Curto circuito nos pontos "a" e "d";

Quando um curto ocorre nos pontos acima a reatância total entre o trecho A-B permanece indutiva porque o valor de Xc é menor do que a reatância da linha. Portanto as tensões nas barras A e B bem como as correntes nos relés 1,2,3,4 e 5 terão as mesmas direções e magnitudes relativas como se a rede não contivesse Capacitores Série. (Figura 3.1.2.2.a).

Curto no ponto "b";

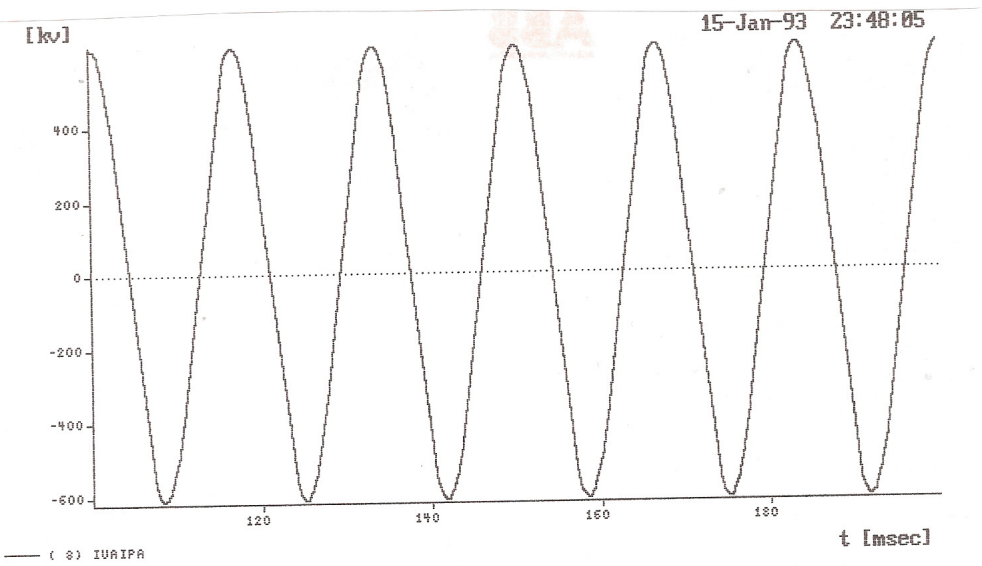
Para o curto no ponto "b" a contribuição de barra A através de I é indutiva enquanto que de II tem uma pequena componente reativa capacitiva, porque a reatância do curto vista através da barra B é capacitiva. Portanto pode-se notar que os respectivos diagramas vetoriais sofrerão uma rotação de 180° enquanto a corrente de curto para o relé 2 será capacitiva (Figura 3.1.2.2.b).

Para o curto no ponto C a reatância total da rede bem como as correntes de defeito são capacitivas, e a corrente total é dividida entre as linhas I e II de forma que a correntes para os relés 1 e 4 é indutiva, e para os relés 2 e 3 capacitiva (Figura 3.1.2.2.c).

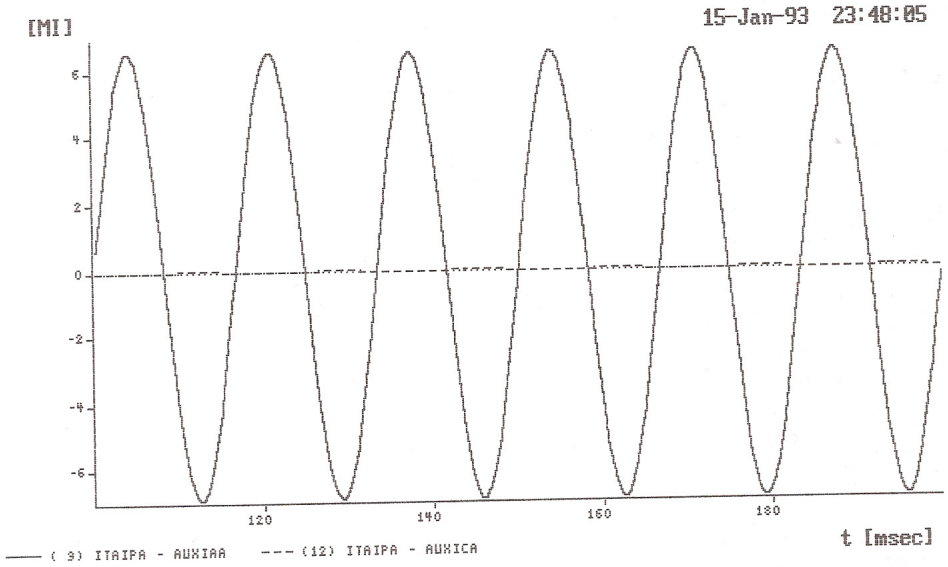
Pode-se portanto notar a dificuldade de se medir corretamente as grandezas de tensão e corrente para as diversas condições operativas descritas. Com relação as proteções que trabalham no diagrama de impedâncias (R-X) verifica-se a dificuldade de se calcular os ajustes pois as mesmas têm que operar para condições em que os Bancos de capacitores estão inseridos ou não no sistema através da

atuação dos seus respectivos SPARK-GAP's.

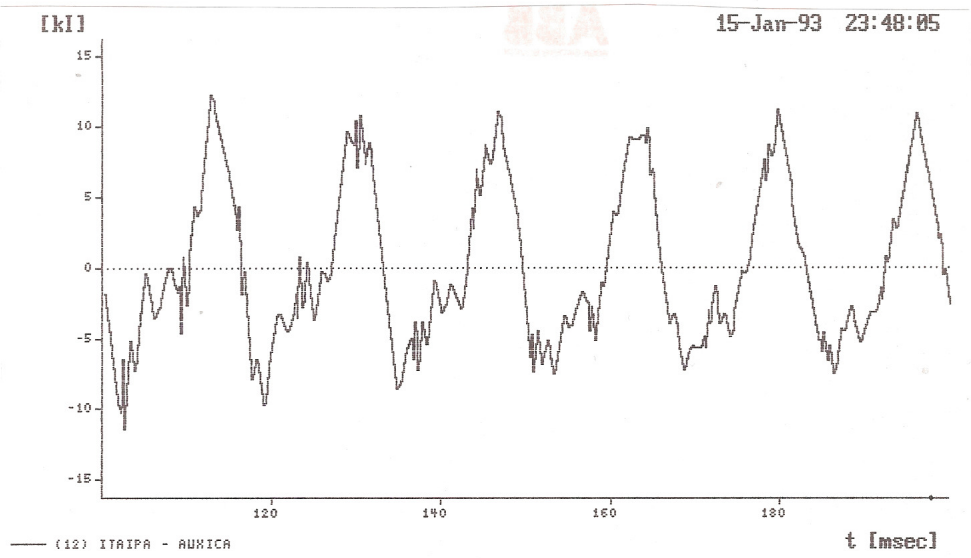
As condições operativas mostradas no diagrama vetorial da figura 3.1.2.2 bem como os diferentes tipo de localização do defeito indicados na Figura 3.1.2.1, podem ser visualizadas nas simulações dos gráficos a seguir. Foram utilizados para tanto o circuito duplo do Sistema Itaipu em 765 KV (Figura 2.2.5.2), bem como os valores dos parâmetros, das fontes e demais condições do circuito.



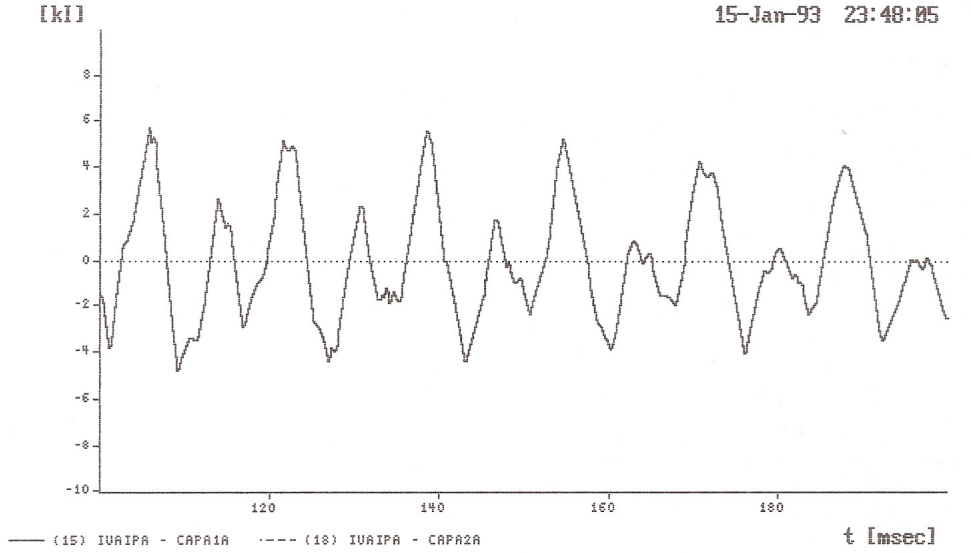
CURTO CIRCUITO TRIFASICO NO PONTO "A".
TENSAO NA BARRA DE IVAIPORA(REFERENCIA FIGURA 3.1.2.1)
DIAGRAMA VETORIAL DA FIGURA 3.1.2.2/a



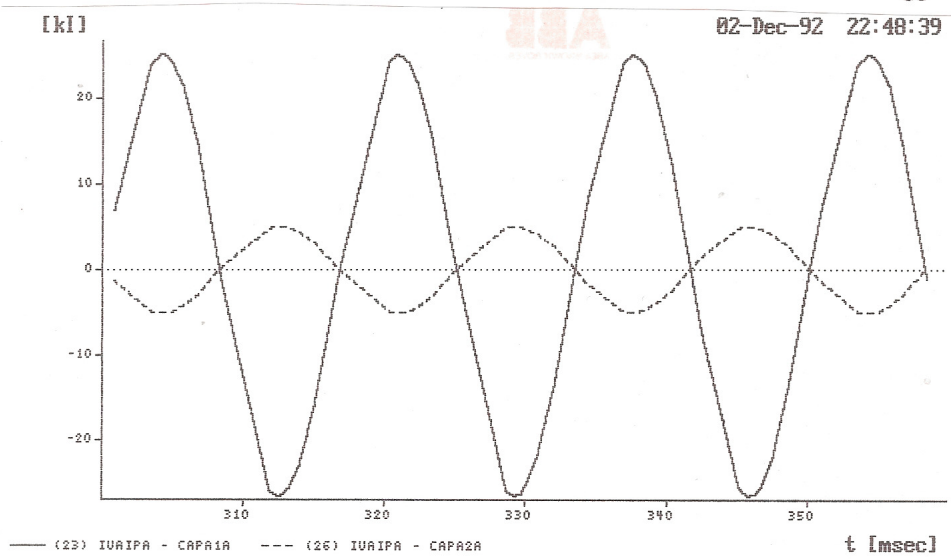
CURTO CICUITO TRIFASICO NO PONTO "A".
CORRENTE Ir1(9)(REFERENCIA FIGURA 3.1.2.1)
DIAGRAMA VETORIAL DA FIGURA 3.1.2.2/a



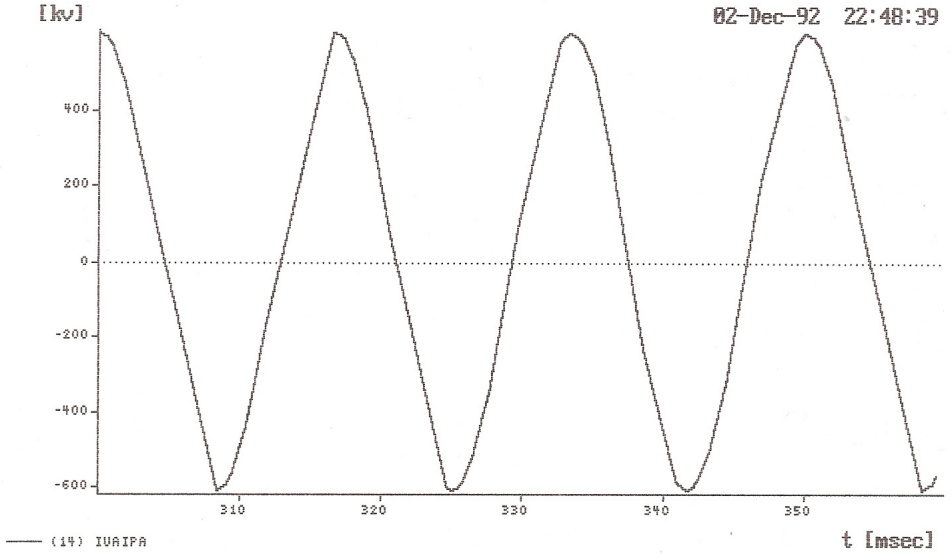
CURTO CIRCUITO TRIFASICO NO PONTO "A".
CORRENTE Ir3(12)(REFERENCIA FIGURA 3.1.2.1)
DIAGRAMA VETORIAL DA FIGURA 3.1.2.2/a.



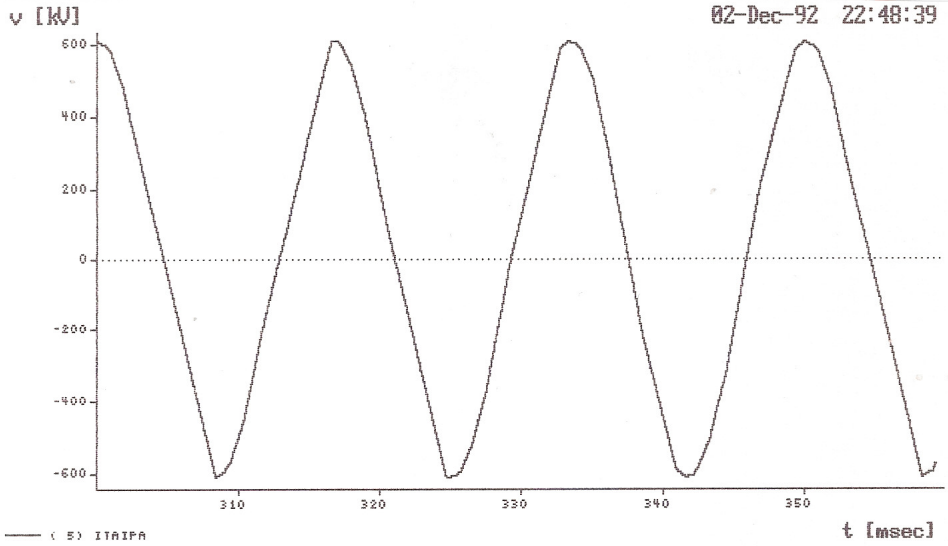
CURTO CICUITO TRIFASICO NO PONTO "A".
CORRENTES Ir2(15) E Ir4(18)(REFERENCIA FIGURA 3.1.2.1)
DIAGRAMA VETORIAL DA FIGURA 3.1.2.2/a.



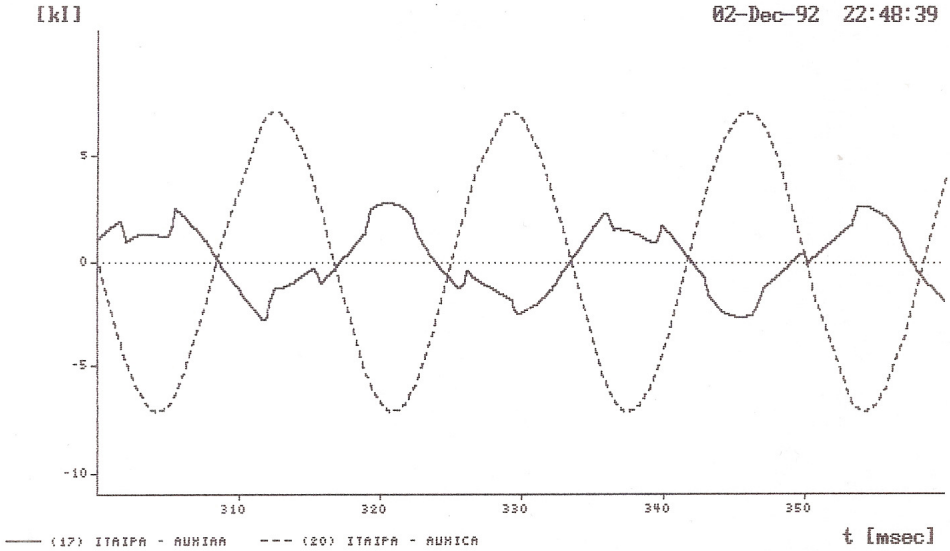
CURTO TRIFASICO NO PONTO "C"(FASE-A)
CORRENTES Ir2(23) E Ir4(26)(REFERENCIA FIGURA 3.1.2.1)
DIAGRAMA VETORIAL DA FIGURA 3.1.2.2/c



TENSAO NA BARRA DE IVAIPORA(FASE-A)
CURTO TRIFASICO NO PONTO "C"(REFERENCIA FIGURA 3.1.2.1)
DIAGRAMA VETORIAL DA FIGURA 3.1.2.2/c



TENSAO NA BARRA DE ITAIPU(FASE-A)
CURTO TRIFASICO NO PONTO "C"(REFERENCIA FIGURA 3.1.2.1)
DIAGRAMA VETORIAL DA FIGURA 3.1.2.2/c



CURTO TRIFASICO NO PONTO "C"(FASE-A)
CORRENTES Ir1(17) E Ir3(20)(REFERENCIA FIGURA 3.1.2.1)
DIAGRAMA VETORIAL DA FIGURA 3.1.2.2

3.1.3 - Frequências Naturais e Sub-síncronas.

A Compensação Série da rede pode afetar as proteções de distância nas seguintes formas alistadas abaixo:

- determinação da direção do defeito, através da reversão de corrente e ou de tensão.

- correntes sub-síncronas ou de baixa frequência que podem gerar sub-alcance ou sobre-alcance dependendo da localização do defeito e dos parâmetros do sistema.

Conforme já citado no ítem 3.1.1, uma tensão reversa pode ocorrer na rede. Se usarmos o processo de polarização direta poderemos ter uma atuação incorreta. Para estes casos costuma-se utilizar polarização das fases sãs que não são submetidas à tensão reversa.

Para curtos trifásicos onde o problema pode ocorrer nas três fases, somente a tensão de memória de pré-falta pode proporcionar uma direcionalidade adequada. Normalmente em proteções de distância a tensão de memória é utilizada somente quando a tensão é reduzida a uma pequena porcentagem da tensão nominal. Este critério não pode ser usado nesta aplicação quando a tensão reversa ocorre. Neste caso a tensão de memória deverá ser controlada por um elemento não direcional para faltas trifásicas.

Seja a fig. 3.1.3.1 abaixo:

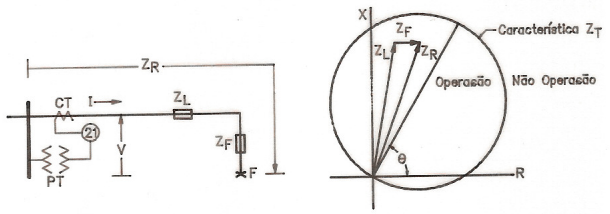


FIGURA 3.1.3.1

A característica de operação na unidade acima indica que a região de atuação da unidade é obtida pela comparação angular entre as componentes de 60 Hz obtidas dos TC's e TP's que depende fundamentalmente da localização do defeito.

Por outro lado a operação dos Capacitores Série pode gerar componentes transitórias de baixas frequências em conjunto com os transitórios em altas frequências. O distúrbio causado nas proteções por estas altas frequências podem ser eliminados pela instalação apropriada de filtros nas entradas analógicas de corrente e/ou tensão da proteção. Entretanto para os transitórios sub-síncronos este procedimento nem sempre é possível pois estas frequências podem ser bem próximas da frequência da rede.

Por outro lado o tempo requerido para estas oscilações decairem costumam a ser grandes se comparado com o tempo necessário de atuação das proteções pois as mesmas são diretamente proporcionais a constante de tempo do sistema.

Estas componentes transitórias citadas podem também ocasionar a respectiva saturação dos transformadores de corrente bem como uma distorção ainda maior no circuito de tensão devido aos divisores capacitivos de potencial. Em vista do exposto acima vamos fazer a análise da fig. 3.1.3.2 a seguir em (05) cinco partes distintas a saber, visando resaltar o período de medição indicado para o esquema de proteção mostrado na figura 3.1.3.1;

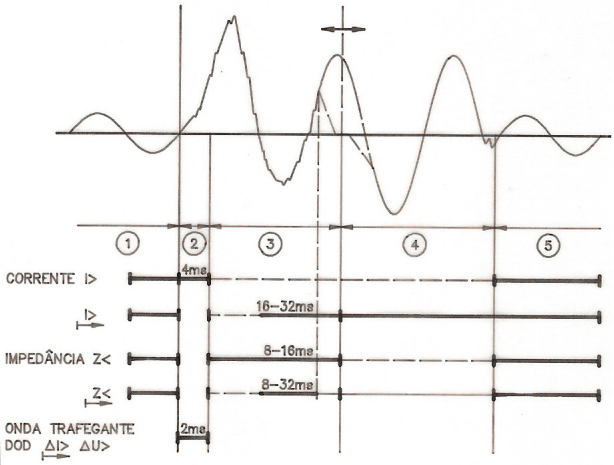


FIGURA 3.1.3.2

3.1.3.a) Regime permanente de pré-falta: Durante este período somente existe a corrente de carga. Entretanto as Oscilações de Potência podem influenciar a performance da proteção. Se o relé responde para estas condições, deve ser bloqueado (trecho - 1).

3.1.3.b) Regime sub-transitório: Logo após a incidência da falta, esta informação deve ser suprida ao relé. Não ocorre saturação dos TC's ou transitórios nos DCP's bem como corrente e/ou tensão reversa (trecho - 2).

3.1.3.c) Regime transitório: Neste trecho ocorrem a saturação dos TC's, transitórios nos DCP's, reversão de corrente e/ou tensão bem como potências reversas em linhas paralelas devido a abertura dos disjuntores. Técnicas especiais de medição utilizando a passagem pelo ponto zero com filtros podem ser as técnicas mais usuais para uma medição correta (trecho - 3).

3.1.3.d) Regime pós-transitório: Durante este período a corrente de defeito contém praticamente a componente fundamental sem maiores distorção possibilitando uma medição mais correta da impedância de defeito (trecho - 4).

Pode-se verificar portanto que pelo exposto nos ítens 3.1.3.a a 3.1.3.d o ideal seria que a medição fosse efetuada durante o período sub-transitório, mas para os relés de distância devido a utilização de transactores e filtros, a medição para os mesmos é efetuada no período transitório.

Simulando a linha de transmissão por um circuito R-L-C e resolvendo por análise de Fourier, temos:

$$V_D = V_T - V_R = [L_T - L].(I_1.w_1.\cos w_1 t + I_2.w_2 \cos(w_2 t + \theta_1) + [R_T - R].(I_1.w_1.\operatorname{sen} w_1 t + I_2.w_2 \operatorname{sen}(w_2 t + \theta_1) + \frac{1}{C}\left[\frac{I_1}{w_1}.\cos w_1 t + \frac{I_2}{w_2}.\cos(w_2 t + \theta_1)\right] \quad (3.1.3.1)$$

Por simplicidade mas sem perda de generalidade, vamos assumir que a corrente do sistema contenha somente duas componentes I_1 e I_2. Após algumas integrações e diferenciações com as condições de contorno consideradas, temos o princípio básico de medição que é a comparação angular entre: (Vide Figura 3.1.3.3)

V_R = (gerada pelo sistema - tensão do defeito).

e

$V_D = I.Z_T - V_R$ (onde Z_T é a impedância réplica do sistema).

Através destas equações os valores instantâneos das ondas de tensão e correntes devem ser computados e plotados como função do tempo. A modulação causada pela corrente sub-síncrona pode inadvertidamente alterar o alcance da proteção de distância podendo causar sua operação para faltas externas ou mesmo inibí-las para faltas internas. Analisando a equação 3.1.3.1 pode-se observar que a tensão gerada associada a indutância é proporcional a frequência, e o efeito da corrente sub-síncrona é atenuado pela relação w_2 / w_1. Com relação a capacitância ocorre justamente o processo inverso, ou seja, quanto menor a frequência sub-síncrona maior a modulação obtida nas tensões V_R e V_D. Podemos verificar através das fig's 3.1.3.3 e 3.1.3.4 (a e

b) que para um defeito localizado no ponto limite de ajuste com uma baixa frequência sub-síncrona (wz), teremos uma alta modulação de V_R, uma baixa modulação de V_T e a curva V_D dominada pelo sinal sub-harmônico.

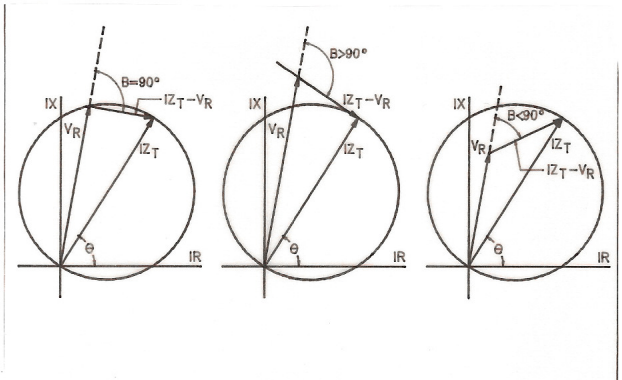


FIGURA 3.1.3.3

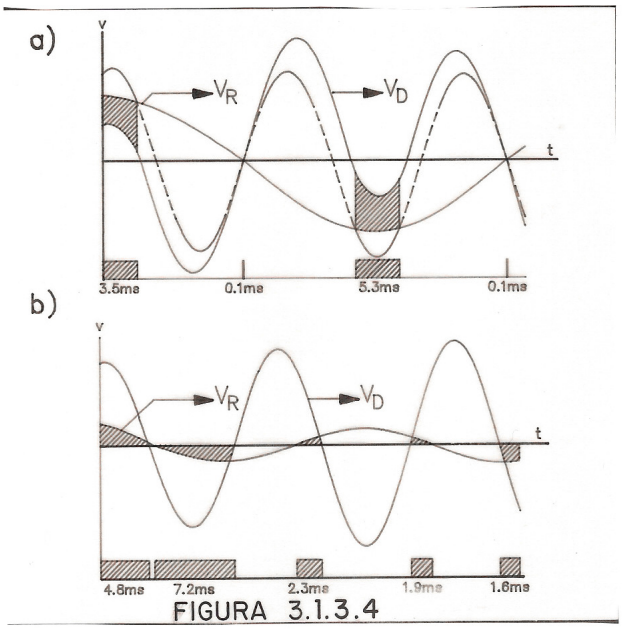


FIGURA 3.1.3.4

Poderemos ter portanto um sobrealcance caracterizado já que o tempo de coincidência de 5,3 ms só ocorre 27 ms após a incidência da falta. Para uma frequência subsíncrona maior este efeito é minimizado pois o tempo de coincidência de 4,8 ms se dá praticamente após a incidência do defeito. Uma filtragem efetiva das correntes acima de 50 Hz sem afetar a faixa de medição de 55 a 60 Hz, poderia ser um desafio a ser implementado.

Do exposto acima podemos verificar também que quanto menor for a frequência subsíncrona poderemos ter um sobrealcance, enquanto que quanto mais próxima da componente fundamental poderemos ter subalcance.

O aspecto do sub e sobrealcance citado pode ser também visualizado na figura 3.1.3.5a), onde a componente harmônica Vn deve ser somada à componente fundamental, que dependendo da defasagem angular entre ambas pode gerar o problema operativo já citado.

Por outro lado, poderíamos implementar um filtro bassa-banda com uma faixa de w1 (sub-frequências) a w2 (altas-frequências) na entrada analógica do relé e com uma curva mostrada na figura 3.1.3.5b). Entretanto pela figura 3.1.3.5c) pode-se visualizar o atraso introduzido no processo de medição em pauta, além de exigir um estudo aplicativo bem detalhado desta faixa de frequências a serem introduzidas no esquema de proteção.

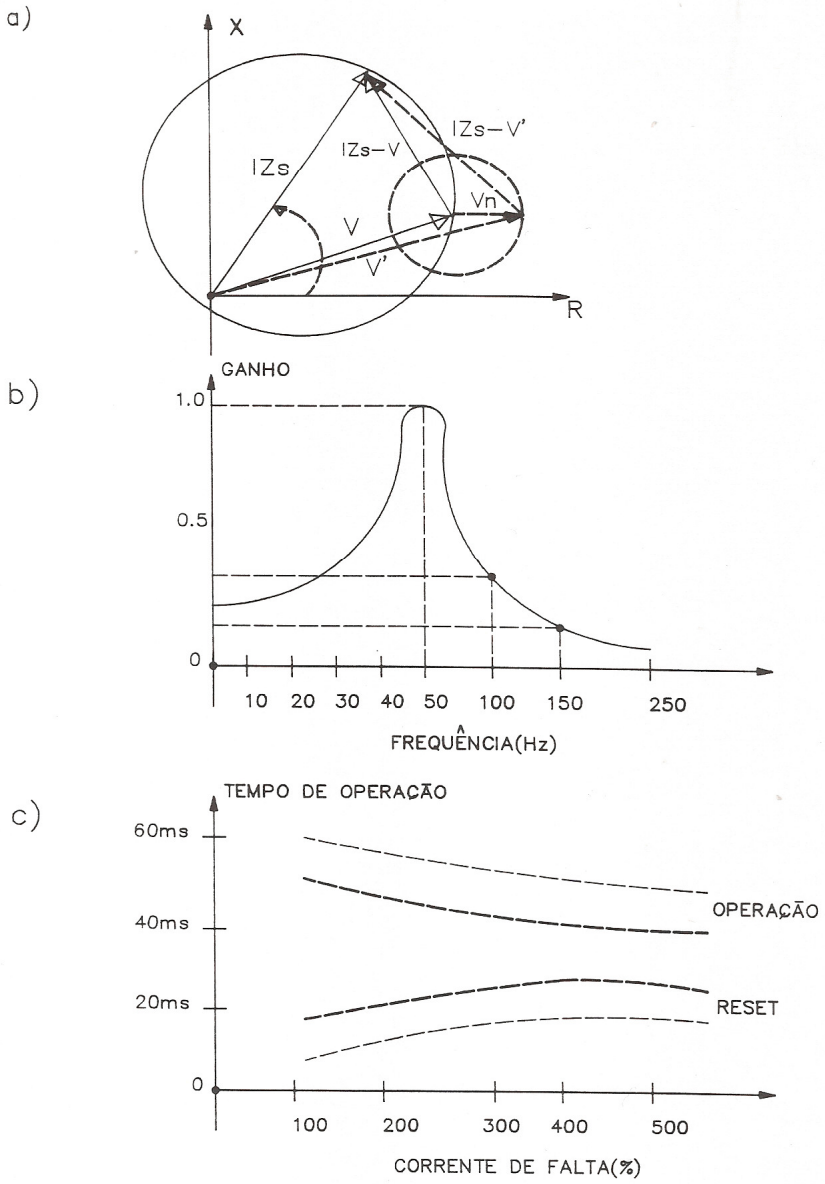

a)
X
IZs
IZs−V
IZs−V'
Vn
V
V'
R
b)
GANHO
1.0
0.5
0
10 20 30 40 50 100 150 250
FREQUÊNCIA(Hz)
c)
TEMPO DE OPERAÇÃO
60ms
40ms
20ms
0
OPERAÇÃO
RESET
100 200 300 400 500
CORRENTE DE FALTA(%)

FIGURA 3.1.3.5

3.1.4 - Esquemas de Teleproteção

Seja a figura 3.1.4.1 abaixo:

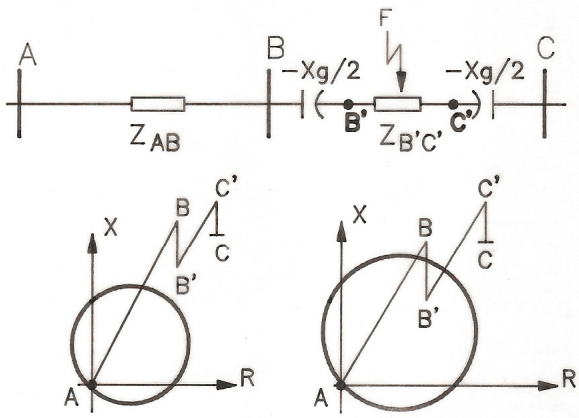


FIGURA 3.1.4.1

No primeiro diagrama da figura acima pode-se excluir no ajuste a Capacitância Série, evitando assim uma operação indevida para faltas externas. Entretanto a zona 1 de alcance direto ficará bastante limitada além de ser baseada na componente fundamental sendo portanto vulnerável a componentes sub-harmônicas. No segundo diagrama deveremos introduzir uma temporização de aproximadamente 100 ms para coordenar-se a atuação do SPARK-GAP do Banco. Entretanto este atraso intencional indica sua utilização somente como proteção de back-up do sistema em questão.

Seja a figura 3.1.4.2;

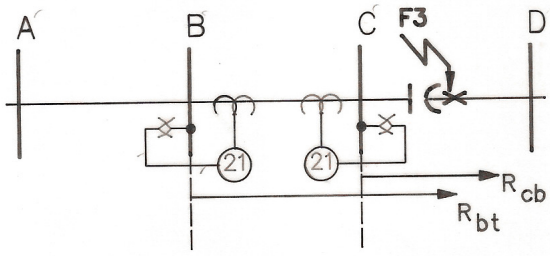


FIGURA 3.1.4.2

Ao utilizar-se o esquema Comparação Direcional, vamos supor que o esquema de teleproteção é o de bloqueio (blocking). Ao supormos um defeito F3 no ponto indicado na figura, teremos na unidade R_{CB} a corrente de falta fluindo através do valor de impedância medida entre a barra B e o defeito. Para ambas as unidades RBT a capacitância medida é a mesma mas a resistência e reatância são acrescidas pela linha BC. Devido a alta relação X_L/X_C do circuito poderemos ter sub-alcance na unidade R_{CB} e sobre-alcance para a unidade R_{BT} podendo ocasionar uma operação indevida da proteção localizada no terminal B. Para os demais esquemas de teleproteção tendo como referência a fig. 3.1.4.1, o esquema PUTT se mostra limitado em zona 1, enquanto o esquema POTT se mostra mais adequado, mas convém ressaltar que ambos os esquemas acima são suscetíveis as correntes sub-síncronas conforme descrito.

3.2 - Relés de Ondas Trafegantes

3.2.1 - Esquema de Comparação Direcional

O princípio de medição para o esquema de Comparação Direcional usando técnicas digitais foi primeiramente proposto por A.T. Johns em 1980 e posteriormente desenvolvido por McLaren na referência (07) da bibliografia.

O mesmo consta basicamente de tratar-se as Ondas Incidentes/Refletidas através das equações de BERGERON para o circuito da fig. 3.2.1.1, onde;

$$S_1 = v(t) - Ko.i(t) \qquad (3.2.1.1)$$

e

$$S_2 = v(t) + ko.i(t) \qquad (3.2.1.2)$$

Sendo Ko uma constante positiva que pode ser representada pela impedância de surto da Linha e os valores das equações acima grandezas MODAIS que utilizam a teoria definida nos ANEXOS 2 e 3.

As equações acima na realidade representam de certa forma as Ondas Incidentes e Refletidas utilizando o conceito de polaridade mostrado no item 2.2.1. Logo a equação 3.2.1.1 é definida como Onda Incidente (Backward) e a equação 3.2.1.2 como Onda Refletida (Forward). Portanto a discriminação Direcional do esquema em pauta consta basicamente de se determinar a "SEQUência" no qual os discriminantes S_1 e S_2 se tornam não nulos primeiro, ao atingirem determinado valor de ajuste.

Para uma Falta reversa no terminal "S", a grandeza S_2

se tornará não nula imediatamente após o defeito, e a grandeza S_1 após aproximadamente 02 vezes o tempo de trânsito da Linha (fig. 3.2.1.1/a). Em contrapartida para uma Falta interna na Linha a grandeza S_1 se torna não nula primeiro do que S_2, sendo a diferença de tempo proporcional ao local do defeito. (fig. 3.2.1.1/b).

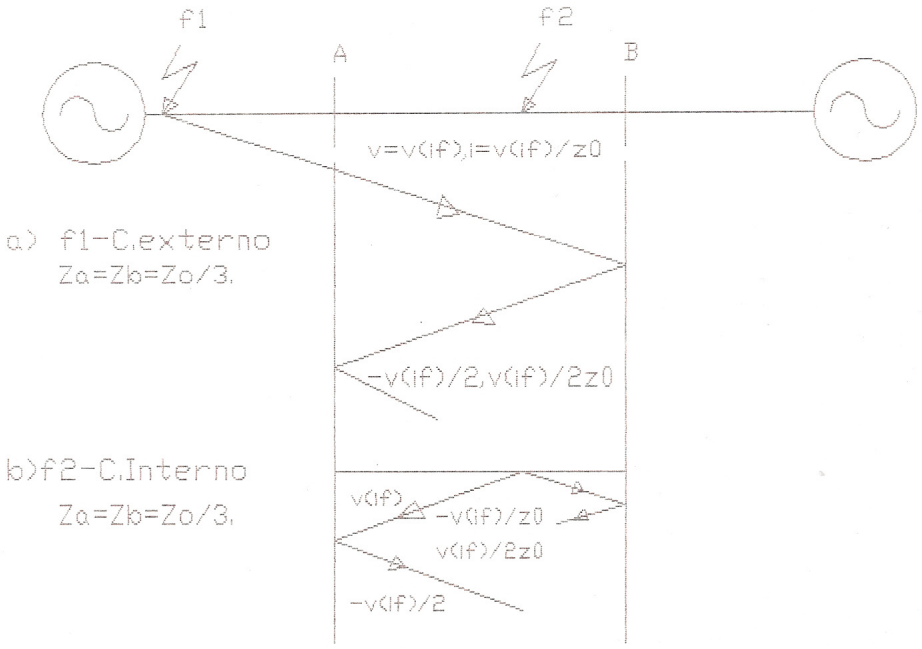


FIGURA 3.2.1.1

Entretanto devida as múltiplas reflexões nos terminais da Linha a ser protegida, o processo de medição acima fica comprometido quanto a direcionalidade, além do sinal de corrente e tensão ficarem sujeitos a sinais espúrios devido ao fenômeno descrito acima. Portanto o esquema em pauta propõe que a medição seja feita na 1. Incidência/Reflexão da Onda para garantir uma direcionalidade correta.

Ao analisarmos portanto as Formas de Ondas de Tensão e Corrente com a primeira passando pelo ZERO e MAXIMO respectivamente, nota-se que o princípio proposto se mantém válido por 1/2 e 1/4 de ciclo respectivamente. Para alguns ângulos de incidência do defeito (de 150 a 180 graus) nota-se também que este tempo torna-se crítico comprometendo o esquema de medição. Logo a Filtragem Digital proposta no ítem 3.2.2 tem por objetivo além de contornar os problemas inerentes a Compensação Série, estender o tempo de medição citado acima para um valor de aproximadamente 1/4 de ciclo para assegurar uma correta direcionalidade ao esquema.

3.2.2 - Aspectos de Filtragem

Conforme já mencionado em ítens anteriores a Compensação Série introduz três tipos de situações operativas que podem comprometer o esquema de proteção da Linha:

- Tensão Reversa.
- Corrente Reversa.

- Correntes Sub-síncronas que geram Sub/Sobre alcance.

Além destas, para o Esquema proposto no ítem anterior as Correntes Sub-síncronas em Sistemas de Linhas Paralelas pode para um Curto Externo ao trecho protegido operar o SPARK-GAP do Banco, fazendo com que o mesmo apareça como um defeito interno. Outro objetivo é tentar reduzir o tempo de RESET do esquema para possibilitar que o mesmo seja habilitado para defeitos do tipo EVOLVING FAULT.

A Filtragem Digital mostrada na figura 3.2.2.1 é dividida em 04 partes distintas indicadas:

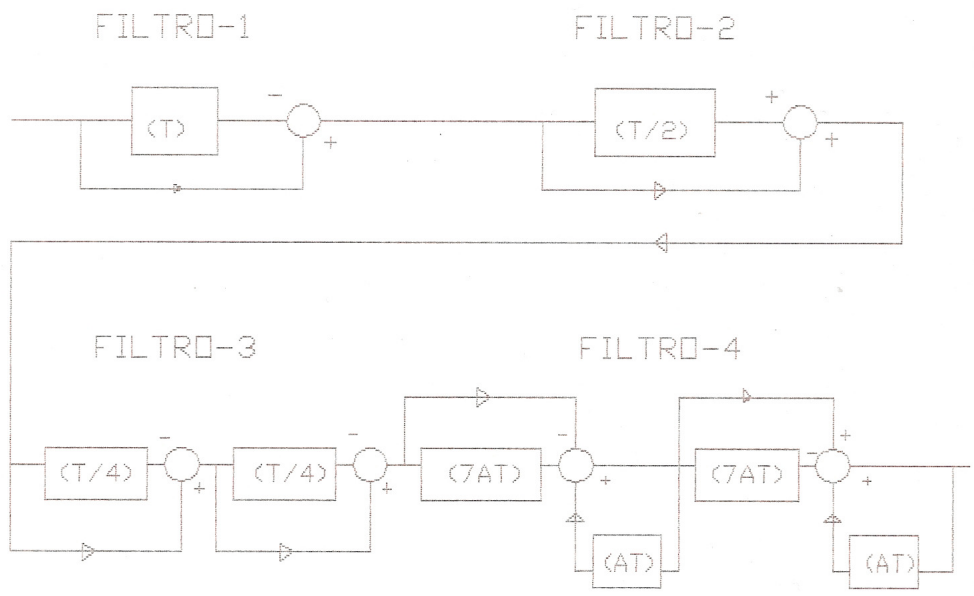


FIGURA 3.2.2.1