

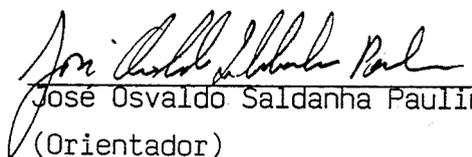
"INDUÇÃO MAGNÉTICA DE LINHAS DE ENERGIA ELÉTRICA EM LINHAS
DE TELECOMUNICAÇÕES"

ENG^o CÉLIO FONSECA BARBOSA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA, DESIGNADA PELO COLEGIADO DO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS À OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS.

Aprovada em: 01 de Julho de 1988

Por:


José Osvaldo Saldanha Paulino
(Orientador)

Ms.C. CPGEÉ - Prof. CPGEÉ/UFMG


Rodney Rezende Saldanha

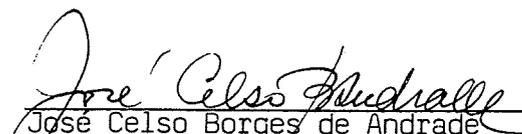
Ms.C. CPGEÉ - Prof. CPGEÉ/UFMG


Mário Fabiano Alves

Ph.D. - University of Toronto
Canadá


Benjamim Rodrigues Menezes

D.Ing. Nancy/FR - Prof. CPGEÉ/UFMG


José Celso Borges de Andrade

D.Ing. - UPS - Toulouse - FR
Prof. CPGEÉ/UFMG

INDUÇÃO MAGNÉTICA DE LINHAS DE ENERGIA

ELÉTRICA EM LINHAS DE TELECOMUNICAÇÕES

Célio Fonseca Barbosa

AGRADECIMENTOS

Ao Professor José Osvaldo Saldanha Paulino pela orientação.

A Telecomunicações Brasileiras S.A. (TELEBRÁS) pelo suporte técnico e financeiro deste trabalho.

À Telecomunicações de Minas Gerais S.A. (TELEMIG) e à Telecomunicações de São Paulo S.A. (TELESP) pelo fornecimento da infra-estrutura necessária para as experiências assim como de informações importantes sobre os sistemas de telecomunicções.

A todo o pessoal do Laboratório de Extra Alta Tensão da EE. UFMG e em especial ao Professor Rodney Resende Saldanha, pelo incentivo.

"Destes tempos em que falar de
árvores é quase um crime, pois
implica em silenciar sobre tan
tos erros - aos que virão de-
pois de mim."

Bertold Brecht

SUMÁRIO

	Página
INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 1 - A ORIGEM DAS TENSÕES ESTRANHAS	8
1.1 - Linhas de Energia Elétrica	8
1.1.1 - Contato Metálico com Condutores de Energia Elétrica	8
1.1.2 - Acoplamento Condutivo através dos Sistemas de Aterramento	11
1.1.3 - Indução Elétrica	13
1.1.4 - Indução Magnética	14
1.2 - Descargas Atmosféricas	16
1.2.1 - Descargas Atmosféricas Diretas ..	16
1.2.2 - Descargas Atmosféricas Indiretas.	18
1.3 - Outras Origens de Tensões Estranhas	20
1.3.1 - Emissoras de Rádio-Difusão	20
1.3.2 - Pulsos Eletromagnéticos Nucleares	20
1.3.3 - Tempestades Magnéticas	22
1.3.4 - Descargas de Eletricidade Estáti- ca	22

CAPÍTULO 2 - DESCRIÇÃO GERAL DAS REDES DE TELECOMUNICAÇÕES	24
2.1 - A Rede Local	24
2.2 - Terminações do Par Telefônico	28
2.2.1 - Pares Referenciados à Terra	29
2.2.2 - Pares de Potencial Flutuante	32
2.3 - Características Construtivas das Linhas de Telecomunicações	33
2.3.1 - Cabos	34
2.3.2 - Fios Externos	36
2.3.3 - Linhas de Fio Nu	37
2.4 - Comprimentos Típicos das Linhas de Telecomunicações	38
CAPÍTULO 3 - DESCRIÇÃO GERAL DAS REDES DE ENERGIA ELÉTRICA	40
3.1 - Tipos de Linhas de Energia Elétrica	40
3.1.1 - Transmissão e Subtransmissão	41
3.1.2 - Distribuição	42
3.1.3 - Tração Elétrica	43
3.2 - Modos de Operação das Linhas	44
3.2.1 - Linhas em Regime Permanente	44
3.2.2 - Linhas em Regime Transitório	47
3.3 - Frequência da Corrente Indutora	50

CAPÍTULO 4 - O PROCESSO DE INDUÇÃO MAGNÉTICA	53
4.1 - As Etapas	53
4.2 - O Processo	60
CAPÍTULO 5 - IMPEDÂNCIA MÚTUA E FORÇA ELETROMOTRIZ INDUZIDA	64
5.1 - Impedâncias de Circuitos com Retorno por Terra	64
5.2 - Distribuição de Corrente na Terra	67
5.3 - Impedâncias Próprias e Mútuas	71
5.3.1 - Impedâncias Próprias	73
5.3.2 - Impedâncias Mútuas	76
5.4 - Medições de Forças Eletromotrizes Induzi- das	77
CAPÍTULO 6 - FATOR DE BLINDAGEM E FORÇA ELETROMO- TRIZ RESULTANTE	79
6.1 - A Teoria da Blindagem Magnética	79
6.2 - Aspectos Relevantes no Efeito de Blindagem gem	81
6.2.1 - Posição Relativa do Condutor de Blindagem	81
6.2.2 - Material do Condutor de Blindagem	81
6.2.3 - Resistências de Aterramento da Blindagem	84

6.3 - Multiaterramento da Blindagem	85
6.4 - Tipos de Fator de Blindagem	87
6.5 - O Fator de Blindagem na Rede Local	90
CAPÍTULO 7 - FATOR DE CIRCUITO LONGITUDINAL E TEN- SÃO LONGITUDINAL	95
7.1 - Distribuição do Fator de Circuito Longitu- dinal	95
7.1.1 - Condutores Referenciados à Terra em uma Extremidade	95
7.1.2 - Condutores de Potencial Flutuante	97
7.1.3 - Condutores com Ambas as Extremida- des Conectadas à Terra	100
7.1.4 - Modificações do Circuito Longitu- dinal Durante a Atuação de Cente- lhadores	102
7.2 - Problemas Causados pela Tensão Longitudi- nal e seus Limites	105
7.2.1 - Segurança Pessoal	105
7.2.2 - Danos à Rede e aos Equipamentos .	108
7.2.3 - Interferência na Operação do Sis- tema	110
7.3 - Medições de Tensões Longitudinais	110

CAPÍTULO 8 - FATOR DE RUÍDO E TENSÃO TRANSVERSAL .	116
8.1 - O Modelo do Fator de Ruído	116
8.2 - Verificação Teórico-Experimental	119
8.3 - Sensibilidade do Fator de Ruído às Modifi- cações na Rede	123
8.3.1 - Aterramento da Blindagem	123
8.3.2 - Vinculações das Blindagens dos Ca- bos	125
8.3.3 - Balanceamento do Cabo na Estação.	125
8.4 - Problemas Causados pela Tensão Transver- sal e seus Limites	127
8.4.1 - Riscos à Segurança Pessoal ou de Dano aos Equipamentos	127
8.4.2 - Interferência com o Funcionamento de Equipamentos	128
8.5 - Medições de Tensões Transversais	129
 CAPÍTULO 9 - FATOR PSOFOMÉTRICO E TENSÃO TRANSVER- SAL PSOFOMÉTRICA	 132
9.1 - A Resposta em Frequência do Ouvido Humano	132
9.1.1 - Os Testes	132
9.1.2 - As Ponderações	135
9.3 - Os Problemas Causados pela Tensão Trans- versal Psófométrica e seus Limites	139
9.4 - Medições de Tensões Transversais Psófomé- tricas	140

CONCLUSÃO	144
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	147
APÊNDICE 1 - EQUAÇÕES DE RÜDENBERG	155
APÊNDICE 2 - DADOS DE BLINDAGENS DE CABOS TELEFÔNI COS	161
APÊNDICE 3 - FATORES PSOFOMÉTRICOS	163

RESUMO

A indução magnética provocada por linhas de energia elétrica em linhas de telecomunicações é um fenômeno que tem causado muitos problemas para as companhias de telecomunicações, como a depreciação ou interrupção do serviço prestado pelas mesmas.

Uma condição necessária para a solução destes problemas é a compreensão teórica do fenômeno, a qual é dificultada por tratar-se de um assunto que envolve simultaneamente conceitos de Sistemas Elétricos de Potência e de Sistemas de Telecomunicações. Dessa forma, este trabalho situa-se na interface destas duas áreas da engenharia, abordando as redes de energia elétrica e telecomunicações como um único sistema.

A Introdução do trabalho descreve as implicações gerais da indução magnética e faz um histórico da evolução dos estudos sobre a mesma. No Capítulo 1 é feita a inserção deste fenômeno dentro do universo das tensões que podem ser impostas a uma linha de telecomunicações por fontes externas.

Os Capítulos 2 e 3 descrevem de forma geral

as redes de telecomunicações e energia elétrica, respectivamente, criando uma base conceitual comum para o desenvolvimento do trabalho.

O Capítulo 4 divide o fenômeno da indução magnética em etapas, as quais são encadeadas de forma a compor um processo.

Os Capítulos 5, 6, 7, 8 e 9 se dedicam à análise de cada uma destas etapas de forma objetiva. Nestes Capítulos os resultados experimentais do autor e de outros pesquisadores são inseridos dentro de uma mesma estrutura teórica, dando consistência ao processo da indução magnética proposto neste trabalho.

INTRODUÇÃO

Embora o fenômeno elétrico tenha sido descoberto no século VI A.C., só a partir do século XIX a eletricidade passou a ser utilizada como meio de transporte de energia e informações. Como resultado dos inúmeros desenvolvimentos técnicos que se sucederam desde então, a eletricidade passou a ser indispensável na vida cotidiana da humanidade.

Os sofisticados sistemas de telecomunicações da atualidade chegam a trabalhar com potências da ordem de dezenas de microwatts, enquanto os sistemas de energia elétrica operam com potências de vários milhões de quilowatts. A relação entre as potências destes sistemas chega a cerca de 10^{14} vezes, o que faz com que os problemas de interferência venham se tornando cada vez mais críticos, já que as redes de energia elétrica e telecomunicações são necessariamente instaladas próximas umas das outras.

Com o desenvolvimento dos sistemas de energia elétrica e telecomunicações diversos problemas relativos à influência dos primeiros sobre os últimos foram se fazendo notar. De um lado, com o crescimento dos sistemas de energia elétrica, passou-se a ter na área de transmissão exten-

sas linhas de elevada potência em corrente alternada, assim como linhas em corrente contínua com retorno contingencial pela terra. Na área de distribuição, o crescimento dos centros urbanos deu origem a ramais alimentadores de alta potência, freqüentemente alimentando cargas não lineares (retificadores, fornos a arco, controladores de potência, etc...).

Do lado do sistema de telecomunicações, o desenvolvimento tecnológico na área de estado sólido deu origem à tendência, cada dia mais acentuada, de se incorporar equipamentos eletrônicos aos circuitos de telecomunicações. Estes equipamentos, em que pese a sua grande eficiência em serviço, são bastante sensíveis à interferência. Tal tendência se manifesta não apenas na área de transmissão, como também na área de comutação, através da utilização de centrais eletrônicas (CPA's) em lugar das eletromecânicas. Também no lado do assinante tem-se uma crescente utilização de aparelhos eletrônicos, como telex, telefones eletrônicos, sistemas KS, processadores de dados, vídeo texto, etc... Esta tendência se faz no sentido de transformar a atual rede telefônica na futura rede digital de serviços integrados .. (RDSI).

Dessa forma, não só os sistemas de energia elétrica vêm aumentando a sua capacidade de influência, como

os sistemas de telecomunicações vêm se tornando cada dia mais sensíveis à mesma.

Para fazer face a estas transformações, necessário se faz dotar os sistemas de telecomunicações de características tais que os permitam manter elevado padrão de serviço a custo relativamente baixo. Para tal, é de fundamental importância o conhecimento dos processos pelos quais se dá a influência, para que então se possa adaptar os procedimentos de proteção elétrica hoje em uso, a fim de compatibilizá-los com os novos requisitos resultantes da evolução dos sistemas.

Historicamente, os primeiros esforços de investigação dos processos pelos quais os sistemas de energia elétrica influem sobre os sistemas de telecomunicações datam do início deste século, quando o então incipiente sistema de telecomunicações demandou estudos de especialistas com o objetivo de melhorar o seu desempenho. Datam desta época os trabalhos de Osborne (1), (2) assim como os hoje clássicos artigos de Rüdenberg (3) e Carson (4), estes últimos modelizando o fenômeno da indução magnética.

Destes estudos evidenciou-se a necessidade da conjugação de esforços entre as empresas de energia elétrica e telecomunicações visando o conhecimento dos processos

de influência, assim como o desenvolvimento de métodos visando a compatibilização dos sistemas.

Neste sentido, no final da década de 20, foi constituído nos Estados Unidos da América o Comitê Geral Conjunto congregando as empresas de energia elétrica e telecomunicações do país. Vinculado a este comitê foi criado o Subcomitê Conjunto de Pesquisa e Desenvolvimento, o qual, durante os seus mais de 20 anos de vigência, proporcionou um progresso significativo neste campo do conhecimento, através da emissão de 50 relatórios de engenharia (5).

Muitas das características dos sistemas de energia elétrica e telecomunicações em todo o mundo foram determinadas por estes estudos. Isto é particularmente verdadeiro no Brasil, devido à origem norte-americana de grande parte destes sistemas. No entanto, a dinâmica da evolução tecnológica, aliada às particularidades regionais, fazem com que os problemas relativos à influência constituam-se em um constante desafio às equipes técnicas das concessionárias.

O Comitê Consultivo Internacional Telegráfico e Telefônico (CCITT), filiado à União Internacional de Telecomunicações (UIT), tem dedicado especial atenção ao assunto. Em 1963 foi emitido um manual relativo à coordenação

entre linhas de energia elétrica e telecomunicações (6), o qual tem sido periodicamente revisto. Essas versões, assim como outras recomendações, são elaboradas com base nas contribuições do Grupo V, que estuda a proteção elétrica dos sistemas de telecomunicações.

As empresas do Sistema TELEBRÁS também têm se dedicado ao estudo destes problemas, através da elaboração de práticas e emissão de relatórios. Dentre estes trabalhos destacam-se (7) e (8), ambos se dedicando à análise da indução magnética.

Uma importante contribuição neste campo foi realizada em 1979 com a emissão de Norma Técnica pela ABNT (9), vindo preencher uma lacuna até então existente.

Em 1982, com a criação da Gerência de Redes Externas do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento (CPqD) da TELEBRÁS, foi feita uma pesquisa junto às empresas do Sistema TELEBRÁS visando determinar metas prioritárias a serem perseguidas pela nova gerência. Dentre as prioridades estabelecidas se encontrava a Proteção Elétrica, que vem a ser o conjunto de procedimentos e materiais a serem utilizados no sistema visando a sua compatibilização com o ambiente elétrico.

Dessa forma, foi constituído junto ao CPqD o Programa de Estudo e Desenvolvimento de Redes, dentro do qual tem-se o Projeto de Proteção Elétrica. Uma das primeiras ações deste projeto foi o estabelecimento, no segundo semestre de 1983, de um convênio com a Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, através da Fundação Christiano Ottoni, e a Telecomunicações de Minas Gerais - TELEMIG, visando o desenvolvimento de estudos teórico-experimentais sobre a caracterização do ambiente elétrico a que estão sujeitas as redes de telecomunicações.

Os trabalhos deste convênio foram se diversificando em áreas distintas de modo que, dentro do pleno interesse das partes, os vínculos contratuais perduram até a presente data. Nestes quase quatro anos de trabalho foram investigados os mais diversos problemas de proteção elétrica, tendo sido emitidos 12 relatórios de pesquisa.

Desde o início do convênio estes estudos estiveram intimamente relacionados com o Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG, o que se deu de diversas formas, como a participação de engenheiros do Sistema TELEBRÁS em cadeiras do curso, incorporação de assuntos relevantes da pesquisa nas ementas, manutenção de bolsistas e elaboração de trabalhos acadêmicos.

Dentro deste contexto, este trabalho vem a ser uma síntese do estudo teórico-experimental sobre a indução magnética executado neste convênio. A sua elaboração foi motivada pelos objetivos de se acrescentar uma parcela ao processo acadêmico, enquanto dissertação de mestrado, e de fornecer subsídios que possibilitem a obtenção da coordenação indutiva de maneira eficiente.

CAPÍTULO 1 - A ORIGEM DAS TENSÕES ESTRANHAS

Define-se como tensão estranha todas as tensões que se estabeleçam entre dois condutores do sistema de telecomunicações ou entre um condutor e a terra, que não estejam relacionadas com o funcionamento do mesmo e sejam impostas por uma fonte externa ao sistema.

Para efeito de análise as tensões estranhas são classificadas como aquelas originadas por linhas de energia elétrica, por descargas atmosféricas e por outras causas de natureza diversa.

1.1 - Linhas de Energia Elétrica

1.1.1 - Contato Metálico com Condutores de Energia Elétrica

Consiste no contato acidental de um condutor da rede de energia elétrica com um condutor da rede de telecomunicações. Este contato pode se dar de várias maneiras, sendo as mais comuns a queda do condutor de energia sobre uma linha de telecomunicações devido à sua ruptura e a falha do isolamento entre estes condutores nos postes de uso mútuo.

Bodle (10) reporta a seguinte distribuição da localização dos contatos, segundo a experiência da Bell Canadá:

71% nos postes de uso-mútuo
21% nos vãos de uso-mútuo ou cruzamentos
8% não especificados.

Ainda segundo Bodle, a freqüência dos contatos metálicos nas redes da Bell Canadá situa-se em 2,5 contatos por mil quilômetros de linha aérea por ano.

Embora não se tenha estatísticas a respeito deste fenômeno nas redes do Sistema TELEBRÁS, pode-se avaliar que a freqüência dos contatos é superior ao reportado por Bodle, devido às diferenças construtivas das redes.

A figura 1.1 mostra o caminho da descarga elétrica de uma fase de uma linha primária de distribuição até o cabo telefônico instalado no mesmo poste.

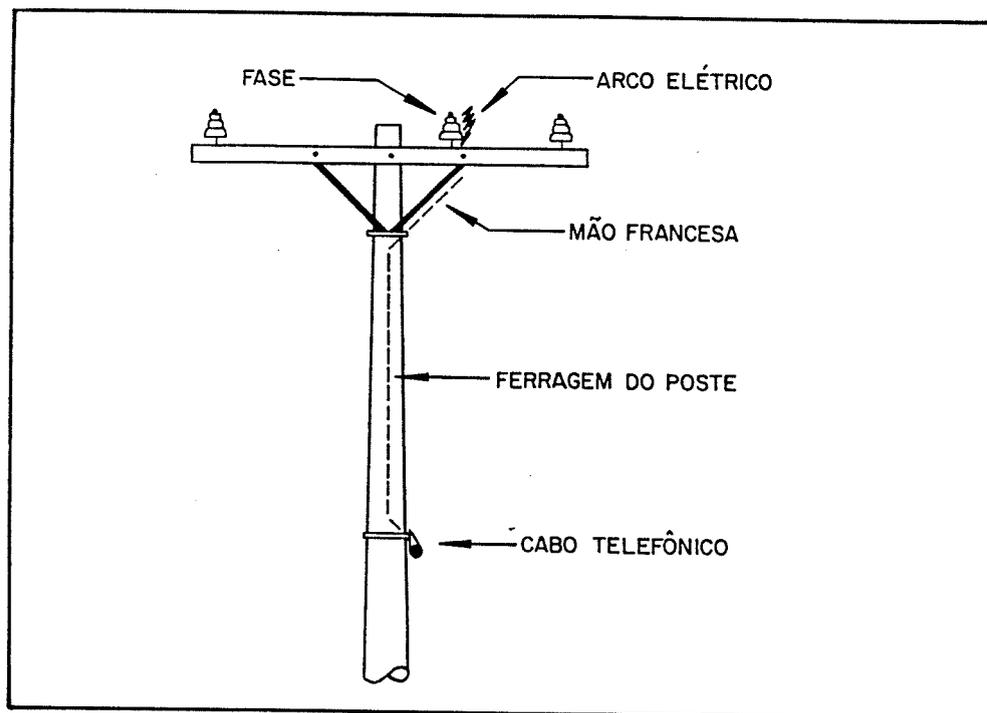


Figura 1.1 - Caminho Típico de Descarga Elétrica em Posteação de Uso-Mútuo.

Diversos aspectos construtivos das redes levam a diferentes freqüências de ocorrência de danos devido ao contato metálico. A título de exemplo pode-se citar:

- nos estados do Nordeste a utilização de postes pequenos deixa pouco espaço para as redes, levando a uma alta incidência de contatos com as fases da baixa tensão de distribuição;
- em Minas Gerais a TELEMIG optou por isolar a sua rede dos

postes de uso-mútuo, com o que reduziu significativamente a ocorrência de danos devido ao contato metálico;

Esta origem de tensões estranhas foi estudada no Convênio TELEBRÁS-UFMG citado na Introdução deste trabalho, sendo os principais aspectos analisados em (11).

1.1.2 - Acoplamento Condutivo através dos Sistemas de Aterramento

Quando uma corrente é drenada para a terra através de um sistema de aterramento ela estabelece um gradiente de potencial nas proximidades do mesmo, definindo su perfícies equipotenciais na terra. Caso um aterramento da rede de telecomunicações intercepte uma superfície equipotencial criada por um aterramento da rede de energia elétrica, uma tensão estranha será aplicada na rede de telecomunicações.

Este fenômeno é importante nas proximidades das subestações de energia elétrica assim como dos aterramentos do neutro das linhas de distribuição. Os procedimentos recomendados para a construção de aterramentos das linhas de telecomunicações são no sentido de localizá-los fo ra das zonas de influência dos aterramentos dos sistemas de energia elétrica.

Um caso especial e bastante sério consiste no eletrodo de aterramento do sistema CCAT de Itaipu, o qual pode contingencialmente drenar a corrente nominal de uma das fases. A figura 1.2 mostra as equipotenciais criadas por este eletrodo, segundo (12).

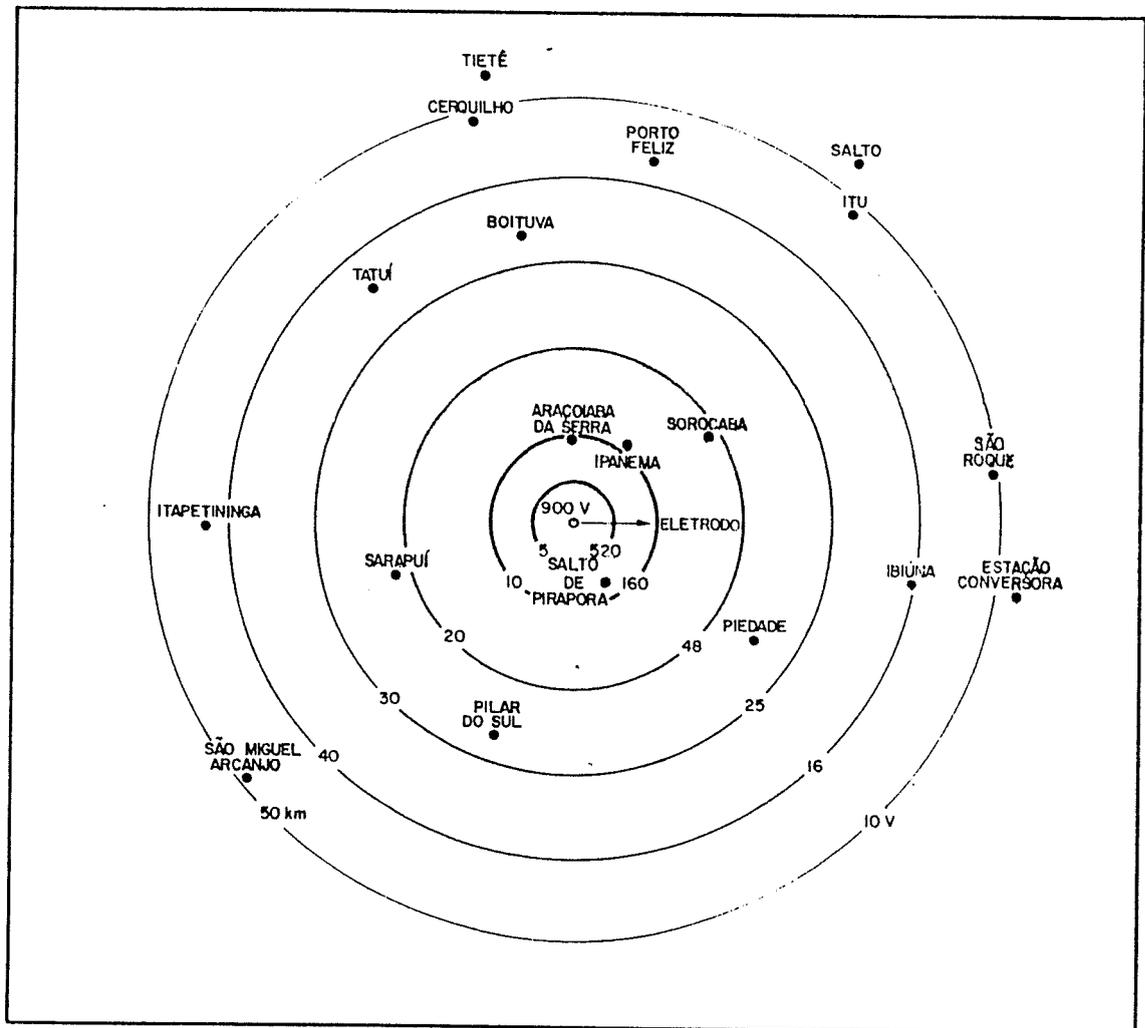


Figura 1.2 - Equipotenciais Criadas pelo Eletrodo de Terra de Itaipu.

Observe-se que um cabo telefônico que interliga as cidades de Araçoiaba da Serra e Sorocaba, por exemplo, estará submetido a uma tensão de cerca de 110 V.

1.1.3 - Indução Elétrica

Consiste no acoplamento capacitivo entre um condutor da linha de energia elétrica e a linha de telecomunicações.

A figura 1.3 mostra o mapeamento de equipotenciais para uma linha monofilar com retorno por terra (MRT), a qual tem sido utilizada na eletrificação rural de alguns

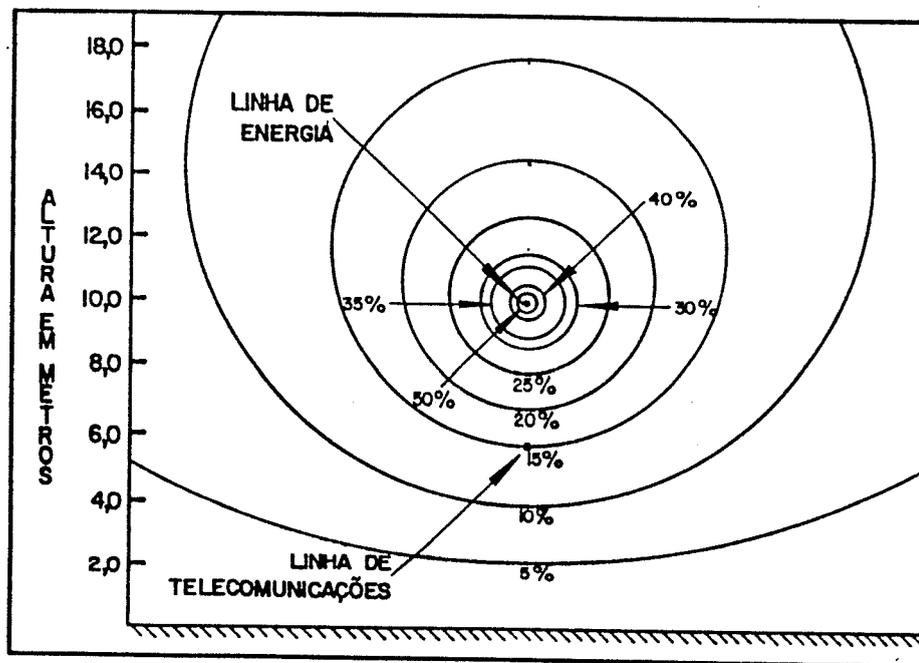


Figura 1.3 - Equipotenciais Criadas por uma Linha MRT.

estados. Observe-se que para uma tensão de operação de 8,0 kV fase/terra, uma linha de telecomunicações sem referência de terra e localizada conforme a figura 1.3 está sujeita a uma tensão induzida de 1,2 kV.

Este tipo de indução é eficientemente atenuada ao se referenciar os condutores à terra ou ao se blindar a linha.

Recentemente ocorreram problemas de choque elétrico em funcionários de uma empresa de telecomunicações quando do lançamento de cabos tipo CCE-APL-ASF em uso-mútuo com linha de distribuição monofásica. Como os condutores ficam com o potencial flutuante durante o processo de instalação, a indução elétrica impõe uma grande diferença de potencial do cabo em relação à terra. O problema foi solucionado com o procedimento de se aterrar a blindagem do cabo logo no início do lançamento da bobina.

1.1.4 - Indução Magnética

Esta fonte de tensões estranhas é o tema deste trabalho e consiste na imposição de tensões nas linhas de telecomunicações devido ao acoplamento magnético com linhas de energia elétrica.

A indução magnética é provavelmente a fonte de tensões estranhas que mais problemas causa para as companhias de telecomunicações, sendo um fenômeno característico de linhas com longos paralelismos com linhas de energia elétrica que tenham parte da corrente fluindo pela terra.

A figura 1.4 mostra o lugar geométrico das

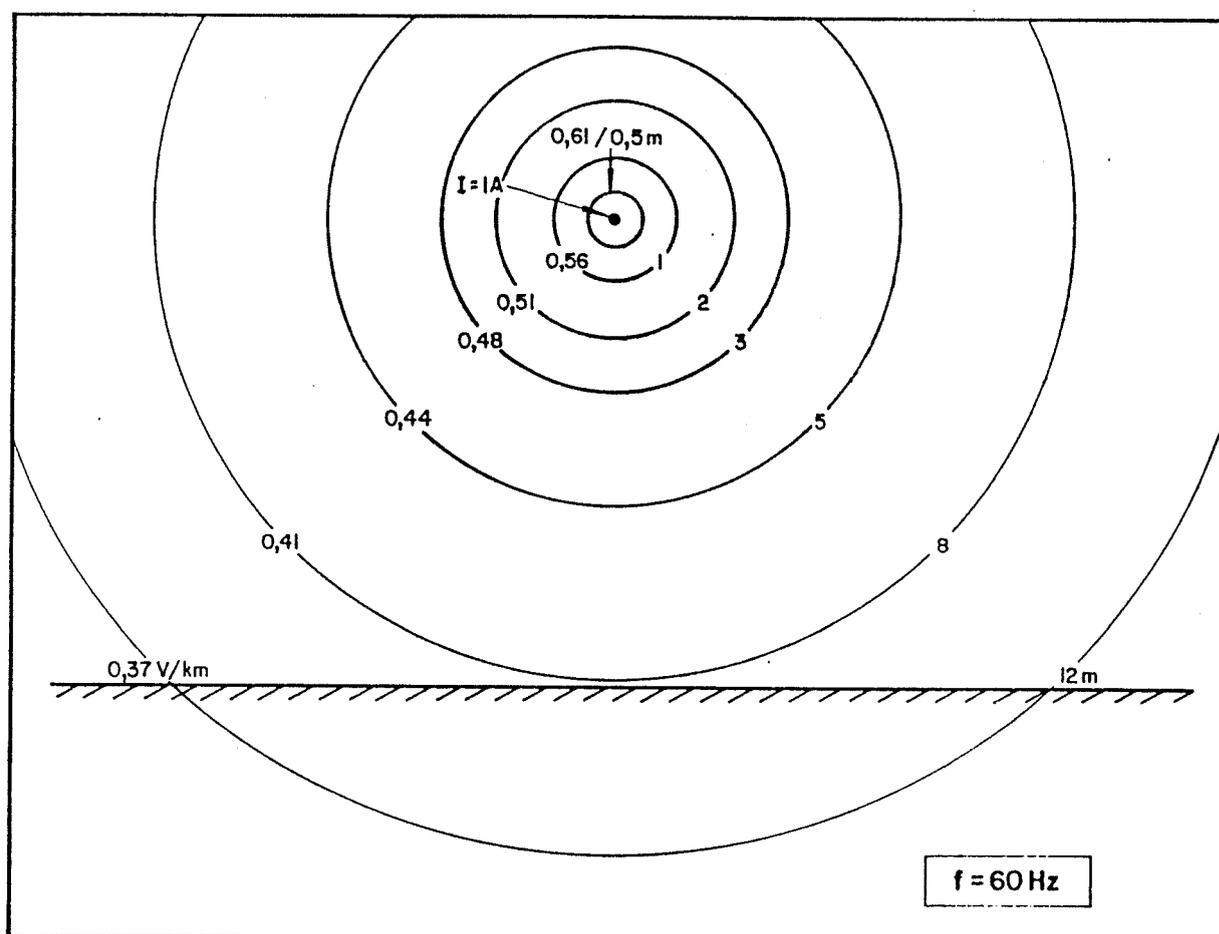


Figura 1.4 - Lugar Geométrico da F.E.M. Induzida (em V por Km de paralelismo).

forças eletromotrizes induzidas em linhas de telecomunicações situadas nas imediações de uma fase de uma linha monofilar com retorno por terra (MRT), para a frequência industrial (60 Hz).

1.2 - Descargas Atmosféricas

As descargas atmosféricas podem impor tensões em uma linha de telecomunicações de duas maneiras:

- caso incidam diretamente na linha;
- caso ocorram nas suas proximidades, sem incidir diretamente na linha.

1.2.1 - Descargas Atmosféricas Diretas

No caso de uma descarga atmosférica atingir diretamente uma linha de telecomunicações tem-se uma elevada corrente sendo injetada na linha, o que provavelmente levará a danos na mesma. A figura 1.5 mostra a distribuição hipotética da corrente da descarga ao incidir em uma linha aérea de telecomunicações.

A impedância apresentada à descarga atmosférica pela linha de telecomunicações é sua impedância característica em modo longitudinal, que para uma linha aérea vale

cerca de 400Ω . Para uma corrente de descarga de 50 kA de pico desenvolve-se uma tensão de 10 MV, tornando-se praticamente inevitável a ocorrência de danos na linha.

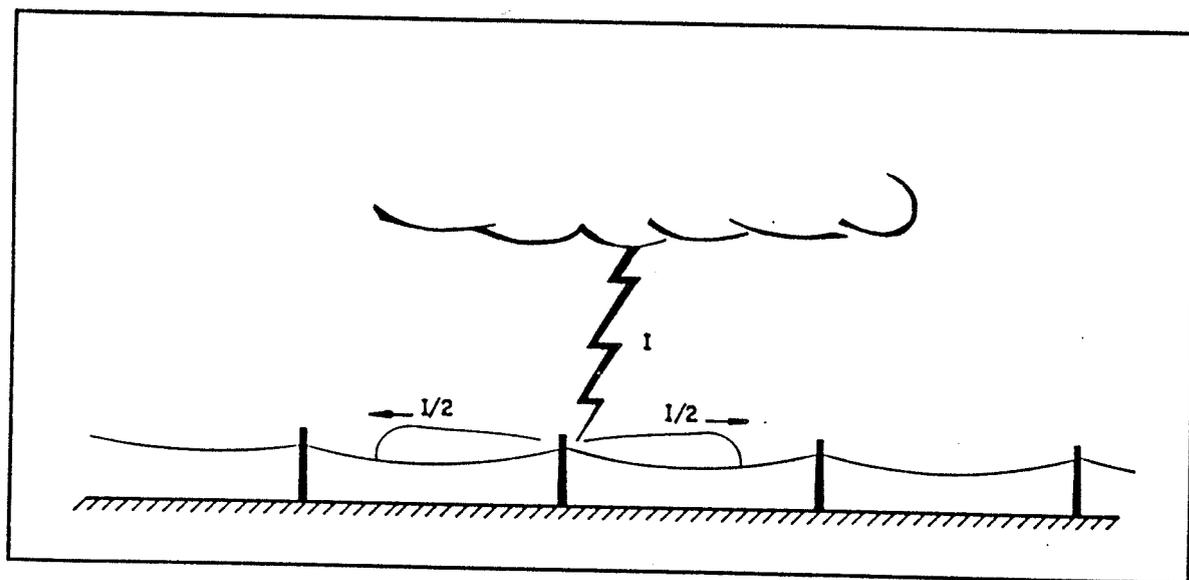


Figura 1.5 - Descarga Atmosférica Incidindo em uma Linha de Telecomunicações.

Bodle (10) reporta a incidência de danos na rede da Bell Canadá devido à descargas atmosféricas diretas, sendo estes valores reproduzidos na Tabela 1.1. Observe-se que também as linhas subterrâneas e enterradas estão sujeitas a este tipo de dano, embora com uma taxa menor do que as linhas aéreas.

TIPO DE REDE	TAXA DE DANOS
AÉREA	3,3
SUBTERRÂNEA	1,1
ENTERRADA	1,1

Tabela 1.1 - Taxa de Danos por Cem Quilômetros por ano Devido às Descargas Atmosféricas Diretas.

1.2.2 - Descargas Atmosféricas Indiretas

No caso da descarga atmosférica ocorrer nas proximidades da linha de telecomunicações os campos eletromagnéticos gerados pela descarga se propagam no espaço e, ao encontrarem a linha, desenvolvem tensões impulsivas na mesma. Dependendo da magnitude da descarga e da distância entre o ponto de incidência e a linha, essas tensões podem provocar desde a ruptura de isolamentos da linha até danos e/ou interferência em equipamentos conectados à mesma.

Embora as conseqüências de uma descarga atmosférica indireta sejam bem menos drásticas do que as de uma descarga direta, as descargas indiretas constituem um fenômeno de grande relevância devido à sua elevada taxa de ocorrência.

A figura 1.6 mostra uma comparação entre diversas medições de tensões induzidas por descargas atmosféricas em linhas de telecomunicações. Este fenômeno foi estudado no Convênio TELEBRÁS-UFMG (13).

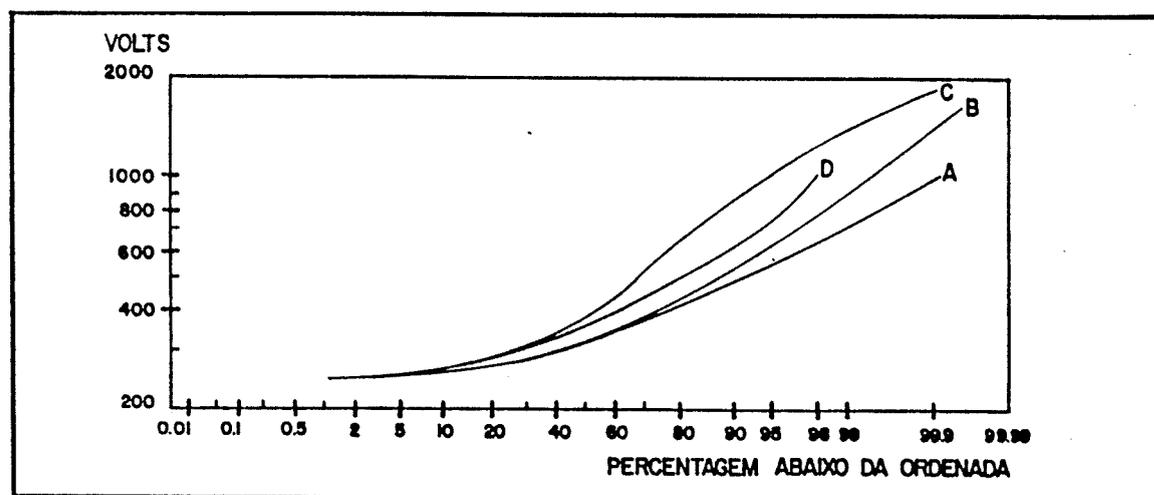


Figura 1.6 - Comparação entre Tensões de Pico Induzidas por Descargas Atmosféricas.

- A - Bodle (14) normalizada para 250 V
- B - Bennison (15) normalizada para 250 V
- C - Carrol (16) medições de Washington
- D - Carrol (17) medições de Cleveland

1.3 - Outras Origens de Tensões Estranhas

1.3.1 - Emissoras de Rádio-Difusão

Ao incidirem nas linhas de telecomunicações, os campos eletromagnéticos emitidos por estações de rádio-difusão induzem tensões nestas linhas que podem interferir com os sinais da mesma. Esta interferência pode se dar tanto em linhas de sinais digitais quanto analógicos. Nas primeiras tem-se erro na interpretação dos pulsos, enquanto nas últimas costuma ocorrer a demodulação de sinais da emissora (AM) por películas de óxidos nos contatos do par, o que faz com que o som da rádio se sobreponha ao da conversação telefônica.

Segundo a Referência (18), menos de 3% dos equipamentos digitais de telecomunicações sofrerão interferência em regiões que estejam a mais de 5 km de uma antena de rádio-difusão de 300 kW.

1.3.2 - Pulsos Eletromagnéticos Nucleares

Consistem em intensas radiações eletromagnéticas que são emitidas quando das explosões nucleares. Estas radiações de intensa potência são atualmente mantidas como objeto de segredo militar por colocarem em perigo sistemas

de direcionamento e rastreamento de mísseis, assim como os sistemas de telecomunicações vitais.

As primeiras evidências dos pulsos eletromagnéticos de origem nuclear foram falhas em instrumentos durante os primeiros testes nucleares nas décadas de 40 e 50. No entanto, só a partir do desenvolvimento do sistema de mísseis "Minute-Man" na década de 60 é que passou-se a analisar o impacto dos pulsos eletromagnéticos no equipamento militar.

No caso de uma explosão nuclear em grande altitude os raios gama interagem com a densa atmosfera ao redor da terra e formam uma região de deposição que constitui a fonte de pulsos eletromagnéticos. Segundo Podgorski (19) a região de deposição para uma explosão em grande altitude pode cobrir a terra em um raio de 1500 Km.

Embora não exista até o momento uma forma de onda padrão para estes pulsos, a maioria dos autores concorda que seu tempo de frente é menor que 5 ns e o tempo de cauda é maior que 100 ns, podendo atingir valores de pico de 50 kV/m.

1.3.3 - Tempestades Magnéticas

Fenômenos cíclicos associados às explosões solares causam correntes elétricas na ionosfera próxima dos pólos da terra (aurora). Essas correntes induzem tensões no sentido dos paralelos, as quais atingem valores significativos nas regiões próximas dos pólos.

Os gradientes de potencial criados pelas tempestades magnéticas atingem valores médios em torno de 2 V/km nas regiões de grande latitude. Devido ao baixo valor deste gradiente de potencial as tempestades magnéticas só são significativas para longos cabos de telecomunicações que corram no sentido dos paralelos e próximos às regiões polares.

1.3.4 - Descargas de Eletricidade Estática

Em regiões secas e sujeitas a ventos, os condutores de telecomunicações expostos e de potencial flutuante podem ser ionizados pelo atrito com o ar. As tensões estáticas desenvolvidas podem levar à ruptura de isolamentos ou danos aos equipamentos conectados à linha. Dentre os equipamentos, os construídos com tecnologia MOS são os mais sensíveis às descargas de eletricidade estática.

Assim como no caso da indução elétrica, uma referência de terra ou blindagem eliminam os perigos causados pelas tensões estáticas.

CAPÍTULO 2 - DESCRIÇÃO GERAL DAS REDES DE TELECOMUNICAÇÕES

2.1 - A Rede Local

Para que se possa estabelecer uma conexão telefônica é em geral necessário um circuito de dois fios, normalmente designado por par telefônico, entre o distribuidor geral (DG) da estação local e o aparelho telefônico do assinante.

Na sua forma mais simples, a rede local de telecomunicações consiste em pares de fios nus ou de condutores isolados que vão do DG da estação até os aparelhos dos assinantes. No entanto, é freqüentemente mais prático e econômico agrupar os pares em um cabo até o ponto onde eles divergem. Normalmente uma caixa terminal é instalada nos pontos onde os pares do cabo são distribuídos em pares individuais. Também nos pontos de ramificações de um cabo são instaladas estruturas (armários) com o objetivo de prover flexibilidade à rede.

A figura 2.1 mostra um diagrama esquemático das conexões da rede local da estação telefônica até as instalações dos assinantes.

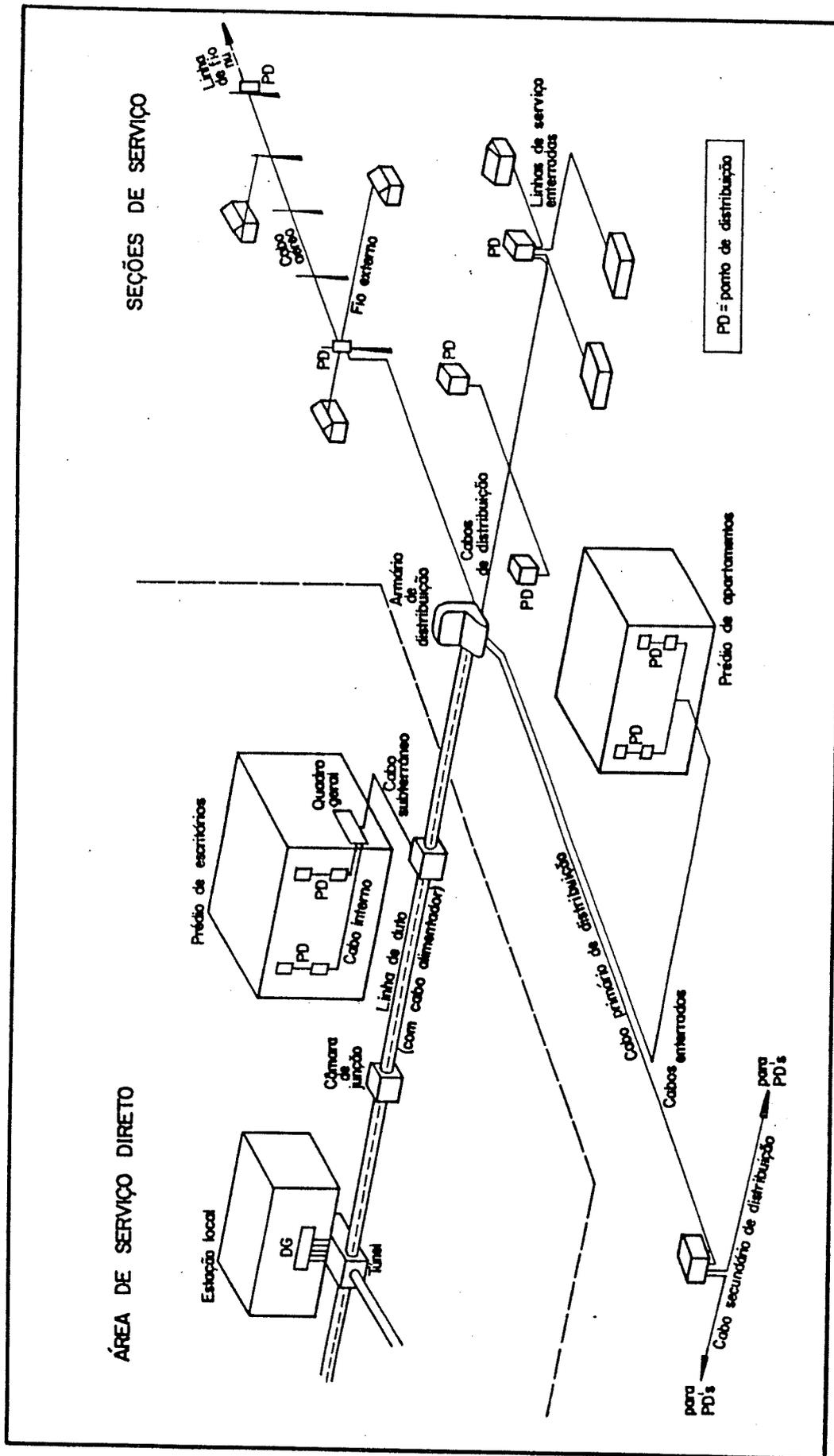


Figura 2.1 - Diagrama Esquemático da Rede Local desde a Estação até as Instalações dos Assinantes.

A central local é a central telefônica à qual os assinantes estão conectados. A central tem por função a comutação das linhas dos assinantes de forma a possibilitar que dois assinantes quaisquer sejam conectados entre si e possam estabelecer uma conversação telefônica.

A central de comutação e outras facilidades são instaladas em um prédio denominado estação telefônica. A área atendida pelos pares de assinantes de uma estação telefônica é denominada área da estação. A área da estação é dividida em área de atendimento direto, localizada nas imediações da estação e atendida por derivações do cabo alimentador, e as áreas atendidas pelos cabos de distribuição, usualmente designadas por secções de serviço.

O distribuidor geral (DG) da estação é a interface entre a rede externa e os terminais da central. Da estação saem diversos cabos alimentadores, os quais são usualmente instalados em linhas de dutos (cabos subterrâneos). Os cabos de distribuição são normalmente enterrados diretamente no solo ou instalados em posteação (rede aérea).

A figura 2.2 mostra a interrelação entre diversas estações telefônicas. Os cabos que interligam as estações são denominados cabos troncos. Observe-se que em uma estação pode-se ter mais de uma central. Nas estações

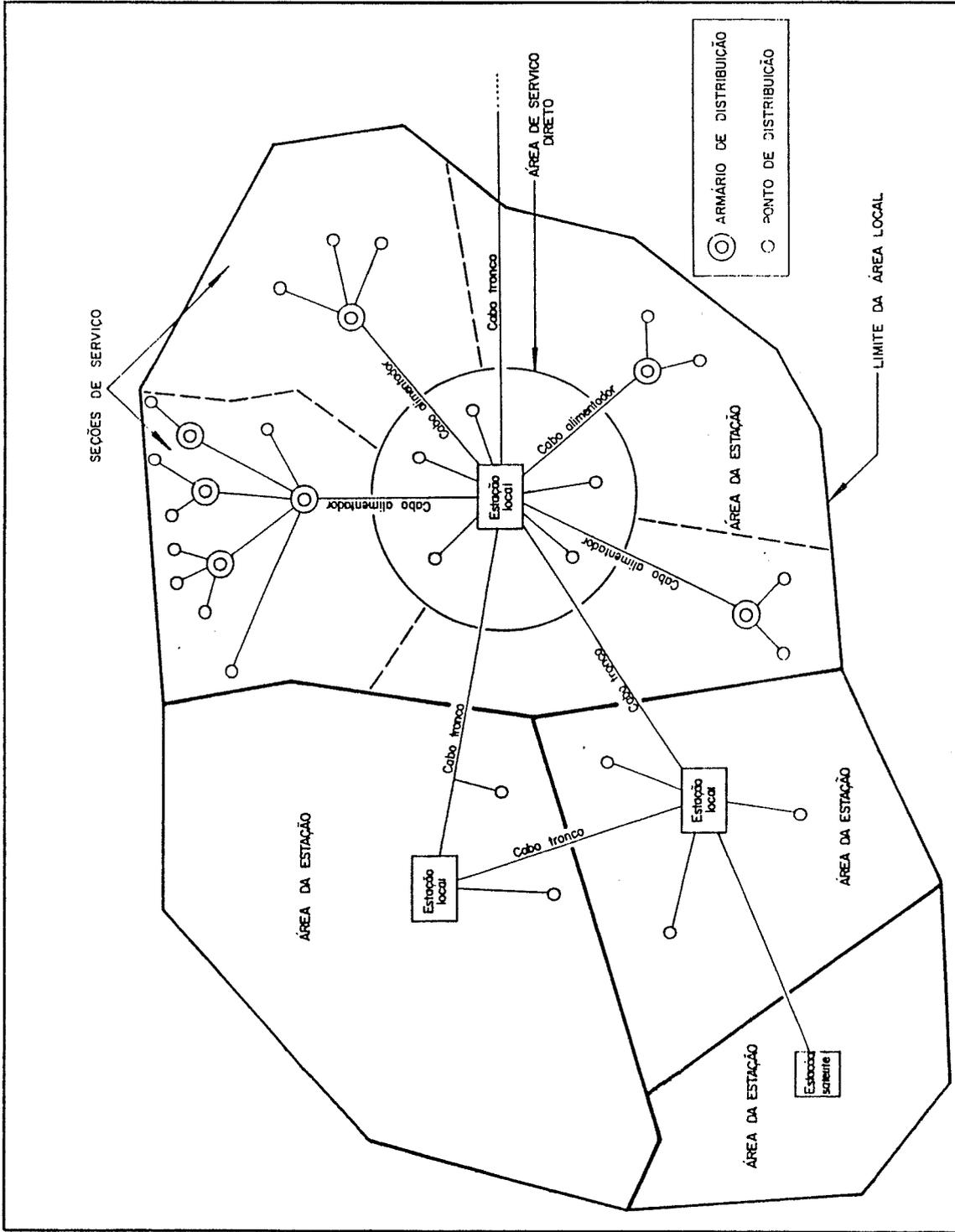


Figura 2.2 - Planta Simplificada da Rede Local.

de tráfego intenso é usual ter-se uma central que não é conectada diretamente às linhas de assinantes, mas sim aos pares de cabos troncos, de modo a executar as interligações entre estações. Estas centrais são designadas por centrais de trânsito (ou tandem). Maiores detalhes sobre a rede local podem ser obtidos através da referência (20).

2.2 - Terminações do Par Telefônico

De grande importância no processo da indução magnética são as terminações do par telefônico, especialmente no que diz respeito ao circuito longitudinal. Estas terminações dependem do estado do circuito do par, que pode ser: telefone no gancho, em conversação ou em comutação. Embora nos três estados citados o circuito esteja exposto à influência da indução magnética, é no estado de conversação que esta influência é mais crítica.

O estado de conversação de um circuito caracteriza-se pela possibilidade de existir um fluxo de informações entre os usuários do circuito. As terminações do par telefônico neste estado podem ser classificadas em dois tipos: pares referenciados à terra ou pares de potencial flutuante.

2.2.1 - Pares Referenciados à Terra

Pertencem a este tipo a grande maioria dos pares telefônicos da rede brasileira, podendo-se considerar esta terminação como típica. O par telefônico termina na estação telefônica na ponte de alimentação, que é um circuito que tem por objetivo alimentar o par telefônico com uma corrente adequada para o funcionamento do telefone.

A figura 2.3 mostra uma ponte de alimentação com dois tipos de circuito cordão (ponte de transmissão).

As bobinas de alimentação são duas bobinas magneticamente acopladas de forma a fornecer uma alta impedância ao circuito transversal e uma baixa impedância ao circuito longitudinal (basicamente sua resistência).

Os valores das tensões de alimentação variam de 24 a 60 V (em corrente contínua), sendo 48 V um valor típico. As resistências das bobinas de alimentação variam de 200 a 400 Ω , sendo 220 Ω um valor típico. A referência (7) fornece uma relação dos principais equipamentos de comutação e suas respectivas pontes de alimentação.

Nas centrais de comutação eletrônica (CPA's) as bobinas de alimentação são substituídas por resistores

de alimentação, cujas resistências também variam de 200 a 400 Ω por resistor, dependendo do equipamento.

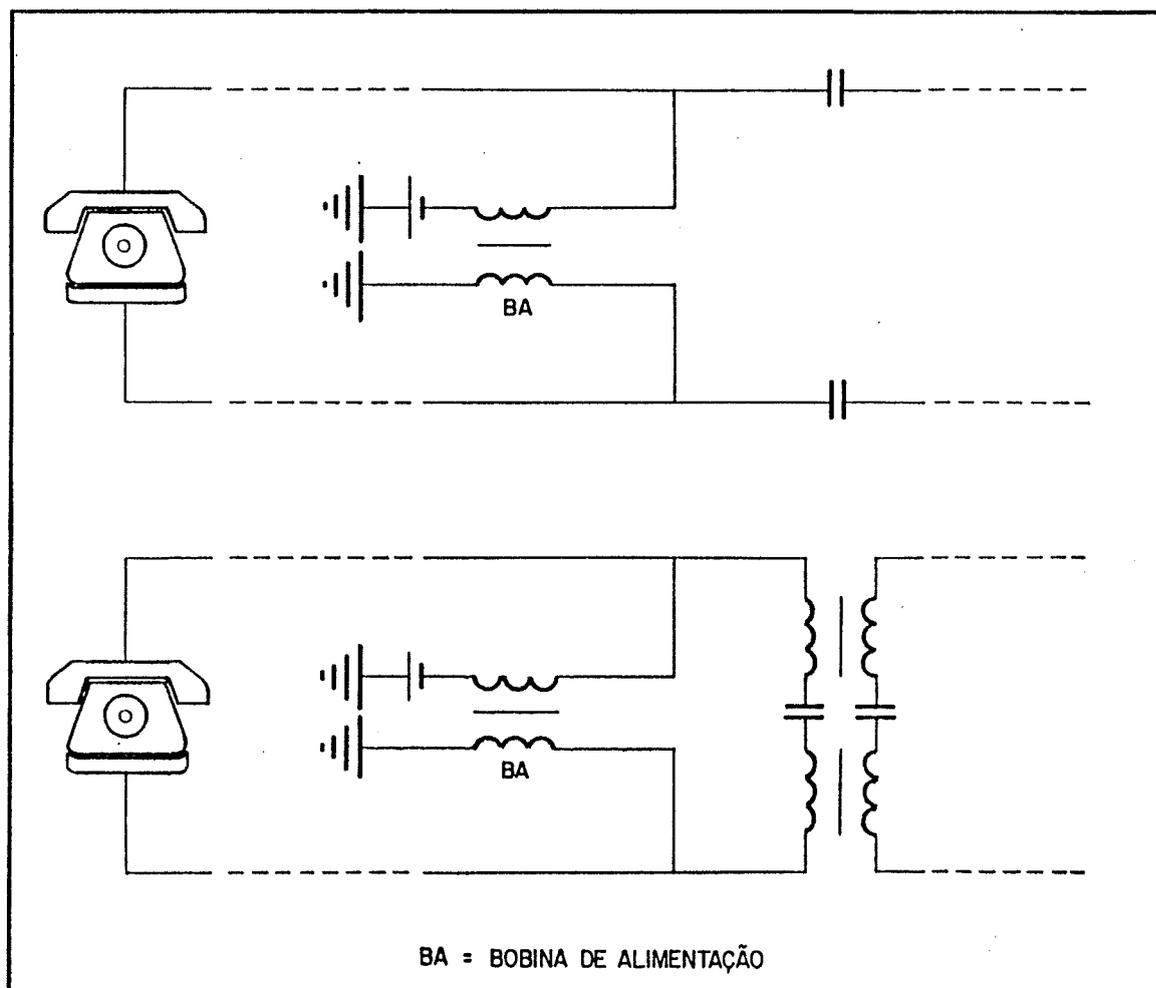


Figura 2.3 - Pontes de Alimentação e Transmissão.

O circuito cordão promove o isolamento galvânico (bloqueio de corrente contínua) do assinante que chama dos fios que levam o sinal de conversação até o assinante que atende. Esse isolamento é feito por capacitores

(2 a 4 μF) ou por transformadores (ver figura 2.3). O isolamento por transformadores tem a vantagem de eliminar possíveis desbalanceamentos no circuito do assinante do circuito da central, reduzindo a tensão transversal (ruído).

O aparelho telefônico apresenta uma resistência transversal que usualmente varia entre 100 e 300 Ω e uma impedância longitudinal praticamente infinita.

Os circuitos longitudinal e transversal equivalentes são mostrados na figura 2.4, onde a capacitância do circuito longitudinal representa as capacitâncias parasitas entre o condutor e a terra.

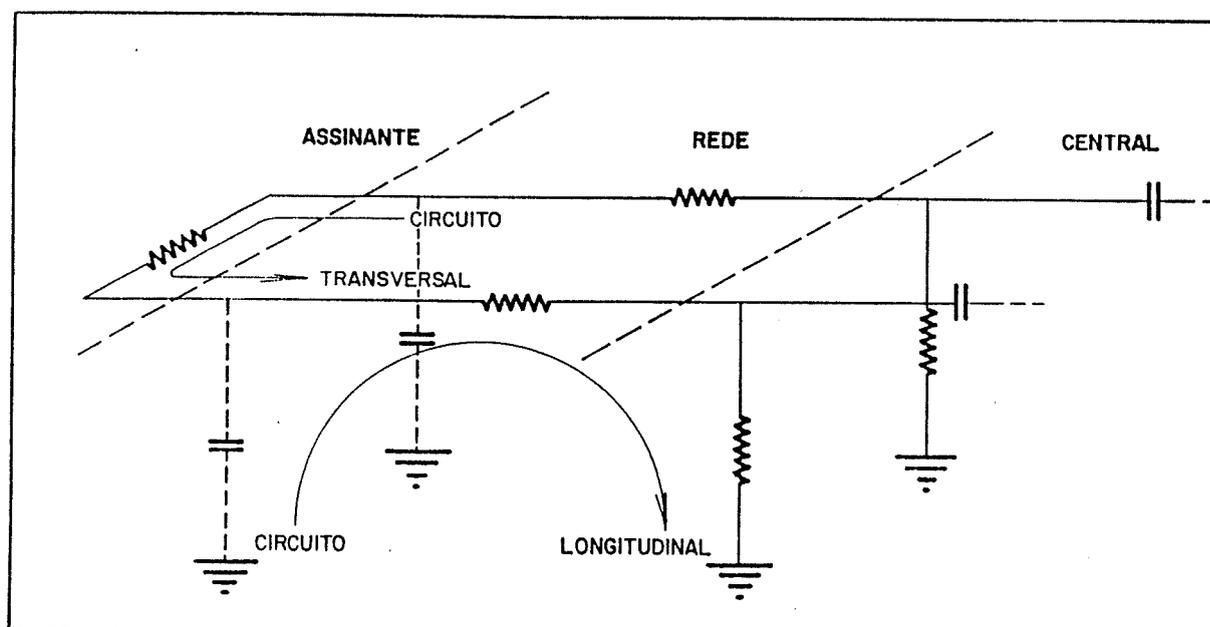


Figura 2.4 - Circuitos Transversal e Longitudinal Equivalentes

Estas terminações estão implícitas nos cálculos desenvolvidos ao longo deste trabalho, exceto quando explicitado em contrário.

2.2.2 - Pares de Potencial Flutuante

Alguns circuitos especiais diferem das terminações mostradas em 2.2.1. A diferença principal, do ponto de vista da indução magnética, é o fato dos pares não serem referenciados à terra (via ponte de alimentação) na central telefônica. Dessa forma, esses pares ficam com o potencial flutuante em relação à terra.

Esse é o caso de equipamentos de transmissão de dados, cujo exemplo típico é o Modulador de Código de Pulsos (MCP). Este equipamento é utilizado no entroncamento entre estações, possibilitando a ampliação do número de canais disponíveis (ligações) em um cabo tronco, através do princípio da multiplexação.

O par telefônico utilizado para o sinal do MCP não é contínuo de uma estação à outra, nem é alimentado pela bateria da estação. Como o sistema MCP necessita de regeneradores ao longo da linha, o par só é contínuo entre dois regeneradores. Em um regenerador o par termina em um a coplador magnético (transformador), fornecendo uma impedân-

cia praticamente infinita para o circuito longitudinal.

A figura 2.5 mostra uma secção do par de MCP entre dois regeneradores e o circuito longitudinal equivalente.

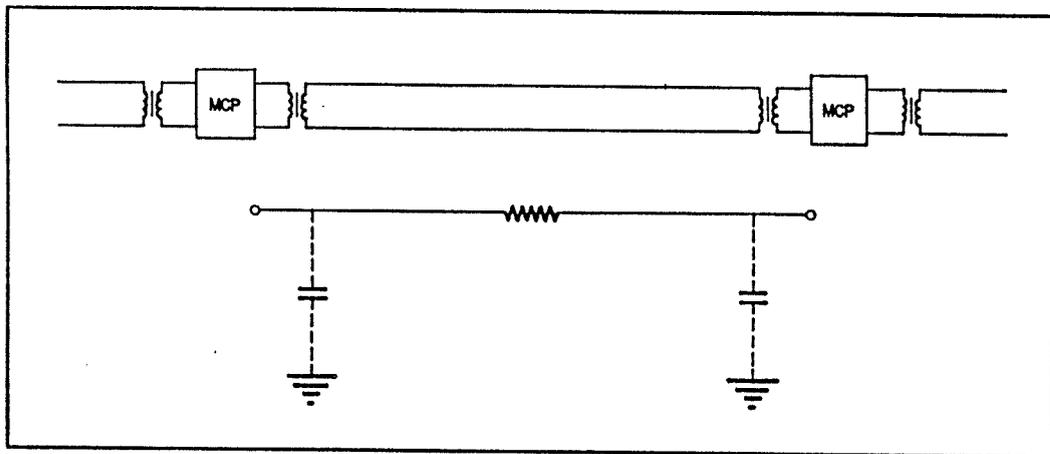


Figura 2.5 - Circuito Longitudinal Equivalente de um Par de Potencial Flutuante.

2.3 - Características Construtivas das Linhas de Telecomunicações

As linhas de telecomunicações são compostas pelos conjuntos de pares que seguem uma mesma rota. Essas linhas podem ser de assinante ou tronco. A linha de assinante liga o assinante à estação local, enquanto a linha tronco liga duas estações.

Dependendo da construção, as linhas podem ser subterrâneas, enterradas ou aéreas. As linhas subterrâneas caracterizam-se por cabos colocados em dutos subterrâneos ou túneis, enquanto as linhas enterradas são compostas por cabos enterrados diretamente no solo. As linhas aéreas são suportadas em postes que podem ser exclusivos da companhia de telecomunicações ou de uso-mútuo com a concessionária de energia elétrica local. Por razões econômicas e estéticas este último tipo de construção é o mais adotado para as linhas aéreas, exceto para linhas de fio nu.

As linhas aéreas podem ser compostas por cabos, fios externos ou fios nus.

2.3.1 - Cabos

Os cabos de telecomunicações são compostos pela reunião de vários pares. Um par é formado pelo trançamento de dois fios isolados. Uma quadra é formada pelo trançamento de quatro fios isolados, sendo que os fios opostos formam um par. Estes elementos básicos (par ou quadra) são dispostos em camadas formando um cabo telefônico.

Em outra forma construtiva, aplicável principalmente em cabos de grande número de pares, estes elementos básicos são dispostos de forma a constituírem grupos que

por sua vez são trançados entre si.

A figura 2.6 mostra as construções básicas dos cabos.

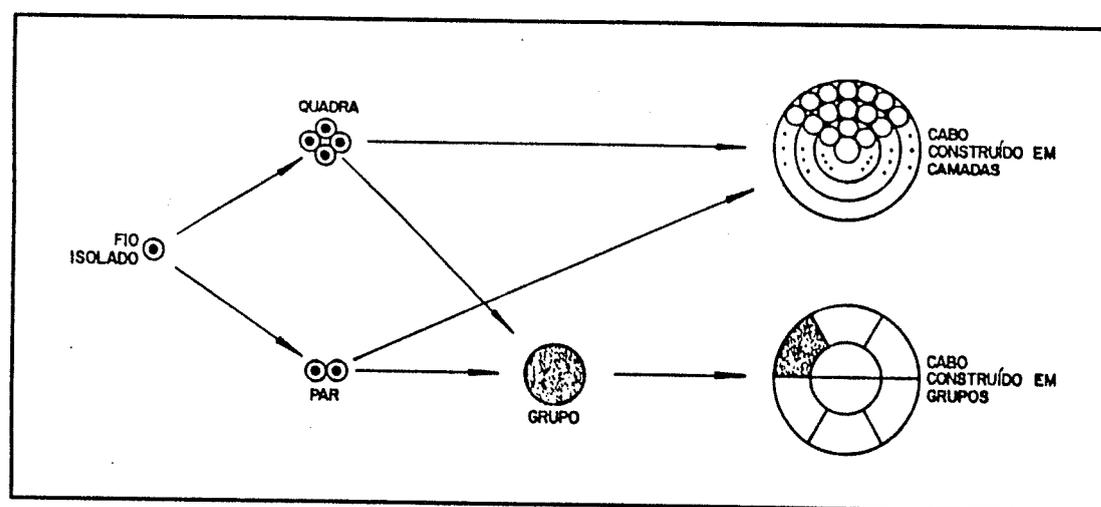


Figura 2.6 - Construção do Cabo de Telecomunicações.

O conjunto dos pares é envolvido por uma capa metálica que, além de prover a estanqueidade do cabo, oferece uma blindagem contra induções elétrica e magnética.

Esta capa metálica (também chamada blindagem) pode ser de chumbo ou alumínio. Por cima desta capa metálica é aplicada uma capa de polietileno, fornecendo proteção mecânica e elétrica ao cabo.

As resistências em corrente contínua a 20°C dos condutores dos cabos mais utilizados são dadas na tabela 2.1, onde também são fornecidos os desequilíbrios resistivos médios (segundo dados do fabricante (21)). No Apêndice 2 tem-se os dados das blindagens de cabos telefônicos.

TIPO DE CABO	DIÂMETRO (mm)	RESISTÊNCIA (Ω /km)	DES. RESISTIVO (%)
CT	0,40	144,0	2,0
	0,50	92,0	2,1
	0,65	53,0	2,5
	0,90	28,0	2,4
CTP-APL	0,40	136,5	2,2
	0,51	85,5	2,3
	0,64	53,0	2,5
	0,91	26,5	2,5

Tabela 2.1 - Características Resistivas dos Condutores dos Cabos Telefônicos.

2.3.2 - Fios Externos

Os fios externos são pares individuais que vão do ponto de distribuição até as instalações dos assinantes. São usualmente constituídos por fios de liga de cobre isolados e instalados em posteação.

A figura 2.7 mostra a secção de um fio externo, assim como seus parâmetros principais.



TIPO DE FIO	DIÂMETRO (mm)	RESISTÊNCIA (Ω /km)
FE 80	0,80	113
FE 100	1,00	73
FE 160	1,60	30

Figura 2.7 - Características do Fio Externo (FE).

2.3.3 - Linhas de Fio Nu

As linhas de fio nu, também chamadas de linhas abertas, são compostas por fios nus instalados em isoladores de vidro ou porcelana e em estruturas próprias da companhia de telecomunicações. As linhas de fio nu são boas como meio de transmissão, embora sejam mais expostas às interferências. Foram usualmente utilizadas como entroncamento interurbano, sendo atualmente substituídas por outros meios de transmissão. Dessa forma, são um tipo de linha em extinção, de modo que não lhe será dada atenção especial neste trabalho.

2.4 - Comprimentos Típicos das Linhas de Telecomunicações

É extremamente difícil se estabelecer comprimentos típicos para as linhas de telecomunicações, pois os mesmos variam em função de diversos fatores. Os valores aqui expostos são uma estimativa.

A tabela 2.2 mostra os valores dos comprimentos das linhas de assinantes tomados como típicos neste trabalho.

COMPRIMENTOS TÍPICOS			
REDE	LINHA	PRIMÁRIA (km)	SECUNDÁRIA (km)
URBANA	CURTA	1,0	0,5
	MÉDIA	2,0	1,0
	LONGA	3,0	3,0
RURAL	CURTA	2,0	2,0
	MÉDIA	2,0	5,0
	LONGA	8,0	16,0

Tabela 2.2 - Linhas de Assinantes.

A tabela 2.3 fornece os comprimentos tomados como típicos para cabos troncos.

COMPRIMENTOS TÍPICOS	
LINHA	COMPRIMENTO (km)
CURTA	2,0
MÉDIA	6,0
LONGA	12,0

Tabela 2.3 - Linhas Troncos.

CAPÍTULO 3 - DESCRIÇÃO GERAL DAS REDES DE ENERGIA ELÉTRICA

Os sistemas elétricos de potência usualmente operam com circuitos trifásicos e em corrente alternada, possibilitando que a tensão nominal do sistema seja elevada ou abaixada onde for conveniente.

A frequência de operação destes sistemas é de 60 Hz na América do Norte e no Brasil, e 50 Hz praticamente no resto do mundo.

A seguir faz-se a descrição geral das redes de energia elétrica, com ênfase nas características que são importantes no fenômeno da indução magnética.

3.1 - Tipos de Linhas de Energia Elétrica

As linhas de energia elétrica podem ser classificadas em 3 tipos, cada um deles com características próprias:

- transmissão e sub-transmissão
- distribuição
- tração elétrica.

A figura 3.1 mostra de maneira esquemática a sequência de linhas pelas quais passa a energia elétrica e exemplifica uma possível combinação de tensões em kV.

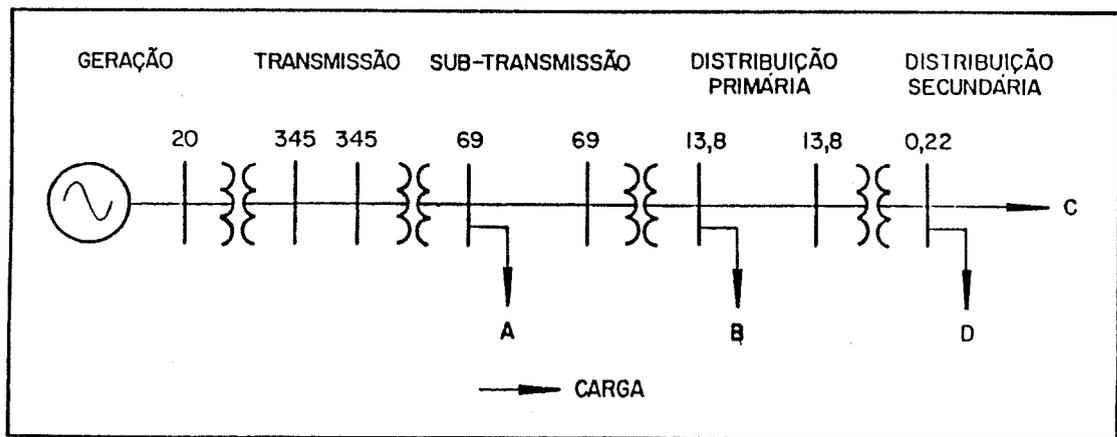


Figura 3.1 - Sistema Elétrico de Potência.

3.1.1 - Transmissão e Sub-transmissão

A energia elétrica gerada tem de ser transportada para os centros de consumo. Para que este transporte seja executado de maneira eficiente são necessárias linhas de transmissão operando em tensões elevadas (centenas de quilovolts).

Próximo aos centros de consumo são construídas subestações de transformação que transferem a potência das linhas de transmissão para as linhas de sub-transmissão.

Estas linhas vão mais próximo aos centros de consumo, até as subestações de distribuição, e operam com tensões de cerca de uma centena de quilovolts.

Observe-se que a elevação da tensão nas linhas de transmissão tem por objetivo principal a redução das perdas por efeito joule, através da redução da corrente necessária para o transporte de uma dada potência.

3.1.2 - Distribuição

Das subestações de distribuição a potência das linhas de sub-transmissão é transferida para as linhas de distribuição, que operam com tensões ainda menores, na faixa de uma dezena de quilovolts. Essas linhas se ramificam pelas ruas das cidades, levando a energia elétrica bem próximo do consumidor.

As linhas de distribuição primárias operam com tensões ainda muito elevadas para a utilização residencial. Dessa forma, junto ao consumidor final são instalados transformadores que reduzem a tensão para cerca de duas centenas de volts, que é levada pela linha de distribuição secundária até o consumidor.

Observe-se que existem consumidores especiais

(geralmente indústrias) que recebem potência diretamente da distribuição primária ou mesmo da sub-transmissão.

3.1.3 - Tração Elétrica

Embora escassas no Brasil, as linhas férreas eletrificadas são largamente utilizadas em diversos países e constituem uma fonte importante de indução magnética para as linhas de telecomunicações.

As linhas férreas que operam com corrente alternada usualmente utilizam as frequências de $16 \frac{2}{3}$ Hz, 25 Hz ou a frequência industrial (50 Hz ou 60 Hz). Nos dois primeiros casos é necessária geração própria ou o uso de um ciclo-conversor alimentado em frequência industrial.

A tendência atual é no sentido de se utilizar a frequência industrial nos novos projetos. Esse aumento na frequência implica em um aumento proporcional nos campos magnéticos gerados pelas linhas e, conseqüentemente, da indução magnética nos circuitos de telecomunicações próximos. Além disso, o controle de potência das locomotivas através de tiristores eleva significativamente a distorção harmônica das correntes.

Segundo Gundrum (22), as correntes destas li-

nhas podem chegar a 1000 A, caracterizando uma linha de energia com um "curto-circuito permanente" para a terra, já que o retorno da corrente é feito pelos trilhos e pela terra. Para maiores detalhes dos efeitos indutivos das linhas férreas, ver (23).

3.2 - Modos de Operação das Linhas

As linhas de energia elétrica, do ponto de vista da indução magnética, podem ter dois modos de operação distintos:

- em regime permanente;
- em regime transitório.

3.2.1 - Linhas em Regime Permanente

São linhas em seu regime normal de operação. A indução magnética originada por uma linha em regime permanente depende basicamente da parcela da corrente de carga que circula pela terra.

Para que exista corrente de carga fluindo pela terra, duas condições são necessárias:

- configuração de transformadores que permita o fluxo de cor

- rente pela terra;
- desequilíbrio entre as fases.

A figura 3.3 mostra as configurações de transformadores que permitem o fluxo de corrente pela terra.

Na configuração (a), que é designada por estrela com neutro multi-aterrado (NMA), a corrente de desequilíbrio entre as fases se divide entre o neutro e a terra.

A configuração (b), que é necessariamente desequilibrada, é chamada estrela incompleta com NMA. Observe-se que se trata da utilização de apenas duas fases de um sistema trifásico.

Nas configurações (c) e (d) tem-se os sistemas monofásicos com NMA e monofásico com retorno por terra (MRT), respectivamente.

As linhas que não têm corrente de carga fluindo pela terra também podem causar indução magnética em linhas de telecomunicações, devido à assimetria da distribuição das correntes nos condutores. No entanto, a magnitude desta indução é muito menor do que a causada por circuitos com circulação de corrente pela terra, sendo de pouco interesse prático.

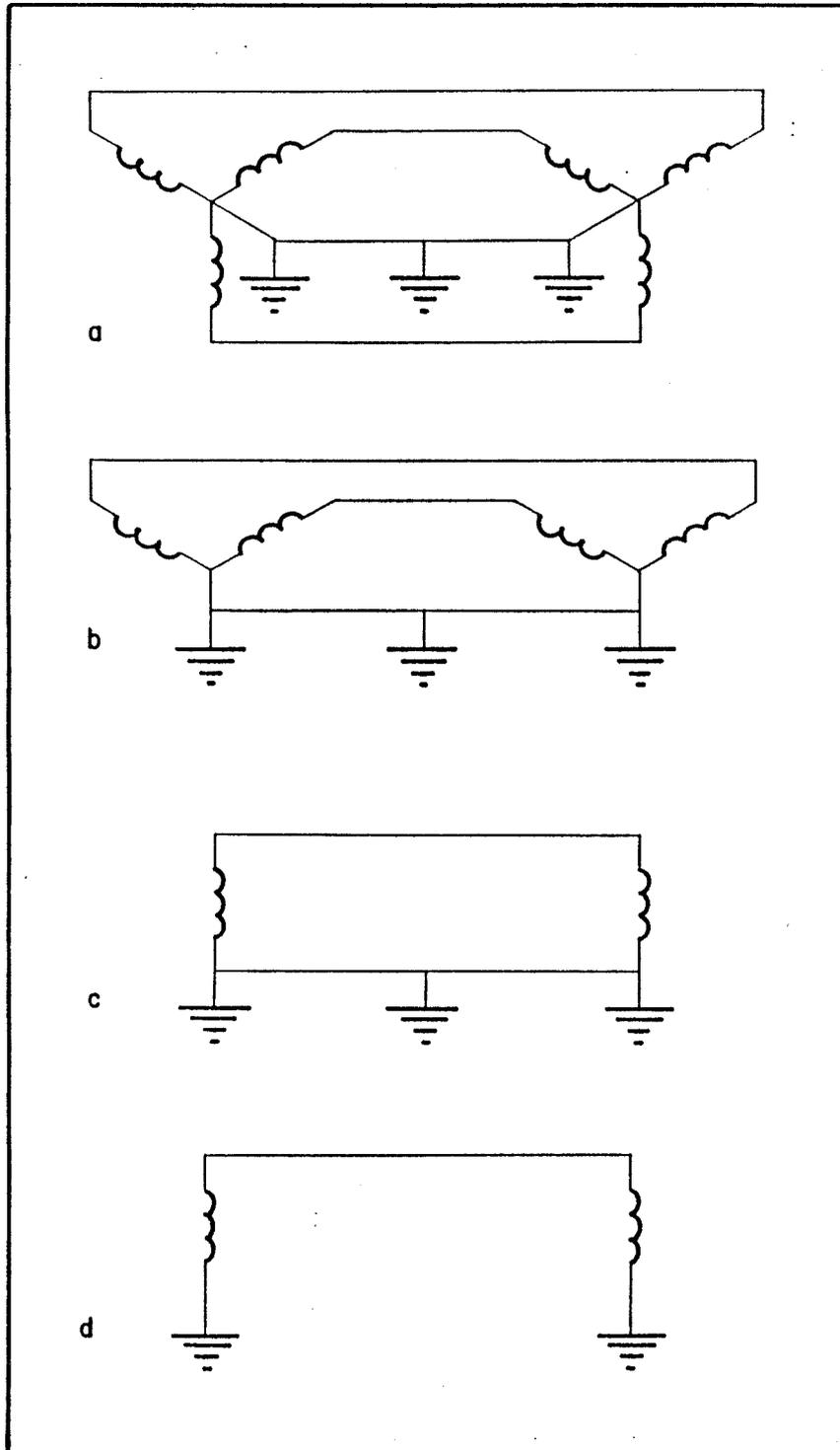


Figura 3.2 - Configurações Críticas de Transformadores.

3.2.2 - Linhas em Regime Transitório

O regime transitório é um regime de curta duração no tempo e que ocorre após a alteração das condições de operação da linha. Essa alteração pode ser causada pelo chaveamento de transformadores, energização de bancos de capacitores, curto-circuito, etc...

O regime transitório associado ao curto-circuito é bastante severo sob o ponto de vista da indução magnética devido às elevadas correntes envolvidas, razão pela qual lhe será dada especial atenção neste trabalho.

Dos diversos curtos-circuitos, o mais crítico é o que envolve a terra, sendo também o mais comum. Dentre as principais causas de curtos-circuitos pode-se citar as descargas atmosféricas, contatos com árvores e falhas em equipamentos.

A freqüência de ocorrência de curtos-circuitos é inversamente proporcional à tensão de operação da linhá, sendo um evento muito mais freqüente nas linhas de distribuição do que nas linhas de transmissão.

A duração do curto-circuito depende das características da proteção contra sobrecorrentes adotada. Em

geral, quanto maior a magnitude da corrente de curto-circuito, menor é o tempo de duração da falta.

Bodle (10) reporta os resultados de um levantamento estatístico feito pela Hydro Quebec, o qual é mostrado na tabela 3.1.

CLASSE DE TENSÃO (kV)	TEMPO DE ENERGIZAÇÃO DA FALTA (s)		RELIGAMENTOS
	MIN.	MÁX.	
735	0,1	0,66	2
330	0,1	1,0	2
220	0,1	2,0	2
110	0,1	2,0	2
10	0,5	8,0	3-4

Tabela 3.1 - Tempos de Duração de Faltas (Hydro Quebec).

Na tabela 3.1 o tempo da coluna de "máximo tempo de energização da falta" é o tempo acumulado dos religamentos, i.é., no caso da classe 330 kV tem-se a possibilidade de duas energizações de 0,5 s cada, levando a um tempo acumulado de 1,0 s.

Também quanto ao tempo de duração das faltas as linhas de distribuição (10 kV) representam o pior caso.

As correntes de curto-circuito variam bastante em função da distância entre o ponto onde ocorre o curto-circuito e a subestação que alimenta a linha. Em geral, quanto maior é a tensão de operação da linha, maior é a corrente de curto-circuito.

Segundo o levantamento feito pela Hydro Quebec (10) tem-se os valores máximos e mínimos das correntes de curto-circuito mostrados na tabela 3.2.

CLASSE DE TENSÃO (kV)	CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO (kA)	
	MÍN.	MÁX.
330	1,4	18
220	0,5	23
110	0,3	28
10	0,2	5

Tabela 3.2 - Valores Extremos das Correntes de Curto-Circuito (Hydro Quebec).

Medições realizadas por Burke (24) em linhas de distribuição nos Estados Unidos fornecem um valor médio de cerca de 2100 A, com valores extremos chegando a 6000 A.

3.3 - Freqüência da Corrente Indutora

As correntes que circulam nas linhas de energia elétrica em regime permanente são compostas por uma componente fundamental (freqüência industrial) e diversas correntes nas freqüências harmônicas superiores. Medições de campo (25) (26) indicam que as harmônicas superiores até a 31ª (1860 Hz) são relevantes na análise da indução magnética.

Das diversas fontes de harmônicas pode-se citar:

- transformadores;
- fornos a arco;
- retificadores e inversores;
- controladores de potência (tiristores).

Destas fontes de harmônicas, as mais comuns são os transformadores. Dentre estes, são os transformadores de distribuição os que freqüentemente são submetidos às sobretensões devido à pobre regulação destas linhas. Como já trabalham no joelho da curva de magnetização do aço, a sobretensão aumenta significativamente a amplitude das harmônicas, conforme descrito em (27).

As referências (28) e (29) fornecem procedimentos para se estimar a distribuição espectral das correntes harmônicas nas linhas de energia elétrica em função dos parâmetros da mesma.

A Referência (30) mostra uma série de medições de correntes e tensões harmônicas em linhas de distribuição, duas das quais são reproduzidas na figura 3.3 de forma a exemplificar o efeito causado pela energização de um inversor.

Usualmente a frequência associada ao curto-circuito é a frequência industrial, sendo desprezadas as eventuais componentes unidirecionais da corrente de curto. Este procedimento é coerente com as medições de Burke (24), onde foi constatada uma componente unidirecional média de apenas 10% do valor da corrente de curto, muito embora no caso mais crítico tenha chegado a 60%.

Cabe observar que em alguns casos especiais de curtos-circuitos intermitentes pode-se obter correntes em frequências elevadas, conforme o reportado por Carrol (17), onde foi detectada uma tensão induzida de 390 V de pico na frequência de 1,7 kHz devido a um defeito em um banco de capacitores.

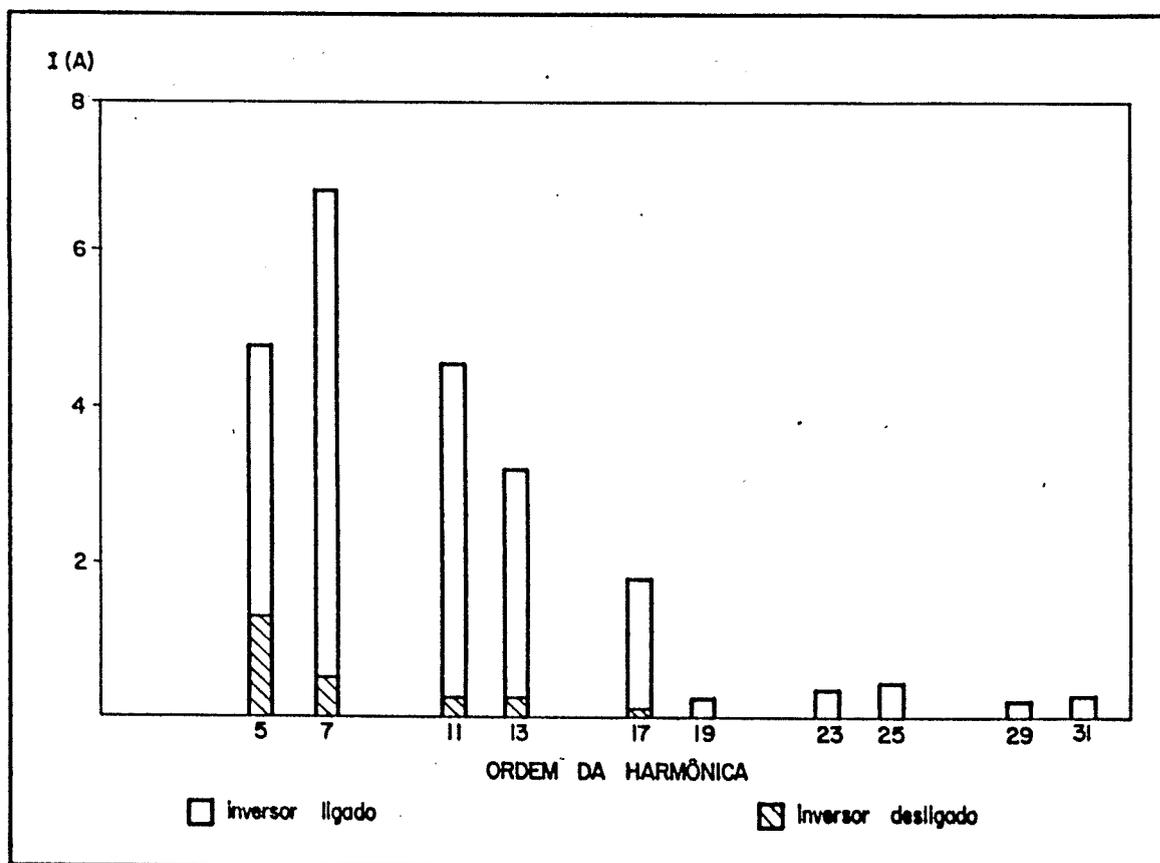


Figura 3.3 - Espectro de Correntes Harmônicas Típicas de um Inversor.

CAPÍTULO 4 - O PROCESSO DE INDUÇÃO MAGNÉTICA

A indução magnética é definida neste trabalho como o fenômeno através do qual as correntes que circulam em uma linha de energia elétrica (circuito indutor) induzem tensões em uma linha de telecomunicações (circuito induzido).

Para a compreensão e análise deste fenômeno, é conveniente dividi-lo em etapas, as quais formam o processo de indução magnética.

4.1 - As Etapas

Considere-se como circuito indutor uma linha monofilar com retorno por terra e infinita (C1). Paralela a esta linha, corre uma linha finita de comprimento l , que constitui o circuito induzido (C2).

Ao circular uma corrente alternada (I_1) no circuito indutor, o circuito longitudinal induzido concatena um fluxo magnético que, por sua vez, induz uma força eletromotriz (f.e.m.) neste circuito. Esta f.e.m. induzida no circuito longitudinal é definida como a diferença de potencial entre uma extremidade aberta deste circuito e a terra

adjacente, estando a outra extremidade solidamente conectada à terra, conforme a figura 4.1.

Define-se como impedância mútua (Z_{12}) entre os dois circuitos à razão entre a f.e.m. induzida no circuito longitudinal induzido e a corrente no circuito indutor que causa esta indução. Esta impedância mútua é expressa em ohms (Ω) ou, caso seja dividida por λ , em ohms por quilômetro (Ω/km).

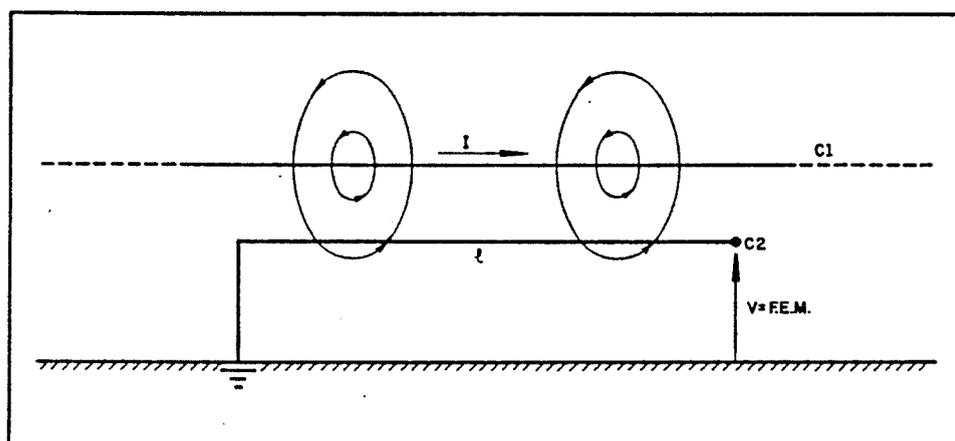


Figura 4.1 - Acoplamento Magnético entre os Circuitos Indutor e Induzido.

Suponha-se que exista, no sistema da figura 4.1, um terceiro condutor cujo circuito longitudinal esteja fechado. Tem-se agora três circuitos: o circuito indutor

(C1), o induzido (C2) e este terceiro que será designado por circuito de blindagem (C3).

O novo sistema é mostrado na figura 4.2, onde podem ser identificadas três impedâncias mútuas: entre os circuitos 1 e 2 (Z_{12}), entre 1 e 3 (Z_{13}) e entre 2 e 3 (Z_{23}).

Com a circulação da corrente I_1 em C1, são induzidas f.e.m. nos circuitos C2 e C3. Como o circuito C3 está fechado, uma corrente I_3 circulará pelo mesmo. O campo magnético originado por I_3 induzirá também uma f.e.m. no circuito C2. Dessa forma a f.e.m. resultante no circuito induzido será dada pela combinação das f.e.m. induzidas pelos circuitos indutor (C1) e de blindagem (C3).

Como a corrente no circuito de blindagem tende a anular o efeito da corrente indutora, esta f.e.m. resultante será menor do que a f.e.m. induzida originalmente pelo circuito indutor.

Está implícita a hipótese de que a corrente no circuito indutor (I_1) não é influenciada pela corrente no circuito de blindagem (I_3).

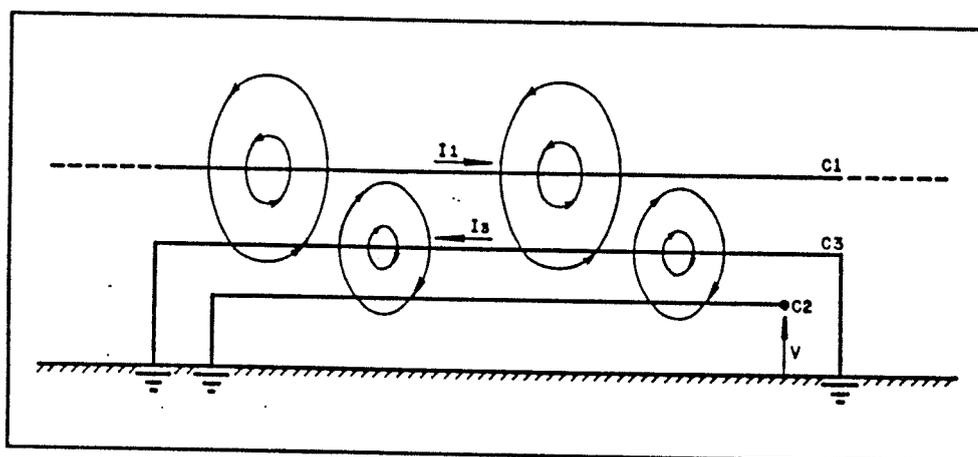


Figura 4.2 - Acoplamento Magnético do Circuito de Blindagem

Define-se como "fator de blindagem" (F_b) à razão entre a f.e.m. resultante no circuito induzido e a f.e.m. neste circuito devido exclusivamente à corrente no circuito indutor. Dessa forma, o fator de blindagem é um número adimensional que vale 0 para uma blindagem perfeita e 1 para inexistência de blindagem.

A força eletromotriz resultante no circuito induzido distribui-se ao longo deste circuito em função das impedâncias do mesmo, determinando diferenças de potencial entre os diversos pontos do circuito. Define-se como "tensão longitudinal" (V_l) à diferença de potencial entre o con

dutor do circuito induzido e a terra adjacente, em um dado ponto do circuito.

Como a tensão longitudinal é uma fração da f.e.m. resultante, define-se como "fator do circuito longitudinal" à razão entre a tensão longitudinal em um dado ponto do circuito e a f.e.m. resultante no circuito. O fator do circuito longitudinal (F_L) é um número adimensional cujo módulo situa-se entre 0 e 1.

A figura 4.3 mostra a distribuição do fator do circuito longitudinal ao longo de duas linhas induzidas. No caso (a) trata-se de uma linha referenciada solidamente à terra em uma extremidade e, no caso (b) trata-se de uma linha referenciada à terra em ambas as extremidades através de impedâncias de alto valor. Supõe-se que ambas as linhas sejam submetidas à indução uniforme.

O circuito induzido (C2) foi considerado como composto de um único condutor. No entanto, conforme visto no cap. 2, as linhas de telecomunicações são compostas de pares condutores. Dessa forma, considere-se o circuito induzido como constituído de um par de fios (por exemplo, uma linha de fio externo).

Como estes dois fios estão bem próximos um do

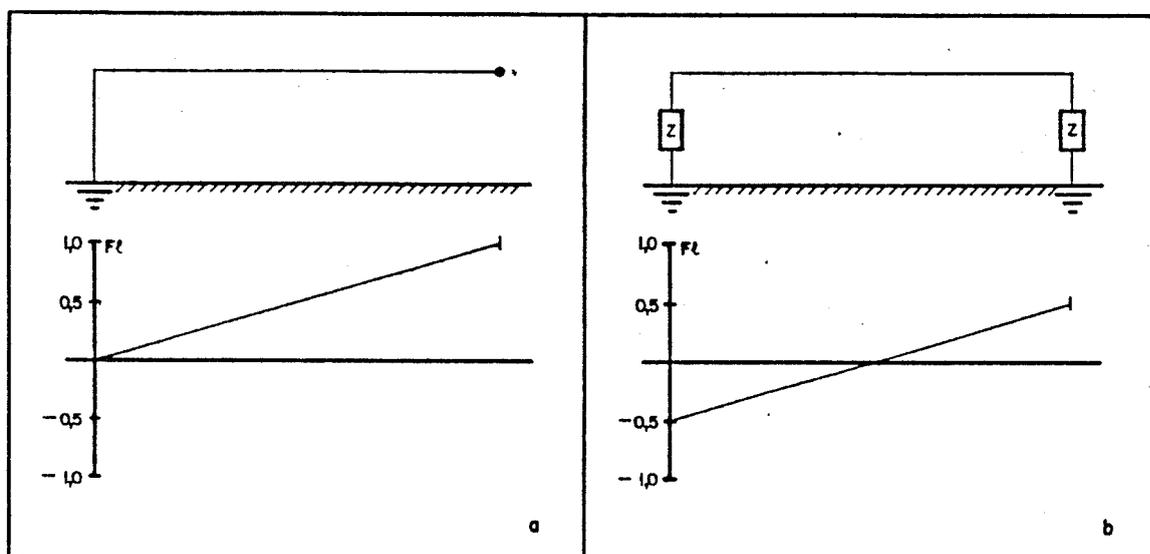


Figura 4.3 - Distribuição do Fator do Circuito Longitudinal (F_l).

outro e são torcidos entre si, a força eletromotriz resultante é a mesma para os dois fios. Isto é válido para os pares de fios dos cabos assim como para os fios externos, embora não seja válido para os pares de fio nu. Estes últimos, por estarem bem afastados um do outro, experimentam f.e.m. diferentes, as quais são sensivelmente equalizadas pela transposição do circuito (1).

Os dois fios do circuito induzido, designados por A e B, não são fisicamente idênticos. Do processo de fabricação existem pequenas diferenças entre os seus parâme

metros (por exemplo, o desbalanceamento resistivo mostrado na tabela 2.1), assim como dos outros elementos que fazem parte do seu circuito longitudinal.

As pequenas diferenças nos circuitos longitudinais dos dois fios levam a fatores do circuito longitudinal ligeiramente diferentes e, conseqüentemente, a tensões longitudinais também ligeiramente diferentes. A essa diferença de tensões longitudinais entre os dois fios do par, que corresponde a uma diferença de potencial entre o fio A e o fio B, denomina-se "tensão transversal" (V_t).

Define-se como "fator de ruído" (Fr) à razão entre a tensão transversal e a tensão longitudinal de um par em um dado ponto da linha. Observe-se que nesta definição não é necessário especificar a qual dos condutores do par se refere a tensão longitudinal porque, como elas são bastante próximas, isto é irrelevante. Num caso atípico, onde as tensões longitudinais forem significativamente distintas, considera-se a de maior valor para o cálculo do fator do ruído. Desta forma, este fator também fica limitado entre 0 e 1.

A tensão transversal é responsável por interferência nas linhas de telecomunicações que se manifestam de diversas formas. Uma delas é o ruído audível na cápsula

telefônica.

A intensidade desta interferência é função não apenas da magnitude da tensão transversal, como também da sua frequência. Isto se dá porque tanto a cápsula telefônica quanto o ouvido humano têm uma resposta que é função da frequência.

Logo, define-se como fator psufométrico à razão entre a tensão transversal em uma frequência de referência e a tensão transversal em uma outra frequência que cause a mesma interferência na conversação que a tensão de referência. Ao produto da tensão transversal (V_t) pelo seu fator psufométrico (F_p) denomina-se tensão transversal psufométrica (V_{tp}), a qual é usualmente medida em milivolts psufométricos (mVp).

4.2 - O Processo

Conforme foi visto, o fenômeno da indução magnética foi dividido em etapas, as quais, quando encadeadas, constituem o processo da indução magnética. Observe-se que todas estas etapas são simultâneas, pois se trata de um único fenômeno, onde o seu seccionamento consiste em um artifício de análise.

O diagrama da figura 4.4 descreve esquematicamente o processo da indução magnética. Este diagrama é composto de variáveis (tensões e correntes) dentro das setas e parâmetros (funções de transferência) dentro dos blocos. Pode-se observar que o processo representado é unidirecional (no sentido das setas), não comportando nenhum tipo de realimentação, o que simplifica bastante a análise dos fenômenos. Isto significa que uma dada variável só é afetada pelos blocos e variáveis anteriores, sendo insensível aos blocos e variáveis subsequentes.

A título de exemplo, considere-se uma linha de energia elétrica e uma linha de telecomunicações que tenham uma impedância mútua de 5Ω . Caso circule uma corrente de 10 A na linha de energia elétrica é induzida uma f.e.m. de 50 V na linha de telecomunicações. Seja o fator de blindagem para esta linha igual a 0,8. Logo a f.e.m. resultante vale 40 V. Considere-se um assinante localizado em um ponto da linha cujo fator de circuito longitudinal vale 0,5, o que determina uma tensão longitudinal neste ponto de 20 V. Considerando-se que neste ponto o fator de ruído vale 0,001, a tensão transversal é de 20 mV. Para a frequência de 60 Hz o fator psfométrico vale 0,00235, o que leva a uma tensão transversal psfométrica de 0,047 mVp.

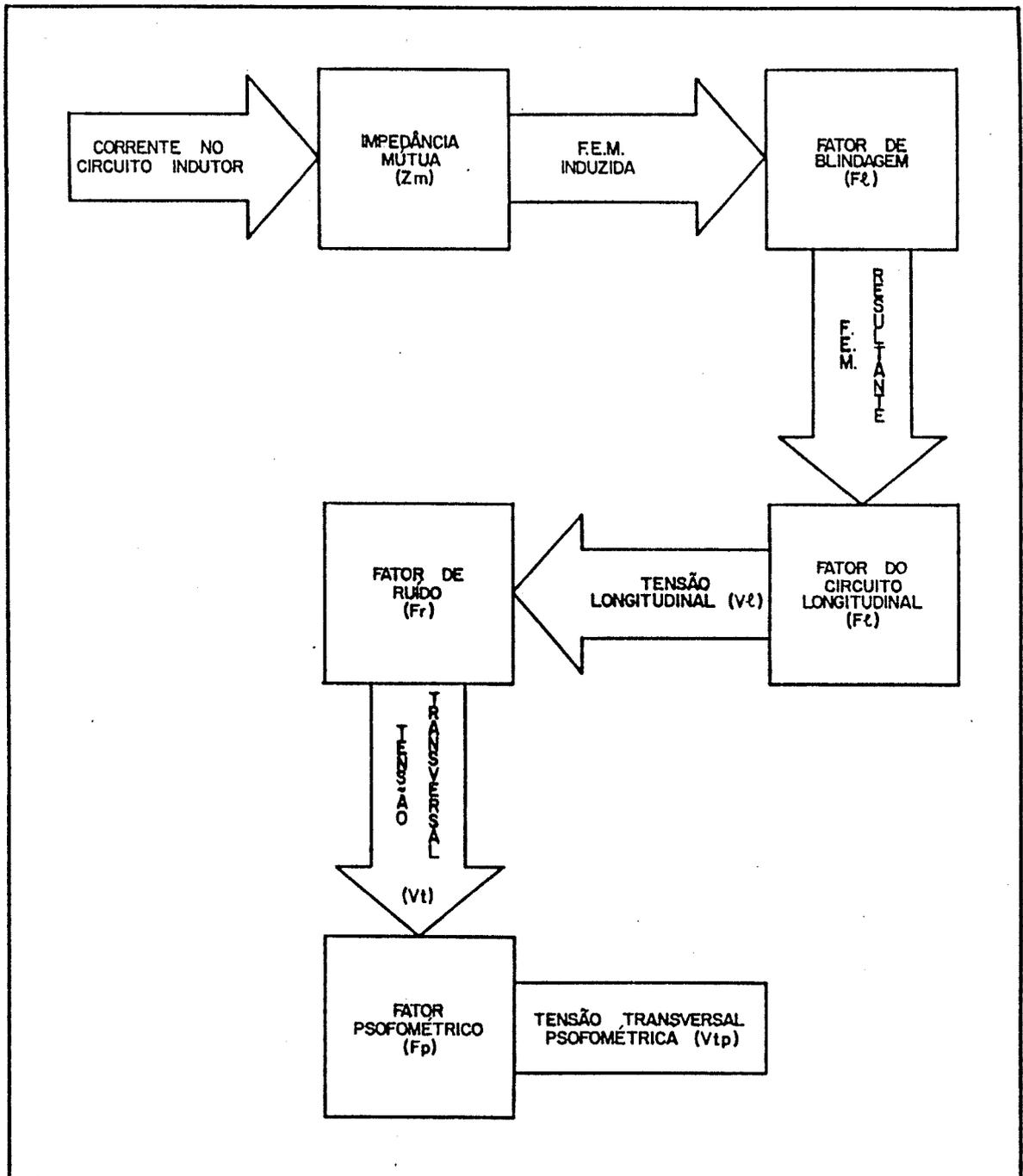


Figura 4.4 - Diagrama do Processo de Indução Magnética.

A figura 4.5 mostra o diagrama do processo de indução magnética para este exemplo.

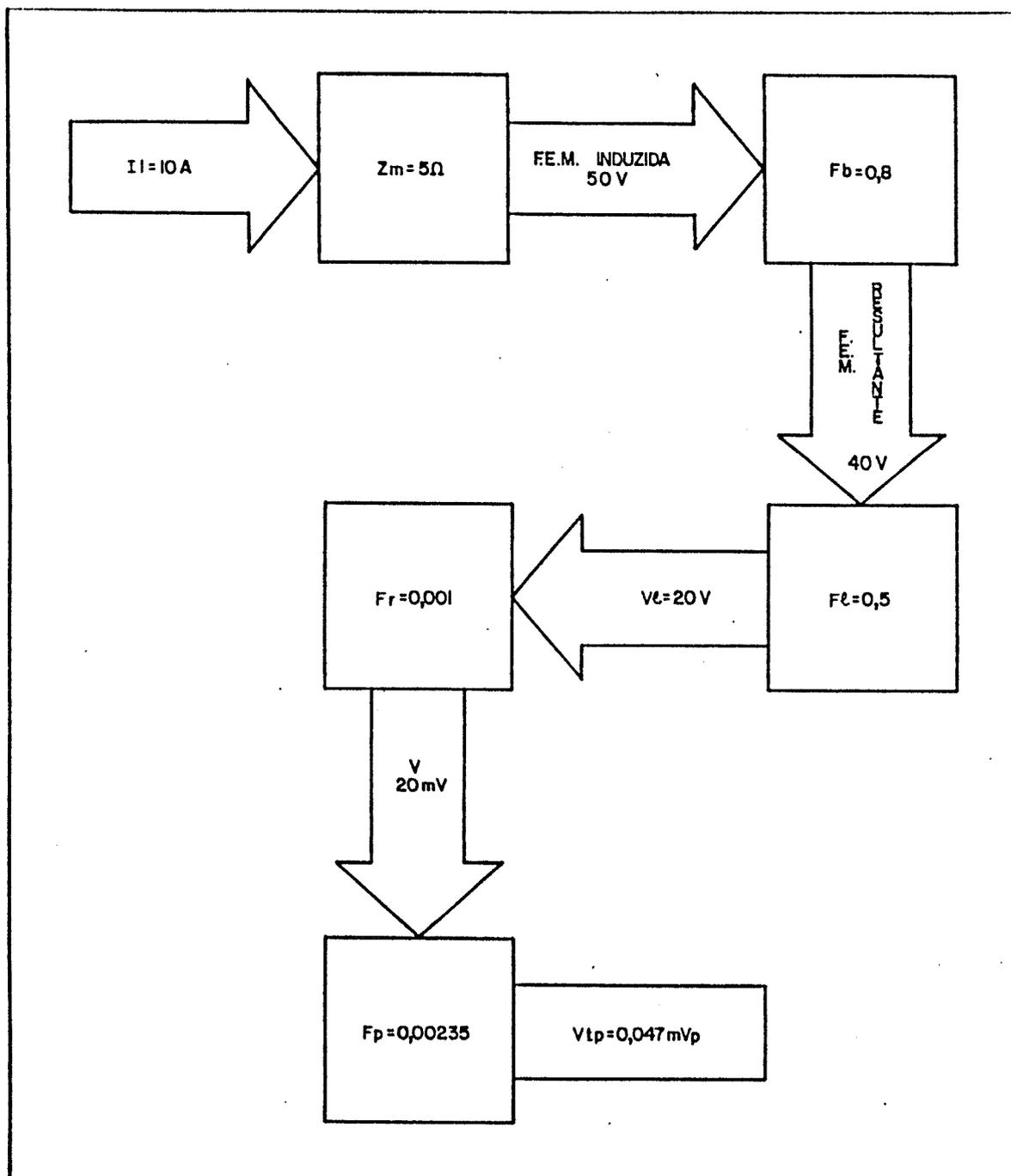


Figura 4.5 - Exemplo do Processo de Indução Magnética.

CAPÍTULO 5 - IMPEDÂNCIA MÚTUA E FORÇA ELETROMOTRIZ INDUZIDA

5.1 - Impedâncias de Circuitos com Retorno por Terra

As impedâncias próprias e mútuas de linhas onde as correntes circulam em condutores metálicos são obtidas com relativa facilidade (31). No entanto, quando o retorno de corrente é feito pela terra as condições de contorno do problema requerem cálculos bem mais elaborados.

Rüdenberg (3) propôs em 1925 uma solução para o problema, através de aproximações que o dotava de condições de simetria suficientes para a solução analítica das equações de Maxwell.

A expressão obtida por Rüdenberg para as impedâncias próprias e mútuas, na sua forma simplificada (32), é:

$$Z = u \ell + 2\pi f \ell 10^{-4} \left[\frac{\pi}{2} + j \left[\ln \left(\frac{\rho}{f \cdot d^2} \right) + 12,67 \right] \right]$$

onde Z é a impedância em Ω , ℓ é o comprimento da linha em km, f é a frequência em Hz e ρ é a resistividade do solo em $\Omega \cdot m$.

Para o cálculo da impedância própria u é a resistência do condutor em Ω/Km e d é o raio médio geométrico (RMG) do condutor em metros. Para o cálculo da impedância mútua, u é zero e d é a distância entre o condutor indutor e o condutor induzido em metros.

Estas expressões são válidas para linhas que obedecem às restrições:

$$h < 150 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad ; \quad e < 200 \sqrt{\frac{\rho}{f}}$$

onde:

h - altura do condutor indutor em metros

e - distância entre o condutor indutor e a projeção sobre o solo do condutor induzido, em metros.

Esta expressão é desenvolvida no Apêndice 1 a partir da equação genérica de Rüdenberg para impedâncias próprias e mútuas de linhas com retorno por terra.

Em 1926 Carson (4) formulou uma nova solução para o problema sem adotar algumas das aproximações utilizadas por Rüdenberg. A figura 5.1 mostra as indutâncias mútuas calculadas com base nas fórmulas de Carson, para 60Hz.

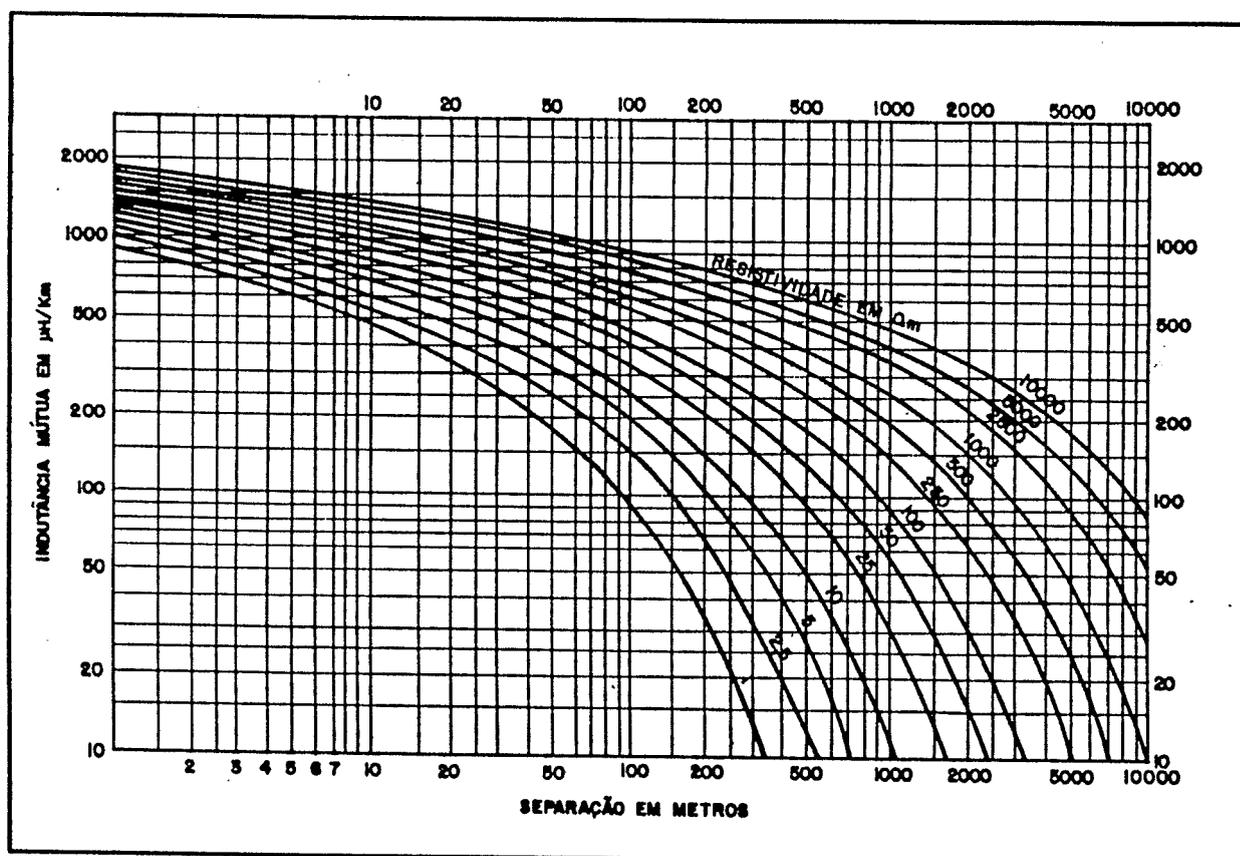


Figura 5.1 - Curvas de Carson

Em 1967 Krakowsky (33) obteve uma extensão das fórmulas de Carson levando em consideração a existência de um ângulo entre os condutores, i.é., nos casos onde as linhas são oblíquas. Outro método adotado nestes casos consiste em se considerar as projeções da linha induzida sobre a linha indutora, de modo a reduzir o problema a um caso de paralelismo. Embora seja uma aproximação, este método leva a resultados satisfatórios na prática.

5.2 - Distribuição de Corrente na Terra

Para se compreender o papel desempenhado pela terra é importante compreender a distribuição de corrente na mesma. Considere-se uma linha cujo retorno de corrente se faça pela terra. A corrente que flui pela terra enfrenta dois compromissos contraditórios. Por um lado ela tende a dispersar-se, pois através do aumento da área utilizada reduz a resistência que lhe é imposta pela terra. Por outro lado, ao se dispersar ela aumenta o fluxo magnético concatenado e, conseqüentemente, a indutância do circuito. A solução de compromisso corresponde a uma condição de mínima impedância, na qual a corrente se distribui em uma área nas imediações do condutor, a qual diminui com o aumento da freqüência. No caso limite da corrente contínua a mesma se distribui em toda a terra disponível.

A figura 5.2 mostra a distribuição de corrente na terra para as freqüências de 60 Hz e 1000 Hz, considerando-se uma resistividade do solo de 250 Ω .m.

Observe-se que quanto menor a freqüência, maior é a área que corrente ocupa. A curva demarcada por 60 Hz - 90% indica que 90% da corrente de freqüência industrial circula dentro de um raio de cerca de 2,2 Km da linha indutora.

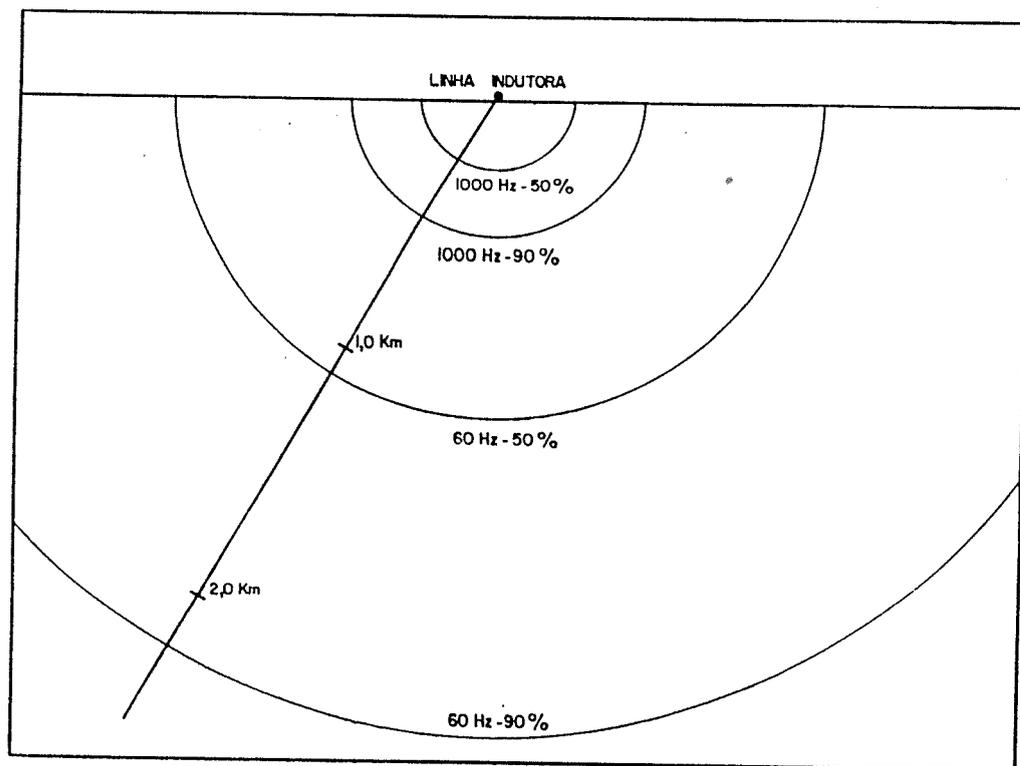


Figura 5.2 - Distribuição de Corrente na Terra.

Com o aumento da resistividade do solo tem-se o aumento da dispersão da corrente. Caso a resistividade do solo fosse cerca de $4200 \Omega.m$, por exemplo, a corrente de 1000 Hz se dispersaria de modo a ocupar a região da corrente de 60 Hz na figura 5.2.

Outra conclusão importante originada pela análise da distribuição de corrente pela terra é que o percurso da corrente segue o trajeto da linha. Considere-se uma linha de transmissão em corrente alternada que tenha um curto-circuito para a terra, conforme a figura 5.3. A corren-

te de curto-circuito mantém-se seguindo o trajeto da linha até a subestação, ao invés de procurar o caminho mais curto.

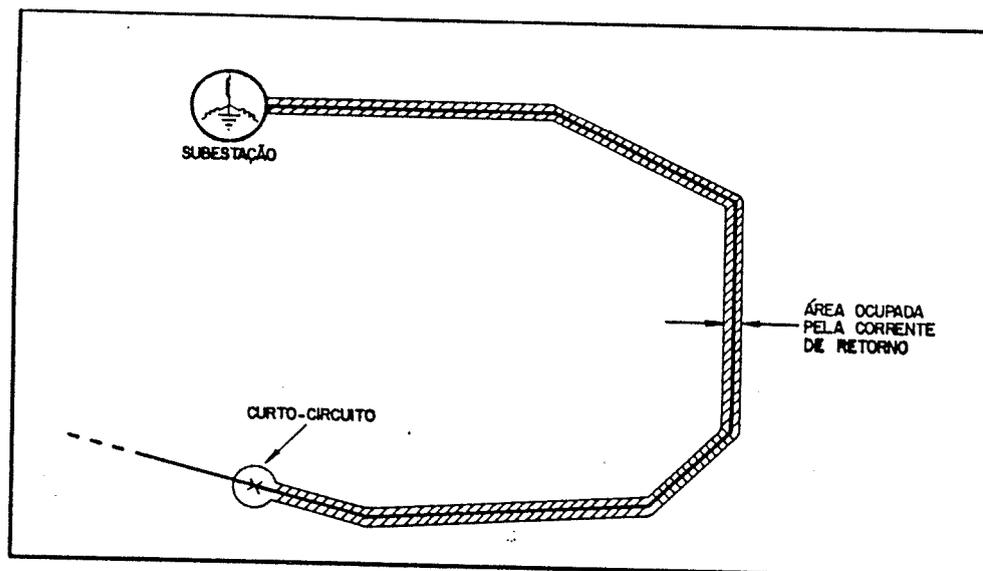


Figura 5.3 - Trajeto da Corrente de Curto-Circuito.

Dois pontos na superfície da terra localizados dentro do raio de distribuição da corrente de retorno e dispostos longitudinalmente em relação à linha terão potenciais diferentes. Esta diferença de potencial é diretamente proporcional à magnitude da corrente. De fato, a terra entre estes dois pontos comporta-se como uma impedância, a qual foi definida por Rùdenberg.

A figura 5.4 mostra esquematicamente o circuito equivalente da terra. Como a tensão entre os pontos A

e B é adiantada em relação à corrente de retorno, a terra é modelada como uma impedância indutiva. Isto é válido para a região próxima à linha, onde estas tensões assumem valores significativos. A título de curiosidade, cabe comentar que em locais afastados da linha a tensão entre os pontos A e B chega a ficar atrasada em relação à corrente, caracterizando a terra como uma impedância capacitiva.

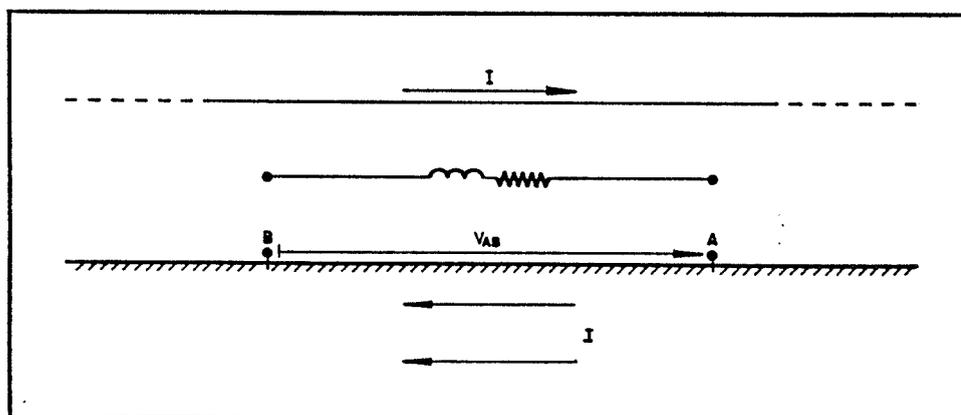


Figura 5.4 - Circuito Equivalente da Terra.

Dessa forma, quando se trata de indução magnética, a terra deve ser tratada como um condutor cujo potencial varia de um local para outro. Por exemplo, a terra nas imediações da ponta de um par telefônico pode estar em um potencial dezenas (ou mesmo centenas) de volts diferente do potencial do terra da estação telefônica de onde parte o par.

5.3 - Impedâncias Próprias e Mútuas

Como visto em 4, a f.e.m. induzida é dada pelo produto entre a corrente indutora e a impedância mútua entre os circuitos indutor e induzido. No caso genérico, onde o circuito indutor seja composto por "n" condutores, a força eletromotriz induzida total é dada por:

$$\text{f.e.m.} = \sum_{i=1}^n I_i \cdot Z_{it}, \text{ onde}$$

I_i é a corrente no condutor i e

Z_{it} é a impedância mútua entre o condutor i e o circuito induzido. Observe-se que em geral, tanto I_i como Z_{it} são grandezas complexas.

Um caso particular e de grande interesse prático é o acoplamento entre uma linha de distribuição de energia elétrica e uma linha de telecomunicações, conforme discutido em 3. Dessa forma, é feita a seguir a aplicação das expressões de 5.1 nestes tipos de linhas.

A geometria considerada é dada na figura 5.5, para uma estrutura típica de distribuição. Considera-se a frequência industrial (60 Hz) e a resistividade do solo como 500 Ω .m.

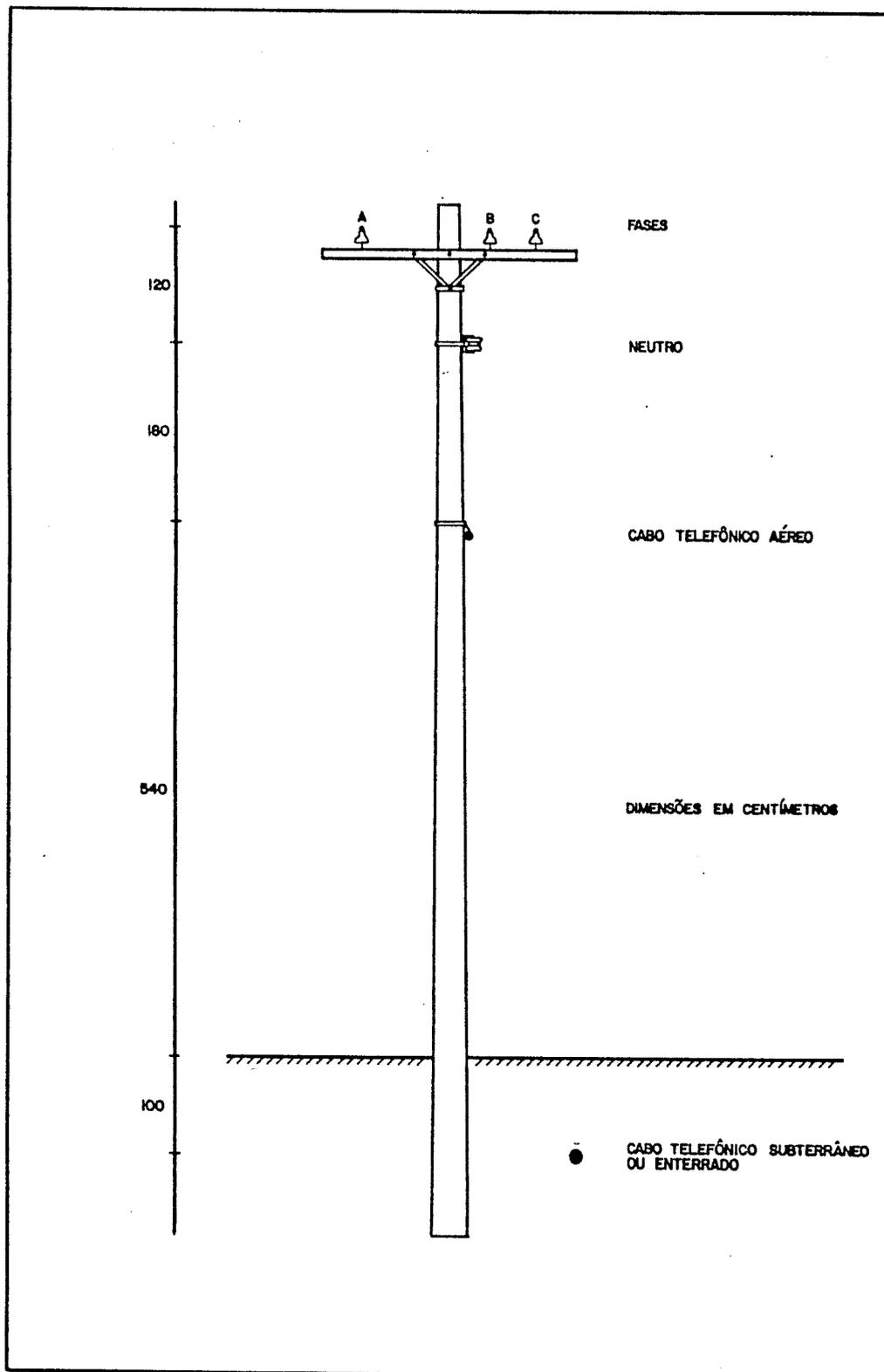


Figura 5.5 - Linhas de Energia e Telecomunicações.

Os cálculos são feitos com as fórmulas de Carson (4), as quais foram programadas em computador. No caso das impedâncias de linhas de distribuição faz-se também o cálculo com a expressão simplificada de Rüdenberg (32), para efeito de comparação.

5.3.1 - Impedâncias Próprias

As impedâncias próprias das linhas primárias de distribuição para o retorno de corrente pela terra são mostradas na tabela 5.1 para as equações de Carson e na tabela 5.2 para as equações de Rüdenberg. Para este caso, o desvio nos valores das impedâncias é bem pequeno, em torno de 2%.

Os cabos da linha de energia foram considerados como de alumínio com núcleo de aço, sendo os seus parâmetros obtidos de (31).

Em todas as tabelas tem-se o módulo da impedância (Z) assim como as suas componentes real (R) e imaginária (X).

Para as linhas de telecomunicações escolheu-se alguns cabos representativos sendo a instalação aérea e subterrânea ou enterrada. Os valores das resistências das

blindagens foram obtidos com base em (7), as quais são dadas no Apêndice 2.

IMPEDÂNCIAS PRÓPRIAS			
CABO	R(Ω /km)	X(Ω /km)	Z(Ω /km)
336,4 MCM	0,227	0,958	0,985
4/0 AWG	0,336	1,041	1,094
2/0 AWG	0,499	1,076	1,186
1/0 AWG	0,613	1,086	1,247
2 AWG	0,939	1,091	1,439
4 AWG	1,458	1,088	1,819

Tabela 5.1 - Distribuição Primária - Carson.

IMPEDÂNCIAS PRÓPRIAS			
CABO	R(Ω /km)	X(Ω /km)	Z(Ω /km)
336,4 MCM	0,228	0,927	0,955
4/0 AWG	0,337	1,010	1,065
2/0 AWG	0,500	1,045	1,158
1/0 AWG	0,614	1,055	1,221
2 AWG	0,940	1,060	1,417
4 AWG	1,459	1,057	1,802

Tabela 5.2 - Distribuição Primária - Rüdénberg.

A figura 5.5 mostra a geometria das instalações. A tabela 5.3 fornece as impedâncias do circuito longitudinal da blindagem para alguns cabos aéreos do tipo CTP-APL, enquanto a tabela 5.4 fornece esses valores para cabos tipo CT instalados em dutos subterrâneos ou enterrados.

IMPEDÂNCIAS PRÓPRIAS			
CABO	R(Ω /km)	X(Ω /km)	Z(Ω /km)
50/0,40	2,958	0,959	3,110
100/0,40	2,058	0,933	2,260
400/0,40	1,158	0,885	1,457
50/0,64	2,158	0,936	2,352
100/0,64	1,658	0,913	1,893
400/0,64	0,858	0,569	1,030

Tabela 5.3 - Cabo Aéreo - tipo CTP-APL.

IMPEDÂNCIAS PRÓPRIAS			
CABO	R(Ω /km)	X(Ω /km)	Z(Ω /km)
50/0,40	3,459	0,965	3,591
100/0,40	2,459	0,945	2,634
400/0,40	1,159	0,902	1,495
50/0,65	2,259	0,939	2,446
100/0,65	1,559	0,918	1,809
400/0,65	0,719	0,875	1,133

Tabela 5.4 - Cabo Subterrâneo - tipo CT.

5.3.2 - Impedâncias Mútuas

As impedâncias mútuas entre os condutores da linha de energia e as linhas de telecomunicações da figura 5.5 são mostradas na tabela 5.5 para a linha aérea e na tabela 5.6 para a subterrânea.

Em todos os casos trata-se dos circuitos com retorno por terra, exceto para os circuitos fase-neutro e trifásico que são circuitos metálicos.

Por exemplo, uma corrente de 1A (60Hz) circulando pela fase B (figura 5.5) e retornando pela terra induz uma tensão de 0,489V no cabo telefônico aéreo por quilômetro de paralelismo. Caso esta corrente retornasse pelo neutro (circuito fase B/neutro), a tensão induzida seria 0,039V. Caso a corrente circulasse nas fases A, B e C (trifásico), a tensão induzida seria 0,006V.

IMPEDÂNCIAS MÚTUAS			
CIRCUITO	R(Ω /km)	X(Ω /km)	Z(Ω /km)
FASE A	0,058	0,480	0,483
FASE B	0,058	0,486	0,489
FASE C	0,058	0,483	0,486
NEUTRO	0,058	0,525	0,528
FASE B/NEUTRO	0	0,039	0,039
TRIFÁSICO	—	—	0,006

Tabela 5.5 - Cabo Aéreo

IMPEDÂNCIAS MÚTUAS			
CIRCUITO	R(Ω /km)	X(Ω /km)	Z(Ω /km)
FASE A	0,058	0,398	0,402
FASE B	0,058	0,400	0,404
FASE C	0,058	0,400	0,404
NEUTRO	0,058	0,411	0,415
FASE B/NEUTRO	0	0,011	0,011
TRIFÁSICO	—	—	0,002

Tabela 5.6 - Cabo Subterrâneo.

Das tabelas 5.5 e 5.6 pode-se observar que as impedâncias mútuas para os circuitos metálicos (fase/neutro e trifásico) são muito menores do que para os circuitos com retorno por terra. Logo, conforme discutido em 3.2, são as linhas de energia elétrica que apresentam correntes circulando pela terra que representam fontes de indução magnética significativa.

5.4 - Medições de Forças Eletromotrizes Induzidas

As forças eletromotrizes induzidas por diversos circuitos de uma linha de distribuição de energia em uma linha de telecomunicações foram medidas em uma linha experimental com o objetivo de se verificar a correlação das

medições nesta linha com os valores calculados.

A figura 5.6a mostra os valores obtidos com a circulação de 1 A no circuito da fase da alta tensão e o neutro. A linha contínua corresponde ao valor teórico, enquanto os pontos representam os dados experimentais. A figura 5.6b corresponde ao circuito da fase da baixa tensão e o neutro.

Estas medições foram executadas variando-se o circuito indutor, a freqüência e a magnitude da corrente. A Referência (34) descreve com detalhes as medições de força eletromotriz induzidas nesta linha experimental.

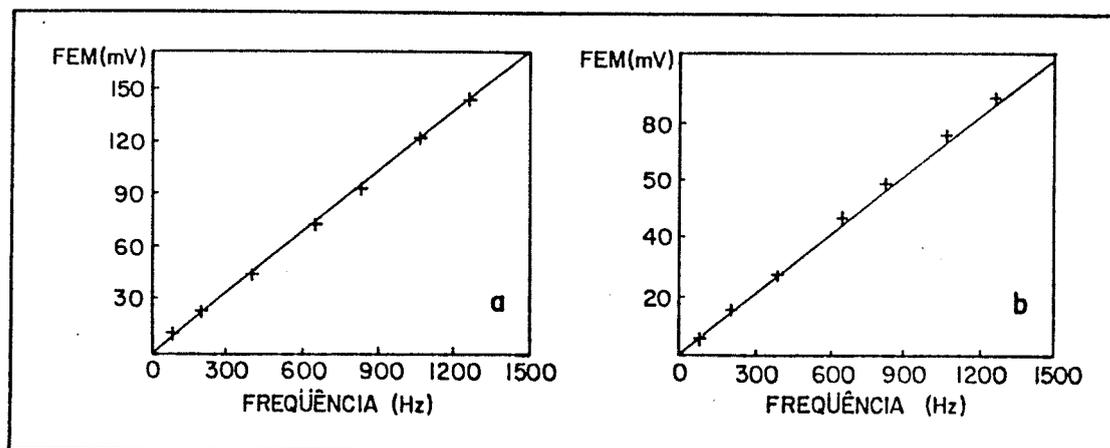


Figura 5.6 - F.E.M. Induzidas

- a) Circuito fase alta tensão/neutro
- b) Circuito fase baixa tensão/neutro.

CAPÍTULO 6 - FATOR DE BLINDAGEM E FORÇA ELETROMOTRIZ RESULTANTE

6.1 - A Teoria da Blindagem Magnética

O efeito de blindagem magnética é um fenômeno que é quantificado pelo fator de blindagem. O fator de blindagem foi definido em 4.1 como a razão entre a f.e.m. resultante no circuito induzido e a f.e.m. neste circuito devido exclusivamente ao circuito indutor. Mesmo sendo o fator de blindagem uma grandeza complexa, nos casos práticos o que é importante é o seu módulo.

Considerando-se as impedâncias definidas em 4.1 e com base na figura 4.2, pode-se expressar o fator de blindagem (F_b) por:

$$F_b = 1 - \frac{Z_{13} \cdot Z_{23}}{Z_{12} \cdot Z_3}$$

onde Z_3 é a impedância própria do circuito da blindagem incluindo as resistências de aterramento.

Com base nas impedâncias que envolvem a blindagem (Z_{13} , Z_{23} e Z_3) é que são elaborados os procedimentos para se reduzir o fator de blindagem. De fato, quer-se re-

duzir Z_3 e aumentar Z_{13} e Z_{23} .

Reduzir a impedância própria da blindagem (Z_3) implica em construir boas conexões à terra (baixas resistências de aterramento) e utilizar um condutor de baixa resistência como blindagem.

Aumentar a impedância mútua entre a blindagem e o circuito induzido (Z_{23}) implica em aproximar esses condutores até o limite onde a blindagem envolve o condutor induzido e aumentar a permeabilidade do meio através da utilização de cabos armados com fitas de aço, por exemplo.

Aumentar a impedância mútua entre a blindagem e o circuito indutor (Z_{13}) implica em se aproximar a blindagem do circuito indutor, embora isto seja conflitante com o exposto no parágrafo anterior.

No caso particular onde o condutor de blindagem é a capa metálica do cabo, $Z_{13} = Z_{12}$, sendo que o fator de blindagem é dado por:

$$F_b = 1 - \frac{Z_{23}}{Z_3}$$

6.2 - Aspectos Relevantes no Efeito de Blindagem

6.2.1 - Posição Relativa do Condutor de Blindagem

O condutor de blindagem magnética não precisa, necessariamente, ser colocado entre o condutor indutor e o induzido, nem precisa envolver este último. Como foi visto a posição do condutor de blindagem influi em Z_{23} e Z_{13} . Com o objetivo de se otimizar o fator de blindagem deve-se maximizar o produto $Z_{23} \cdot Z_{13}$.

Pode-se demonstrar que isto ocorre quando o condutor de blindagem está bem próximo do condutor indutor ou do induzido. Como o condutor indutor é em geral um condutor de energia elétrica, a condição prática para se minimizar o fator de blindagem é aproximar a blindagem do condutor induzido.

6.2.2 - Material do Condutor de Blindagem

Para se analisar o efeito do material do condutor de blindagem no efeito de blindagem considera-se as duas situações mostradas na figura 6.1.

Na primeira situação (a), o material da blindagem só influi no fator de blindagem através da impedância

própria Z_3 .

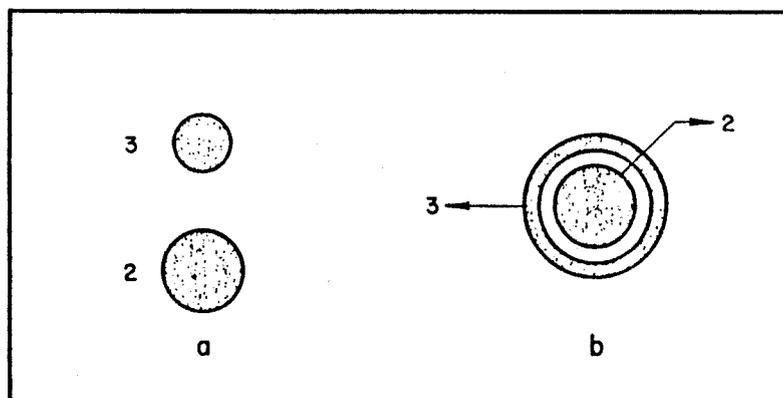


Figura 6.1 - Posições da Blindagem.

Considerando-se que a blindagem está próxima do condutor induzido, o fator de blindagem é dado aproximadamente por:

$$F_b = 1 - Z_{23}/Z_3$$

A minimização de F_b é obtida quando Z_3 se aproxima de Z_{23} tanto em módulo quanto em fase. Como Z_{23} tem um módulo menor que Z_3 e uma relação X/R maior (ver as tabelas do Capítulo 5), conclui-se que uma redução da resistência da blindagem contribui para a redução do fator de blindagem tanto pela redução do módulo de Z_3 quanto pelo aumento de sua relação X/R.

Uma das maneiras de se reduzir a resistência da blindagem é através da utilização de um material de baixa resistividade na sua fabricação.

Uma outra característica do material que deve ser considerada é a sua permeabilidade magnética. Um aumento na permeabilidade do material da blindagem leva à um aumento na indutância própria da blindagem. Se por um lado este aumento na indutância é benéfico por elevar a relação X/R da blindagem, por outro lado ele eleva também o módulo de Z_3 . Usualmente o resultado líquido do aumento da permeabilidade do material da blindagem é a redução do fator de blindagem.

Na segunda situação da figura 6.1, isto é, quando o condutor de blindagem envolve o condutor induzido, o material da blindagem influi em Z_3 e Z_{23} .

A resistividade do material influencia apenas Z_3 , devendo ser a menor possível, conforme discutido anteriormente. Já a permeabilidade influencia Z_3 e Z_{23} . Como foi visto, o aumento da permeabilidade leva à redução do fator de blindagem. Neste caso esta redução é ainda mais pronunciada devido ao aumento de Z_{23} .

Este efeito é obtido através de cabos telefô-

nicos armados com fitas de aço. Observe-se que não se trata de uma atuação do aço no sentido de "desviar" as linhas de indução magnética dos pares, mas sim de aumentar a impedância mútua entre blindagem e pares através do aumento da permeabilidade de parte do meio.

6.2.3 - Resistências de Aterramento da Blindagem

Este parâmetro entra no cálculo de Z_3 e é, na maioria dos casos reais de linhas telefônicas, o parâmetro que determina o fator de blindagem. Isto se dá porque as limitações práticas da construção de sistemas de aterramento, aliadas aos comprimentos típicos de linhas telefônicas, levam a fatores de blindagem elevados, controlados pelas resistências de aterramento.

Qualitativamente, quanto menores as resistências de aterramento, menor é o fator de blindagem.

Cabe comentar que os fatores de blindagem associados a um dado cabo, conforme catálogos de fabricantes (35), são calculados tendo por hipótese resistências de aterramento nulas. Na prática esta condição está longe de ser obtida (mesmo em termos aproximados) para a rede local, o que faz com que esses fatores de blindagem nominais sejam uma informação de utilidade duvidosa, conforme argumenta

Menez (36).

6.3 - Multiaterramento da Blindagem

No ítem 6.1 o fator de blindagem foi calculado para uma blindagem aterrada nas extremidades. Por uma série de razões, freqüentemente tem-se a blindagem aterrada em mais de dois pontos (multiaterrada). A abordagem é essencialmente a mesma, só que neste caso tem-se de se resolver um sistema de equações com tantas equações quantas forem as secções da linha entre dois aterramentos sucessivos (ou o número de aterramento menos um).

Para calcular o fator de blindagem nestes casos foi desenvolvido um programa computacional capaz de resolver um sistema de equações complexas. Como análise qualitativa, considere-se uma blindagem que esteja uniformemente exposta a uma fonte indutora e aterrada em suas extremidades conforme a figura 6.2a. Neste caso a corrente de blindagem vale I .

Suponha-se que um novo aterramento seja construído no meio da blindagem (figura 6.2b). Não são necessários cálculos para se concluir que nenhuma corrente fluirá por este aterramento, de modo que a corrente de blindagem (e, conseqüentemente, o fator de blindagem) continua a mesma.

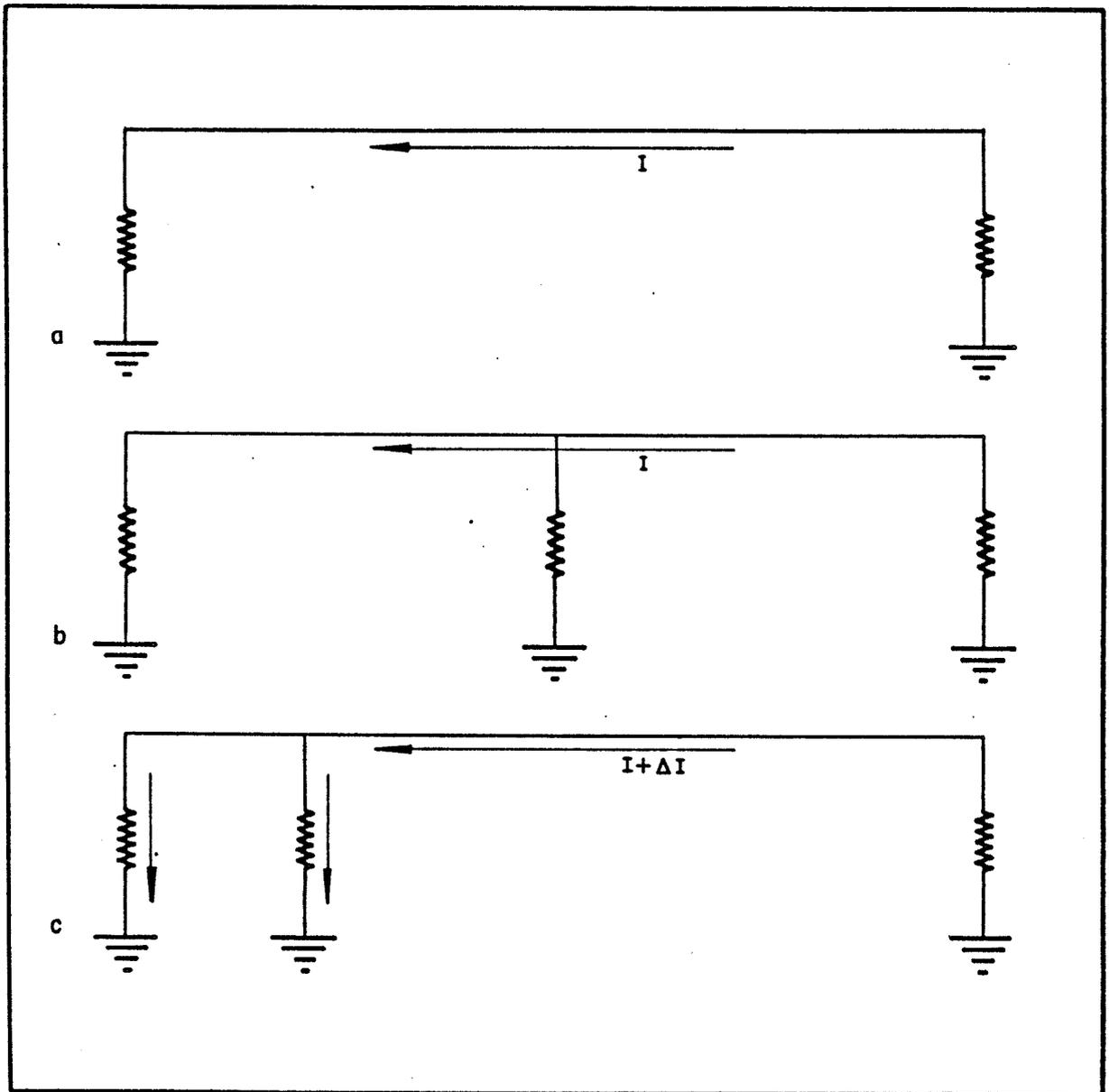


Figura 6.2 - Multiaterramento da Blindagem.

A seguir desloca-se este aterramento para a esquerda, em direção à extremidade do cabo (figura 6.2c). Neste caso a impedância da blindagem diminui e a corrente

aumenta, com a conseqüente redução do fator de blindagem.

Desta forma, conclui-se que se o problema for indução magnética, consegue-se maior redução do fator de blindagem investindo-se em aterramentos nas extremidades da blindagem do que em aterramentos ao longo da linha. Em (37) esta análise é feita em termos quantitativos.

6.4 - Tipos de Fator de Blindagem

O fator de blindagem descrito em 4.1 e analisado até aqui é o fator de blindagem referenciado ao terra remoto. É este fator de blindagem que está relacionado com um genuíno efeito de blindagem magnética.

No entanto, nas redes de telecomunicações têm-se freqüentemente efeitos redutores da tensão longitudinal que, por serem relativos ao circuito de blindagem, são também chamados (algo impropriamente) de fatores de blindagem.

A figura 6.3 mostra quatro possibilidades de conexão do par em relação à blindagem, com as respectivas designações dos fatores de blindagem.

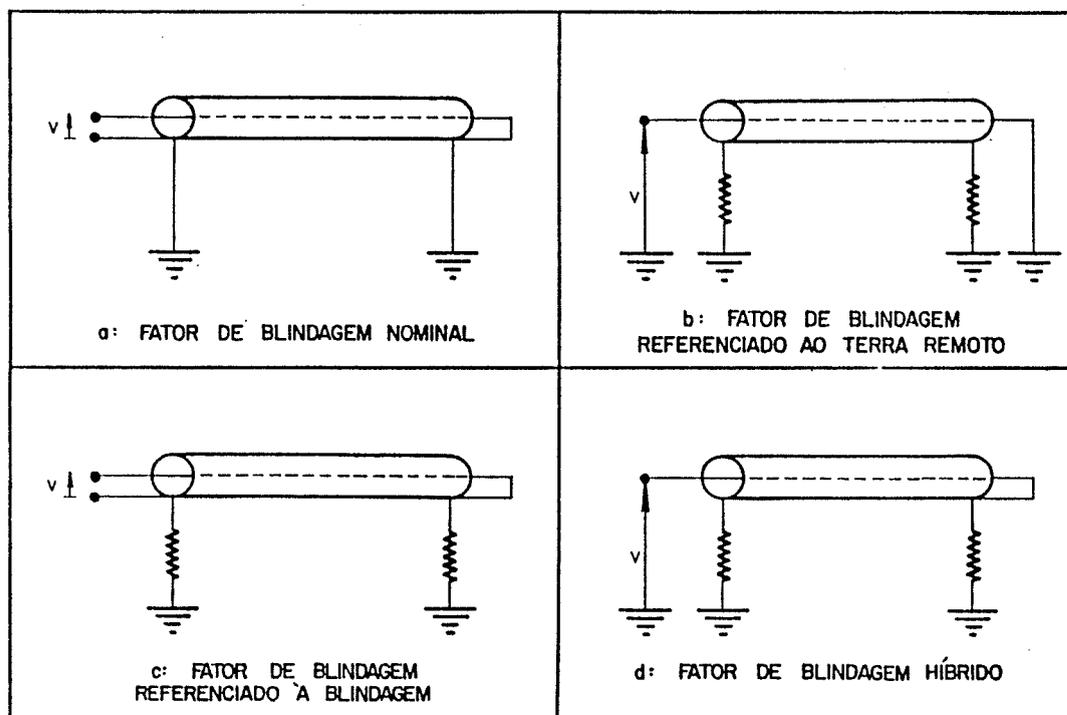


Figura 6.3 - Tipos de Fator de Blindagem.

Essas designações, com exceção de (d), são propostas pelo CCITT (38).

O fator de blindagem nominal (a) conforme foi comentado em 6.2.3, é um dado de pouca aplicação na rede local. Em linhas bem longas, onde as resistências de aterramento fiquem desprezíveis frente às outras impedâncias do circuito de blindagem, este valor representará o limite do fator de blindagem referenciado ao terra remoto.

O fator de blindagem referenciado ao terra re moto (b) representa o fator de blindagem magnética propriamente dito, onde o único acoplamento entre os circuitos de blindagem e induzido se dá através de campo magnético.

O fator de blindagem referenciado à blindagem (C) é um caso onde o acoplamento entre os circuitos indutor e induzido se dá também através de resistências. Este é o caso de cabos troncos, onde a blindagem é aterrada nas duas estações. Observe-se que a medição de tensão se faz em relação à malha de aterramento da estação da esquerda. Neste caso a tensão medida é dada basicamente pela queda de tensão na resistência da blindagem. É interessante notar que um aumento nas resistências de aterramento leva a uma redução deste "fator de blindagem".

O caso (d), chamado de híbrido, é uma representação rigorosa dos cabos de assinantes, onde a resistência da direita representa a malha de aterramento da estação. Como a resistência desta malha é muito menor do que a resistência de aterramento da rede externa, na prática este caso corresponde ao caso do fator de blindagem referenciado ao terra remoto (b).

6.5 - O Fator de Blindagem na Rede Local

Conforme foi visto no item 6.1, o fator de blindagem da capa metálica de um cabo telefônico é dado por:

$$F_b = 1 - \frac{Z_{23}}{Z_3}, \text{ onde } Z_{23} \text{ e } Z_3 \text{ são as impedâncias mútua}$$

e própria da blindagem em relação aos pares. Desenvolvendo-se esta expressão obtém-se para o módulo do fator de blindagem a equação:

$$F_b = (R_3 - R_{23}) (R_3^2 + X_3^2)^{-1/2}, \text{ onde}$$

$$X_3 = \omega l 10^{-7} \left(\ln \left(\frac{\rho}{fd^2} \right) + 12,67 \right)$$

$$R_3 = R_T + u l + \pi^2 f l 10^{-7}, \text{ onde}$$

R_T é a soma das resistências de aterramento da blindagem (a qual é aterrada apenas nas extremidades) e as outras variáveis são definidas no item 5.1.

Para linhas de assinantes considera-se como a resistência mútua entre blindagem e pares apenas a componente real da impedância mútua (ver item 5.1), obtendo-se:

$$R_3 - R_{23} = R_T + u l$$

O fator de blindagem calculado por esta expressão é o fator de blindagem referenciado ao terra remoto (ver figura 6.3), sendo que para $R_T = 0$ tem-se o fator de blindagem nominal.

A tabela 6.1 mostra os fatores de blindagem para um cabo tipo CT (blindagem de chumbo) de 400 pares e diâmetro dos fios de 0,50 mm. A tabela 6.2 mostra os fatores de blindagem para um cabo tipo CTP-APL (blindagem de alumínio) de 400 pares e 0,51 mm de diâmetro dos fios. Em ambos os casos considerou-se a resistividade do solo de $500 \Omega.m$ e variou-se o comprimento das linhas, a frequência e as resistências de aterramento. A referência (37) mostra os fatores de blindagem para uma ampla variação destes parâmetros. Os valores das tabelas 6.1 e 6.2 podem ser tomados como representativos para linhas de assinantes.

Comparando-se as tabelas 6.1 e 6.2 observa-se que as blindagens de chumbo e de alumínio são aproximadamente equivalentes quanto ao fator de blindagem. Para a frequência industrial e valores de resistências de aterramento que são normalmente obtidas em campo, o fator de blindagem situa-se em geral acima de 0,90.

Para linhas troncos as resistências de aterramento das estações fazem parte da resistência mútua entre

blindagem e pares, obtendo-se:

$$R_3 - R_{23} = u\ell$$

f (Hz)	L(km)	Rt (Ω)						
		0	0,1	1	5	10	15	30
60	1,0	0,70	0,74	0,89	0,98	0,99	0,99	1,00
	2,0	0,70	0,72	0,83	0,95	0,98	0,99	0,99
	5,0	0,70	0,71	0,76	0,89	0,94	0,96	0,98
	15,0	0,70	0,70	0,72	0,80	0,85	0,89	0,94
900	1,0	0,08	0,09	0,16	0,45	0,67	0,78	0,92
	2,0	0,08	0,08	0,12	0,28	0,45	0,57	0,78
	5,0	0,08	0,08	0,10	0,16	0,24	0,32	0,50
	15,0	0,08	0,08	0,08	0,11	0,14	0,16	0,24

Tabela 6.1 - Fatores de Blindagem para o cabo CT - 400/0,50
(linha de Assinantes)

f (Hz)	L(km)	Rt (Ω)						
		0	0,1	1	5	10	15	30
60	1,0	0,74	0,77	0,90	0,98	0,99	0,99	1,00
	2,0	0,74	0,75	0,85	0,96	0,98	0,99	0,99
	5,0	0,74	0,74	0,79	0,90	0,95	0,96	0,98
	15,0	0,74	0,74	0,76	0,82	0,87	0,90	0,95
900	1,0	0,09	0,10	0,17	0,46	0,67	0,79	0,92
	2,0	0,09	0,09	0,13	0,29	0,46	0,58	0,79
	5,0	0,09	0,09	0,11	0,17	0,25	0,33	0,51
	15,0	0,09	0,09	0,09	0,12	0,15	0,17	0,25

Tabela 6.2 - Fatores de Blindagem para o cabo CTP-APL -
400/0,51 (Linha de Assinantes)

O fator de blindagem calculado por esta expressão é o fator de blindagem referenciado à blindagem (ver figura 6.3). Também neste caso para $R_T = 0$ tem-se o fator de blindagem nominal.

A tabela 6.3 mostra os fatores de blindagem para um cabo tipo CT de 400 pares e diâmetro dos fios de 0,50 mm. Considerou-se a resistividade do solo de 500 $\Omega \cdot m$ e variou-se o comprimento das linhas, a frequência e as resistências de aterramento das estações onde o cabo termina.

f (Hz)	L(km)	Rt (Ω)						
		0	0,1	1	5	10	15	30
60	1,0	0,70	0,66	0,42	0,15	0,08	0,06	0,03
	2,0	0,70	0,68	0,53	0,25	0,15	0,11	0,06
	5,0	0,70	0,69	0,63	0,42	0,29	0,22	0,13
	15,0	0,70	0,70	0,68	0,58	0,49	0,42	0,29
900	1,0	0,08	0,08	0,08	0,07	0,06	0,04	0,03
	2,0	0,08	0,08	0,08	0,07	0,07	0,06	0,04
	5,0	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,07	0,07
	15,0	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08

Tabela 6.3 - Fatores de Blindagem para o cabo CT - 400/50
(Linha Tronco)

Observe-se que a dependência do fator de blindagem referenciado à blindagem (tabela 6.3) com relação às resistências de aterramento e ao comprimento da linha é o inverso da dependência do fator de blindagem referenciado ao terra remoto (tabelas 6.1 e 6.2).

Para a frequência industrial e valores de resistências de aterramento típicas de estações telefônicas, o fator de blindagem de cabos troncos situa-se em torno de 0,5.

A influência direta da resistividade do solo no fator de blindagem é desprezível em termos práticos. Por exemplo, um aumento de 10 vezes na resistividade do solo leva a uma redução no fator de blindagem inferior a 1%. No entanto, a resistividade do solo influi indiretamente no fator de blindagem, através dos valores das resistências de aterramento, conforme comentado no item 6.2.3.

O fator de blindagem diminui com a frequência (Tab. 6.1, 6.2, 6.3) porque a impedância mútua (fortemente indutiva) se aproxima da própria.

CAPÍTULO 7 - FATOR DE CIRCUITO LONGITUDINAL E TENSÃO LONGITUDINAL

Em 4.1 a tensão longitudinal (V_l) foi definida como a diferença de potencial entre um condutor do circuito induzido e a terra adjacente, em um dado ponto do circuito. Da mesma forma, define-se o fator de circuito longitudinal (F_l) à razão entre a tensão longitudinal em um dado ponto do circuito e a f.e.m. resultante no circuito.

7.1 - Distribuição do Fator de Circuito Longitudinal

O fator de circuito longitudinal e, conseqüentemente, a tensão longitudinal, são determinados basicamente pelas impedâncias para a terra do condutor em questão e pela posição relativa da zona de exposição ao circuito indutor.

7.1.1 - Condutores Referenciados à Terra em uma Extremidade

Estes condutores constituem os pares representativos da grande maioria da rede local brasileira, sendo descritos em detalhe em 2.2.1. O seu circuito longitudinal é dado na figura 2.4.

Como as impedâncias da bobina de alimentação e do condutor são muito menores do que a impedância das capacitâncias parasitas para a terra, o condutor é mantido no potencial de terra da estação. Dessa forma, a tensão longitudinal é dada pela f.e.m. induzida desde o ponto de aterramento (no caso, a estação) até o ponto onde a mesma é medida.

A figura 7.1a mostra a distribuição do fator de circuito longitudinal para uma indução uniforme ao longo do circuito induzido enquanto a figura 7.1b mostra esta mesma distribuição para uma indução localizada em um dado trecho do circuito.

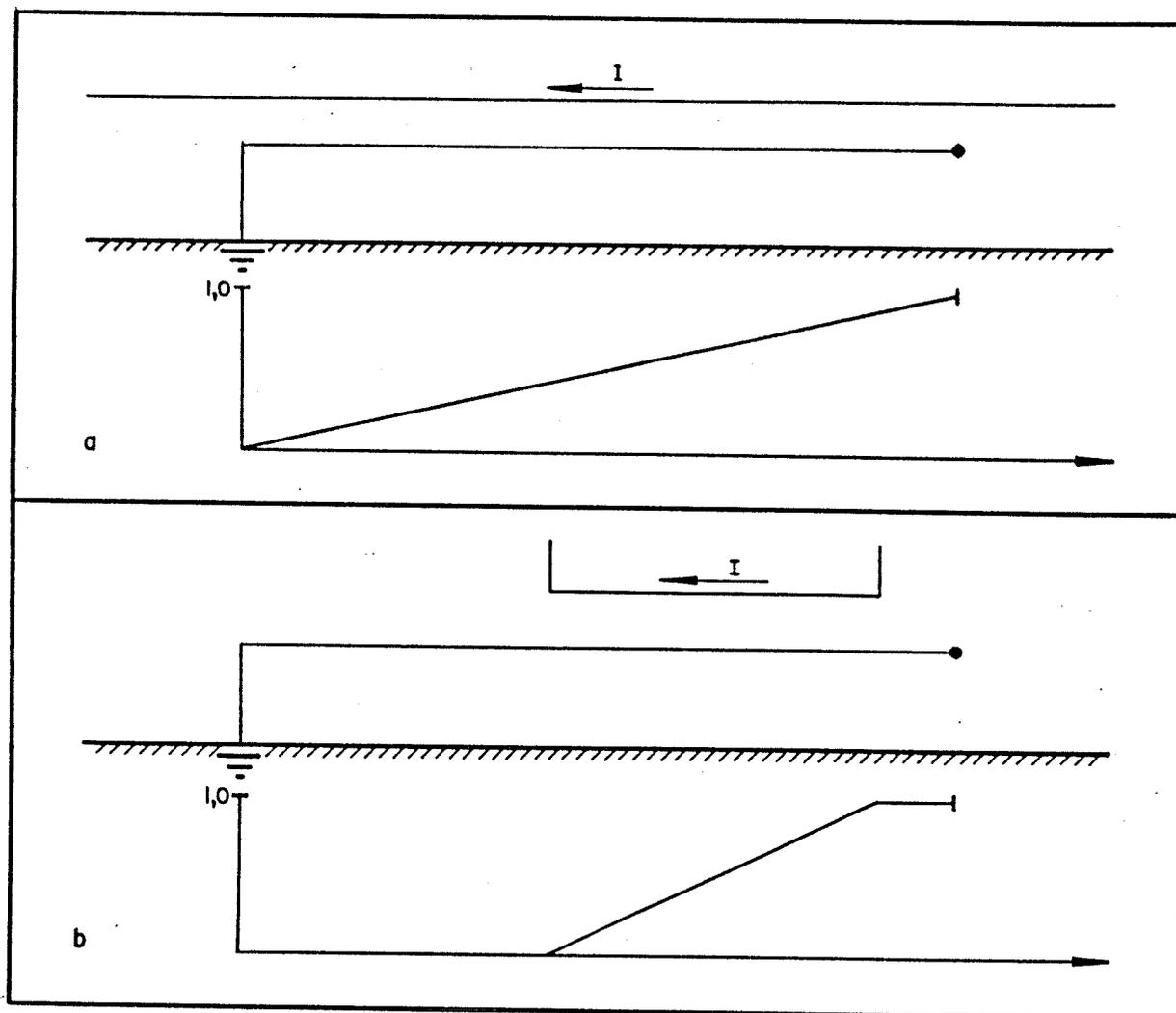


Figura 7.1 - Distribuição do Fator de Circuito Longitudinal

a) Indução Uniforme

b) Indução Localizada

7.1.2 - Condutores de Potencial Flutuante

Estes condutores constituem os pares descritos em 2.2.2, sendo seu circuito longitudinal dado na figura 2.5.

Considerando-se uma mesma capacitância para a terra por unidade de comprimento do condutor e uma indução uniforme ao longo do mesmo, conclui-se que a tensão longitudinal é nula no ponto médio da linha, pois não flui nenhuma corrente pela capacitância relativa a este ponto (ver figura 7.2a).

A figura 7.2a mostra a distribuição do fator de circuito longitudinal para uma indução uniforme.

Para uma linha com indução localizada, a distribuição do fator de circuito longitudinal depende da posição relativa da zona de exposição. Para o seu cálculo, Person (39) fornece a seguinte expressão:

$$C_1 = (\ell_1 + p\ell_3) C$$

$$C_2 = (\ell_2 + p\ell_3) C$$

sendo $p = 1/3$ para $\ell_3 \leq \ell/2$ e

$$p = 1/4 \text{ para } \ell_3 > \ell/2$$

onde C_1 , C_2 , ℓ_1 , ℓ_2 e ℓ_3 são dados na figura 7.2b, C é a capacitância para a terra por unidade de comprimento do condutor e $\ell = \ell_1 + \ell_2 + \ell_3$.

A figura 7.2b mostra a distribuição do fator

de circuito longitudinal para uma indução localizada.

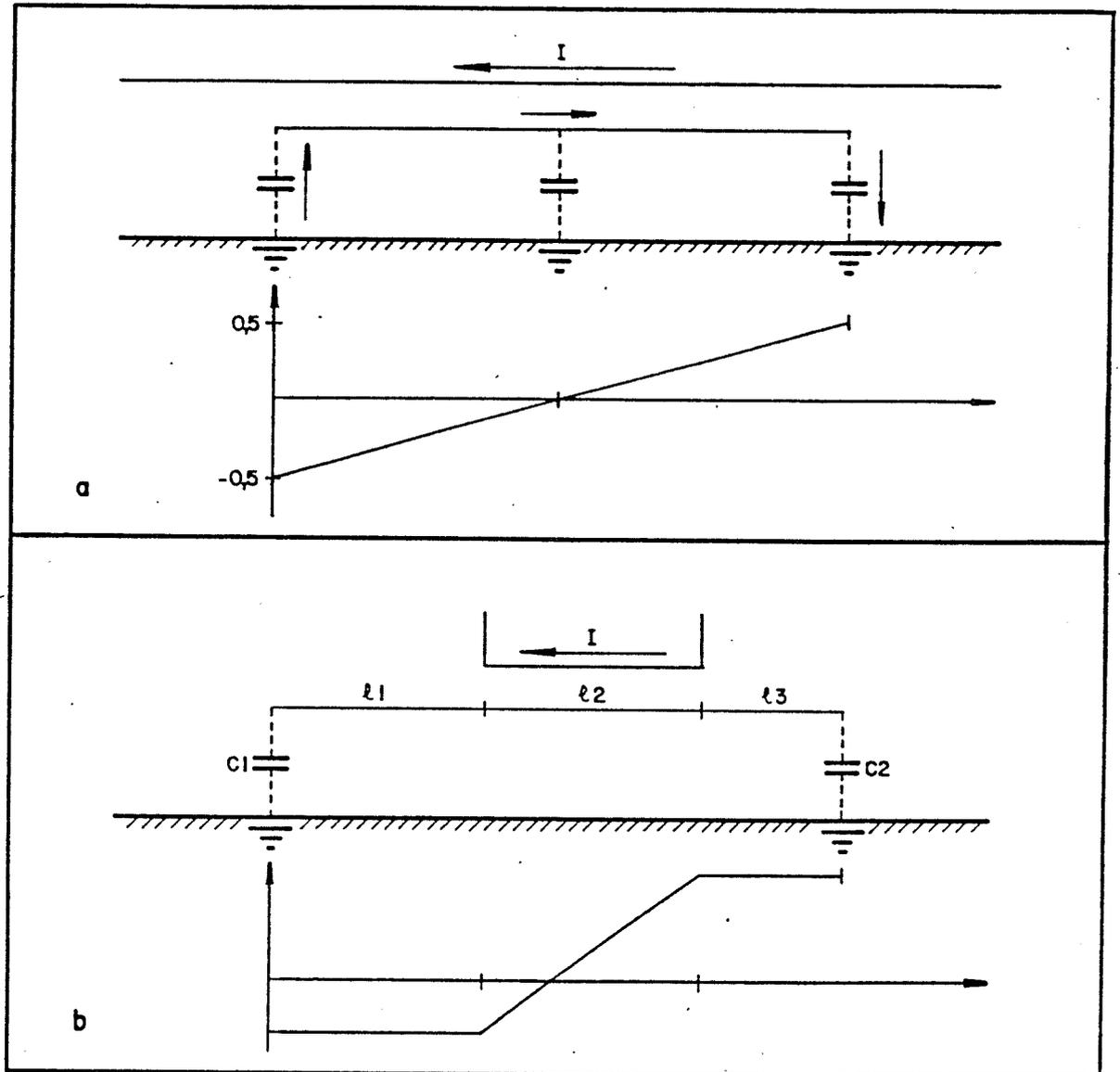


Figura 7.2 - Distribuição do Fator de Circuito Longitudinal

a) Indução Uniforme

b) Indução Localizada

7.1.3 - Condutores com Ambas as Extremidades Conectadas à Terra

Nesta condição os condutores são conectados à terra por impedâncias cujos valores são da ordem de grandeza das resistências dos condutores. Na prática esta situação ocorre quando da operação de centelhadores em ambas as extremidades de um par telerônico (por exemplo, no D.G. e na instalação do assinante). Desprezando-se a impedância do arco elétrico, o condutor induzido é conectado à terra a través das resistências de aterramento dos centelhadores. Co mo essas resistências são da mesma ordem de grandeza da resistência do condutor, este não pode mais ser considerado como uma equipotencial. De fato, parte da f.e.m. induzida desenvolve-se ao longo do mesmo, conforme mostra a figura 7.3a.

A figura 7.3a mostra a distribuição do fator de circuito longitudinal para uma indução uniforme, sendo:

$$Fl_1 = - R_1 / (R_1 + R_C + R_2) \quad e$$

$$Fl_2 = R_2 / (R_1 + R_C + R_2)$$

Observe-se que para R_1 e R_2 bem menores que R_C , a tensão longitudinal é nula ao longo de toda a linha.

A figura 7.3b mostra a distribuição do fator de circuito longitudinal para uma indução localizada.

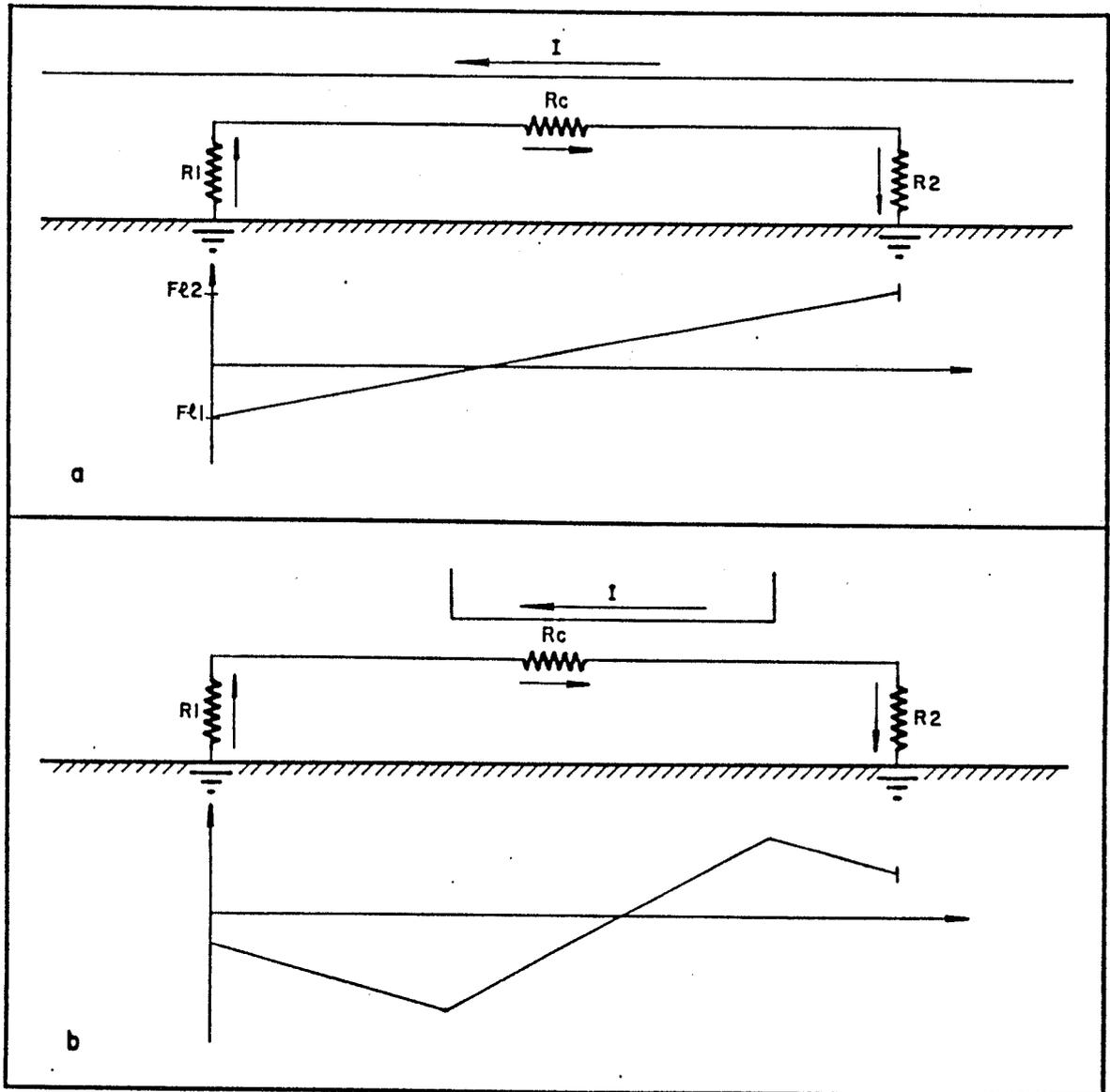


Figura 7.3 - Distribuição do Fator de Circuito Longitudinal

a) Indução Uniforme

b) Indução Localizada

Uma outra forma de se ter os pares aterrados em ambas as extremidades, além da atuação de centelhadores, é através de filtros de drenagem. Estes filtros apresentam baixa impedância para a frequência indutora, reduzindo de maneira significativa a tensão longitudinal através da redução do fator de circuito longitudinal. No entanto, a utilização destes dispositivos deve ser feita com critério, pois um pequeno desbalanceamento do mesmo pode resultar em uma tensão transversal elevada.

7.1.4 - Modificações do Circuito Longitudinal Durante a Atuação de Centelhadores

No item 7.1.3 tomou-se como hipótese a atuação de centelhadores em ambas as extremidades do condutor induzido. No entanto, durante o processo de disparo dos centelhadores o circuito longitudinal sofre diversas modificações, que serão analisadas a seguir.

Considere-se um par que liga uma estação telefônica a um assinante, tendo 300Ω de resistência por fio. Tanto no D.G. da estação quanto na instalação do assinante existem centelhadores que disparam para uma tensão longitudinal de 460 V eficazes. O par é alimentado por uma bobina de alimentação de 220Ω , sendo a resistência da malha da estação desprezível e a resistência do aterramento do cente-

lhador do assinante igual a 30Ω .

Este par está submetido a uma indução uniforme que induz uma f.e.m. de 1250 V eficazes, originada por um curto circuito em uma linha de energia elétrica.

A figura 7.4 mostra as tensões longitudinais durante o processo de disparo dos centelhadores. A linha (a) representa a condição inicial, onde a f.e.m. induzida é aplicada integralmente na extremidade do assinante (ver ítem 7.1.1.) Nesta condição a tensão longitudinal no terminal do assinante vale 1250 V eficazes, o que faz com que o centelhador atue. O circuito longitudinal é então modificado, originando a nova distribuição de tensões longitudinais como mostrado pela linha (b). A atuação do centelhador reduz a tensão longitudinal no terminal do assinante para 68V eficazes, mas eleva a tensão no D.G. para 500 V eficazes.

Com a atuação do centelhador do D.G. a tensão neste ponto cai a zero (desprezou-se a resistência de arco) e a tensão no terminal no assinante sobe para 114 V eficazes (curva (C)).

Esta condição mantém-se durante o curto-circuito, voltando depois à condição original. Durante este processo, o fator de circuito longitudinal sofreu as seguin

tes variações:

	D.G.	Assinante
(a)	0	1,000
(b)	0,4	0,055
(c)	0	0,091

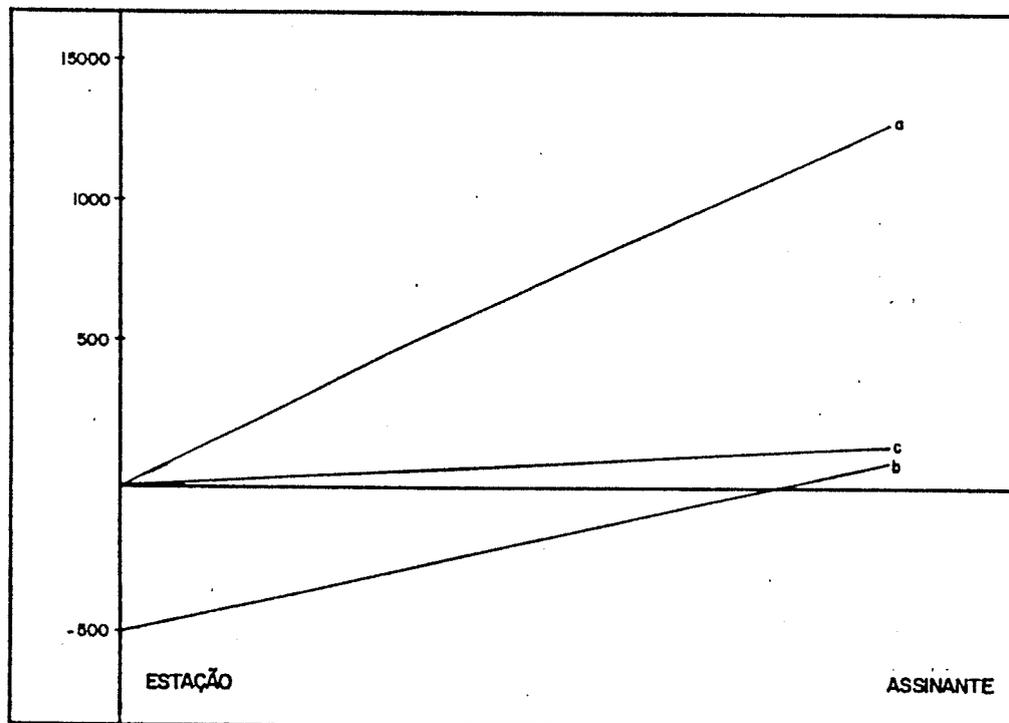


Figura 7.4 - Modificações na Distribuição de Tensões Longitudinais durante a Atuação de Centelhadores.

7.2 - Problemas Causados pela Tensão Longitudinal e seus Limites

Os problemas causados pela tensão longitudinal podem ser classificados em três grupos. O primeiro diz respeito ao choque elétrico, representando risco à segurança pessoal. O segundo diz respeito aos danos causados à rede ou aos equipamentos conectados à mesma e o terceiro grupo representa a interferência na operação dos sistema.

7.2.1 - Segurança Pessoal

O choque elétrico pode produzir danos ao ser humano diretamente, pela ação da corrente sobre o corpo, ou indiretamente, devido à reação muscular causada pelo choque (por exemplo, ao experimentar um choque o artífice de rede pode cair da escada).

Dependendo da magnitude do choque, o mesmo pode causar simples sensação, dor, incapacidade de largar um objeto energizado, parada respiratória, fibrilação ventricular, parada cardíaca ou queima do tecido.

A magnitude do choque depende de diversas variáveis, como o tipo de corrente (contínua, alternada, im-

pulsiva, etc...), a sua intensidade, freqüência, forma de onda, duração, condição física da vítima (peso, sexo, idade, etc...), o caminho da corrente pelo corpo e a fase do ciclo cardíaco no instante do choque. Bodle (10) apresenta uma detalhada análise sobre os efeitos do choque elétrico sobre o ser humano e das suas relações com as diversas variáveis descritas.

Sendo a fibrilação ventricular a principal causa de mortes por choques elétricos em baixa tensão, e assumindo como a resistência do corpo humano 1230Ω , pode-se construir a tabela 7.1, onde se tem as correntes mínimas que causam a fibrilação e seus respectivos tempos de duração. Tem-se também a tensão máxima permissível para um condutor energizado que possa vir a ser tocado por um ser humano. Observe-se que um fator de segurança está implícito no valor da resistência do corpo humano, que corresponde ao menor valor medido em 1054 indivíduos. A resistência foi medida com o indivíduo segurando um fio de cobre e com os dois pés sobre uma placa metálica imersa em cerca de dois centímetros de água salgada.

Os valores da tabela 7.1 representam condições extremamente desfavoráveis para o ser humano. Na prática diversos fatores concorrem para que tensões mais elevadas sejam admissíveis. Dessa forma, a Norma Técnica ABNT

TEMPO (s)	CORRENTE (mA)	TENSÃO (V)
0,01	1160	1427
0,10	370	455
0,50	163	200
1,00	116	143
20,0	52	64

Tabela 7.1 - Correntes e Tensões Limites para a Fibrilação Ventricular.

(NB-447 (9)) estabelece limites de tensões longitudinais nas linhas de telecomunicações, os quais são dados na tabela 7.2. Tem-se nesta tabela os valores dados também pela Prática TELEBRÁS (7).

TEMPO (s)	ABNT (V)	TELEBRÁS(V)
0,2	—	1000
0,5	650	650
1,0	430	430
REGIME	65	65

Tabela 7.2 - Máximas Tensões Longitudinais Admissíveis em Linhas de Telecomunicações.

Observe-se que o tempo de duração da tensão é um dado muito importante, sendo determinado pelo ajuste da proteção contra sobre-correntes das linhas de energia elétrica, conforme exposto em 3.2.2.

7.2.2 - Danos à Rede e aos Equipamentos

Os danos que a tensão longitudinal pode causar à rede consistem em disrupções do isolamento entre um condutor da rede e um ponto aterrado. Como a tensão suportável pelos componentes da rede de telecomunicações estão bem acima dos limites impostos pela segurança pessoal, caso se obedeça a estes limites (tabela 7.2) se estará também protegendo a rede.

Os valores das tensões disruptivas para frequência industrial dos diversos componentes da rede de telecomunicações são mostrados na tabela 7.3. Observe-se que estes valores raramente são atingidos na rede local. Para maiores detalhes ver a referência (40).

Se a ocorrência de danos à rede devido à indução magnética é um evento raro, o mesmo não se pode dizer de equipamentos conectados à mesma.

Como é complexa a determinação dos níveis má-

ximos suportáveis pelos diversos equipamentos, em geral to-

	CABO CT	CABO CTP	CAIXA TERMINAL	CAIXA DE EMENDA	ARMÁRIO DE DISTR.
ENTRE PARES	1,75	25,8	7,3	—	4,2
ENTRE PARES E BLINDAGEM	2,40	16,3	4,9	6,7	2,5
ENTRE BLINDAGEM E POSTE	—	47,0	—	—	—
ENTRE BLINDAGEM E CABO MENSAGEIRO	—	54,7	—	—	—

Tabela 7.3 - Tensões Disruptivas dos Componentes da Rede de Telecomunicações (Valores Médios em kV eficaz)

ma-se como base os níveis dados pela proteção primária do D.G., que corresponde à atuação de um centelhador acoplado a um elemento fusível, conforme a tabela 7.4.

TEMPO (s)	TENSÃO (V)	CORRENTE (mA)
∞	33	150
210	55	250
5	220	1000
—	450	2890

Tabela 7.4 - Estimativa da Suportabilidade de Equipamentos Conectados às Linhas de Telecomunicações (baseada no módulo de proteção MP4)

7.2.3 - Interferência na Operação do Sistema

Embora o sistema opere com tensões transversais, a tensão longitudinal pode interferir com o mesmo através da sua conversão em transversal pelo desbalanceamento de um dado equipamento.

A Prática TELEBRÁS (7) fornece os seguintes valores para a suportabilidade de equipamentos à tensão longitudinal:

equipamentos eletromecânicos = 15 V eficazes
equipamentos de transmissão
de dados = 1,4 V eficazes

7.3 - Medições de Tensões Longitudinais

Faz-se aqui um resumo de diversas medições de tensões longitudinais.

Um trabalho de medição de tensões longitudinais que tem um significado estatístico foi elaborado por Heirman (25) nos Estados Unidos. A figura 7.5 mostra os resultados de 72 rotas que apresentavam níveis de ruído acima da média.

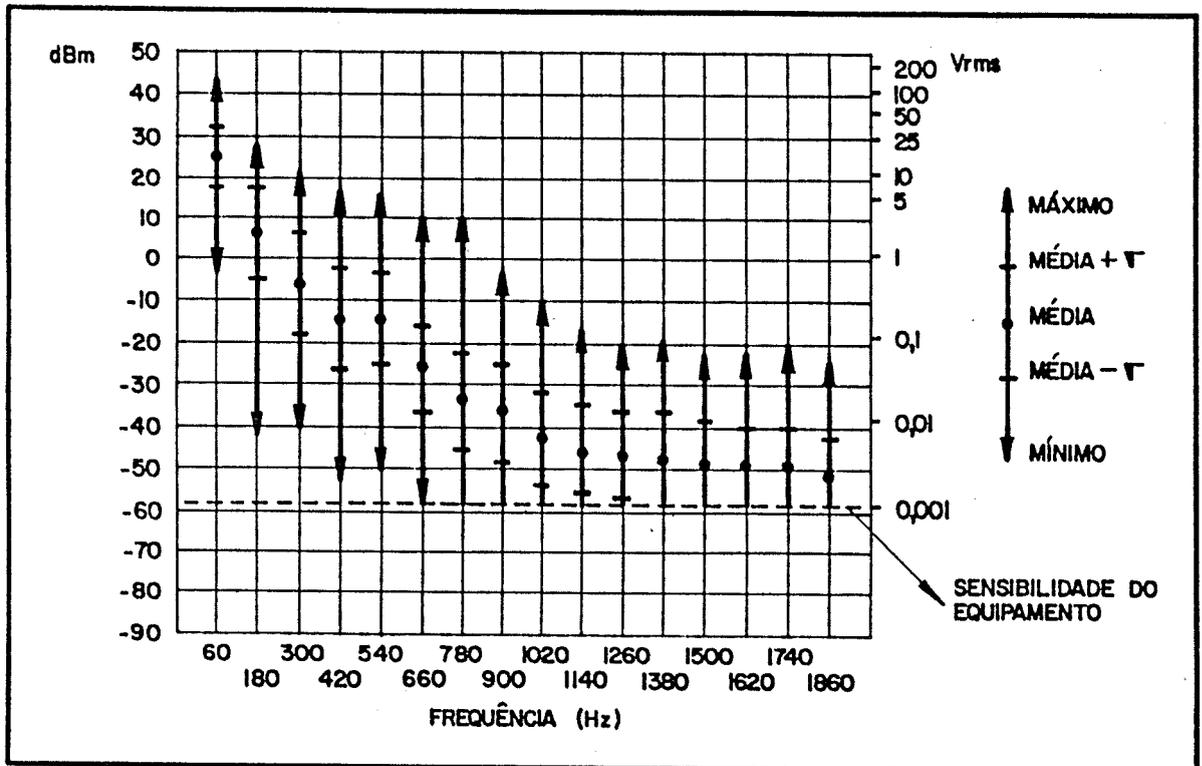


Figura 7.5 - Medição de Tensões Longitudinais em Linhas do Sistema Bell.

A tensão longitudinal pode variar com o tempo ao longo do dia e em certos casos, mesmo em poucos segundos. Com relação ao primeiro tipo de variação, que está relacionada com a flutuação da carga em linhas de energia elétrica, tem-se um exemplo das medições de Heirman (25) na figura 7.6. Com relação ao segundo caso, isto é, a flutuação rápida da tensão longitudinal, a mesma usualmente está relacionada com linhas de tração elétrica.

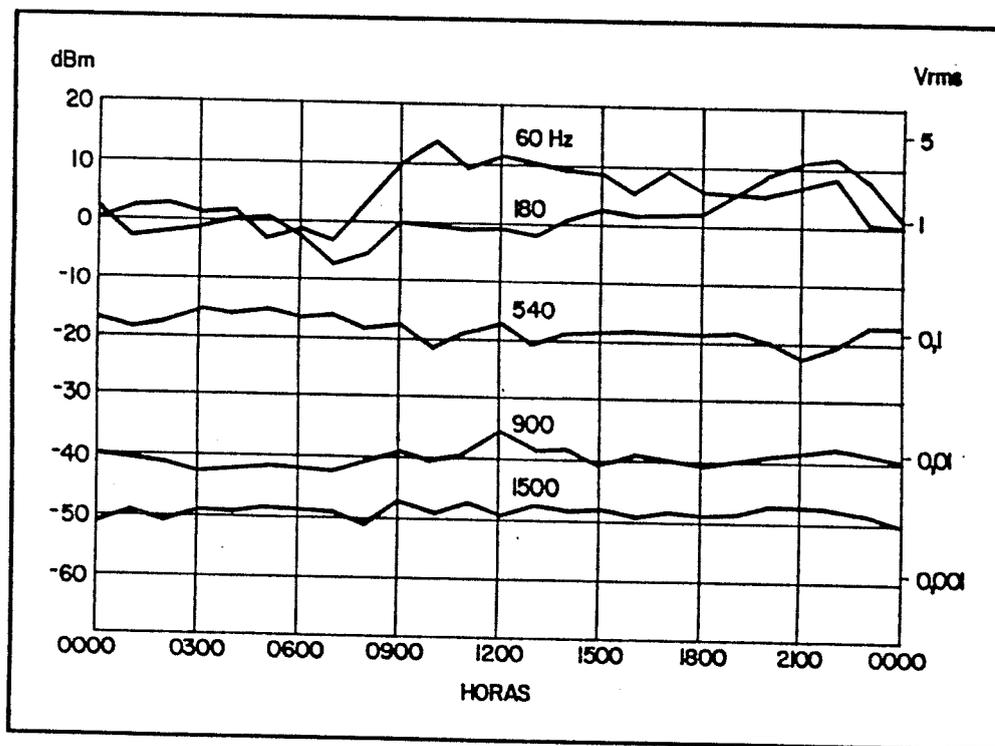


Figura 7.6 - Flutuação da Tensão Longitudinal ao Longo do Dia.

Uma pesquisa de campo feita pelo autor (26) na rede da TELEMIG permitiu caracterizar as tensões longitudinais nas rotas críticas desta companhia. Algumas tensões longitudinais em regime permanente, discriminadas em frequência, são mostradas na figura 7.7. Observe-se que em dois dos casos mostrados a amplitude da terceira harmônica supera a da fundamental.

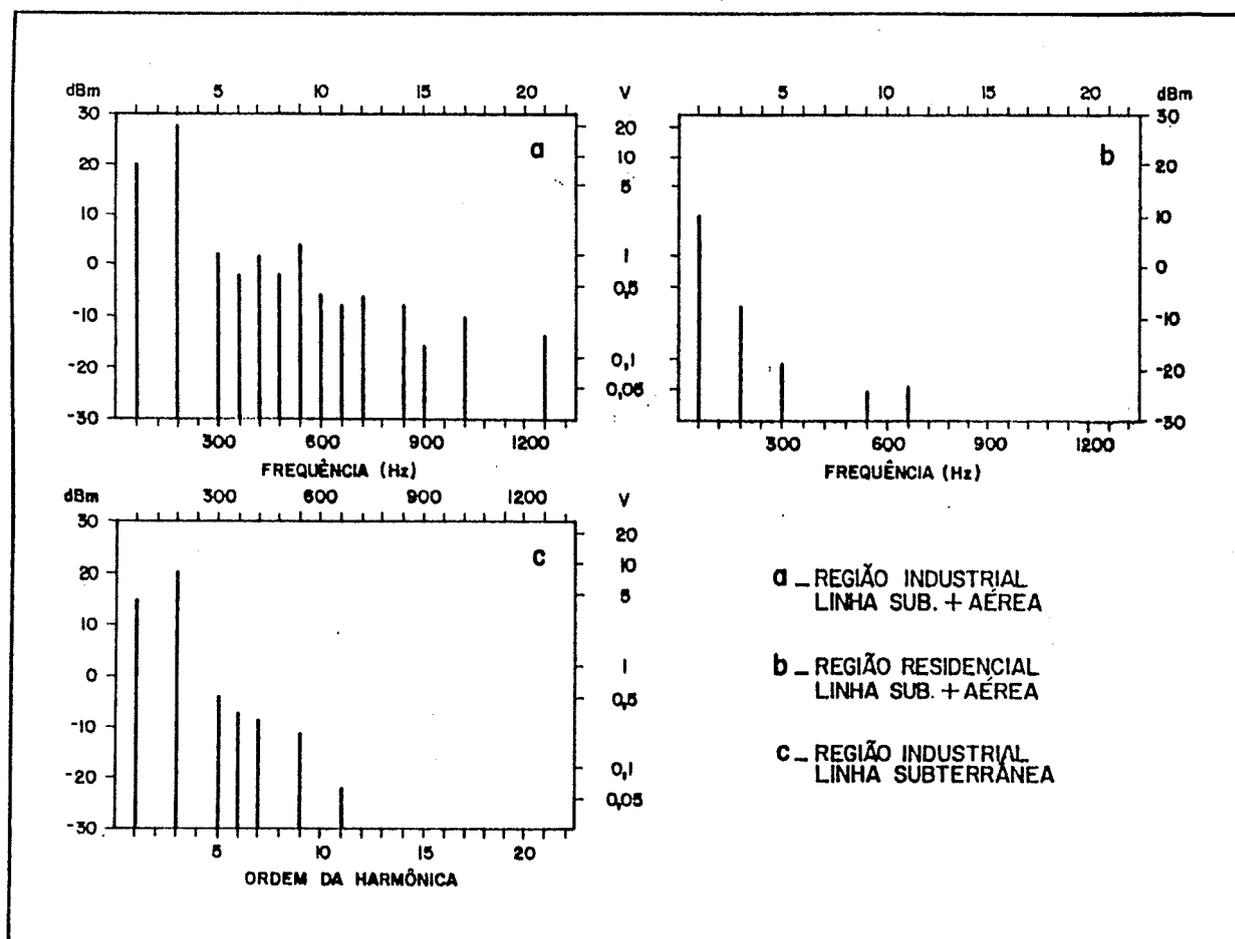


Figura 7.7 - Medições de Tensões Longitudinais em Linhas da TELEMIG.

Andreta (8) reporta medições de tensões longitudinais na região de Parelheiros (S.P.) onde a rede da TELESP caracteriza-se por longos paralelismos com linhas de distribuição de energia elétrica. A tensão longitudinal nesta rede produz ruídos na faixa de voz (através do fator

de ruído), faz soar as campainhas dos aparelhos telefônicos, provoca a queima de equipamentos de tratamento de enlace e faiscamento dos relés dos equipamentos de comutação.

Os valores das tensões longitudinais de regime são reproduzidos na tabela 7.5.

ROTA	COMPRIMENTO (km)	V _ℓ MÁX. (V)	V _ℓ MÍN. (V)
EST. PARELHEIROS	12,5	80	46
EST. MARSILAC	13,3	140	78
EST. CIPÓ	20,4	80	50
EST. COLÔNIA	15,0	20	18

Tabela 7.5 - Tensões Longitudinais na Região de Parelheiros
TELESP

As medições mostradas até aqui são relativas à indução magnética em regime permanente, isto é, devido às correntes de carga das linhas de energia elétrica. Medições de tensões longitudinais provocadas por curtos-circuitos em linhas de energia elétrica são mostradas a seguir.

Carrol (17) reporta algumas medições onde o valor máximo obtido é 508 V de pico. Uma fonte importante de dados sobre as tensões longitudinais devido aos curtos-circuitos é o projeto COPELIA (41) do CNET, que monitora as

sobretensões que são impostas às linhas de telecomunicações francesas.

Durante o período de novembro de 1982 a maio de 1983 foram registradas 177 tensões induzidas em frequência industrial (50 Hz) nas oito linhas monitoradas pelo projeto COPELIA (42). O valor mínimo destas tensões induzidas é de 60 V eficazes e o máximo de 450 V eficazes.

CAPÍTULO 8 - FATOR DE RUÍDO E TENSÃO TRANSVERSAL

No Capítulo 4 o fator de ruído (Fr) foi definido como a razão entre a tensão transversal e a tensão longitudinal de um par em um dado ponto da rede.

O inverso do fator de ruído, expresso em decibéis, é usualmente denominado como o balanceamento do par em questão. Dessa forma, o fator de ruído e o balanceamento ($B\ell$) se relacionam pela expressão:

$$B\ell = - 20 \log Fr$$

8.1 - O Modelo do Fator de Ruído

Com exceção das linhas de fio nu, onde os condutores ocupam lugares bem distintos no espaço, a tensão transversal não é devida a um fluxo magnético que concatene com o circuito metálico. Considerando-se um par de um cabo telefônico, por exemplo, o fluxo magnético resultante que concatena com o circuito transversal (entre o fio A e o fio B) é absolutamente desprezível.

Na realidade, o que leva à "indução" da tensão transversal é o acoplamento capacitivo e/ou resistivo do

par telefônico com condutores que estejam em potenciais diferentes do potencial do par em questão. Em outras palavras, são as pequenas diferenças nos circuitos longitudinais dos dois fios do par que levam a diferentes tensões longitudinais e, conseqüentemente, ao surgimento da tensão transversal.

Para se compreender o processo considere-se um cabo telefônico idealizado, de um único par, o qual é referenciado à terra na estação. Suponha-se que a blindagem esteja aterrada na estação e nas proximidades do assinante, estando a linha em conversação. O circuito equivalente é dado na figura 8.1.

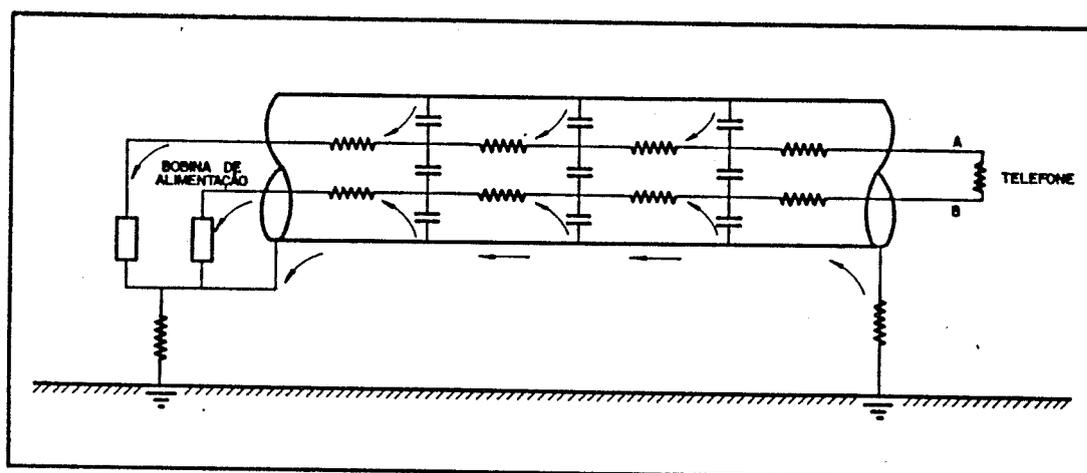


Figura 8.1 - Circuito do Modelo do Fator de Ruído.

Caso esta linha esteja sujeita a uma f.e.m. induzida, uma corrente circulará pela capa metálica do cabo (blindagem) determinando um perfil de potencial ao longo da mesma. Como os fios A e B do par estão em um potencial diferente do potencial da blindagem, uma corrente circulará pelos pares através das capacitâncias entre o par e a blindagem.

Considerando-se que os parâmetros elétricos dos fios A e B sejam idênticos, não haverá diferença de potencial entre os mesmos e, conseqüentemente, o fator de ruído será nulo.

No entanto, pequenas diferenças nos parâmetros elétricos dos fios de um par são inerentes ao próprio processo de fabricação. Essas diferenças são denominadas desbalanceamentos, cujos principais são:

- desbalanceamento resistivo dos fios do par, situando-se em cerca de 2% da resistência nominal do fio (ver item 2.3);
- desbalanceamento capacitivo dos fios do par em relação à blindagem; este parâmetro é cerca de 2% da referida capacitância;
- desbalanceamento resistivo das bobinas de alimentação da estação telefônica;

- resistências de contato desiguais nas emendas dos pares;
- desbalanceamento introduzido por equipamentos conectados ao par;
- diferenças nas resistências de isolamento do par em relação à blindagem, no caso de um cabo com baixa resistência de isolamento.

O fator de ruído do par é resultado da interação entre todos os desbalanceamentos presentes.

No caso de um par de fio FE o modelo da figura 8.1 continua válido, sendo a blindagem do cabo substituída pela terra e por eventuais condutores de energia elétrica próximos.

8.2 - Verificação Teórico-Experimental

Com o objetivo de verificar este modelo foram feitos testes em uma linha experimental. O cabo desta linha é do tipo CTP-APL de 50 pares e com o diâmetro do par de 0,40 mm.

O modelo adotado inicialmente foi um pouco mais complexo que o da figura 8.1, pois levou em consideração a presença dos outros pares do cabo. Este modelo é mostrado na figura 8.2. As medições de capacitâncias foram

feitas em diversas frequências sendo que, tendo-se verificado uma constância de valores, padronizou-se a frequência em 1000 Hz.

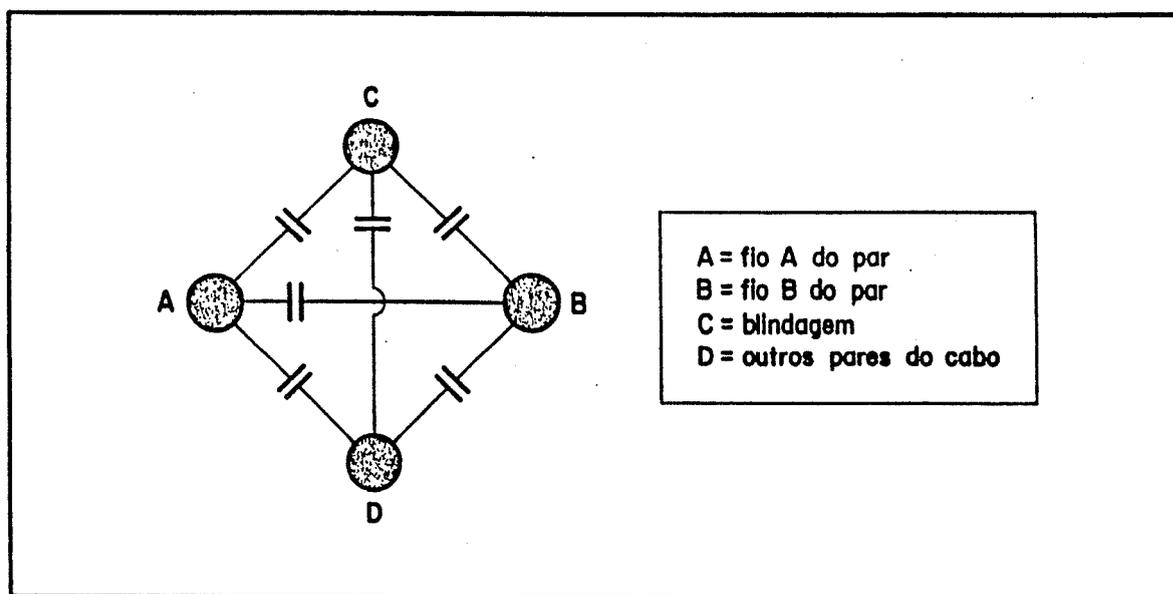


Figura 8.2 - Modelo de um Cabo Telefônico.

Com a adição do quarto condutor da figura 8.2, o circuito da figura 8.1 foi implementado em computador digital.

Após diversas simulações concluiu-se que não se comete erro significativo ao se desprezar a ação dos outros pares do cabo. Isto é válido para linhas típicas da rede local e está em conformidade com o modelo proposto pe-

la Administração Húngara (43) para o cálculo da tensão transversal.

Desta forma, conclui-se que o circuito da figura 8.1 é representativo de um cabo real. A tabela 8.1 mostra um dos conjuntos de medições executadas na linha experimental, os quais respaldam experimentalmente o modelo proposto.

FREQÜÊNCIA (Hz)	V _t CALCULADA (mV)	V _t MEDIDA (mV)	DESVIO (%)
210	0,69	0,65	6
500	1,65	1,60	3
800	2,64	2,55	4
1000	3,30	3,20	3
1500	4,95	4,90	1

Tabela 8.1 - Verificação Experimental do Modelo.

Um parâmetro importante para a determinação da tensão transversal é a capacitância entre um fio e a blindagem, assim como o seu desbalanceamento em relação ao outro fio do par.

O desbalanceamento desta capacitância medido na linha experimental situou-se em cerca de 2%, chegando ao

valor de 500 pF/Km. A referência (43) trabalha com um valor de 600 pF/Km. Esta referência faz um interessante estudo com relação à dependência da tensão transversal quanto à distribuição do desbalanceamento capacitivo ao longo da linha.

A capacitância entre fios e blindagem depende da posição do par em questão dentro do cabo.

A tabela 8.2 mostra os diferentes valores desta capacitância para vários pares do cabo da linha experimental. Observe-se que a numeração, no caso, corresponde a uma distribuição arbitrária no bloco terminal.

PAR	C (nF/km)	PAR	C (nF/km)
01	9,5	07	16
02	5,5	10	4,4
03	4,7	15	6,9
04	16	20	4,4
05	15	25	3,6
06	13	—	—

Tabela 8.2 - Capacitâncias Fio/Blindagem para Diversos Pares

8.3 - Sensibilidade do Fator de Ruído às Modificações na Rede

8.3.1 - Aterramento da Blindagem

Sendo a equalização do potencial da blindagem com relação aos pares uma medida que reduz o ruído, concluiu-se que manter a blindagem aterrada apenas na central é um procedimento que leva a baixos níveis de ruído no cabo.

No entanto, este procedimento não é recomendável porque os aterramentos da blindagem têm outras funções, como a atenuação dos surtos de origem atmosférica, por exemplo.

Com base no modelo desenvolvido, evidencia-se que as tensões transversal e longitudinal comportam-se de maneira distinta com relação ao aterramento da blindagem do cabo na extremidade do assinante. Se por um lado uma menor resistência de aterramento leva a um menor fator de blindagem (e, conseqüentemente, menor tensão longitudinal), devido ao acoplamento blindagem/pares tem-se um maior fator de ruído, levando a uma maior tensão transversal. Observe-se que o fator de ruído depende não somente das características do cabo como também do procedimento utilizado no aterra

mento da blindagem.

A figura 8.3 mostra a dependência das tensões transversal e longitudinal medidas na linha experimental em função da resistência de aterramento da blindagem.

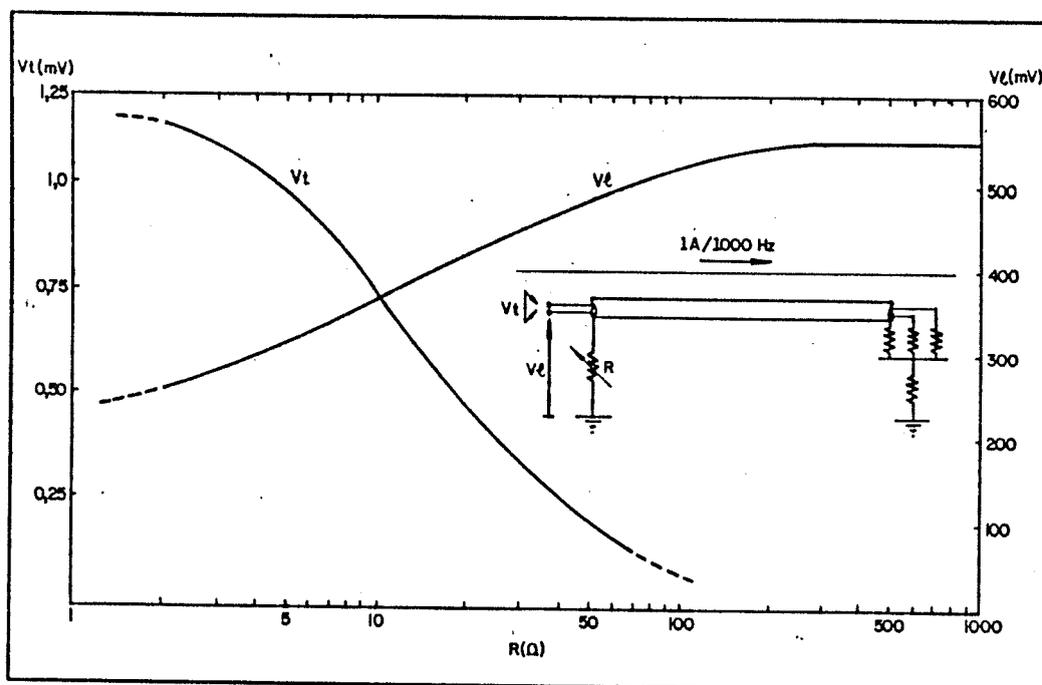


Figura 8.3 - Dependência das Tensões Transversal e Longitudinal com o Aterramento da Blindagem.

Em condições normais os aterramentos da blindagem não levam a níveis de ruído elevados. No entanto, caso um cabo tenha níveis de tensões transversais elevados, não é através da melhoria dos aterramentos que se vai cor-

rigí-los. Pelo contrário, tais medidas tendem a agravar o problema.

8.3.2 - Vinculações das Blindagens dos Cabos

Com o objetivo de manter o potencial da blindagem o mais equalizado possível em relação aos pares, as blindagens dos cabos devem ser contínuas e vinculadas entre si, desde a estação telefônica até a ponta dos cabos de distribuição.

Dessa forma, uma das primeiras medidas recomendadas para cabos com tensões transversais elevadas é se verificar a continuidade da blindagem.

8.3.3 - Balanciamento do Cabo na Estação

Como foi visto, a condição necessária para o aparecimento da tensão transversal é a existência de desbalanceamentos entre os fios de um par. Estes desbalanceamentos podem ser parcialmente compensados através da inserção de impedâncias no circuito. No caso de pares referenciados a terra na estação pode-se inserir uma resistência em série com o fio que apresente menor resistência ou capacitância. Qual fio do par deve ser escolhido e qual valor de resistência deve ser inserida são questões que dependem de cada ca-

so, sendo resolvidos empiricamente.

Utilizando-se de um potenciômetro de algumas dezenas de ohms e da possibilidade de comutá-lo em série com o fio A ou com o B, determina-se este valor como sendo aquele que fornece a menor leitura da tensão transversal.

A figura 8.4 mostra testes deste método realizado no cabo tronco que liga as estações de São Miguel Paulista e Guaianazes (TELESP). Observe-se que na maioria dos casos obteve-se reduções superiores a 20 dB.

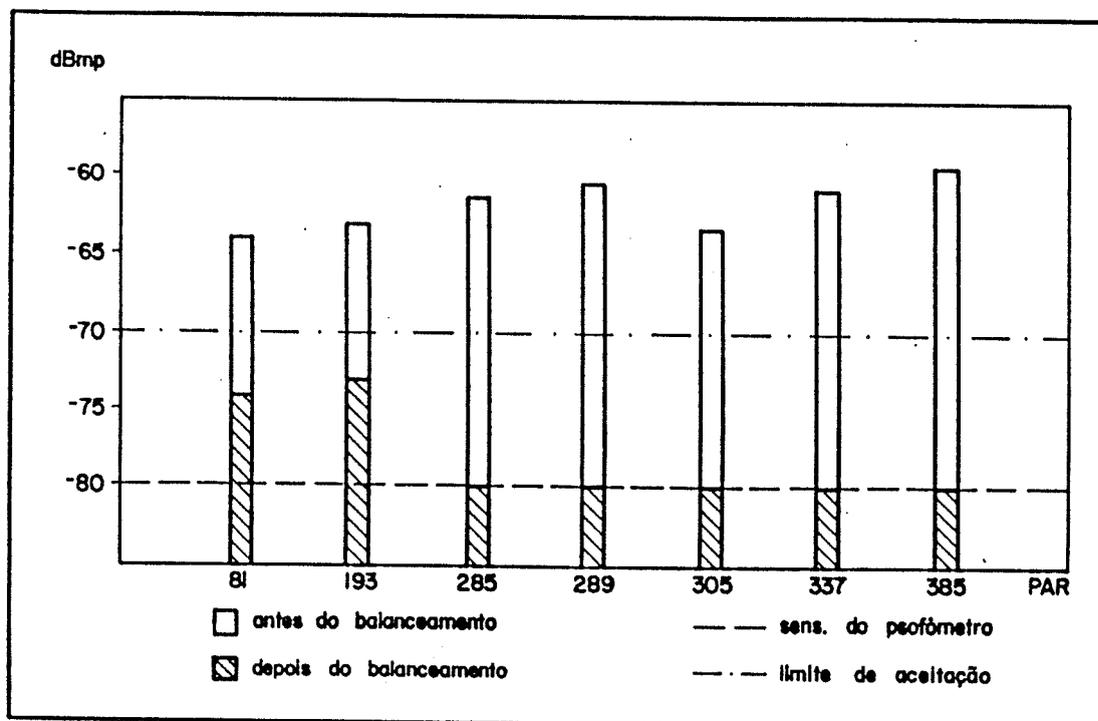


Figura 8.4 - Balanceamento na Estação.

8.4 - Problemas Causados pela Tensão Transversal e seus Limites

A tensão transversal pode causar riscos à segurança pessoal, dano aos equipamentos ou interferência com o funcionamento do sistema. Os problemas relativos ao ruído audível são tratados no próximo Capítulo, que diz respeito à tensão transversal psofométrica.

8.4.1 - Riscos à Segurança Pessoal ou de Dano aos Equipamentos

Em condições normais, a tensão transversal nunca atinge níveis capazes de colocar em risco a segurança do usuário ou de um equipamento. No entanto, caso ocorra um forte desbalanceamento no circuito do par como resultado de uma tensão longitudinal elevada, a tensão transversal pode atingir níveis perigosos.

Isto se dá, por exemplo, quando a tensão longitudinal provoca o centelhamento do fio A para a terra. Caso o fio B não centelhe, a tensão longitudinal ficará aplicada transversalmente.

Quando aplicada à cápsula telefônica, esta tensão pode provocar o choque acústico, podendo levar ao rom-

pimento do tímpano do usuário. Para eliminar este risco todos os telefones modernos têm um elemento protetor de estado sólido que limita a tensão transversal em valores seguros.

Também os equipamentos conectados às linhas de telecomunicações usualmente têm proteção contra tensões transversais elevadas.

Desta forma, os limites às tensões transversais são impostos pelos dispositivos protetores de cada equipamento. Com relação aos cabos, a tensão disruptiva média entre os fios de um par é de 1750 V eficazes para o isolamento de papel (cabo CT) e de 26000V eficazes para o isolamento de polietileno (cabo CTP).

8.4.2 - Interferência com o Funcionamento de Equipamentos

Sendo a tensão induzida transversal aplicada ao equipamento no mesmo circuito do sinal, tem-se frequentemente a interferência no funcionamento do equipamento devido aos baixos valores de sinal/ruído.

A ABNT (9) estabelece 1mV eficaz como o limite para a tensão transversal, sendo este valor compatível com a maioria dos equipamentos em uso.

Por exemplo, um equipamento MCP que opera com um nível de sinal mínimo (entrada do repetidor) de 30 mV, teria uma relação sinal/ruído limitada em 29,5 dB (para 1 mV de ruído), bem acima dos 24 dB solicitados pelo fabricante.

Com o advento da Rede Digital de Serviços Integrados, o CCITT tem dedicado especial atenção ao assunto, visando padronizar métodos de medição de tensões transversais e da suportabilidade de equipamentos à mesma. Os trabalhos estão ainda em andamento, sendo que estudos iniciais são reportados em (44).

8.5 - Medições de Tensões Transversais

As medições de tensões transversais que se tem na literatura técnica usualmente são feitas com ponderação psufométrica.

Uma exceção é a da referência (26), onde se mediu as tensões induzidas nas linhas mais "ruidosas" da TELEMIG com discriminação de frequências. A figura 8.5 mostra os resultados para três linhas.

Cabe comentar que no caso (c) foi reportada interferência com equipamento de TELEX anteriormente conectado ao par.

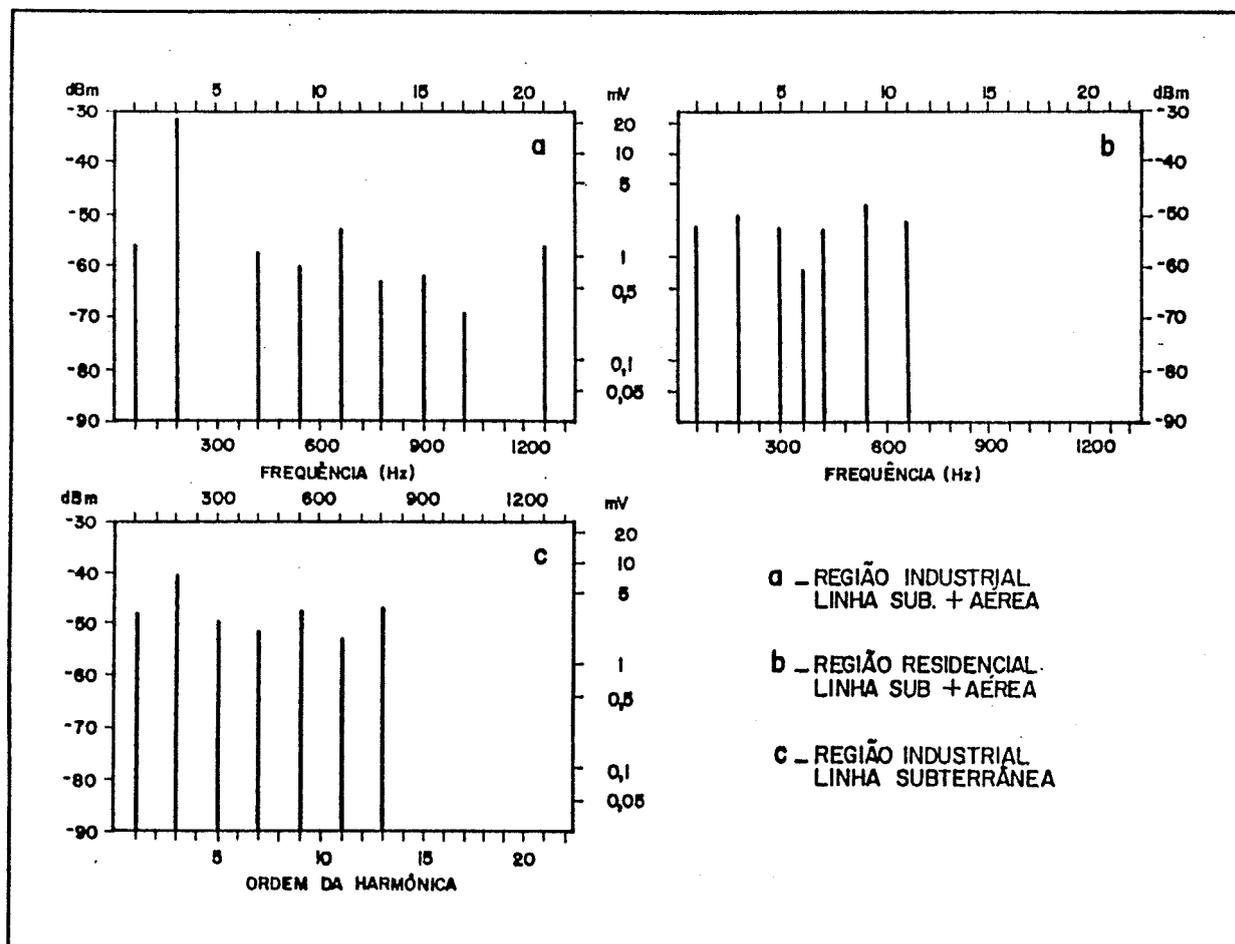


Figura 8.5 - Medições de Tensões Transversais em Linhas da TELEMIG.

É usual se expressar as tensões transversais em termos de decibéis relativos a uma potência de referência. Desta forma, a unidade dBm corresponde à potência de 1 mW sendo dissipada em um resistor de 600 Ω , levando a uma tensão de referência de 775 mV.

$$V_t \text{ (dBm)} = 20 \log \left(\frac{V_t \text{ (mV)}}{775} \right)$$

Outra unidade bastante utilizada é o dBm, que corresponde à potência de 1 pW (10^{-12} W).

$$0 \text{ dBm} = -90 \text{ dBm}$$

CAPÍTULO 9 - FATOR PSOFOMÉTRICO E TENSÃO TRANSVERSAL PSOFOMÉTRICA

Devido às características do aparelho telefônico e do ouvido humano há uma grande variação no efeito de interferência de uma dada tensão transversal em função da sua frequência. Dessa forma, definiu-se como fator psofométrico a razão entre a tensão transversal em uma frequência de referência e a tensão transversal em uma outra frequência que cause a mesma interferência na conversação que a tensão de referência.

Ao produto da tensão transversal (V_t) pelo seu fator psofométrico (F_p) denomina-se tensão transversal psofométrica (V_{tp}), a qual é usualmente medida em milivolts psofométricos (mVp).

9.1 - A Resposta em Frequência do Ouvido Humano

9.1.1 - Os Testes

O efeito de um dado ruído no circuito telefônico é bastante complexo, incluindo o mascaramento de sons da conversação, distração do ouvinte, irritação, etc... A quantificação deste "efeito de interferência" da tensão

transversal induzida (ruído) é uma tarefa bastante difícil, por se tratar de um efeito intrinsecamente subjetivo. Com o objetivo de quantificar este efeito foram originalmente utilizados dois métodos (45): testes de julgamento e testes de articulação.

No teste de julgamento um observador compara diretamente dois ruídos na presença de uma conversação ouvida através de um circuito telefônico típico. Um dos ruídos é usualmente variável em intensidade e é controlado pela pessoa que conduz o teste ou pelo próprio observador. As duas intensidades que o observador julga interferirem da mesma maneira são medidas e, no caso dos ruídos serem tons de uma única freqüência, se obtém o peso relativo entre as duas freqüências. Através dos resultados de um certo número de observadores, pode-se considerar a média das ponderações individuais como representativa do efeito de interferência do ruído sob teste.

O teste de articulação consiste em se pronunciar uma série de sílabas sem significado em um circuito telefônico para um grupo de observadores. Cada observador deve escrever o som que ele escuta. A percentagem de sons corretamente entendidos é chamada de "articulação sonora" para a condição do teste. Usualmente cada sílaba é composta de três letras (consoante, vogal, consoante) colocadas no meio

ou no fim de uma sentença. Para um dado circuito, dois ruídos diferentes que produzem a mesma perda de articulação são considerados como equivalentes. Para o caso de tons de uma única freqüência obtém-se um peso relativo do efeito de interferência.

Através destes testes pode-se comparar o efeito de interferência de diferentes freqüências. No entanto os ruídos usualmente encontrados na prática não são tons de uma única freqüência, mas uma complexa combinação de freqüências. Dessa forma, torna-se necessário não apenas um peso adequado para cada freqüência, mas também um método que as combine de maneira análoga ao utilizado pelo ouvido humano.

A maneira como as diferentes freqüências se combinam no ouvido humano para causar a interferência é extremamente complexa, dependendo não apenas das freqüências como também de suas intensidades, constâncias no tempo, separação no espectro, etc... O processo utilizado para solucionar o problema foi assumir arbitrariamente uma regra de combinação e verificar nos testes de julgamento e articulação se os resultados são razoáveis.

Após medir-se as componentes de um dado ruído calcula-se, através da regra de combinação formulada, qual

deve ser a perda de articulação (ou intensidade julgada equivalente) para este ruído. A seguir mede-se esta perda de articulação (ou intensidade julgada equivalente) e compara-se este valor com o valor calculado. A regra de combinação que deu melhores resultados foi a raiz quadrada da soma dos quadrados de cada componente ponderada.

Sendo F_p o fator de ponderação psofométrica (fator psofométrico) para uma dada frequência (harmônica) e V_t a tensão transversal nesta frequência, a tensão transversal psofométrica (V_{tp}) resultante da combinação de várias harmônicas é dada por:

$$V_{tp} = \sqrt{\sum (V_t \cdot F_p)^2}$$

9.1.2 - As Ponderações

Desde que as primeiras ponderações foram medidas ainda na segunda década deste século, diversos pesquisadores vêm realizando medições nas quais variam o método e as condições dos testes. As variações entre as ponderações ao longo do tempo deveu-se principalmente à evolução dos aparelhos telefônicos.

Atualmente as duas ponderações mais utilizadas são a Ponderação Psofométrica, que é recomendada pelo

CCITT, e a Ponderação C - Message, que é utilizada pelo Sistema Bell (América do Norte).

A figura 9.1 mostra graficamente o fator psfométrico correspondente à ponderação psfométrica, enquanto no Apêndice 3 têm-se tabelados os seus valores para os múltiplos de 60 Hz. A frequência tomada como referência é 800 Hz.

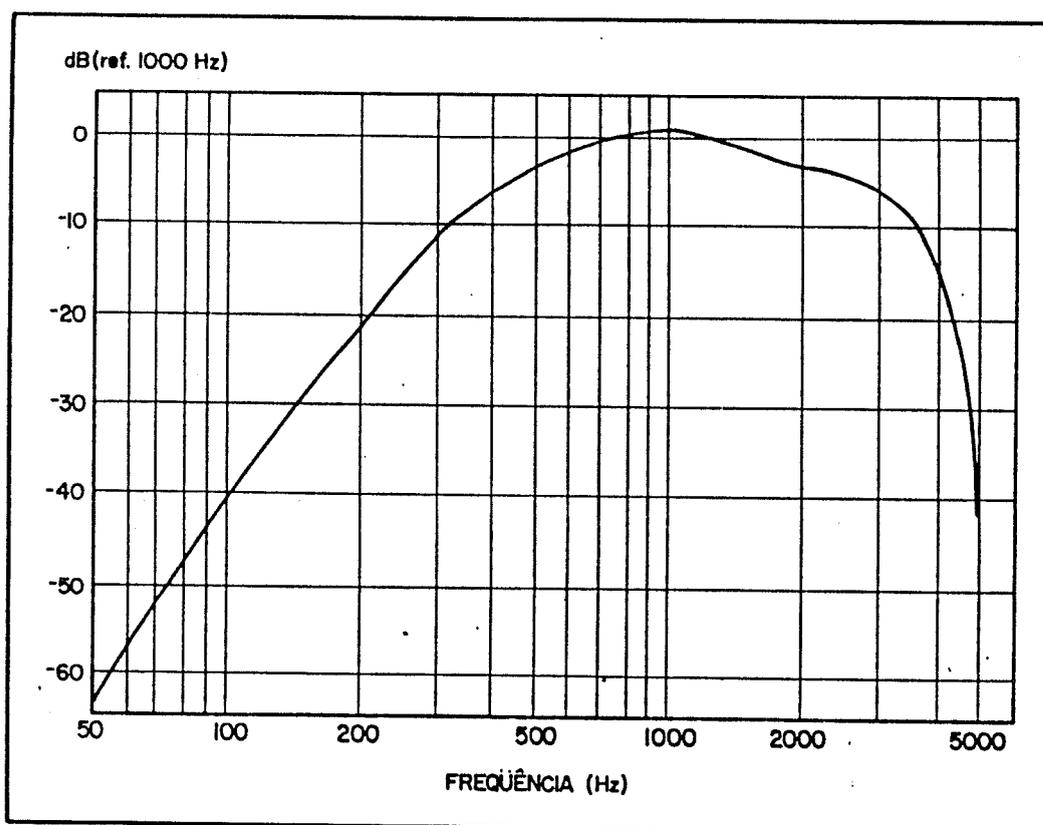


Figura 9.1 - Fator Psfométrico - Curva CCITT Telefone

A figura 9.2 mostra este mesmo fator, segundo a ponderação C - Message, onde a frequência de referência é 1 kHz.

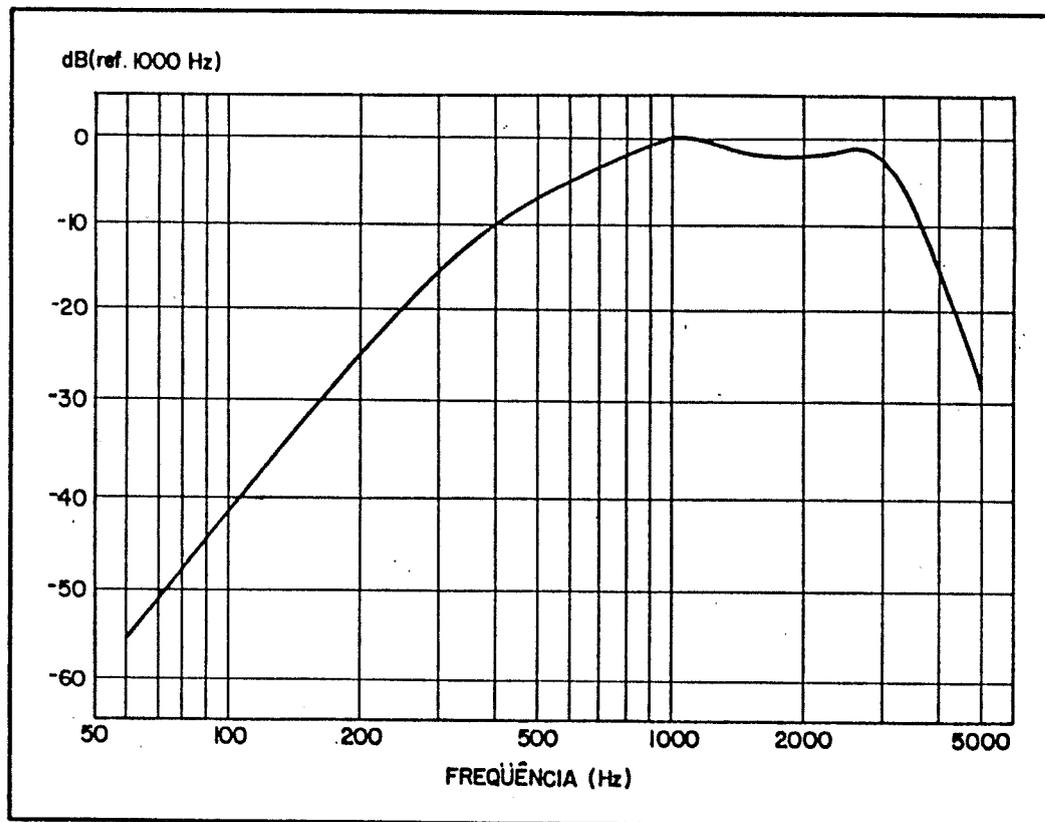


Figura 9.2 - Fator Psfométrico - Curva C - Message

A TELEBRÁS segue a ponderação proposta pelo CCITT (ponderação psfométrica), assim como a ABNT (9). Esta ponderação também é utilizada neste trabalho.

Tomando-se como base a curva da figura 9.1, por exemplo, observa-se que o conjunto formado pelo ouvido humano e a cápsula telefônica se comportam como um filtro passa faixa. A tabela 9.1 fornece os valores que as tensões transversais de diversas freqüências devem ter para que tenham o mesmo efeito interferente de 1 mV em 800 Hz.

FREQÜÊNCIA (Hz)	TENSÃO (mV)	FREQÜÊNCIA (Hz)	TENSÃO (mV)
60	426	900	0,93
180	14,8	1020	0,90
300	3,39	1140	0,96
420	1,91	1260	1,03
540	1,39	1500	1,16
660	1,16	1860	1,35
780	1,02	3000	1,90

Tabela 9.1 - Equivalência entre Tensões Transversais de Diferentes Freqüências
(Curva CCITT - Telefone)

As tensões transversais, depois de ponderadas, passam a ser designadas por tensões transversais psfométricas, as quais são quantificadas em milivolts psfométricos (mVp). Dessa forma todas as tensões da tabela 9.1 valem 1 mVp.

Para se medir as tensões transversais psofométricas foi construído um aparelho chamado psofômetro. Trata-se basicamente de um voltímetro em cujo circuito de entrada há um filtro que comporta-se maneira análoga ao conjunto formado pelo ouvido humano e a cápsula telefônica.

O psofômetro usualmente fornece sua leitura em dBmp, que corresponde à tensão transversal psofométrica medida em decibéis relativos à potência de 1 mW sendo dissipada em um resistor de 600 Ω (o que corresponde a uma tensão de referência de 775 mV).

$$V_{tp} \text{ (dBmp)} = 20 \log \left(\frac{V_{tp} \text{ (mVp)}}{775} \right)$$

O psofômetro também permite a leitura da tensão transversal sem a ponderação psofométrica, o que é feito através do acionamento de uma chave que substitui o filtro psofométrico por um filtro de resposta plana que corta em 3 KHz. Neste caso a leitura é em dBm.

9.3 - Os Problemas Causados pela Tensão Transversal Psofométrica e seus Limites

A tensão transversal psofométrica é responsável pelo ruído audível, o qual interfere na conversação telefônica. Conforme comentado no item 9.1, esta interferên-

cia se dá de diversas formas, incluindo o mascaramento de sons da conversação, distração do ouvinte, irritação, etc..

A tabela 9.2 fornece os limites para a tensão transversal psofométrica adotados pela TELEBRÁS.

TIPO DE LINHA	RUIM (dBmp)	ACEITÁVEL (dBmp)	ÓTIMO (dBmp)
CABOS	> -50	-50 A -70	< -70
FIO NU	> -44	-44 A -64	< -64

Tabela 9.2 - Limites da tensão Transversal Psofométrica.

O limite superior da faixa designada por aceitável corresponde ao limite para linhas já em operação (limite de manutenção), enquanto o limite inferior corresponde ao limite para aceitação de linhas novas.

9.4 - Medições de Tensões Transversais Psofométricas

Existem dois métodos distintos de se medir as tensões transversais psofométricas. O primeiro consiste em se medir as tensões transversais com discriminação de freqüências e depois calcular a tensão transversal psofométrica de acordo com a equação dada no sub-ítem 9.1.1.

A figura 9.3 mostra este método aplicado às linhas "ruidosas" da TELEMIG (26), as quais foram mostradas na figura 8.5.

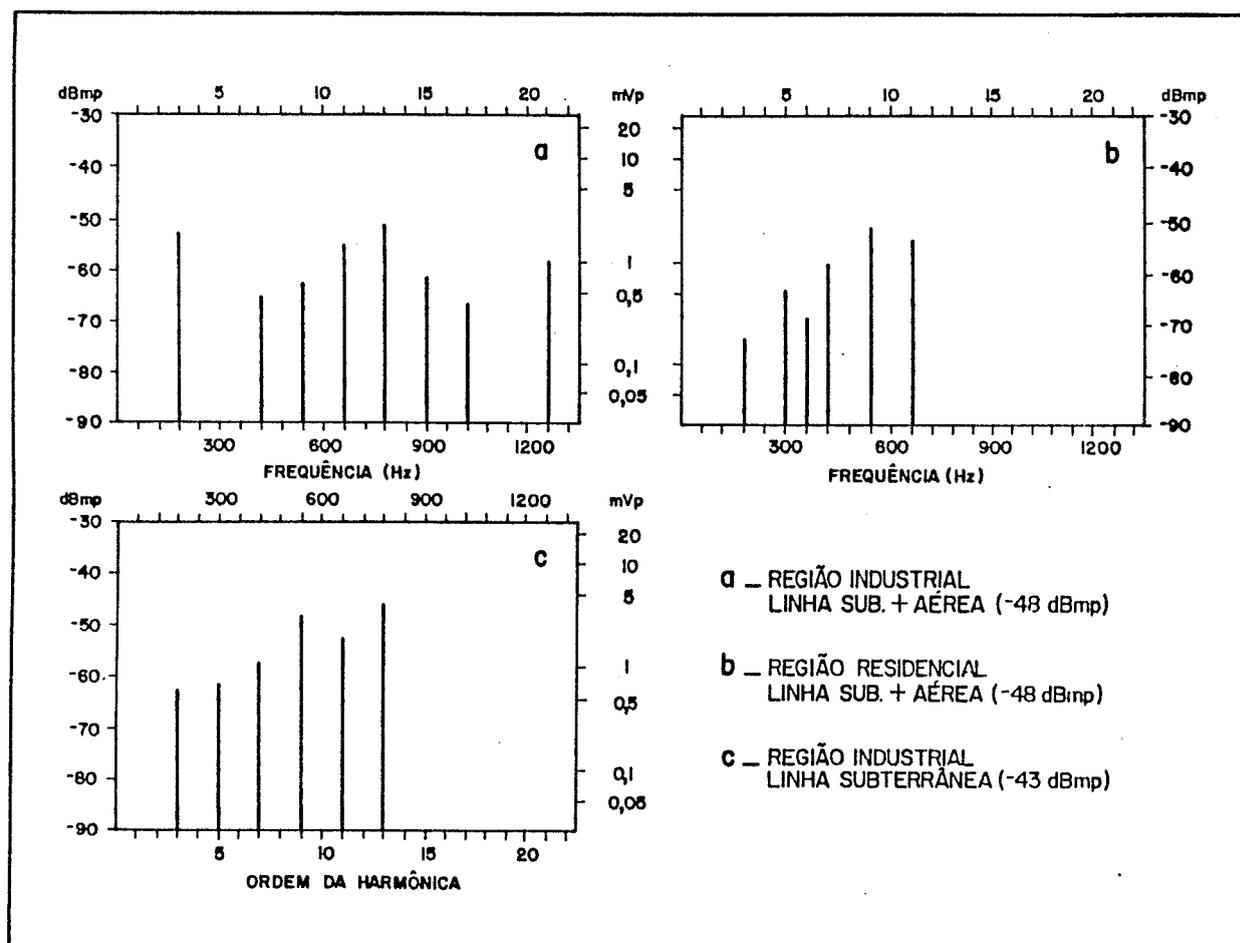


Figura 9.3 - Medições de Tensões Transversais Psfométricas em Linhas da TELEMIG.

O segundo método de se medir as tensões transversais psfométricas consiste na leitura direta através do

psofômetro.

A tabela 9.3 mostra diversas medições diretas de tensões transversais psfométricas realizadas no cabo tronco que liga as estações de São Miguel Paulista e Guaianazes (rede da TELESP).

PAR	Vtp (dBmp)	PAR	Vtp (dBmp)
02	-66,0	285	-61,0
77	-70,0	289	-62,0
81	-64,0	301	-79,0
113	-80,0	305	-65,0
145	-65,5	321	-80,0
157	-80,0	337	-63,2
161	-79,0	353	-73,3
177	-74,3	361	-70,3
193	-64,3	369	-76,7
197	-66,0	385	-59,3

Tabela 9.3 - Medições de Tensões Transversais Psfométricas em Cabo Tronco da TELESP.

Observe-se que a variação da tensão transversal psfométrica entre os diversos pares do mesmo cabo é devido principalmente às diferentes capacitâncias entre fio

e blindagem. Estas capacitâncias variam em função da posição do par dentro do cabo, conforme mostra a tabela 8.2.

Comparando-se os valores da tabela 9.3 com os limites da tabela 9.2 conclui-se que este cabo atende ao limite de manutenção, já que todas as tensões transversais psométricas estão abaixo de - 50 dBmp.

CONCLUSÃO

A maneira mais efetiva de se solucionar os problemas advindos da influência de linhas de energia elétrica em linhas de telecomunicações é a formulada em (27), que se baseia em dois níveis de ação:

1. Estabelecimento de normalização relativa a ambas as linhas, orientada no sentido de minimizar a influência.
2. Determinação conjunta de métodos apropriados às situações específicas.

O primeiro nível de ação se aplica às rotas típicas, onde as medidas de coordenação têm um caráter preventivo. O segundo nível se aplica às rotas atípicas, onde as medidas de coordenação gerais não são suficientes. Para estas rotas são necessárias medidas especiais, determinadas conforme as características específicas do problema, cujo objetivo é remediar uma situação de influência existente.

O processo de indução magnética descrito neste trabalho foi programado em computador digital, constituindo uma ferramenta bastante útil na avaliação das medidas de coordenação indutiva a serem adotadas em ambos os níveis de

ação descritos.

A elaboração deste programa computacional representa uma continuidade dos trabalhos do Convênio TELEBRÁS - UFMG na área de proteção elétrica das redes de telecomunicações.

Em (22), R. Stoneman, um experiente engenheiro de telecomunicações, descreve de forma global o problema da indução magnética:

"Indução tem causado mais esforço improdutivo ser gasto na rede de telecomunicações do que qualquer outra força que atue sobre o sistema. No passado, medidas ineficazes em conjunto com a falta de soluções reais criaram um pesadelo de reclamações de ruído e problemas com equipamentos, que colocaram em dúvida a habilidade das pessoas mais sinceras e dedicadas na indústria de telecomunicações. Junto com isto veio a frustração de engenheiros e gerentes incapazes de prover um sistema de telecomunicações confiável".

É exatamente neste contexto que este trabalho se insere, descrevendo de forma detalhada todo o processo de indução magnética. Pois, conforme o grupo de trabalho do

IEEE em coordenação indutiva (46):

"a compreensão é o começo da solução".

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. OSBORNE, H.S., - "The Design of Transpositions for Parallel Power and Telephone Circuits", AIEE Trans., June 1918.
2. OSBORNE, H.S. - "Review of Work of the Subcommittee on Wave Shape Standard of the Standards Committee", AIEE Trans., Vol. 38, 1919.
3. RÜDENBERG, R., - "Die Ausbreitung der Erdströme in der Umgebung von Wechselstromleitungen", Z. Angewandte Math Mech., Band 5, 1925.
4. CARSON, J.R., - "Wave Propagation in Overhead Wires with Ground Return", Bell System Technical Journal, Vol. 5, 1926.
5. EDISON ELECTRIC INSTITUTE AND BELL TELEPHONE SYSTEM - "Engineering Reports of Joint Subcommittee on Development and Research", 5 Volumes: I, 1930; II, 1932; III, 1937; IV, 1937; V, 1943; Report nº 50, 1951.

6. CCITT - "Directives Concerning the Protection of Telecommunication Lines Against Harmful Effects from Electricity Lines", Manual, 1963 (mod. 1982).
7. TELECOMUNICAÇÕES BRASILEIRAS S.A. - "Análise de Problemas Associados à Indução Elétrica", SPT 565-520-500, Janeiro 1978,
8. ANDRETA, J.A., - "Cálculo de Tensões Induzidas por Circuitos de Força em Circuitos de Telecomunicações", TELESP - Divisão de Estudos da Rede, 1980.
9. NB - 477 - "Influência de Sistemas de Potência em Instalações de Telecomunicações", Maio 1979.
10. BODLE, D.W., GHAZI, A.J., SYED, M., WOODSIDE, R.L. - "Characterization of the Electrical Environment", University of Toronto Press, 1976.
11. PAULINO, J.O.S., - "Influências de Curtos-Circuitos nas Redes de Distribuição sobre Redes Telefônicas em Uso-Mútuo de Posteação", CPGEE-UFMG, Dissertação de Mestrado, 1985.
12. TELECOMUNICAÇÕES BRASILEIRAS S.A. - "Influências de Sistemas de Potências em Corrente Contínua em Siste-

mas de Telecomunicações", 1982.

13. PAULINO, J.O.S.; SÁ, T.L.; SANTOS, I.M. - "Tensões Induzidas em Redes Aéreas Devido a Descargas Atmosféricas", Convênio TELEBRÁS/EEUFMG, Novembro 1986.
14. BODLE, D.W.; GRESH, P.A., - "Lightning Surges in Paired Telephone Cable Facilities", Bell System Technical Journal, Vol. 40, nº 2, March 1961.
15. BENNISON, E.; GHAZI, A.J.; FERLAND, P. - "Lightning Surges in Open Wire, Coaxial and Paired Cables", International Conference on Communications, 1972.
16. CARROL, R.L.; MILLER, P.S. - "Loop Transients at the Customer Station", Bell System Technical Journal, Vol. 59, Nº 9, November 1980.
17. CARROL, R.L., - "Loop Transient Measurements in Cleveland, South Carolina", Bell System Technical Journal, Vol. 59, Nº 9, November 1980.
18. NIPPON TELEGRAPH AND TELEPHONE CORPORATION - "Interference with Digital Transmission Signals Due To Radio Broadcast Wave Noise Induced on Paired Cables", CCITT COM V-42-E, December 1986.

19. PODGORSKI, A., - "Nuclear Electromagnetic Pulse",
Emergency Planning Digest, December 1984.
20. CCITT - "Local Telephone Networks, July 1968.
21. FICAP - "Cabos Telefônicos", Catálogo.
22. GUNDRUM, R., - "Power Line Interference: Problems and
Solutions", ABC of the Telephone, Vol. 14.
23. GRUPO DE REDACCIÓN PARA LAS DIRETRICES - "Inducción
Magnética Producida por las Líneas de Tracción
Eléctrica em Corriente Alterna", CCITT, COM V-45-S,
Diciembre de 1986.
24. BURKE, J.J.; LAWRENCE, D.J., - "Characteristics of
Fault Currents on Distribution Systems", IEEE Trans.
PAS, Vol. 103, nº 1, January 1984.
25. HEIRMAN, D.N. - "Time Variations and Harmonic Content
of Inductive Interference in Urban/Suburban and
Residential/Rural Telephone Plants", IEEE Trans.
Vol. COM-23, nº 12, December 1975.

26. BARBOSA, C.F. - "Medições de Induções Elétricas no Sistema Telefônico", Convênio TELEBRÁS-EEUFMG, Relatório nº 5, Outubro de 1984.
27. EVANS, R.D.; WITZKE, R.L. - "Coordination of Power and Communication Systems", Electrical Transmission and Distribution Reference Book, Chapter 23, September 1950.
28. CIGRÉ WORKING GROUP 36-05 - "Harmonics, Characteristic Parameters, Methods of Study, Estimates of Existing Values in the Network", ELECTRA nº 77.
29. KLEWE, H.R.J., - "Interference between Power Systems and Telecommunications Lines", Edward Arnold Ltd., London 1958.
30. McGRANAGHAN, M.F.; SHAW, J.H., OWEN, R.E. - "Measuring Voltage and Current Harmonics on Distribution Systems", IEEE Trans. PAS, Vol. 100, July 1981.
31. STEVENSON, W.D. - "Elements of Power Systems Analysis", McGraw Hill-Kogakusha Press, 1962.

32. RÜDENBERG, R. - "Transient Performance of Electric Power Systems", MIT Press, May 1970.
33. KRAKOWSKY, M. - "Mutual Impedance of Crossing Earth-Return Circuits", Proc. IEE, Vol. 114, 1967.
34. BARBOSA, C.F. - "Análise Teórico-Experimental da Indução Eletromagnética", Convênio TELEBRÁS-EEUFMG, Relatório nº 6, Março 1985.
35. PIRELLI - "Cálculo de Tensões Induzidas e Fator de Blindagem", Divisão Cabos, Novembro 1981.
36. MENEZ, J.; DELEPINE, J.L.; KERMARC, P. - "Efficacite des Cables a Effet Reducteur Utilises dans le Reseau Local", CNET - NT/LAA/RLM/30, Juillet 1980.
37. BARBOSA, C.F. - "Indução Eletromagnética - Parte II", Convênio TELEBRÁS-EEUFMG, Relatório nº 8, Outubro 1985.
38. CCITT - "Protection Against Interference", Series K Recommendations, Vol. IX.
39. PERSON, J.M. - "Retorno a la Noción de F.E.M. Inducida y su Utilizacion en los Criterios o Convenios",

CCITT COM V-56-5, Diciembre 1986.

40. PAULINO, J.O.S.; ARAUJO, A.E.A.; VASCONCELOS, F.H. - "Proteção Elétrica de Redes Telefônicas", Convênio TELEBRÁS/EEUFMG, Novembro 1983.
41. CNET - "Connaissance des Perturbations sur les Lignes D'Abonnés - COPELIA", LAA/ELR.
42. ADMINISTRATION FRANÇAISE - "Surtensions Recueillies sur le Réseau Local Français", CCITT COM V-F, Janvier 1984.
43. ADMINISTRACIÓN HÚNGARA - "Estudio de la Relación entre Desequilibrio y Tensiones Transversales Inducidas", CCITT COM V-38-5, Diciembre 1982.
44. CCITT - "Report on the Study Progress of Question 19/V", COM V-69-E, January 1987.
45. BARSTOW, J.M.; BLYE, P.W.; KENT, H.E. - "Measurement of Telephone Noise and Power Wave Shape", AIEE Trans., December 1935.

46. IEEE WORKING GROUP - "Power Line Harmonic Effects on Communication Line Interference", IEEE Trans. PAS, Vol. 104, № 9, September 1985.

Equações de Rüdenberg

(Adaptado de (32) conforme desenvolvido em (34)).

No desenvolvimento das Equações de Rüdenberg considera-se as linhas de campo magnético como círculos con cêntricos com o condutor pelo qual a corrente flui. O solo é considerado como tendo uma resistividade uniforme e cuja permeabilidade magnética é igual a do ar. Embora estas hipóteses não sejam rigorosamente obedecidas na prática, elas não comprometem significativamente a precisão dos cálculos.

A figura A1.1 mostra os parâmetros geométricos considerados. Trabalha-se no sistema MKS.

é obtido em ohms por metro.

A equação genérica de Rüdénberg para impedâncias é:

$$\bar{Z} = \frac{-\sqrt{j} k \rho}{\pi h} \frac{H_0 (\sqrt{j} K e)}{H_1 (\sqrt{j} K h)} - j \frac{\omega \mu_0}{2 \pi} \ln \left(\frac{e}{d} \right) + u$$

onde: $K = \sqrt{\frac{\omega \mu_0}{2 \rho}}$, $\omega = 2 \pi f$

ρ = resistividade do solo em ohms . metro

μ_0 = permeabilidade magnética do vácuo = $4 \pi 10^{-7}$ H/m

f = freqüência da corrente indutora em hertz

H_0 e H_1 são funções cilíndricas de Hankel de ordem zero e de primeira ordem, respectivamente. As figuras A1.2 e A1.3 fornecem os diagramas vetoriais destas funções.

Para valores de Kh menores que 0,3 pode-se substituir a função H_1 por uma assíntota, obtendo-se:

$$\bar{Z} = \frac{\omega \mu_0}{4 \pi} (\pi H_0 (\sqrt{j} K e) - j 2 \ln \left(\frac{e}{d} \right)) + u$$

Para valores de K_e menores que 0,4 pode-se substituir também a função H_0 , obtendo-se:

$$\bar{Z} = \frac{\omega \mu_0}{4\pi} \cdot \left(\frac{\pi}{2} - j 2 \ln \left(\frac{2}{\gamma K d} \right) \right) + u$$

onde $\gamma =$ constante de Euler = 1,7811

A equação acima pode também ser expressa na forma:

$$\bar{Z} = \omega 10^{-7} \left(\frac{\pi}{2} - j \left(\ln \left(\frac{\rho}{f \cdot d^2} \right) + 12,67 \right) \right) + u$$

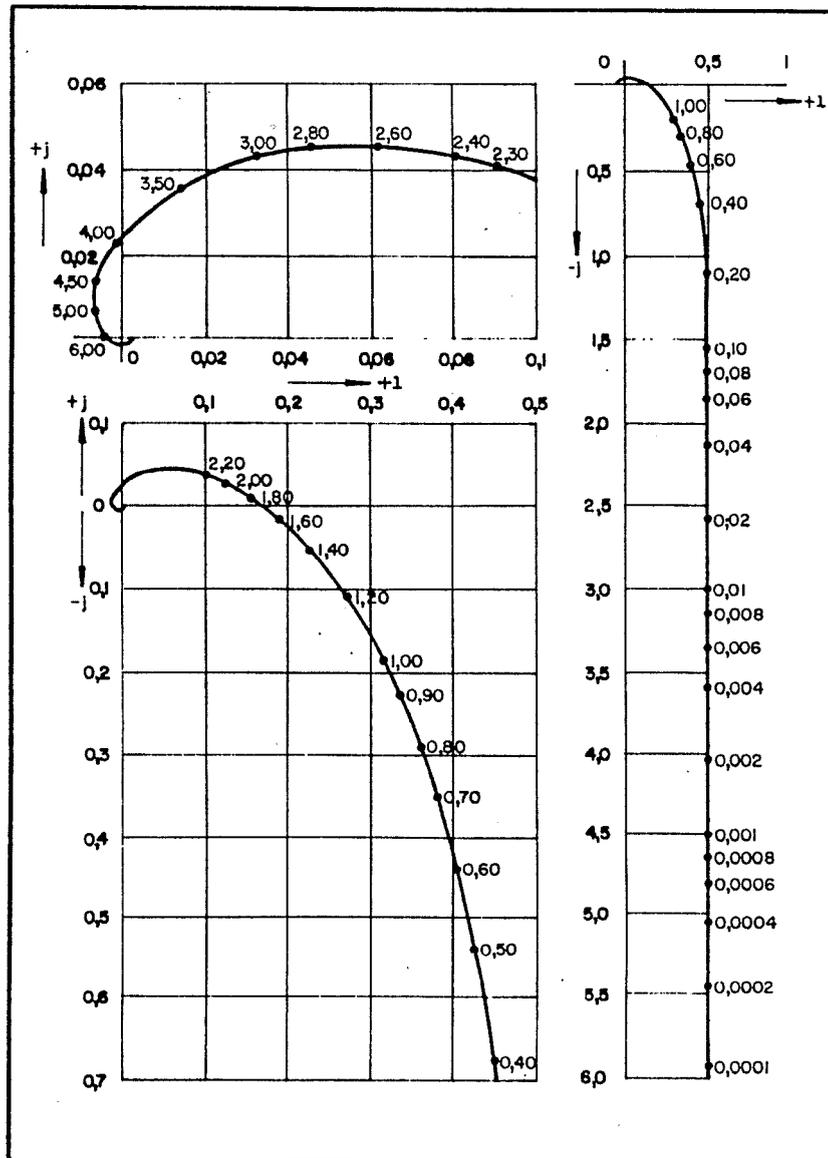


Figura A1.2 - Diagrama Vetorial da Função $H_o(\sqrt{j} Kx)$

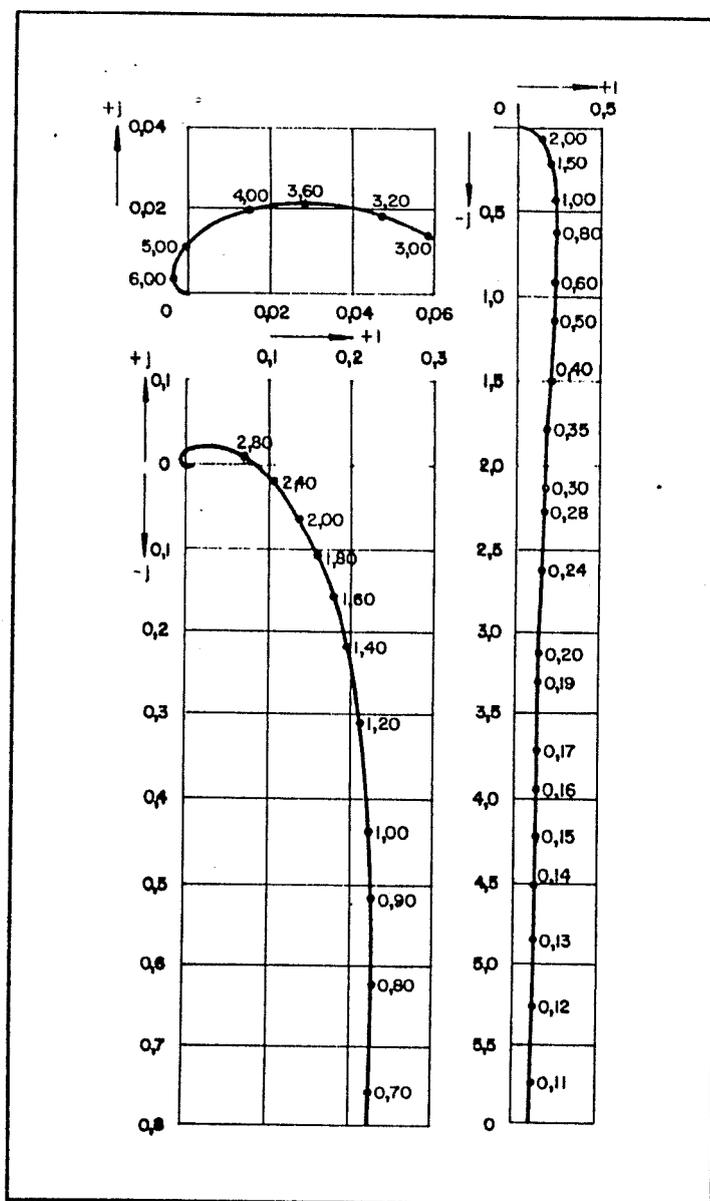


Figura A1.3 - Diagrama Vetorial da Função $\sqrt{j} H_1(\sqrt{j} K_x)$

APÊNDICE 2

Dados de Blindagem de Cabos Telefônicos.

DIÂMETRO DO CONDUTOR	0,40		0,50		0,65		0,90	
	Re	Ra	Re	Ra	Re	Ra	Re	Ra
Nº DE PARES								
10	6,2	4,25	5,4	4,75	4,8	5,25	3,4	6,75
20	5,0	5,0	4,2	5,75	3,4	6,75	2,4	8,75
30	4,4	5,5	3,4	6,75	2,8	7,75	2,0	10,25
50	3,4	6,75	2,7	8,0	2,2	9,5	1,5	12,5
75	2,8	7,75	2,3	9,25	1,8	11,0	1,2	14,75
100	2,4	8,75	2,0	10,25	1,5	12,5	1,0	16,5
200	1,7	11,5	1,4	13,25	1,0	16,25	0,65	22,75
300	1,3	13,75	1,1	15,75	0,79	19,5	0,49	27,25
400	1,1	15,5	0,91	17,75	0,66	22,25	0,40	31,25
600	0,87	18,5	0,70	21,5	0,49	27,0	—	—
900	0,66	22,25	0,54	25,75	0,38	31,75	—	—
1200	0,54	25,5	0,43	29,5	—	—	—	—
1500	0,46	28,0	—	—	—	—	—	—
1800	0,40	31,0	—	—	—	—	—	—
2400	0,33	35,5	—	—	—	—	—	—

Tabela A2.1 - Dados de Blindagens de Cabos CT

(blindagem de chumbo)

diâmetro do condutor = mm

resistência da blindagem (Re) = Ω /Km

raio da blindagem (Ra) = mm

DIÂMETRO DO CONDUTOR	0,40		0,51		0,64		0,91	
	Re	Ra	Re	Ra	Re	Ra	Re	Ra
Nº DE PARES								
10	52	4,05	4,9	4,3	4,2	5,05	3,1	6,8
20	4,0	5,3	3,6	5,8	3,1	6,8	2,3	9,05
30	3,5	6,05	3,1	6,8	2,6	8,05	1,9	11,1
50	2,9	7,3	2,6	8,05	2,1	9,85	1,6	13,4
75	2,4	8,8	2,2	9,6	1,8	11,85	1,3	16,65
100	2,0	10,3	1,9	11,1	1,6	13,4	1,1	18,6
200	1,5	13,85	1,4	15,4	1,1	18,6	0,80	26,2
300	1,2	16,9	1,1	18,35	0,92	22,9	0,64	32,7
400	1,1	19,4	1,0	21,6	0,80	26,2	0,56	37,2
600	0,89	23,6	0,80	26,4	0,64	32,7	—	—

Tabela A2.2 - Dados de Blindagens de Cabos CTP-APL
 (blindagem de alumínio)
 diâmetro do condutor = mm
 resistência da blindagem (Re) = Ω/km
 raio da blindagem (Ra) = mm

HARMÔNICO	FREQUÊNCIA	Fp	dB
1	60	0.00235	- 52.58
2	120	0.01955	- 34.18
3	180	0.06766	- 23.39
4	240	0.16022	- 15.91
5	300	0.29500	- 10.60
6	360	0.39760	- 8.01
7	420	0.52320	- 5.63
8	480	0.62940	- 4.02
9	540	0.71860	- 2.87
10	600	0.79400	- 2.00
11	660	0.86120	- 1.30
12	720	0.92320	- 0.69
13	780	0.98200	- 0.16
14	840	1.02800	0.24
15	900	1.07200	0.69
16	960	1.11160	0.92
17	1020	1.11680	0.96
18	1080	1.08680	0.72
19	1140	1.04240	0.36
20	1200	1.00000	0.00
21	1260	0.97260	- 0.24
22	1320	0.94420	- 0.50
23	1380	0.91420	- 0.78
24	1440	0.88580	- 1.95
25	1500	0.86100	- 1.30
26	1560	0.83840	- 1.53
27	1620	0.81720	- 1.75
28	1680	0.79740	- 1.97
29	1740	0.77900	- 2.17
30	1800	0.75900	- 2.40
31	1860	0.74240	- 2.59
32	1920	0.72680	- 2.77
33	1980	0.71240	- 2.95
34	2040	0.70000	- 3.10
35	2100	0.68900	- 3.24
36	2160	0.67720	- 3.39
37	2220	0.66640	- 3.53
38	2280	0.65560	- 3.67
39	2340	0.64480	- 3.81
40	2400	0.63400	- 3.96

Tabela A3.1 - Fatores Psfométricos (Curva CCITT - Telefone)

HARMÔNICO	FREQÜÊNCIA	Fp	dB
41	2460	0.62340	- 4.10
42	2520	0.61300	- 4.25
43	2580	0.60160	- 4.41
44	2640	0.59160	- 4.56
45	2700	0.58000	- 4.73
46	2760	0.56920	- 4.89
47	2820	0.55840	- 5.06
48	2880	0.54700	- 5.24
49	2940	0.53580	- 5.42
50	3000	0.52500	- 5.60
51	3060	0.51060	- 5.84
52	3120	0.49540	- 6.10
53	3180	0.47860	- 6.40
54	3240	0.46180	- 6.71
55	3300	0.44400	- 7.05
56	3360	0.42480	- 7.44
57	3420	0.40480	- 7.86
58	3480	0.38320	- 8.33
59	3540	0.35920	- 8.89
60	3600	0.33400	- 9.53
61	3660	0.30880	- 10.21
62	3720	0.28360	- 10.95
63	3780	0.25984	- 11.71
64	3840	0.23752	- 12.49
65	3900	0.21520	- 13.34
66	3960	0.19288	- 14.29
67	4020	0.17208	- 15.29
68	4080	0.15432	- 16.23
69	4140	0.13656	- 17.29
70	4200	0.11880	- 18.50
75	4500	0.05600	- 25.04
80	4800	0.03200	- 29.90
85	5100	0.01375	- 37.24
90	5400	0.00698	- 43.12
100	6000	0.00178	- 54.99

Tabela A3.2 - Fatores Psfométricos (Curva CCITT - Telefone)