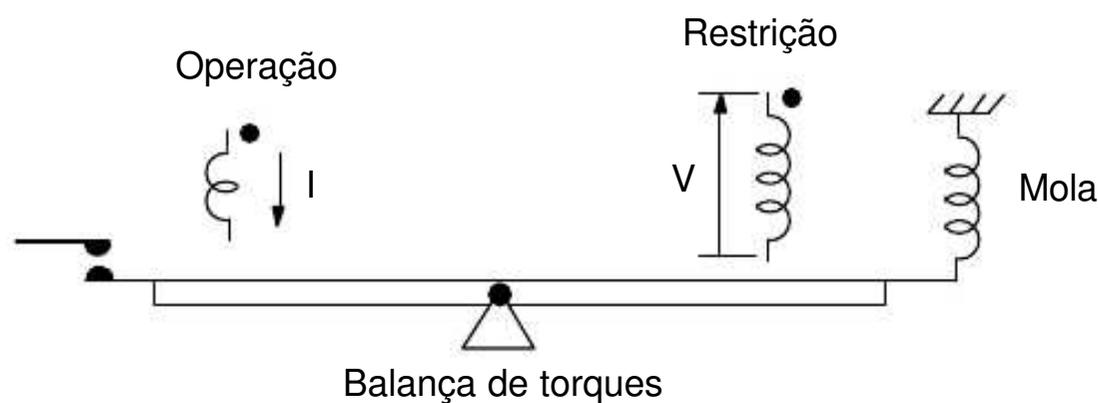
## RELÉS DE DISTÂNCIA

### 1. Tipos

- Relé de Impedância
- Relé de Reatância
- Relé de Admitância
- Relés Poligonais

### 2. Relé de Impedância

Tem restrição por tensão e atuação por corrente, conforme figura a seguir:



A equação de torques é dada por:

$$C = K_1 I^2 - K_2 V^2 - K_3$$

Onde:

- $K_1$  e  $K_2$  são constantes de proporcionalidade
- $K_3$  é a constante de mola
- $C$  é o conjugado total na balança

Quando:

- $C > 0$  os contatos fecham (operação)
- $C < 0$  os contatos abrem (bloqueio)
- $C = 0$  limiar de operação (definição da característica operação/bloqueio)

Finalidade da mola → manter contatos abertos em condições de pequenos sinais.

Para traçar a característica operação bloqueio deve-se fazer:

$$C = 0$$

$$K_3 = K_{MOLA} = 0$$

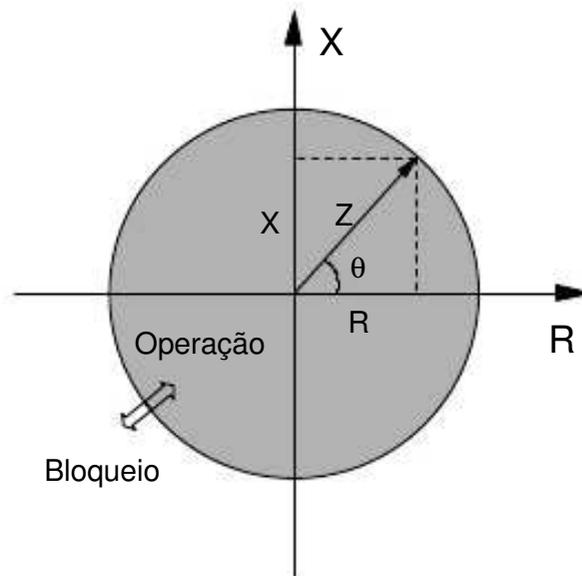
Desta forma, obtém-se:

$$\frac{V}{I} = \sqrt{\frac{K_1}{K_2}} = Z = \text{constante}$$

Como:

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \text{constante}$$

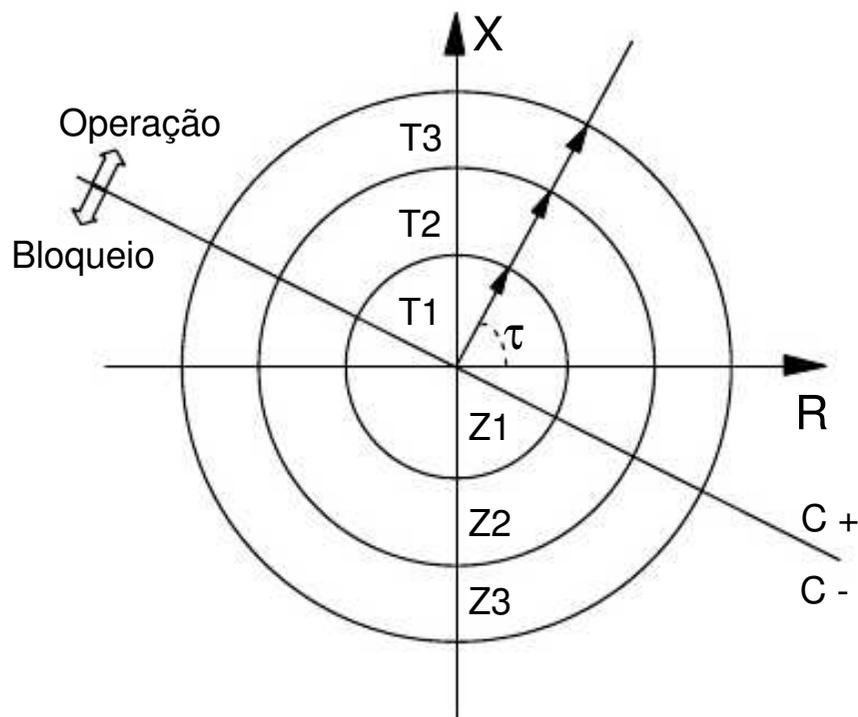
No plano R-X, tem-se a equação de uma circunferência centrada na origem, conforme a figura abaixo:



O relé tipo impedância, por sua vez, é constituído de várias partes:

- unidade de partida direcional (67);
- unidades de medida de impedância ( $Z_1$ ,  $Z_2$  e  $Z_3$ ) de alta velocidade e ajustáveis independentemente;
- unidades de temporização por zona ( $T_1$ ,  $T_2$  e  $T_3$ , onde  $T_1$  é instantâneo), ajustáveis independentemente;
- unidades auxiliares para sinalização (bandeira - B), selo - S, etc.

A figura abaixo mostra a unidade direcional recortando a área de operação das zonas de distância. O ângulo de máximo torque  $\tau$  é ajustável.

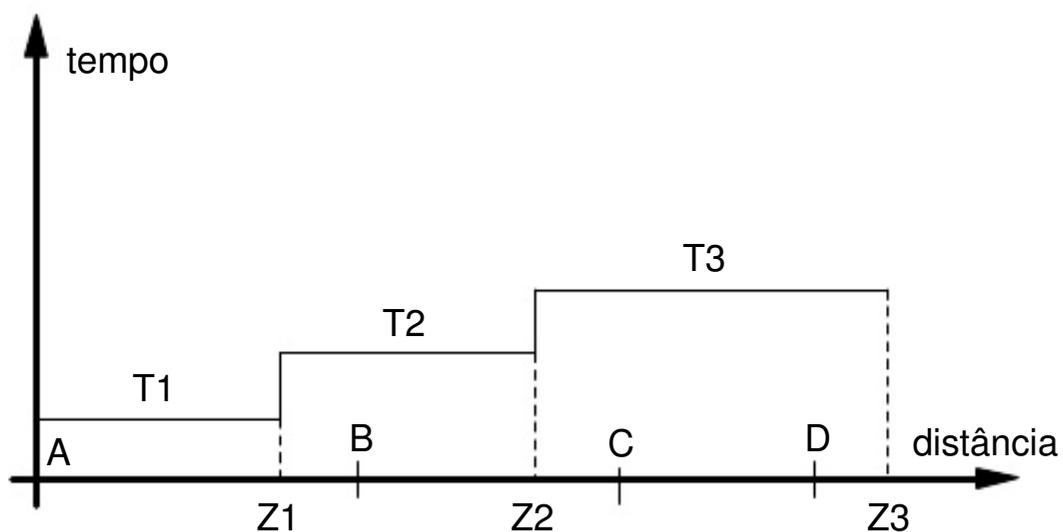


A proteção típica por zona em relés de distância eletromecânicos é:

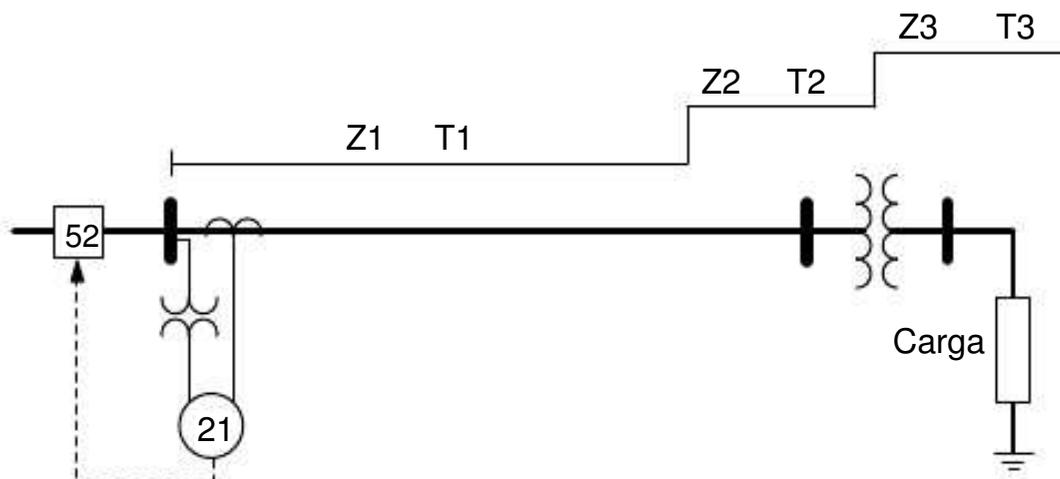
Zona de Proteção	Percentagem da Linha	Temporização
Z1	80 %	instantânea
Z2	120 %	0,5 s
Z3	200 %	1,0 s

Sendo que a primeira não deve sobrepor à proteção de barra e dos equipamentos situados na outra ponta da linha. As outras zonas, a princípio trabalham em retarguarda da primeira, além de servir a propósitos de teleproteção.

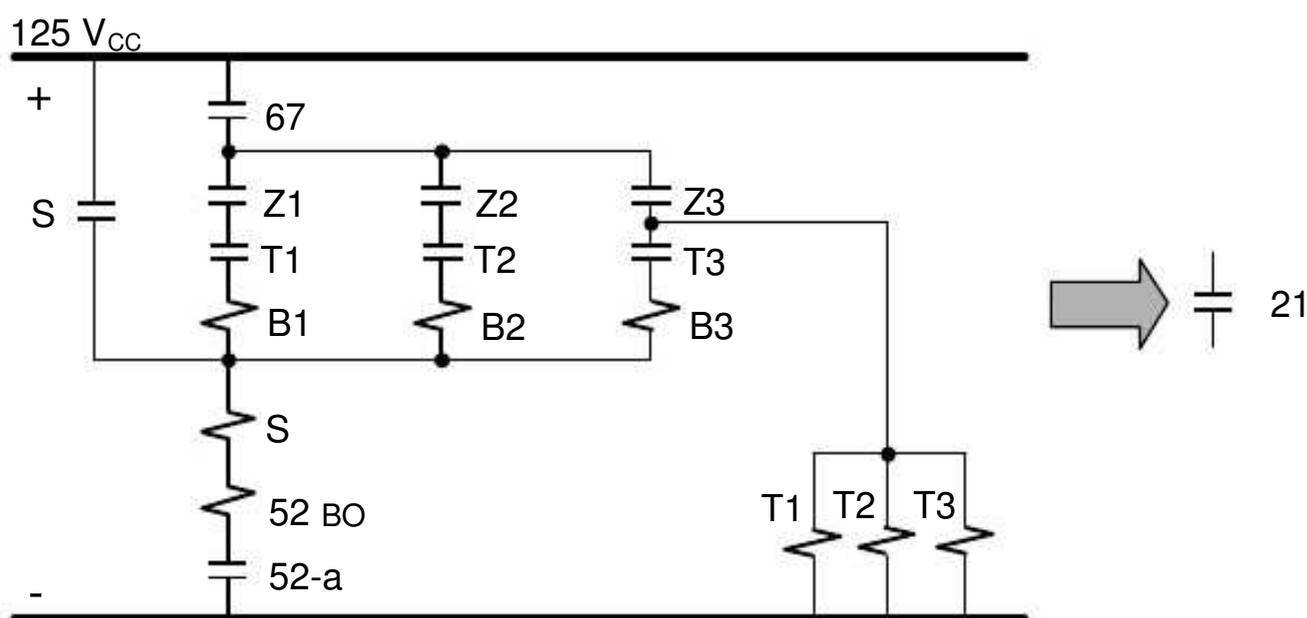
Considerando três trechos de impedância em cascata trechos definidos pelos pontos A - B - C - D, o relé de distância enxerga da seguinte maneira:



E o diagrama físico fica:



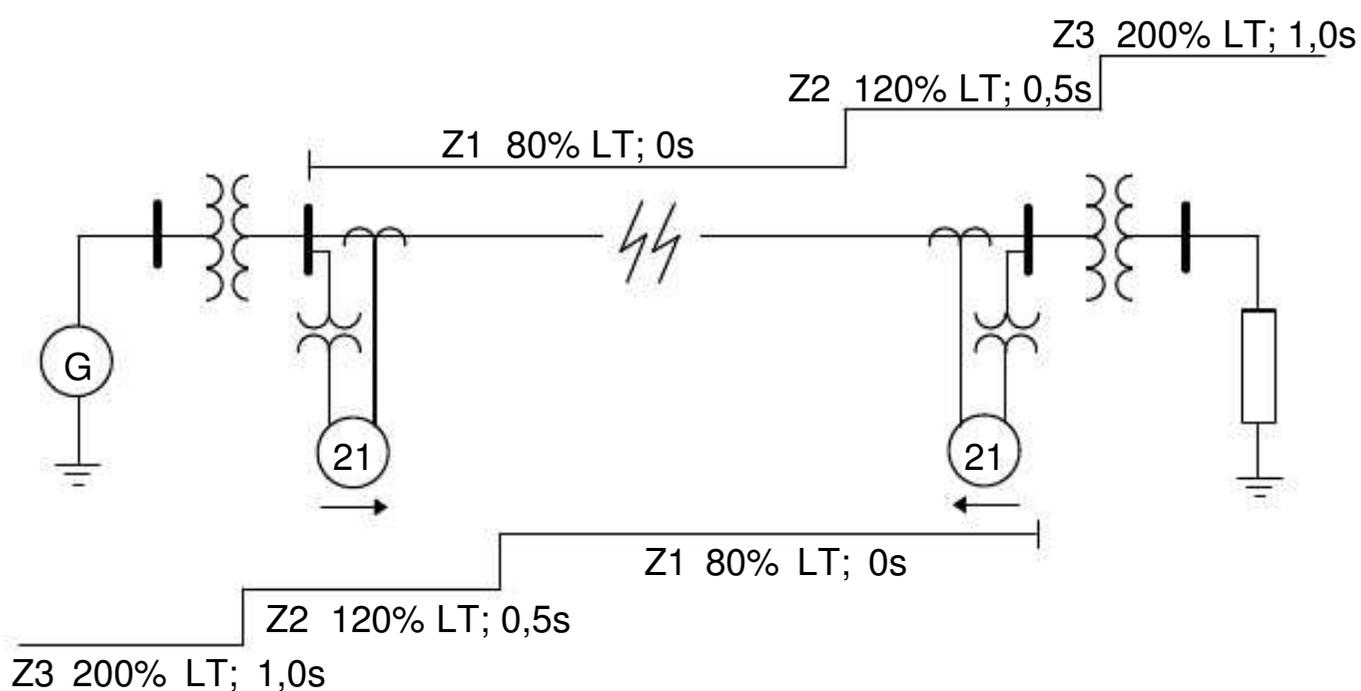
O diagrama funcional do relé é mostrado na figura a seguir:



- No sentido de visão do relé direcional (67), acontecendo uma falha na terceira zona, apenas a terceira unidade de medição (Z3) parte. As três unidades de temporização (T1, T2 e T3) partem simultaneamente. Ao fechar T1 nada acontece. Ao fechar T2 nada acontece. Ao fechar T3, cria-se um caminho para a atuação do disjuntor (52) que está, neste momento, fechado.
- Idem, ainda no sentido de visão do relé direcional (67), acontecendo uma falha na segunda zona, as segunda e terceira unidade de medição (Z2 e Z3) partem. Por causa da partida de Z3 as três unidades de temporização (T1, T2 e T3) partem simultaneamente. Ao fechar T1 nada acontece. Ao fechar T2 cria-se um caminho para a abertura de disjuntor (52). Ao fechar T3, cria-se um outro caminho para a atuação do disjuntor (52) servido então de retaguarda.

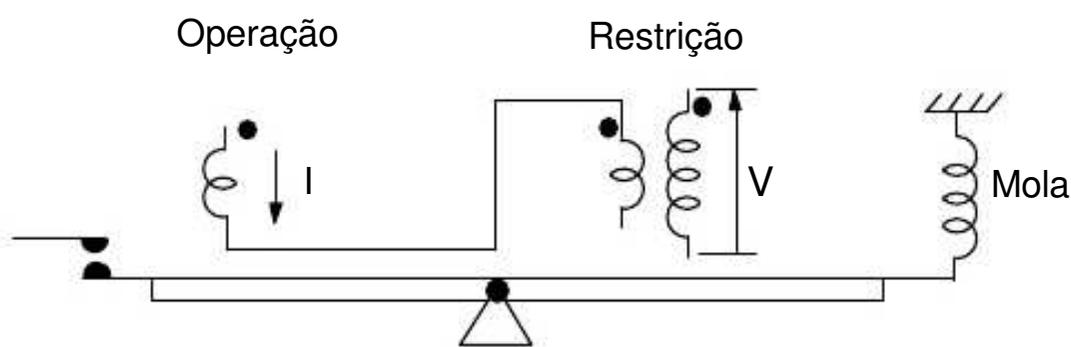
- Idem, ainda no sentido de visão do relé direcional (67), acontecendo uma falha na primeira zona, todas as unidades de medição (Z1, Z2 e Z3) partem. Por causa da partida de Z3 as três unidades de temporização (T1, T2 e T3) partem simultaneamente. Ao fechar T1 cria-se um caminho para a abertura do disjuntor (52). Ao fechar T2 cria-se um outro caminho para a abertura de disjuntor, idem ao fechar T3. Estas duas zonas servem então de retaguarda da primeira.

Para se proteger a totalidade da linha de transmissão (100% LT), normalmente usa-se dois relés igualmente ajustados, um olhando para o outro, conforme mostra a figura a seguir:



### 3. Relé de Reatância

Tem restrição direcional e atuação por corrente, conforme figura a seguir:



A equação de torques é dada por:

$$C = K_1 I^2 - K_2 VI \cos(\theta - \tau) - K_3$$

Onde:

- $K_1$  e  $K_2$  são constantes de proporcionalidade
- $K_3$  é a constante de mola
- $C$  é o conjugado total na balança
- $VI \cos(\theta - \tau)$  é o conjugado da unidade direcional

Quando:

- $C > 0$  os contatos fecham (operação)
- $C < 0$  os contatos abrem (bloqueio)
- $C = 0$  limiar de operação (definição da característica operação/bloqueio)

Supondo inicialmente  $\tau = 90^\circ$  obtém-se:

$$C = K_1 I^2 - K_2 VI \sin(\theta) - K_3$$

Para traçar a característica operação bloqueio deve-se fazer:

$$C = 0$$

$$K_3 = K_{\text{MOLA}} = 0$$

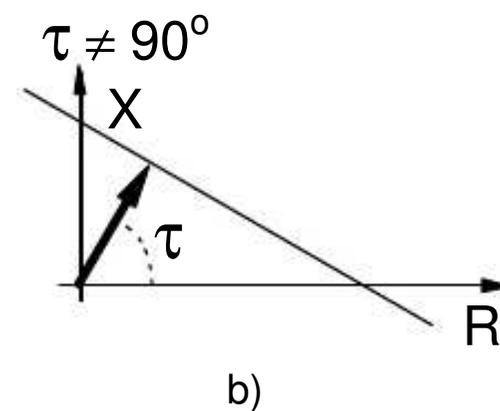
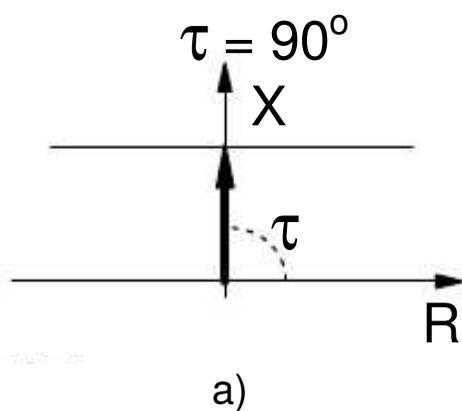
Desta forma, obtém-se:

$$K_1 I = K_2 V \sin \theta \quad \Rightarrow \quad \frac{V}{I} \sin \theta = \frac{K_1}{K_2} = \text{constante}$$

Então:

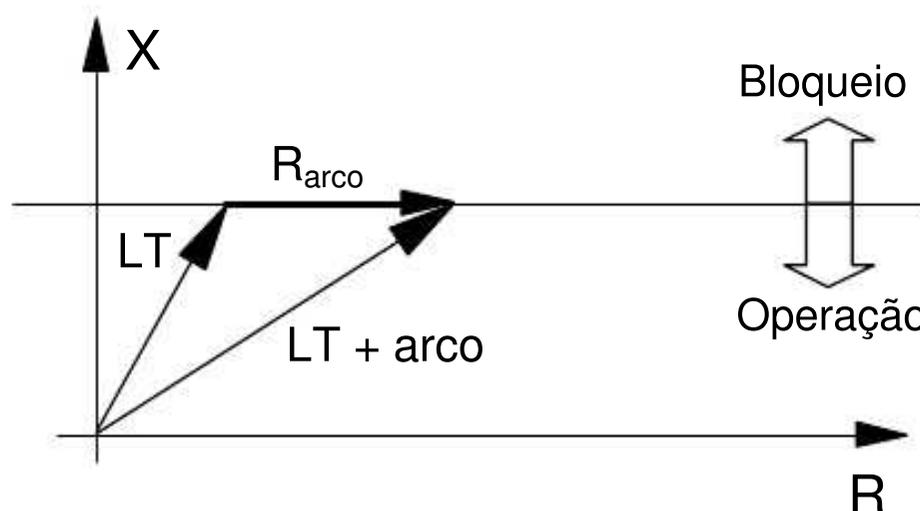
$$Z \sin \theta = X = \text{constante}$$

No plano R-X, tem-se uma reta paralela ao eixo das abcissas, conforme a figura "a" abaixo:

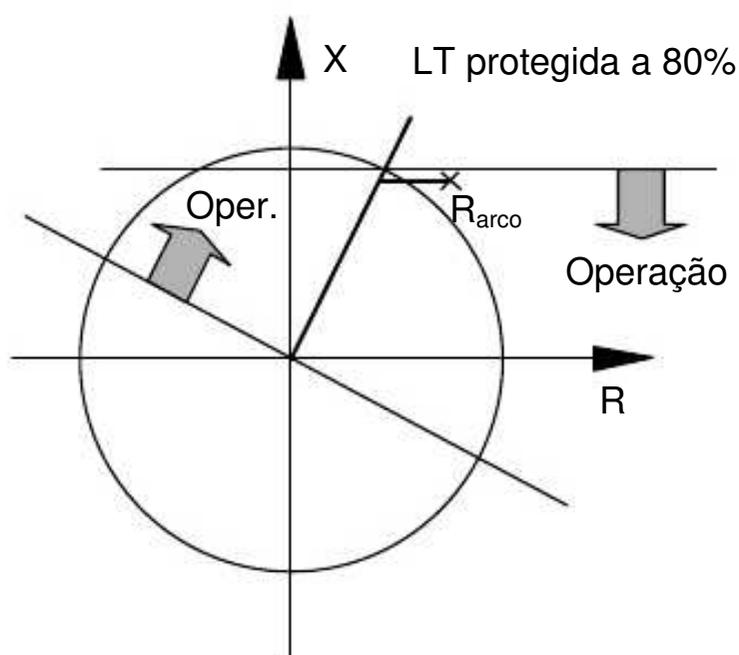


Pode-se, no entanto, conseguir inclinações diferentes para a reta, fazendo o ângulo de máximo torque diferente de 90°, conforme mostra a figura “b”.

Observa-se que a característica do relé de reatância é aberta, sendo bastante problemática para oscilações de potência. Porém uma das grandes vantagens é a sua imunidade aos efeitos dos arcos voltaicos, pois, estes são puramente resistivos, conforme mostra a figura abaixo:



Este tipo de relé é adequado para linhas curtas de tensões não muito altas. Fazendo uma comparação com o relé de impedância, temos o resultado abaixo:



OBS:

1) uma carga do tipo  $Z = R + j X$ , conectada em uma barra de tensão  $V$  que demanda uma potência  $S = P + j Q$ , pode ser representada por:

$$R = V^2 \frac{P}{P^2 + Q^2} \quad e \quad X = V^2 \frac{Q}{P^2 + Q^2}$$

ou seja, a oscilação de potência pode ser representada por oscilação de impedância.

2) A resistência de um arco voltaico pode ser dada pela expressão (Warrington):

$$R_{\text{ARCO}} = \frac{28707 \cdot L}{I^{1,4}}$$

Onde:

L - o comprimento do arco (normalmente distância  $\phi$ - $\phi$  ou  $\phi$ -terra) em metros  
 I - a corrente de curto circuito no arco em Ampéres

Caso haja vento o comprimento L deve ser corrigido para  $L = e + v \cdot t$  onde:

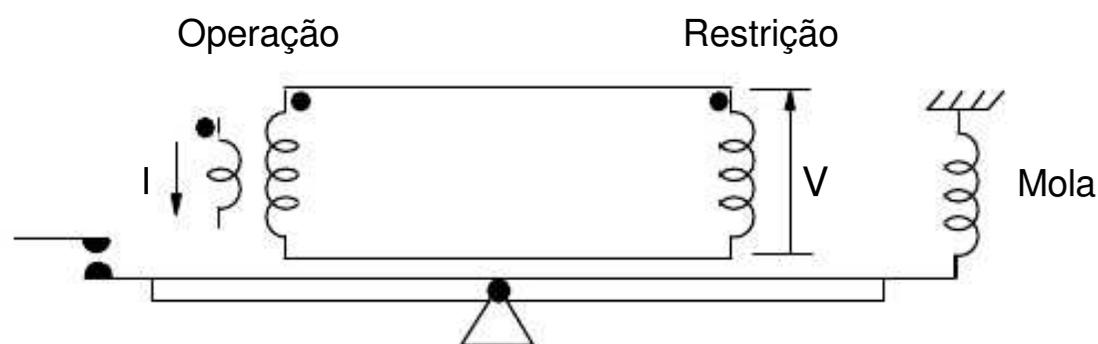
L - o comprimento do arco com o vento

e - o espaçamento original

t - tempo de falta decorrido

#### 4. Relé de admitância (MHO)

Por definição é um relé com restrição por tensão e atuação por unidade direcional, conforme figura a seguir:



A equação de torques é dada por:

$$C = K_1 VI \cos(\theta - \tau) - K_2 V^2 - K_3$$

Onde:

- $K_1$  e  $K_2$  são constantes de proporcionalidade
- $K_3$  é a constante de mola
- C é o conjugado total na balança
- $VI \cos(\theta - \tau)$  é o conjugado da unidade direcional

Quando:

- $C > 0$  os contatos fecham (operação)
- $C < 0$  os contatos abrem (bloqueio)
- $C = 0$  limiar de operação (definição da característica operação/bloqueio)

Para traçar a característica operação bloqueio deve-se fazer:

$$C = 0$$

$$K_3 = K_{MOLA} = 0$$

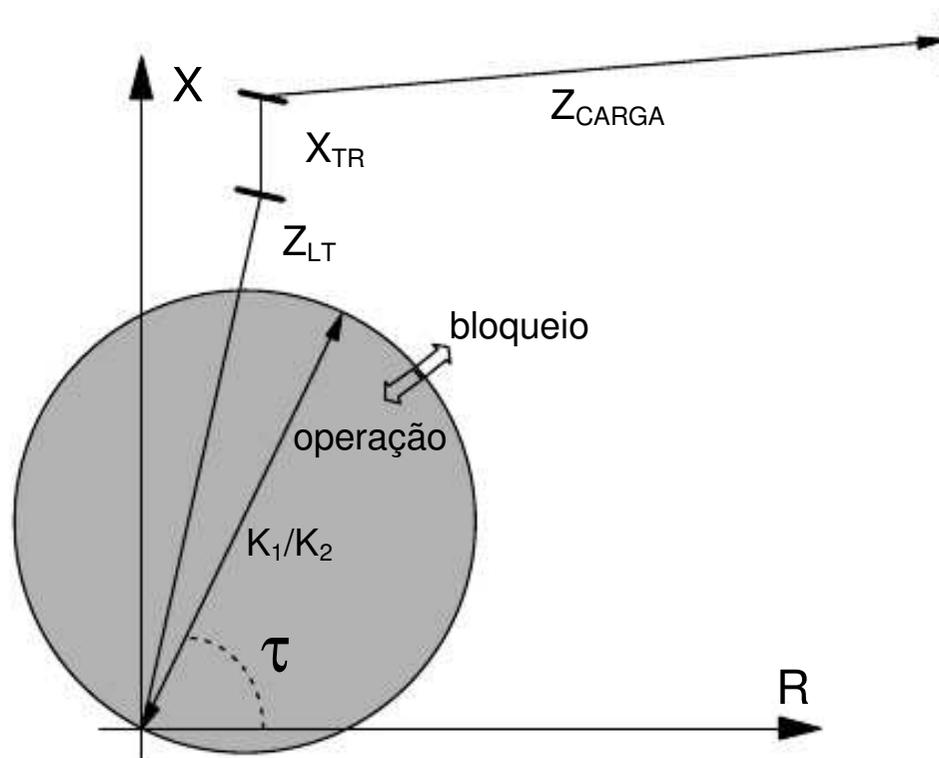
Desta forma, obtém-se:

$$K_1 VI \cos(\theta - \tau) = K_2 V^2$$

Ou

$$\frac{V}{I} = Z = \frac{K_1}{K_2} \cos(\theta - \tau)$$

Uma vez que  $\theta$  é um ângulo qualquer entre  $0$  e  $360^\circ$ , no plano R-X, tem-se a equação de uma circunferência, com inclinação  $\tau$ , tangenciando a origem, de diâmetro  $K_1/K_2$  conforme a figura abaixo:



Na verdade, pela equação de Z são geradas duas circunferências, uma espelho da outra. neste caso apenas a de sentido de visão direta é utilizada.

Algumas observações para o relé de admitância:

1. é um relé inerentemente direcional;

2. ocupa uma menor área no plano R-X, fato que o torna adequado para linhas longas de alta tensão, sujeitas a severas oscilações de potência;
3. pode fazer uma boa acomodação do arco voltaico, pelo fato de podermos inclinar sua característica circular (10 a 20°);

### Problemas a serem levados em consideração nos relés de distância:

- oscilação de potência;
- efeitos infeed / outfeed;
- capacitâncias de compensação;
- resistência de arco;
- resistência de terra;
- impedância mútua;
- falta de transposição;
- linhas multiterminais (derivações);
- faltas muito próximas (tensão muito baixa);
- impedância de curto circuito elevada.

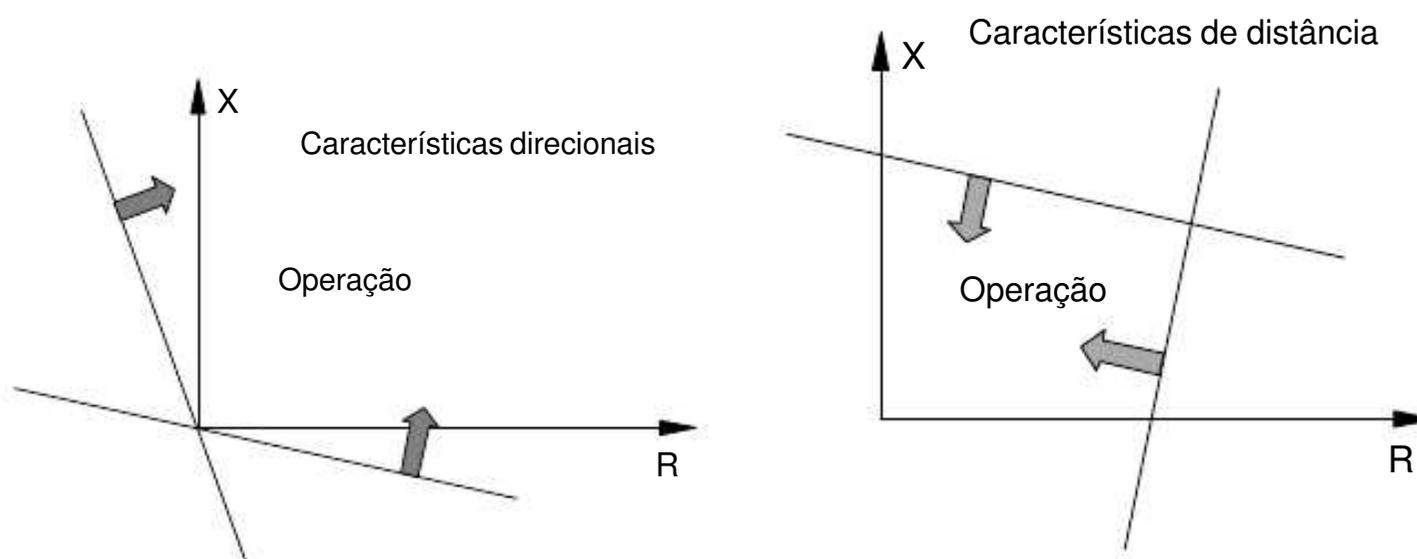
Esses fenômenos poderão fazer com que o relé sub ou sobre-alcance.

**Sub-alcance:** impedância medida pelo relé é maior que a real. Em outras palavras, seria como se a característica circular encolhesse. O relé bloqueia quando deveria operar.

**Sobre-alcance:** impedância medida pelo relé é menor que a real. Em outras palavras, seria como se a característica circular ficasse maior. O relé opera quando deveria bloquear.

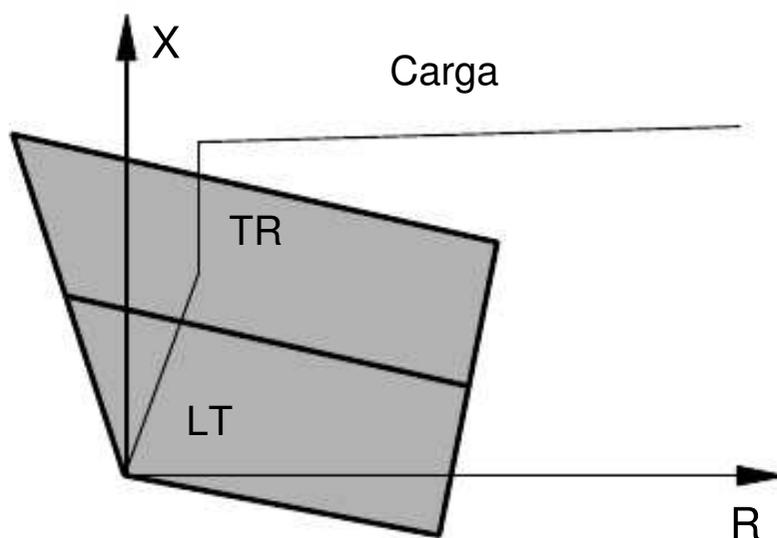
## 5. Relés Poligonais

São formados a partir de retas no plano R-X. Essas retas podem ser unidades direcionais ou unidades de “reatância” modificadas para  $\tau \neq 90^\circ$ . As figuras abaixo mostram a formação de um relé poligonal.

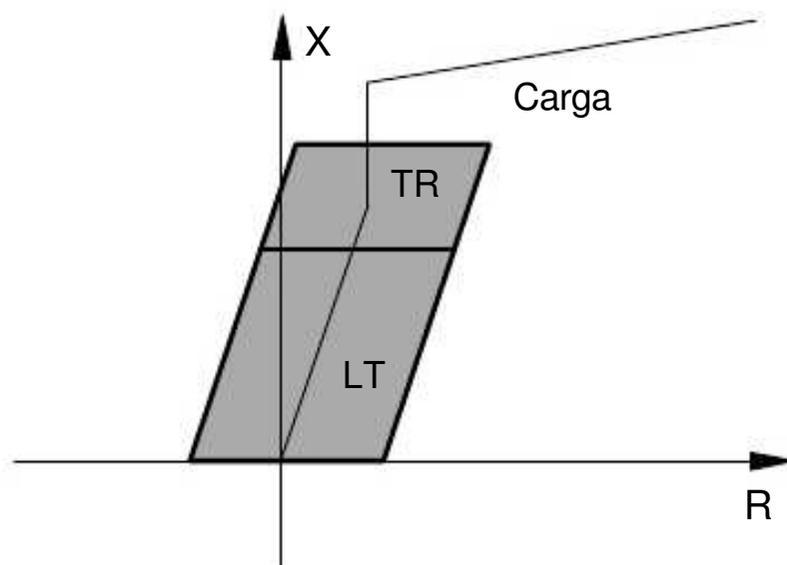


a) Características direcionais

b) Características de distância



c) Relé poligonal



d) Relé paralelogramo

## 6. Uso de TP's e TC's

Seja a figura abaixo