



São Paulo, 10/15 de abril de 1972

GRUPO DE ESTUDOS DE PROTEÇÕES, TELECONTROLE E TELECOMUNICAÇÕES

COMPORTAMENTO DOS RELÉS DE DISTÂNCIA EM DESENERGIZAÇÕES DE LINHAS RADIAIS.

Engº Leonardo Lins de Albuquerque

Cia. Hidro Elétrica do São Francisco - CHESF

1.0 - INTRODUÇÃO

Os relés de distância polifásicos são conhecidos por serem influenciados por perturbações no sistema de tensão alternada que os alimenta.

A falta de tensão secundária, originada pelo rompimento de fusíveis, é uma das causas de operação incorreta dos relés encontradas nas estatísticas de perturbações, elaboradas pelos órgãos técnicos de qualquer empresa.

Outras causas também conhecidas, só podem ser bem caracterizadas por dispositivos adequados de registro automático. São perturbações transitórias, motivadas por oscilações elétricas.

2.0 - APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

É fato conhecido, que ao se desenergizar uma linha de transmissão de apreciável efeito capacitivo, a tensão na linha poderá se comportar de várias maneiras distintas, dependendo dos elementos que a ela estiverem conectados.

No caso das linhas sem carga, a tensão não irá imediatamente a zero, mas decairá exponencialmente, face à energia armazenada na sua capacitância, desde que ao se processar a extinção da corrente próxima à passagem do zero, a tensão estará forçosamente em torno do seu ponto de máximo valor.

A existência da própria indutância da linha, e a de reatores ou transformadores, impõe que o descarregamento da energia armazenada no campo elétrico circundante aos condutores, se desenvolva de forma oscilatória na frequência natural amortecida do circuito assim constituído.

O uso de reatores ligados constantemente à linha, com pensando-a total ou parcialmente, solução necessária em algumas das interligações do Sistema CHESF, faz com que a frequência da oscilação a se esperar, seja inferior à nominal, conforme adiante se demonstrará.

Por outro lado, como a interrupção do arco no disjuntor não se processa simultaneamente nas três fases, há o aparecimento de componente de sequência negativa na tensão que decai oscilatoriamente.

Portanto, se um disjuntor é aberto, entre o ponto onde se localiza a fonte de referência de tensão dos relés de distância, e a rede geradora - exemplo típico de uma linha radial, o sistema de tensões que se apresentará aos terminais dos dispositivos protetores, poderá ter:

- a) frequências diferentes da nominal, para a qual ele foi projetado;
- b) componente de sequência negativa capaz de influenciar o desempenho dos relés (1).

Sendo os relés de distância usados pela CHESF, em suas linhas de alta tensão, sensíveis à sequência negativa, e funcionando baseados na comparação de fase através de uma unidade de indução, tipo "induction cup", oscilações de tal origem, poderiam ensejar operações indevidas dos mesmos.

É mister salientar que, embora a atuação dos dispositivos não alastrem as consequências operacionais do desligamento devido a se tratar de linhas radiais, por outro lado, virá certamente, comprometer uma análise mais superficial ou imediata dos órgãos que operam o Sistema.

Ocorrências dessa espécie, já foram registradas na L.T. - MILAGRES - BANABUIU - FORTALEZA, e na L.T. PAULO AFONSO -

CATU - MATATU (S2).

As características elétricas dessas linhas são apresentadas nas ilustrações 2.0-1/2, que apresentam a configuração elétrica do Sistema que elas constituem e indicam também o seu "status" - quando das perturbações.

Uma análise teórica completa dessas oscilações, apresenta bastante dificuldade, desde que é necessário considerar não só a capacitância fase-terra, mas também o acoplamento inter-fases, além dos parâmetros internos relativos aos divisores de potencial. O uso de computadores ou simuladores analógicos poderia ser válido como meios de comparar os resultados de campo com os obtidos teoricamente, a fim de testar o modelo considerado.

3.0 - REGISTROS OBTIDOS

A seguir são apresentados oscilogramas obtidos em nossas subestações:

3.1 - Registros em Banabuiu: Após a passagem do Sistema FORTALEZA ao nível de 230kV, em novembro de 1969, ocorreram algumas operações automáticas dos disjuntores de Banabuiu, quando da abertura do disjuntor 52-B de Milagres, quer fosse manual quer automaticamente. (Ver ilustração 2.0-1).

Este fato, motivou uma investigação mais profunda, quando foram realizados ensaios programados, utilizando-se osciloperturbógrafos, adequadamente localizados, dotados de telecomando, visando a sincronização dos registros, além da dilatação do tempo de memória.

O diagrama ilustrado em 3.1-1 apresenta de forma simplificada, o esquema montado para os registros, em BANABUIU.

O osciloperturbograma da ilustração 3.1-2, registrou a perturbação, e salienta as oscilações sentidas pelos relés de BANABUIU, após a abertura do disjuntor em MILAGRES; indica também, o instante em que o relé 21-1 do 52-F, foi sensibilizado a operar.

Informa-se que idêntico registro foi colhido no disjuntor 52M.

Vale ressaltar que os divisores de potencial que alimentavam os relés e os osciloperturbógrafos ficavam na barra da subestação. De modo que, após a abertura automática do disjuntor 52-M

cessou o sinal de tensão, no instante indicado por A. Não se deu a conhecer contudo o que ocorria do lado da linha. O item seguinte, elucidará este fato.

Todavia, ficava evidenciada a causa das operações dos relés de BANABUIU, durante manobras semelhantes: oscilações no decaimento da tensão da linha.

3.2 - Registros em Catu: - No dia 22-10-70, às 20:14 h, face à operação indevida de relés diferenciais na S/E de MATATU, quando de manobras de transferência com disjuntores de 69KV, desligou-se, automaticamente, pelas chaves 86 auxiliares, o disjuntor 852-A, entrada de linha naquela importante subestação.

Devido à configuração mantida atualmente no Sistema CHESF (ver ilustrações 2.0-2 e 3.2-1), a Usina de Paulo Afonso ficou alimentando 412,5km de linha de transmissão em vazio, advindo daí fortes oscilações de tensão e de carga, o que motivou a abertura manual de emergência, em Paulo Afonso, do disjuntor 152-S2.

Em Catu, abriram-se automaticamente, os disjuntores 52-S2 e 52-M, operando os relés de distância 21-1 (1a. zona), que são de sentidos de atuação opostos, em ambos os disjuntores.

Os osciloperturbogramas das ilustrações 3.2-2 e 3.2-3, foram registrados nos terminais 52-S2 e 52-M, respectivamente, ambos em Catu. Evidenciam oscilações idênticas às que foram observadas em BANABUIU, assim como claramente indicam as respectivas aberturas dos disjuntores correspondentes pelos relés de distância de fase. Registram inclusive, que a operação dos relés foi retardada pelo bloqueio do dispositivo anti-oscilação, que funciona baseado no mesmo princípio que os de distância.

As pistas das correntes de fase não traduzem nenhuma anormalidade.

Portanto, os relés de distância operaram face ao transitório de tensão ocorrido após a desenergização da linha, o - mais precisamente, cerca de 4 ciclos depois de indicado pela abertura do disjuntor 152-S2.

Não é necessário dizer, que sem os correspondentes oscilogramas, seria difícil analisar, acertadamente, o desenrolar da perturbação.

3.3 - Novos Registros em Banabuiu - As informações fornecidas pelos registros oscilográficos, correspondentes às

perturbações relatadas nos itens anteriores, já definiam a causa da operação dos relés, aparentemente anormal.

Todavia, desejava-se conhecer o que se passava no lado da linha, quando havia reatores a esta conectados, como no caso de BANABUIU.

Assim, após outra etapa de ampliação do sistema MILAGRES - BANABUIU - FORTALEZA, os relés e osciloperturbógrafos passaram a ser alimentados por capacitores de acoplamento, como divisores de potencial, fabricação Haefely - ligados do lado da linha.

Antes de se programar novos testes, por necessidade operacional, o Sistema teve que ser desligado, e nessa oportunidade se colheu o registro oscilográfico 3.3-1, que é anexado.

A situação do sistema é indicada no diagrama 3.3-2 ou seja com o disjuntor 52-M, de BANABUIU fechado, e o 52-B, de MILAGRES, sendo manualmente operado.

Da análise do osciloperturbograma se deduz:

- Fortes oscilações de tensão, imediatamente após a abertura do disjuntor em MILAGRES.
- Amortecimento das oscilações relativamente lento, quando comparado com os oscilogramas obtidos em CATU.
- Frequência de oscilação das tensões V1, V2 e V3, da ordem de 30 Hz.
- Frequência de oscilação de 3Vo compreendida entre 34 e 36 Hz.
- Sobre-tensões transitórias, atingindo o coeficiente de 1.52 na fase 2.
- O sistema de tensões anormal em intensidade, fase e frequência, que se estabeleceu imediatamente após a abertura do disjuntor 52-B, de MILAGRES, motivou a operação do relé 21-1 do disjuntor 52-M, em BANABUIU.

4.0 - ANÁLISE PARCIAL DA INTERRUPÇÃO EM VAZIO DE UMA LINHA COMPENSADA COM REATORES:

Uma análise teórica completa da perturbação relatada no item anterior, determinando-se o comportamento dinâmico do sistema, e calculando-se também os níveis de sobre-tensões, é conforme já frisado, verdadeiramente difícil, quando inclusive a característica desionizante do disjuntor deveria ser considerada.

Todavia, se for desprezado de início esse defeito, que se pronuncia apenas no limiar da perturbação, será possível determinar as frequências próprias de oscilação do sistema, e compará-las com aquelas obtidas pelo registro oscilográfico da ilustração 3.3-1.

4.1 - Oscilações de sequência positiva: -

Supondo que as correntes nas três fases sejam interrompidas simultaneamente, e considerando que o sistema possui uma eficaz referência de terra, fornecida pelo neutro do banco de reatores monofásicos, a análise poderia se efetuar monofasicamente, como primeira aproximação.

Assim, o circuito a se analisar, de maneira superficial como se deseja, poderia constar da representação T - da linha, com um reator conectado à sua extremidade. (Ver figura - 4.1-1).

- Tem-se para a L.T. - Milagres - Banabuiu, que:

$$\left. \begin{aligned} Z_T &= \frac{Z_{\pi}}{2} = 11.0 + j 57.6 && \text{ohms} \\ Y_T &= 2 Y_{\pi} = j 709 \times 10^{-6} && \text{mhos} \\ X_L &= \frac{(kV)^2}{MVA_r} = j 5290 && \text{ohms} \end{aligned} \right\} \text{ a } 60 \text{ Hz}$$

Com o disjuntor 52-B fechado, a linha se apresenta ainda capacitiva, solicitando cerca de 68A, o que corresponde aproximadamente a 27 MVA_r, com tensão nominal.

A interrupção da corrente, ocorrendo em torno de seu valor zero, implica em se deixar a capacitância da linha carregada, que desprezando qualquer efeito de tensão de restabelecimento no disjuntor, irá se descarregar forçosamente sobre o reator a ela conectado, constituindo-se portanto, em um sistema tipicamente oscilante.

- Do circuito considerado se conclui:

$$[(l+L)p^2 + (r+R_L)p + 1/c] i(t) = 0$$

$$\left[p^3 + \frac{r+R_L}{(l+L)} p + \frac{1}{(l+L)c} \right] i(t) = 0$$

Normalizando-se vem:

$$\left(p^2 + 2\alpha p + \omega_n^2 \right) i(t) = 0 \quad ; \quad \text{onde:}$$

$$\alpha = \frac{r + R_L}{2(\ell + L)} \quad e \quad \omega_n = \sqrt{\frac{1}{(\ell + L)C}}$$

Sendo:

α = fator de amortecimento

ω_n = pulsação natural, ou própria, do sistema.

A pulsação real das oscilações decorrentes, será:

$$\omega_d = \sqrt{\omega_n^2 - \alpha^2} = \sqrt{\frac{1}{(\ell + L)C} - \left[\frac{r + R_L}{2(\ell + L)} \right]^2}$$

Em função da frequência de geração do Sistema $\bar{f} =$

= 60Hz, a frequência real de oscilação será:

$$(f_1)_d = \bar{f} \sqrt{\frac{1}{(x + X_L)Y_n} - \left[\frac{r + R_L}{2(x + X_L)} \right]^2}$$

Considerando que $r + R_L \ll X_L + x$, o segundo termo, dentro do radical, pode ser desprezado, e a frequência real de oscilação do sistema, corresponde aproximadamente à sua frequência natural:

$$(f_1)_d = \bar{f} \sqrt{\frac{1}{(x + X_L)Y_r}} = f_n = \frac{\omega_n}{2\pi}$$

Que fornece:

$$(f_1)_d = 0,514 \bar{f} = 30.8 \text{ Hz}$$

Tal resultado vem sobejamente justificar o registro 3.3-1, onde a frequência de oscilação era da ordem - de 30 Hz, para V1, V2 e V3.

Por outro lado, o fato de $r + R_L \ll x + X_L$, corresponde a um amortecimento bastante lento, desde que a constante de tempo seria:

$$\tau = \frac{1}{\alpha} = \frac{2(\ell + L)}{r + R_L}, \quad \text{ou}$$

$$\tau = T \left[\frac{x + X_L}{r + R_L} \right], \quad \text{onde } T \text{ é o período da onda a } 60\text{Hz}$$

Considerando valores normais de r e RL , tem-se uma constante de tempo superior a 20 vezes o período nominal T , que corresponde aproximadamente ao registro obtido, no caso de linhas compensadas com reatores.

4.2 - Oscilações de sequência negativa e zero-

As considerações até aqui desenvolvidas, correspondem às oscilações de sequência positiva, que existiriam singularmente, apenas se as interrupções da corrente nas três fases ocorressem simultaneamente. Em verdade, o corte de corrente se processando nos instantes em que elas passam pelo valor zero, defasados de $1/3$ de período, o sistema assume, sequencialmente, características de um circuito com uma fase aberta, e em seguida com duas fases abertas, antes de ocorrer a total interrupção tripolar, embora tudo isso se apresente dentro de um intervalo de tempo bastante curto.

Este comportamento próprio das interrupções, possibilita o aparecimento de componentes de sequência negativa e de sequência zero nas oscilações decorrentes, conforme se constata pelos registros contidos no oscilograma da figura 3.3-1.

As de sequência negativa, sendo da mesma frequência que as de sequência positiva, desde que as impedâncias e as admitâncias não dependem da sequência das fases, provocam modificações nas defasagens relativas entre as três tensões fase-terra, conforme se observa.

Enquanto que as de sequência zero, exigem uma frequência de oscilação diferente, ditada pelas características de sequência zero da linha e do reator.

Um desenvolvimento similar àquele efetuado para a frequência de sequência positiva (f_1), poderia ser elaborado. No caso da linha MILAGRES - BANABUIU, tem-se:

$$Z_{T_0} = 88.12 + j 306 \text{ ohms}$$

$$Y_{T_0} = j 220 \times 10^{-6} \text{ mhos} \quad \text{a } 60 \text{ Hz}$$

o que impõe uma frequência de oscilação, para o sistema de sequência zero igual a $(f_0)d = 37.5 \text{ Hz}$, desprezando-se o efeito das perdas da linha e do reator.

Da análise gráfica do oscilograma 3.3-1, deduz-se que a tensão $3V_0$, possui uma frequência da ordem de $34 - 36 \text{ Hz}$, o que vem corresponder ao valor apresentado acima, fruto de dedu-

ções algébricas não inseridas, mas facilmente compreensíveis.

A comprovação da existência das duas frequências, f_1 e f_0 , se traduz pela modulação da amplitude das tensões V_1 , V_2 e V_3 , no oscilograma referido.

No caso de linhas sem transposições, podem aparecer frequências outras, ditadas pela diferença entre as capacitâncias e indutâncias mútuas das diversas fases, em relação à linha corretamente transposta.(2).

4.3 - Conclusão - Portanto, em resumo, - conclui-se da análise efetuada, que as oscilações na tensão manifestadas após a desenergização em vazio, de uma linha compensada com reatores, apresentam:

- a) componente de sequência positiva decaindo oscilatoriamente em uma frequência f_1 ; função do grau de compensação da linha (MVar do reator/MVar da linha).
- b) componente de sequência negativa, de mesma frequência que a de sequência positiva f_1 , e de intensidade função de fatores como a discordância dos polos do disjuntor durante a abertura, e a assimetria do arranjo dos condutores da linha.
- c) componente de sequência zero, decaindo oscilatoriamente - com frequência f_0 , ditada pelos parâmetros da sequência zero do circuito.

As deduções acima, fruto da análise, correspondem à realidade dos registros oscilográficos obtidos. (Ver ilustração 3.3-1).

5.0 - CONSIDERAÇÕES SOBRE INTERRUPÇÕES, EM VAZIO, DE LINHAS NÃO COMPENSADAS -

5.1. Descrição do Fenômeno - o comportamento dinâmico que se segue, após a interrupção de uma linha não compensada é bastante diferente daquela com reatores.

No caso limite, de uma linha sem elementos descarregadores a ela conectados, são conhecidos os efeitos - das tensões de restabelecimento (recovery voltage) que se apresentam entre os polos do disjuntor que a interrompe. Porquanto, teoricamente, a capacitância transversal tenderia a permanecer sempre carregada, caso não houvesse maneira de descarregar a energia armazenada. Cabe aos resistores inseridos automaticamente, quando

da abertura dos disjuntores, atenuar este efeito.(3).

Todavia havendo transformadores de potencial, ou capacitores de acoplamento, a ela conectados, estes tenderão a descarregá-la rapidamente. Essa descarga possui características normalmente oscilantes, todavia a frequência é bem mais baixa - que aquelas obtidas, quando das linhas compensadas. Esta diferença advém do alto valor da reatância indutiva presente aos transformadores de potencial, ou associados aos capacitores de acoplamento, comparado com aquele dos reatores normalmente usados. A constante de tempo é baixa devido à pequena relação R/L do circuito.

5.2 - Conclusão: - As considerações acima desenvolvidas, se confirmam pelos oscilogramas das figuras 3.2-2 e 3.2-3, onde além da baixa frequência das oscilações, e o seu rápido decaimento apresenta-se uma forte componente de sequência zero. É possível também se observar a existência de componentes de sequência negativa, pela alteração das defasagens relativas entre as três fases, embora o sistema de tensões seja predominante de sequência positiva.

6.0 - HIPÓTESE QUANTO AO COMPORTAMENTO DOS RELÉS DE DISTÂNCIA :

Os relés de distância usados em quase que a totalidade das linhas de transmissão do Sistema CHESF em 230kV e 138kV são sensíveis, conforme já relatado, à sequência negativa.

O sistema de tensões que se apresenta - quando das perturbações em estudo, é predominantemente positivo, como se constata dos oscilogramas. Portanto, a operação do relé só seria justificada se algum outro efeito viesse a adicionar à pequena componente de sequência negativa, observada nos mesmos oscilogramas.

Basicamente os relés de distância podem - ser representados pelo diagrama da ilustração 6.0-1.

Possuem elementos resistivos, indutivos e capacitivos, necessários a exercer a função de medida da distância do defeito, através da impedância. Circuitos de compensação e de memória necessitam dos elementos capacitivos. E estes foram calculados baseados no funcionamento do relé à frequência nominal, ou próxima à mesma. (60 Hz).

Portanto, no caso do aparecimento súbito de frequências bem abaixo da nominal, o circuito próprio do relé po

deria modificar internamente a imagem da sequência das tensões que o alimenta, fazendo com que na unidade de indução fosse ampliado o sistema de tensões de sequência negativa, em relação à respectiva componente positiva.

Objetivando constatar a hipótese aventada acima, foram realizados testes elétricos com um relê desse tipo, alimentado com um sistema de tensões equilibradas de frequência da ordem de 30 Hz, e embora ele não tenha operado, o seu torque de restrição foi bastante atenuado, em relação ao obtido com um sistema de mesma intensidade, mas de 60 Hz.

Em seguida foi alimentado com um sistema de tensões, com uma razoável componente de sequência negativa, e ao se diminuir a frequência até cerca de 30 Hz, a tensão V_{yz} tendia a se anular, levando a unidade de indução a uma condição de torque zero.

Confirma-se, portanto que:

- a existência de componente de sequência negativa;
- a baixa frequência de oscilações do sistema; em conjunto contribuem à operação intempestiva dos relés de distância, quando das desenergizações de linhas em vazio, quer sejam ou não compensadas.

Em outros registros oscilográficos, recentemente obtidos em linhas de configuração semelhante às descritas, têm sido constatadas atuações de relés de distância pelos motivos acima descritos.

7.0 - CONSIDERAÇÕES FINAIS:

Da exposição contida nos itens anteriores, se conclui que a atuação dos relés de distância, quando da desenergização de linhas em vazio, é justificável.

São pertinentes ao Sistema as duas hipóteses formuladas para explicar esta operação dos relés.

Cabe salientar que em redes elétricas interligadas, esse tipo de atuação é mais difícil de ocorrer, todavia o presente informe serve ao engenheiro de proteção, como uma causa a mais, a ser investigada, para explicar a operação dos relés de distância em uma perturbação.

Os resultados obtidos, e a experiência

comprovada, possibilitam dizer que, quer seja ou não compensada a linha, poderão ocorrer atuações desse tipo.

O uso de relés de sobre-corrente, ou mesmo de taxa de crescimento de corrente, supervisionando continuamente os de distância, poderia evitar esse comportamento. Todavia o tempo de operação desses dispositivos auxiliares deveria ser o necessário a não impôr nenhum retardo adicional à atuação do de distância, quando da ocorrência de um defeito real.

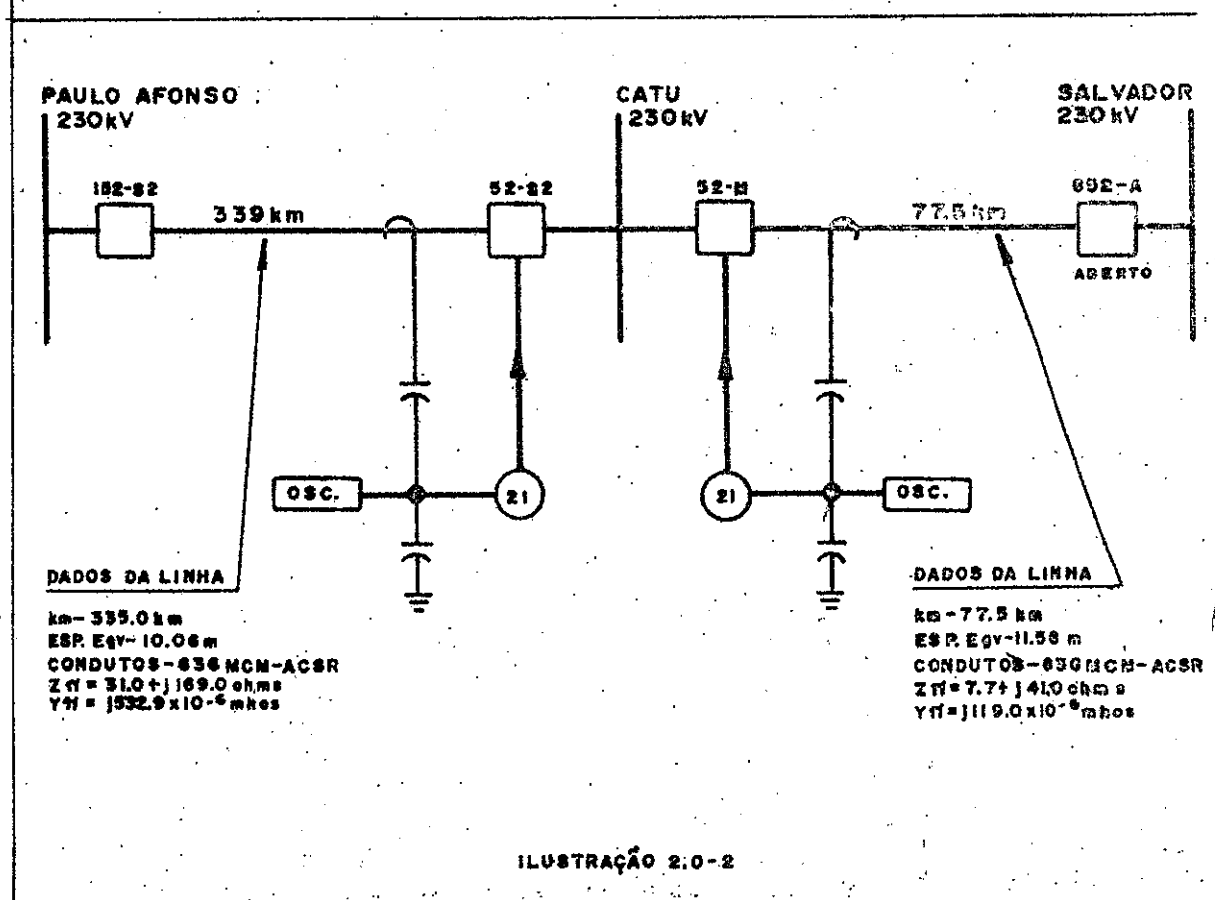
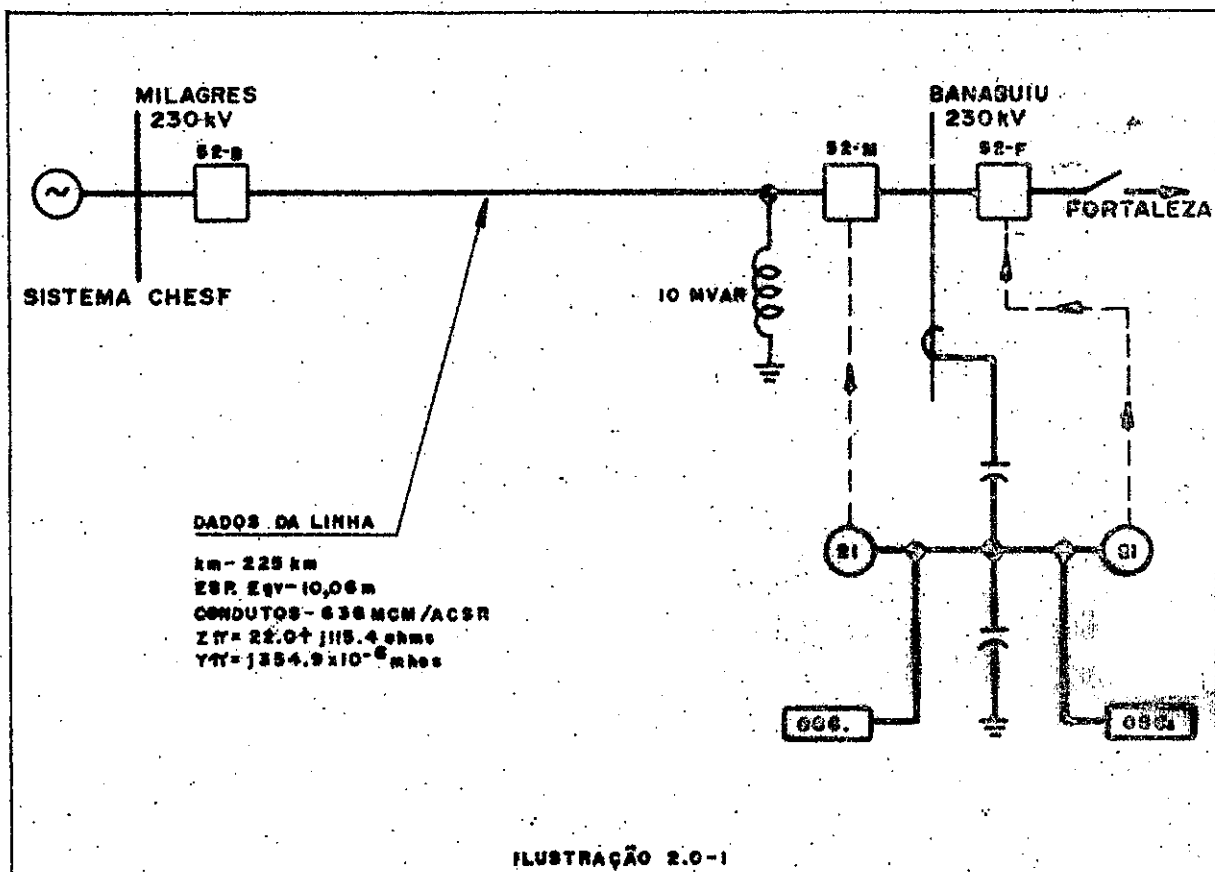
Outro artifício seria o uso de circuitos de filtros, desde que o problema da atuação dos relés, está sempre ligado à baixa frequência da oscilação da tensão de linha, após a interrupção do disjuntor que a separa do Sistema.

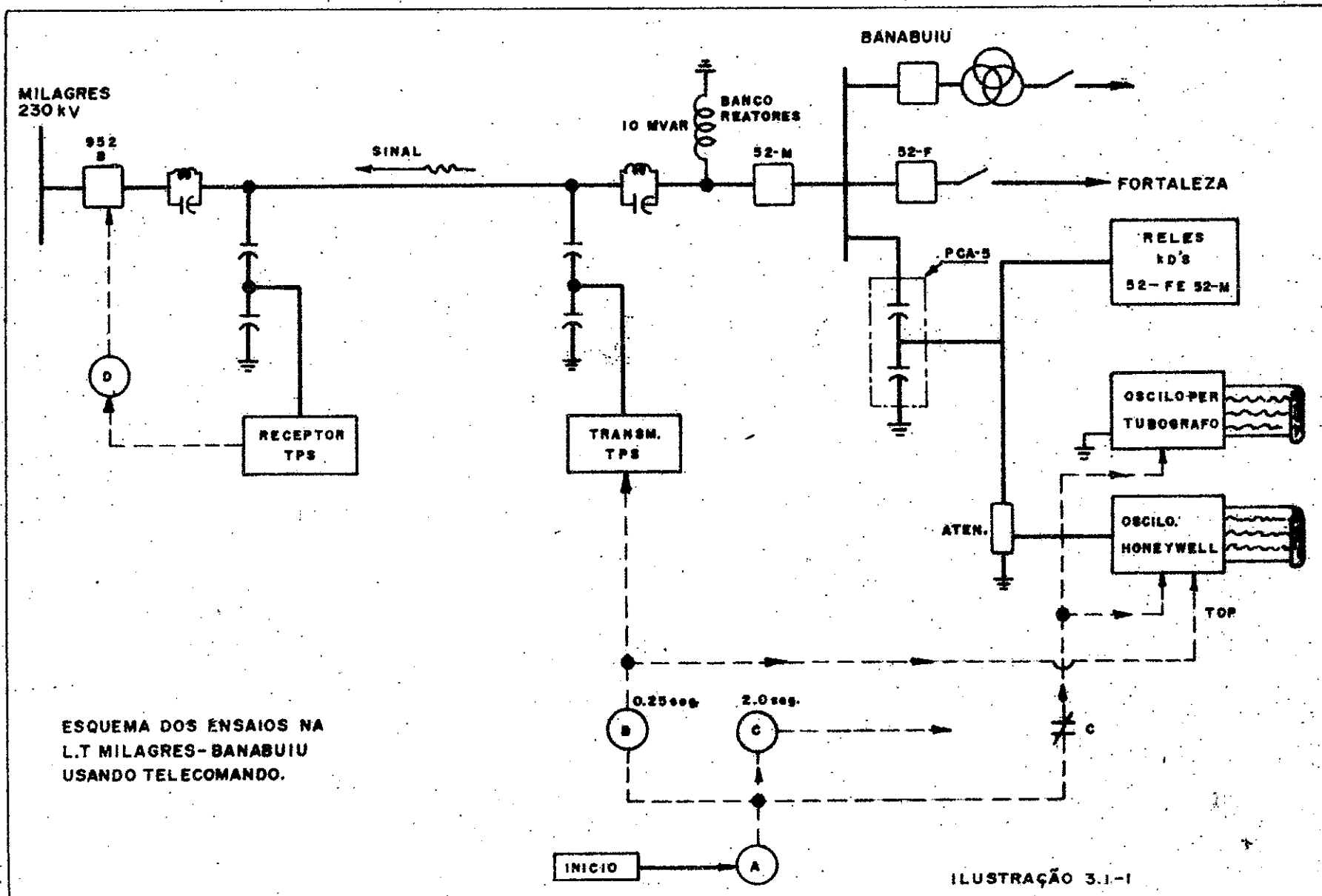
Contudo, não provocando maiores consequências operacionais ao Sistema, desde que a atuação do relé nesse tipo de perturbação ocorre após a desenergização da linha, não se cogita em dotar o esquema de proteção usado na CHESF, desses meios de bloquear a atuação dos relés de distância. Os órgãos de controle operacional já estão devidamente cientificados desse comportamento dos relés, o que evita uma errônea interpretação quanto à característica e à localização do defeito. Informações necessárias à rotina de restabelecimento do Sistema.

Recife, fevereiro de 1972

B I B L I O G R A F I A

1. Warrington - Protective Relays - Vol.I
2. CESI/Milano - Influence of Shunt Reactors on Switching Surges (IEEE - Conference Paper).
3. Fernier - Les Phenomenes de Fermeture et de Coupure (Delle-Alsthom).
4. Peterson - Transients in Power Systems.



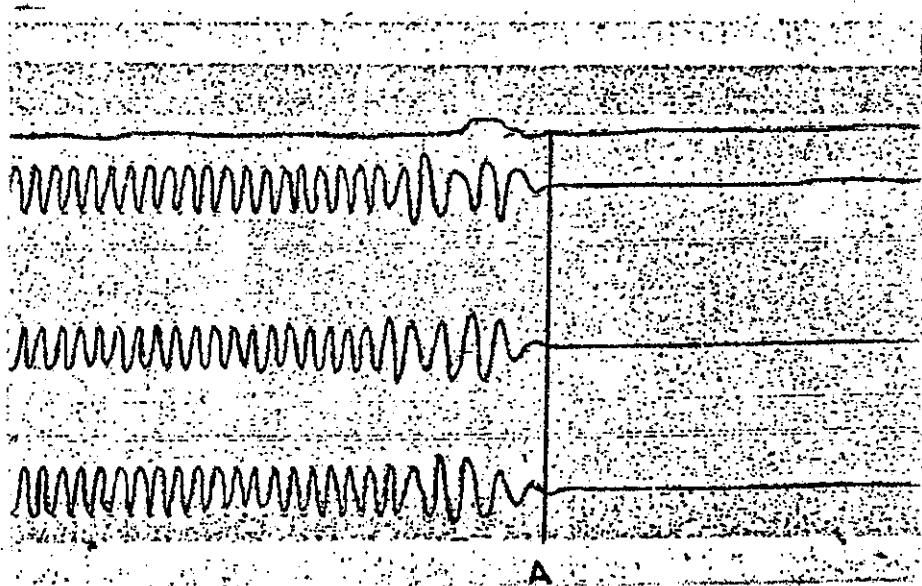


KD-Z)

Vc

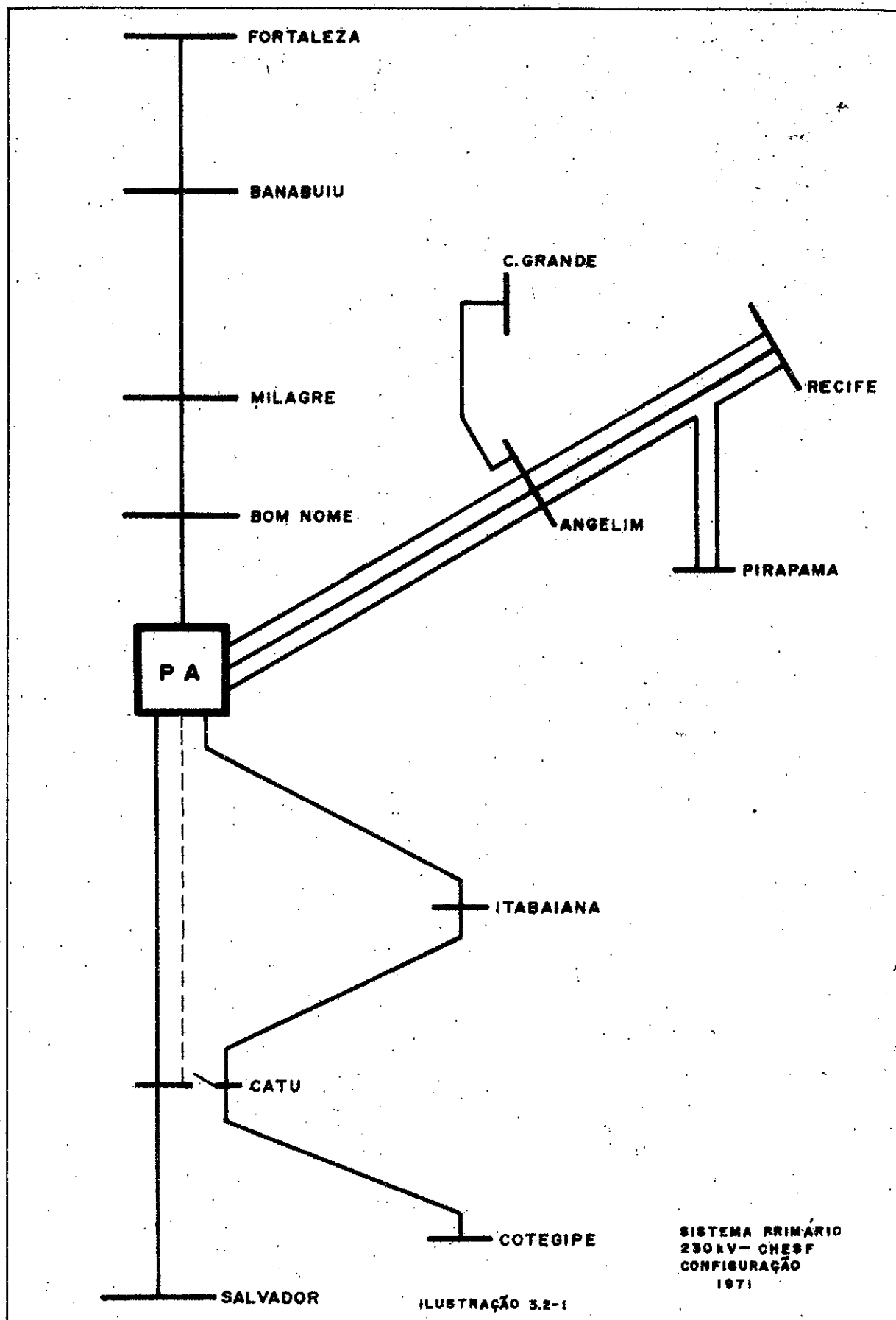
Vb

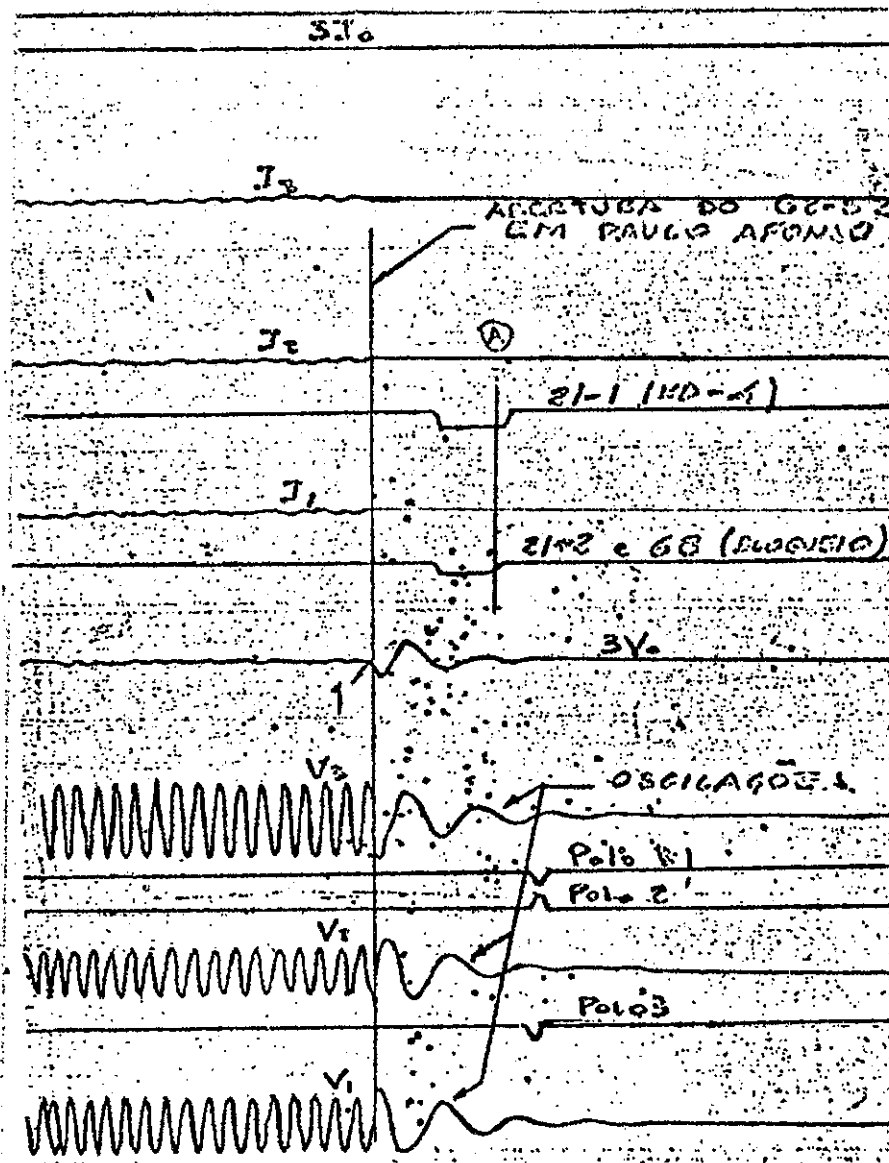
Va



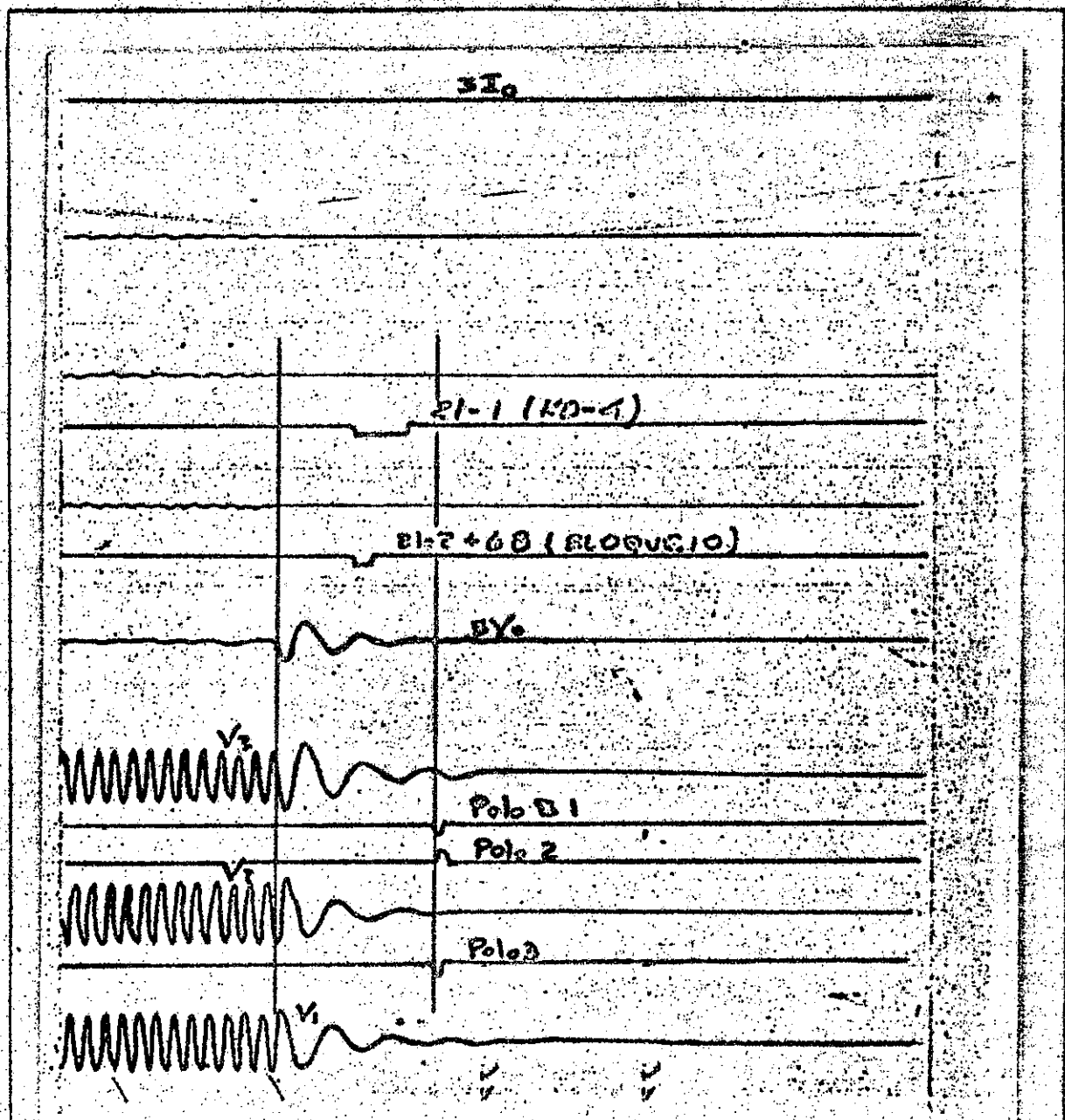
OSCILOGRAMA REGISTRADO PELO OSCILOPERTUBOGRAFO DO
DISJUNTOR 52-F DE BANABUIU.

ILUSTRAÇÃO 3.1-2





OSCILOGRAMA REGISTRADO NO DISJUNTOR 52-S2, EM CATU
DIA-22/10/70



OSCILOGRAMA REGISTRADO NO DISJUNTOR 52-M, EM CATU.
DIA -20/10/70

ILUSTRAÇÃO 9.2-5

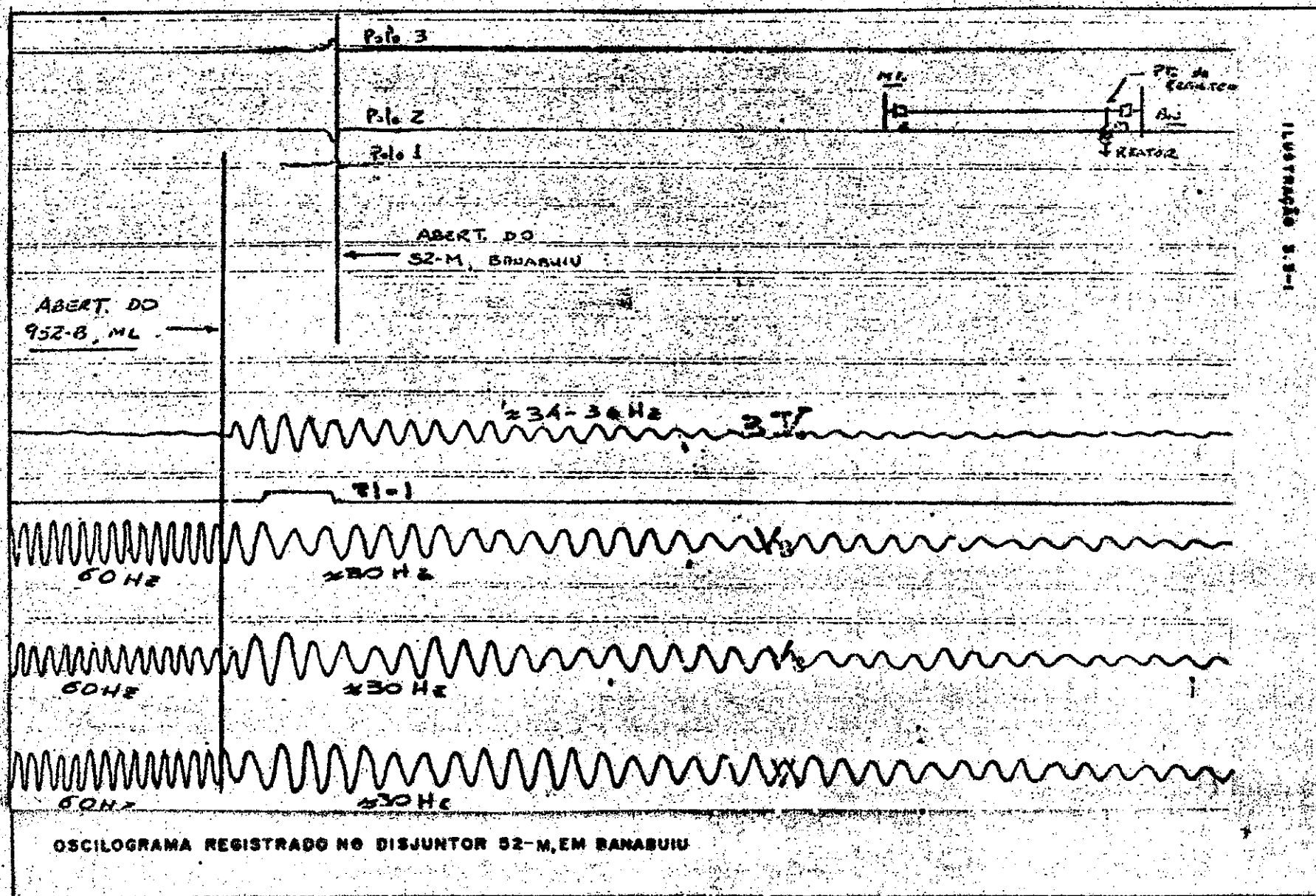
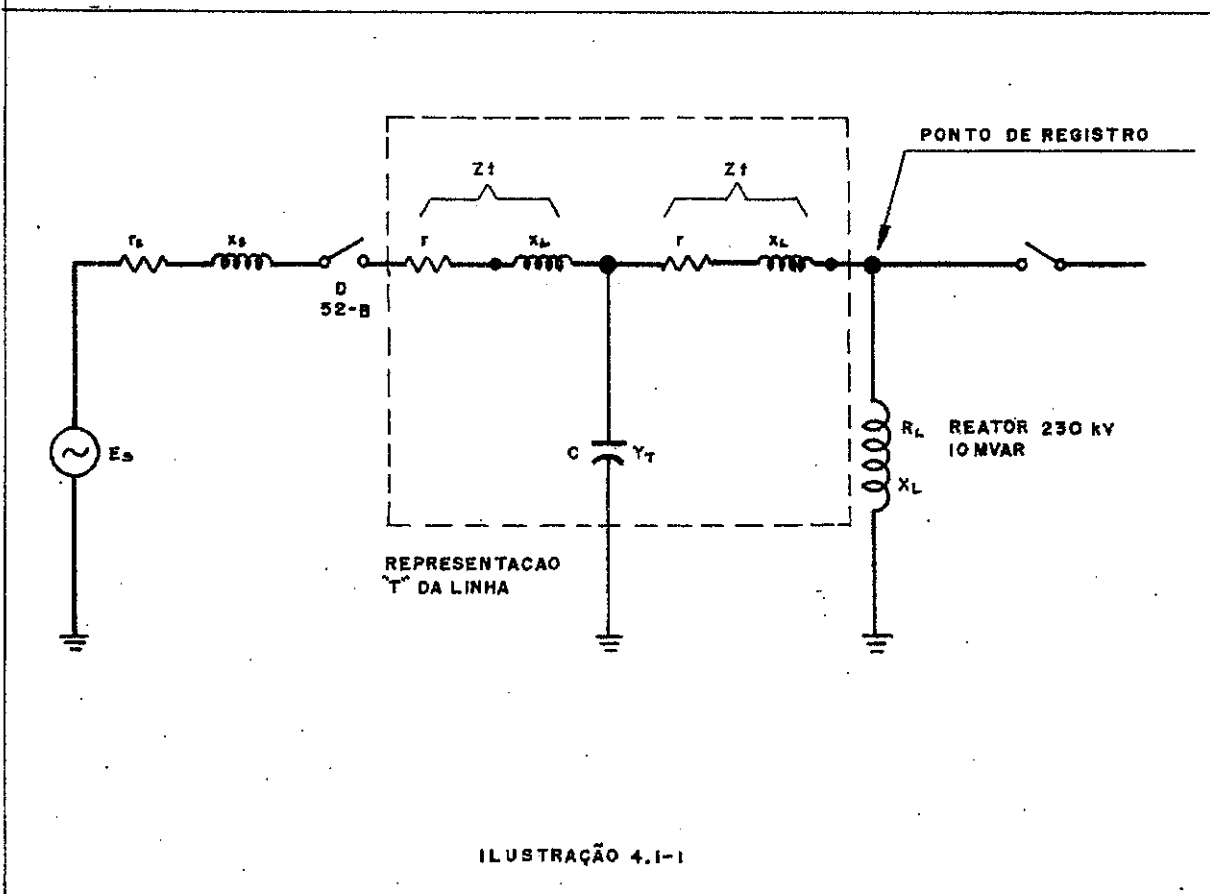
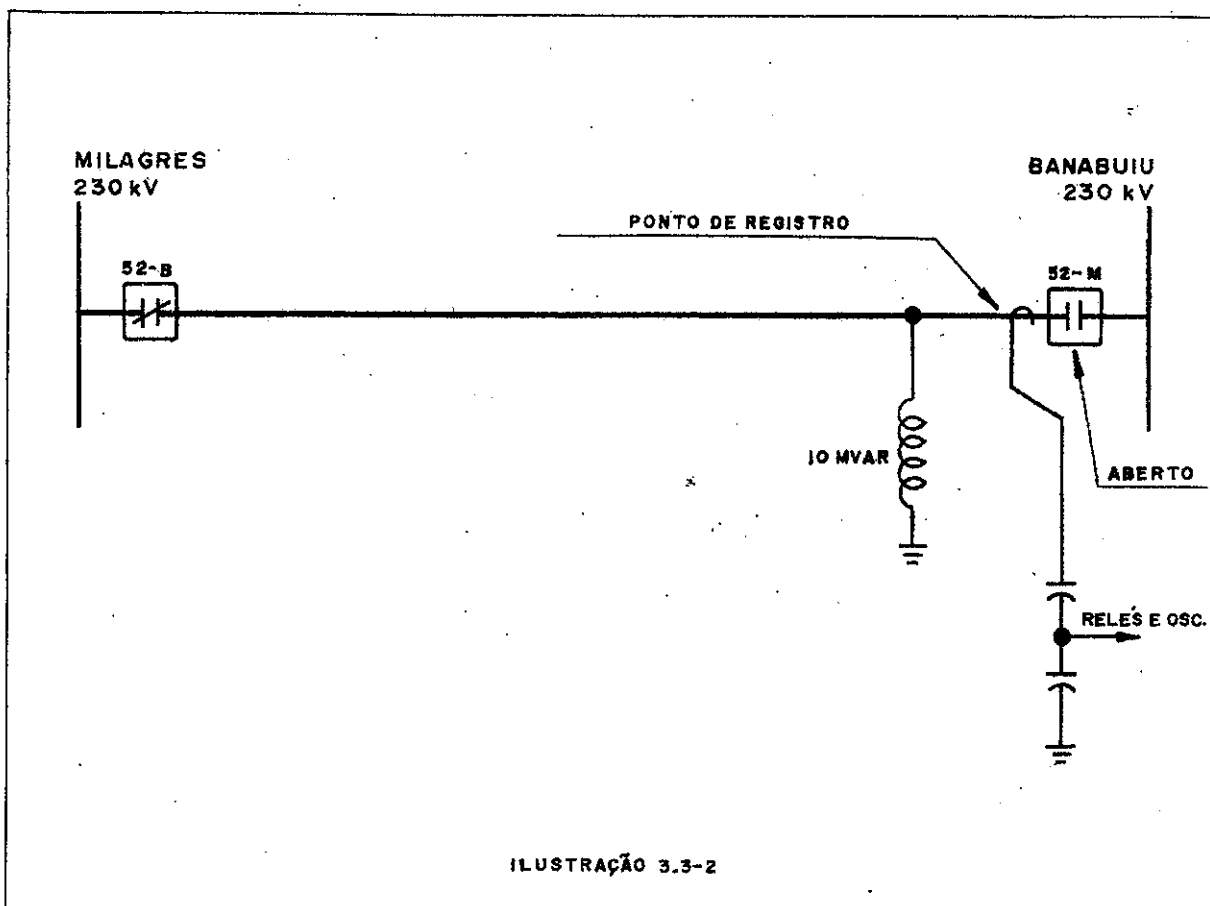


ILUSTRAÇÃO 5.5-1

SP/OTC/10



ESQUEMA SIMPLIFICADO DOS RELES
DE DISTANCIA

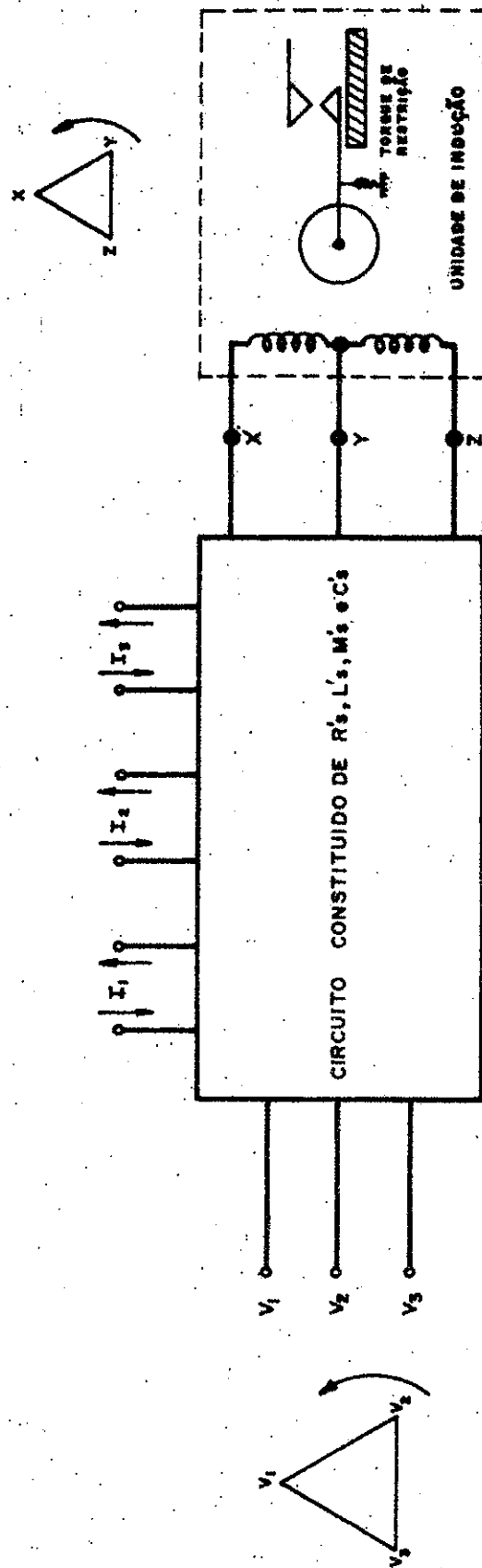


ILUSTRAÇÃO 6.0-1