

## Capítulo IV

# Dispositivos de proteção – Parte II

Por Cláudio Mardegan\*

### Relé direcional de potência

Em concepção, os relés direcionais de potência são relés que operam quando o valor da potência ativa do circuito ultrapassa um valor prefixado ou ajustado e na direção preestabelecida. Atualmente, com o advento dos relés digitais, já existem relés 32P, 32Q, 32S.

### Função ANSI

O número para a função ANSI para o relé direcional de potência é 32.

### Direcionalidade

Os relés 32 operam em apenas uma direção.

### Polarização

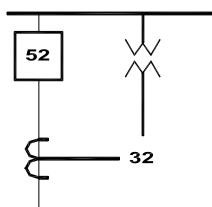
A polarização do relé 32 é por tensão e corrente.

### Conexão

As principais conexões para o relé 32 são: 30°, 60° e 90°. A conexão mais usual é a 30°.

### Unifilar

O relé 32 pode ser representado em um esquema unifilar conforme indicado na Figura 1.



A potência nominal vista pelo relé é dada pela equação abaixo.

$$P_{N-RELÉ-NA-LINHA} = \sqrt{3} \times I_{N-RELÉ} \times V_{N-RELÉ} \times RTC \times RTP$$

Quando instalado na interconexão com concessionária, o ajuste deste relé é normalmente dado em função de um percentual sobre o total da geração o qual é calculado como abaixo:

$$P_{32} = \frac{K \times P_{Total-Geração}}{P_{N-RELÉ-NA-LINHA}} \times 100 \Rightarrow K = 0.05 - 0.1$$

Figura 1 – Representação em unifilar do relé 32 (direcional de potência).

### Relé diferencial

São relés que operam quando a diferença da corrente de entrada em relação à corrente de saída ultrapassa um valor preestabelecido ou ajustado.

### Função ANSI

O número que expressa a função ANSI do relé diferencial é o 87. Pode receber uma letra adicional como 87T (diferencial de transformador), 87B (diferencial de barra), 87G (diferencial de gerador), 87M (diferencial de motor), etc.

### Direcionalidade

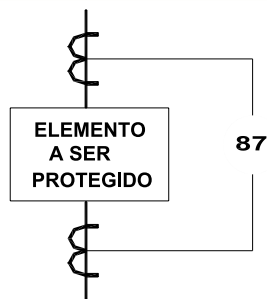
Operam dentro de sua zona de proteção (entre os TCs de entrada e saída) em qualquer direção.

### Polarização

A polarização do relé diferencial ocorre por corrente.

### Conexão/esquemas

Para a representação em esquemas unifilares, vide Figura 2. Para a representação em esquemas trifilares, vide Figura 3.

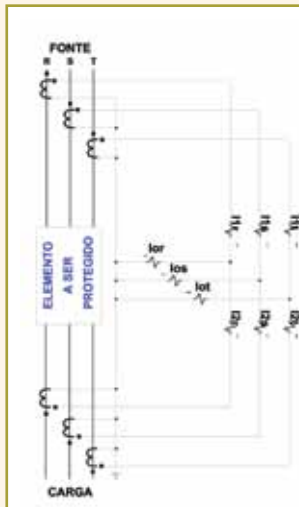


Existem dois tipos básicos de relés diferenciais: o relé diferencial amperimétrico, que se constitui apenas de um relé de sobrecorrente instantâneo conectado, operando de forma diferencial; o relé diferencial percentual constituído, além da bobina de operação uma bobina de restrição dividida em duas metades.

Figura 2 – Representação em unifilar do relé 87 (diferencial).

### Relé diferencial percentual

Como descrito no parágrafo anterior, existem duas metades de bobina (N2) percorridas pela corrente média  $(I_1 + I_2) / 2$  que exercem a restrição e a diferença de corrente  $(I_1 - I_2)$  e exerce a operação sobre a bobina (N1). O esquema trifilar da Figura 3 mostra esquema de ligação e funcionamento.



Em que:

$I_o$  = Corrente de operação

$I_r$  = Corrente de restrição

$$I_o = I_1 - I_2$$

$$I_r = (I_1 + I_2) / 2$$

A equação universal dos relés fica:

$$C = K_1 (I_1 - I_2)^2 - K_2 [(I_1 + I_2) / 2]^2 - K_3$$

Fazendo-se inicialmente  $K_3 = 0$  e para  $C=0$ , tem-se a declividade da reta:

$$declividade = \sqrt{\frac{K_2}{K_1}} = \frac{I_1 - I_2}{\left(\frac{I_1 + I_2}{2}\right)}$$

Levando-se em conta  $K_3$ , tem-se:

$$(I_1 - I_2)^2 = \frac{K_2}{K_1} \left(\frac{I_1 + I_2}{2}\right)^2 + \frac{K_3}{K_1}$$

Figura 3 – Esquema trifilar do relé 87

Quando  $I_r = (I_1 + I_2) / 2$  tende a zero, atinge-se o valor de pick-up.

$$I_1 - I_2 = \sqrt{\frac{K_3}{K_1}}$$

A Figura 4 mostra a característica do relé diferencial.

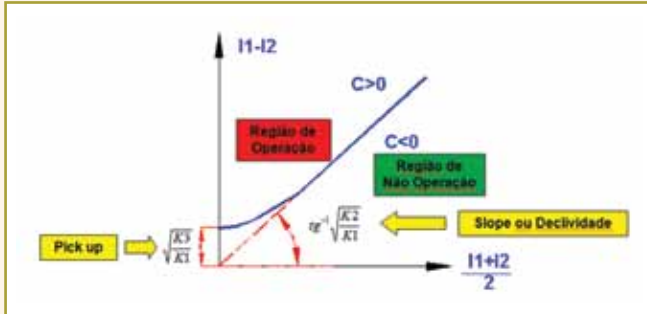


Figura 4 – Característica de operação do relé diferencial.

### Relé de subtensão

São relés que operam quando a tensão do sistema cai abaixo de um valor preestabelecido ou ajustado.

#### Função ANSI

O número que expressa a função ANSI do relé de subtensão é o 27.

#### Polarização

A polarização do relé de subtensão é por tensão.

#### Conexão

A conexão do relé de subtensão é apresentada no esquema unifilar da Figura 5.

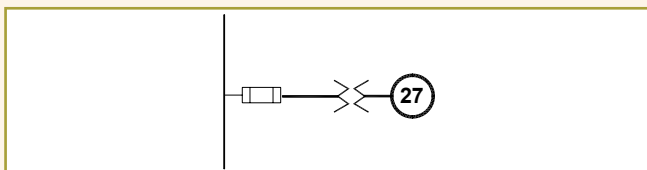


Figura 5 – Esquema unifilar do relé de subtensão.

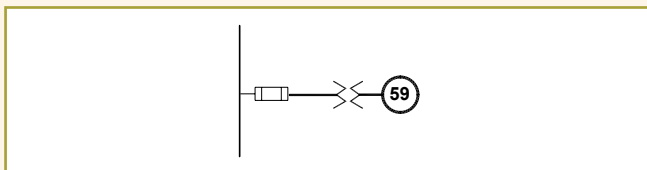


Figura 6 – Esquema unifilar do relé de sobretensão.

### Relé de sobretensão

São relés que operam quando a tensão do sistema ultrapassa um valor preestabelecido ou ajustado.

#### Função ANSI

O número que expressa a função ANSI do relé de sobretensão é o 59.

#### Polarização

A polarização do relé de sobretensão é por tensão.

### Conexão

A conexão do relé de sobretensão é apresentada no esquema unifilar da Figura 6.

### Relé de sobretensão de sequência zero

São relés que operam quando a tensão do sistema ultrapassa um valor preestabelecido ou ajustado na ocorrência de uma falta a terra. Na prática, este relé é utilizado no secundário de TPs conectados em estrela aterrada-delta aberto, ou utilizando-se de recursos de firmware, em que a tensão de sequência zero é calculada a partir das tensões de fase.

A sua aplicação é mais frequente em sistemas não aterrados, para a detecção e eliminação de faltas a terra. Deve-se, preferencialmente, desligar as fontes.

#### Função ANSI

O número que expressa a função ANSI do relé de sobretensão de sequência zero é o 59N.

#### Polarização

A polarização do relé 59N é por tensão de sequência zero.

#### Conexão

A conexão do relé de 59N é apresentada no esquema unifilar da Figura 7.

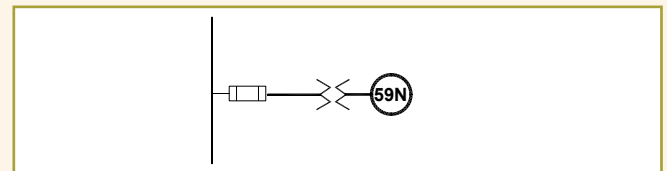


Figura 7 – Esquema unifilar do relé 59N.

Demonstra-se a seguir o valor que aparece no relé 59N em um sistema não aterrado quando submetido a uma falta a terra.

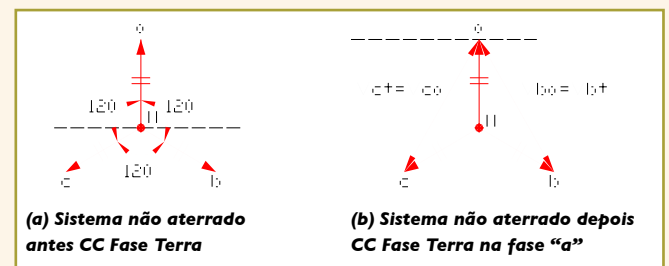


Figura 8 – Sistema não aterrado (a) antes e (b) após uma falta a terra.

A forma trifilar de conectar o relé 59N é apresentada na Figura 9.

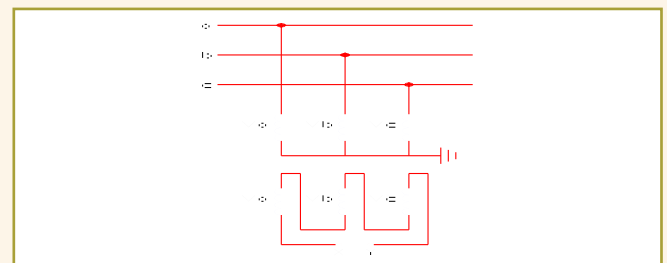


Figura 9 – Esquema trifilar para conectar o relé 59N.

Assim, pode-se provar que a tensão que aparece entre os terminais X e Y é igual a três vezes a tensão fase-neutro do sistema. Veja a demonstração a seguir.

$$\text{Tese: } V_{XY} = 3 V_{FN}$$

$$V_{XY} = 3 V_{ao} = 3 \times (1/3) [V_a + V_b + V_c]$$

$$V_{XY} = V_a + V_b + V_c$$

$$V_a = 0.0 \angle 0.0^\circ; V_b = V_{FF} \angle -60.0^\circ; V_c = V_{FF} \angle -120.0^\circ$$

$$V_{XY} = V_a + V_b + V_c = 0.0 \angle 0.0^\circ + V_{FF} \angle -60.0^\circ + V_{FF} \angle -120.0^\circ$$

$$V_{XY} = V_{FF} (1 \angle -60.0^\circ + 1 \angle -120.0^\circ)$$

$$V_{XY} = V_{FN} \times \sqrt{3} \times \sqrt{3}$$

$$V_{XY} = 3 \times V_{FN}$$

### Relé de bloqueio

São relés que recebem sinais de desligamento de outros relés e atuam sobre o disjuntor. Sua função é bloquear o religamento do disjuntor no caso de falta, pois o disjuntor somente pode ser religado após este relé ser resetado e, assim, somente será religado por pessoa especializada e autorizada. Normalmente, apenas os relés de sobrecorrente são direcionados para este relé (50, 51, 50/51, 50/51N, 67, 87).

### Função ANSI

O número ANSI para esta função é o 86.

### Polarização

Não possui.

### Conexão

A representação do relé de bloqueio em esquemas unifilares pode ser visualizada na Figura 10.

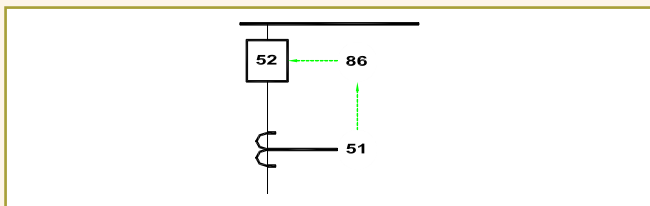


Figura 10 - Representação do relé de bloqueio em esquemas unifilares.



Figura 11 - Foto de um relé de bloqueio

A Figura 11 mostra um relé de bloqueio típico. Os relés de bloqueio possuem uma boa quantidade de contatos NA (normalmente abertos) e NF (normalmente fechados) para poderem realizar as lógicas de contato. Nos relés digitais e nos IEDs, a função de bloqueio pode ser feita pelo próprio relé.

### Relé de distância

Um relé de distância pode ter esta função desempenhada por um relé de impedância (ou ohm), admitância (ou mho – o contrário de ohm), reatância ou relés poligonais.

Este relé utiliza este nome visto que, quando há uma falta em uma linha, a impedância da linha vista pelo relé muda e depende da distância onde foi a falta.

### Função ANSI

O número da função ANSI que representa o relé de distância é o 21.

### Polarização

A polarização é por corrente e tensão.

### Conexão

Conforme esquema unifilar apresentado na Figura 12.

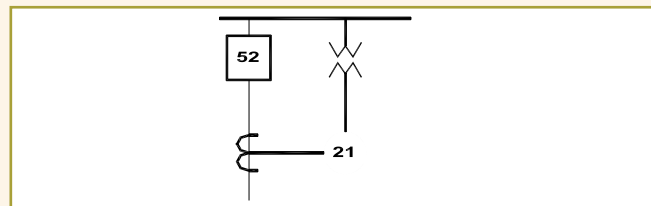


Figura 12 - Esquema unifilar do relé 21.

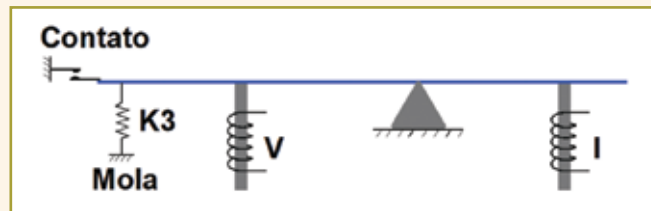


Figura 13 - Esquemático do princípio de funcionamento do relé 21.

### Relé de distância do tipo impedância ou OHM

Este tipo de dispositivo de proteção é um relé de sobrecorrente com restrição de tensão, conforme pode ser observado na Figura 13, que mostra esquematicamente o princípio de funcionamento do relé de distância do tipo impedância, cuja equação de conjugado é dada por:

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

Os termos negativos  $K_2 I^2$  e  $K_3$  representam as restrições de tensão e de mola.

No limiar de operação, ou seja,  $C = 0$  a equação acima fica:

$$K_2 \times V^2 = K_1 \times I^2 - K_3 \Rightarrow (\text{dividindo por } K_1 \times I^2)$$

$$\frac{V^2}{I^2} = \frac{K_1}{K_2} - \frac{K_3}{K_2 \times I^2}$$

$$\frac{V}{I} = Z = \sqrt{\frac{K_1}{K_2} - \frac{K_3}{K_2 \times I^2}}$$

Desprezando-se o efeito de mola, tem-se  $K_3 = 0$

$$\frac{V}{I} = Z = \sqrt{\frac{K_1}{K_2}} = \text{Const} \tan te \Rightarrow I = V \sqrt{\frac{K_2}{K_1}} !$$

Em um plano cartesiano complexo  $Z = R + j X = \text{Constante}$  significa módulo constante. Assim, o lugar geométrico cujo módulo é constante é um círculo. Veja Figura 14.

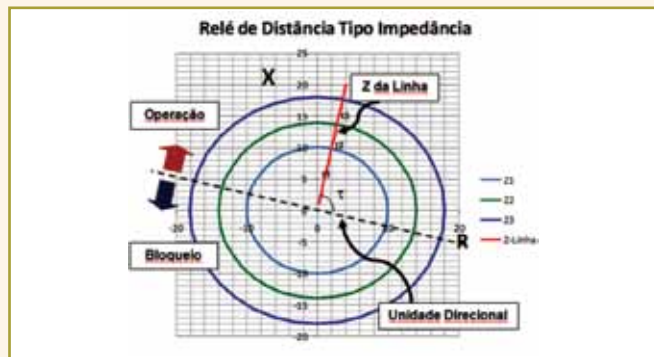


Figura 14 – Relé de distância tipo impedância.



Figura 15 – Temporizações das zonas de proteção.

A linha de transmissão mostrada na Figura 14 mostra um relé de distância do tipo impedância, que possui três zonas de proteção, correspondendo às respectivas impedâncias  $Z_1$ ,  $Z_2$  e  $Z_3$  os respectivos

comprimentos  $l_1$ ,  $l_2$ ,  $l_3$ , dentro de cada zona de proteção e os respectivos tempos de atuação de  $t_1$ ,  $t_2$  e  $t_3$ . A Figura 15 mostra estas temporizações.

É importante notar que a região de conjugado positivo (atuação) fica dentro dos círculos de cada zona de proteção. Assim, o relé operará sempre que a impedância for menor que o valor ajustado e pela foto  $t_1 < t_2 < t_3$ .

Levando-se em conta agora o efeito da mola, no início da falta à tensão tende para zero e a corrente aumenta, logo a impedância ( $V/I = Z$ ) tende a zero.

$$\frac{V}{I} = Z = 0 = \sqrt{\frac{K_1}{K_2} - \frac{K_3}{K_2 \times I^2}} =$$

$$\frac{K_1}{K_2} = \frac{K_3}{K_2 \times I^2} \Rightarrow I^2 = \frac{K_3}{K_1} =$$

$$I = \sqrt{\frac{K_3}{K_1}}$$

A Figura 16 mostra o valor do pick up do relé de impedância e a sua respectiva declividade.

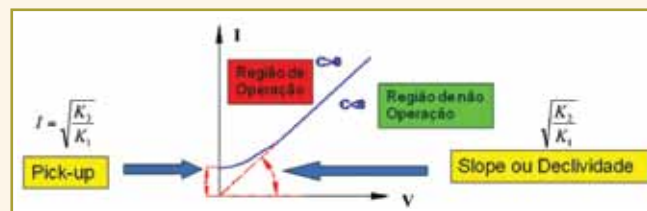


Figura 16 – Valor de pick up e slope (declividade) do relé de distância.

Vale a pena lembrar que um relé de distância normalmente apresenta três partes principais (a) unidade de partida; (b) três unidades de impedância ajustáveis ( $Z$  e temporização) independentes (Zona 1, 2 e 3); e (c) unidades auxiliares (sinalização, bloqueio de contatos, etc.).

### Relé de distância do tipo reatância

Este tipo de dispositivo de proteção é um relé de sobrecorrente com restrição direcional, dessa forma, a equação do conjugado é expressa por:

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

Utilizando-se  $\tau = 90^\circ$ , a equação acima resulta em:

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

No limiar de operação  $C = 0$  e desprezando-se inicialmente o efeito de mola ( $K_3 = 0$ ), tem-se:

$$K_1 I^2 = K_2 V I \sin(\theta)$$

$$\frac{K_1}{K_2} = \frac{V}{I} \times \sin\theta = Z \times \sin\theta = X$$

$$X = \frac{K_1}{K_2} = \text{Constante}$$

A curva característica deste relé, no plano R-X, é representada por uma reta paralela ao eixo R, conforme indicado na Figura 17.

A aplicação deste relé apresenta algumas restrições pelo fato dele apresentar uma característica aberta, sendo sensível às oscilações do sistema. Entretanto, devido à sua característica, este relé torna-se independente da resistência de arco. Vide Figura 18.

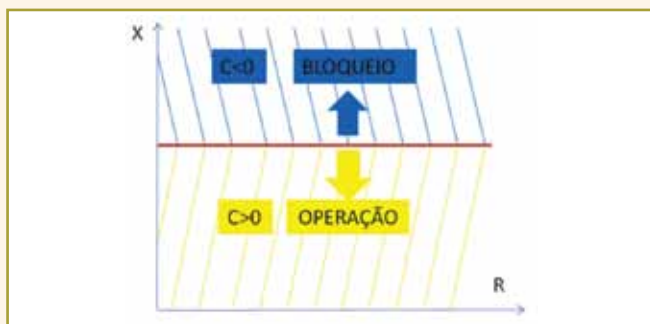


Figura 17 – Característica do relé de reatância.

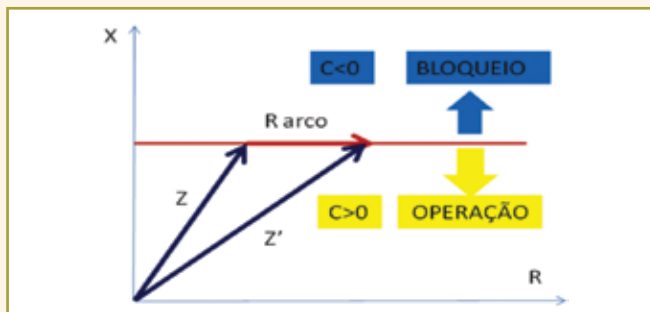


Figura 18 – Relé de reatância com falta por arco.

Existem relés que apresentam característica angular. Derivam da mesma equação abaixo:

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

Fazendo-se  $C = 0$  e  $K_3 = 0$

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

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

Esta equação é uma reta na forma de  $2a = r \cos(\theta - \tau)$ . Dependendo do valor da relação  $K_1/K_2$ , tem-se uma família de retas inclinadas no plano R-X.

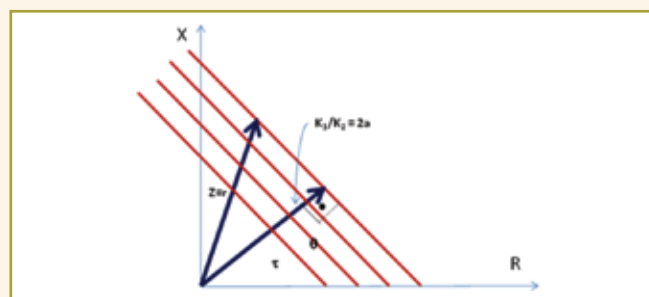


Figura 19 – Relé de distância com característica inclinada.

Pode-se mostrar que uma dada carga de potência  $S = P + jQ$ , pode ser representada no plano R-X na forma:

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

Assim, é importante avaliar o comportamento da carga, pois se ocorre uma perturbação a variação da impedância da carga poderá penetrar na zona de atuação do relé de distância do tipo ohm, podendo causar um desligamento indevido. Os relés de distância com características angulares podem ser mais convenientes nessas condições, porém, operarem em condições de curto-circuito. Existem relés que combinam características para poder tirar as vantagens de cada tipo de curva.

### Relé de distância do tipo admitância

Este tipo de dispositivo de proteção é um relé direcional com restrição por tensão. A equação de conjugado é dada por:

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

No limiar de operação ( $C = 0$ ) e desprezando-se o efeito de mola ( $K_3 = 0$ ), tem-se:

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

Dividindo-se ambos os membros por  $K_2 V I$ , tem-se:

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

Em um plano R-X, a equação acima representa um círculo de diâmetro  $K_1/K_2$  que passa pela origem, como mostrado na Figura 20. O ângulo  $t$  é, por construção do relé, o ângulo de máximo torque do relé e, obviamente, a característica de conjugado nulo fica a  $90^\circ$  da linha de máximo torque.

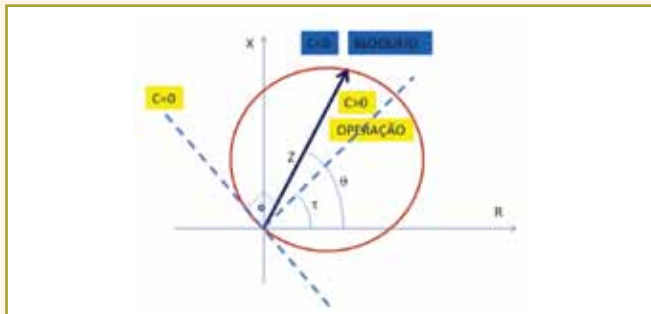


Figura 20 – Característica do relé de admitância ou tipo mho.

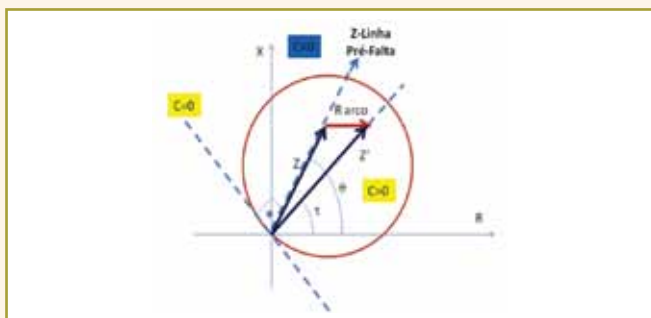


Figura 21 – Relé de distância tipo mho com falta e por arco.

Devido à sua característica, o relé de admitância é mais propício que o relé de impedância para faltas por arco. Veja Figura 21.

Pode-se demonstrar que o diâmetro do círculo é proporcional ao valor obtido de  $(K_1/K_2) \cdot V^2$ . Isso significa que para faltas próximas do relé (começo da linha) o valor de  $V$  é pequeno e pode ocorrer mau funcionamento ou falha do relé devido a uma “zona morta”. Assim, significa que há necessidade de um comprimento mínimo de linha. Este fato faz ser interessante ajustar-se a relação  $K_1/K_2$  ou haver uma tensão mínima para operação do relé. Mesmo no caso de um curto-circuito franco (metálico), em que  $V = 0$ , na prática terá um valor de resistência de arco, que corresponde a valores da ordem de 4% da tensão nominal, o que normalmente será suficiente para operar o relé.

Lista-se a seguir algumas características do relé mho:

- ▶ Constitui-se um relé inerentemente direcional;
- ▶ Ocupa uma menor área no plano R-X, o que o torna adequado para linhas longas de alta tensão, sujeitas a severas oscilações de potência;
- ▶ Acomoda adequadamente faltas por arco.

#### **Principais pontos a serem considerados na aplicação de relés de distância**

Apresenta-se a seguir alguns dos principais pontos a serem observados quando da aplicação de relés de distância:

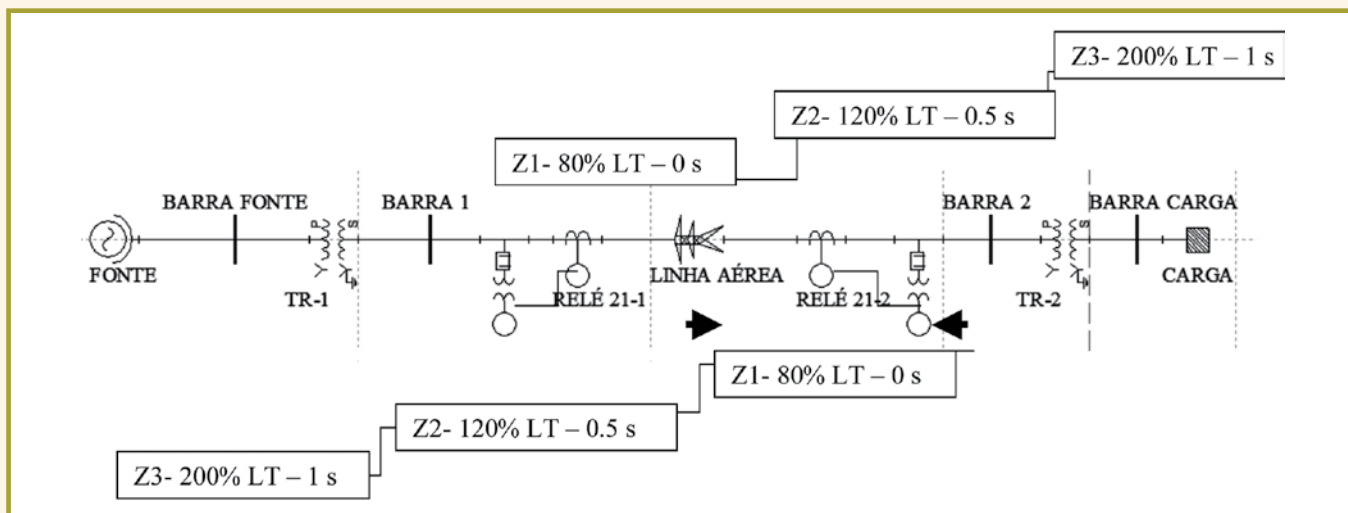


Figura 22 – Proteção de distância típica.

- ▶ Falta muito próximas do relé (tensão muito baixa);
- ▶ Elevada impedância de curto-circuito;
- ▶ Falta de transposição ou transposição inadequada;
- ▶ Oscilação de potência;
- ▶ Efeito da saturação de TCs;
- ▶ Impedância mútua;
- ▶ Resistência de arco;
- ▶ Derivações de linhas;
- ▶ Efeito infeed/outfeed;
- ▶ Variações de temperatura ambiente e condições de resfriamento dos condutores (direção e velocidade do vento).

### Proteção de distância típica

Apresenta-se a seguir, na Figura 22, uma proteção de distância típica para proteção de 100% de uma linha de transmissão, utilizando-se dois relés igualmente ajustados, “olhando” um para o outro. Existem outros critérios.

### Relé de sobrecorrente com restrição (ou supervisão) de tensão

Anteriormente foi mostrado que quando ocorre um curto-circuito em um gerador, a corrente de falta amortece rapidamente, podendo mesmo acontecer que a corrente de curto-circuito permanente fique abaixo da corrente nominal do gerador. Como então proteger este equipamento, tendo que permitir a circulação de corrente nominal e ao mesmo tempo conseguir proteger na condição de curto-circuito? Foi desta forma que surgiu a proteção de sobrecorrente com supervisão ou restrição de tensão. Na prática, o que esta proteção faz é deslocar a característica do relé de sobrecorrente para a esquerda horizontalmente (no plano cartesiano  $t \times I$ , em função do valor da tensão. A Figura 24 ilustra o exposto.

### Função ANSI

O número da função ANSI que representa o relé de sobrecorrente com restrição de tensão é o 51 V.

### Polarização

A polarização é por corrente e tensão.

### Conexão

Conforme esquema unifilar apresentado na Figura 23.

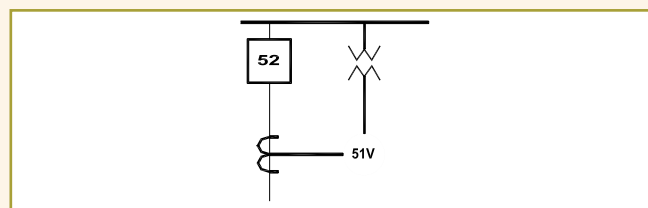


Figura 23 – Representação em esquema unifilar do relé 51 V.

Em relés numéricos digitais e IEDs, a restrição normalmente é feita por meio da aplicação de um fator sobre o valor do pick-up, como segue:

$$I_{\text{PICK-UP RESTRIÇÃO}} = I_{\text{PICK-UP 51}} \times \text{Fator}$$

A Figura 25 ilustra um relé que apresenta esta curva típica. Para o exemplo, vê-se que o valor do fator é 0,25 para valores de tensão de 0% a 25% da tensão nominal. Entre 25% e 100% da tensão nominal obedece a curva da Figura 25 (ou seja, o valor  $p\mu$  da tensão corresponde ao fator). Acima de 100% da tensão o fator é sempre 1.

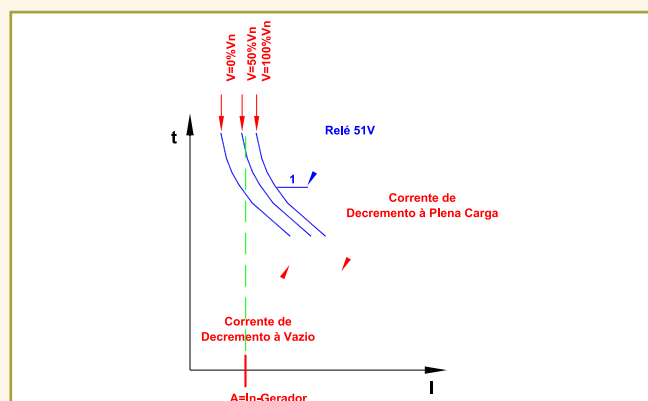
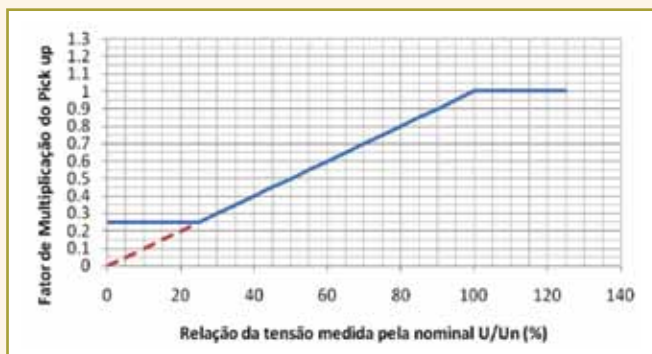


Figura 24 – Característica tempo x corrente do 51 V em função do valor da tensão.





**Figura 25 – Fator aplicado em função do valor da tensão para relés digitais e IEDs.**

### Relé de frequência

São relés que operam quando a frequência do sistema cai (relé de subfrequência) abaixo ou ultrapassa (relé de sobrefrequência) um valor preestabelecido ou ajustado.

### Função ANSI

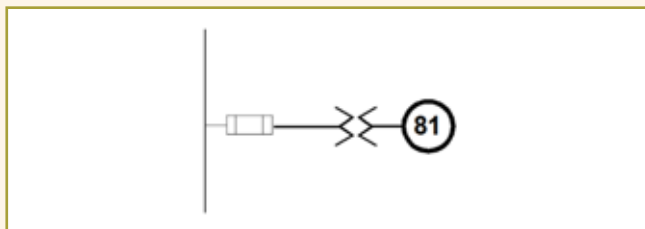
O número que expressa a função ANSI do relé de frequência é o 81.

### Polarização

A polarização do relé de frequência é por tensão.

### Conexão

A conexão do relé de frequência é apresentada no esquema unifilar da Figura 26.



**Figura 26 – Esquema unifilar do relé de frequência.**

### Aplicação

A aplicação deste relé é feita em sistemas em que existe a possibilidade de haver a perda parcial de geração e ainda que estas perdas não possam ser toleradas por certo tempo. Outra aplicação desta proteção é feita em sistemas em que há a necessidade de rejeição de cargas (load shadding), com o objetivo de descartar cargas de forma a recuperar a frequência do sistema.

*\*CLÁUDIO MARDEGAN é engenheiro eletricista formado pela Escola Federal de Engenharia de Itajubá (atualmente Unifei). Trabalhou como engenheiro de estudos e desenvolveu softwares de curto-circuito, load flow e seletividade na plataforma do AutoCad®. Além disso, tem experiência na área de projetos, engenharia de campo, montagem, manutenção, comissionamento e start up. Em 1995 fundou a empresa EngePower® Engenharia e Comércio Ltda, especializada em engenharia elétrica, benchmark e em estudos elétricos no Brasil, na qual atualmente é sócio diretor. O material apresentado nestes fascículos colecionáveis é uma síntese de parte de um livro que está para ser publicado pelo autor, resultado de 30 anos de trabalho.*

### CONTINUA NA PRÓXIMA EDIÇÃO

Confira todos os artigos deste fascículo em [www.osetoreletrico.com.br](http://www.osetoreletrico.com.br)  
Dúvidas, sugestões e comentários podem ser encaminhados para o e-mail [redacao@atitudeeditorial.com.br](mailto:redacao@atitudeeditorial.com.br)