



RELÉS SEMI-ESTÁTICOS E ESTÁTICOS DE **DISTÂNCIA**

ANÁLISE MATEMÁTICA

Luiz Renato Gomes

Revisado em 22/05/2012

RESUMO

Este simples informe tem por finalidade apresentar um conjunto de análises relativo ao equacionamento básico dos relés semi-estáticos e estáticos buscando generalizar a conceituação dos mesmos.

Visando facilitar a análise proposta, serão utilizados conceitos ligados ao equacionamento básico dos relés eletromagnéticos de conhecimento mais geral. Será focada apenas a proteção de distância em suas principais variantes.

SUMÁRIO

1. Filosofia da proteção	3
2. Equação básica do relé de indução	5
3. Análise do relé de impedância	10
4. Análise do relé de reatância	16
5. Análise do relé de admitância	20
6. Proteção de distância semi-estática	24
6.1. Relés semi-estáticos de distância de funções ajustáveis	25
6.2. Relé semi-estático de distância tipo impedância	26
6.3. Relé semi-estático de distância tipo condutância	27
6.4. Relé semi-estático de distância tipo impedância deslocado	29
7. Proteção estática de distância	31
7.1. Introdução à proteção estática	31
7.2. Transactor	32
7.3. Tipos de comparação em proteção estática	35
7.4. Análise dos tipos convencionais de relés estáticos de distância por comparação de fase	36
7.4.1. Característica direcional sob comparação de fase	38
7.4.2. Característica angular de reatância sob comparação de fase	39
7.4.3. Característica do relé de impedância off-set sob comparação de fase ..	40
7.5. Análise dos tipos convencionais de relés estáticos de distância por comparação de amplitude	43
7.5.1. Característica do relé de impedância off-set sob comparação de amplitude	44
7.6. Análise da dualidade entre a proteção de distância por comparação de fase e por comparação de amplitude	46
7.7. Filosofia e aspectos práticos da proteção estática de distância	50
7.7.1. Filosofia geral da proteção estática de distância	50
7.7.1.1. Sistema de proteção de distância via <i>carrier</i>	52
7.7.1.2. Sistema de proteção de distância via microondas	54
7.7.1.3. Esquema utilizado na proteção de distância	54
7.7.1.5. Transferência de <i>trip</i> permissiva com sub-alcance – putt	56
7.7.1.6. Transferência de <i>trip</i> permissiva com sobre-alcance – pott	57
7.7.2. Aplicação da proteção estática de distância	59
7.8. Características especiais adotadas na prática	61
7.9. Característica quadrilateral de relés de proteção	76
7.9.1. Introdução	76
7.9.2. Comparador geral	76
8. Requisitos importantes válidos para a proteção estática de distância	75
8.1. Valor mínimo operativo	82
8.2. Exatidão operativa	82
9. Observações finais	85
9.1. Resistência de arco ou de falta	85
9.2. Oscilações de origem sistêmica	85
9.3. Problema de carregamento máximo	86
9.4. Critérios de proteção relativos às proteções de fase e terra	86
Referências	88

1. FILOSOFIA DA PROTEÇÃO

Em termos de filosofia de proteção a Figura 01, abaixo, mostra as zonas de proteção e de atuação dos elementos disjuntores atuantes num Sistema Elétrico de Potência, ou SEP.

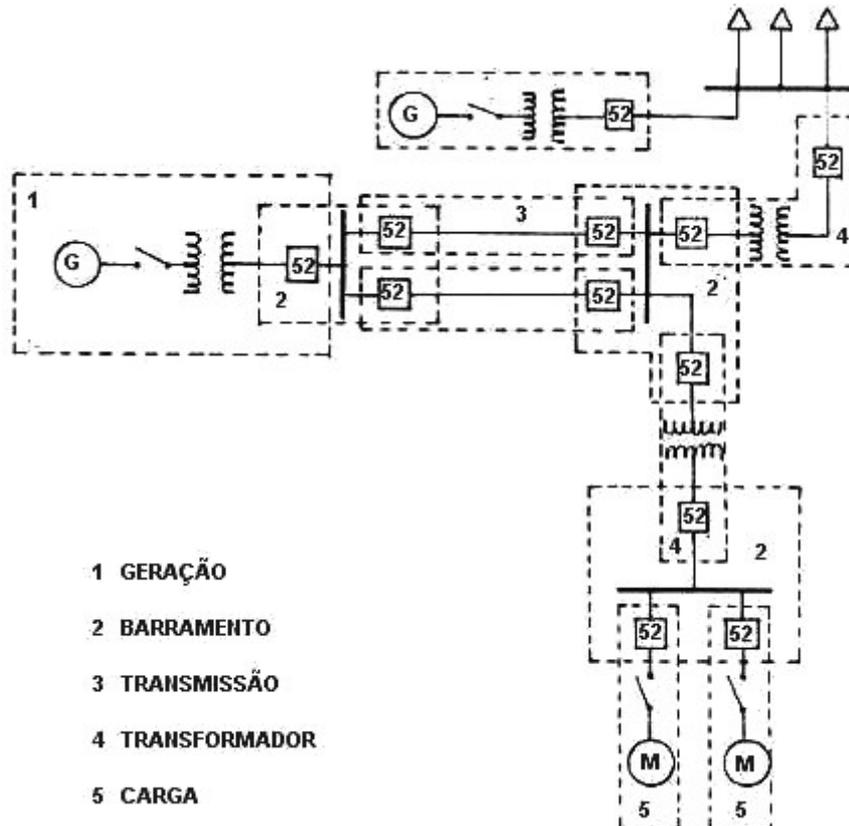


Figura 01 – Zonas de atuação da proteção

Analisando a Figura 01, focando mais diretamente a proteção do sistema de transmissão identificada por "3", pode-se perceber a filosofia de proteção aplicada a um determinado SEP.

Termos como confiabilidade e seletividade aparecem interligados e a definição clara dos mesmos garantirá o compromisso operativo do SEP.

A parte de transmissão de energia é responsável, diretamente, pela transferência, intercâmbio e alimentação interligando os blocos de geração aos blocos de carga ou de consumidores. Esse bloco é, na sua grande parte, composto de linhas de transmissão e de interligação.

Existem vários modos de se estabelecer a proteção de uma linha sendo a proteção básica usual desenvolvida via *proteção de distância* cujo alcance básico foi calculado a partir de uma falta trifásica simétrica.

Além da proteção de distância, com suas variantes condicionadas, existem outros tipos de proteção como a de sobrecorrente pura ou em combinações de correntes de seqüência.

Um bom sistema de proteção de linha deverá apresentar as seguintes características principais:

- **Velocidade de ação**

Na ocorrência de um curto-circuito a rapidez de ação da proteção permitirá:
 Minimizar a extensão do dano causado pela ação da falta;
 Evitar a perda da estabilidade no sistema síncrono, equação de balanço de transferência de potência;
 Manter as partes sadias em operação normal.

- **Sensibilidade operativa**

A sensibilidade operativa da proteção garantirá que esta atue durante as anormalidades para as quais foi projetada.
 Em termos matemáticos poder-se-ia estabelecer um fator que determina a sensibilidade, a saber:

$$K_S = \frac{I_{CC\text{mín}}}{I_{pk}} \quad (001)$$

Onde,

$I_{CC\text{mín}}$ – menor valor de corrente de curto circuito na área a ser protegida no ponto de maior afastamento para o qual a proteção foi projetada, em Ampères, no secundário do transformador de corrente;

I_{pk} – menor valor da corrente de *pick-up* para o qual o relé tem seu sistema de acionamento atuado, em Ampères, no secundário do transformador de corrente.

- **Confiabilidade**

A probabilidade máxima de atuação da proteção dependerá diretamente da capacidade operativa desta, onde os quesitos qualidade de equipamento bem como qualidade de manutenção são primordiais.

- **Seletividade**

A coordenação de todo aparato que constituirá a proteção de um certo sistema; a lei que ditará quem deverá atuar num determinado tempo ou quem aguardará tal intervalo para posterior atuação, determina a chamada seletividade, também fundamental no desempenho da proteção.

2. EQUAÇÃO BÁSICA DO RELÉ DE INDUÇÃO

Será mostrado aqui o equacionamento básico do relé que utiliza o princípio da indução eletromagnética com a interação de campos magnéticos alternativos com as correntes por estes induzidas em um sistema de disco de alumínio rotativo conforme figura 02.

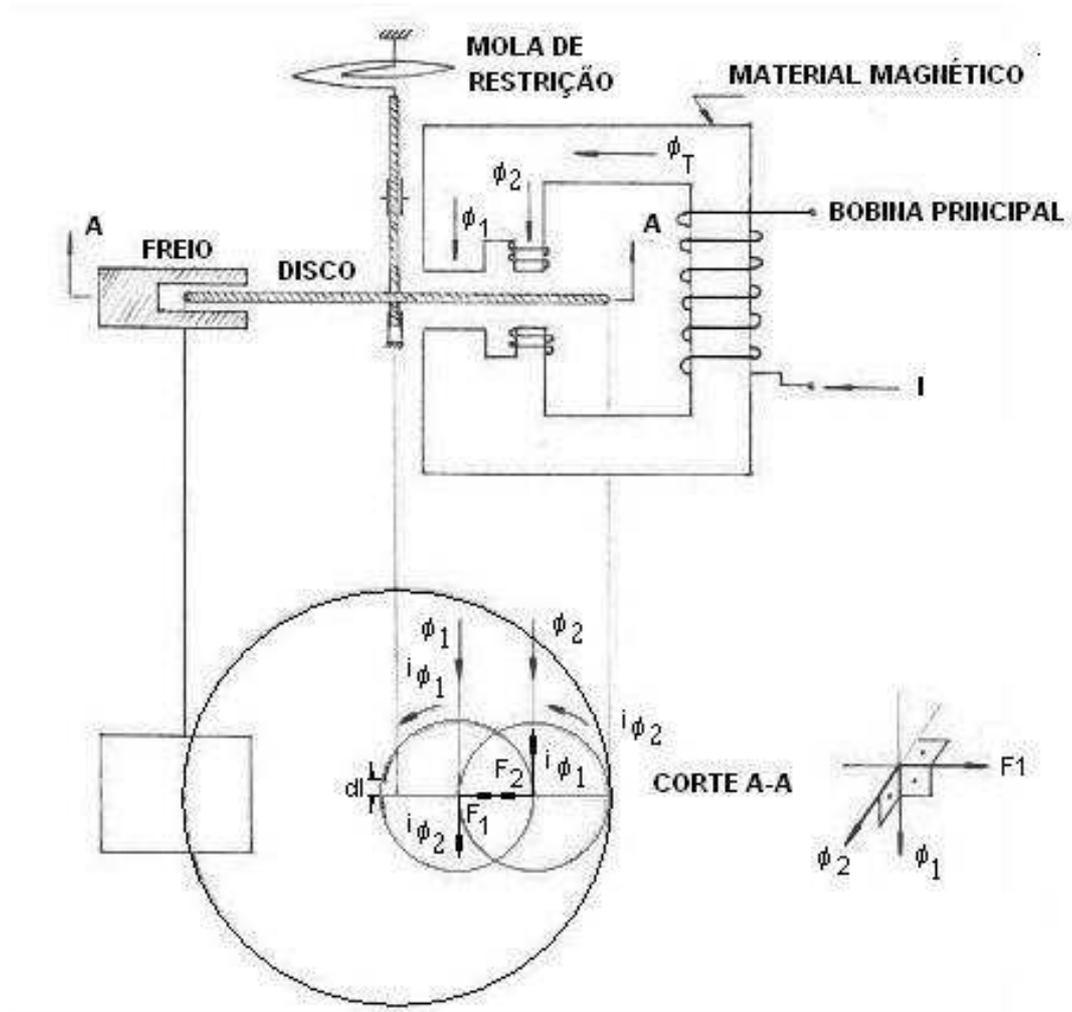


Figura 02 – Relé de indução tipo disco

Imaginando-se uma corrente " I " alternada, no domínio do tempo, o fluxo total " ϕ_T " gerado por esta, ao percorrer o enrolamento da bobina principal, se decompõe em duas parcelas " ϕ_1 " e " ϕ_2 " pela disposição física do entreferro próximo ao disco de alumínio, ver figura 02.

A força gerada pela interação corrente de circulação e vetor indução é dada pela fórmula da teoria de eletromagnetismo:

$$\vec{F} = \oint \vec{i} \, dl \times \vec{B} \quad (002)$$

Onde,

i – corrente no domínio do tempo;
 B – vetor indução magnética;
 dl – elemento linear de circulação.

Idealizando uma área circular tal que:

$l = \pi D$ – perímetro total de circulação da corrente;
 $S = \pi D^2/4$ – área limitada pela circulação da corrente.

O fluxo " ϕ ", função do vetor indução magnética " \vec{B} " e da área " S ", é dado por:

$$\phi = \vec{B} \cdot \vec{S} = BS \cos(\text{arg } BS)$$

Como o ângulo $\text{arg } BS = \pi \text{ rad}$, tem-se:

$\phi = -BS \therefore B = \frac{-\phi}{S}$ que permite escrever a equação 002 como seguinte:

$$\vec{F} = \oint_I i \, dl \left(\frac{-\phi}{S} \right) \text{sen}(idl \hat{B}) \hat{f}$$

Para $idl \hat{B} = 3\pi/2$ rad, a equação precedente fica:

$$\vec{F} = \frac{\phi i}{S} \oint_I dl \hat{f} = \frac{\phi i l}{S} \hat{f}$$

Logo,

$$\vec{F} = K' \phi i \hat{f} \quad (003)$$

sendo $K' = l/S$

Supondo-se que a força " \vec{F} ", idealizada, atue a uma distância " x " do centro do disco, o conjugado gerado será:

$$\vec{C} = \vec{F} \times \vec{X} = FX \text{sen } \vec{F} \vec{X}$$

Para $\text{ang } FX = \pi/2$ rad a equação precedente fica:

$$\vec{C} = FX \quad (004)$$

Assim, em termos de módulo, tem-se, já utilizando a equação 003:

$$C = K' \phi i \bar{x}$$

Ou melhor,

$$C = K'' \phi i \quad (005)$$

Para a configuração suposta na figura 02, tem-se, para os fluxos " ϕ_1 " e " ϕ_2 " as seguintes expressões estando " ϕ_2 " defasada de um ângulo " θ " de " ϕ_1 ":

$$\phi_1 = \phi_{1M} \text{sen } \omega t \quad (006)$$

E

$$\phi_2 = \phi_{2M} \text{sen}(\omega t + \theta) \quad (007)$$

As correntes " i_{ϕ_1} " e " i_{ϕ_2} ", em função dos fluxos geradores, terão as seguintes expressões:

$$i_{\phi_1} = -\frac{V}{R} = -\frac{1}{R} \frac{d\phi_1}{dt}$$

Ou melhor,

$$i_{\phi_1} = K_1 \cos \omega t \quad (008)$$

$$\text{com } K_1 = -\frac{1}{R} \phi_{1M} \cdot \omega$$

E

$$i_{\phi_2} = K_2 \cos(\omega t + \theta) \quad (009)$$

$$\text{com } K_2 = -\frac{1}{R} \phi_{2M} \cdot \omega$$

R – resistência suposta do caminho percorrido pela corrente no disco de alumínio;

V – tensão induzida na espira hipotética criada pelo caminho de circulação da corrente.

Supondo o torque resultante da interação entre os fluxos e as correntes já decompostas em suas componentes efetivas pode-se escrever:

$$C_R = C_2 - C_1$$

Ou ainda, segundo a Equação 005:

$$C_R = K'' \left[\phi_2 \cdot i_{\phi_1} - \phi_1 \cdot i_{\phi_2} \right] \quad (010)$$

Substituindo na equação 010 as expressões obtidas nas equações anteriores 006, 007, 008 e 009 tem-se:

$$C_R = K'' \left[\phi_{2M} \text{sen}(\omega t + \theta) \cdot K_1 \cos \omega t - \phi_{1M} \text{sen} \omega t \cdot K_2 \cos(\omega t + \theta) \right]$$

Ou

$$C_R = K \text{sen}[(\omega t + \theta) - \omega t]$$

Ou

$$C_R = K \text{sen} \theta \quad (011)$$

Onde,

$$K = K'' \phi_{1M} \cdot K_2 = K'' \phi_{2M} \cdot K_1$$

Claramente percebe-se, pela equação 011, que o torque máximo será obtido sempre que a seguinte relação for respeitada:

$$\theta = 2K\pi + \frac{\pi}{2} \quad K = 0, 1, 2, 3... \quad (012)$$

Com $K \in Z_+$ [conjunto dos números inteiros positivos]

Como é interessante trabalhar com valores modulares de corrente ou de tensão, podem-se obter as seguintes variantes para a equação 011:

Em corrente:

$$C = \alpha I_1 I_2 \text{sen} \theta \quad (013)$$

Em tensão:

$$C = \beta V_1 V_2 \text{sen} \theta \quad (014)$$

Em fluxo:

$$C = \gamma \phi_1 \phi_2 \text{sen} \theta \quad (015)$$

Nas equações anteriores considerar:

α, β, γ – constantes de proporcionalidade.

Através da combinação podem-se ter os seguintes grupos de relés:

- equação 013 – torque utilizado em relés de sobrecorrente;
- equação 014 – torque utilizado em relés de sobretensão;
- equação 015 – torque utilizado em relés de indução.

Percebe-se que o conjugado gerado depende do ângulo " θ " de defasamento entre as grandezas envolvidas.

O conjugado máximo, de grande interesse em projetos de relés, pode ser obtido quando $\theta = \pi/2$ rad, porém sua exequibilidade é praticamente impossível por aspectos construtivos.

Para tal, lança-se mão do seguinte artifício que determina a decomposição de uma das grandezas segundo suas componentes indutiva e resistiva.

Imaginando-se um relé de sobrecorrente, observar a figura 03 seguinte.

Trabalhando-se na Equação 013 com as correntes " I_1 " e " I_2 " vem:

$$C = \alpha I_2 I_{1i} \text{sen}(\theta + \phi) \quad (016)$$

Os ângulos " ϕ " e " T " são ângulos característicos de um relé. O fabricante fornece em catálogos o ângulo " T " sendo o ângulo " ϕ " ajustado internamente ao relé por intermédio da associação de resistores e capacitores.

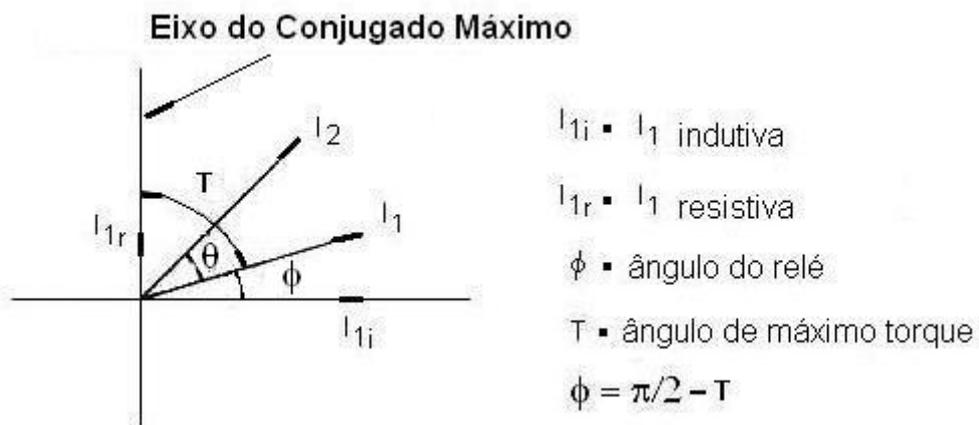


Figura 03 – Conjugado máximo para o relé de sobrecorrente

Pela figura 03, a equação 016 poderá ser reescrita da forma seguinte:

$$\begin{aligned} C &= \alpha I_2 I_{1j} \operatorname{sen} \left[\theta + \left(\frac{\pi}{2} - T \right) \right] = \\ &= \alpha I_2 I_{1j} \operatorname{sen} \left[(\theta - T) + \frac{\pi}{2} \right] = \\ &= \alpha I_2 I_{1j} \cos(\theta - T) \end{aligned}$$

Pela expressão anterior o conjugado máximo será obtido para $\theta - T = k\pi$; assim tem-se:

$$\theta = T \pm k \pi \quad (017)$$

Com $k \in Z_+$

Através do artifício descrito consegue-se, para um mesmo relé, obter qualquer ângulo de conjugado máximo de modo a atender determinadas configurações.

3. ANÁLISE DO RELÉ DE IMPEDÂNCIA

O relé de impedância ou relé OHM, como também é conhecido, dentro daquilo que se entende por tipos de relés em função da equação básica do conjugado, é uma associação de um relé de sobrecorrente com um relé de sobretensão. Como a parcela de sobretensão é subtraída daquela relativa à sobrecorrente entende-se ser o relé de impedância um relé de sobrecorrente com restrição em tensão.

Considerando-se um relé eletromagnético, para fins didáticos, ainda existirá outra parcela de restrição relativa ao efeito de mola.

A equação do conjugado deste tipo de relé terá o seguinte aspecto:

$$C = k_1 I^2 - k_2 V^2 - k_3 \quad (018)$$

Onde,

k_1, k_2, k_3 – constantes de proporcionalidade;

I – módulo de corrente;

V – módulo de tensão.

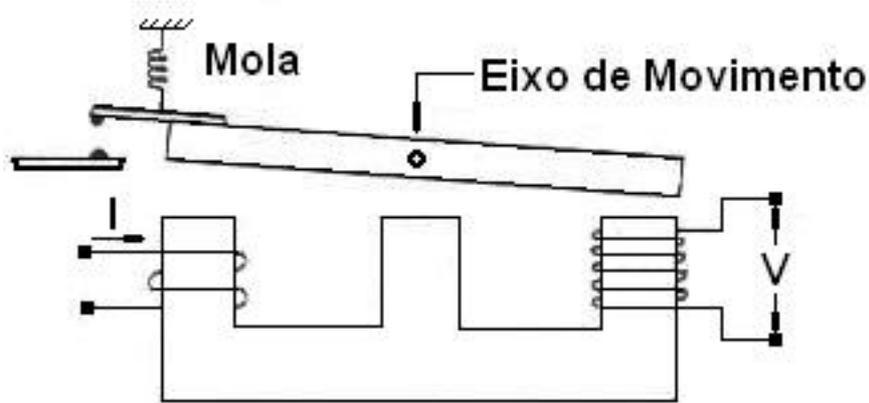


Figura 04 – Relé de impedância idealizado

Para se traçar a curva $I = f(V)$ considerar, primeiramente, a condição “iminência de operação” do relé, ou melhor, $C = 0$ na equação 018.

Assim tem-se:

$$I^2 = \frac{k_3}{k_1} + \frac{k_2}{k_1} \cdot V^2$$

De onde

$$I = \sqrt{\left[\frac{k_3}{k_1} \frac{1}{V^2} + \frac{k_2}{k_1} \right]} V^2$$

Ou melhor,

$$I = \sqrt{\frac{k_3}{k_1 V^2} + \frac{k_2}{k_1}} \cdot V \quad (019)$$

Para $V = 0$ $I = \sqrt{\frac{k_3}{k_1}}$

Para $V \rightarrow \infty$ $\frac{k_2}{k_1} \gg \frac{k_3}{k_1 V^2}$



Figura 05 – Curva de operação do relé da equação 018

Considerando que a condição de atuação já esteja na situação tal que o relé se apresente atuando como se $k_3 = 0$ observa-se claramente a reta que representa a função $I = f(V)$, ou melhor:

$$I = V \sqrt{\frac{k_2}{k_1}}$$

ou

$$\frac{V}{I} = \sqrt{\frac{k_1}{k_2}} = z \quad (020)$$

Onde "z" é a impedância associada à atuação do relé.

No plano complexo ter-se-ia:

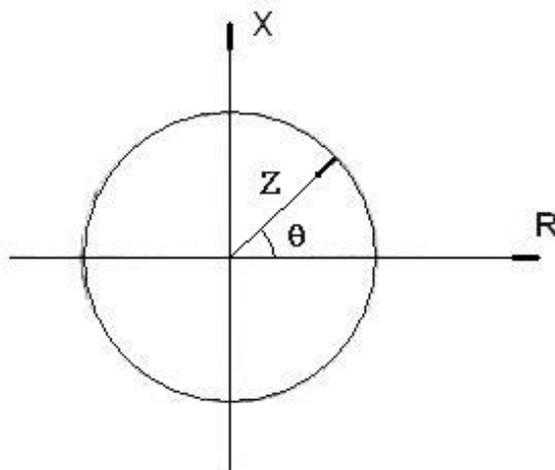


Figura 06 – Característica do relé de distância de impedância

Pela figura 06 pode-se perceber que o relé de sobrecorrente, com restrição em tensão, apresentando a equação básica de conjugado 018, nada mais é que um relé de impedância tal que se por algum motivo houver redução no valor da impedância, mantendo-se o valor de tensão "V" de serviço, entende-se que o valor da corrente circulando atingiu certo limite caracterizando a existência de um provável curto-circuito.

Pelas equações 019 e 020 nota-se que, pelas zonas de atuação e de não-atuação do relé, na figura 06, a atuação se dará para valores de impedância internos à circunferência de raio "Z".

Estendendo a análise à proteção de uma linha de transmissão e fixando um valor de impedância "z" associado a um valor de impedância de um determinado trecho da linha a ser protegido, acaba-se definindo uma proteção de distância deste mesmo trecho.

Assim, sempre que houver redução da impedância da linha, relativa a uma determinada distância, sendo mantida a tensão gerada, o relé de distância atuará indicando presença de curto-circuito no trecho.

O que foi descrito anteriormente vem associado a uma filosofia da proteção de distância de um determinado trecho de uma determinada linha de transmissão. Esta filosofia de proteção é interpretada segundo a figura 07 seguinte.

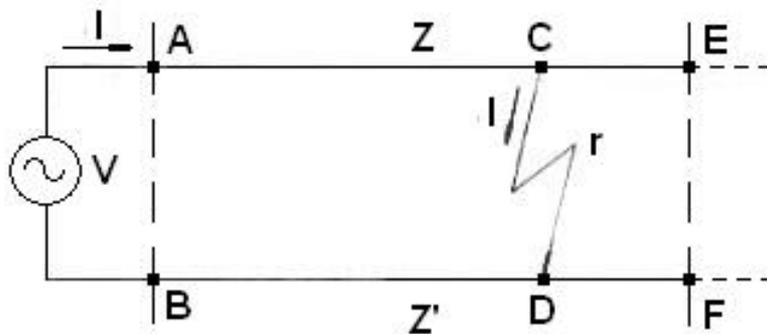


Figura 07 – Filosofia da proteção de distância

Na figura 07 foi suposta uma linha de transmissão com de fases, com o trecho AB/EF protegido, sendo os valores de impedância dos cabos $Z_{AE} = Z_{BF} = Z$, impedância do trecho.

No caso da ocorrência de uma falta fase-fase entre os pontos "C" e "D", do mencionado trecho de linha, o equacionamento da tensão ficaria:

$$\begin{aligned} V &= V_A - V_0 = (V_A - V_C) + (V_C - V_D) + (V_D - V_0) = \\ &= z_{AC} I + r I + z_{DB} I \end{aligned}$$

Na equação anterior, para $z_{AC} = z_{DB} = z'$, vem:

$$V = (2z' + r)I$$

Sendo o curto franco onde $r = 0$ (resistência de arco) tem-se:

$$V = 2z' I$$

Ou

$$2z' = \frac{V}{I} \quad (021)$$

O relé de distância monitorando a relação V/I , como é mostrado através da equação 021, por comparação ao valor "z", será atuado caso $z' < z$.

Fisicamente, como a impedância da linha de transmissão é sempre fornecida em função da distância ao longo do comprimento desta, para uma dada distância fica estipulado o valor mínimo da impedância do trecho em que não se é considerada presença de falta. Na comparação a presença de qualquer falta implicará na atuação do relé sempre que a impedância do trecho sob falta for inferior àquela determinada para o trecho sem falta.

A figura 08 mostra a situação acima.

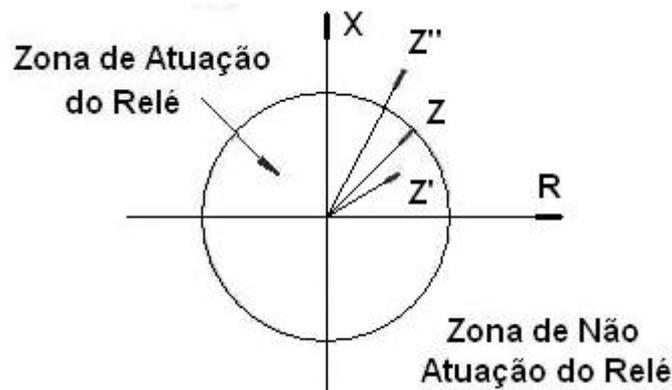


Figura 08 – Situação da proteção de distância

Para o exemplo anterior a impedância "z" do trecho foi tomada como referência do limite de atuação.

Muitas vezes o valor limite de impedância de comparação, valor "z" na figura 08, trata-se de um valor de impedância associado ao valor de impedância referente ao cálculo de uma falta equilibrada, portanto de seqüência positiva, valor este menor que o de z'' que na figura 08 representa a impedância de regime do trecho de linha no seu carregamento máximo de transmissão.

Outra importante observação deve ser feita acerca da utilização de mais de uma zona de proteção de distância utilizando-se o relé tipo impedância que por ora se analisa.

O estabelecimento de zonas de proteção cobrindo trechos específicos, atuando em bobinas de *TRIP*, outras vezes promovendo bloqueio de atuação, são opções inerentes à própria característica dos relés de distância tipo

impedância. O acoplamento de uma unidade direcional ao relé de distância muitas vezes amplia a sua capacidade operativa. Utilizando um relé direcional de partida associado ao relé de impedância o problema da direcionalidade fica resolvido.

Assim, poder-se-ia traçar a seguinte característica, no plano X-R, para um relé de distância tipo impedância com duas zonas de proteção para frente e uma zona de proteção para trás, todas temporizadas em T_1 , T_2 e T_3 , respectivamente.

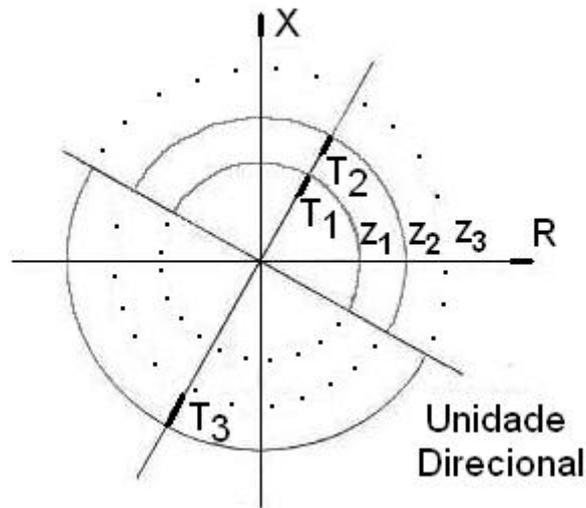


Figura 09 – Característica do relé de distância tipo impedância com duas zonas no sentido direto e uma zona no sentido reverso

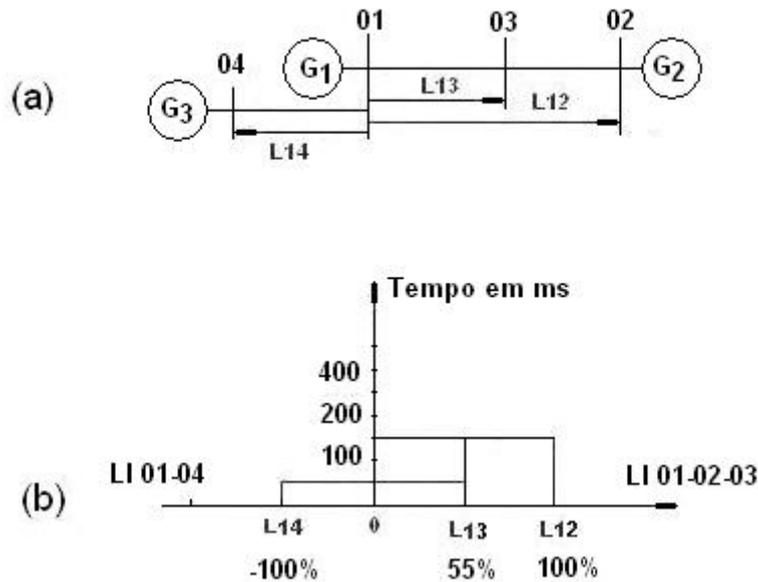


Figura 10 – Temporização dos alcances da proteção de distância utilizando o sistema da Figura 09

Um exemplo típico de zona de atuação pode ser observado pela figura 10 onde estão delimitados os trechos de proteção com suas respectivas temporizações.

O seguinte resumo poderia ser montado:

Trecho Sob Falta	Alcance da Proteção	Temporização (ms)	Tipo de Ação
03 – 02	L12	150	TRIP
01 – 03	L13	50	TRIP
	L12	150	TRIP
01 – 04	L14	50	Bloqueio

Observar que para uma falta no sentido direto no trecho 01 – 03 existirá a proteção principal temporizada em 50 ms e a proteção suplementar temporizada em 150 ms com característica de retaguarda.

A proteção de distância utilizando o tipo impedância apresenta algumas dificuldades em sua execução, tais como as que se seguem:

- Problemas de oscilação de impedância medida causadas por transitórios de chaveamento verificados no sistema interligado que não podem provocar atuação do relé;
- Dificuldades de acomodação e de incorporação do valor da resistência de arco o que acaba provocando a não atuação do relé durante faltas em que deveria ocorrer atuação da proteção.

A utilização pelos fabricantes do relé de distância tipo admitância, ou relé MHO, dotado de unidades antioscilação tem se mostrado uma boa alternativa para se contornar tais problemas. Este tema será bem analisado nos capítulos subseqüentes.

4. ANÁLISE DO RELÉ DE REATÂNCIA

Outra variante do relé de distância é aquela que confere a função reatância para esta proteção.

O relé de reatância nada mais é que um relé de sobrecorrente dotado de restrição unidirecional.

Considerando-se, novamente, um relé eletromagnético, para fins didáticos assim como foi desenvolvido para o relé de impedância, vem:

$$C = k_1 I^2 - k_2 V I \cos(\theta - T) - k_3 \quad (022)$$

Onde,

k_1, k_2, k_3 – constantes de proporcionalidade;

I – módulo de corrente;

V – módulo de tensão;

θ - ângulo entre tensão e corrente;

T – ângulo de conjugado máximo.

Considerando-se a condição "iminência de operação" do relé, ou melhor, $C = 0$ na equação 022, vem:

$$\frac{k_1}{k_2} = \frac{V}{I} \cos(\theta - T) \quad \text{com } k_3 = 0$$

Para o caso particular onde $T = \pi/2$ rad tem-se, para equação anterior:

$$\frac{k_1}{k_2} = z \operatorname{sen} \theta \quad (023)$$

Onde $z = V/I$ em módulo.

Pode-se perceber a função de reatância do relé que para o caso da equação 023 apresentará a seguinte característica já no plano X-R:

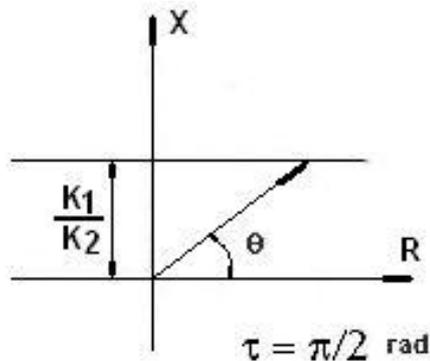


Figura 11 – Característica do relé de distância tipo reatância

Observando a característica do relé de reatância, que se encontra estampada na figura 11, nota-se que esta é uma característica aberta se comparada com aquela característica do relé de impedância.

Neste caso a incorporação de uma provável resistência de arco parece garantir um ponto positivo na aplicação deste tipo de relé em sistemas de proteção de distância.

Na figura 12 é mostrado o processo de incorporação da resistência de arco quando da ocorrência de uma falta.

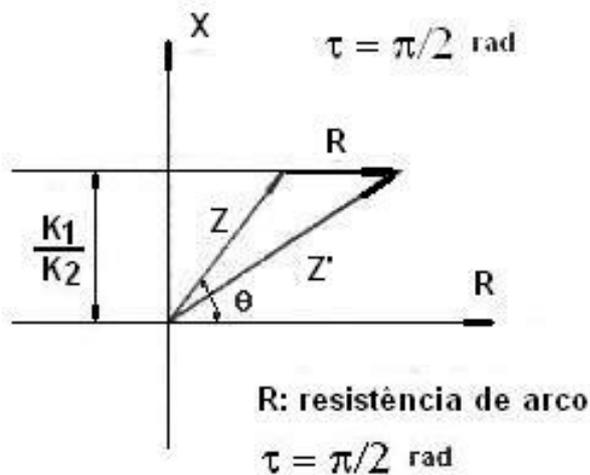


Figura 12 – Incorporação da resistência de arco pelo relé de reatância

Apesar de a característica aberta do relé de reatância ser positiva, no processo de incorporação da resistência de arco, esta não libera do relé o problema gerado pelas oscilações de origem transitória que podem ainda provocar atuações intempestivas da proteção.

Para o caso onde o ângulo de conjugado máximo é diferente de $\pi/2 \text{ rad}$ a característica do relé de reatância toma uma característica angular conforme indicado a seguir.

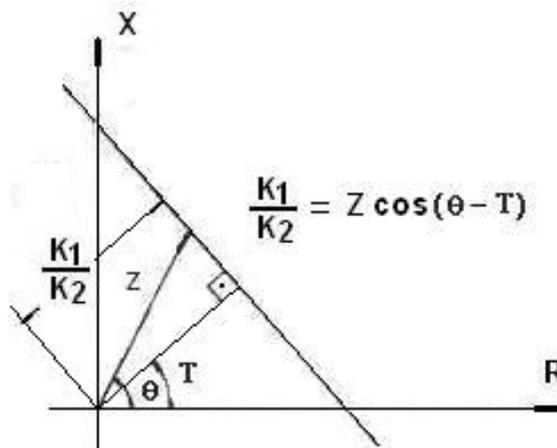


Figura 13 – Característica angular do relé de reatância

Através da variação dos valores das constantes " k_1 " e " k_2 " e do ângulo " T ", de conjugado máximo do relé, direciona-se a família de curvas de modo a se flexibilizar a utilização deste tipo de relé.

A literatura técnica encontra no relé de reatância com característica angular a aplicação na função de bloqueio nas oscilações transitórias amortecidas

restringindo a sua operação na condição de falta ou de oscilações transitórias não-amortecidas ou instáveis.

Foi mencionado anteriormente o problema gerado sobre a atuação dos relés de impedância e de reatância pela oscilação transitória amortecida presente na dinâmica operativa dos sistemas elétricos de potência.

Notadamente, existem muitas operações, tanto manuais quanto automáticas, que impõem ao sistema transitórios de diferentes origens com diferentes graus de impacto.

Considerando-se a transferência de potência fornecida pela equação abaixo vem:

$$S = VI^* \quad (024)$$

Onde,

S – potência aparente ($S = P + jQ$);

V – tensão ($V = V + j0$);

I^* - conjugado da corrente;

Z – impedância ($Z = R + jX$).

Mas também

$$S = V \left(\frac{V}{Z} \right)^* = \frac{V^2}{Z^*} = \frac{V^2}{R - jX}$$

Logo,

$$R - jX = \frac{V^2}{S} = \frac{V^2}{P + jQ}$$

$$R - jX = V^2 \left[\frac{P}{P^2 + Q^2} - j \frac{Q}{P^2 + Q^2} \right] \quad (025)$$

A equação 025 permite a obtenção das expressões da carga alimentada:

$$R = \frac{P}{P^2 + Q^2} V^2 \quad (026)$$

$$X = \frac{Q}{P^2 + Q^2} V^2 \quad (027)$$

Pelas equações 026 e 027 observa-se como um transitório atuante sobre grandezas como potência ativa elétrica ou mesmo potência reativa introduzem oscilações também no valor da impedância de carga.

Como essas grandezas são bastante sensíveis a oscilações sistêmicas, pode haver situações que os valores de "Q" e "X" atinjam valores tais que

transitoriamente o valor instantâneo de "Z" caia abaixo do limite estabelecido levando o ponto de carga para dentro da área de atuação do relé.

A maior parte das proteções de distância é dotada de dispositivos sensores que monitoram e medem os valores de "Q" e de "X" com a finalidade de identificar um fenômeno de oscilação e bloquear uma provável atuação indevida da proteção. Foi citada a utilização do relé de reatância como um dispositivo de monitoramento de oscilações sistêmicas com função de bloqueio.

5. ANÁLISE DO RELÉ DE ADMITÂNCIA

Outra variante do relé de distância é aquela que confere a função de admitância para esta proteção.

O relé de admitância nada mais é que um relé direcional dotado de restrição de tensão.

Considerando-se novamente um relé eletromagnético, para fins didáticos assim como foi desenvolvido para o relé de impedância, vem:

$$C = k_1 V I \cos(\theta - T) - k_2 V^2 - k_3 \quad (028)$$

Onde,

k_1, k_2, k_3 – constantes de proporcionalidade;

I – módulo de corrente;

V – módulo de tensão;

θ – ângulo entre tensão e corrente;

T – ângulo de conjugado máximo.

Considerando-se a condição "iminência de operação" do relé, ou melhor, $C = 0$ na equação 028 vem:

$$\frac{V}{I} = \frac{k_1}{k_2} \cos(\theta - T) \quad \text{Com } k_3 = 0 \quad (029)$$

Pela equação 028 percebe-se a característica de admitância deste tipo de implementação do relé de distância.

No plano X-R a característica do relé de admitância terá o aspecto mostrado na figura 14.

A comprovação de que a equação 029 trata-se de uma circunferência no sistema polar parte da hipótese de que todo triângulo circunscrito em uma semicircunferência será sempre retângulo.

Seja para tal a figura 15 genérica.

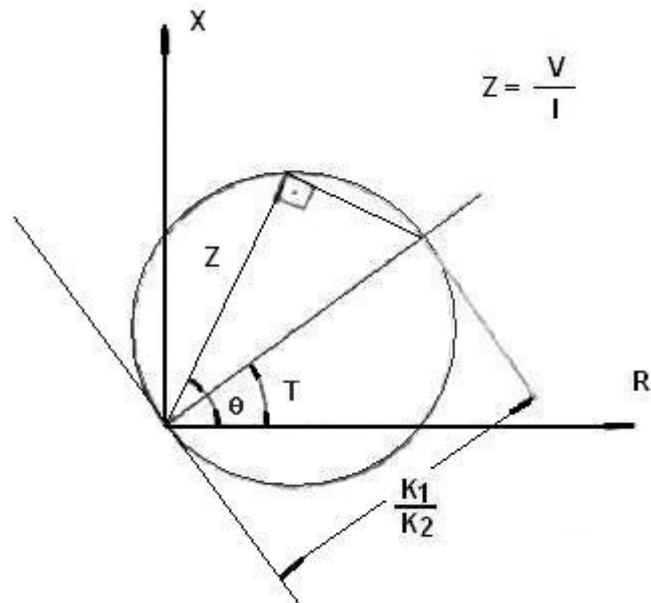


Figura 14 – Característica do relé de distância tipo admitância.

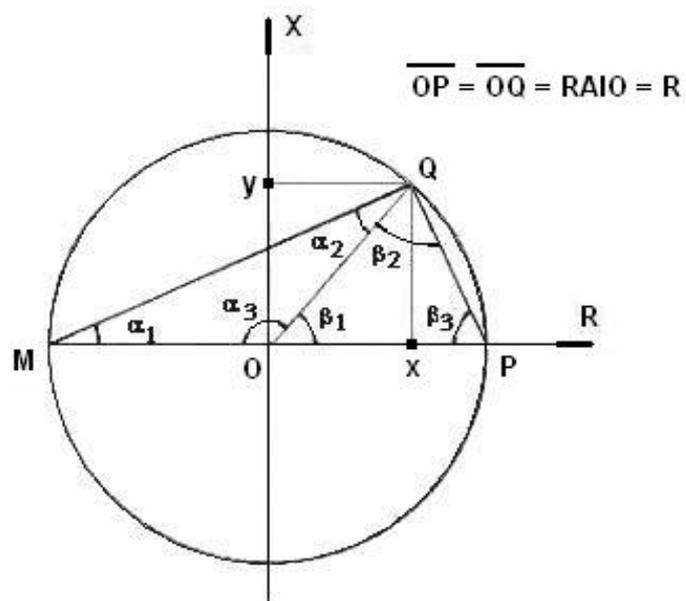


Figura 15 – Triângulo circunscrito numa semicircunferência

Da figura 15 extraem-se as relações seguintes:

$$\overline{MQ} \cdot \cos \alpha_1 = R + X \quad (030)$$

$$\overline{QP} \cdot \cos \beta_3 = R - X \quad (031)$$

$$\alpha_1 + \beta_3 + (\alpha_2 + \beta_2) = \pi \text{ rad} \quad (032)$$

$$\alpha^2 - x^2 = y^2 \quad (033)$$

Multiplicando-se as equações (030) e (031) membro a membro vem:

$$\overline{MQ} \cdot \cos \alpha_1 \cdot \overline{QP} \cdot \cos \beta_3 = (R + X)(R - X) = R^2 - X^2$$

Ou,

$$\overline{MQ} \cdot \overline{QP} \cdot \cos \alpha_1 \cdot \cos \beta_3 = y^2 \quad (034)$$

Da figura 15 tem-se:

$$y = \overline{MQ} \cdot \sin \alpha_1 = \overline{QP} \cdot \sin \beta_3$$

Logo,

$$y^2 = \overline{MQ} \cdot \overline{QP} \cdot \sin \alpha_1 \cdot \sin \beta_3 \quad (035)$$

Levando-se o valor de y^2 , da equação 035, na equação 034, já eliminados os termos em \overline{MQ} e \overline{QP} , vem:

$$\cos \alpha_1 \cdot \cos \beta_3 = \sin \alpha_1 \sin \beta_3$$

Ou

$$\cos \alpha_1 \cdot \cos \beta_3 - \sin \alpha_1 \sin \beta_3 = 0$$

Ou

$$\cos(\alpha_1 + \beta_3) = 0 \quad (036)$$

A solução geral da equação trigonométrica 036 será:

$$\alpha_1 + \beta_3 = 2k\pi \pm \frac{\pi}{2} \text{ rad} \quad \text{com} \quad k \in \mathbb{Z}_+$$

A solução particular para $k = 0$ será:

$$\alpha_1 + \beta_3 = \frac{\pi}{2} \text{ rad} \quad (037)$$

Assim, pela equação 037, a equação 032 fornecerá a seguinte relação:

$$\alpha_2 + \beta_2 = \frac{\pi}{2} \text{ rad} \quad (038)$$

Com a relação 038 comprova-se a hipótese inicial de que o triângulo MQP, circunscrito na semicircunferência, é retângulo.

O diâmetro da circunferência para a característica do relé de admitância da figura 14 será k_1/k_2 perfeitamente ajustável, garantindo o alcance da proteção.

A atuação do relé ocorrerá sempre que a impedância for inferior àquela estabelecida pela circunferência na figura 14.

Observa-se também a direcionalidade da proteção relativa ao ângulo "T" de extrema importância e ajustável segundo a necessidade operativa.

Pelas características próprias do relé de admitância percebe-se a vantagem de sua utilização relativamente ao relé de impedância, pois neste último há necessidade de se adicionar uma unidade extra-direcional enquanto que no relé de admitância a direcionalidade é intrínseca, pelo menos teoricamente isto pode ser visto no equacionamento.

Com relação à incorporação de uma provável resistência de arco o problema persiste, porém em menor grau que aquele verificado com o relé de impedância.

Já em termos de oscilações amortecidas de origem transitória, pela menor área abrangida no plano X-R pela característica operativa, o relé tipo admitância é o que melhor se adapta, não implicando que isto elimina o problema.

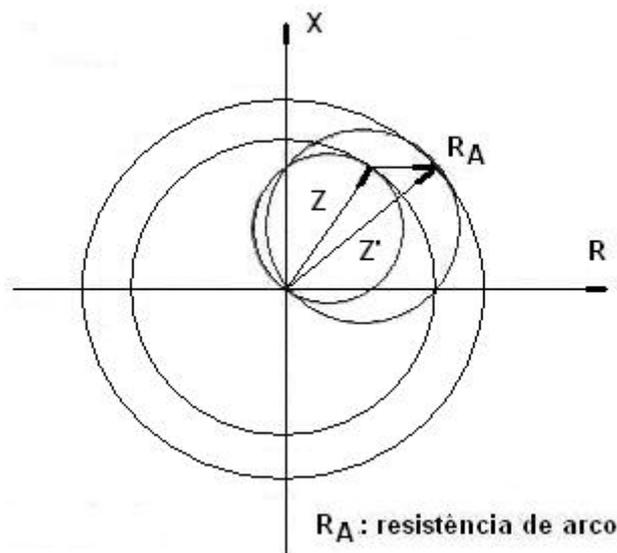


Figura 16 – Efeito da resistência de arco na característica de relés de distância

A figura 16 mostra, de maneira comparativa, as alterações introduzidas na característica, no plano X-R, dos relés de impedância e de admitância quando a presença de uma provável resistência de arco é admitida durante a ocorrência de uma falta.

Percebe-se que a alteração introduzida na impedância "Z", que pela presença da resistência de arco " R_A " passou ao valor "Z' ", interfere na característica operativa tanto do relé de admitância quanto na característica do relé de impedância, sendo de maior grau neste último tipo, uma vez que para o mesmo trecho a ser protegido a área descoberta é bem maior.

Também por este motivo, até em analogia, nota-se que as oscilações sistêmicas são mais sensíveis ao relé de impedância.

6. PROTEÇÃO DE DISTÂNCIA SEMI-ESTÁTICA

Com o avanço da tecnologia no campo da eletrônica, tanto analógica quanto digital, muitos progressos foram conseguidos pelos fabricantes na implementação de novos projetos de relés de proteção.

A denominação semi-estática, ou mesmo estática, tem tudo a ver com a utilização dos componentes eletrônicos em sua definição.

Um relé que apresenta no seu circuito de comando componentes eletrônicos executando funções que antes eram realizadas por elementos eletromagnéticos e eletrodinâmicos é classificado como de geração estática.

Quando o elemento de disparo, deste suposto relé, trata-se de um dispositivo tipo bobina móvel, elemento eletromagnético, tem-se um relé denominado semi-estático.

A grande flexibilidade de implementação eletrônica de funções específicas permite que vários tipos de releamento sejam implementados sendo que algumas vantagens podem ser listadas:

- Redução das constantes de tempo de resposta comparativamente aos relés do tipo eletromecânico;
- Redução, por conseguinte, do consumo interno do próprio relé;
- Facilidade de ajustes e de ensaios verificativos;
- Redução de manutenção na falta de partes móveis;
- Redução do espaço de ocupação físico;
- Maior confiabilidade operativa pelas vantagens anteriores.

Devido à flexibilidade de implementações na escolha do tipo de releamento diferentes funções foram descobertas, sendo que algumas delas só passaram a coexistir junto com as funções clássicas graças à eletrônica.

Nos próximos tópicos serão mostrados os principais tipos de relés de distancia seguidos tanto de estrutura de ligação quanto da análise matemática associada.

6.1. RELÉS SEMI-ESTÁTICOS DE DISTÂNCIA DE FUNÇÕES AJUSTÁVEIS

Como a implementação da parte eletrônica é bem diversificada entre os fabricantes, se tentará generalizar a análise dos relés semi-estáticos de distância através da utilização da configuração mostrada na figura 17.

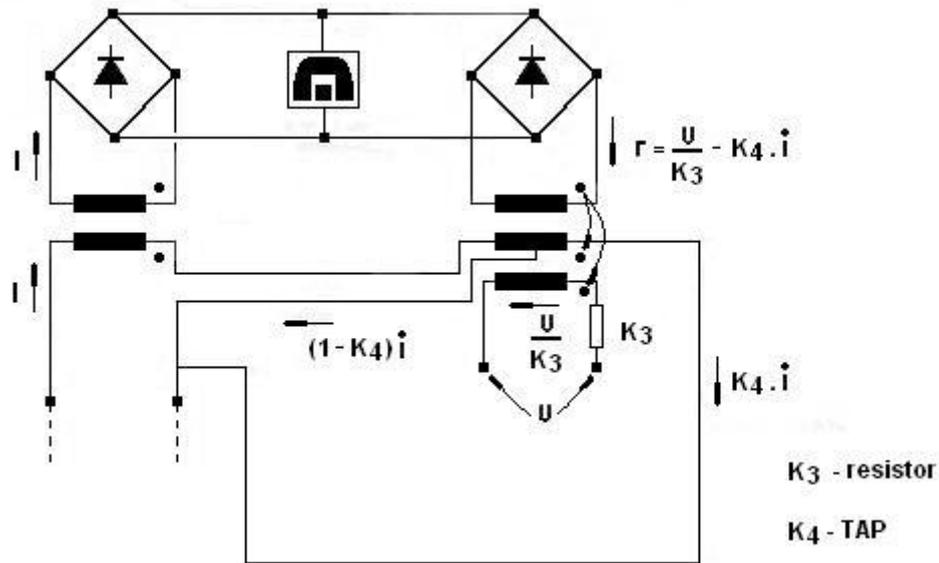


Figura 17 – Esquema básico de um relé semi-estático genérico¹

Na figura 17 considerar:

\dot{i} - fasor corrente;

\dot{U} - fasor tensão.

A atuação do relé ocorrerá por ação diferencial das correntes sobre a bobina móvel, valores já retificados.

A equação geral do torque do relé genérico da figura 17 será:

$$C = k_1 I^2 - k_2 I'^2 \quad (039)$$

Pela equação 039 entende-se que o torque que promoverá a mudança de estado na posição do dispositivo de bobina móvel, um *TRIP* p. ex., será oriundo de um desequilíbrio entre as parcelas $k_1 I^2$ e $k_2 I'^2$.

Como a parcela $k_2 I'^2$ depende de restrições em corrente de carga e em tensão de alimentação, p. ex., a equação genérica ficará:

¹ O ponto sobre a grandeza denota grandeza vetorial,

$$C = k_1 I^2 - k_2 \left[\frac{\dot{U}}{k_3} - k_4 I \right]^2 \quad (040)$$

O ajuste do valor do *tap* de enrolamento do transformador é que determinará o tipo do relé a ser utilizado. Seguem-se as análises.

6.2. RELÉ SEMI-ESTÁTICO DE DISTÂNCIA TIPO IMPEDÂNCIA

Pela própria definição do relé de impedância ajustando o valor para $k_4 = 0$ obtém-se o relé de sobrecorrente com restrições em tensão, ou melhor, considerando a condição "iminência de operação" do relé, ou $C = 0$ na equação 040, vem:

$$k_1 I^2 - k_2 \left[\frac{\dot{U}}{K_3} \right]^2 = 0 \quad (041)$$

Logo,

$$I = \sqrt{\frac{k_2}{k_1 k_3^2}} \cdot U$$

Ou melhor,

$$Z = \frac{U}{I} = k_3 \sqrt{\frac{k_1}{k_2}} \quad (042)$$

Escolhendo-se os valores k_1 e k_2 , de tal modo que $k_1 = k_2$, vem:

$$Z = k_3 \quad (043)$$

A característica deste relé, no plano X-R, será:

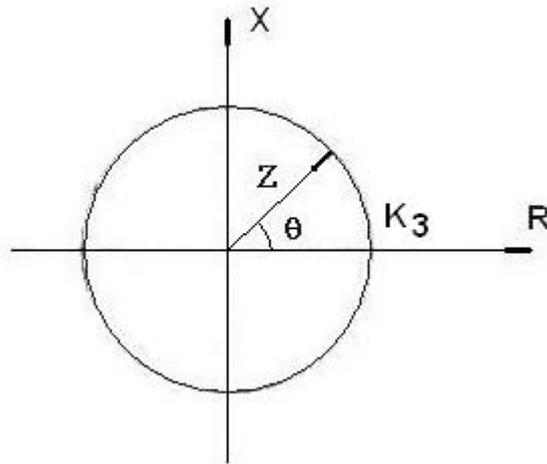


Figura 18 – Característica do relé de distância semi-estático de impedância ($k_4 = 0$)

6.3. RELÉ SEMI-ESTÁTICO DE DISTÂNCIA TIPO CONDUTÂNCIA

Do mesmo modo que para o relé semi-estático de impedância, ajustando o valor para $k_4 = 1$ obtém-se o relé direcional com restrição em tensão, ou melhor, considerando a condição “iminência de operação” do relé, ou $C = 0$ na equação 040, vem:

$$k_1 I^2 - k_2 \left[\frac{\dot{U}}{k_3} - I \right]^2 = 0 \quad (044)$$

A parcela dentro dos colchetes é uma soma vetorial que, pelo Teorema de Carnot, será dada em módulo por:

$$k_1 I^2 - k_2 \left[\sqrt{\left(\frac{U}{k_3} \right)^2 + I^2 - 2 \frac{U}{k_3} I \cos \theta} \right]^2 = 0$$

Ou melhor,

$$k_1 I^2 - k_2 \left[\left(\frac{U}{k_3} \right)^2 + I^2 - 2 \frac{U}{k_3} I \cos \theta \right] = 0$$

Com

$$(k_1 - k_2) I^2 - \frac{k_2}{k_3^2} U^2 + 2 \frac{k_2}{k_3} U I \cos \theta = 0$$

E como previamente foi escolhido $k_1 = k_2$, tem-se:

$$\frac{U^2}{2k_3} = UI \cos \theta$$

Com $Y = \frac{1}{Z} = \frac{I}{U}$

Ou, finalmente

$$\frac{1}{2k_3} = Y \cos \theta = G \quad (045)$$

Onde

Y – admitância;
G – condutância.

A característica deste relé, no plano X-R, será:

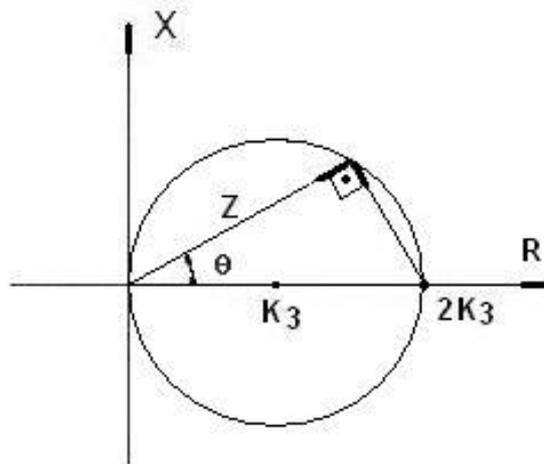


Figura 19 – Característica do relé de distância semi-estático de condutância ($k_4 = 1$)

Notar que o relé de condutância é uma particularização do relé de admitância quando o ângulo de torque máximo "T" vale zero.

6.4. RELÉ SEMI-ESTÁTICO DE DISTÂNCIA TIPO IMPEDÂNCIA DESLOCADO

Do mesmo modo que para o relé semi-estático de impedância, considerando um valor qualquer para k_4 , obtém-se o relé de sobrecorrente associado ao relé direcional com restrição em tensão.

Para a condição “iminência de operação” do relé, $C = 0$ na equação 040, vem:

$$k_1 I^2 - k_2 \left[\frac{\dot{U}}{k_3} - k_4 I \right]^2 = 0 \quad (046)$$

Do mesmo modo anterior, a parcela dentro dos colchetes é uma soma vetorial que, pelo teorema de Carnot, será dada em módulo por:

$$k_1 I^2 - k_2 \left[\sqrt{\left(\frac{U}{k_3} \right)^2 + k_4^2 I^2 - 2 \frac{k_4}{k_3} U I \cos \theta} \right]^2 = 0$$

Ou melhor,

$$k_1 I^2 - k_2 \left[\left(\frac{U}{k_3} \right)^2 + k_4^2 I^2 - 2 \frac{k_4}{k_3} U I \cos \theta \right] = 0$$

Desmembrando-se a equação anterior vem:

$$k_1 I^2 - \frac{k_2}{k_3^2} U^2 - k_2 k_4^2 I^2 + 2 \frac{k_2 k_4}{k_3} U I \cos \theta = 0$$

Reagrupando-se convenientemente vem:

$$\left(k_1 - k_2 k_4^2 \right) I^2 - \frac{k_2}{k_3^2} U^2 + 2 \frac{k_2 k_4}{k_3} U I \cos \theta = 0$$

Fazendo-se $U/I = Z$, e como previamente foi escolhido $k_1 = k_2$, vem:

$$\left[\left(1 - k_4^2 \right) k_3^2 - Z^2 + 2 k_3 k_4 Z \cos \theta \right] k_2 = 0$$

Como $k_2 \neq 0$ vem que:

$$\left(1 - k_4^2 \right) k_3^2 - Z^2 + 2 k_3 k_4 Z \cos \theta = 0$$

Que conduz a:

$$\left[\dot{Z} - k_3 k_4 \right]^2 = k_3^2 \quad (047)$$

A equação 047 trata-se da equação de uma circunferência cujo centro se localiza no ponto $(k_3 k_4, 0)$.

A figura 20 mostra a característica operativa do relé de impedância deslocado no plano X-R.

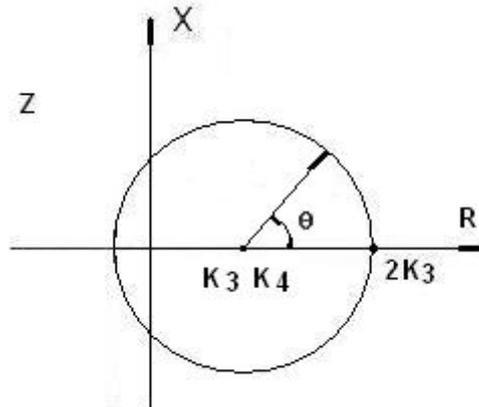


Figura 20 – Característica do relé de distância semi-estático de impedância deslocado ($0 < k_4 < 1$)

Observando as três características e superpondo-as nota-se que a variação do tap k_4 de $k_4 = 0$, passando por $0 < k_4 < 1$, chegando até $k_4 = 1$ permitirá a obtenção de uma família de curvas relativas ao relé de impedância deslocada.

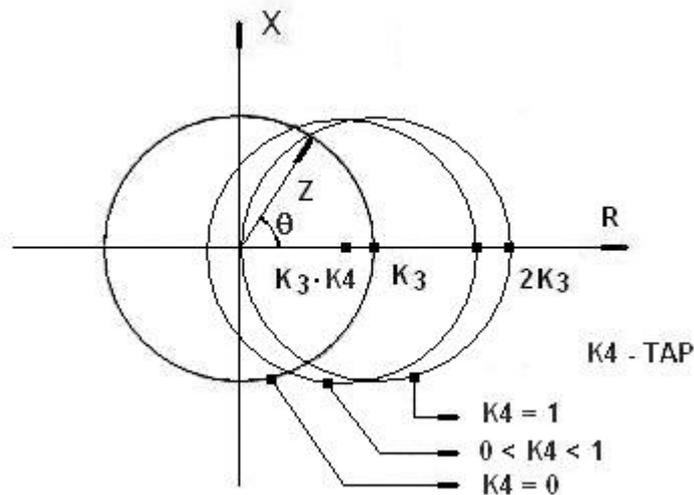


Figura 21 – Família de curvas do relé de distância da Figura 17

É importante lembrar que a utilização de um relé de distância – no presente caso um relé semi-estático – tipo impedância modificado assegurará, pela própria característica operativa do mesmo, uma boa incorporação da resistência de arco, ou resistência de falta, existindo a possibilidade de se ajustar esta incorporação.

7. PROTEÇÃO ESTÁTICA DE DISTÂNCIA

Nos capítulos anteriores, a intenção, de um modo geral, foi mostrar algumas variantes da proteção de distância tanto para a linha de relés da geração eletromecânica quanto para a linha de relés da geração semi-estática.

Apesar de a tentativa de generalização ter sido utilizada durante as análises, é importante saber que novas implementações, bem mais genéricas, poderiam ser aventadas para a análise da proteção semi-estática, porém a maior parte destas implementações será introduzida via análise da proteção estática a ser abordada neste capítulo.

7.1. INTRODUÇÃO À PROTEÇÃO ESTÁTICA

Durante o desenvolvimento visando a análise da proteção que utiliza relés eletromagnéticos, observou-se claramente que a ação de atuação desses relés origina num desequilíbrio, provocado por uma determinada ocorrência, verificado entre o conjugado eletromagnético relativo à grandeza principal monitorada e àquele relativo à grandeza auxiliar utilizada como restrição.

Como na maioria dos relés eletromagnéticos a existência de conjugados antagônicos não pode ser eliminada, esta situação acaba interferindo na ação de atuação destes relés de modo que uma parcela não linear é adicionada à ação de restrição inicial.

A proteção estática tem o mesmo princípio de ação e de disparo verificado na proteção com relés eletromagnéticos apenas que entre os sinais monitorados gera-se um sinal elétrico de erro, através de um comparador de sinais, a partir do qual, por intermédio de estágios amplificadores, criam-se níveis de saída que podem ou não disparar um determinado comando.

Normalmente trabalha-se com o princípio dos chamados quadripolos, ou princípio da caixa-preta como é mais popularmente conhecido.

Tal princípio consiste em monitorar, num circuito elétrico, grandezas como a tensão e a corrente e a partir destas criar sinais de erro em tensão proporcionais às grandezas monitoradas.

A grande dificuldade vem ligada à monitoração da corrente, ou seja, criar um dispositivo que libere um sinal em tensão proporcional ao sinal de corrente.

A figura 22 tenta mostrar o princípio da comparação utilizado no processo da proteção via relés estáticos.

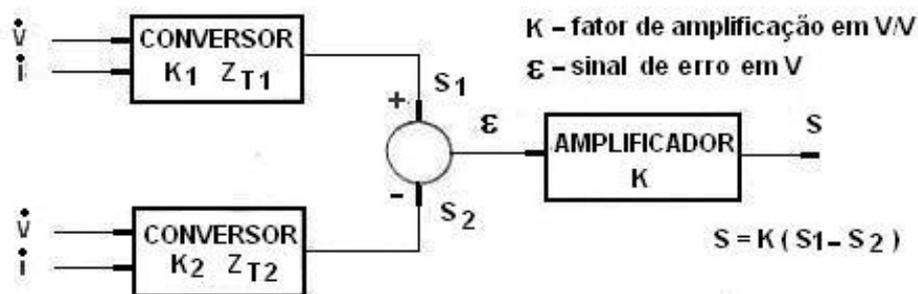


Figura 22 – Esquema da comparação de amplitude de sinais

Pela figura 22, poder-se-iam obter as seguintes equações para os sinais:

$$S_1 = k_1 V + Z_{T1} I \quad (048)$$

$$S_2 = k_2 V + Z_{T2} I \quad (049)$$

Onde,

k_1, k_2 – constantes de proporcionalidade;

Z_{T1}, Z_{T2} – impedâncias de transferência ou dos *transactors*.

Fisicamente, a obtenção de " k_1 " e " k_2 " é conseguida por intermédio da ação de potenciômetros, enquanto que a obtenção de " Z_{T1} " e " Z_{T2} " depende da utilização de dispositivos especiais que utilizam efeitos de indutâncias, mútua e própria, de reatores, montados especialmente para tal, conhecidos como *transactors*.

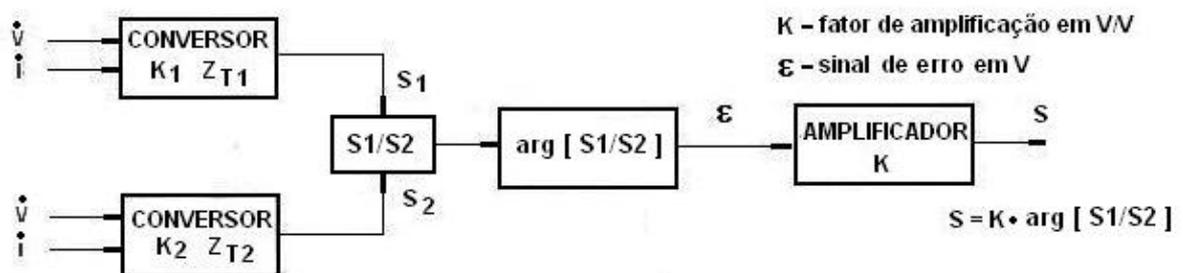


Figura 23 – Esquema da comparação de fase de sinais

O esquema montado na figura 22 trata-se de um dispositivo utilizado em processos que requerem a comparação em amplitude dos sinais " S_1 " e " S_2 ". Pela facilidade de eletrônica existem, também, dispositivos cuja comparação é promovida em fase e neste caso tem-se o seguinte esquema mostrado na figura 23.

7.2. TRANSACTOR

No processo de conversão de sinais, naquele que deve gerar a conversão da corrente em um sinal em tensão, de maneira linear, são utilizados dispositivos especiais.

A figura 24 mostra dois tipos de dispositivos que permitem a obtenção de um conversor tensão-corrente.

Para o esquema da figura 24(a) considerar um reator formado por um enrolamento único sobre um núcleo de material apresentando certo valor de

entreferro visando manter a linearidade entre a corrente de excitação e a tensão de saída.

Na figura 24(a) considerar:

- I – corrente de excitação a ser medida;
- V – tensão de saída;
- R – resistência de enrolamento do reator
- L – indutância própria do reator.

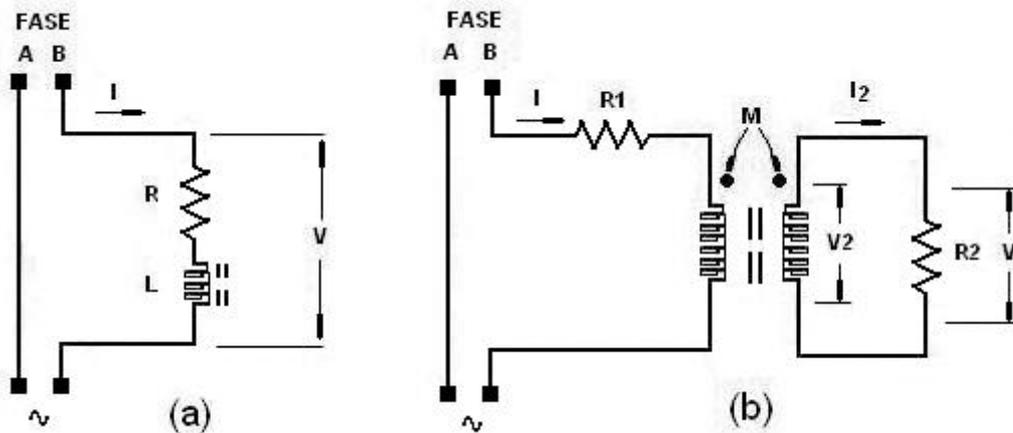


Figura 24 – Dispositivos conversores V/I
(a) Indutância própria
(b) Indutância própria e mútua – transactor

A equação para este conversor é a apresentada na equação 050 seguinte:

$$\frac{\dot{V}}{I} = Z e^{j\theta} = R + j\omega L \quad (050)$$

Onde,

$$\theta = \arctg \frac{\omega L}{R}$$

$$\omega = 2\pi f$$

Com " f " em Hz.

Para o esquema da figura 24(b), considerar a associação entre o efeito transformador e o efeito reator sendo que no transformador aparece a influência da indutância mútua entre o enrolamento primário, por onde circula a corrente de excitação, e o enrolamento secundário, por onde é liberada a

tensão de saída. No reator aparece a influência da indutância própria do secundário.

Também aqui, pela questão da linearidade, os enrolamentos primário e secundário são enrolados sobre um núcleo magnético com um certo entreferro.

Na figura 24(b) considerar:

I – corrente de excitação a ser medida;

I_2 – corrente de excitação referida ao secundário;

V – tensão de saída;

R_1 – resistência de enrolamento primário;

R_2 – resistência conectada ao secundário, inclusive aquela relativa ao enrolamento;

L_2 – indutância própria do enrolamento secundário;

M – indutância mútua entre os enrolamentos primário e secundário.

A equação para este conversor seria um pouco mais complexa:

$$V_2 = (R_2 + j\omega L_2)I_2 - j\omega MI \quad (051)$$

Na equação 051 a tensão " V_2 ", que nada mais é que a tensão do secundário de um transformador de corrente, vale zero, logo:

$$\frac{I_2}{I} = \frac{j\omega M}{R_2 + j\omega L_2} = \frac{j\omega M}{\sqrt{R_2^2 + \omega^2 L_2^2} e^{j\lambda}}$$

Onde $\lambda = \arctg \frac{\omega L_2}{R_2}$

Multiplicando-se por R_2/R_2 o primeiro membro da equação anterior resulta:

$$\frac{R_2 I_2}{R_2 I} = \frac{V}{R_2 I} = \frac{\omega M}{\sqrt{R_2^2 + \omega^2 L_2^2}} e^{j\left[\frac{\pi}{2} - \lambda\right]}$$

Ou melhor,

$$\frac{\dot{V}}{I} = \frac{\omega M R_2}{\sqrt{R_2^2 + \omega^2 L_2^2}} e^{j\left[\frac{\pi}{2} - \lambda\right]} = \dot{Z}_T \quad (052)$$

A literatura técnica confirma que o ângulo $\frac{\pi}{2} - \lambda$, relativo apenas à indutância própria do secundário do *transactor*, é um valor passível de escolha sendo que os fabricantes, em seus projetos, o destacam como um parâmetro de ajuste.

7.3. TIPOS DE COMPARAÇÃO EM PROTEÇÃO ESTÁTICA

Para que se efetive a ação da proteção estática surge a necessidade de estabelecimento de certos critérios.

Primeiramente, a respeito dos tipos de comparação existentes na proteção estática, já se sabe que se trata de dois tipos, lembrando:

- Comparação de fase;
- Comparação de amplitude.

Na comparação de amplitude, como pode ser comprovado através da figura 22, o sinal de erro deve ser proporcional à diferença entre os sinais de entrada.

Como critério poder-se-ia estabelecer a condição de atuação o que equivaleria, num relé tipo eletromagnético, ao torque positivo para:

$$|S_1| \geq |S_2| \quad (053)$$

Do mesmo modo poder-se-ia estabelecer a condição de atuação para a comparação de fase tomando como base a Figura 23.

$$-\lambda_1 \leq \arg[S_1/S_2] \leq +\lambda_2 \quad (054)$$

Para que se possa dar início a uma análise mais apurada acerca de cada um dos tipos de comparação comentados serão consideradas as Equações prévias 048 e 049 que são pontos comuns entre os tipos mencionados.

Assim vem:

$$\dot{S}_1 = k_1 \dot{V} + \dot{Z}_{T1} i = a + jb = S_1 e^{j\alpha_1} \quad (055)$$

$$\dot{S}_2 = k_2 \dot{V} + \dot{Z}_{T2} i = c + jd = S_2 e^{j\alpha_2} \quad (056)$$

Para a primeira condição estabelecida, equação 053, pode-se utilizar o seguinte raciocínio reportando as equações anteriores 055 e 056:

$$|\dot{S}_1| = \sqrt{a^2 + b^2} \therefore S_1^2 = a^2 + b^2 \quad (057)$$

$$|\dot{S}_2| = \sqrt{c^2 + d^2} \therefore S_2^2 = c^2 + d^2 \quad (058)$$

Como $S_1^2 \geq S_2^2$ pela Equação 053 vem:

$$c^2 + d^2 - a^2 - b^2 \leq 0 \quad (059)$$

A inequação 059 estabelece a condição "iminência de operação" para um relé estático por comparação de amplitude.

Do mesmo modo, considerando a equação 054, pode-se estabelecer a condição para a comparação de fase onde:

$$\frac{\dot{S}_1}{\dot{S}_2} = \frac{a + jb}{c + jd} = \frac{(a + jb)(c - jd)}{(c + jd)(c - jd)} = \frac{S_1}{S_2} e^{j\alpha} = \frac{ac + bd + j(bc - ad)}{c^2 + d^2}$$

Como $-\lambda_1 \leq \alpha \leq +\lambda_2$ e como para a condição primordial de direcionalidade, o ideal seria se trabalhar com comparação de fase em "co-seno", vem que esta função somente é positiva no intervalo $\left[-\frac{\pi}{2}, +\frac{\pi}{2}\right]$ de seu argumento.

Logo, a relação estabelecida para a condição "iminência de operação" se caracteriza por $\cos \alpha \geq 0$.

No desenvolvimento anterior tem-se:

$$\frac{\dot{S}_1}{\dot{S}_2} = \frac{ac + bd}{c^2 + d^2} + j \frac{bc - ad}{c^2 + d^2}$$

Mas da relação anterior obtém-se:

$$\cos \alpha = \frac{ac + bd}{M}$$

Onde,

$$M = \sqrt{(ac + bd)^2 + (bc - ad)^2}$$

Logo a condição procurada para a comparação de fase por co-seno será:

$$-ac - bd \leq 0 \quad (060)$$

7.4. ANÁLISE DOS TIPOS CONVENCIONAIS² DE RELÉS ESTÁTICOS DE DISTÂNCIA POR COMPARAÇÃO DE FASE

Como já foi desenvolvida no tópico anterior, a expressão básica para o estabelecimento da condição operativa para um relé estático de distância, que

² A citação convencional que apareceu neste trabalho se refere a relés estáticos que apresentam apenas dois sinais de entrada, no presente caso S1 e S2, ver equações 048 e 049. Com esta implementação conseguem-se os tipos impedância, reatância, admitância, ângulo impedância, admitância off-set e impedância modificado. Os relés não convencionais apresentam entradas múltiplas tipo S1, S2, S3,... onde se conseguem tipos especiais como relés de características complexas, característica elíptica e característica quadrilateral, no plano IX-IR.

trabalha por comparação de fase, consiste na obediência da relação ditada pela equação 060.

Tomando-se como referencia, para o sistema de vetores, o vetor tensão "V" ficará definido como $\dot{V} = Ve^{j0} = V$.

Logo

$$Z = \frac{V}{Ie^{-j\gamma}} = \frac{V}{I} e^{j\gamma}$$

Assim,

$$\begin{aligned}\dot{V} &= Ve^{j0} \\ i &= Ie^{-j\gamma} \\ \dot{Z}_{T_1} &= Z_{T_1} e^{j\theta_1} \\ \dot{Z}_{T_2} &= Z_{T_2} e^{j\theta_2}\end{aligned}$$

A equação 055, com as expressões já desenvolvidas anteriormente, tomará o seguinte aspecto:

$$\dot{S}_1 = K_1 V + Z_{T_1} I e^{j(\theta_1 - \gamma)} = K_1 V + Z_{T_1} I \cos(\theta_1 - \lambda_1) + j Z_{T_1} I \sin(\theta_1 - \lambda_1) = a + jb \quad (061)$$

$$\dot{S}_2 = K_2 V + Z_{T_2} I e^{j(\theta_2 - \gamma)} = K_2 V + Z_{T_2} I \cos(\theta_2 - \lambda_2) + j Z_{T_2} I \sin(\theta_2 - \lambda_2) = c + jd \quad (062)$$

Levando-se, na inequação 060, os valores determinados para os parâmetros a, b, c, d, via equações 061 e 062, vem:

$$ac + bd = [K_1 V + Z_{T_1} I \cos(\theta_1 - \gamma)] [K_2 V + Z_{T_2} I \cos(\theta_2 - \gamma)] + [Z_{T_1} I \sin(\theta_1 - \gamma) Z_{T_2} I \sin(\theta_2 - \gamma)]$$

$$\begin{aligned}ac + bd &= K_1 K_2 V^2 + K_1 V Z_{T_2} I \cos(\theta_2 - \gamma) + K_2 V Z_{T_1} I \cos(\theta_1 - \gamma) + Z_{T_1} Z_{T_2} I^2 \cos(\theta_1 - \gamma) \cos(\theta_2 - \gamma) + \\ &+ Z_{T_1} Z_{T_2} I^2 \sin(\theta_1 - \gamma) \sin(\theta_2 - \gamma)\end{aligned}$$

Simplificando-se vem:

$$ac + bd = K_1 K_2 V^2 + K_1 V Z_{T_2} I \cos(\theta_2 - \gamma) + K_2 V Z_{T_1} I \cos(\theta_1 - \gamma) + Z_{T_1} Z_{T_2} I^2 \cos(\theta_1 - \theta_2) \quad (063)$$

Considerando-se a condição de “iminência de operação”, estabelecida pela inequação 060, e aplicando a equação 063 vem:

$$-K_1 K_2 V^2 - VI[K_1 Z_{T_2} \cos(\theta_2 - \gamma) + K_2 Z_{T_1} \cos(\theta_1 - \gamma)] - Z_{T_1} Z_{T_2} I^2 \cos(\theta_1 - \theta_2) \leq 0 \quad (064)$$

A inequação 064 corresponde à condição operativa genérica para o relé estático de distância sob comparação direcional.

7.4.1. CARACTERÍSTICA DIRECIONAL SOB COMPARAÇÃO DE FASE

Na inequação 064, fazendo $Z_{T_1}=0$ e $K_2 = 0$, obtém-se a seguinte relação:

$$-VIK_1 Z_{T_2} \cos(\theta_2 - \gamma) \leq 0$$

onde $Z=V/I$

Dividindo-se a relação anterior por $-I^2$ vem:

$$K_1 Z Z_{T_2} \cos(\theta_2 - \gamma) \geq 0 \quad (065)$$

A solução da equação 065 será:

$$\cos(\theta_2 - \gamma) \geq 0$$

sendo $K_1, Z, Z_{T_2} \neq 0$

Logo

$$-\frac{\pi}{2} \leq (\theta_2 - \gamma) \leq +\frac{\pi}{2} \text{ rad}$$

De onde

$$(-\theta_2 - \frac{\pi}{2}) \leq -\gamma \leq (+\frac{\pi}{2} - \theta_2) \text{ rad}$$

Finalmente

$$(\theta_2 + \frac{\pi}{2}) \geq \gamma \geq (\theta_2 - \frac{\pi}{2}) \text{ rad} \quad (066)$$

A equação 066 permite delimitar, em forma de gráfico, a característica no plano X-R do relé direcional, ver figura 25.

Notar que a inclinação da direcionalidade é ajustada segundo o valor de " θ_2 ", característica de ajuste do transactor.

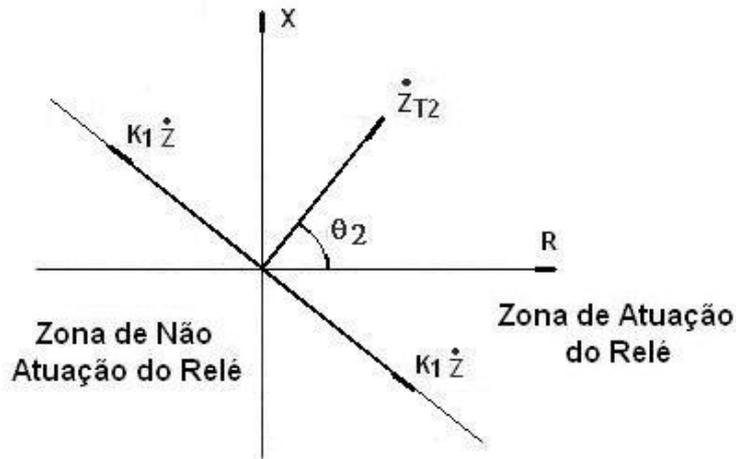


Figura 25 – Característica direcional do relé estático no plano X-R

7.4.2. CARACTERÍSTICA ANGULAR DE REATÂNCIA SOB COMPARAÇÃO DE FASE

Na inequação 064 fazendo $K_1 = -K$, $K_2 = 0$, $Z_{T1} = Z_{T2} = Z_T$ e $\theta_1 = \theta_2 = \theta$, obtém-se:

$$VIKZ_T \cos(\theta - \gamma) - Z_T^2 I^2 \leq 0$$

Dividindo-se a relação anterior por $I^2 Z_T$ vem:

$$Z \cos(\theta - \gamma) \leq \frac{Z_T}{K} \quad (067)$$

A figura 26(a) mostra a característica, no plano X-R, do relé de característica angular que é regido pela Inequação 067.

Notar que se $\theta = 0$ tem-se o relé de resistência e se $\theta = \pi/2$ rad tem-se o relé de reatância, ver figuras 26(b) e 26(c) respectivamente.



Figura 26 – Característica angular de reatância do relé estático no plano X-R

- (a) Característica angular genérica
 (b) Característica de resistência
 (c) Característica de reatância

7.4.3. CARACTERÍSTICA DO RELÉ DE IMPEDÂNCIA OFF-SET SOB COMPARAÇÃO DE FASE

Na inequação 064 fazendo $K_1 = K$, $K_2 = -K$ e $\theta_1 = \theta_2 = \theta$, obtém-se:

$$K^2 V^2 - KV I \cos(\theta - \gamma) [Z_{T_2} - Z_{T_1}] - Z_{T_2} Z_{T_1} I^2 \leq 0$$

Dividindo-se a relação anterior por I^2 vem:

$$K^2 Z^2 - (Z_{T_2} - Z_{T_1}) K Z \cos(\theta - \gamma) - Z_{T_2} Z_{T_1} \leq 0 \quad (068)$$

Para se descobrir o tipo de cônica envolvido na inequação 068 seguir o raciocínio.

$$K^2 Z^2 - (Z_{T_2} - Z_{T_1}) K Z [\cos \theta \cos \gamma + \text{sen} \theta \text{sen} \gamma] - Z_{T_2} Z_{T_1} = 0$$

Ou

$$K^2 Z^2 - (Z_{T_2} - Z_{T_1}) K [(Z \cos \gamma) \cos \theta + (Z \text{sen} \gamma) \text{sen} \theta] - Z_{T_2} Z_{T_1} = 0 \quad (069)$$

Na equação 069 podem-se considerar as seguintes relações:

$$\begin{aligned} X &= Z \text{sen} \gamma \\ R &= Z \cos \gamma \end{aligned}$$

Onde $\dot{Z} = R + jX \therefore Z^2 = R^2 + X^2$

De modo que a equação 069 ficará como seguinte:

$$K^2 Z^2 - (Z_{T_2} - Z_{T_1})K[R \cos \theta + X \operatorname{sen} \theta] - Z_{T_2} Z_{T_1} = 0$$

Multiplicando-se membro a membro por 4 vem:

$$4K^2 Z^2 - 4(Z_{T_2} - Z_{T_1})K[R \cos \theta + X \operatorname{sen} \theta] - 4Z_{T_2} Z_{T_1} = 0 \quad (070)$$

Mas $4Z_{T_2} Z_{T_1} = (Z_{T_2} - Z_{T_1})^2 - (Z_{T_2} + Z_{T_1})^2$

Logo a equação 070 ficará como seguinte:

$$4K^2 Z^2 - 4K(Z_{T_2} - Z_{T_1})[R \cos \theta + X \operatorname{sen} \theta] + (Z_{T_2} - Z_{T_1})^2 - (Z_{T_2} + Z_{T_1})^2 = 0$$

Dividindo-se a equação anterior por $(4K)^2$ vem:

$$Z^2 + \left[\frac{Z_{T_2} - Z_{T_1}}{2K} \right]^2 - \left[\frac{Z_{T_2} - Z_{T_1}}{2K} \right] (2R \cos \theta + 2X \operatorname{sen} \theta) = \left[\frac{Z_{T_2} + Z_{T_1}}{2K} \right]^2 \quad (071)$$

Substituindo o valor $Z^2 = R^2 + X^2$ na equação 071, e separando os membros de modo conveniente, tem-se:

$$\begin{aligned} R^2 - 2R \left[\frac{Z_{T_2} - Z_{T_1}}{2K} \right] \cos \theta + X^2 - 2X \left[\frac{Z_{T_2} - Z_{T_1}}{2K} \right] \operatorname{sen} \theta + \\ + \left[\frac{Z_{T_2} - Z_{T_1}}{2K} \right]^2 (\cos^2 \theta + \operatorname{sen}^2 \theta) = \left[\frac{Z_{T_2} + Z_{T_1}}{2K} \right]^2 \end{aligned} \quad (072)$$

Outro melhor arranjo da equação (072) permitirá escrever:

$$\left[X - \frac{(Z_{T_2} - Z_{T_1})}{2K} \operatorname{sen} \theta \right]^2 + \left[R - \frac{(Z_{T_2} - Z_{T_1})}{2K} \cos \theta \right]^2 = \left[\frac{Z_{T_2} + Z_{T_1}}{2K} \right]^2 \quad (073)$$

Lembrando-se que

$$\begin{aligned} X_0 &= \frac{(Z_{T_2} - Z_{T_1})}{2K} \operatorname{sen} \theta \\ R_0 &= \frac{(Z_{T_2} - Z_{T_1})}{2K} \cos \theta \end{aligned}$$

Nota-se que a equação 073 nada mais é que a equação de uma circunferência

de raio $\left[\frac{(Z_{T_2} + Z_{T_1})}{2K} \right]$ e centro $\left[\frac{(Z_{T_2} - Z_{T_1})}{2K} \cos\theta, \frac{(Z_{T_2} - Z_{T_1})}{2K} \operatorname{sen}\theta \right]$

Pela equação 073 percebe-se que, para condições especiais, outras importantes características são obtidas.

Para o caso particular de se ter $Z_{T_1} = Z_{T_2} = Z_T$ tem-se a característica de impedância e para o caso de se ter $Z_{T_1} = 0$ tem-se a característica de admitância.

Graficamente, no plano X-R, a característica seria conforme figura 28.

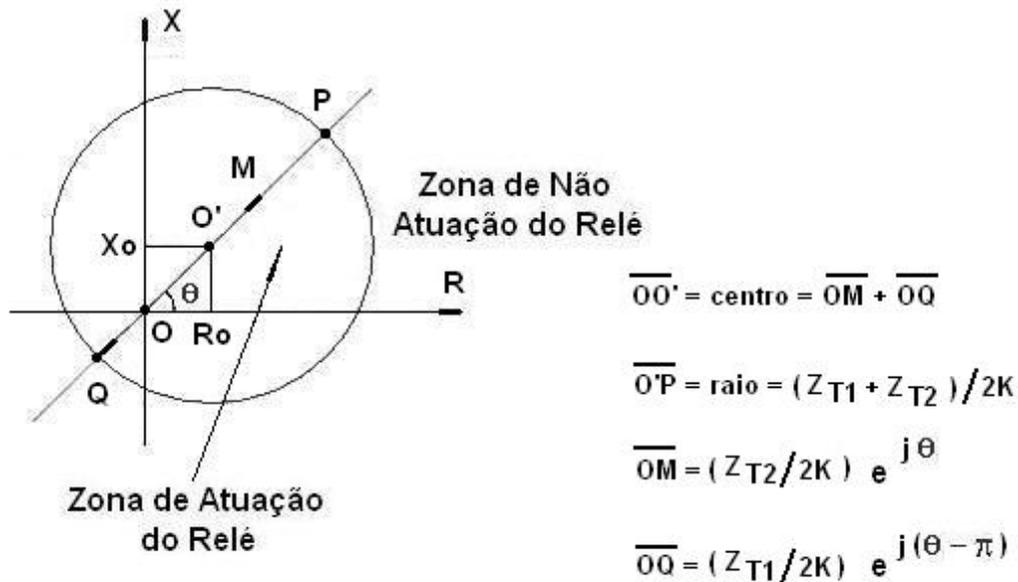
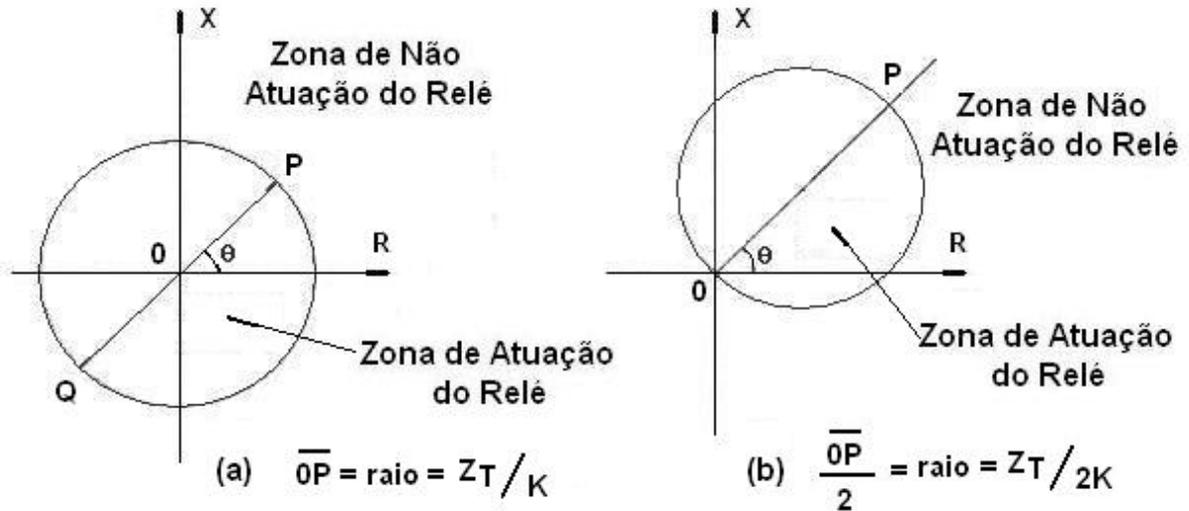


Figura 27 – Característica de impedância off-set do relé estático no plano X-R



**Figura 28 – (a) Característica de impedância do relé estático no plano X-R
(b) Característica de admitância**

7.5. ANÁLISE DOS TIPOS CONVENCIONAIS DE RELÉS ESTÁTICOS DE DISTÂNCIA POR COMPARAÇÃO DE AMPLITUDE

Como já foi desenvolvida no tópico precedente, a expressão básica para o estabelecimento da condição operativa para um relé estático de distância, que trabalha por comparação de amplitude, consiste na obediência da relação (059). Tomando-se como referência, assim como para a comparação de fase, o vetor tensão "V" este ficará definido como no item 7.4 precedente.

Levando-se na inequação 059 os valores determinados para os parâmetros a, b, c, d, via equações 061 e 062, vem:

$$c^2 + d^2 - a^2 - b^2 = [K_2 V + Z_{T_2} I \cos(\theta_2 - \gamma)]^2 + [Z_{T_2} I \sin(\theta_2 - \gamma)]^2 - [K_1 V + Z_{T_1} I \cos(\theta_1 - \gamma)]^2 - [Z_{T_1} I \sin(\theta_1 - \gamma)]^2$$

Ou

$$c^2 + d^2 - a^2 - b^2 = K_2^2 V^2 + 2 K_2 V Z_{T_2} I \cos(\theta_2 - \gamma) + Z_{T_2}^2 I^2 [\cos^2(\theta_2 - \gamma) + \sin^2(\theta_2 - \gamma)] - K_1^2 V^2 + 2 K_1 V Z_{T_1} I \cos(\theta_1 - \gamma) - Z_{T_1}^2 I^2 [\cos^2(\theta_1 - \gamma) + \sin^2(\theta_1 - \gamma)]$$

Logo

$$c^2 + d^2 - a^2 - b^2 = (K_2^2 - K_1^2) V^2 + 2VI [K_2 Z_{T_2} \cos(\theta_2 - \gamma) - K_1 Z_{T_1} \cos(\theta_1 - \gamma)] + (Z_{T_2}^2 - Z_{T_1}^2) I^2 \quad (074)$$

Considerando-se a condição de "iminência de operação" estabelecida pela inequação 059 e adaptando a esta a equação 074, vem:

$$(K_2^2 - K_1^2)V^2 + 2VI[K_2Z_{T_2}\cos(\theta_2 - \gamma) - K_1Z_{T_1}\cos(\theta_1 - \gamma)] + (Z_{T_2}^2 - Z_{T_1}^2)I^2 \leq 0 \quad (075)$$

A inequação 075 corresponde à condição operativa genérica para o relé estático de distância sob comparação direcional.

7.5.1. CARACTERÍSTICA DO RELÉ DE IMPEDÂNCIA OFF-SET SOB COMPARAÇÃO DE AMPLITUDE

Na inequação 075, fazendo $K_1 = 0$ e $K_2 = -K$, obtém-se:

$$K^2 V^2 - 2VIKZ_{T_2}\cos(\theta_2 - \gamma) + (Z_{T_2}^2 - Z_{T_1}^2)I^2 \leq 0$$

Dividindo-se a relação anterior por I^2 vem:

$$K^2 Z^2 - 2KZZ_{T_2}\cos(\theta_2 - \gamma) + (Z_{T_2}^2 - Z_{T_1}^2) \leq 0 \quad (076)$$

Para provar o tipo de cônica envolvido na inequação 076 seguir o raciocínio.

$$K^2 Z^2 - 2KZ_{T_2}(Z\cos\gamma\cos\theta_2 + Z\sen\gamma\sen\theta_2) + (Z_{T_2}^2 - Z_{T_1}^2) = 0 \quad (077)$$

Na equação 077 podem-se considerar as seguintes relações:

$$X = Z\sen\gamma$$

$$R = Z\cos\gamma$$

onde $\dot{Z} = R + jX \therefore Z^2 = R^2 + X^2$

De modo que a equação 077 ficará como seguinte, já dividindo a equação por resultante por K^2 :

$$R^2 + X^2 - 2\frac{Z_{T_2}}{K}(R\cos\theta_2 + X\sen\theta_2) + \frac{Z_{T_2}^2 - Z_{T_1}^2}{K^2} = 0 \quad (078)$$

Reagrupando convenientemente, as parcelas da equação 078, obtém-se:

$$R^2 - 2R \frac{Z_{T2} \cos \theta_2}{K} + \frac{Z_{T2}^2 \cos^2 \theta_2}{K^2} - \frac{Z_{T2}^2 \cos^2 \theta_2}{K^2} +$$

$$+ X^2 - 2X \frac{Z_{T2} \sin \theta_2}{K} + \frac{Z_{T2}^2 \sin^2 \theta_2}{K^2} - \frac{Z_{T2}^2 \sin^2 \theta_2}{K^2} + \frac{Z_{T2}^2 - Z_{T1}^2}{K^2} = 0$$

Ou melhor,

$$\left[X - \frac{Z_{T2} \sin \theta_2}{K} \right]^2 + \left[R - \frac{Z_{T2} \cos \theta_2}{K} \right]^2 = \left[\frac{Z_{T1}}{K} \right]^2 \quad (079)$$

Lembrando-se que:

$$X_0 = \frac{Z_{T2} \sin \theta_2}{K}$$

$$R_0 = \frac{Z_{T2} \cos \theta_2}{K} \quad (080)$$

Nota-se que a equação 079 nada mais é que a equação de uma circunferência

de raio $\left[\frac{Z_{T1}}{K} \right]$ e centro $\left[\frac{Z_{T2} \cos \theta_2}{K}, \frac{Z_{T2} \sin \theta_2}{K} \right]$.

Graficamente, no plano X-R, a circunferência seria conforme está mostrado na figura 29:

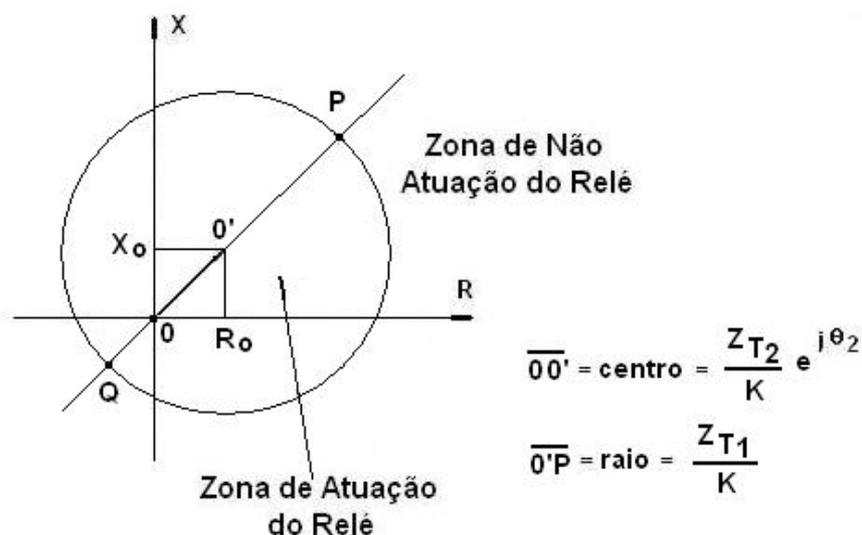


Figura 29 – Característica de impedância off-set do relé estático no plano X-R

Assim como foram verificados quando se analisou a comparação de fase existem condições especiais que geram outras importantes características. Para o caso particular de se ter $Z_{T_1} = Z_T$ e $Z_{T_2} = 0$ tem-se a característica de impedância e para o caso de se ter $Z_{T_1} = Z_{T_2} = Z_T$ tem-se a característica de admitância.

7.6. ANÁLISE DA DUALIDADE ENTRE A PROTEÇÃO DE DISTÂNCIA POR COMPARAÇÃO DE FASE E POR COMPARAÇÃO DE AMPLITUDE

Como pode ser analisado nos dois tópicos precedentes, existe a possibilidade de se trabalhar, para um determinado tipo de característica escolhido, segundo o processo de comparação de fase ou segundo o processo de comparação de amplitude.

Um bom exemplo para discussão é o caso do relé de impedância cuja análise foi desenvolvida anteriormente.

Em termos dos sinais de entrada " S_1 " e " S_2 ", relativos à proteção estática e referentes às equações 048 e 049, pode-se indicar como operação e como restrição, de um determinado relé estático, as seguintes equações:

operação do relé

$$S_{oper} = S_1 + S_2 \quad (081)$$

restrição do relé

$$S_{rest} = S_1 - S_2 \quad (082)$$

Para o caso de operação em que $|S_{oper}| \geq |S_{rest}|$ tem-se:

$$|(S_1 + S_2)| \geq |(S_1 - S_2)| \quad (083)$$

Ou então,

$$\frac{1}{|Z|} = \frac{|(S_1 + S_2)|}{|(S_1 - S_2)|} \geq 1$$

Ou também

$$|Z| \leq 1$$

O que graficamente poderia ser retratado como:

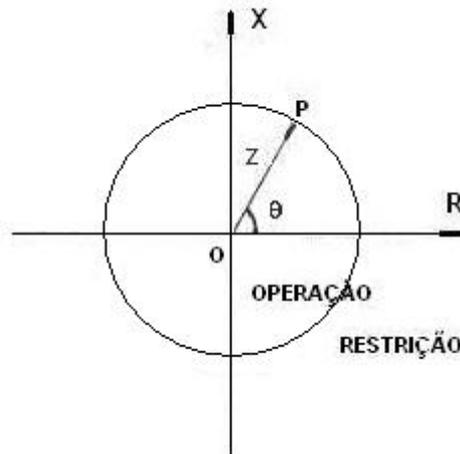


Figura 30 – Característica do relé de impedância para $|Z| \leq 1$

Deste modo, a relação 083 através da monitoração dos sinais " S_1 " e " S_2 ", segundo as equações 048 e 049 precedentes, satisfaz os quesitos da comparação de amplitude, porém em termos da comparação de fase não satisfaz.

Utilizando-se apenas os sinais " S_1 " e " S_2 " independentes e segundo certa implementação, é possível estabelecer uma nova relação visando satisfazer os quesitos da comparação de fase.

Para tal, lembrar que a relação S_1/S_2 , que permite obter o ângulo de fase entre os sinais, satisfaz os quesitos da comparação de fase, senão veja:

Sendo $\frac{S_1}{S_2} = \dot{M}$, na relação 083 ter-se-ia,

com $\dot{M} = M e^{j\beta}$:

$$\left| \frac{S_1}{S_2} + 1 \right| \geq \left| \frac{S_1}{S_2} - 1 \right|$$

Ou

$$|M + 1| \geq |M - 1| \quad (084)$$

O que graficamente poderia ser retratado por:

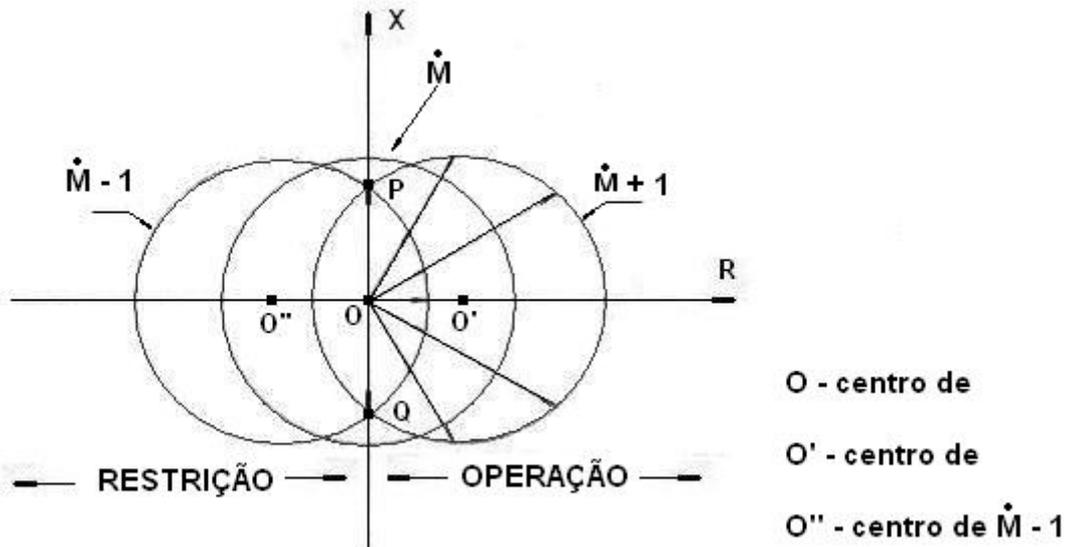


Figura 31 – Característica do relé de impedância para $|M+1| \geq |M-1|$

Pela figura 31 nota-se que a condição estabelecida na relação 084 satisfaz os quesitos da comparação de fase (entre estes $-\frac{\pi}{2} \leq \beta \leq +\frac{\pi}{2}$).

Voltando novamente à análise do relé estático de impedância sabe-se, por comprovação anterior, que, com base nas equações 048 e 049 que regem a filosofia operativa:

Comparação de fase

$$\begin{aligned} S_1 &= KV + Z_T I \\ S_2 &= -KV + Z_T I \end{aligned}$$

Comparação de amplitude

$$\begin{aligned} S_{rest} &= -KV = S_R \\ S_{oper} &= Z_T I = S_O \end{aligned}$$

Imaginando-se ser a comparação de amplitude no primal, seu dual seria:

Sistema Primal

$$S_O = S_1 + S_2$$

$$S_R = S_1 - S_2$$

Sistema Dual

$$S_1 = S_O - S_R = KV + Z_T I$$

$$S_2 = S_O + S_R = -KV + Z_T I$$

Baseando-se no raciocínio anterior de sistemas dual e primal, podem-se desenvolver os seguintes esquemas alternativos conforme mostrado na figura 32:

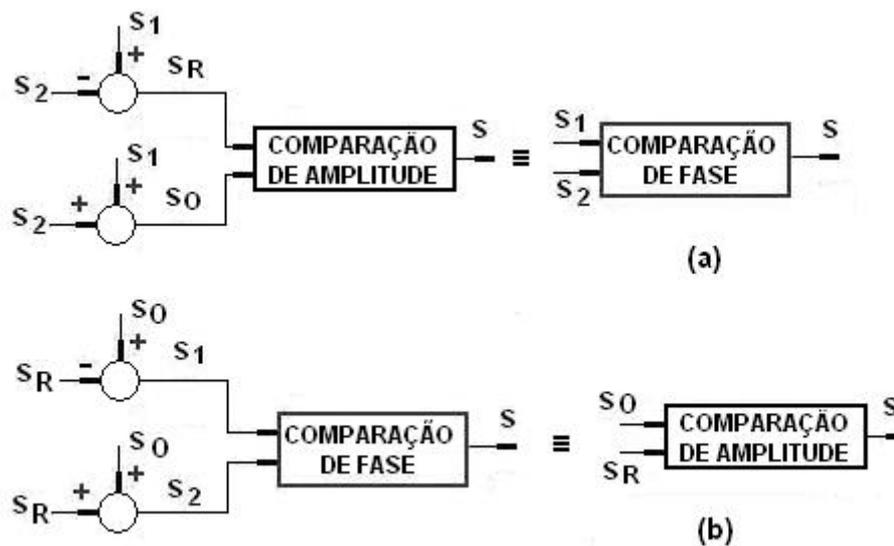


Figura 32 – (a), (b) Equivalência entre as comparações

A grande vantagem na utilização da dualidade consiste na flexibilidade que se pode introduzir num processo de proteção uma vez que um julgamento de engenharia poderia optar entre um ou outro tipo de comparação e dispendo de determinado processo de comparação se passaria para outro sem maiores problemas.

Para resumir os tipos convencionais de relés estáticos de distância, e a equivalência verificada entre os mesmos, extraiu-se, da referência 4, a seguinte tabela.

Tabela 1
Tabela de Equivalência Entre os Tipos de Comparação

Tipo do Relé	Comparação por Fase	Comparação por Amplitude
Impedância	Dual $S_1 = KV + Z_T I$ $S_2 = -KV + Z_T I$	Primal $S_O = Z_T I$ $S_R = -KV$
Admitância	Primal $S_1 = KV$ $S_2 = -KV + Z_T I$	Dual $S_O = \frac{Z_T}{2} I$ $S_R = -KV + \frac{Z_T}{2} I$
Angular de Reatância	Primal $S_1 = -KV + Z_T I$ $S_2 = Z_T I$	Dual $S_O = -KV + 2Z_T I$ $S_R = -KV$
Impedância OFF-SET	Não há dualidade! $S_1 = KV + Z_{T_1} I$ $S_2 = -KV + Z_{T_2} I$	Não há dualidade! $S_1 = Z_{T_1}$ $S_2 = -KV + Z_{T_2}$
Direcional	Primal $S_1 = KV$ $S_2 = Z_T I$	Dual $S_O = KV + Z_T I$ $S_R = KV - Z_T I$

Pela tabela acima se pode ter uma idéia das combinações, pelo menos de algumas combinações estudadas, possíveis e não-possíveis.

7.7. FILOSOFIA E ASPECTOS PRÁTICOS DA PROTEÇÃO ESTÁTICA DE DISTÂNCIA

7.7.1. FILOSOFIA GERAL DA PROTEÇÃO ESTÁTICA DE DISTÂNCIA

O objetivo básico da proteção de distância, ou mesmo da proteção estática de distância, seria estabelecer um sistema de proteção para linhas de transmissão

que fosse rápido, sensível, seletivo e confiável de modo a garantir os compromissos assumidos pelo sistema elétrico de potência.

Embora tenha sido, inicialmente, idealizada como uma proteção típica de sistemas de transmissão, a proteção de distância tem sua aplicação na consecução da proteção de distância de geradores e barramento, bem como na proteção de perda de excitação de máquinas síncronas.

O princípio geral utilizado para tal consiste em se monitorar certas grandezas que reflitam a atual impedância, fato este que permite se saber a respeito da normalidade ou não da condição presente da transmissão da energia.

Na proteção de distância são empregados dois tipos de processo que operacionalizam a execução da mesma, quais sejam, utilização via *carrier* através da própria linha física e utilização via microondas através do sistema multiplex de comunicação.

Através desses meios, anteriormente mencionados, procede-se, no caso de alguma ocorrência, a eliminação de uma provável falta entre o trecho de linha compreendido pela proteção. Neste caso, a proteção de um lado da linha sente a falta e promove o desligamento do respectivo disjuntor (*TRIP*) transferindo um sinal para o outro disjuntor, localizado no outro extremo do trecho protegido, garantindo também seu desligamento (*TRANSFER TRIP*).

Esquemáticamente, de modo bem simplificado, poder-se-iam agrupar os dois processos citados anteriormente através do seguinte desenho, ver Figura 33.

Na figura 33 mostram-se o sistema de proteção via *carrier* utilizando-se apenas a fase "C" da linha trifásica e o sistema de proteção via microondas.

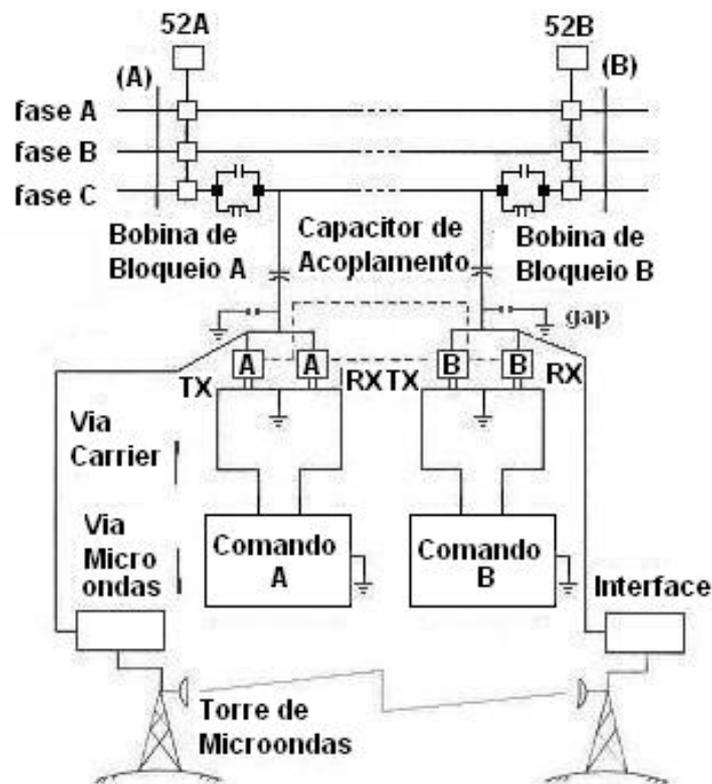


Figura 33 – Sistema de proteção via carrier via microondas

7.7.1.1. SISTEMA DE PROTEÇÃO DE DISTÂNCIA VIA *CARRIER*

Na figura 33 a representação do sistema de proteção via *carrier* corresponde ao esquema da parte superior. É o sistema cuja informação utiliza a própria linha física como meio de propagação.

Na proteção de distância trabalha-se com dois tipos de sinais de comando diferenciados pelo valor de frequência, quais sejam:

- Sinal de *Guard*;
- Sinal de *TRIP*.

Para um determinado equipamento, relativamente, p.ex. na figura 33, ao lado da barra "A", existe um canal de frequência que gera e transmite (TX-A) um sinal que se apresenta num determinado valor de frequência denominado de frequência central. Deste são deliberados os sinais de *guard* e de *TRIP* anteriormente mencionados segundo o critério seguinte:

- **Sinal de *Guard***

Frequência do sinal de *guard* = frequência central + desvio

- **Sinal de *TRIP***

Frequência do sinal de *TRIP* = frequência central – desvio

O processo consiste no chaveamento por desvio de frequência, em inglês *frequency shift keying* – FSK, de sinais em tons de áudio.

Portanto, em condição normal de operação o transmissor TX-A, da figura 33, transmite para o receptor RX-B um sinal de *guard*, o mesmo ocorrendo entre o transmissor TX-B e o receptor RX-A.

No caso de ocorrência de uma falta no trecho A-B da linha considerada, o transmissor TX-A, p.ex., receberá o comando, via relé de distância, de que há falta no trecho chaveando a frequência do sinal para a frequência de *TRIP*.

O mesmo ocorrerá relativamente ao transmissor TX-B.

Para o equacionamento usar as fórmulas seguintes:

$$f_{guard} = f_{central} + f_{desvio} \quad (085)$$

$$f_{trip} = f_{central} - f_{desvio} \quad (086)$$

Segundo a referência 4 o sinal de frequência central deverá ser em Amplitude Modulada dentro da faixa 30-500 kHz, normalizada.

No caso do sinal de *TRIP* pode-se ainda optar pela utilização das condições *EXALT* e *NO EXALT*. Caso a condição *EXALT* seja adotada, o sinal de *TRIP*, além do desvio de frequência, sofrerá um chaveamento extra que elevará a potência de transmissão garantindo o envio de *TRIP*.

O sinal de *TRIP* atuará diretamente no disjuntor inerente ao lado da linha e, através do *transferer-TRIP*, este mesmo sinal será transmitido para o outro disjuntor situado do outro lado da linha.

Este foi um exemplo bem simples de comando conhecido como *direct transfer-TRIP*, um dos tipos de alcance e disparo que será descrito mais à frente.

Para a operacionalização deste tipo de proteção, também muito conhecida por "teleproteção", alguns aspectos técnicos deverão ser obedecidos.

O conjunto é formado basicamente pelos seguintes dispositivos:

TRANSMISSOR

Transmissor de onda portadora com geração da frequência central e das frequências de *guard* e de *TRIP* por chaveamento, com osciladores de batimento, misturador, CAG, estágio de filtros, chaveamento de potência de saída, estágio de amplificação, estágio de saída, fonte de alimentação.

RECEPTOR

Receptor para a faixa de frequência desejada no *transfer-TRIP*, estágio de filtros, estágio de amplificação, osciladores de batimento, misturador, CAG, discriminador, estágio de saída para *guard* e *TRIP*, fonte de alimentação.

BOBINA DE BLOQUEIO

Circuito ressonante LC que oferece elevada impedância aos sinais de *carrier* e baixíssima impedância aos sinais de frequência industrial.

CAPACITOR DE ACOPLAMENTO

Nada mais é que um divisor de tensão capacitivo onde acoplam, entre si, a fase da linha de transmissão e a saída do sinal de *carrier*. Tem também a função de promover a ressonância série com o sinal de *carrier* proveniente dos estágios de saída dos transmissores e dos receptores.

GAP

Dispositivo de proteção de sobretensão.

CABOS

Cabos de baixa resistência na interligação capacitor de acoplamento e estágios de saída e cabos coaxiais de interligação entre os equipamentos eletrônicos e os estágios de saída dos transmissores e dos receptores.

7.7.1.2. SISTEMA DE PROTEÇÃO DE DISTÂNCIA VIA MICROONDAS

A diferença entre este sistema de proteção via microondas e aquele via *carrier* vem ligada ao meio que ambos usam para propagação dos sinais de *guard* e de *TRIP*.

Enquanto via *carrier* o meio físico utilizado é a própria linha de transmissão, via microondas o meio físico será a própria atmosfera não sendo necessária a presença desta para tal, uma vez que se trata de ondas eletromagnéticas.

Para que tal sistema venha ser utilizado existe outro equipamento *interface* que faz a adaptação entre os comandos do relé de distância e os grupos transmissores e receptores (ligação promovida por intermédio de cabo coaxial). Atualmente os grupos de proteção de distância utilizam um misto que implementa ambos os sistemas apresentados. O sistema via *carrier* seria responsável pela proteção principal enquanto o sistema via microondas seria responsável pela proteção secundária.

7.7.1.3. ESQUEMA UTILIZADO NA PROTEÇÃO DE DISTÂNCIA

Na implementação da proteção de distância, além dos procedimentos comentados, é usual a utilização de certos recursos.

Num esquema completo de proteção observou-se a existência de características especiais dos relés de distância, porém nada se falou de suas aplicações.

Como existem seções da linha que deverão ser protegidas dentro de certa seletividade, e como os terminais interligados são sempre dois, muitas vezes o equipamento do comando deverá decidir sobre a necessidade ou não de um disparo relativamente a um sinal.

Os relés de proteção, localizados em ambos os terminais de uma determinada linha de transmissão, trabalham de modo cruzado, sendo que as ordens de comando passam por um processo de seleção e de auto-análise compondo os seguintes grupos operativos:

- Comparação direcional e *TRIP*;
- Comparação de fase;
- *Transferer-TRIP*;
- Comparação de tensões opostas.

A *comparação direcional* tem como finalidade estabelecer o sentido em que a proteção ora deve atuar com *TRIP*, ora deve atuar com bloqueio do sinal de *TRIP*.

Para tal, muitas vezes utiliza-se o esquema do relé de impedância *off-set* ou então, como visto, do relé de impedância pura dotado de uma unidade direcional extra-relé. Assim, em termos gerais, o conjunto de proteção de distância referente a um determinado lado a ser protegido disporia, p.ex., de uma unidade de admitância, para frente (primeira zona), sem temporização atuando de modo direto na liberação do *TRIP*; de uma unidade de impedância *off-set*, para frente (segunda zona), com temporização atuando de modo direto na liberação do *TRIP*; de uma unidade de impedância *off-set* reversa atuando

como bloqueio do sinal de *TRIP*. Estas três unidades atuam para valores de falta trifásica equilibrada ou fase-fase (menor valor) de seqüência positiva.

A *comparação de fase* consiste num dispositivo que também detecta a falta pela comparação de grandezas como corrente de fases. Na condição normal operativa, caso o sistema seja suposto equilibrado, a diferença de fase para os mesmos sinais precedentes será $3\pi/2$ rad. No caso de falta fase-fase a diferença de fase para os mesmos sinais precedentes será π rad. Sobre o comando de *TRIP* se superpõem as decisões de confirmação ou bloqueio da ordem.

O esquema de *transferer-TRIP* de um terminal ao outro é o procedimento automático de comando. O que se nota neste processo são as extensões do alcance para cada tipo de proteção.

Serão reproduzidas aqui as análises relativas aos três tipos de comandos verificados no *transferer-TRIP*.

Supondo-se, inicialmente, a presença de dois tipos de relés sensores de distância “ R_O ” e “ R_U ” é possível se estabelecer três tipos de transferência de *TRIP*.

- R_O – relé de sobre-alcance que apresenta uma zona de proteção que envolve o terminal remoto;
- R_U – relé de sub-alcance que apresenta uma zona de proteção que não envolve o terminal remoto.

A figura 34 mostra o esquema de proteção com os relés de distância “ R_O ” e “ R_U ” com as seções protegidas.

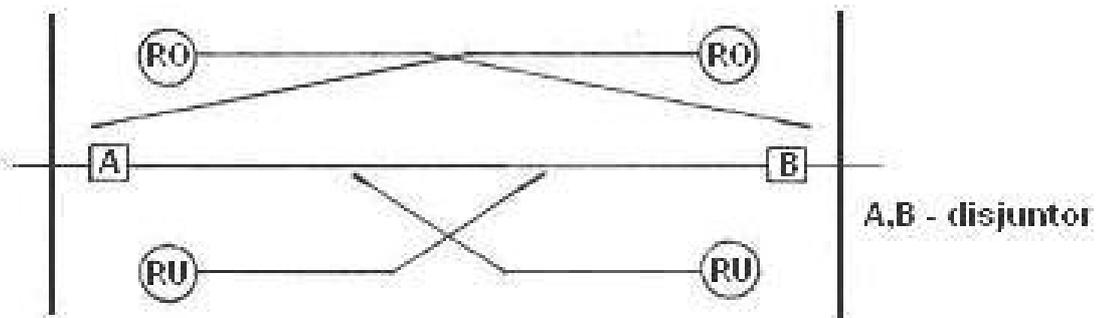


Figura 34 – Proteção “ R_O ” de sobre-alcance e “ R_U ” de sub-alcance

7.7.1.4. TRANSFERÊNCIA DE *TRIP* DIRETA COM SUB-ALCANCE – DUTT³

O princípio básico consiste em detectar a presença de uma falta, num determinado trecho protegido de linha, e promover a abertura do respectivo disjuntor, transferindo o comando de *TRIP* para o disjuntor do outro lado da linha.

³ DUTT – *Direct Underreaching Transferred Tripping*

A figura 35 mostra o esquema operativo.

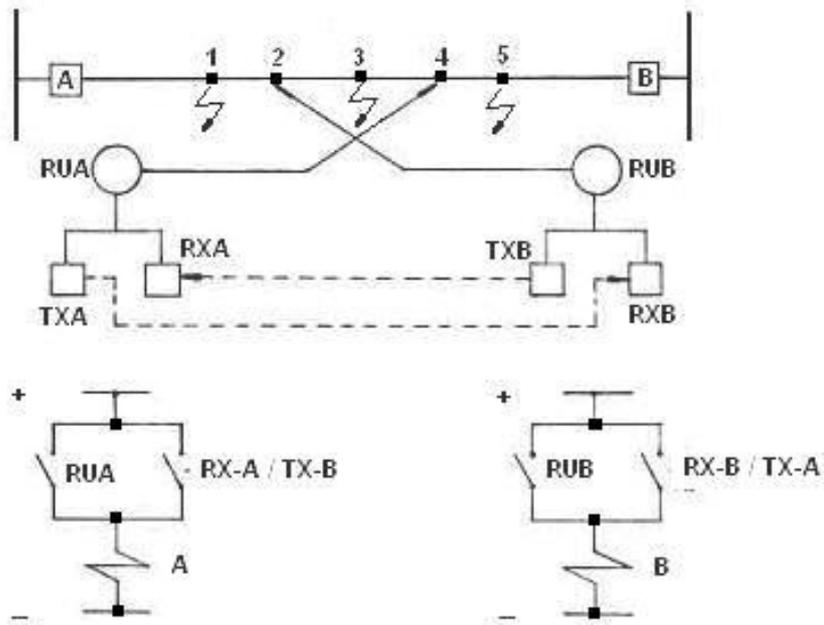


Figura 35 – Proteção por transferência de TRIP direta por sub-alcance

Notar que para esta implementação, a atuação dos relés de distância "RUA" e "RUB" obedecerá, primeiramente, a direcionalidade, pois o alcance de "RUA" vai de "A" até "4" e apenas neste sentido, enquanto o alcance de "RUB" vai de "B" até "2" e apenas neste sentido.

Caso ocorra, p.ex., uma falta fase-fase no ponto "1", pela direcionalidade e pelo alcance do relé de distância "RUA", ocorrerá a liberação de *TRIP* com o fechamento de contato NA/RUA e o conseqüente disparo do disjuntor "A". Ao mesmo tempo o transmissor TX-A parte e envia o sinal de *TRIP* para o receptor RX-B que promoverá o fechamento do contato NA/RUB e o conseqüente disparo do disjuntor "B".

Notar que o relé de distância "RUB", devido ao seu alcance ser de "B" até "2", não enxergará a falta. Uma falta no ponto "3" provocará a atuação de ambos os relés, enquanto uma falta no ponto "5" provocará apenas a atuação do relé "RUB". Em todas as atuações ocorrem as mesmas seqüências descritas na análise de falta no ponto "1".

7.7.1.5. TRANSFERÊNCIA DE *TRIP* PERMISSIVA COM SUB-ALCANCE – PUTT

Trata-se de um esquema de proteção semelhante ao tipo DUTT apenas que, na transferência do *TRIP*, a localização da falta será verificada e confirmada pelo dispositivo de sobre-alcance. A figura 36 mostra o esquema operativo.

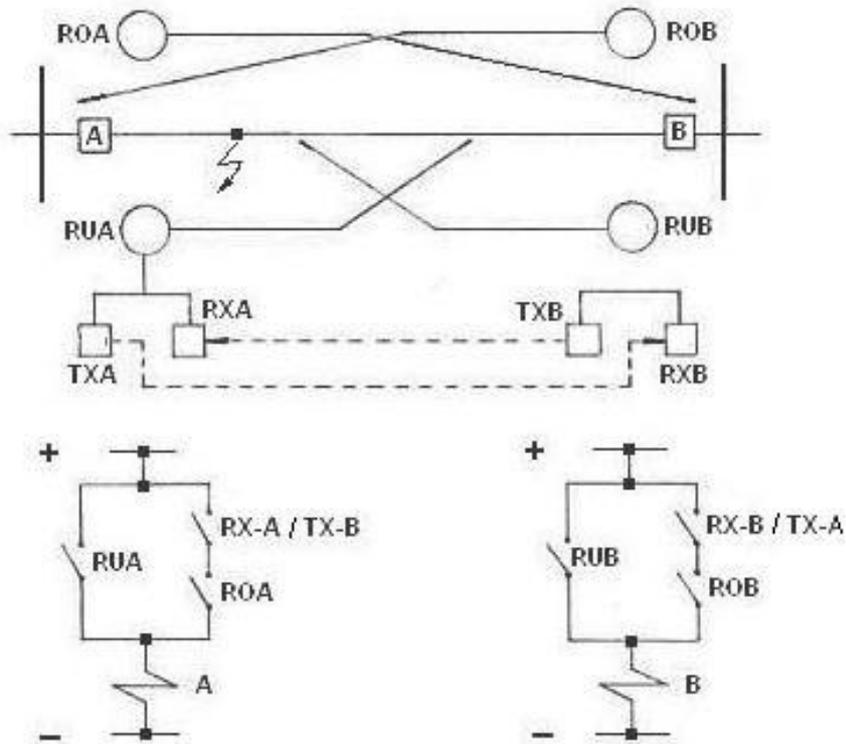


Figura 36 – Proteção de transferência de TRIP permissiva por sub-alcance

A grande vantagem do esquema PUTT sobre o esquema DUTT consiste em se evitar o sinal de *transfer TRIP* falso.

Caso ocorra, p.ex., uma falta fase-fase no ponto "1" as mesmas seqüências observadas quando da análise do sistema DUTT são também aqui observadas com o disparo do disjuntor "B" dependendo da confirmação do relé de sobre-alcance ROB.

7.7.1.6. TRANSFERÊNCIA DE TRIP PERMISSIVA COM SOBRE-ALCANCE – POTT

Neste esquema são utilizados apenas relés de distância com sobre-alcance que fazem o papel tanto de disparo quanto de supervisão e confirmação.

A figura 37 mostra o esquema operativo.

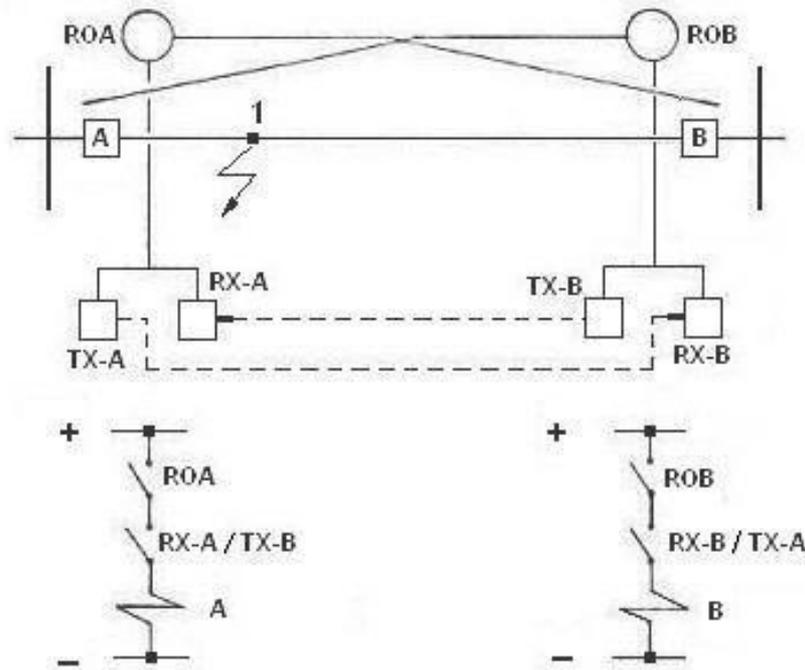


Figura 37 – Proteção de transferência de TRIP permissiva por sobre-alcance

Neste esquema, para uma falta interna ao trecho A-B haverá atuação de ambos os relés e para faltas externas ao trecho em questão não haverá atuação de nenhum dos relés.

Em relação aos três tipos de esquemas apresentados pode-se afirmar que o DUTT é bastante seguro, porém pouco confiável, enquanto o POTT se mostra bastante confiável e pouco seguro.

A figura 38 já trás o esquema operativo relacionado com o também já comentado esquema por comparação direcional.

Assim como já foi comentada previamente, e observando a partir da figura 38, na comparação direcional tem-se a vantagem de se poderem definir o trecho cuja liberação do TRIP é permitida e o trecho em que o bloqueio do TRIP é identificado. Na operacionalização deste esquema lembrar que para uma falta fase-fase no ponto "1", p.ex., o relé de distância "RTB" enxergará a mesma e tentará promover a abertura do disjuntor "B", porém o relé direcional "RBA" é ajustado para uma operação mais rápida de modo que o contato NF/RX-B abrirá primeiro que o fechamento do contato NA / RTB promovendo o bloqueio. Portanto, em termos de ajuste de seletividade, os relés "RTA" e "RTB" apresentam retardo em relação aos relés "RBA" e "RBB" para que a coordenação operativa da comparação direcional seja promovida.

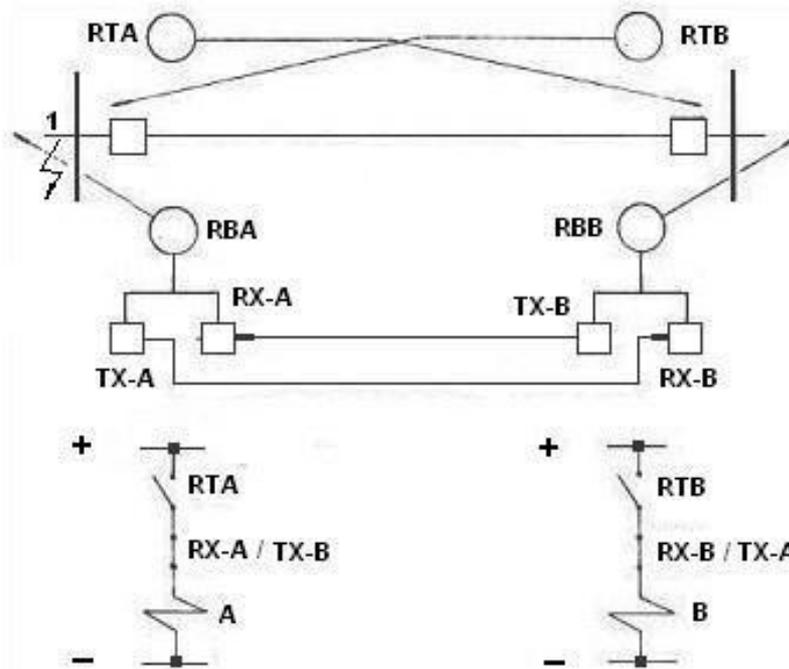


Figura 38 – Proteção por transferência de TRIP por comparação direcional

7.7.2. APLICAÇÃO DA PROTEÇÃO ESTÁTICA DE DISTÂNCIA

Como exemplo de aplicação, dentro daquilo que foi exposto neste capítulo, será descrito o sistema de proteção de distância do relé SLY da GECO sem a preocupação de se aprofundar no aspecto construtivo, voltando-se mais para o aspecto da filosofia, foco deste trabalho.

A figura 39 mostra um determinado trecho de sistema de transmissão sob proteção de distância vai canal de onda portadora.

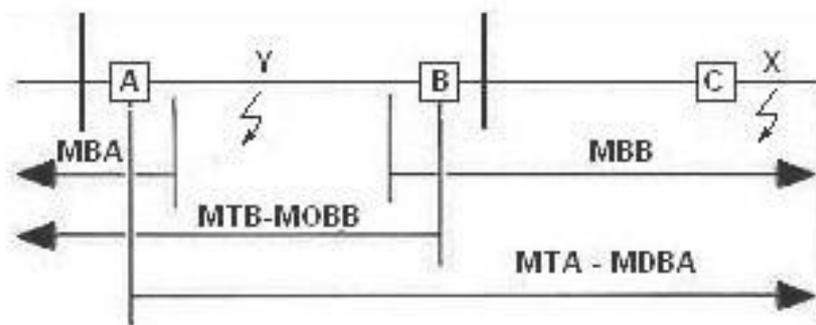


Figura 39 – Sistema de transmissão para exemplificação da proteção por comparação direcional vai carrier

Na figura 39 considerar:

- Unidade "MT" de admitância para frente com função de disparo de modo direto, como primeira zona;
- Unidade "MDB" de impedância *off-set* para frente com função de disparo de modo direto, como segunda zona temporizada visando bloqueio nas oscilações sistêmicas;
- Unidade "MB" de impedância *off-set* reversa com função de bloqueio.

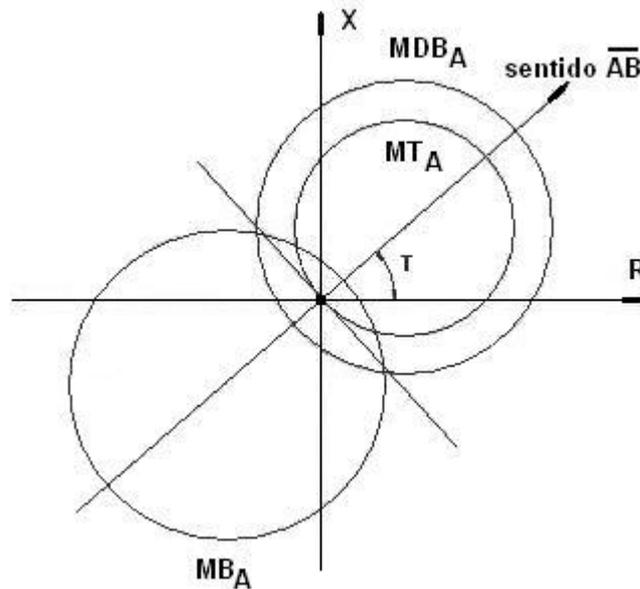


Figura 40 – Curvas características das unidades MT-MB-MDB do relé SLY/GECO – disjuntor “A”

Considerando-se a proteção que comandará o disjuntor "A", no trecho A-B, as seguintes características poderão compor o diagrama no plano X-R, na figura 40.

A utilização da unidade "MDB" tenta caracterizar a supervisão de oscilações de potência inerentes ao sistema.

A temporização desta unidade deverá levar em conta o período relativo a oscilação no modo local, caracterizado por frequências mais elevadas que aquelas relativas a oscilação interáreas.

Como análise, para uma provável falta fase-fase no ponto "Y" as unidades "MTA" e "MTB" atuarão disparando a abertura dos disjuntores "A" e "B".

Para uma falta fase-fase, agora no ponto "X", a unidade "MTA", enxergando-a, tentará abrir o disjuntor em "A", porém, como, por projeto, a unidade "MBB" é mais rápida, será enviado um comando via *carrier* desta unidade para a unidade "A", de recepção, que promoverá o bloqueio do disparo do disjuntor "A".

7.8. CARACTERÍSTICAS ESPECIAIS ADOTADAS NA PRÁTICA

Na prática, sempre houve problemas inerentes ao próprio processo de transmissão de energia elétrica por linhas de alta tensão. São problemas ligados à existência de arco durante faltas e problemas ligados à variação do valor da impedância equivalente do sistema de transmissão devido a oscilações de potência, sem contar os problemas comuns que envolvem uma linha de transmissão. Esses problemas acabaram sendo equacionados tendo em vista a facilidade de implementação permitida pelo relé estático, adotando-se certas características especiais, no plano X-R, que foram introduzidas no contexto da proteção estática, mais especificamente na proteção estática de distância.

Um exemplo típico ocorre com o relé de impedância *off-set* e o seu derivado, o relé de admitância. Através de implementações via dispositivos eletrônicos, denominado *timers*, conseguem-se características da linha não convencional permitindo se contornar os problemas referenciados anteriormente.

O *timer* trata-se de um dispositivo eletrônico cuja função nada mais é que retardar um determinado sinal relativamente ao instante de aplicação.

A figura 41 mostra a representação e o gráfico cartesiano no domínio do tempo das funções de entrada e de saída aplicadas sobre um determinado *timer*.

Imaginando um esquema típico, muito utilizado em relés estáticos de admitância por comparação de fase, tem-se, pela tabela 1 apresentada anteriormente:

$$S_1 = \dot{V} \quad (087)$$

$$S_2 = -\dot{V} + \dot{Z}_T i \quad (088)$$

Com $K = 1$

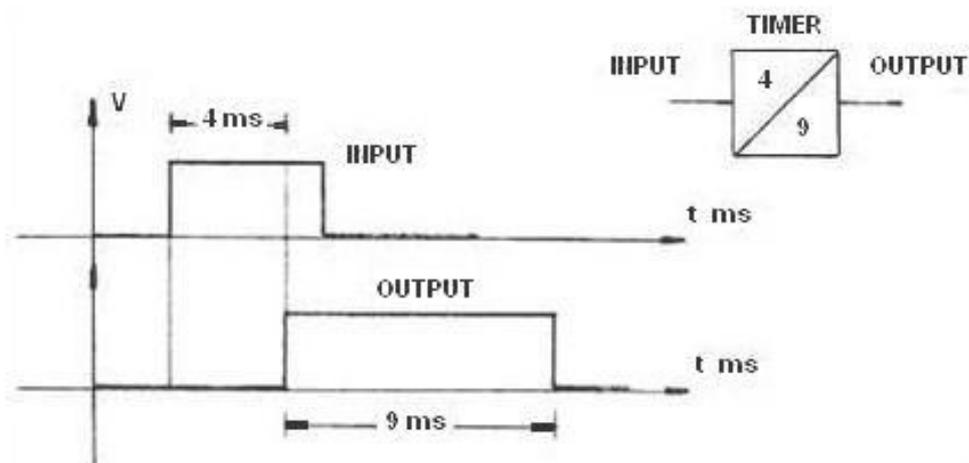


Figura 41 – Característica de entrada e saída do timer 4/9

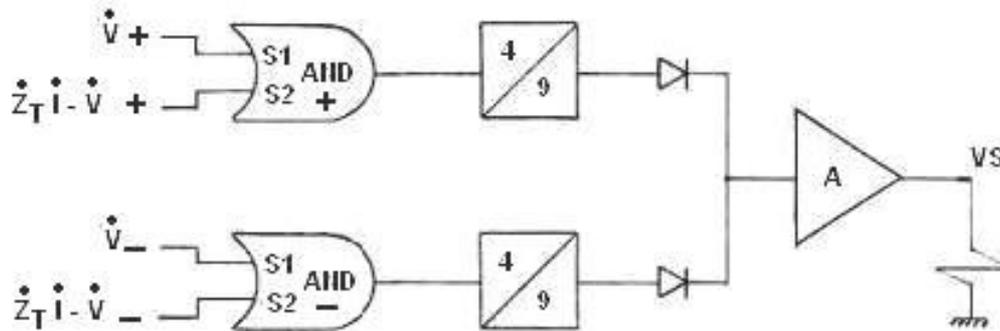


Figura 42 – Circuito eletrônico de comando de um relé estático de admitância

A característica do relé de admitância, no plano X-R, pode ser observada na figura 14 anterior e toda análise desenvolvida, acerca do mesmo, obtida no capítulo 5. Para o relé estático de admitância, cuja análise foi desenvolvida no item 7.4, a figura 28 (b) mostra a característica no plano X-R.

Considerando as equações (087) e (088) pode-se traçar, de modo mais completo, a característica no plano X-R do relé estático de admitância. Ver figura 43.

A figura 44 consiste na simples multiplicação dos valores de impedância pela corrente "I" gerando o plano IX-IR que em nada altera as análises precedentes. Observa-se, pelas figuras 44 e 45, que existe uma relação matemática muito importante que amarra os vetores $\dot{V}, \dot{Z}_T i$ e $(\dot{Z}_T i - \dot{V})$.

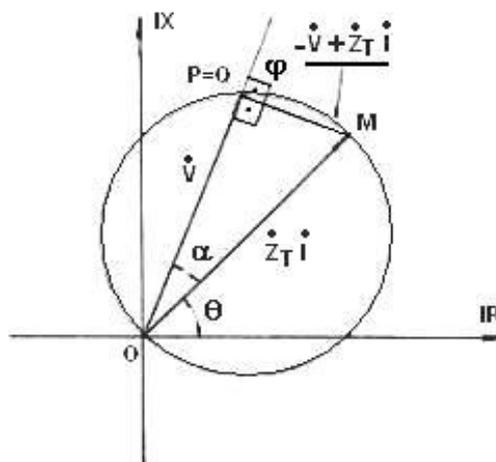


Figura 43 – Característica de admitância do relé estático no plano IX-IR

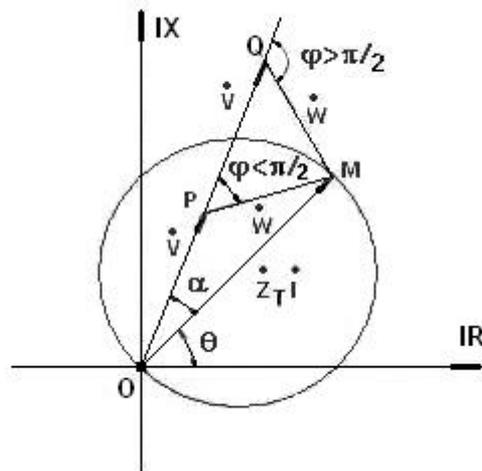


Figura 44 – Característica de admitância do relé estático no plano IX-IR

Na figura 43, a equação vetorial básica forma um triângulo retângulo OPM ou OQM o que, em outras palavras, garante uma característica convencional para o lugar geométrico do vetor "V" sendo que o ângulo " φ " vale sempre $\pi/2$ rad.

Na figura 44 existem duas situações que determinam a mudança do lugar geométrico traçado pelo vetor "V". Enquanto que para $\varphi = \pi/2$ rad o lugar geométrico convencional do vetor "V" é uma circunferência, para $\varphi < \pi/2$ rad o lugar geométrico descrito pelo vetor "V" terá uma característica "tipo tomate". Considerando um exemplo no qual são dados os vetores "V" e $(\dot{Z}_T i - \dot{V})$, aplicados ao circuito eletrônico da figura 43, para os valores " φ " iguais a $\pi/2, \pi/3$ e $2\pi/3$, respectivamente, obtêm-se os gráficos de resposta no tempo conforme as figuras 46, 49 e 50.

Para a realização da análise serão utilizados os seguintes valores para os timers correspondentes a frações de período da freqüência industrial, ver tabela 2.

Pelo tipo de lógica adotada, blocos "AND", apenas haverá saída para disparo do timer quando houver níveis altos coincidentes nas entradas "S₁" e "S₂" do circuito de comando da figura 42.

Supondo-se dois sinais harmônicos, como seguinte, onde " ω " é a freqüência em rad/s vem:

$$\varphi = \frac{\pi}{2} r$$

$$\dot{V} = V_d^a \text{sen } \omega t$$

$$\dot{Z}_T i - \dot{V} = |Z_T i - V| \text{sen}(\omega t - \varphi)$$

Tabela 2
Tabela de Ângulos versus Timers

Ângulo Elétrico [rad]	Timer [ms]
$\frac{\pi}{6}$	1,388
$\frac{\pi}{3}$	2,777
$\frac{\pi}{2}$	4,1666
$2\frac{\pi}{3}$	5,555
$0,48\pi \rightarrow (86,4^\circ)$ $1,08\pi \rightarrow (194,42^\circ)$	$\rightarrow 4,000$ $\rightarrow 9,000$

Para o controlador da figura 43, os seguintes sinais serão verificados

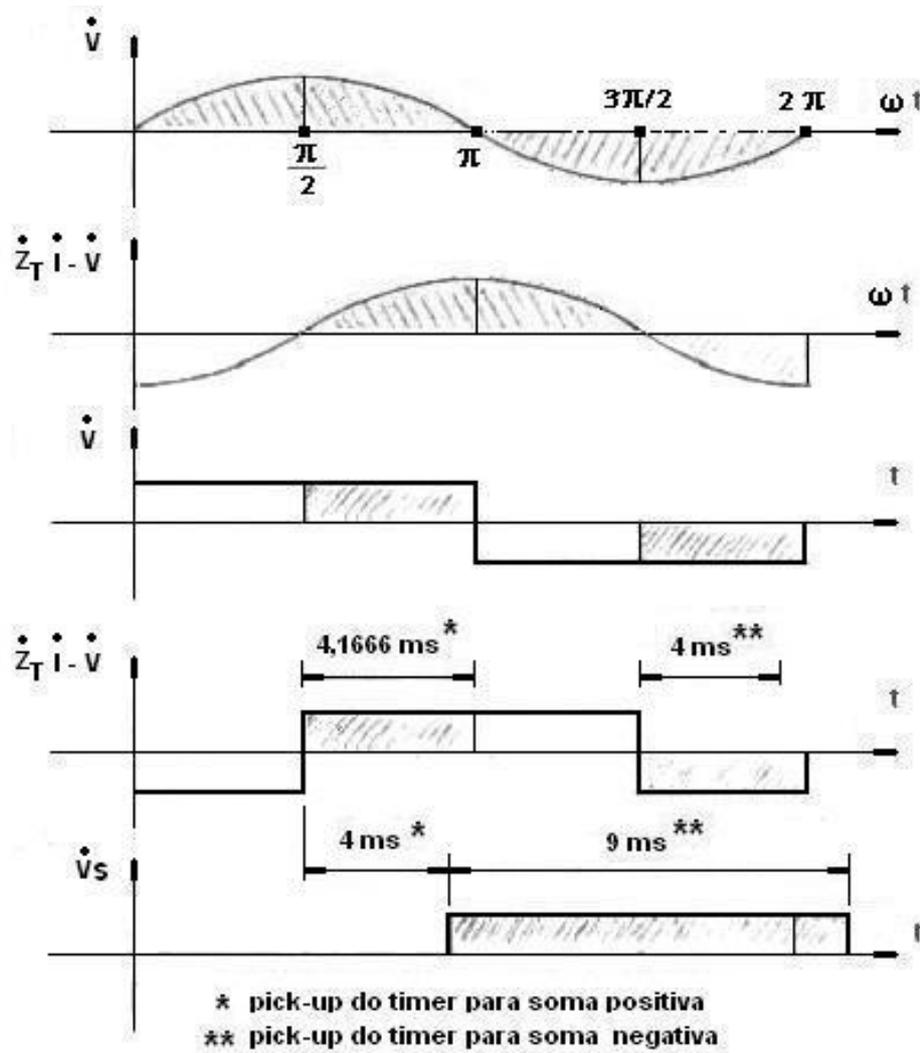
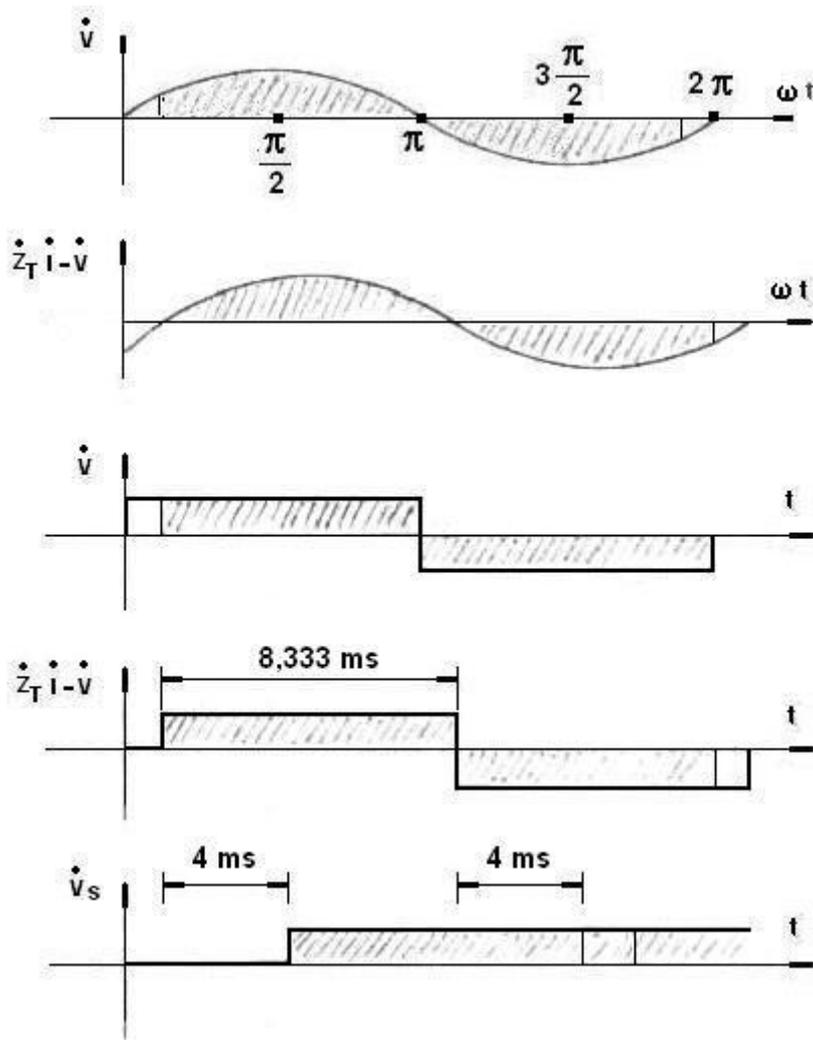


Figura 45 – Sinais de comando relativos ao controle via timer 4/9 ms/ms com $\varphi = \pi/2$

Pela figura 45 conclui-se que, relativamente a figura 44, para um sistema de controle via *timers*, sendo o timer de 4ms/9ms, supondo um ângulo $\varphi = \pi/2$ rad, haverá sempre valor “ V_s ” de saída diferente de zero. Caso o timer seja alterado para 4,1666 ms / 9 ms, ainda haverá valor de saída diferente de zero para a condição $\varphi = \pi/2$ rad.

Se $\varphi < \pi/2$ rad a seguinte figura representativa, para esta nova condição, será obtida:



**Figura 46 – Sinais de comando relativos ao controle via timer 4/9 ms/ms
com $\varphi < \frac{\pi}{2} r$**
a
d

Notar que para $\varphi < \frac{\pi}{2} r$ fica confirmada a saída com “V_s” sempre em nível alto.
a

Para as mesmas condições anteriores, porém com $\varphi > \frac{\pi}{2} r$, obtém-se a seguinte figura representativa:
a
d

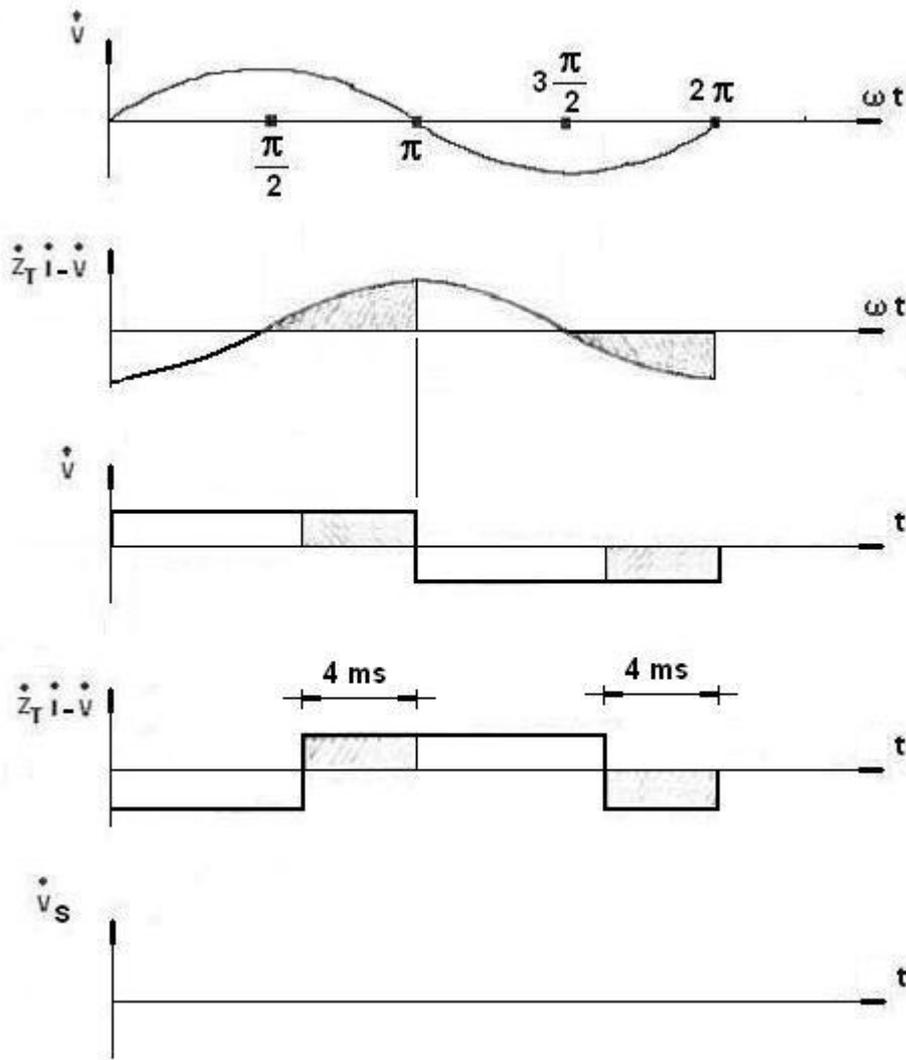


Figura 47 – Sinais de comando relativos ao controle via timer 4/9 ms/ms

com $\varphi > \frac{\pi}{2} r$
a
d

Existe uma condição especial para o dispositivo de controle da figura 42 que permite, pelos ajustes adotados, a obtenção de interessantes características no plano IX-IR.

Estes ajustes definem os limites operativos desejados e são os seguintes:

- Timer de 5,555 ms e limite operativo $\varphi = \frac{\pi}{3} r$;
 - Timer de 2,777 ms e limite operativo $\varphi = 2 \frac{\pi}{3} r$.
- a
d

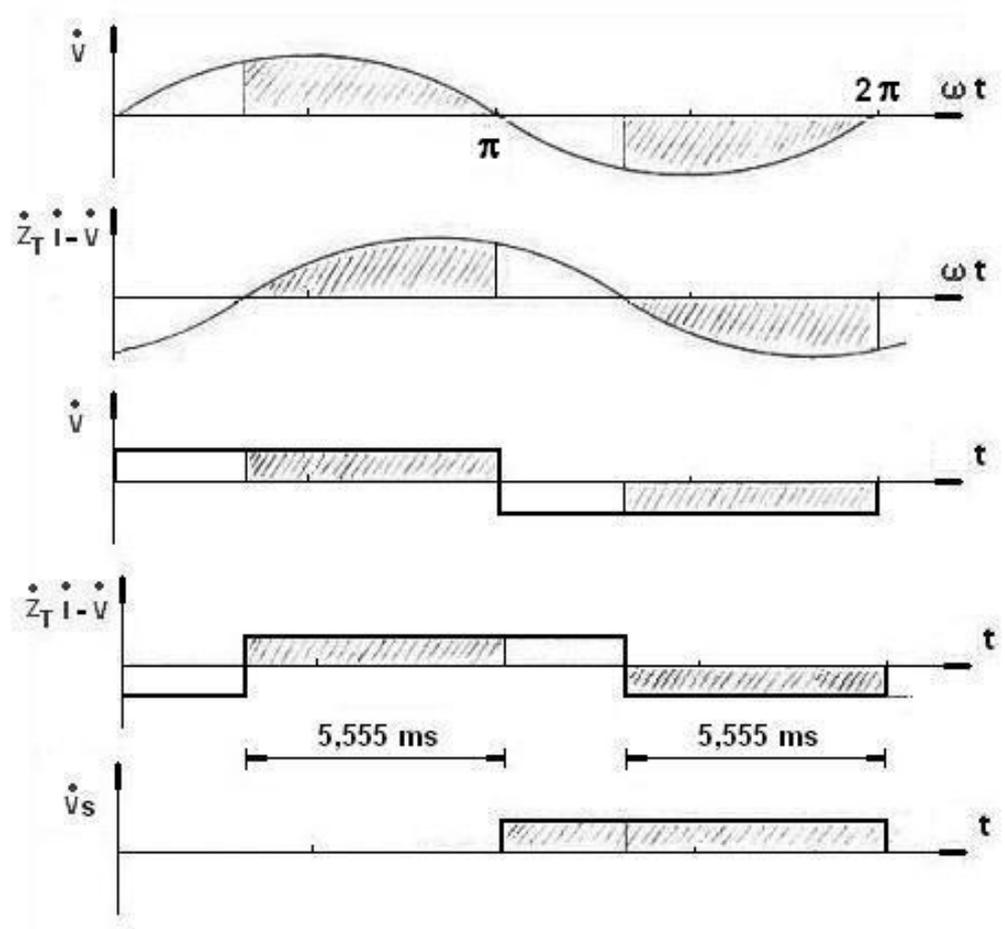


Figura 48 – Sinais de comando relativos ao controle via timer 5,555 ms e

$$\varphi = \frac{\pi}{3} \text{ rad}$$

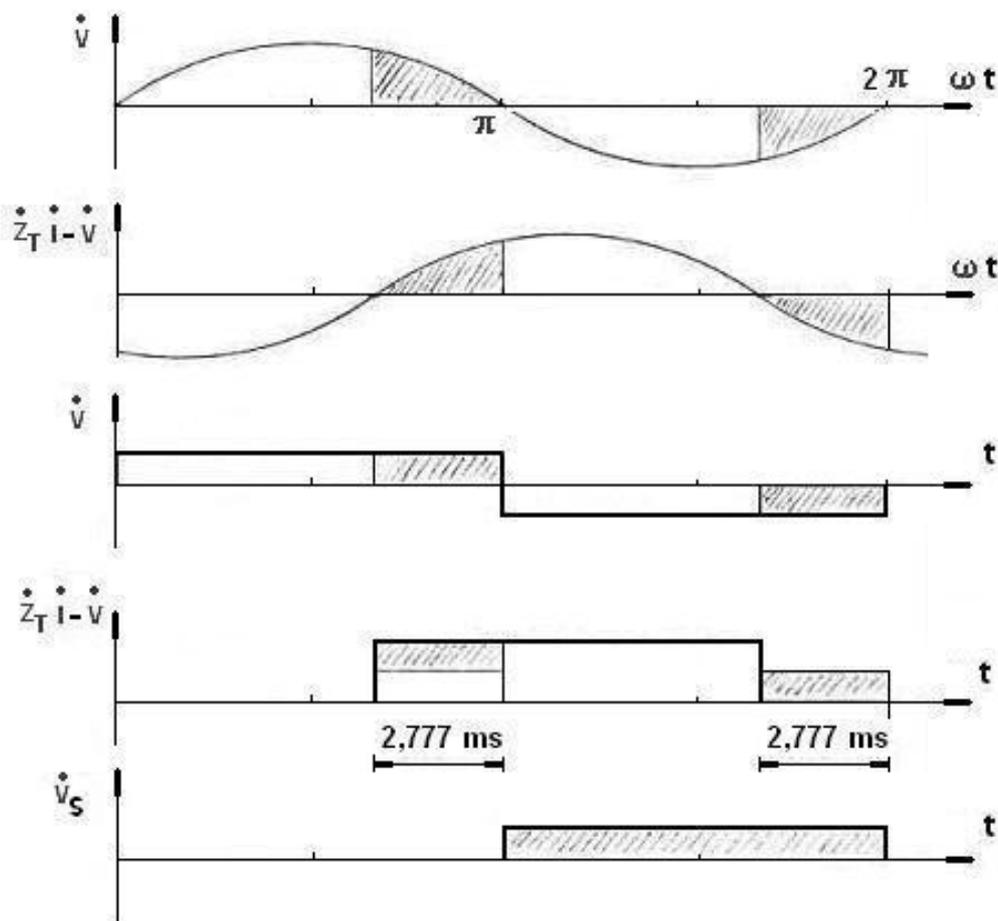


Figura 49 – Sinais de comando relativos ao controle via timer 2,777 ms e

$$\varphi = 2 \frac{\pi}{3} \text{ rad}$$

As figuras 48 e 49 mostram os limites operativos⁴ do dispositivo de comando via timer para 5,555 ms / $\varphi = \frac{\pi}{3} r$ e para 2,777 ms / $\varphi = 2 \frac{\pi}{3} r$.

Com base na figura 43, que traz a característica do relé estático de admitância no plano IX-IR, e com base no processo recursivo descrito aqui neste tópico confirma-se a exequibilidade da alteração da fase do vetor "W" segundo o desejado.

Em termos físicos a possibilidade ficou comprovada, porém, matematicamente, trabalhando-se com a característica do relé estático de admitância, tem-se o seguinte desenvolvimento com base na trigonometria.

⁴ Entender que a liberação de sinal em V_s , para o dispositivo de controle da figura 42, irá produzir um disparo ou um *TRIP* enquanto que zero significa não operação.

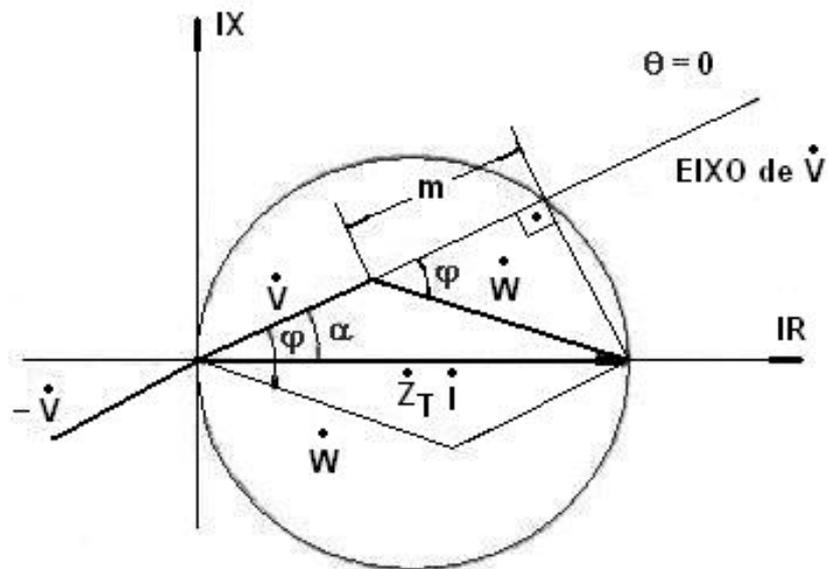


Figura 50 – Curva detalhada do relé estático de admitância no plano IX-IR

Equações básicas:

$$\dot{W} = \dot{Z}_T i + (-\dot{V}) \quad (089)$$

$$(Z_T I)^2 = V^2 + W^2 + 2 V W \cos \varphi \quad (090)$$

Mas, como $W \cos \varphi = m$.

Levando a expressão de "W" anterior na equação (090) obtém-se:

$$(Z_T I)^2 = V^2 + |(\dot{Z}_T i - \dot{V})|^2 + 2 V m \quad (091)$$

Mas

$$|(\dot{Z}_T i - \dot{V})|^2 = (Z_T I)^2 + (V)^2 + 2 (Z_T I) V \cos(\pi - \alpha)$$

Ou

$$|(\dot{Z}_T i - \dot{V})|^2 = (Z_T I)^2 + V^2 - 2 Z_T I V \cos \alpha$$

Levando-se a expressão anterior na equação 091 vem:

$$(Z_T I)^2 = V^2 + (Z_T I)^2 + V^2 - 2Z_T I V \cos \alpha + 2Vm$$

Com a simplificação tem-se:

$$0 = 2V^2 - 2Z_T I V \cos \alpha + 2Vm$$

Ou melhor,

$$0 = V - Z_T I \cos \alpha + m$$

Finalmente,

$$m = Z_T I \cos \alpha - V \quad (092)$$

Na figura 50 adotou-se a condição $\theta = 0$, ângulo de impedância do transactor, visando facilitar a análise.

A equação 092 representa o lugar geométrico gerado, a partir do estabelecimento de certas grandezas, do vetor "V" delimitando o campo modificado de atuação do relé de admitância.

O vetor alcance do relé de admitância normal, projetado sobre o eixo de "V", é subtraído do próprio vetor "V" dando origem à distância "m", ver Figura 51.

É evidente que para $\varphi = \pi/2 \text{ rad}$ tem-se $m = V$, o que gera a característica normal do relé de admitância.

Ao se alterar o valor do ângulo " φ " a característica original começa a se modificar.

Claramente se percebe que para $\varphi = \frac{\pi}{3} \text{ rad}$ acaba ocorrendo simetria com a

condição $\varphi = 2\frac{\pi}{3} \text{ rad}$. Usando a relação $m = W \cos \varphi$ da Figura 51 obtém-se:

- Para $\varphi = \frac{\pi}{3} \text{ rad}$, $m = +W/2$;
- Para $\varphi = 2\frac{\pi}{3} \text{ rad}$, $m = -W/2$.

A figura 51 mostra que, pela simetria, as duas condições podem ser obtidas sendo que as figuras 52 e 53 trazem as características: tipo "lenticular" e tipo "tomate", termos já consagrados na área de proteção.

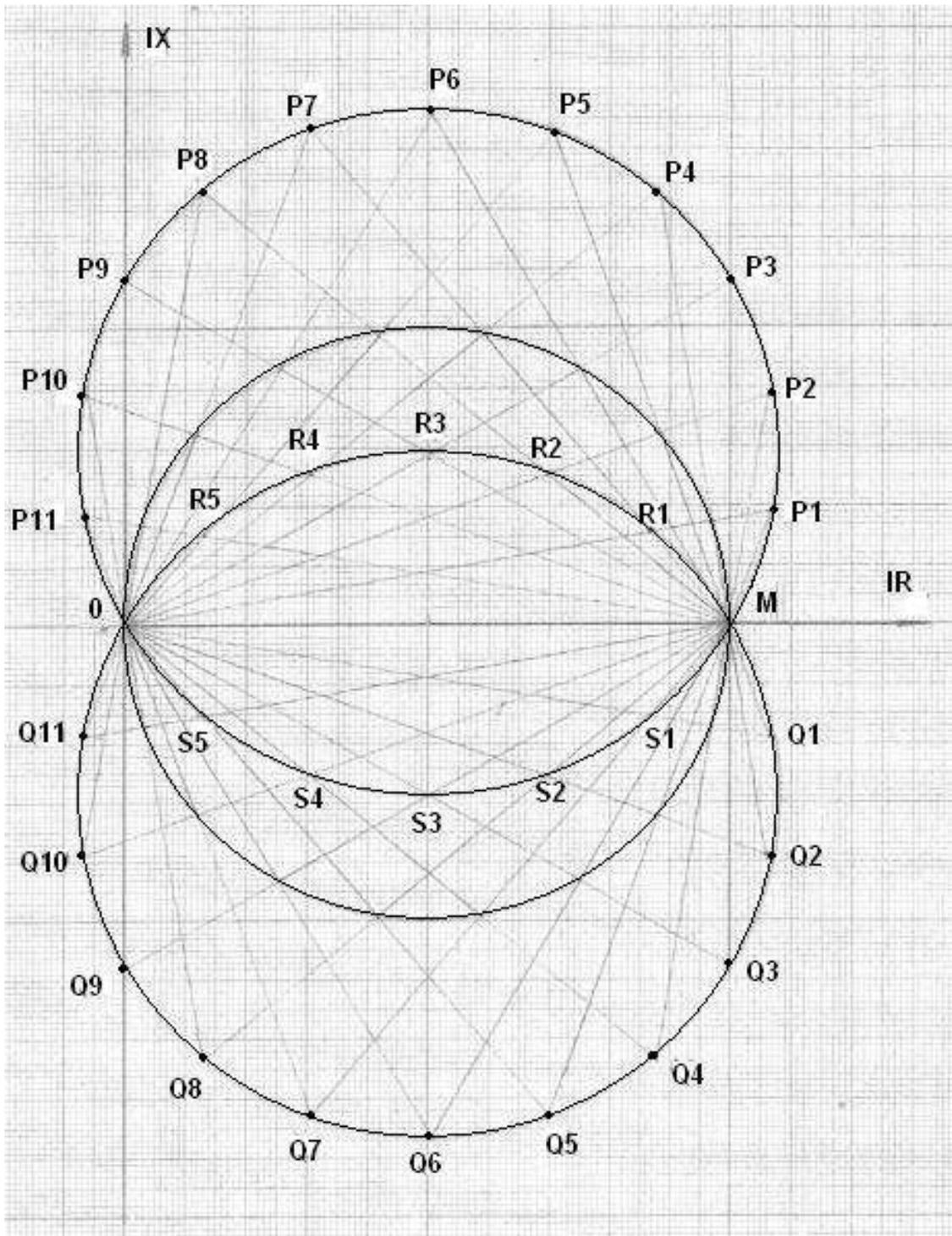


Figura 51 – Relé Estático, Característica MHO, Direcionalidade $\theta = 0^\circ$

Timer 5,555 ms / 9 ms e $\varphi = \frac{\pi}{3} r$

Timer 2,777 ms / 9 ms e $\varphi = 2 \frac{\pi}{3} d$

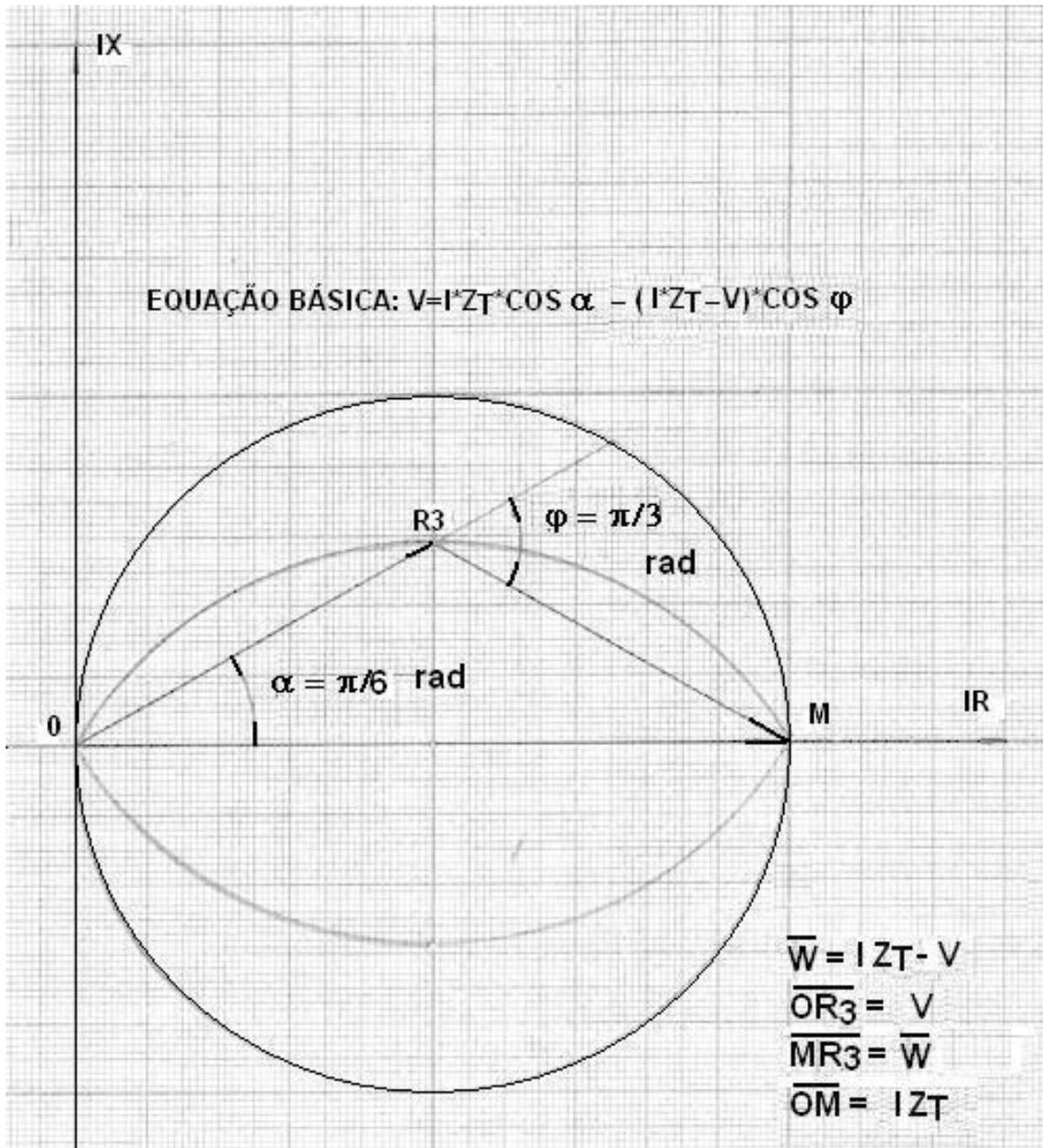


Figura 52 – Relé Estático, Característica MHO, Direcionalidade $\theta = 0^\circ$

Timer 5,555 e $\varphi = \frac{\pi}{3}$ rad

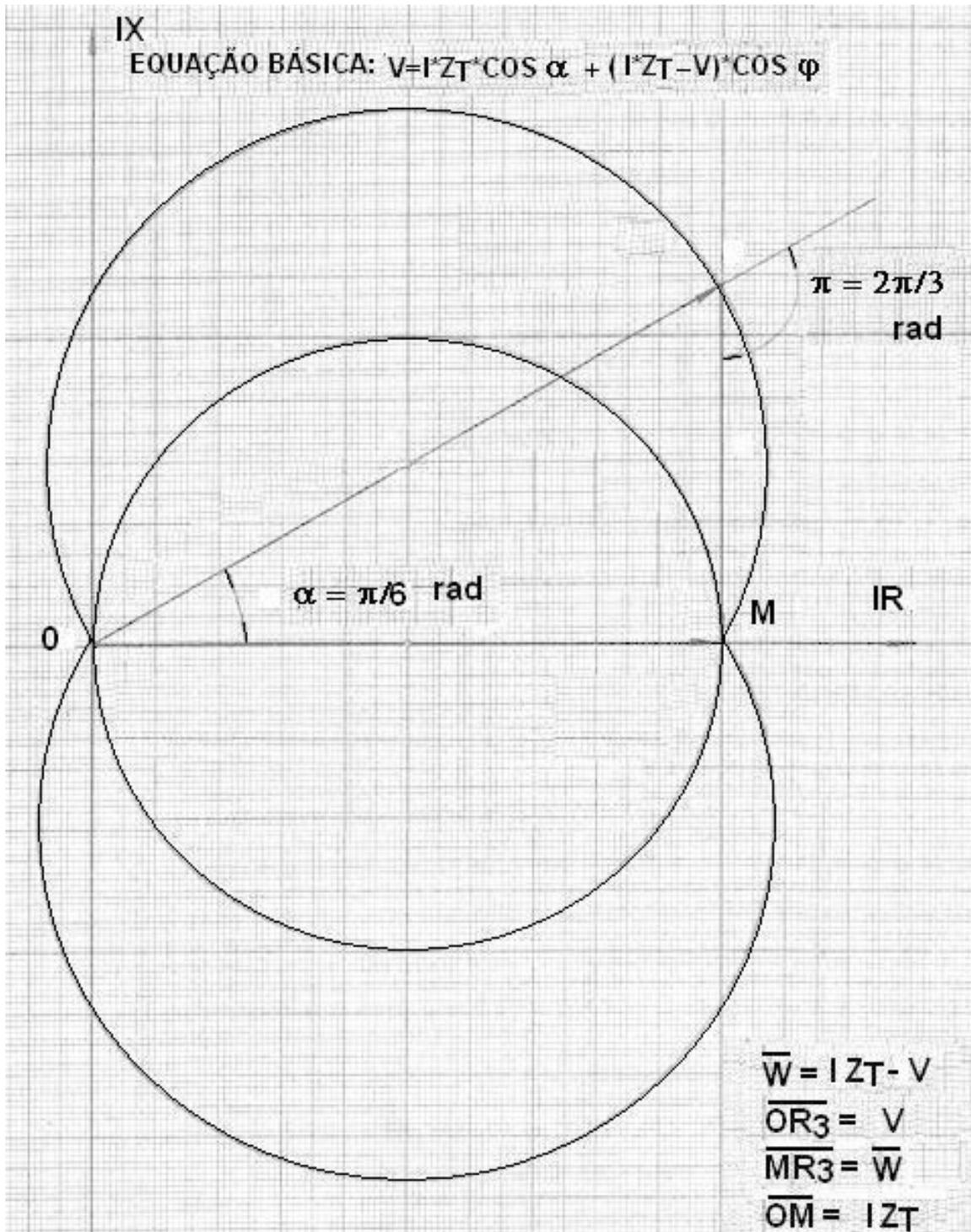


Figura 53 – Relé Estático, Característica MHO, Direcionalidade $\theta = 0^\circ$

Timer 2,777 e $\varphi = 2\frac{\pi}{3} \text{ rad}$

7.9. CARACTERÍSTICA QUADRILATERAL DE RELÉS DE PROTEÇÃO

7.9.1. INTRODUÇÃO

Como já foi mencionada antes, teoricamente, a característica ideal para um relé de distância será a característica conhecida como "quadrilateral", levando-se em conta o diagrama no plano complexo IX-IR.

A característica quadrilateral permite contornar o problema das operações indesejadas da proteção de distância, principalmente aquelas associadas aos efeitos de oscilação de potência do sistema elétrico.

Considerando-se esquemas com a utilização de relés eletromagnéticos convencionais, a obtenção de uma característica quadrilateral seria impraticável, pois demandaria a presença de quatro unidades de releamento de contatos em série cada uma representando uma reta correspondente a um lado do paralelogramo de modo a se formar a característica desejada.

Seria necessário um par com acoplamento de indução com dois dispositivos do tipo "blinder" ⁵ e uma unidade mho somente para a definição de uma reta o que implicaria em custos e operacionalidade.

Com a utilização das técnicas da eletrônica de componentes e da eletrônica digital, a implementação de um dispositivo dotado de um sistema de releamento, cuja característica seja do tipo quadrilateral, é muito mais fácil e perfeitamente exequível.

7.9.2. COMPARADOR GERAL

A utilização de sistemas dotados de multi-comparadores é bem melhor que aquela que se utiliza da combinação de dois comparadores, principalmente quando se deseja certo sincronismo entre os sinais de entrada aplicados.

Em um multi-comparador dispendo de quatro entradas é possível se obter importantes características aplicadas aos relés de proteção de distância.

A figura 54 seguinte mostra o esquema de um multi-comparador, com quatro entradas, muito utilizado na comparação de fase de relés de distância.

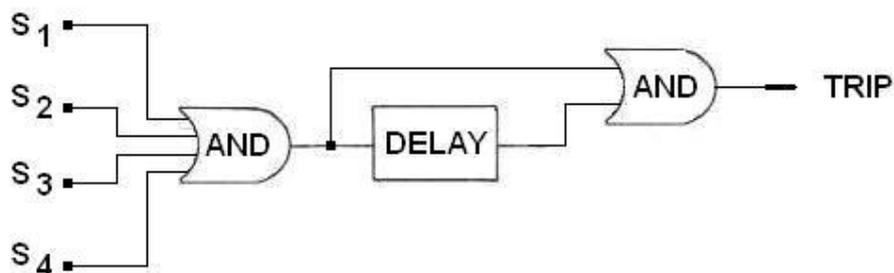


Figura 54 – Comparador de Fase de 4 Entradas

Na figura 54 considerar que S_{1,2,3,4} sejam os sinais de entradas.

⁵ Blinder, dispositivo auxiliar de releamento de distância cuja característica é do tipo angular de reatância, ver referência 10.

A combinação dos sinais de entrada tem de ser de tal ordem que se possa permitir a obtenção das condições desejáveis envolvidas na liberação do sinal de *TRIP*.

Considerando-se o tempo de DELAY ajustado, o sinal de *TRIP* ocorrerá se todas as equações relativas aos sinais de entrada, através da comparação, resultarem, simultaneamente, em uma combinação que satisfaça as condições pré-estabelecidas.

Têm-se os seguintes sinais de entrada na forma geral:

$$\dot{S}_1 = \dot{Z}_{T1} \dot{I}_L - k_1 e^{j\alpha_1} \dot{V}_L \quad (093)$$

$$\dot{S}_2 = \dot{Z}_{T2} \dot{I}_L \quad (094)$$

$$\dot{S}_3 = \dot{Z}_{T3} \dot{I}_L \quad (095)$$

$$\dot{S}_4 = k_4 e^{j\alpha_4} \dot{V}_L \quad (096)$$

Nas equações 093, 094, 095 e 096, devem-se considerar as seguintes variáveis:

\dot{V}_L, \dot{I}_L – respectivamente tensão e corrente sobre a carga;
 $\dot{Z}_{T1}, \dot{Z}_{T2}, \dot{Z}_{T3}$ – transactors envolvidos;
 k_1, k_4 – constantes;
 α_1, α_4 – argumentos de ajustes.

Considerando as seguintes representações para as equações 093, 094, 095 e 096, vem:

$$\dot{V}_L = |\dot{V}_L| e^{j\varphi} = V_L e^{j\varphi} \quad (097)$$

$$\dot{I}_L = |\dot{I}_L| e^{j\gamma} = I_L e^{j\gamma} \quad (098)$$

$$\dot{Z}_L = \frac{\dot{V}_L}{\dot{I}_L} = |\dot{Z}_L| = Z_L e^{j\varphi} \quad (099)$$

Para o caso em que se queira uma característica quadrilateral, tendo em vista o relé de distância, a seguinte escolha deverá ser obedecida:

$$\dot{Z}_{T2} = j X_T \quad (100)$$

$$\dot{Z}_{T3} = R_T \quad (101)$$

$$\dot{Z}_{T1} = R_T + j X_T = Z_T e^{j\theta} \quad (102)$$

O diagrama vetorial no plano complexo da equação 093 pode ser representado pelo diagrama mostrado na figura 55. Trata-se da conhecida característica de admitância da proteção de distância ou característica mho.

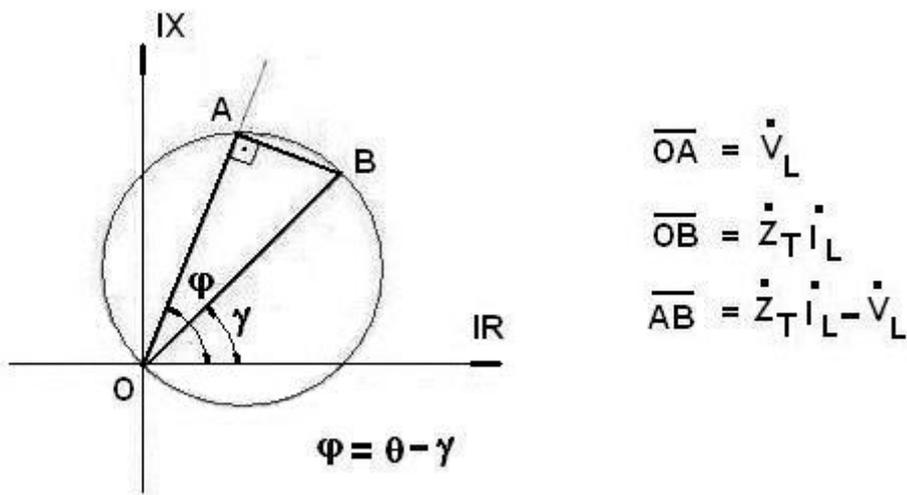


Figura 55 – Característica Mho no Plano Complexo

Considerando-se a característica mho ou característica do relé de admitância, conforme mostrado na figura 55, pode-se notar que esta se trata de uma circunferência cujo centro encontra-se fora da origem. Levando-se em conta que o comparador usado aqui se trata de um comparador de fase, a circunferência passa a representar o limite de comando de *TRIP* de um relé de admitância ou mho que apresenta a seguinte equação lógica dentro da matemática:

$$\dot{V}_L \text{ AND } (\dot{Z}_T \dot{I}_L - \dot{V}_L) \Rightarrow \text{TRUE} \quad (103)$$

Ângulo entre \dot{V}_L e $(\dot{Z}_T \dot{I}_L - \dot{V}_L) \leq 90^\circ \Rightarrow \text{TRIP}$

Ângulo entre \dot{V}_L e $(\dot{Z}_T \dot{I}_L - \dot{V}_L) > 90^\circ \Rightarrow \text{NO TRIP}$

Para obter a característica quadrilateral é necessário estabelecerem-se as condições para as quais o dispositivo comparador possa realizar as ações de medida e de *TRIP* considerando, no caso, os quatro sinais de entrada que deverão estar disponibilizados.

O principal sinal condicionante é aquele da equação 093 que representa a característica mho para o relé de distância. A equação 103, trata-se da forma lógica de operação da equação 093.

Nota-se que a equação 103 pode ser reescrita de maneira tal que a impedância seja decomposta na forma de um número complexo com as partes real e imaginária evidenciando, primeiro, uma indutância e, posteriormente, uma resistência.

Assim tem-se:

$$\dot{X}_T \dot{I}_L \text{ AND } (\dot{Z}_T \dot{I}_L - \dot{V}_L) \Rightarrow \text{TRUE} \quad (104)$$

e

$$\dot{R}_T \dot{I}_L \text{ AND } (\dot{Z}_T \dot{I}_L - \dot{V}_L) \Rightarrow \text{TRUE} \quad (105)$$

Ou melhor, ainda:

$$\text{INTERSEÇÃO } \dot{X}_T \dot{I}_L \text{ AND } (\dot{Z}_T \dot{I}_L - \dot{V}_L) \Rightarrow \text{TRUE} \quad (106)$$

e

$$\text{INTERSEÇÃO } \dot{R}_T \dot{I}_L \text{ AND } (\dot{Z}_T \dot{I}_L - \dot{V}_L) \Rightarrow \text{TRUE} \quad (107)$$

Considerando a equação 106 versus a circunferência que representa a característica do relé mho, da figura 56 seguinte, é possível obter uma área de interseção entre o círculo e a zona indicada de atuação da unidade de reatância localizada abaixo da linha tracejada, no sentido negativo do eixo das ordenadas, linha CB. A operação lógica de interseção é representada pela condição lógica AND.

Do mesmo modo, seria possível uma nova delimitação se a interseção agora for entre o círculo e a zona indicada de atuação da unidade de resistência localizada à esquerda da linha tracejada, no sentido negativo do eixo das abscissas, linha BD na figura 56.

Na figura 57, encontra-se "hachurada" a área delimitada de atuação da proteção de distância considerando-se as três condições anteriores ditas pelas equações 103, 106 e 107.

Agora, tomando-se as equações 104 e 105 e trabalhando com \dot{V}_L ao invés de $\dot{Z}_T \dot{I}_L - \dot{V}_L$, dentro do comparador, estas equações adquirem o seguinte aspecto:

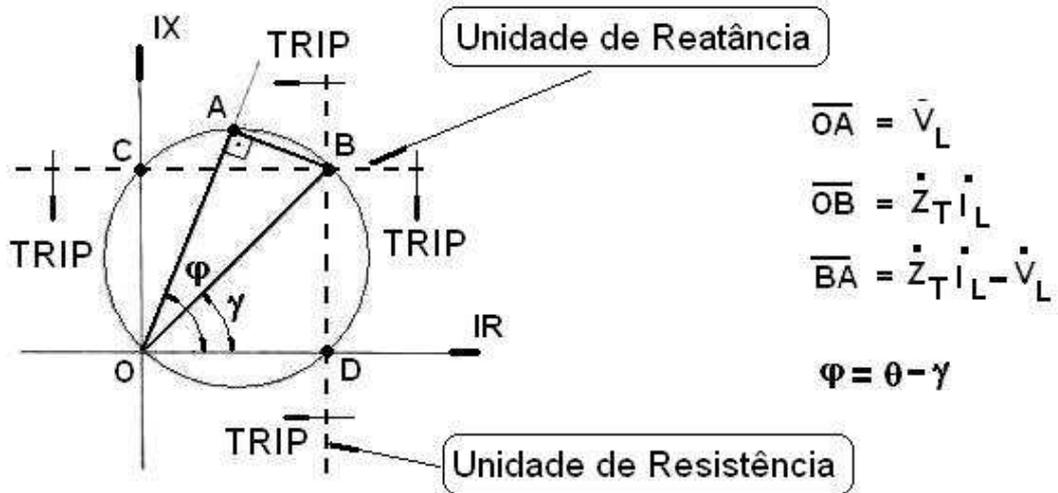


Figura 56 – Área Delimitada pelas Unidades de Admitância, de Reatância e de Resistência

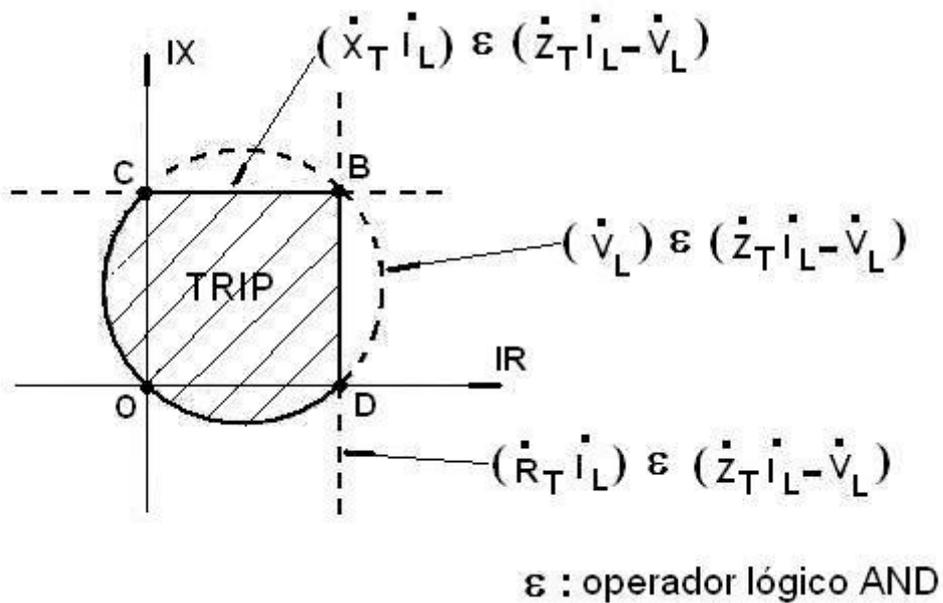


Figura 57 – Área de TRIP Delimitada pelas Unidades de Admitância, de Reatância e de Resistência

$$\dot{X}_L \dot{I}_L \text{ AND } \dot{V}_L \Rightarrow \text{TRUE} \quad (108)$$

e

$$\dot{R}_L \dot{I}_L \text{ AND } \dot{V}_L \Rightarrow \text{TRUE} \quad (109)$$

As equações 108 e 109, trata-se de casos particulares das equações 104 e 105 e no diagrama vetorial da figura 57 elas representam os novos limites de *TRIP* para o sistema de proteção de distância. A equação 108 acaba se resumindo no eixo das abscissas enquanto que a equação 109 acaba por se resumir no eixo das ordenadas. Na figura 58 encontram-se representadas as curvas de atuação das unidades geradas pelas equações 108 e 109.

É oportuno repetir que a equação 108, bem como a equação 104, apresenta a característica de uma unidade de reatância, enquanto que as equações 109 e 105, do mesmo modo, apresentam a característica de uma unidade de resistência.

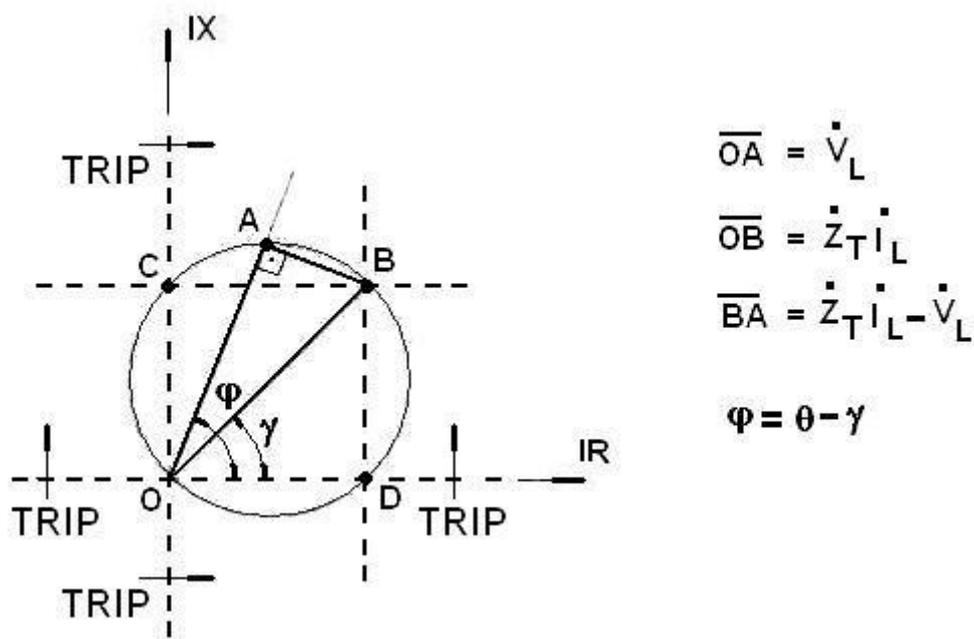


Figura 58 – Área Delimitada pelas Unidades de Admitância, de Reatância e de Resistência para uma Condição Particular

A figura 59 mostra os limites de atuação definidos pelos quatro sinais e as suas respectivas características quando sujeitas as operações lógicas, por consideração da comparação de fase dos sinais envolvidos.

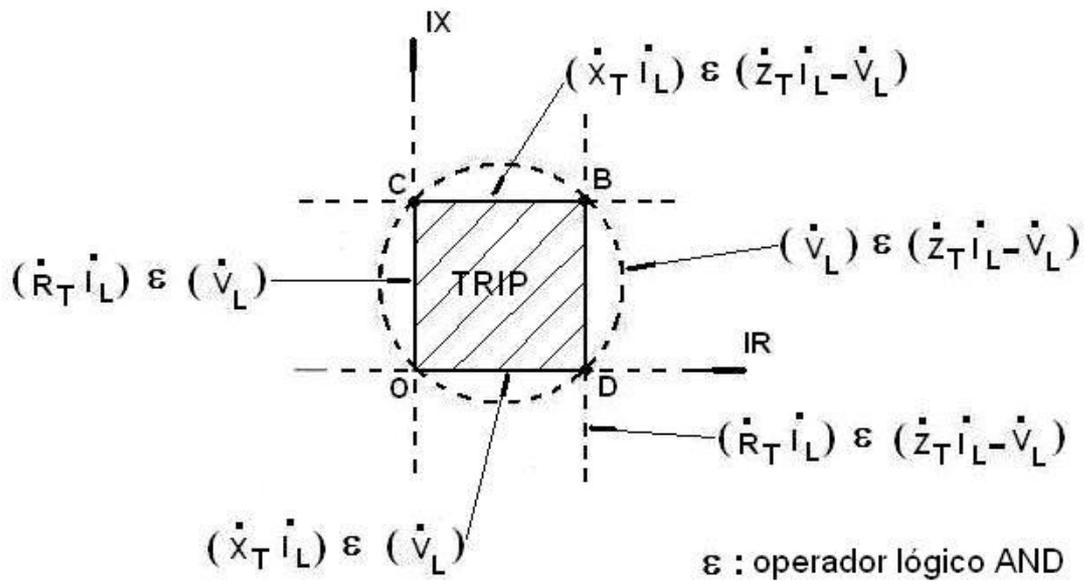


Figura 59 – Área de TRIP Delimitada pelas 4 Unidades Geradas

A figura 60 mostra a composição total dos sinais promovida pelo comparador definindo a região de TRIP obtida pela aplicação do sistema quadrilateral de sinais à proteção de distância.

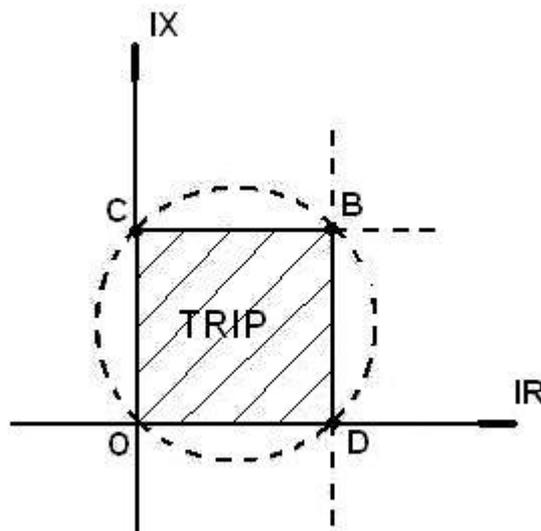


Figura 60 – Diagrama Vetorial de Operação de um Sistema de Proteção de Distância do tipo Quadrilateral

8. REQUISITOS IMPORTANTES VÁLIDOS PARA A PROTEÇÃO ESTÁTICA DE DISTÂNCIA

8.1. VALOR MÍNIMO OPERATIVO

É evidente que uma das vantagens na utilização da proteção estática, a base de componentes de CI, se deve às baixas constantes de tempo envolvidas graças à eliminação de partes móveis como mancais e outras restrições mecânicas.

A condição básica mínima a ser obedecida pode ser expressa pela relação seguinte:

$$|I_{MIN}| \geq I_{P+} |I| \quad (093)$$

Onde

I_{MIN} – mínimo valor de corrente de operação do relé;

I_P – corrente de pick-up do relé;

I – corrente de restrição.

8.2. EXATIDÃO OPERATIVA

Teoricamente a exatidão operativa de um relé estático deverá independer do valor da impedância de surto verificada numa ocorrência de atuação.

Na pratica esta condição não ocorre sendo que faixas limite são fornecidas pelos fabricantes de modo a estipularem-se os limites máximos operativos.

As relações obedecidas são as seguintes:

$$X = \frac{Z}{Z_T} \quad (094)$$

$$Y = \frac{Z_S}{Z_T} \quad (095)$$

Onde

Z – impedância atual vista pelo relé;

Z_T – impedância do transactor;

Z_S – impedância de surto.

A curva tensão-corrente relativa à impedância do transactor deverá apresentar o seguinte gráfico:

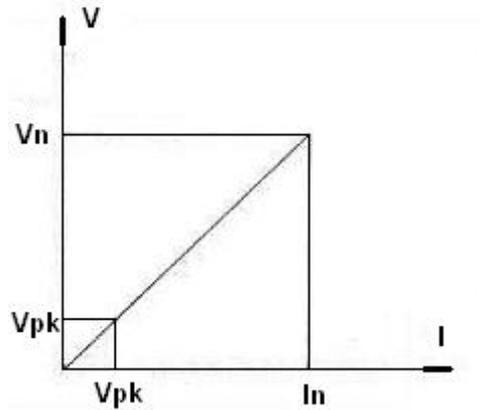


Figura 61 – Gráfico ideal para um relé estático tensão-corrente

Na figura 61 considerar:

- V_N – tensão normal do sistema medido;
- I_N – corrente circulante no relé via transactor;
- V_{PK} – tensão de pick-up do relé;
- I_{PK} – corrente relativa à tensão de pick-up.

As equações 094 e 095 podem, também, ser escritas do seguinte modo:

$$X = \frac{V}{Z_T I} \quad (096)$$

$$Y = \frac{V_N - V_{PK}}{Z_T I} \quad (097)$$

Se forem traçadas as curvas ideal e real $x = f(y)$ o seguinte gráfico será obtido:

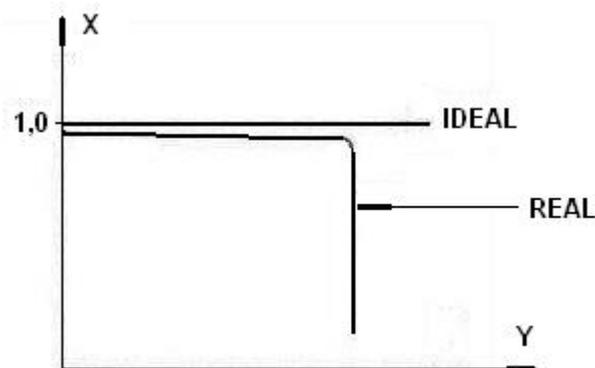


Figura 62 – Gráfico da exatidão operativa do relé estático ideal e real

Pela figura 62 pode-se perceber que a condição "boa operativa", segundo critérios pré-estabelecidos, deverá ser fornecida pelos fabricantes e escolhida segundo um julgamento de engenharia quanto à capacidade exigida por um relé.

A necessidade, de maneira genérica, de se ter um valor elevado para o limite "y", aproximadamente $y = 50$, acaba relacionando o carregamento do sistema físico do relé.

O limite "y" também poderá ser dado em função da carga exigida pelo relé durante a operação, " w_0 ", e da carga exigida para monitoramento e medição via transactor, " w_M ".

Em termos de carga durante a operação do relé tem-se:

$$w_0 = R I_{PK}^2 \quad (098)$$

Onde

R – resistência equivalente.

Já em termos de carga de medição, considerando-se a condição nominal, tem-se:

$$w_M = \frac{V_N^2}{Z_T} \cos \theta \quad (099)$$

Onde

$$\dot{Z}_T = Z_T e^{j\theta}$$

Assim, tem-se que:

$$I_{PK} = \sqrt{\frac{w_0}{R}} \quad (100)$$

E

$$V_N = \sqrt{\frac{w_M \cdot Z_T}{\cos \theta}} \quad (101)$$

Levando-se as expressões de " I_{PK} " e " V_N ", das equações 100 e 101, na equação de "y", equação 97 considerando-se $V_N \gg V_{PK}$, vem:

$$y = K \sqrt{\frac{W_M}{W_0}} \quad (102)$$

Onde

$$K = \sqrt{\frac{R}{Z_T \cos \theta}}$$

Nos relés eletromagnéticos a relação de potências "y" é menor que aquela verificada nos relés estáticos de distância.

9. OBSERVAÇÕES FINAIS

Durante a descrição deste trabalho foram feitas certas observações que muitas vezes se originaram de processos de estatística levantados por quem já tem a devida experiência no ramo. Tais experiências e observações quase sempre foram obtidas por intermédio de trabalhos de pesquisa realizados sobre os documentos listados nas referências deste informe.

9.1. RESISTÊNCIA DE ARCO OU DE FALTA

As faltas verificadas numa linha de transmissão podem ser francas, quando a resistência de falta é nula, ou com resistência de falta que pode ser gerada por intermédio da presença de arco voltaico.

Nas faltas trifásicas equilibradas a terra, bem como nas faltas fase-fase-terra e fase-terra, além da possível presença de uma resistência de arco, ainda poderá aparecer uma resistência devido a aterramento de neutros.

Em linhas curtas o efeito da resistência de arco é bastante considerável relativamente ao mesmo efeito quando se consideram linhas médias e longas (acima 130 km). Por esse motivo é que existe uma certa preferência por utilizar, em linhas curtas, a proteção de distância feita via relé de reatância, que não sofre o efeito da alteração da resistência de falta; enquanto que nas linhas longas a preferência recai na utilização do relé de impedância off-set e do relé de admitância apesar destes sofrerem o efeito da resistência de arco.

A utilização de características especiais para os relés de distância tipo impedância off-set, ou mesmo admitância, garante uma boa acomodação de resistência de arco ou de falta.

9.2. OSCILAÇÕES DE ORIGEM SISTÊMICA

Um outro fator restritivo existente nos sistemas elétricos de potência são as oscilações eletrodinâmicas que provocam alterações transitórias no valor da impedância assim como foi demonstrado no capítulo 4.

Um provável *TRIP* falso poderia facilmente ser entendido como verdadeiro.

Analisando o sistema elétrico percebe-se que, associando grandes linhas de transmissão a grandes blocos de potência, cujos modos de oscilação ocorrem

em baixas frequências (períodos de ordem de 0,5 a 10 s), os impactos são maiores tanto em quantidade quanto em magnitude se forem comparados com aqueles impactos inerentes a linhas curtas cujos modos de oscilação ocorrem em frequência natural mais elevada e em quantidade e magnitude bem reduzida.

Por isso, quando se utiliza o relé tipo reatância em linhas curtas, o problema da oscilação sistêmica pouca interferência tem, fato que não pode ser desprezado nas linhas longas. Neste caso, são utilizados os relés tipo impedância com duas zonas de proteção sendo uma delas unicamente dedicada ao problema.

9.3. PROBLEMA DE CARREGAMENTO MÁXIMO

A grande aplicação da característica lenticular vem ligada ao fato de muitas vezes ocorrer atuação do relé de distância, de maneira indesejável, para um carregamento máximo principalmente em linhas longas. Com o ajuste da direcionalidade da característica lenticular o problema acaba sendo contornado.

9.4. CRITÉRIOS DE PROTEÇÃO RELATIVOS ÀS PROTEÇÕES DE FASE E TERRA

Os tipos mais freqüentes de falta em linhas de transmissão são aqueles associados às faltas fase-fase e fase-terra.

Em termos de magnitude da corrente, as faltas trifásicas a terra e falta fase-terra são aquelas cujos valores são os mais elevados.

Portanto, é prudente, no estabelecimento da proteção, ajustar a operação para a magnitude de corrente de seqüência positiva da falta fase-fase e definir uma proteção de sobrecorrente para as faltas do tipo fase-terra.

REFERÊNCIAS

1. A. E. BARROS

Relés Estáticos – Artigo da General Elétrica do Brasil

2. A. C. CAMINHA / ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ – EFEI

Introdução a Proteção dos Sistemas Elétricos
Editora Edgar Blücher Ltda. – São Paulo – SP – 1981

3. CEMIG – MN/EG2

Conjunto de Proteção Estática para LT – Fabricação GECO
Tipos SLYP e SLCN – Instrução n.º 02-111-MN/EG2-033/7B

4. T. S. MADHAVA RAO / UNIVERSIDADE DE ROORKEE (INDIA)

Power System Protection – Static Relays
McGraw – Hill Book Company – New Delhi – India – 1982

5. CEMIG – MN

Instruções de Teleproteção n.º 02-112-MN-008
Superintendência de Manutenção do Sistema – MN – Junho 85

6. A. R. VAN C. WARRINGTON

Application of the OHM and MHO Principles to Protective Relays
AIEE Transactions – Vol. 65 – Pages 378-386 – June 1946

7. W. K. SONNEMAN – H. W. LENSNER

Compensator Distance Relaying
AIEE Transactions Part III – Vol. 77 – Pages 372-382 – June 1958

8. R. C. CHEEK – J. L. BLACKBURN

Considerations in Selecting a Carrier Relaying System
AIEE Transactions – Part III – PAS Vol. PAS-71 – Pages 10-15 – Jan 1952

9. E. L. HARDER – W. E. MARTER

Principles and Practices of Relaying in the United States
AIEE Transactions – Vol. 77 – Pages 1005-1022 – June 1948

10. C. RUSSELL MASON

The Art and Science of Protective Relaying
John Wiley & Sons, Inc, New York, USA, 1956

LUIZ RENATO GOMES
Manuscrito em Jan 1991
Editado em Set 2006
Registrado na LRG-ME em 22/02/2012