



SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO
E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

SP/GSP/05

São Paulo, 10/15 de Abril de 1972

GRUPO DE ESTUDOS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA

COMPORTAMENTO DOS RELEYS DE DISTÂNCIA EM LINHA DE CIRCUITO

DUPLO

Takeshi Konishi

Centrais Elétricas de São Paulo S/A -CESP

1.0 - INTRODUÇÃO (1) (2): A medição efetuada pelo relé de distância, quando da falta fase-terra em linhas de circuito duplo nos sistemas com neutro aterrado (solidamente) é afetada pela impedância mútua de sequência zero entre os dois circuitos.

Os principais fatores que determinam a impedância mútua são :

- Arranjo geométrico dos condutores
- Resistência específica de aterramento
- Resistência de solo
- Altura dos condutores
- Número de cabos terra
- Frequência

Considerações análogas aplicam-se para faltas bifásicas a terra.

Por outro lado as impedâncias mútuas de sequência positiva e negativa normalmente são despresíveis para fins práticos, desde que sejam efetuadas transposições dos condutores.

2.0 - ERRO DE MEDAÇÃO DURANTE FALTAS FASE-TERRA (1) (2) (3): O erro de medição pode ser atribuído ao acoplamento indutivo entre os circuitos de sequência zero, resultando na influência mútua pelas correntes de sequência zero (indutância mútua dos circuitos de sequência zero).

Devido à influência mútua entre as correntes dos circuitos de sequência zero, a impedância medida não mais varia linearmente com o comprimento da linha.

Entretanto, pelo princípio de medição aplicado, a linearidade é uma condição necessária, para medições corretas de distância com qualquer localização do ponto de falta, no trecho protegido.

O efeito da impedância mútua de sequência zero, depende de sua magnitude, da impedância da fonte e distribuição dos pontos de aterramento.

A fim de se verificar o efeito da impedância mútua de distância, suponhamos duas condições de alimentação:

- por uma das extremidades
- por ambas extremidades

No desenvolvimento do trabalho usaremos as seguintes notações:

Comprimento da linha.

- x Distância do ponto de falta até a barra A (c)
 z Impedância de sequência positiva ou negativa da linha
 (ohm/fase km)
 zm Impedância mútua de sequência zero (ohm/fase km)
 zo Impedância de sequência zero da linha (ohm/fase km)
 If Corrente na fase em falta
 Io Corrente residual no circuito defeituoso
 I'o Corrente residual no circuito sem defeito

$k_o = \frac{z_0 - z}{3z}$ Fator de correção para corrente residual

2.1 - Alimentação por uma das extremidades Esta condição está mostrada na ilustração 2.1-1.

Para uma falta metálica fase-terra, o relé de distância do tipo impedância mede a relação $Z = \frac{V}{I}$

Seja uma falta no ponto F, distando x da barra A.

2.1.1 - Impedância vista pelo relé 1: A tensão fase-terra vista pelo relé ^{da} fase em falta será:

$$V = z \cdot x \cdot (I_f + 3 I_o \cdot k_o) + I'_o \cdot z_m \cdot x$$

- A corrente no relé será:

$$I = I_f + 3 I_o \cdot k_o$$

O relé mede a impedância dada por:

$$Z = \frac{V}{I} = \frac{z \cdot x \cdot (I_f + 3 I_o \cdot k_o) + I'_o \cdot z_m \cdot x}{I_f + 3 I_o \cdot k_o}$$

$$Z = z \cdot x + \frac{I'_o \cdot z_m \cdot x}{I_f + 3 I_o \cdot k_o}$$

Onde, $I_f = 3 I_o$

$$\frac{I'_o}{I_o} = \frac{x}{2\ell - x}$$

$$k_o = \frac{z_0 - z}{3z}$$

$$I_o \frac{x}{2\ell - x} \cdot z_m \cdot x \\ Z = z \cdot x + \frac{3 I_o}{3 z} \left(1 + \frac{z_o - z}{3 z} \right)$$

$$Z = z \cdot x \cdot \left[1 + \frac{z_m}{2z + z_o} \cdot \frac{x}{2\ell - x} \right] \quad (I)$$

2.1.2 - Impedância vista pelo relé 2: A tensão fase-terra vista pelo relé da fase em falta será:

$$V = z \cdot (\ell - x) (I_f + 3 I'_o k_o) - I'_o \cdot z_m \cdot (\ell - x)$$

A corrente no relé será:

$$I = I_f + 3 I'_o k_o$$

O relé mede a impedância dada por:

$$Z = \frac{V}{I} = \frac{z \cdot (\ell - x) (I_f + 3 I'_o k_o) - I'_o \cdot z_m \cdot (\ell - x)}{I_f + 3 I'_o k_o}$$

$$Z = z \cdot (\ell - x) - \frac{I'_o \cdot z_m \cdot (\ell - x)}{I_f + 3 I'_o k_o}$$

Onde,

$$I_f = 3 I'_o$$

$$k_o = \frac{z_o - z}{3 z}$$

$$Z = z \cdot (\ell - x) - \frac{I'_o \cdot z_m \cdot (\ell - x)}{3 I'_o \left(1 + \frac{z_o - z}{3 z} \right)}$$

$$Z = z \cdot (\ell - x) \left[1 - \frac{z_m}{2z + z_o} \right]$$

(II)

2.1.3 - Impedância vista pelo relé 3: A tensão fase-terra vista pelo relé da fase em falta será:

$$V = z (2\ell - x) (I_f + 3 I'_o k_o) + I_{ozm} \cdot x - 2 I'_o z_m (\ell - x)$$

A corrente no relé será:

$$I = I_f + 3 I'_o k_o$$

O relé mede a impedância dada por:

$$Z = \frac{V}{I} = \frac{z(2\ell - x) (I_f + 3 I'_o k_o) + I_{ozm} \cdot x - 2 I'_o z_m (\ell - x)}{I_f + 3 I'_o k_o}$$

$$Z = z (2\ell - x) + \frac{I'_o z_m \cdot x - 2 I'_o z_m (\ell - x)}{I_f + 3 I'_o k_o}$$

$$\text{Onde, } I_f = 3 I'_o$$

$$\frac{I_o}{I'_o} = \frac{2\ell - x}{x}$$

$$k_o = \frac{z_0 - z}{3z}$$

$$Z = z(2\ell - x) + \frac{I'_o \cdot \frac{2\ell - x}{x} \cdot z_m \cdot x - 2 I'_o z_m (\ell - x)}{3 I'_o (1 + \frac{z_0 + z_0}{3z})}$$

$$Z = z (2\ell - x) (1 + \frac{z_m}{2z + z_0}) - \frac{2z (\ell - x) \cdot z_m}{2z + z_0}$$

$$Z = z (2\ell - x) \left[1 + \left(\frac{z_m}{2z + z_0} - \frac{z_m}{2z + z_0} \cdot 2 \frac{\ell - x}{2\ell - x} \right) \right] \quad (\text{III})$$

2.1.4 - Considerações: Nas equações I, II e III, o segundo termo da expressão entre colchetes, representa o erro de medição, devido a influência da impedância mútua de sequência zero do circuito paralelo.

Na ilustração 2.1.4-1 estão mostradas as impedâncias medidas pelos relés 1,2 e 3, utilizando-se valores médios práticos de $z_0 = 3z$ e $z_m = 1,5z$.

Quanto ao erro de medição, temos a comentar:

2.1.4.1) Relé 1: Se ocorrer uma falta em qualquer ponto do trecho protegido, o relé sentirá como se a falta estivesse mais afastada.

O erro de medição aumenta de zero até cerca de 30% quando x varia de zero até ℓ . (falta no fim do trecho protegido)

Pela ilustração 2.1.4-1, se a la. zona do relé estiver ajustada para cobrir 85% do trecho, na realidade cobrirá somente cerca de 72% do trecho.

2.1.4.2) Relé 2: Na ocorrência de uma falta em qualquer ponto do trecho protegido, o relé "verá" como se a falta estivesse num ponto mais próximo.

O erro de medição não varia com a variação de x e, mantém-se constante em cerca de 30% em toda extensão do trecho.

Portanto, se a la. zona do relé estiver ajustada para cobrir 85% do trecho, na realidade cobrirá o trecho total.

Por outro lado sucede que, quanto menor o x , menor será a corrente no relé, consequentemente haverá um limite abaixo do qual o relé não mais atuará.

2.1.4.3) Relé 3: Para uma falta em qualquer ponto do trecho do circuito paralelo, o relé verá como se a falta estivesse num ponto mais afastado.

O erro de medição cresce de zero até cerca de 30% quando x varia de zero até ℓ .

2.2 - Alimentação por ambas extremidades: Esta condição está mostrada na ilustração 2.2-1.

É o caso em que há fonte de alimentação em ambas extremidades, ou ainda, fonte numa das extremidades e fonte de terra na oposta (por exemplo, reatores, transformadores aterrados, etc.)

Seja uma falta metálica fase-terra no ponto F, distando x da barra C.

2.2.1 - Impedância vista pelo relé 1: A tensão fase-terra vista pelo relé, da fase em falta, será:

$$V = z \cdot x (I_f + 3 I_o k_o) \pm I'_o \cdot zm \cdot x$$

A corrente no relé será:

$$I = I_f + 3 I_o k_o$$

O relé mede a impedância

$$Z = \frac{z \cdot x (I_f + 3 I_o k_o) \pm I'_o \cdot zm \cdot x}{I_f + 3 I_o k_o}$$

$$Z = z \cdot x \pm \frac{I'_o \cdot zm \cdot x}{I_f + 3 I_o k_o}$$

$$\text{Onde, } k_o = \frac{z_o - z}{3 z}$$

$$Z = z \cdot x \pm \frac{I'_o \cdot zm \cdot x}{I_f + 3 I_o} \frac{z_o - z}{3 z}$$

$Z = z \cdot x \left[1 \pm \frac{I'_o \cdot zm \cdot x}{I_f \cdot z + I_o (z_o - z)} \right]$	(IV)
--	------

2.2.2 - Impedância vista pelo relé 2: A tensão fase-terra vista pelo relé, da fase em falta, será:

$$V = z (\ell - x) (I_f + 3 I_o k_o) \pm I'_o \cdot z_m (\ell - x)$$

A corrente no relé será:

$$I_f + 3 I_o k_o$$

O relé mede a impedância dada por:

$$Z = \frac{V}{I} = \frac{z (\ell - x) (I_f + 3 I_o k_o) \pm I'_o \cdot z_m (\ell - x)}{I_f + 3 I_o k_o}$$

$$Z = z (\ell - x) \pm \frac{I'_o \cdot z_m (\ell - x)}{I_f + 3 I_o k_o}$$

$$\text{onde, } k_o = \frac{z_0 - z}{3 z}$$

$$Z = z (\ell - x) \pm \frac{z (\ell - x) \cdot I'_o \cdot z_m}{I_f + I_o (z_0 - z)}$$

$$Z = z (\ell - x) \left[1 \pm \frac{I'_o \cdot z_m}{I_f \cdot z + I_o (z_0 - z)} \right] \quad (v)$$

2.2.3 - Considerações: Nas equações IV e V, o segundo termo da expressão entre colchetes, representa o erro de medição devido a influência da impedância mútua de sequência zero.

Se ocorrer uma falta fase-terra próxima à barra C, a corrente de sequência zero nos relés 1 e 3 são de sentidos opostos, porém, terá mesmo sentido se a falta for próxima à barra D.

Dependendo da magnitude da impedância de sequência zero da fonte e da impedância mútua de sequência zero do circuito paralelo, a corrente de sequência zero no circuito paralelo, sem falta, desaparecerá para um valor particular de x.

Neste ponto a medição de distância será exata e, o ponto é dado pela relação:

$$\frac{x}{l} - \frac{x}{z_m} = z_{co}/z_m (\frac{l-x}{z_m}) + z_{do}, \text{ onde:}$$

z_{co} , z_{do} Impedância de sequência zero nas barras C e D, respectivamente.

A relação $I'o/I_o$ estará entre - 1 e + 1 dependendo do local da falta.

Para todas as faltas à esquerda do ponto onde $I'o/I_o = 0$, o relé 1 medirá uma impedância menor e, para todas as faltas à direita do ponto, o relé medirá uma impedância maior do que a real.

A ilustração 2.2.3-1 : Mostra o erro porcentual de $z + x$ (sem compensação) nos relés 1 e 2, quando x varia de zero a l nas seguintes condições:

- fontes iguais em ambas extremidades
- $z_0 = 3,0z$
- $z_m = 1,5z$

Nestas condições, com a la zona ajustada em 85% do trecho, o erro não excederá 5,5% no fim da zona.

Por outro lado não devemos esquecer que o erro depende ainda de:

- relação entre as fontes de alimentação
- resistência de falta
- defasagem entre as tensões das barras C e D.

3.0 - COMPENSAÇÃO DO ERRO DE MEDICÃO (1) (2)

3.1 - Alimentação do relé pela corrente residual do circuito paralelo.

Para se evitar a abertura não seletiva do circuito sem falta, algumas vezes é necessário efetuar a compensação por corrente residual do circuito sem falta para o relé do circuito em falta e não vice-versa.

O relé da fase em falta é alimentado por uma fração $k = zm/3z$ da corrente residual 3 I'o do circuito sem falta. Portanto, a corrente que comanda a medida é $I_f + 3 I_{ok_0} + 3 I'_{ok}$, e o relé medirá corretamente.

3.2 - Compensação comutada pela corrente de sequência zero do circuito paralelo: A comutação de sequência só se efetua se a relação das correntes de sequência zero dos circuitos em falta e sem falta, fôr igual ou maior que a unidade.

3.3 - Correção pela mudança de fator k_0 : Altera-se o fator k_0 do relé conforme a magnitude e direção da corrente de sequência zero no circuito, como segue:

3.3.1 - É aumentado se a corrente de sequência zero no circuito paralelo tem a mesma direção e é igual ou menor do que a corrente de sequência zero no relé.

3.3.2 - É reduzido se a corrente de sequência zero no circuito paralelo tem direção oposta e é igual ou menor do que a corrente de sequência zero no relé.

3.3.3 - É reduzido se o disjuntor do circuito paralelo fôr aberto pelo relé apropriado.

3.3.4 - É reduzido se o circuito paralelo fôr aberto e aterradas em ambas extremidades. (caso de aterramento para manutenção).

Este método não provê medição de distância precisa porém, assegura comportamento correto do relé.

3.4 - Ajuste de k_0 para um valor diferente: O fator k_0 é ajustado um

tanto maior do que o necessário para o trecho, sem considerar a impedância mútua, tal que, o erro de medição possa ser parcialmente compensado.

4.0 - COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS DE COMPENSAÇÃO: O comportamento do relé de distância nas faltas fase-terra utilizando os métodos de compensação 3.1, 3.2 e 3.3, sob as variadas condições de operação do circuito duplo, será descrito a seguir.

4.1 - Alimentação por ambas extremidades: As condições de operação estão mostradas nas ilustrações 4.1.1 e 4.1.2.

Se não fôr efetuada a compensação, os relés 1 e 2 do circuito em falta terão sua medição afetada.

Para uma falta no começo do circuito, haverá atuação dos relês em cascata, nas duas extremidades, porque o segundo relé atua imediatamente após o primeiro sem aguardar o tempo da 2a. Zona. O relé no circuito sem falta, possivelmente medirá impedância menor porque as correntes de sequência zero nos circuitos têm sentidos opostos, mas não atuará por causa de sua característica direcional.

Se fôr utilizado o método 3.1, os relés do circuito em falta medirão corretamente e, aqueles do circuito sem falta erradamente, porque eles não podem ser compensados corretamente, portanto, é possível de atuação incorreta.

Utilizando-se um elemento direcional independente, não compensado pela corrente de sequência zero do outro circuito, esta atuação será evitada.

Por outro lado, há a bem conhecida complicação envolvendo corrida entre os elementos direcional e de medição.

Se considerarmos o disjuntor 1 aberto, o relé 3 terá o alcance prolongado devido à necessidade da corrente de compensação, de maneira que a seletividade com o relé 2 será comprometida, principalmente se o último estiver corretamente compensado e, por isso atuando na 2a. zona.

Os métodos 3.2 e 3.3 não tem a primeira desvantagem, porque a corrente de sequência zero do circuito sem falta, que afeta a

seletividade, não está ligada ao relé.

Entretanto, a possibilidade de operação não seletiva entre os relés 2 e 3, quando o disjuntor 1 está aberto, continuará existindo.

4.1.1 - Com um dos circuitos aterrado: Esta condição de operação está mostrada na ilustração 4.1.1-1.

O relé sem compensação terá o alcance prolongado e assim poderá ocorrer atuação não seletiva.

Por outro lado, não é possível utilizar os métodos 3.1 ou 3.2, porque não há corrente nos TC's do circuito paralelo.

Com o método 3.3 é possível efetuar a correção ^{do} K_0 com um circuito lógico adequado, de maneira que o relé meça corretamente.

4.2 - Alimentação por uma das extremidades: As condições de operação de operação estão nas ilustrações 4.2-1, 4.2-2 e 4.2-3.

Os relés do circuito em falta que não são compensados, comportam-se da mesma maneira descrita no ítem 4.1.

O relé 3 terá o alcance reduzido e, isto poderá temporizar a atuação da zona de retaguarda.

O relé 4 terá tendência de prolongar o alcance, entretanto não atuará, por causa de sua característica direcional.

O método 3.1 induzirá falsa medida de distância no relé do circuito sem falta e, será prejudicada a seletividade entre os relés 2 e 3.

Se a falta ocorrer na primeira metade do lado da fonte, eles podem atuar simultaneamente.

Os métodos 3.2 e 3.3 permitem comportamento correto do relé, quanto à seletividade, mas não eliminam a possibilidade de atuação não seletiva dos relés 2 e 3 quando o disjuntor 1 está aberto.

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

(1) - V.Narayan, H. Ungrad:

Comportamento de relé de distância sob falta fase-terra em linhas de circuito duplo.

Brown Boveri Review nº 10-1969

(2) - Publicação Siemens 4E 141 840.065,

Erlangen, 12/1969

Correção de erro de medição de distância sob falta fase-terra em linhas de circuito duplo.

(3) - G.I. Atabekov: O relé de proteção

em Linhas de alta tensão.

London - 1960.

COMPORTAMENTO DOS RELÉS DE DISTÂNCIA EM
LINHA DE CIRCUITO DUPLO

DES. LSPereira

DATA 26/02/72

VER.

OPA/STA/SEP

REG. N.º SP / GSP / 05

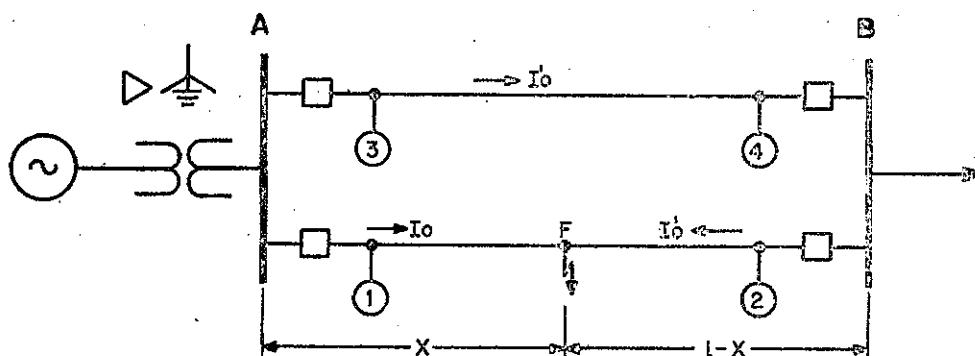


ILUSTRAÇÃO 2.1-1

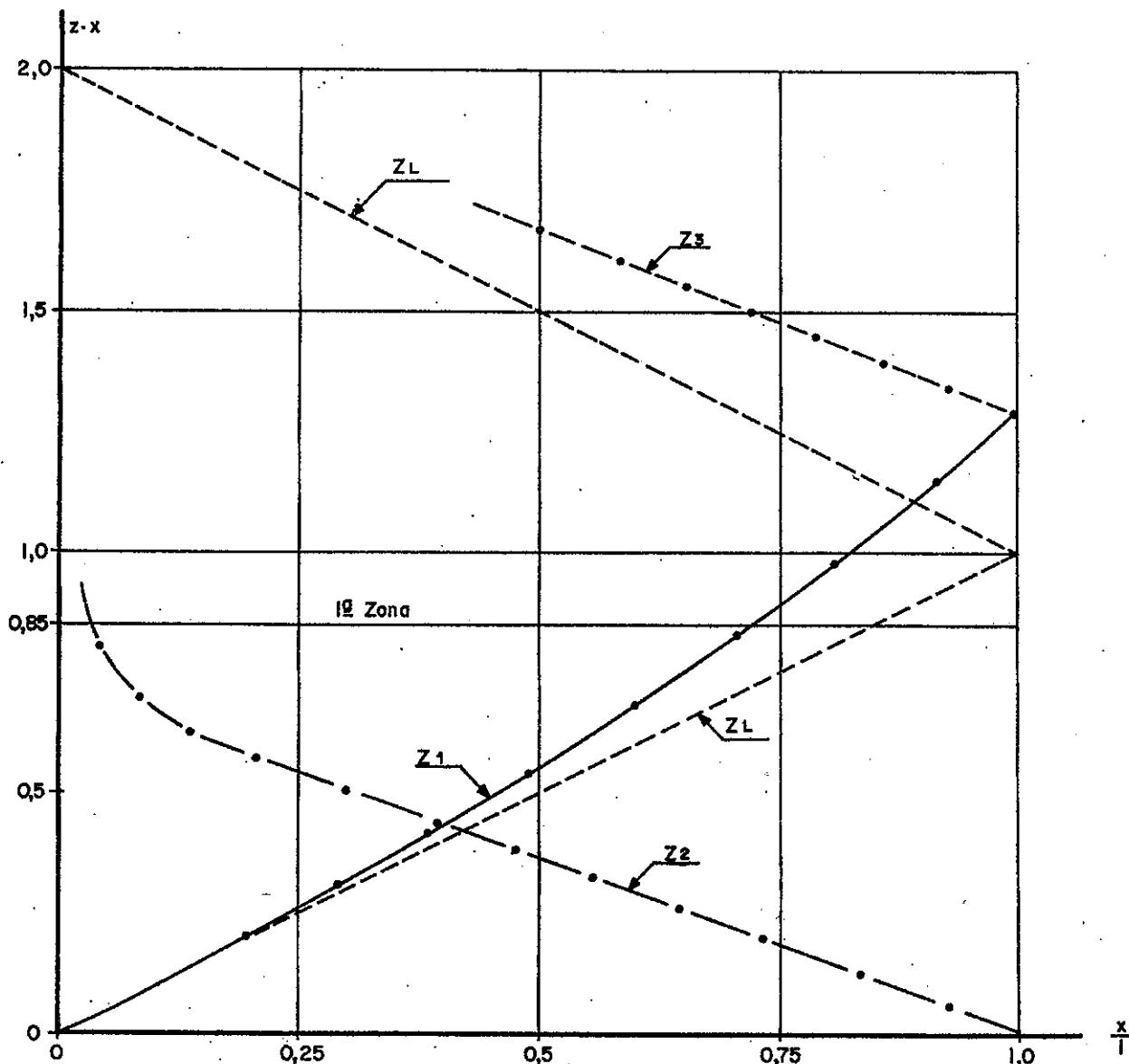


ILUSTRAÇÃO 2.1.4-1 — IMPEDÂNCIA VISTO PELOS RELÉS, SOB FALTA, COM
ALIMENTAÇÃO POR UMA EXTREMIDADE.

Z₁ = IMPEDÂNCIA VISTO PELO RELÉ 1

Z₂ = II II II II 2

Z₃ = II II II II 3

Z_L = II DA LINHA

COMPORTAMENTO DOS RELES DE DISTÂNCIA EM
LINHA DE CIRCUITO DUPLO

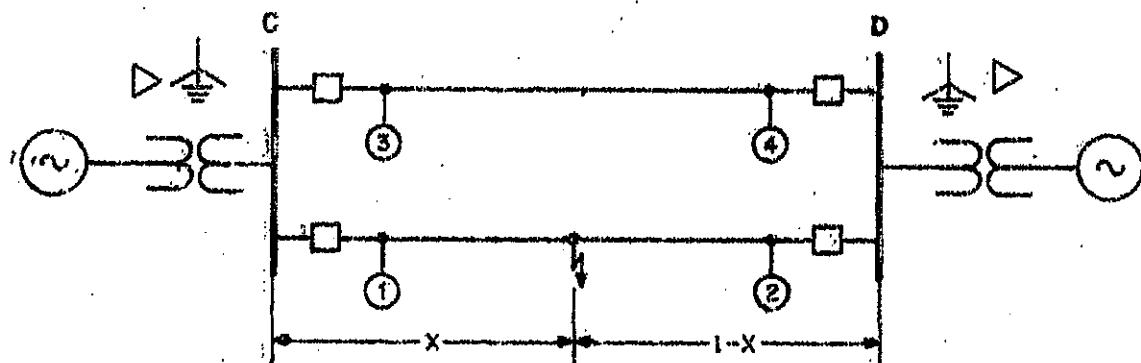
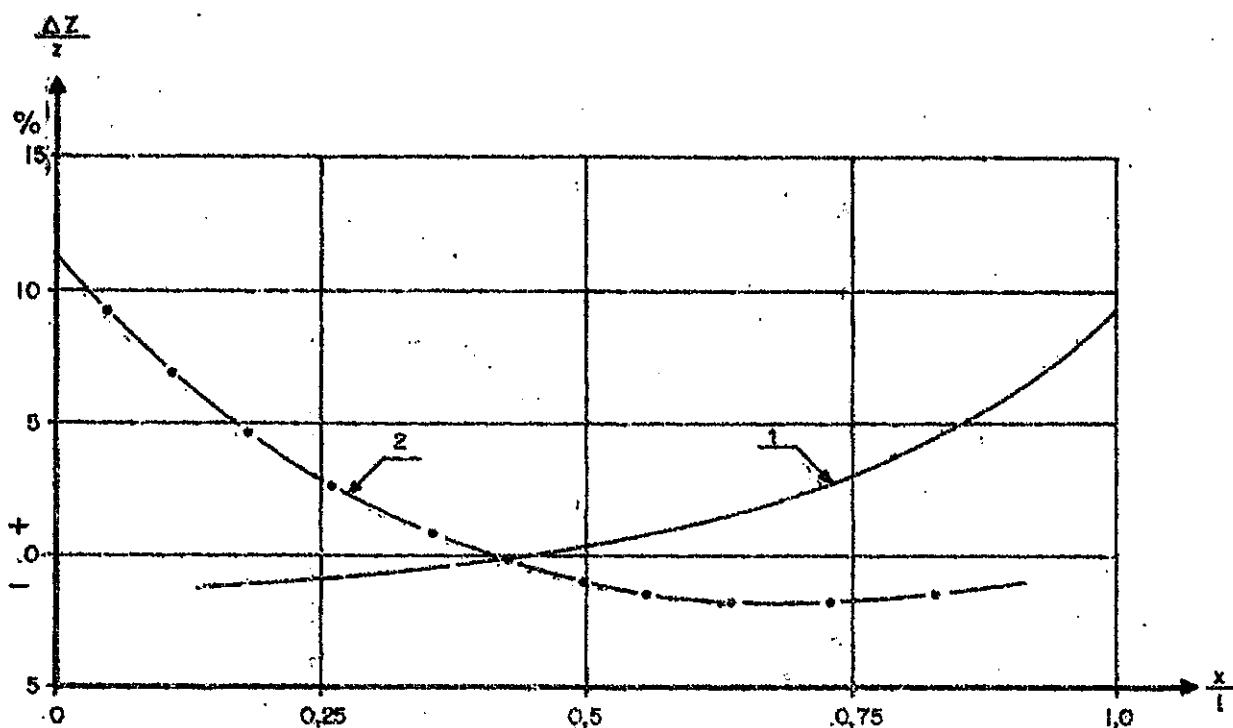
DES. / LSPereira

DATA 28/02/72

VNR. 700

OPA/STA/SEP

PES. N.º SP/GSP/06

ILUSTRAÇÃO 2.2-1ILUSTRAÇÃO 2.2-3-1 — ERRO DE MEDIDAÇĀO DOS RELES 1 e 2, EXPRESSO EM PORCENTAGEM DE $z \cdot x$ (sem compensaçāo), ALIMENTAÇÃO POR AMBAS EXTREMIDADES.

1 = RELE 1

2 = RELE 2

+ = MEDE IMPEDÂNCIA MAIOR QUE A REAL

- = MEDE IMPEDÂNCIA MENOR QUE A REAL

**COMPORTAMENTO DOS RELES DE DISTÂNCIA EM
LINHA DE CIRCUITO DUPLO**

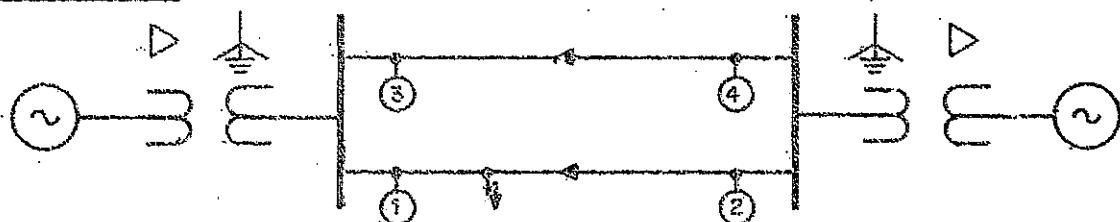
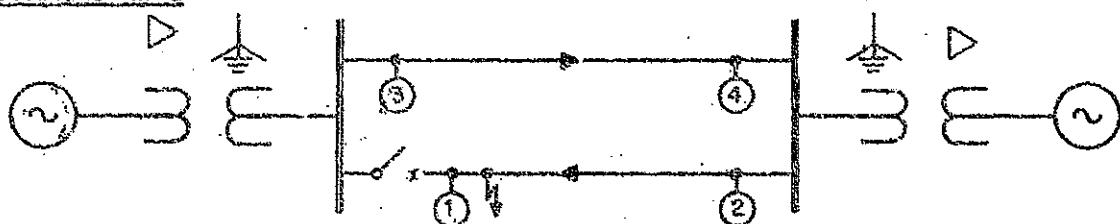
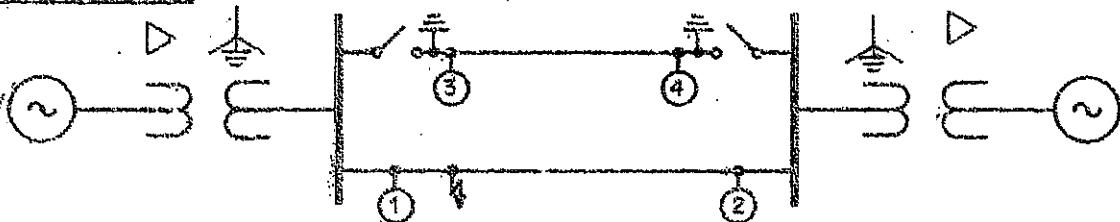
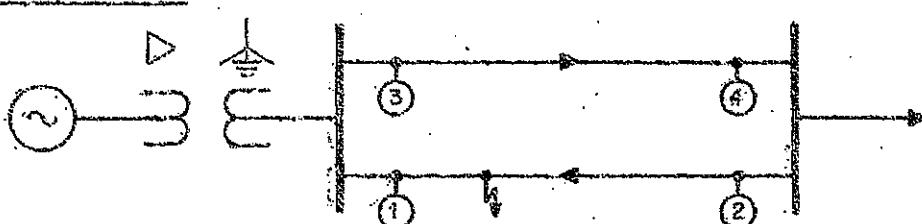
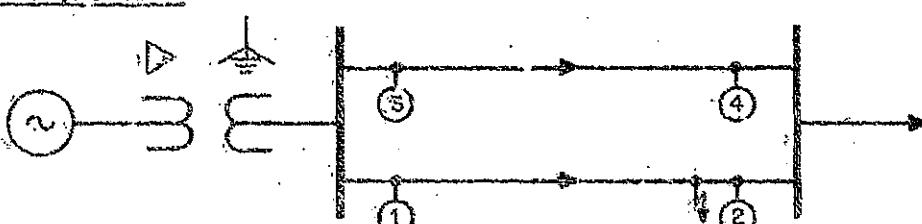
DES. LSPereira

DATA 28/02/72

VER.

OPA/STA/SEP

DES. N.º SP/GSP/05

ILUSTRAÇÃO 4.1-1**ILUSTRAÇÃO 4.1-2****ILUSTRAÇÃO 4.1-3****ILUSTRAÇÃO 4.2-1****ILUSTRAÇÃO 4.2-2****ILUSTRAÇÃO 4.2-3**