SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO
E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

São Paulo, 10/15 de Abril de 1972

GRUPO DE ESTUDOS DE PROTEÇÕES, TELECONTRÔLE E TELECOMUNICAÇÕES

SISTEMA DE 460 kV

TELEPROTEÇÃO E TELEFONIA ATRAVÉS DE "CARRIER"

RELAÇÃO SINAL-RUÍDO x POTÊNCIA DO TRANSMISSOR

Engº Geraldo Borba de Araujo

CENTRAIS ELÉTRICAS DE SÃO PAULO S.A. - CESP

1.0 - INTRODUÇÃO

A necessidade imperiosa de um sistema de proteção confiável para o sistema CESP de 460 kV nos levou a um estudo mais detalhado das diversas variáveis que poderiam influir no desempenho dos equipamentos de teleproteção.

Êsse estudo serviu também para a definição dos equipamentos de telefonia.

O sistema de transmissão adotado foi o "power line carrier" (ou simplesmente "carrier" como é usualmente chamado) pela sua confiabilidade e também porque o número restrito de canais e as distâncias em jôgo tornavam econômicamente inadmissível a adoção de transceptores de micro-ondas.

A análise que se segue tem como objetivo, a determinação da atenuação e do ruído assim como o cálculo da potência do transmissor, para circuitos simples e duplos de 460 kV, de 100 a 350 km de comprimento, com e sem transposições.

A análise também abrange circuitos simples e duplos de 345 kV, de 20 km, sem transposições.

2.0 - CONSIDERAÇÕES GERAIS

O sinal de alta frequência (entre 30 e 500 kHz, dependendo das regulamentações vigentes em cada país) emitido pelo transmissor "carrier", ao percorrer o canal de transmissão que o levará ao receptor, é desviado de sua trajetória desejável e se perde através de impedâncias "shunts" sob forma de bobinas de bloqueio em série com transformadores, isoladores, capacitâncias parasitas, curto-circuitos eventuais, irradiação, reflexões, etc.

Dentre as variáveis que influem na atenuação do canal se destacam:

- frequência
- tipo de construção da linha
- tensão
- diâmetro e nº de condutores
- presença e características dos fios de terra

- transposições
- tipo de acoplamento
- curto-circuitos
- condições climáticas
- poluição dos isoladores

2.1 - Variação da atenuação da linha com a frequência

O nº excessivo de variáveis torna o cálculo da atenuação bastante complexo e, por isso mesmo, prefere-se utilizar gráficos de atenuação (em dB/km) em função da frequência (em kHz).

Êsses gráficos foram obtidos depois de inúmeras medições e cálculos e fornecem uma precisão razoável para a maioria das aplicações.

O gráfico 2.1-1, teve suas ordenadas (originalmente em dB/milhas)convertidas para dB/km para maior facilidade de utilização (1).

2.2 - Variação da atenuação com a tensão da linha

Note-se que a atenuação indicada no gráfico 2.1-1 é válida para linhas de 138 kV. Se a tensão fôr maior, a atenuação será menor e vice-versa. Para que essas variações fôssem computadas no cálculo da atenuação da linha, determinou-se os multiplicadores (1) da tabela 2.2-1.

Êsses multiplicadores devem ser manuseados com um certo cuidado pois circuitos simples e duplos de mesma tensão podem apresentar atenuações distintas. Êsse assunto virá novamente a baila no capítulo 2.8 - Atenuação Calculada x Atenuação Medida.

2.3 - Variação da atenuação com o nº de transposições

Se um sinal de alta frequência de potência P fôr injetado numa linha de um único condutor, observa-se que a potência decresce exponencialmente com a dis -

tância, atingindo 1% P depois de aproximadamente 15 km (6).

Se fizermos a mesma experiência com uma linha de 2 condutores, mantendo a potência P e o acoplamento monofásico, observaremos que o decréscimo de potência já se fará bem mais lentamente e conseguiremos receber 1% P a cêrca de 80 km de distância. Além disso, essa potência de 1% P poderá ser extraída de qualquer um dos condutores.

Se repetirmos a experiência para uma linha de 3 condutores, notaremos que a cêrca de 400 km do transmissor, a potência será de 1% P em qualquer uma das 3 fases.

Dêsses resultados aproximados, conclue-se que a propagação dos sinais de "carrier" em linha de alta tensão depende do número de condutores mesmo se o acoplamento escolhido é o monofásico.

A Análise Modal afirma que a transmissão de um sinal de alta frequência através de um sistema de n fases pode ser considerada como uma transmissão de n componentes, também chamados de "modos naturais de propagação". Cada um dêsses modos é independente e não há transferência de energia entre modos individuais. Cada modo possui sua própria impedância características, sua atenuação constante e sua velocidade de propagação.

Para o simples caso de uma linha horizontal trifásica, distinguem-se 3 modos de propagação distintos, como indicados na figura 2.3-1.

No caso do modo 3, o retôrno se faz pela terra e a atenuação aumenta consideràvelmente. O modo que tem menor atenuação é o modo 1, como se pode verificar pelo gráfico 2.3-2 (2).

Suponhamos, agora, uma linha trifásica de 300 km com uma única transposição equidistante das extremidades.

O acoplamento é monofásico, na fase central, com geração de modos 1 e 3, como indicado na figura 2.3-3.

A análise da figura 2.3-3 nos mostra que:

a) o acoplamento monofásico na fase central gerou os modos 1 e 3.

b) Em virtude da elevada atenuação para o modo 3, seu valor é desprezível nas proximidades da transposição.

c) A transposição reduziu o valor das componentes de modo 1 à metade e gerou componentes de modo 2. Em 150 km, as componentes de modo 2 são praticamente nulas e sòmente as componentes de modo 1 chegam à impedância Z_L. Como correntes e tensões de modo 1 são reduzidas à metade pela transposição e como sòmente as componentes de modo 1 chegam a outra extremidade da linha, deduz-se que a atenuação adicional ocasionada pela transposição foi de

$$20 \log \frac{I_1}{I_{1/2}} = 6 \text{ dB.}$$

Deve-se notar que, logo após a transposição, o sinal é de mesma potência que o sinal imediatamente antes da transposição, desde que não consideremos as reflexões. Essa aproximação é válida pois medidas efetuadas pela Hydro-Electric Power Commission of Ontario num trecho da linha de 500 kV e 370 km de comprimento, revelaram que uma única transposição situada no meio da linha reflete menos que 1% da potência incidente.

Valores práticos (1) conduzem aos seguintes acréscimos totais para a atenuação da linha:

1 transposição	6 dB
2-4 transposições	8 dB

acima de 5 transposições 10 dB

2.4 - Variação da atenuação da linha com o tipo de acoplamento

As componentes modais variam de acôrdo com o tipo de acoplamento. Em outras palavras, a potência do sinal injetado na linha se divide percentualmente entre os diversos modos de propagação, e essa divisão percentual é função do tipo de acoplamento.

Para linhas horizontais trifásicas (6) temos a tabela 2.4-1, onde:

$\eta^{(n)} = \frac{P^{(n)}}{P_i}$ é a eficiência do acoplamento, ou seja, é a relação entre a potência de modo n sôbre a potência incidente.

Baseado na tabela 2.4-1, M.C. Perz conclui:
"Para uma ligação "carrier" a longa distância, é importante que a maior parte da potência incidente seja transformada em modo 1.

Isto pode ser obtido com o acoplamento bifásico do tipo push-pull (quadro E da Tabela 2.4-1) entre as fases externa e central, com a 3a. fase aterrada para as frequências do "carrier". Não há pràticamente potência de modo 3, quase 78% da potência incidente é convertida para o modo 1 e 22% para o modo 2".

A simples mudança do acoplamento push-pull para o push-push (quadro H da tabela 2.4-1) conduz a apenas 2% de modo 1, 20% de modo 2 e 78% de modo 3, extremamente incoveniente para linhas longas.

Êsses 2 tipos de acoplamento (E e H) foram avaliados pela Quebec Hydro-Electric Commission num trecho de linha de 380 km, 735 kV, entre Manicouagan e Levis.- A frequência utilizada foi de 42 kHz e a atenuação - total medida foi de:

16,2 dB para o tipo E (push-pull)

22 dB para o tipo H (push-push)

A pequena diferença decorre do fato da linha possuir 3 transposições, sendo que a 1a. delas dista cêrca de 65 km do transmissor "carrier". Essas 3 transposições, funcionando como conversoras de modos de propagação, proporcionaram uma certa compensação e diminuiram as diferenças que haviam no trecho próximo ao transmissor.

Para efeitos de cálculos aproximados, temos valores práticos (1) para o aumento da atenuação da linha em função do tipo de acoplamento, conforme a tabela 2.4-2.

Além dessa correção que se aplica à atenuação da linha, devemos ainda acrescentar as perdas no acoplamento pròpriamente dito, a saber:

perdas no cabo coaxial
perdas no adaptador de impedância (também chamado de sintonizador de linha)
perdas no dispositivo de proteção
perdas no condensador de acoplamento
perdas na bobina de bloqueio

Essas perdas consomem cêrca de 50 a 75% da potência de saída do transmissor, reduzindo o nível do sinal de 3 a 6 dB por terminal.

2.5 - Variação da atenuação com curto-circuito

Os curto-circuitos exercem maior ou menor influência sôbre a atenuação conforme se localizem:

a) junto ao transmissor
b) junto a uma transposição
c) junto ao receptor

Além disso os curto-circuitos afetam mais ou menos as telecomunicações "carrier" dependendo do tipo de falta (fase-terra, fase-fase, trifásica), da impedância da falta, do tipo de acoplamento, do número de

transposições e do espaçamento entre elas.

2.5.1 - Curto circuitos junto ao transmissor

Um acoplamento monofásico à fase central se tornaria inútil no caso de um curto ligando essa mesma fase à terra nas proximidades do transmissor.

Tal já não seria o caso se o mesmo curto - atingisse a fase central de um sistema com acoplamento bifásico do tipo push-push às fases externas. Êsse curto, ou não alteraria o sinal recebido, ou, no caso de fase central flutuante, até mesmo elevaria o nível do sinal à recepção.

Suponhamos agora um curto fase central-fase-externa-terra junto ao transmissor acoplado às 2 fases externas, como indicado na figura 2.5.1-1.

Se a linha não apresentasse transposições, a atenuação adicional seria de 3 dB (potência cai à metade) + cêrca de 3 dB (admitindo-se que apenas o modo 1 chegasse à recepção) ≅ 6 dB.

O efeito das transposições por ventura existentes estaria na dependência de seu número e espaçamentos entre as mesmas.

Com as transposições levadas em conta, a atenuação adicional produzida pelo curto, variará entre 3 e 10 dB.

2.5.2 - Curto-circuitos junto a uma transposição

O curto-circuito pode ser encarado como uma impedância diferente da impedância característica da linha, que causa reflexões. Se o sinal refletido fôr rico em componentes de modo 1, haverá produção de ondas estacionárias. Se os efeitos das ondas estacionárias não fôrem considerados, o nível do sinal recebido será idêntico ao da linha não curto-circuitada.

2.5.3 - Curto-circuitos junto ao receptor

Um curto circuito numa fase não acoplada ao receptor ou, não afetará o nível do sinal recebido,- ou aumentará êsse nível.

No caso de acoplamento bifásico às fases externas, um curto fase central-fase externa-terra diminuirá a potência do sinal recebido de 3 dB.

A grande diferença entre os efeitos de faltas junto ao transmissor e junto ao receptor é que às últimas reduzem tanto o sinal quanto o ruído, mantendo quase constante a relação sinal-ruído, ao passo que faltas junto ao transmissor reduzem consideràvelmente a relação sinal-ruído.

2.5.4 - Exemplos de curto-circuitos e respectivas atenuações adicionais medidas

2.5.4.1 - Acoplamento monofásico, curto-circuito entre fase acoplada e terra

21 dB de atenuação adicional, há 1.600 metros do transmissor, Bonneville Power Administration.

25 dB de atenuação adicional, há 150 metros do transmissor, Southern Colorado Power Co.

40 dB de atenuação adicional, há 5 metros do transmissor, Bonneville Power Administration.

2.5.4.2 - Acoplamento monofásico, falta trifásica à terra

35 dB de atenuação adicional, há 150 metros do transmissor, Southern Colorado Power Co.

2.5.4.3 - Acoplamento inter-circuitos, curto-circuito num dos condensadores de acoplamento

11,5 dB de atenuação adicional, Public Service Company of Colorado System.

2.5.5 - Valores adotados pelo CIGRÉ

A figura 2.5.5-1 indica os valores práticos de atenuações provocadas por curto-circuitos (9).

As correntes de curto-circuito de 2.500 a 4.000 A, foram produzidas artificialmente, através de conexões metálicas há 800 metros do transmissor.

2.6 - Variação da atenuação da linha com as condições climáticas

Valores práticos para aumento da atenuação da linha durante mau-tempo (1):

- 25% para linhas de tensão maior ou igual a 230 kV
- 50% para linhas de tensão inferior a 230 kV

2.7 - Cálculo da atenuação de uma linha de 460 kV, 350 km, com 6 transposições, para condições climáticas favoráveis baseado nos valores práticos fornecidos pela General Electric Co.

dB/km	x	km	x		+	dB	+	dB	=	dB
atenuação por km (vide gráfico - 2.1-1)		comprimento da linha de transmissão		multiplicador para configuração da linha (vide Tabela 2.2-1)		correção para o tipo de acoplamento		correção para o nº de transposições		atenuação total da linha para tempo-bom

Consideremos: frequência - 100 kHz
acoplamento bifásico

0,062 dB/km x 350 km x 0,54 + 0 dB + 10 dB =21,72 dB
se adicionarmos a atenuação dos acoplamentos 12,00 dB
atenuação total do canal de transmissão 33,72 dB

2.8 - Atenuação Calculada x Atenuação Medida

A atenuação calculada nos parece exagerada ao compararmos êsse valor com o medido pelas seguintes concessionárias de eletricidade:

2.8.1 - CESP - Circuito duplo de 460 kV, 325 km, entre Jupiá e Bauru, frequência de 100 kHz, - acoplamento bifásico entre fases centrais dos dois circuitos de 460 kV, 6 transposições

atenuação total { calculada ≅ 33 dB
medida ≅ 19 dB

É interessante notar que a ligação Jupiá-Bauru é feita com o auxílio de bobinas de bloqueio de 1,265 mH e que, na faixa de 35 kHz a 125 kHz, a atenuação total acusou uma variação de 16 a 19 dB, conforme medições efetuadas por ocasião da instalação - do equipamento "carrier" em novembro de 1969.

Gostaríamos também de assinalar que as medições se fizeram com um dos circuitos energizado e o outro aterrado, o que pode ter contribuído para uma redução da atenuação.

2.8.2 - Quebec Hydro-Electric Commission - Circuito simples de 735 kV, 380 km, entre Manicouagan e Levis, frequência de 42 kHz, acoplamento bifásico, fase central - fase externa, 3 transposições.

atenuação total	Calculada	26 dB
	medida	22 dB

Os dois exemplos acima sugerem o seguinte:

a) os valores práticos da General Electric Co. fornecem uma aproximação melhor no caso de circuito simples. Isso se justifica pois é bem provável que a G.E. tenha construído as suas curvas e tabelas com dados provenientes de medições em linhas americanas e canadenses. Ora, o Edison Electric-Institute em seu "EHV Transmission Line Reference Book" publicado em julho de 1968, apresenta as características técnicas de 21 linhas de 500 kV já construídas ou em vias de execução no período 1962-1968, tanto nos Estados Unidos quanto no Canadá e tôdas elas possuem um único circuito por tôrre de transmissão.

b) 6 dB de perdas no acoplamento bifásico por terminal é provàvelmente um valor excessivo, devendo o valor real se limitar a 3 ou 4 dB, por terminal, na suposição de que as frequências utilizadas estejam contidas dentro da banda da bobina de bloqueio.

São Paulo, fevereiro de 1972

GRÁFICO 2.1—1

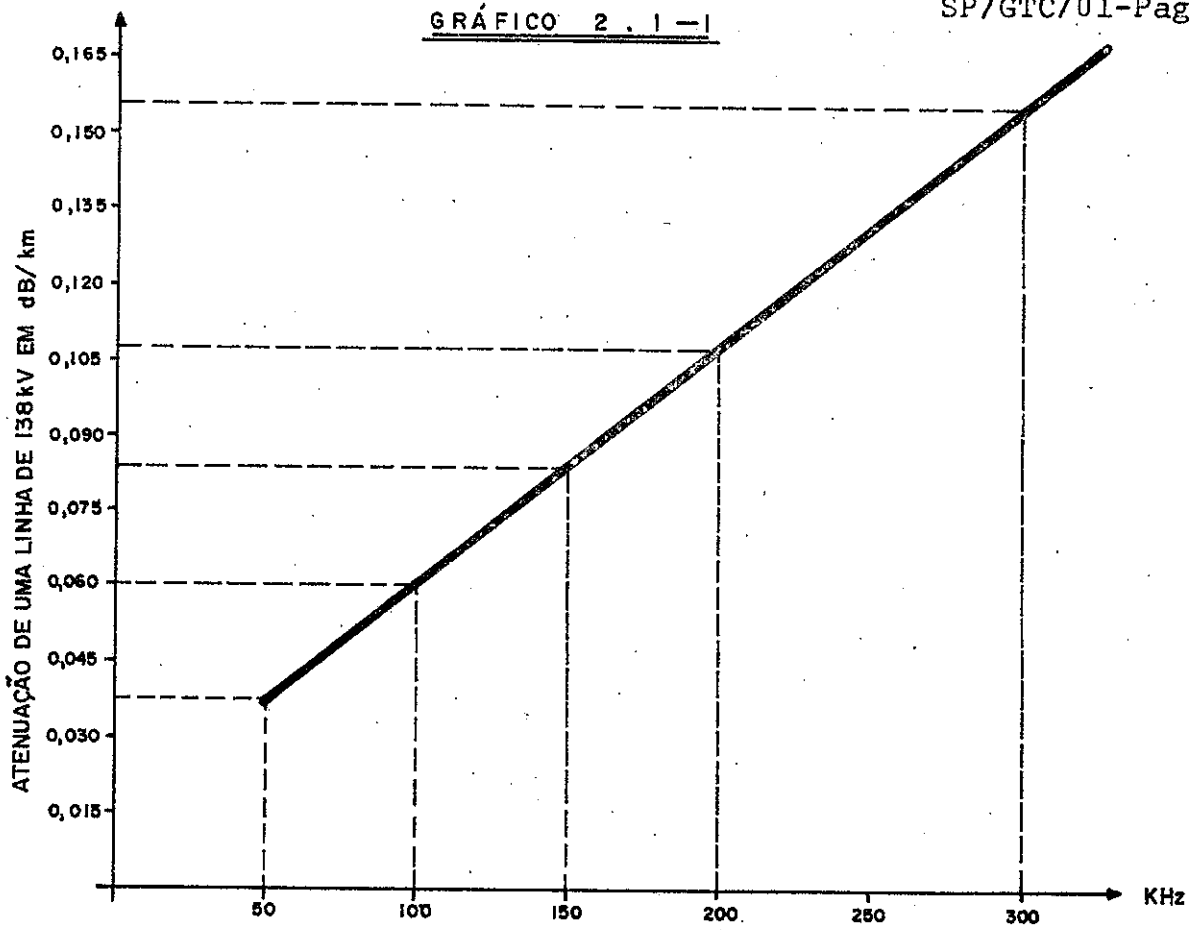


TABELA 2.2—1

TENSÃO DA LINHA	MUTIPLICADOR
34,5 kV	1,46
69 kV	1,20
115 kV	1,11
138 kV	1,00
230 kV	0,78
345 kV	0,72
500 kV	0,54
765 kV	0,50

FIGURA 2.3—1

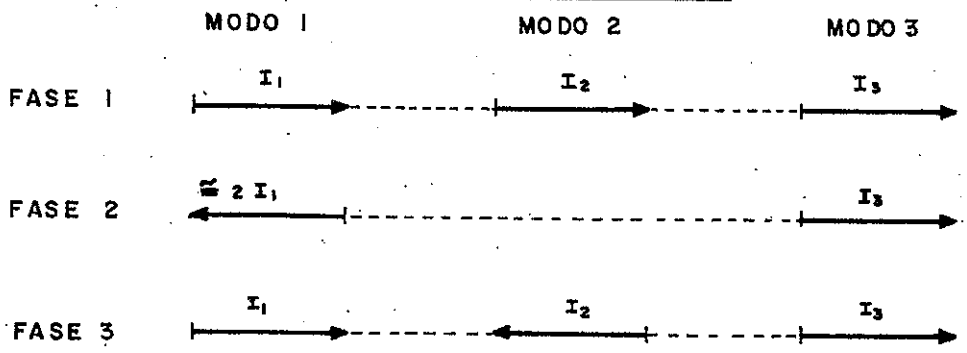


GRÁFICO 2.3-2

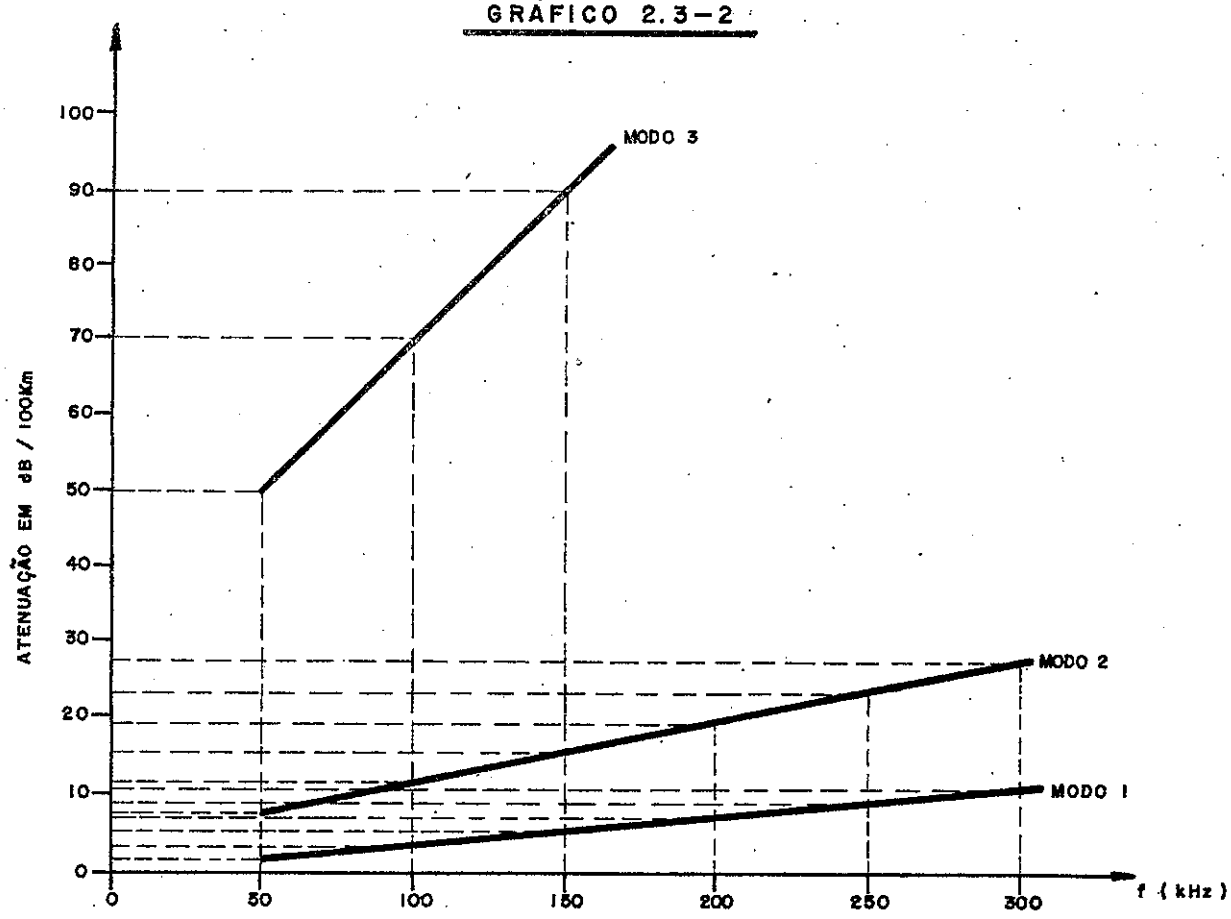
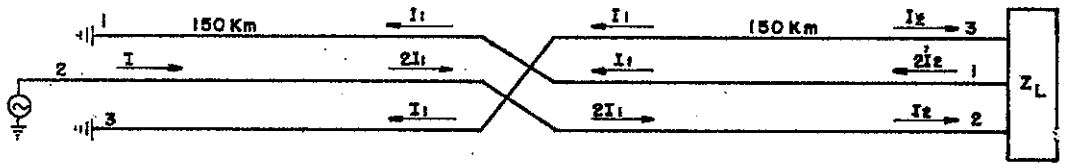


FIGURA 2.3-3



MODO 1	I/3 2I/3 I/3	I1 2I1 I1	0,5 I1 I1 0,5 I1	I2 2I2 I2
MODO 2	0	0	1,5 I1 1,5 I1	≅ 0
MODO 3	I/3	≅ 0	0	0

TABELA 2.4-I

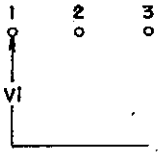
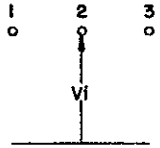
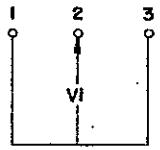
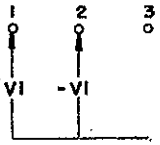
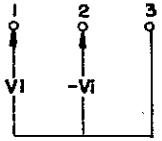
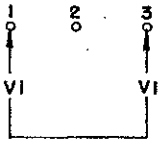
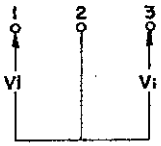
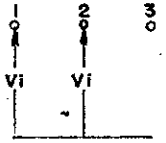
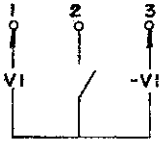
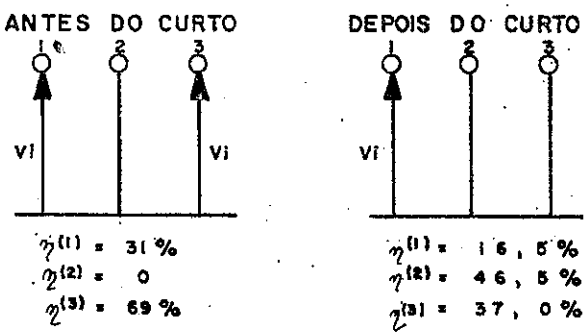
A 	$V_i = V_i = Z_i I_i = 295{,}5 I_i$ $P_i = \frac{V_i^2}{295{,}5}$	$V_i^{(1)} = 0{,}165\ V_i$ $V_i^{(2)} = 0{,}464 V_i$ $V_i^{(3)} = 0{,}371 V_i$	$\eta^{(1)} = 0{,}165\ (-7{,}82\,dB)$ $\eta^{(2)} = 0{,}465\ (-3{,}33\,dB)$ $\eta^{(3)} = 0{,}372\ (-4{,}30\,dB)$
B 	$V_2 = V_i = Z_{22} I_i = 293{,}5 I_2$ $P_i = \frac{V_i^2}{293{,}5}$	$V_i^{(1)} = -0{,}275\ V$ $V_i^{(2)} = 0$ $V_i^{(3)} = 0{,}450\ V$	$\eta^{(1)} = 0{,}457\ (-3{,}40\,dB)$ $\eta^{(2)} = 0$ $\eta^{(3)} = 0{,}543\ (-2{,}66\,dB)$
C 	$V_2 = V_i = Z_i I_i = 276{,}9 I_2$ $P_i = \frac{V_i^2}{276{,}9}$	$V_i^{(1)} = -0{,}349\ V$ $V_i^{(2)} = 0$ $V_i^{(3)} = 0{,}349\ V$	$\eta^{(1)} = 0{,}692\ (-1{,}60\,dB)$ $\eta^{(2)} = 0$ $\eta^{(3)} = 0{,}308\ (-5{,}12\,dB)$
D 	$V_i = V_i = 293{,}9 I_i$ $V_2 = -V_i = 242{,}6 I_2$ $P_i = \frac{V_i^2}{293{,}9} + \frac{V_i^2}{242{,}6}$	$V_i^{(1)} = 0{,}533 V_i$ $V_i^{(2)} = 0{,}562 V_i$ $V_i^{(3)} = -0{,}095\ V_i$	$\eta^{(1)} = 0{,}710\ (-1{,}49\,dB)$ $\eta^{(2)} = 0{,}280\ (-5{,}52\,dB)$ $\eta^{(3)} = 0{,}010\ (-19{,}99\,dB)$
E 	$V_i = V_i = 245{,}1 I_i$ $V_2 = -V_i = 238{,}4 I_2$ $P_i = \frac{V_i^2}{245{,}1} + \frac{V_i^2}{238{,}4}$	$V_i^{(1)} = 0{,}559 V_i$ $V_i^{(2)} = 0{,}500 V_i$ $V_i^{(3)} = -0{,}059 V_i$	$\eta^{(1)} = 0{,}776\ (-1{,}10\,dB)$ $\eta^{(2)} = 0{,}220\ (-6{,}57\,dB)$ $\eta^{(3)} = 0{,}004\ (-24{,}12\,dB)$
F 	$V_i = V_3 = V_i = 316{,}8 I_i = 316{,}8 I_3$ $P_i = 2\frac{V_i^2}{316{,}8}$	$V_i^{(1)} = 0{,}307 V_i$ $V_i^{(2)} = 0$ $V_i^{(3)} = 0{,}693 V_i$	$\eta^{(1)} = 0{,}308\ (-5{,}12\,dB)$ $\eta^{(2)} = 0$ $\eta^{(3)} = 0{,}692\ (-1{,}60\,dB)$
G 	$V_i = V_3 = V_i = 298{,}9 I_i = 298{,}9 I_3$ $P_i = 2\frac{V_i^2}{298{,}9}$	$V_i^{(1)} = 0{,}421 V_i$ $V_i^{(2)} = 0$ $V_i^{(3)} = 0{,}579 V_i$	$\eta^{(1)} = 0{,}543\ (-2{,}66\,dB)$ $\eta^{(2)} = 0$ $\eta^{(3)} = 0{,}457\ (-3{,}40\,dB)$
H 	$V_i = V_i = 344{,}4 I_i$ $V_2 = V_i = 347{,}2 I_2$ $P_i = \frac{V_i^2}{344{,}4} + \frac{V_i^2}{347{,}2}$	$V_i^{(1)} = 0{,}094 V_i$ $V_i^{(2)} = 0{,}395 V_i$ $V_i^{(3)} = 0{,}699 V_i$	$\eta^{(1)} = 0{,}022\ (-16{,}58\,dB)$ $\eta^{(2)} = 0{,}197\ (-7{,}07\,dB)$ $\eta^{(3)} = 0{,}781\ (-1{,}13\,dB)$
I 	$V_i = V_i = 274{,}1 I_i$ $V_3 = -V_i = 274{,}1 I_3$ $P_i = 2\frac{V_i^2}{274{,}1}$	$V_i^{(1)} = 0$ $V_i^{(2)} = V_i$ $V_i^{(3)} = 0$	$\eta^{(1)} = 0$ $\eta^{(2)} = 1{,}000\ (0\,dB)$ $\eta^{(3)} = 0$

TABELA 2.4-2

CORREÇÃO PARA ACOPLAMENTO	
TIPO DE ACOPLAMENTO	CORREÇÃO
FASE CENTRAL — FASE EXTERNA	0 dB
FASE CENTRAL — TERRA	
SEM FIO DE TERRA	8 dB *
FIO DE TERRA DE AÇO	4 dB
FIO DE TERRA DE ALUMINIO OU COBRE	2 dB
FASE EXTERNA — TERRA	
SEM FIO DE TERRA	16 dB *
FIO DE TERRA DE AÇO	12 dB
FIO DE TERRA DE ALUMINIO OU COBRE	10 dB

* SUJEITO A GRANDES VARIAÇÕES

FIGURA 2.5.1-1



1) POTÊNCIA CAI A METADE

2) SURGE MODO 2

3) REDUZ-SE A PARTICIPAÇÃO DOS MODOS 1 e 3

TABELA 2.5.5-1

ANTENUAÇÃO ADICIONAL APROXIMADA PRODUZIDA POR CURTO — CIRCUITOS MOSTRANDO O COMPORTAMENTO COMPARATIVO - DOS ACOPLAMENTOS FASE-TERRA e FASE — FASE

TIPO DE FALTA	NO CONDUTOR	TIPO DE ACOPLAMENTO	
		FASE-TERRA	FASE-FASE
FASE-TERRA	NÃO ACOPLADO	5 dB	1,7 dB
FASE-TERRA	UM CONDUTOR ACOPLADO	14 dB	4,3 dB
FASE-FASE	UM CONDUTOR ACOPLADO	10 dB	3,5 dB
FASE—FASE	DOIS CONDUTORES ACOPLADOS	20 dB	13 dB
TRIFASICA-TERRA	DOIS CONDUTORES ACOPLADOS		22 dB
BARRA ÔNIBUS FASE-FASE	DOIS CONDUTORES ACOPLADOS		30 dB
NO CONDENSADOR DE ACOPLAMENTO	DOIS CONDUTORES ACOPLADOS		45 dB OU MAIOR