

COMPACTAÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO DE 138/230KV

PARA INSTALAÇÃO EM ÁREA URBANA:

ESPECIFICIDADES, DIMENSIONAMENTO E CRITÉRIOS RELEVANTES

PARA DETERMINAÇÃO DA VIABILIDADE DE IMPLANTAÇÃO

Autor: ROBERTO CARNEIRO PUCCINELLI JÚNIOR

Orientador: PROF. DR. CARLOS RODRIGUES DE SOUZA

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

AGOSTO - 1992

Este exemplar foi entregue à biblioteca da tese defendida por Roberto Carneiro Puccinelli Júnior em 28-8-92. Comissão Julgadora: [assinatura] Orientador: [assinatura]

*Para Roswitha*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a meus pais, que me propiciaram o necessário suporte do conhecimento.

Agradeço à MONASA CONSULTORIA E PROJETOS LTDA., pelo apoio logístico oferecido.

Agradeço, pelas valiosas sugestões e contribuições oferecidas, as seguintes pessoas:

Eng. Fábio Teivelis

Eng. João Batista Guimarães Ferreira da Silva

Eng. Naim Kaba Filho

Eng. Paulo Edmundo da Fonseca Freire

Eng. Ricardo Vasconcelos

Agradeço, pela possibilidade de utilização de equipamentos de informática e sistemas de editoração de texto, as seguintes pessoas:

Gilberto Ribeiro Zanon

Guacira Alvarez de Oliveira

Leandro David Dolenc

Mário Sérgio Antunes

Osmar Salvadori

Agradeço a meu orientador, prof. Dr. Carlos Rodrigues de Souza, pelo inestimável auxílio na consecução desse trabalho.

## RESUMO

A compactação de linhas de transmissão nas faixas de tensão de 138kV e 230kV é estudada sob o enfoque de sua instalação em áreas urbanas de cidades de médio e grande porte. Essa situação gera problemas específicos (limitações), não encontrados ou usualmente não considerados em linhas de transmissão convencionais instaladas em áreas rurais.

A análise detalhada das "limitações intrínsecas", inerentes à compactação da linha, e das "limitações extrínsecas", ocasionadas pela instalação da linha em área urbana, permite efetuar um dimensionamento amplo da linha de transmissão compacta, abrangendo os aspectos essenciais que determinarão a viabilidade ou não de sua implantação em área urbana. Esse dimensionamento é explicitado através de exemplos localizados, cujos dados mais se adequam (do ponto de vista das condições mais desfavoráveis) à situação apresentada.

O trabalho em seu todo se configura num guia para consulta de aspectos teóricos, bem como num roteiro para o projeto de linhas de transmissão compactas em regiões densamente povoadas.

## ABSTRACT

Transmission lines compaction in 138kV and 230kV voltage levels is studied from the special point of view of its fittings in urban areas of middle-sized and great-sized cities. This situation offers particular problems (limitations), which are not usually taken into account or which do not exist at all in conventional transmission lines fittings in rural areas.

A detailed analysis of "intrinsic limitations", inherent to line compaction as well as the analysis of "extrinsic limitations" created by line fittings in urban areas, permit a comprehensive evaluation of the compact transmission line which takes into account essential aspects that will confirm - or not - the viability of its fittings in these areas. This evaluation is expressed in terms of localized examples, which offer the most adequate data to the situation, from the point of view of the less favorable conceived conditions.

The work as a whole is shaped in the form of a consultive guide of theoretical aspects, as well as guide-book to compact transmission lines projects in densely populated regions.

# S U M Á R I O

## SIMBOLOGIA

### CAPÍTULO 1

#### CONSIDERAÇÕES INICIAIS

### CAPÍTULO 2

#### PRINCÍPIOS GERAIS DA COMPACTAÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

##### 2.1 *CONCEITUAÇÕES*

2.1.1 Compactação.....	21
2.1.2 Isolador Composto.....	22
2.1.3 Isolador Convencional.....	24
2.1.4 Estrutura Tubular.....	24

##### 2.2 *FINALIDADES*

2.2.1 Instalação em Área Urbana.....	26
2.2.2 Modificação da Classe de Tensão da LT.....	29
2.2.3 Incremento da Potência Característica da LT.....	29
2.2.4 Minimização de Interferência Física.....	32
2.2.5 Minimização da Agressão ao Meio Ambiente.....	35
2.2.6 Redução de Impacto Visual.....	39

##### 2.3 *DESENVOLVIMENTO*

2.3.1 Histórico.....	40
2.3.2 O Estado da Arte.....	43

### CAPÍTULO 3

#### A LINHA DE TRANSMISSÃO COMPACTA: CARACTERIZAÇÃO DAS DIFICULDADES DE IMPLANTAÇÃO

##### 3.1 *LIMITAÇÕES INTRÍNSECAS*

3.1.1 Isolador Composto/Isolador Convencional.....	50
3.1.2 Distâncias Elétricas.....	68
3.1.3 Distâncias de Segurança.....	100
3.1.4 Manutenção.....	112

### **3.2 LIMITAÇÕES EXTRÍNSECAS**

3.2.1 Induções Eletrostáticas e Eletromagnéticas.....	116
3.2.2 Aterramento.....	141
3.2.3 R.I. (Rádio-Interferência).....	149
3.2.4 T.V.I. (T.V.-Interferência).....	161
3.2.5 Ruído Audível.....	165

## **CAPÍTULO 4**

### **CRITÉRIOS PARA DETERMINAÇÃO DA VIABILIDADE DE IMPLANTAÇÃO EM ÁREA URBANA E DIMENSIONAMENTO DA LINHA DE TRANSMISSÃO COMPACTA**

#### **4.1 ASPECTOS PRELIMINARES**

4.1.1 Potência a ser Transmitida.....	171
4.1.2 Viabilidade Física Macroscópica.....	172
4.1.3 Grau de Compactação Necessário ou Possível.....	179
4.1.4 Determinação da Configuração Inicial.....	181

#### **4.2 O DIMENSIONAMENTO DA LTC**

4.2.1 Cálculo de Distâncias Elétricas.....	186
4.2.2 Cálculo de Distâncias de Segurança.....	203
4.2.3 Cálculo de Induções.....	208
4.2.4 Cálculo de Interferências.....	223
4.2.5 Interação ao Meio Ambiente.....	241
4.2.6 Adequação à Normalização Existente.....	245
4.2.7 Determinação da Configuração Final.....	252

#### **4.3 PROBLEMAS USUAIS DE IMPLANTAÇÃO**

## **CAPÍTULO 5**

### **CONCLUSÃO**

### **BIBLIOGRAFIA**

## S I M B O L O G I A

- a: parâmetro de correção do desvio padrão da probabilidade de ocorrência de flashover.
- a<sub>1</sub>, a<sub>2</sub>: distâncias verticais básicas de travessias (m).
- ALT: altitude média da região atravessada pela LTC (m).
- AN<sub>i</sub>: ruído audível gerado pela fase i da LTC no limite da distância transversal considerada (dBA).
- bc: fator de correção das condições ambientais de temperatura e pressão.
- [C]: matriz das capacitâncias (F/m).
- Cr: coeficiente de refração da onda de tensão.
- Cs: coeficiente de segurança.
- C<sub>4t</sub>: capacitância em relação à terra do objeto sujeito à indução eletrostática (F/m).
- db: projeção horizontal do comprimento do isolador line-post ou da mísula de sustentação do isolador tipo pino ou de suspensão (m).
- df: distância fase-fase (mm).
- Dg: profundidade equivalente da corrente de retorno pela terra (m).
- DGE: distância geométrica de escoamento do isolador line-post (mm/kVrms).
- dif: distância entre o condutor de fase i e o fio ou barra f da cerca ou gradil metálicos (m).
- dp: distância entre cabos pára-raios (mm).
- dpi: distância entre o cabo pára-raios i e o condutor sujeito a



maior tensão induzida pela sobretensão originada de surto atmosférico atingindo o cabo pára-raios da LTC (m).

dp'i: distância entre a imagem do cabo pára-raios  $i$  e o condutor sujeito a maior tensão induzida pela sobretensão originada de surto atmosférico atingindo o cabo pára-raios da LTC (m).

dr: raio da seção transversal da estrutura tubular no ponto de fixação do isolador line-post mais baixo (m).

ds: distância horizontal entre subcondutores (m).

Dt: distância transversal ao eixo da LTC (m).

DTE: distância total de escoamento do isolador line-post (mm).

DTE': distância efetiva de escoamento do isolador line-post (mm).

du: valor em "metros" igual à tensão nominal da linha de menor tensão numa travessia de duas linhas (m).

Du: valor em "metros" igual à tensão nominal da linha de maior tensão numa travessia de duas linhas, ou da LTC em estudo (m).

DV: espaçamento vertical mínimo entre a LTC e o obstáculo (m).

Ei: nível de R.I. gerado pela fase  $i$  da LTC no limite da distância transversal considerada (dB).

El: campo elétrico longitudinal (V/km).

Es: campo elétrico ao nível do solo no ponto  $P$  (kV/m).

Etl: nível de T.V.I. gerado pela LTC no limite da distância transversal considerada (dB).

Etr: nível de R.I. gerado pela LTC no limite da distância transversal considerada (dB).

ev: carga mecânica unitária devido ao vento (kgf/m).

f: frequência (kHz).

gai: gradiente médio na superfície do condutor de fase  $\underline{i}$  (kV/cm).

gc: grau de compactação (%).

gmi: gradiente máximo na superfície do condutor de fase  $\underline{i}$  (kV/cm).

GMD: distância média geométrica.

H: altura da estrutura (m).

hcl: altura em relação ao solo do eixo do cilindro equivalente ao objeto sujeito à indução eletrostática (m).

hg: altura do(s) cabo(s) pára-raios (m).

$\overline{hg}$ : altura média do(s) cabo(s) pára-raios (m).

hi: altura do condutor de fase  $\underline{i}$  na estrutura (m).

$\overline{hi}$ : altura média do condutor de fase  $\underline{i}$  ao longo do vão (m).

ho: altura do objeto sujeito à indução eletrostática (m).

$\overline{ho}$ : altura média do objeto sujeito à indução eletrostática (m).

Icc: corrente de curto-circuito.

Ich: corrente de choque (mA).

Ici: corrente no cabo condutor de fase  $\underline{i}$  (A).

Io: corrente de descarga atmosférica (kA).

Im: corrente gerada por indução eletromagnética.

K1: fator de correção da tensão induzida por efeito eletrostático em objetos que possuam as três dimensões com a mesma ordem de grandeza.

K2: fator de correção da capacitância para a terra do objeto sujeito à indução eletrostática.

KC: coeficiente de acoplamento capacitivo entre cabos pára-raios e condutor.

Kd: correção do período de integração.

Kf: fator de forma.

Kh: fator de correção da umidade do ar.

Kr: coeficiente de rugosidade para terreno em área urbana.

l: distância média de atração da descarga atmosférica (m).

L: largura da faixa de servidão da LTC (m).

La: linha de arco do isolador line-post (mm).

Li: comprimento do isolador line-post (mm).

Lo: comprimento do objeto sujeito à indução eletromagnética (m).

LD: linha de distribuição.

LT: linha de transmissão convencional.

LTC: linha de transmissão compacta.

n: número de subcondutores por fase.

Nd: estimativa de desligamentos na linha por 100 km por ano.

Nl: estimativa de descargas na linha por 100 km por ano.

np: número de cabos pára-raios.

p: peso próprio do cabo condutor ou pára-raios (kg/m).

[P]: matriz dos coeficientes de potenciais (m/F).

qi: densidade de carga do condutor ou feixe de subcondutores da fase  $i$  (C/m).

[Q]: matriz das densidades de carga da linha trifásica (C/m).

qo: pressão dinâmica de referência (N/m<sup>2</sup>).

R: raio do círculo que circunscreve os subcondutores de uma fase (m).

RAD: densidade relativa do ar.

rbc: raio da base do cone ou do cilindro equivalente à estrutura (m).

rc: raio do cabo condutor (m).

rcl: raio do cilindro equivalente ao objeto sujeito à indução eletrostática (m).

rf: raio do fio da cerca metálica ou barra de gradil metálico (m)

Rf: resistência distribuída do fio da cerca metálica ou barra de gradil metálico ( $\Omega/\text{km}$ ).

req: raio equivalente do feixe de subcondutores (m).

rp: raio do cabo pára-raios (m).

SE: subestação de distribuição.

Sc: flecha do cabo condutor (m).

Scm: flecha máxima do cabo condutor (m).

Sff: sobretensão de manobra fase-fase (pu).

Sft: sobretensão de manobra fase-terra (pu).

Sg: flecha do cabo pára-raios (m).

SL: ruído audível gerado pela LTC no limite da distância transversal considerada (dBA).

T: nível isocerâunico.

tmin: média das temperaturas mínimas anuais da região atravessada ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Tr: período de retorno considerado.

Trp: carga de ruptura do cabo condutor ou pára-raios (kg/m).

V: vão de linha (m).

[V]: matriz das tensões fasoriais (kV).

Vb: velocidade básica do vento (m/s).

Vcf: tensão crítica de flashover (kV).

V'cf: tensão crítica de flashover corrigida (kV).

Voc: tensão induzida por efeito eletrostático (kV).

Vft: tensão eficaz fase-terra (kV).

Vftp: tensão de pico fase-terra (kV).

Vmp: tensão máxima no cabo pára-raios por efeito de descarga atmosférica (kV).

Vn: tensão nominal da LTC (kV).

Vp: velocidade de vento de projeto (m/s).

Vrc: tensão resultante no condutor no ponto de incidência da descarga atmosférica (kV).

Vri: tensão a que fica submetido o isolador por efeito de descarga atmosférica (kV).

Vrt: tensão resultante no topo da estrutura por efeito de descarga atmosférica (kV).

Vth: tensão de Thévenin induzida por efeito eletromagnético (V).

Vws: tensão suportável entre fases sob impulso de manobra (kV).

Zeq: impedância equivalente ( $\Omega$ ).

Zff: impedância própria do fio de cerca metálica ou da barra de gradil metálico ( $\Omega$ ).

zff: impedância própria distribuída do fio de cerca metálica ou barra de gradil metálico ( $\Omega/\text{km}$ ).

Zgi: impedância de aterramento da cerca metálica ou do gradil metálico no ponto  $\underline{i}$  ( $\Omega$ ).

Zif: impedância mútua entre o condutor de fase  $\underline{i}$  e o fio ou barra  $\underline{f}$  da cerca ou gradil metálicos ( $\Omega$ ).

zif: impedância mútua distribuída entre o condutor de fase  $\underline{i}$  e o fio ou barra  $\underline{f}$  da cerca ou gradil metálicos ( $\Omega/\text{km}$ ).

Zp: associação série da impedância própria do corpo, resistência de contato e impedância de aterramento virtual (k $\Omega$ ).

Zsc: impedância de surto do cabo condutor ( $\Omega$ ).

Zsp: impedância de surto do cabo pára-raios ( $\Omega$ ).

Zst: impedância de surto da estrutura ( $\Omega$ ).

Zth: impedância de Thévenin ( $\Omega$ ).

$\alpha$ : estimador do fator de escala da distribuição de Gumbel  
(m/s)<sup>-1</sup>.

$\beta$ : estimador do fator de posição da distribuição de Gumbel  
(m/s).

$\Upsilon$ : ângulo máximo de balanço do cabo condutor.

$\Delta$ : distância ao solo do objeto sujeito à indução eletrostática  
(m).

$\Delta B_f$ : fator de correção da frequência para sinal televisivo (dB).

$\Delta B_o$ : fator de correção da largura de banda de sinal radiofônico  
para sinal televisivo (dB).

$\epsilon_0$ : permissividade elétrica do ar =  $8,85 \times 10^{-12}$  (F/m).

$\sigma$ : desvio padrão da probabilidade de ocorrência de flashover.

$\delta$ : fator de efetividade.

$\theta$ : ângulo de incidência do vento.

$\rho$ : massa específica do ar (Kg/m<sup>3</sup>).

$\rho_g$ : resistividade do solo ( $\Omega m$ ).

## CAPÍTULO 1

### CONSIDERAÇÕES INICIAIS

As linhas de transmissão convencionais nas classes superiores a 69kV, são constituídas quase que exclusivamente de torres de aço treliçadas e cadeias de isoladores de porcelana ou de vidro do tipo concha-pino.

Do início do século até meados da década de 60 assistiu-se a certo aperfeiçoamento dos componentes dessas linhas, inclusive com o desenvolvimento de alguns acessórios específicos. A filosofia de transmissão de energia porém, baseada nesse tipo de configuração, permaneceu essencialmente a mesma.

As características físicas dessas linhas (originadas dos cálculos elétricos de distâncias fase-terra, com as fases separadas entre si pelas treliças da estrutura metálica) sempre trouxeram grandes dificuldades para sua implantação em lugares mais densamente povoados, atingindo um grau máximo de impedimento em relação a centros urbanos de cidades de médio e grande porte.

Por outro lado, as restrições à implantação de linhas de transmissão de alta tensão têm aumentado sistematicamente nos últimos tempos, como decorrência da preocupação cada vez maior (não sem razão) com os danos causados ao meio ambiente pelos sistemas de transmissão de energia. Há apenas poucos anos atrás, uma Empresa Concessionária de Energia Elétrica no Brasil utilizava um critério de controle de limpeza de faixa inconcebível nos dias de hoje: a área correspondente às faixas de servidão de linhas de 345kV e 500kV, onde a vegetação

havia sido erradicada, era verificada através de um "gabarito" de 30cm. Nenhum obstáculo com altura superior a isso, fosse ele um arbusto ou um cupinzeiro, poderia ser admitido dentro da faixa, sob pena de não se aceitar o serviço executado.

As normas para limpeza de faixa utilizadas hoje em dia são muito mais flexíveis e razoáveis; contudo, a sensação de "devastação" relacionada a essas linhas permaneceu, e a rejeição do grande público a um convívio mais estreito com elas recrudescer sensivelmente nos últimos anos, fruto principalmente de uma maior consciência ecológica.

As dificuldades de implantação, sejam elas físicas (locação de estruturas, superação de obstáculos, etc.) ou jurídico-econômicas (desapropriação e direito de passagem aérea), aliadas a essa rejeição crescente da população, tornaram os projetos dessas linhas muito mais complexos, e as soluções encontradas para minimizar o problema (geralmente variantes), têm onerado consideravelmente o custo final de implantação.

No início da década de 70, com o surgimento em escala comercial dos chamados isoladores compostos, passou-se a explorar uma nova configuração de montagem para linhas nas faixas de 138kV e 230kV: isoladores compostos tipo "line-post", conectados diretamente a estruturas tubulares.

O isolador composto, com um peso correspondente a 10% de uma cadeia de isoladores convencionais de mesmo nível de tensão, pode ser conectado diretamente a uma estrutura tubular de maneira relativamente simples, eliminando-se as mísulas de sustentação utilizadas nas estruturas convencionais. Com esse tipo de montagem, a linha de transmissão necessita de uma faixa de servidão de aproximadamente 30%



da faixa padrão requerida por uma linha com configuração convencional. A linha de transmissão montada desta forma passou a ser designada como linha de transmissão compacta.

Essa filosofia também estendeu-se aos níveis de tensão de UHV e EHV. Atualmente são desenvolvidos intensos esforços na busca de novas configurações para esses níveis de tensão, visando sempre, em última instância, a redução da faixa de servidão, uma melhor interação ao meio ambiente e, não por último, uma maior capacidade de transmissão de potência.

Este trabalho está voltado à compactação de linhas nas faixas de 138kV e 230kV, visto serem esses os níveis máximos de tensão passíveis de serem utilizados por LTC's em áreas urbanas de cidades de médio e grande porte.

A possibilidade de substituição dos isoladores compostos por isoladores rígidos de porcelana desenvolvidos para serem montados da mesma forma, isto é, diretamente junto à estrutura tubular, também foi enfocada, sendo discutidas as vantagens e desvantagens de um e de outro equipamento.

As características apresentadas por uma LTC instalada em área urbana são aqui analisadas em profundidade, dando origem a um roteiro de dimensionamento que pode ser utilizado como subsídio para a otimização dos projetos dessas linhas.

O capítulo 2 dá uma visão geral da compactação de linhas, apresentando um caráter eminentemente informativo. Definem-se aí conceitos que embasarão os assuntos desenvolvidos nos capítulos posteriores.

O capítulo 3 enfoca os problemas com que se depara ao se procurar compactar uma linha de transmissão. Constitui uma análise das limitações específicas encontradas na implementação desse tipo de linha.

O capítulo 4 trata da implantação propriamente dita da LTC. Estabelece métodos para se resolver os problemas apresentados no capítulo 3, constituindo-se dessa forma num compêndio de critérios para determinação da viabilidade de implantação dessas linhas em área urbana.

Alguns passos do dimensionamento da LTC, feitos essencialmente através de tentativas (como é o caso das alterações do arranjo de fases, bitola de cabos e número de subcondutores para obtenção do nível adequado de R.I.) podem facilmente ser compilados em programas de computador. Já outros, que requerem um maior grau de abstração e experiência de campo, como a determinação da "Viabilidade Física Macroscópica", cujos parâmetros devem ser ajustados através de verificação "in loco", só podem ser tomados como roteiros indicativos básicos, sob pena de não se conseguir uma perfeita otimização na configuração estrutural da LTC.

Sendo assim, julgou-se oportuno manter todo o conjunto de passos do dimensionamento numa linguagem única, explicitando todas as passagens relevantes. Para os casos repetitivos mencionados acima, o texto se configura num algoritmo dirigido.

Fêz-se menção a alguns aspectos de dimensionamento mecânico quando estreitamente ligados ao dimensionamento elétrico, apresentando assim um caráter de complementação.

Tendo em vista a diversidade de situações que podem surgir e influenciar o dimensionamento de uma LTC, optou-se em dar exemplos localizados para cada assunto focado no capítulo 4, naturalmente sempre considerando o caso mais desfavorável. Um exemplo único, por mais completo que fosse concebido, jamais poderia abranger todas as situações consideradas, ao menos não na proporção e amplitude com que foram analisadas.

## CAPÍTULO 2

### PRINCÍPIOS GERAIS DA COMPACTAÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

#### 2.1 CONCEITUAÇÕES

##### 2.1.1 Compactação

A compactação de linhas nas faixas de 138kV e 230kV visa, basicamente, a uma redução de distâncias. Uma linha de transmissão compacta apresenta distâncias entre fases inferiores às linhas de transmissão convencionais de mesmo nível de tensão. As estruturas são mais baixas e esguias, e as faixas de servidão correspondentemente mais estreitas.

As vantagens dessas particularidades são imediatas:

.menores custos de material, montagem, desapropriação e manutenção,

.possibilidade de transporte de energia em localidades que não comportam linhas convencionais, como áreas urbanas, regiões de proteção ambiental, zonas de proteção de aeródromos, etc.,

.sensível redução da poluição visual,

.menor agressão ao meio ambiente e ao ecossistema de uma região.

A desvantagem da compactação de linhas prende-se essencialmente à maior complexidade do projeto de instalação. Vários parâmetros comumente desprezados, ou considerados apenas superficialmente nos projetos de LT's, como induções e interferências

são, para os casos de LTC's em áreas urbanas, de fundamental importância, influenciando fortemente na configuração final da linha.

### 2.1.2 Isolador Composto

O isolador composto, também chamado isolador não cerâmico ou polimérico, é um equipamento extremamente importante nos estudos de compactação.

Basicamente, é constituído de um tarugo feito de resina impregnada com fibra de vidro, no qual são fixados os terminais metálicos. Essa montagem assegura as características mecânicas do isolador. Sobre o tarugo é aplicada uma camada de isolante sintético moldado em aletas [1], o que confere ao isolador suas propriedades elétricas (figura 2.1). O isolador composto é, portanto, uma peça única, sem articulações, onde as funções elétricas e mecânicas são mantidas separadas.

As principais vantagens do isolador composto são sua versatilidade e resistência à ruptura. Sua montagem em estruturas tubulares é bastante simples (figura 2.2). Esse tipo de montagem elimina a necessidade de mísulas, o que, juntamente com a inexistência de balanço da cadeia, reduz sensivelmente a largura da faixa de servidão.

Tratando-se de um equipamento novo, de uso crescente em linhas de transmissão e particularmente dirigido à compactação de LT's (line-post), far-se-á uma análise bastante detalhada de suas características eletro-mecânicas no tópico 3.1.1, de modo a se ter uma

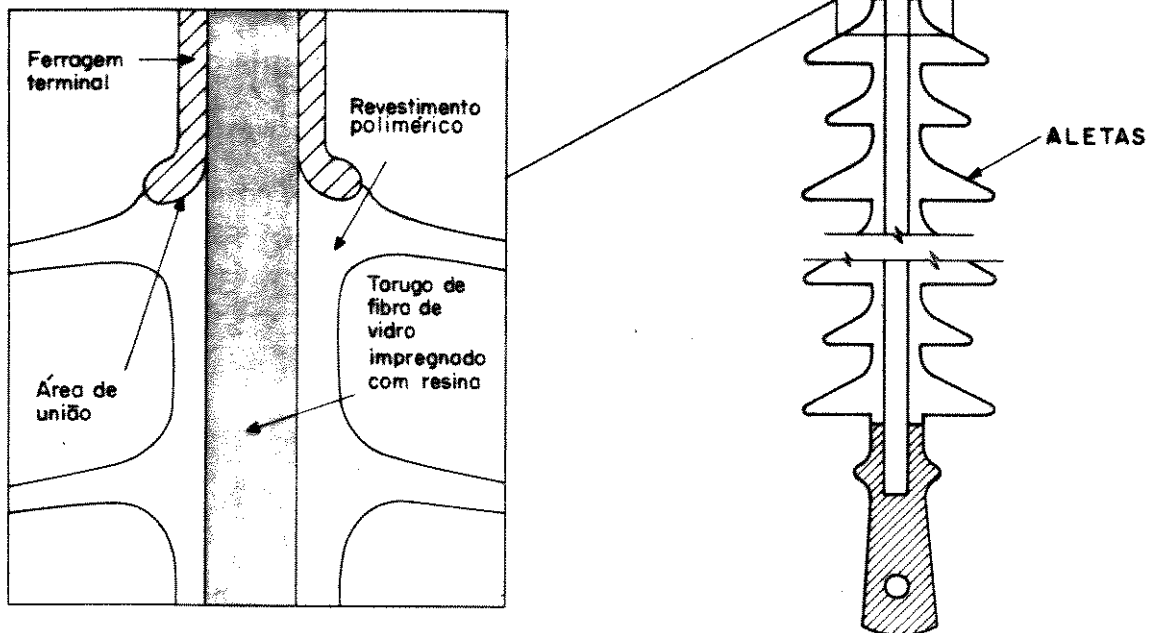


FIGURA 2.1 : CONSTITUIÇÃO DOS ISOLADORES COMPOSTOS

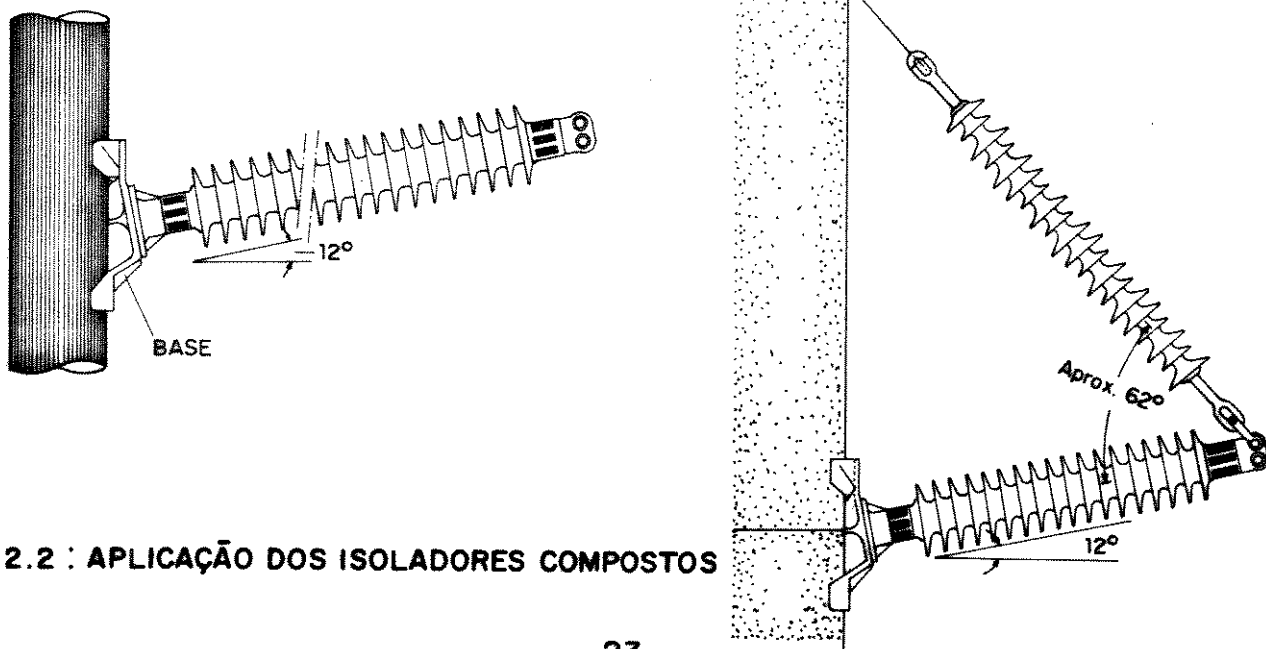


FIGURA 2.2 : APLICAÇÃO DOS ISOLADORES COMPOSTOS

visão abrangente de suas particularidades, bem como uma estimativa confiável do desempenho previsto em serviço.

### 2.1.3 Isolador Convencional

Para as linhas compactas na faixa de HV, pode ser utilizado também o isolador line-post convencional.

O nome "isolador convencional" é dado aqui para diferenciar de isolador composto. Sua concepção também é fundamentalmente distinta dos isoladores de linhas comuns, do tipo concha-pino.

Esses isoladores são moldados numa peça única de cerâmica e, da mesma forma que os isoladores compostos, são fixados diretamente às estruturas tubulares, possibilitando igualmente uma sensível redução da faixa de servidão.

As vantagens e desvantagens desses isoladores e o desempenho comparativo em relação aos isoladores compostos são apresentadas detalhadamente no capítulo 3, tópico 3.1.1.

### 2.1.4 Estrutura Tubular

A estrutura tubular (poste de concreto ou aço), juntamente com os isoladores line-post fornecem a silhueta típica das estruturas compactas para instalação em área urbana. A figura 2.3 mostra uma dessas silhuetas, representando uma linha de 230kV em circuito duplo montada com isoladores compostos [2].

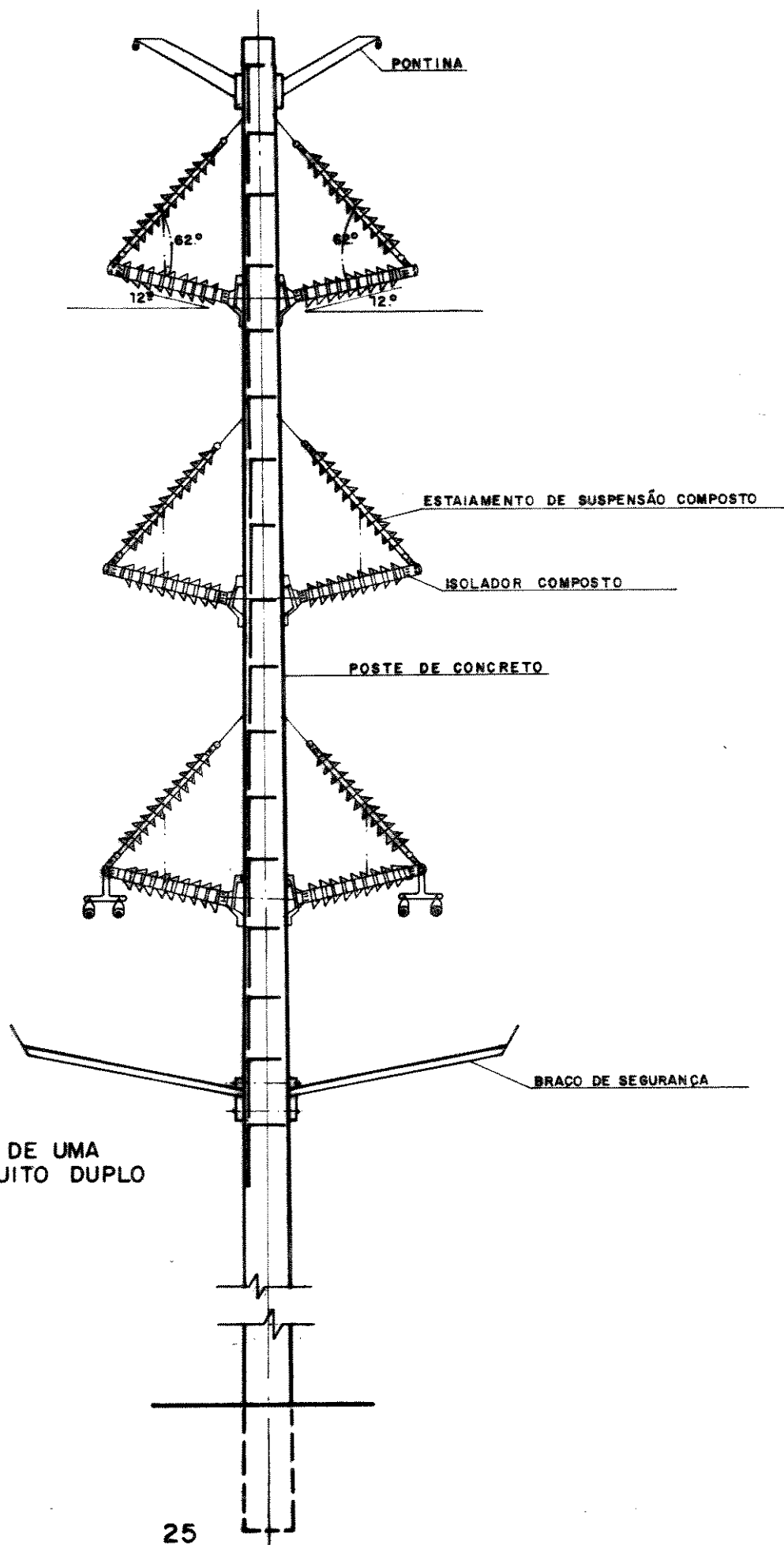


FIGURA 2.3 : SILHUETA TÍPICA DE UMA  
LTC 230 kV CIRCUITO DUPLO



## 2.2 FINALIDADES

### 2.2.1 Instalação em Área Urbana

As linhas de transmissão convencionais, nas classes superiores a 69kV, encontram dificuldades crescentes de implantação à medida que o traçado se aproxima de áreas mais densamente povoadas, atingindo a máxima amplitude dentro da zona urbana de uma cidade de grande porte.

As principais dificuldades são:

a) condensação crescente de obstáculos a serem transpostos ou que se aproximam do eixo da LT: edificações, linhas de distribuição e de telecomunicação, rodovias, vias férreas, aeródromos, etc.

b) necessidade de verificação e adequação dos níveis de interferências gerados.

c) maior quantidade de embargos e disputas judiciais em razão do aumento do número de pequenas propriedades.

d) rejeição crescente ao convívio com a LT, sendo evocados freqüentemente os aspectos estéticos e de interação/agressão ao meio ambiente.

Cidades de pequeno porte (até 50.000 habitantes) geralmente são alimentadas por uma única subestação, localizada na periferia. Dessa subestação partem radialmente os diversos circuitos de distribuição em 13,8kV ou 3,8kV (figura 2.4).

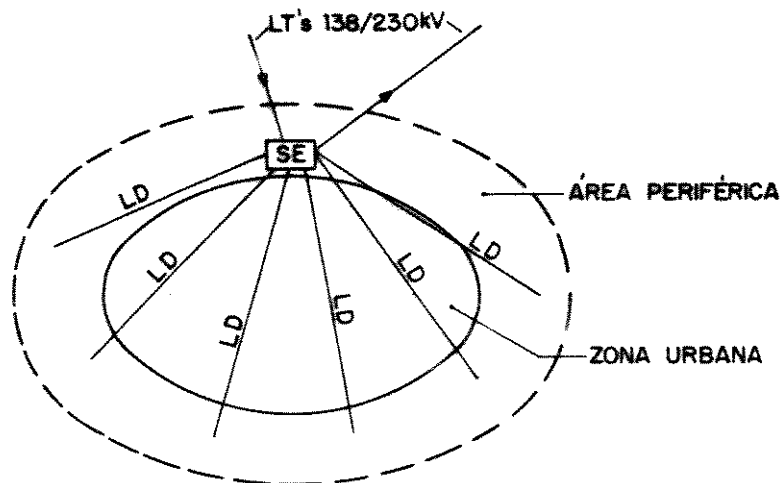


FIGURA 2.4

A medida que as cidades crescem, torna-se necessário alimentá-las através de outras subestações. Cidades de médio porte (de 50.000 a 300.000 habitantes) apresentam geralmente as configurações de alimentação apresentadas nas figuras 2.5 e 2.6.

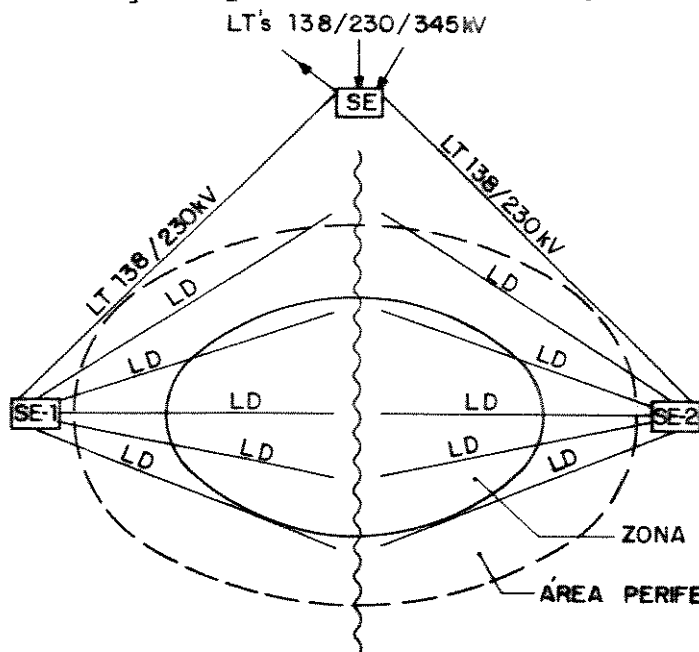


FIGURA 2.5

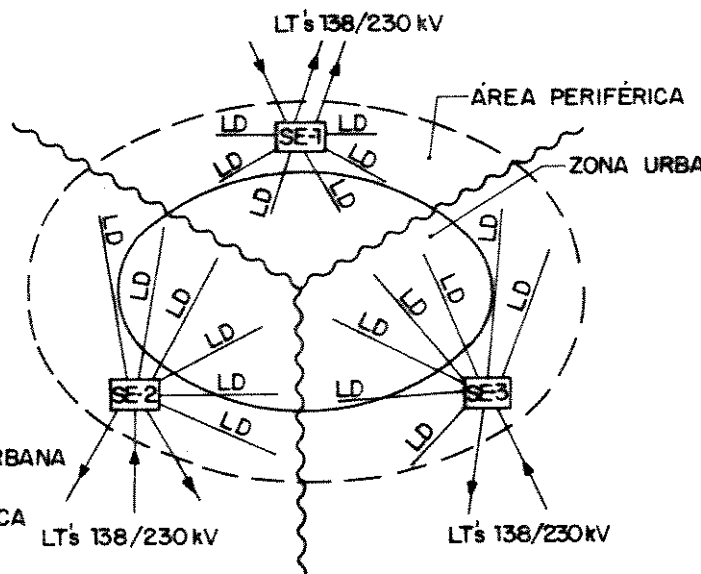


FIGURA 2.6

Para cidades de grande porte (acima de 300.000 habitantes) é praticamente inevitável a implantação de linhas de transmissão através de zonas mais densamente povoadas, não só em razão

do aumento da extensão física da área habitada mas, sobretudo, devido à necessidade de se levar blocos de energia a concentrações de consumo localizadas, como bairros populosos e bairros industriais.

Continuando a crescer, a cidade apresentará dificuldades cada vez maiores para implantação das linhas de transmissão, as quais, justamente devido a esse crescimento, tornam-se igualmente cada vez mais imprescindíveis.

A pior situação é verificada nas grandes capitais. Nelas, as linhas de transmissão já implantadas são literalmente engolidas por construções edificadas nos limites das faixas de servidão, sejam elas edifícios, avenidas, viadutos ou favelas. Em alguns lugares da cidade de São Paulo, por exemplo, as janelas dos apartamentos estão na mesma altura de cabos de LT's de 88kV, e distanciadas de poucos metros.

A manutenção das linhas também é dificultada, podendo acarretar inclusive obstruções de vias de circulação de carros e pedestres.

Essas dificuldades podem ser eliminadas, ou consideravelmente minimizadas, com a compactação da linha de transmissão dentro do trecho urbano (figura 2.7).

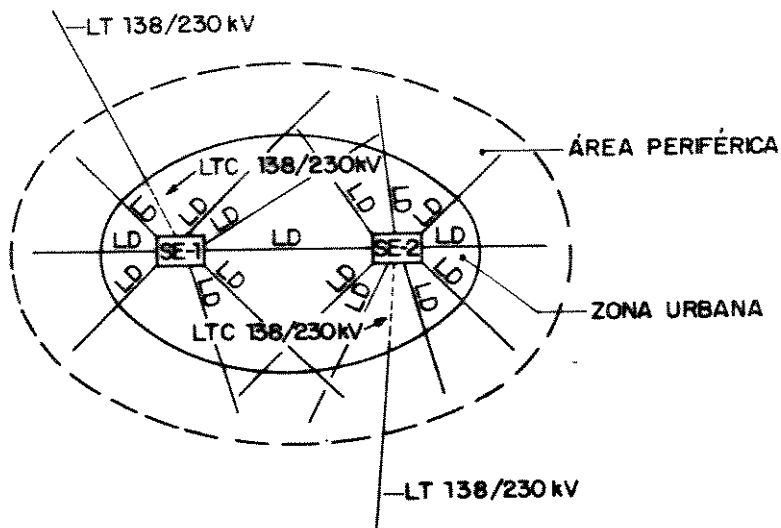


FIGURA 2.7

O grau de compactação, por sua vez, também é uma característica dinâmica, podendo aumentar ou diminuir de acordo com as necessidades ou possibilidades.

### 2.2.2 Modificação da Classe de Tensão da LT

Pode-se também, sob determinadas condições, compactar (re-isolar) uma linha de transmissão convencional já existente, obtendo-se assim uma classe de tensão superior à original.

Isso permite elevar a potência transmitida sem os problemas decorrentes do aumento da faixa de servidão.

A re-isolação pura e simples de linhas convencionais leva fatalmente a um aumento da largura da faixa de servidão, pois o acréscimo do número de isoladores impõe a necessidade de um redimensionamento das mísulas de sustentação dos cabos.

A re-isolação através da compactação, ao contrário, é obtida pela alteração da configuração das estruturas e do modo de isolamento, de modo que a faixa de servidão previamente existente permanece inalterada nas novas condições.

### 2.2.3 Incremento da Potência Característica da LT

A indutância média por fase e a capacitância da fase para o neutro de uma linha trifásica são dadas por [24]:

$$L = 0,7411 \log(D_{eq}/D_s) \text{ [mH/milha]} \quad (2.1)$$

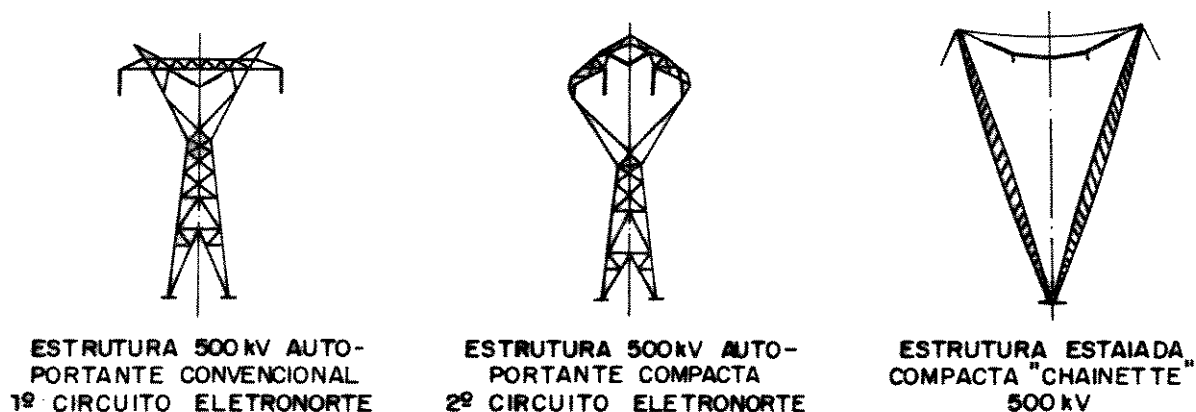
$$C = 0,0388/\log(D_{eq}/D_s) \text{ [\mu F/milha]} \quad (2.2)$$

onde,  $Deq$  = distância média geométrica entre condutores

e  $Ds$  = distância média geométrica própria do condutor

Com a aproximação das fases na compactação, a distância média geométrica entre os condutores é menor, acarretando uma diminuição da indutância e um aumento da capacitância. Isso faz reduzir a impedância de surto da linha, permitindo um aumento da sua capacidade natural de transporte de potência (SIL). Para grandes sistemas de transmissão esse acréscimo pode ser bastante significativo em valores absolutos, assim como a conseqüente economia gerada em potência reativa dos sistemas de compensação.

As estruturas compactas tipo "raquete" do 2º circuito do Sistema de 500kV da ELETRONORTE, por exemplo, (figura 2.8-centro) oferecem uma potência característica de 1330MW, contra 1120MW oferecidos pelas estruturas convencionais auto-portantes do 1º circuito [26]; um acréscimo de 18,75%. Estudos demonstraram também [25] que as estruturas estaiadas tipo "chainette" (que não foram implementadas no 2º circuito) também permitiriam um ganho substancial na potência característica da LTC. Para quatro sub-condutores de



**FIGURA 2.8**

954Kcmil, a estrutura chainette determinou uma potência de 1294MW, contra os 1120MW para a estrutura convencional auto-portante (acrécimo de 15,5%). Com quatro subcondutores de 1113Kcmil, a estrutura chainette determinou uma potência de 1293MW, contra 1125MW para a estrutura convencional auto-portante (acrécimo de 15%).

Para as LTC's em áreas urbanas também ocorre um acréscimo da potência característica que, no entanto, não é tão significativo em termos absolutos. A figura 2.9 mostra a variação da potência característica de uma LTC de 138kV em relação à distância entre fases [9].

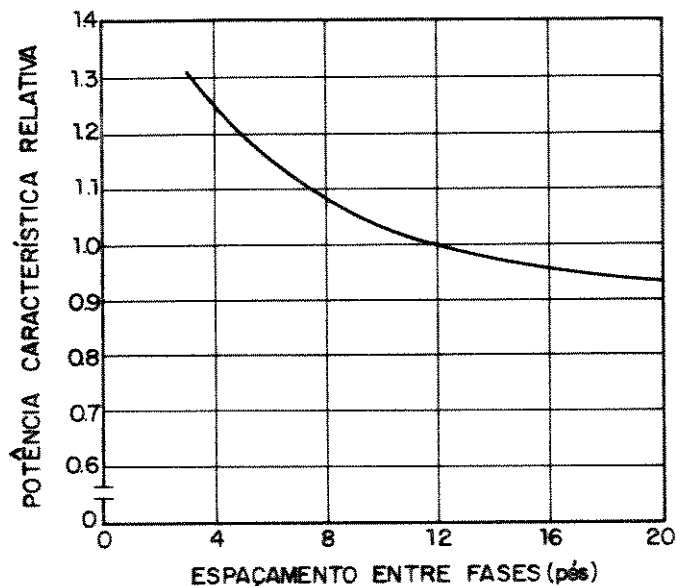


FIGURA 2.9

Nota-se que para uma compactação de 33% (distância fase-fase de 8 pés), o acréscimo na potência característica é de cerca de 8%. Com 50% de compactação (distância fase-fase de 6 pés) esse acréscimo chega a 15%.

Alexandrov [46] desenvolveu uma expressão que fornece a potência característica diretamente como função da distância entre fases e do número de subcondutores:

$$SIL = 6\pi \cdot U_f^2 / [v \cdot \mu_0 \cdot \ln(D_{eq} / \sqrt{n \cdot r_o \cdot r_b^{n-1}})] \quad (2.3)$$

onde,  $v$  = velocidade de propagação da onda

$n$  = número de subcondutores

$r_o$  = raio do subcondutor

$r_b$  = raio do feixe de subcondutores

$U_f$  = Tensão fase-terra

$\mu_0$  = permeabilidade do vácuo =  $4\pi \times 10^{-7}$  H/m

Essa expressão mostra que o SIL é inversamente proporcional à distância equivalente entre condutores (ou entre feixes de subcondutores) e diretamente proporcional ao número de subcondutores. Em sistemas de grande porte pode-se manipular esses parâmetros de modo a se ter um determinado valor de SIL.

#### 2.2.4 Minimização de Interferência Física

A compactação pode ser uma boa solução nos casos de interferências físicas ocasionadas pelas linhas de transmissão.

Uma situação bastante comum é a da "perfuração" dos gabaritos de aeródromos. Os aeródromos possuem várias zonas de proteção que tornam-se mais restritivas à medida que se aproximam da pista de pouso. As figuras 2.10 e 2.11 ilustram as zonas mais externas de proteção dos aeródromos com sistema de vôo visual (VFR) e por instrumentos (IFR) [3].

Enquanto que para os aeródromos classe VFR são permitidas construções com até 145m de elevação em relação à pista, numa área que se estende a 13km das cabeceiras da pista, os aeródromos classe IFR

PLANO BÁSICO DE ZONA DE PROTEÇÃO DE AERÓDROMO  
CLASSE VFR

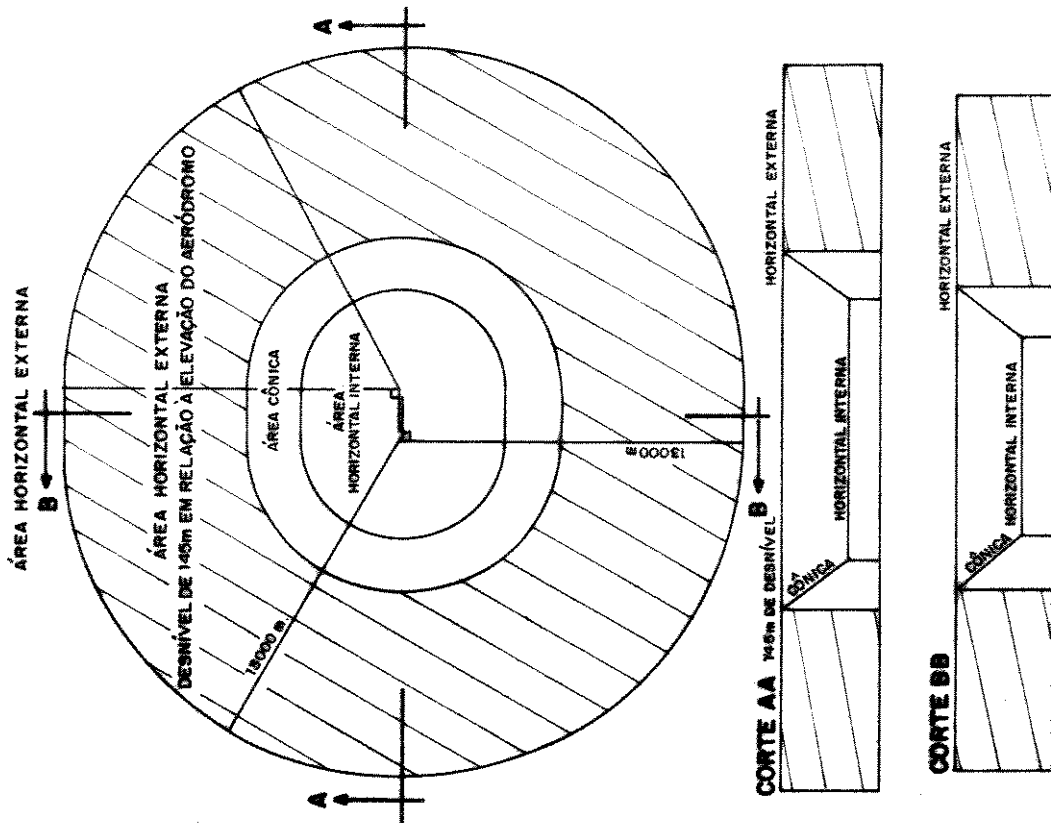


FIGURA 2.10

PLANO BÁSICO DE ZONA DE PROTEÇÃO DE AERÓDROMO  
CLASSES IFR - NÃO - PRECISÃO E IFR - PRECISÃO

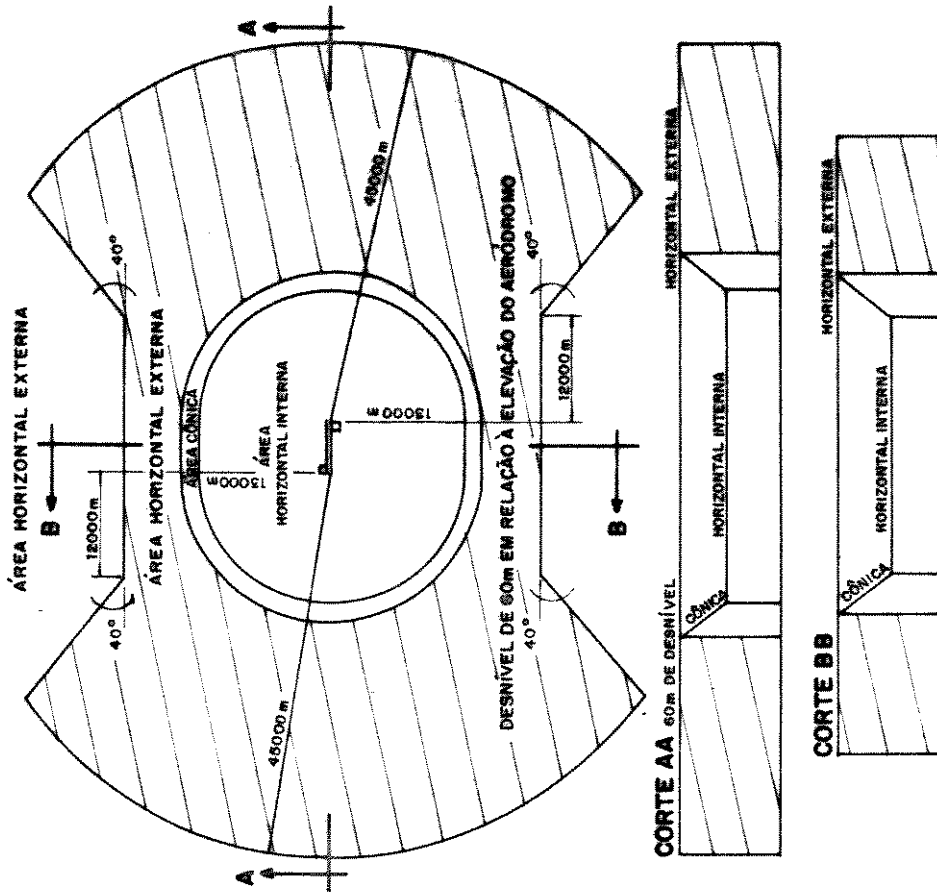


FIGURA 2.11



são muito mais restritivos, e limitam as edificações a até 45km das cabeceiras da pista, com desnível máximo permitido de 60m.

Os aeródromos classe IFR são chamados de aeroportos e situam-se justamente na periferia das grandes cidades. É fácil ver que qualquer linha que se aproxime da cidade terá uma grande possibilidade de entrar na área de proteção horizontal externa desses aeroportos e, dependendo da altimetria da região, "furar" esse plano de proteção.

As alternativas convencionais para se resolver o problema constituem-se geralmente de variantes que oneram em muito o custo da LT, não só pela maior extensão do traçado, mas também porque se busca nessas variantes os pontos mais baixos do relevo, portanto, o inverso de uma plotação ideal, o que acarreta maior quantidade de vãos com menores distâncias, gerando, por conseguinte, um maior número de estruturas.

Quando, mesmo assim, não se consegue solucionar o problema, é preciso então entrar com um pedido de autorização de passagem junto ao Comando Aéreo Regional local (COMAR), que após um considerável período de tramitação dará um dos seguintes pareceres: "favorável", "favorável com restrições" ou "desfavorável".

Uma linha de transmissão compacta com estruturas semelhantes à apresentada na figura 2.3 pode se constituir numa solução mais interessante, tanto do ponto de vista econômico como estético.

Uma outra interferência típica nas proximidades das grandes cidades é a que ocorre em sistemas de telecomunicação, principalmente nas faixas de UHF e SHF.

Quando uma estrutura penetra na zona de FRESNEL [4] desses sistemas irradiantes, provoca interferências e perdas. A utilidade das linhas compactas nessa situação é dupla: diminuem ou mesmo eliminam a interferência pela sua menor altura, enquanto que as estruturas tubulares, contrariamente às treliçadas, não causam tantas reflexões, contribuindo também para reduzir as perdas que ocorrem dessa forma.

#### 2.2.5 Minimização da Agressão ao Meio Ambiente

Uma linha de transmissão de qualquer faixa de tensão tem incorporada a si uma "faixa de servidão". Esta faixa, que não significa uma área desapropriada, mas um direito de passagem aérea da Concessionária, impõe algumas restrições à utilização do solo. A vegetação nativa precisa ser cortada até o "clearance" mínimo especificado, que é uma distância fase-terra calculada para condições muito desfavoráveis. Caso se trate de uma área agricultável, fica proibida ao proprietário a utilização de tratores (para não danificar os fios contrapesos das estruturas) e o uso de culturas que fazem uso de queimadas, como a cana-de-açúcar.

A pior situação, do ponto de vista da agressão ao meio ambiente, ocorre quando a linha precisa atravessar uma zona de mata. Nesse caso, as árvores precisam ser cortadas ou erradicadas de modo a se ter o clearance mínimo especificado. A agressão à Natureza porém, geralmente não se restringe a esse desmatamento inicial, pois há a necessidade de vistorias e cortes constantes para se assegurar a manutenção daquela distância fase-terra. A título de ilustração

menção-se na tabela 2.1 as larguras usuais das faixas de servidão utilizadas por algumas Concessionárias no Brasil [6] [7].

Uma LT de 230kV que atravessasse uma mata numa extensão de 2 km acarretará cortes de árvores numa área de 76.000 m<sup>2</sup>.

Já uma linha com estruturas compactas como a mostrada na figura 2.3, apresenta, dependendo do tipo de cabo e das condições de implantação, faixas de servidão variando de 11,2 m (cabo CANARY) a 14,2 m (cabo HAWK) [2]. No caso mais desfavorável, com uma faixa de 14,2 m atravessando os mesmos 2 km da linha anterior, essa linha exigirá cortes de árvores numa área de 28.400 m<sup>2</sup>, o que corresponde a 37% da área requerida pela linha convencional.

**TABELA 2.1**

CONCESSIONÁRIA	CLASSE (kV)	TIPO	LARGURA FAIXA (m)
CEMIG	69/138	madeira auto-portante	16
CEMIG	69/138	metálica auto-portante	23
CEMIG	230	metálica auto-portante	38
CEMIG	345	metálica auto-portante	50
CEMIG/FURNAS	500	metálica auto-portante	60
FURNAS	750	metálica estaiada	106,5
* FURNAS	750	metálica estaiada	182

\* 2 linhas paralelas

Contudo, ainda outros cuidados devem ser tomados quando uma linha compacta atravessa uma área de fauna silvestre. A figura 2.12 apresenta a silhueta de uma LTC de 138kV, com espaçamento entre fases de 91cm. Com essa ordem de distância entre fases, torna-se necessário estudar maneiras para impedir que um pássaro ou animal trepador seja eletrocutado, causando, além do mais, um curto fase-fase ou uma falta para a terra. Isto pode ocorrer principalmente quando da entrada da linha em operação ou numa reenergização.

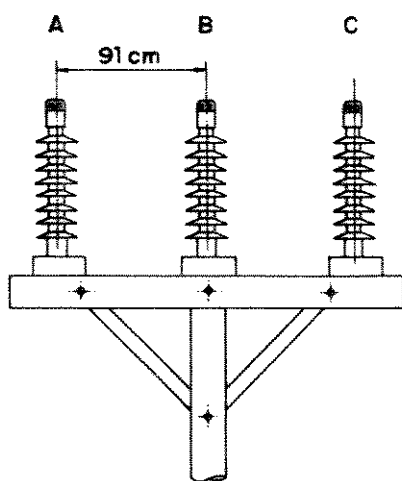


FIGURA 2.12

Para a situação de condutor energizado, um pássaro que se aproxima é um objeto isolado e não aterrado movendo-se em direção a um campo elétrico de intensidade crescente. Esse campo causa uma corrente através do pássaro, e se esta excede um determinado valor de percepção, o pássaro se assustará e se afastará, o que é um efeito desejável.

Da mesma forma, um animal que sobe pela estrutura ficará exposto a um campo similar ao daquele experimentado pelo pássaro. Se tentar subir num dos isoladores de apoio, ficará exposto a um campo

substancialmente mais forte. Esse campo causará igualmente uma corrente em 60 Hz pelo corpo do animal e, da mesma forma que com o pássaro, poderá ser suficiente para fazê-lo descer.

Alguns estudos [9] indicam que pássaros de pequeno e médio porte sempre pousam em condutores com gradientes inferiores a 2kV/cm situados a 15cm de distância entre si. Os pousos vão rareando à medida que cresce a intensidade do campo, cessando por completo quando esse valor atinge 23kV/cm. Observou-se assim a ocorrência de pousos em linhas de 33kV (com gradiente de 5,7kV/cm) e 69kV (com gradiente de 11,5kV/cm), mas não em linhas de 138kV.

No que se refere a efeitos de campo elétrico e magnético sobre organismos vivos, os estudos disponíveis até o momento não constatarem nenhum dano causado por exposição de curta duração sob linhas de transmissão convencionais de alta e extra-alta tensão [8]. Alguns efeitos como eriçamento de pelos e faiscamento na pele podem ocorrer sob campos intensos, maiores que 10kV/m, porém sem nenhum dano permanente. Para as linhas de transmissão compactas, por sua vez, os efeitos são ainda menos significativos. A redução do espaçamento de fases reduz o gradiente do campo elétrico remoto dos condutores, pelo maior cancelamento de cargas das três fases. A figura 2.13 ilustra essa situação, mostrando a variação do campo para uma linha de 138kV com espaçamento entre fases de 3m (convencional) e uma outra, também de 138kV, com espaçamento entre fases de 90cm (compacta). No primeiro caso, o gradiente máximo ao nível do solo é de 0,74kV/m, no segundo, atinge apenas 0,28kV/m.

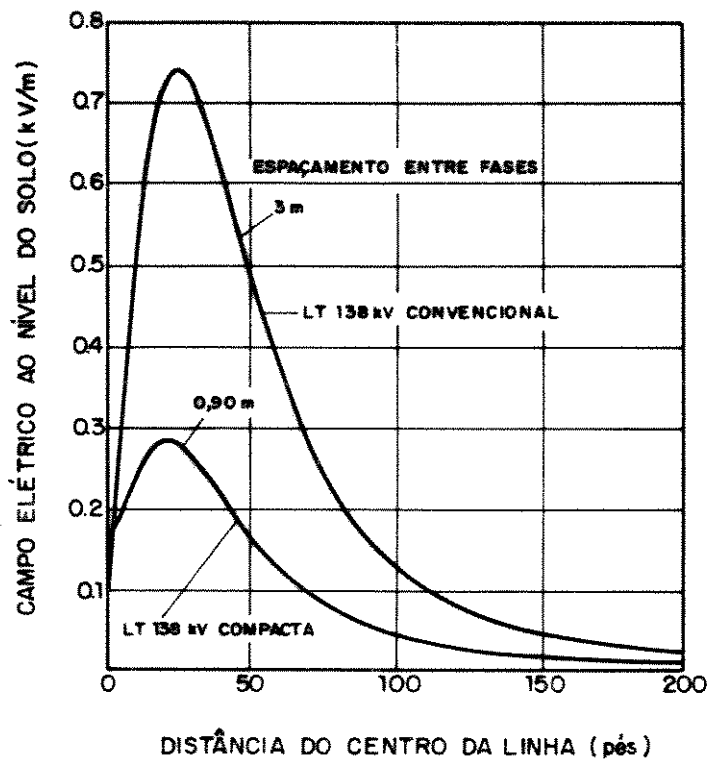


FIGURA 2.13

### 2.2.6 Redução de Impacto Visual

O problema do impacto visual de uma linha de transmissão é tanto mais relevante quanto mais densamente povoada for a região atravessada.

Existem casos documentados em que os proprietários não manifestaram objeções à passagem de uma LT de 500kV em suas terras, desde que não precisassem vê-la.

A redução do impacto visual não é normalmente um objetivo da compactação de linhas, mas uma consequência. Em áreas urbanas é uma característica própria da compactação. Uma LTC com uma configuração semelhante à mostrada na figura 2.12 assemelha-se muito mais a uma

linha de distribuição de 13,8kV, cujo aspecto é familiar à população urbana.

No Canadá, a preocupação com o impacto visual é grande, e os estudos compreendem até a exposição de slides superpostos de estruturas em locais determinados, a fim de se escolher a que mais se adapte sob o ponto de vista do padrão estético.

No Brasil, uma experiência mal sucedida levada a efeito pela ELETROPAULO demonstrou a grande importância desse assunto para LTC's em área urbana. Essa Concessionária projetou uma linha compacta mista de 138kV e 345kV com uma faixa de servidão da ordem de 20m. A assimetria física da linha, porém, realçada pelo maior isolamento requerido pelo circuito de 345kV, acarretou um impacto visual tão negativo na população que sua implantação foi suspensa.

## **2.3 DESENVOLVIMENTO**

### **2.3.1 Histórico**

Desde o início da industrialização de equipamentos elétricos de potência, a pesquisa na área de transmissão de energia sempre esteve voltada para o incremento dos níveis de tensão.

Em 1950 a American Electric Power Company e a Westinghouse Electric Company desenvolveram um projeto conjunto visando a determinação de parâmetros para a classe de tensão de 345kV. A partir daí foram sempre desenvolvidos projetos em antecipação à implantação de sistemas com níveis mais elevados de tensão, como os de 500kV e 765kV.

Essa concentração de pesquisas em altas tensões tem uma justificativa. Cada um desses novos programas de desenvolvimento iniciou-se com o reconhecimento da necessidade de novos e mais elevados níveis de tensão para os sistemas de transmissão.

A implantação desses sistemas em níveis de tensão de UHV e EHV, serviu-se dos estudos desenvolvidos até então como uma fonte de informações.

Contudo, a tecnologia desenvolvida para esses níveis de tensão não foi direcionada nem adaptada aos níveis precedentes de 138kV e 230kV. Assim, essas classes de tensão permaneceram praticamente estagnadas nos últimos 30 anos, em relação aos avanços tecnológicos obtidos nos níveis de tensão mais elevados.

Para tornar as linhas em EHV economicamente viáveis, foram desenvolvidas análises sofisticadas do nível de isolamento e do clearance. O clearance foi assim sendo mais e mais reduzido, aproximando-se dos limites de flashover.

A figura 2.14 mostra como, em termos relativos, as linhas

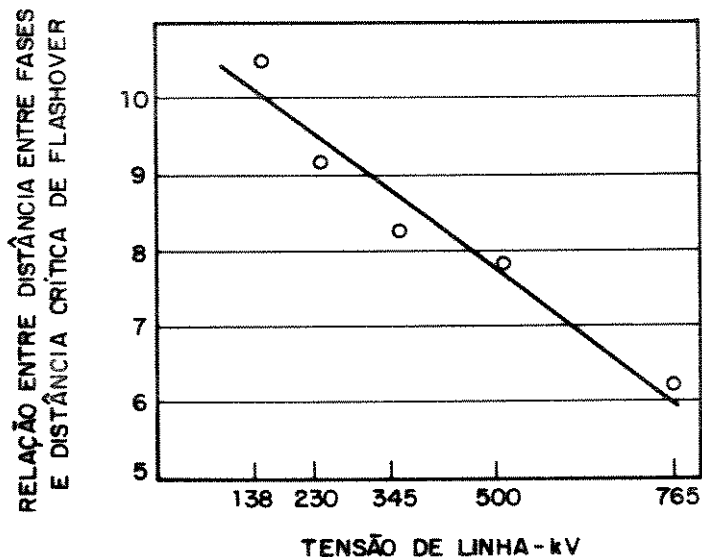


FIGURA 2.14



de alta e altíssima tensão estavam em relação à otimização dos clearances [9].

A redução do clearance, por sua vez, fez aumentar o problema do gradiente nos condutores, o que levou a uma intensificação dos estudos nessa área e, conseqüentemente, também em relação ao fenômeno de corona e dos métodos para se controlá-lo. Surgiu assim o feixe de condutores múltiplos por fase, com 2, 3 e até 4 subcondutores.

Novamente, enquanto a atenção estava dirigida ao desenvolvimento em EHV, os sistemas em 138kV e 230kV praticamente não assistiam a grandes alterações ou inovações conceituais.

A partir da década de 70, porém, iniciaram-se os estudos para utilização dos isoladores compostos em sistemas de média tensão. Em 1973, a Electric Power Technologies construiu uma linha experimental de 138kV utilizando isoladores compostos com distância entre fases de 91cm. O programa concentrou-se inicialmente nos estudos de movimento de cabos e, em 1974, chegou-se à conclusão que quanto a esse aspecto a linha compacta era exeqüível [9].

Estudou-se posteriormente o desempenho em relação a surtos de manobra e atmosféricos, bem como níveis de R.I., T.V.I. e ruído audível.

As dificuldades para implantação de uma LTC podem ser adequadamente equacionadas e os problemas quase sempre resolvidos para um determinado grau de compactação. Existem, porém, algumas dificuldades não inteiramente suplantadas, como a falta ainda de uma normalização para fabricação, teste e avaliação dos isoladores compostos e a necessidade da "adequação à normalização existente",

cujos aspectos são discutidos em profundidade no item 4.2.6 deste trabalho.

Esse último ponto, aliás, depende em grande medida da flexibilidade e bom senso da Concessionária responsável pela implantação da linha, a qual é, em última instância, quem aprova as modificações técnicas introduzidas.

De qualquer forma, pode-se afirmar que a compactação já demonstrou, na prática, ser não apenas viável mas também, em certos casos, a única solução plausível.

### 2.3.2 O Estado da Arte

Os estudos de compactação de LT desenvolveram-se primeiramente ao nível de sistemas de HV, visando atingir essencialmente a finalidade mencionada em 2.2.2.

Contudo, com a constatação das vantagens em se transmitir potência através de níveis de tensão cada vez mais elevados, as linhas de transmissão em UHV também passaram a ser estudadas sob o enfoque da compactação, visando-se reduzir a largura das faixas de servidão, sempre crescentes.

As mais recentes concepções em transmissão de potência em UHV estabelecem que as linhas devem apresentar uma dupla faixa de servidão. A primeira, correspondendo aos aspectos físicos da LT, e a segunda, levando em conta os níveis de interferências admissíveis, cujos limites estabelecem o chamado "corredor de passagem", no qual são estabelecidas limitações para edificações [10].

A figura 2.15 mostra a largura necessária do corredor de transmissão para vários espaçamentos entre fases e classes de tensão de modo a se ter, no limite da faixa, 0,5kV/m (barra superior) ou 2kV/m (barra inferior).

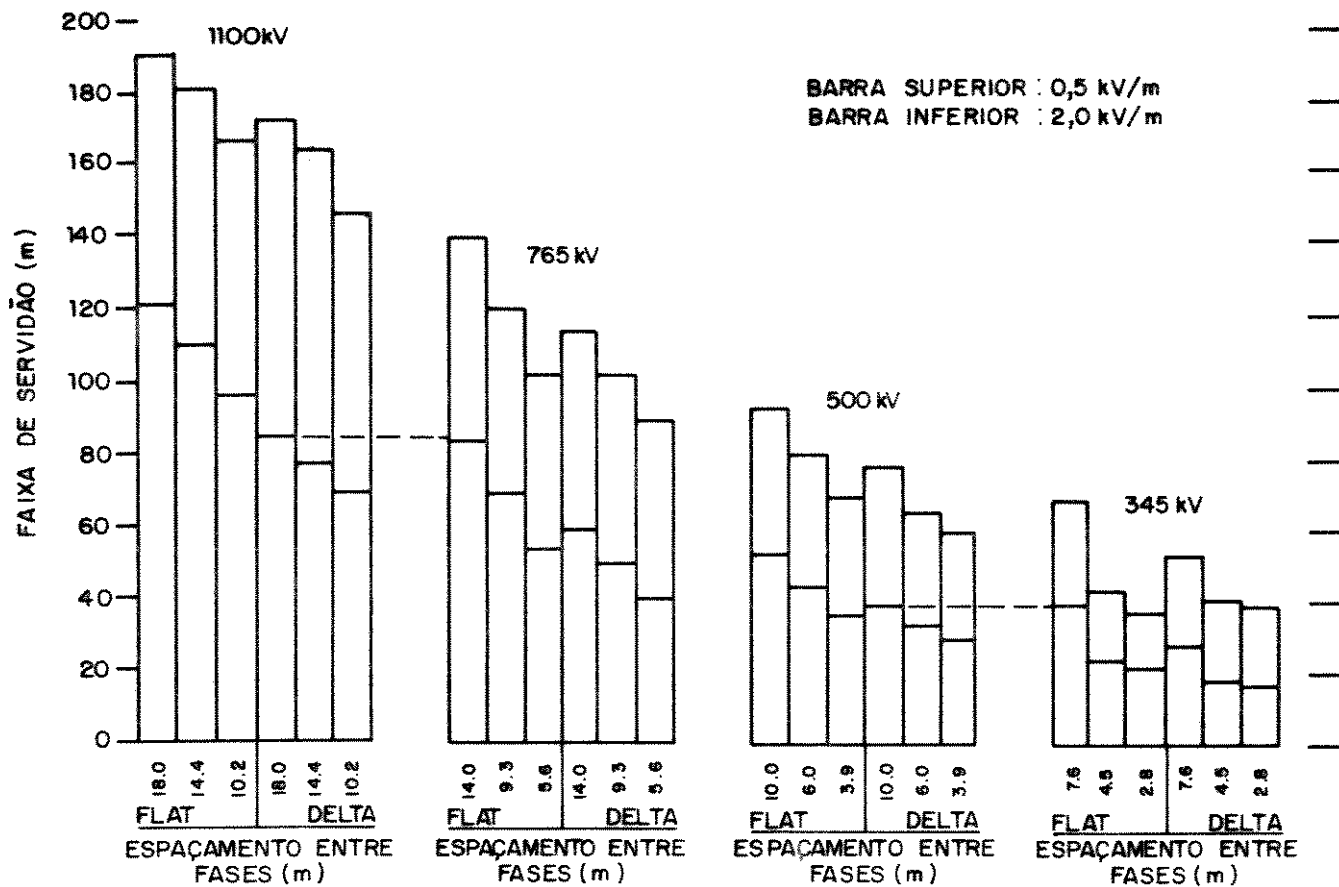


FIGURA 2.15

Vê-se que, para o nível estipulado de 2kV/m, uma LT de 1.100kV com uma compactação moderada em estruturas tipo "delta" (18m de distância fase-fase), demandaria o mesmo corredor de transmissão de uma LT de 765kV convencional em estrutura "flat" (14m de distância fase-fase). O mesmo efeito pode ser constatado em relação às linhas de 500kV e 345kV.

O conceito de compactação de linhas nas faixas de UHV e EHV, está direcionado ao desenvolvimento de estruturas caracterizadas

pela inexistência de partes metálicas entre as fases, o que possibilita uma menor distância entre elas. Além da natural redução da faixa de servidão, a melhoria dos parâmetros elétricos devido à maior proximidade entre as fases (menor indutância e maior capacitância) proporcionam, como visto, um acréscimo sensível na potência característica da linha, propiciando uma redução de custos decorrente da menor necessidade de compensação capacitiva.

A filosofia de compactação está sendo considerada inclusive para o projeto de futuras linhas de 1.100kV. Uma das sugestões atualmente em estudos é a da passagem da fase central "embuchada" pelo centro da estrutura [10]. A figura 2.16 ilustra essa configuração.

Na Itália, a empresa ENEL vem desenvolvendo estudos sobre uma linha de transmissão em UHV onde as estruturas, semelhantes a mastros treliçados, têm sua estabilidade ditada pelos próprios cabos condutores e pára-raios. Esse tipo de linha, batizado de bidimensional, apresenta uma extraordinária esbeltez, reduzindo ao máximo o impacto visual, já que dispensa inclusive o uso de estais. Sua principal dificuldade resulta na assimetria de balanço dos condutores sob efeito de rajadas de vento. Têm-se procurado solucionar esse problema utilizando-se espaçadores fase-fase [13].

No campo das linhas compactas em áreas urbanas, os avanços têm-se multiplicado nos últimos anos. A COPEL - Companhia Paranaense de Energia instalou um cabo auxiliar sobre o braço de segurança de suas linhas compactas em área urbana [11],[12].

## FASE CENTRAL EMBUCHADA

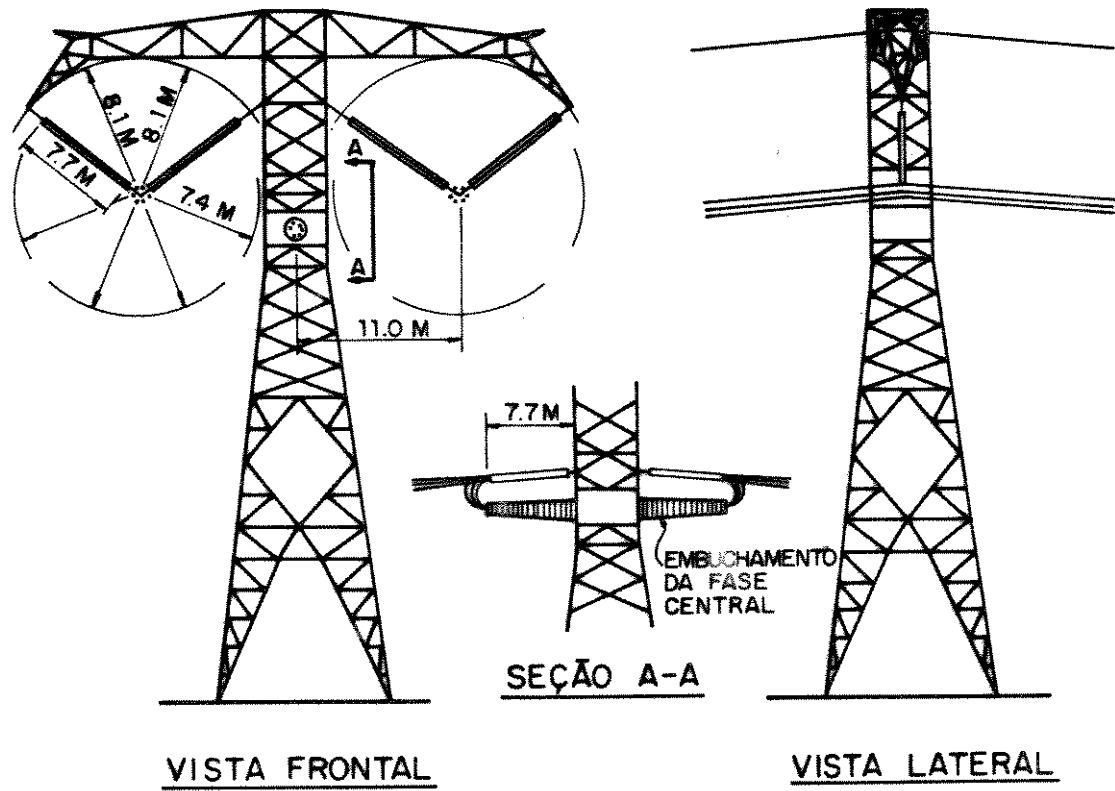


FIGURA 2.16 : LT 1.100 kV : FASE CENTRAL EMBUCHADA

Esse cabo auxiliar desempenha 3 funções distintas:

a) Aterramento

O valor da resistência de aterramento dos postes nos arruamentos é quase sempre insatisfatório, dada a dificuldade de se instalar fios contrapesos (vide ítem 3.2.2 - *LIMITAÇÕES EXTRÍNSECAS - Aterramento*). Uma solução natural para se reduzir os potenciais de passo e de toque no poste, quando da ocorrência de uma falta para a terra, seria conectar eletricamente os pontos entre si e com as malhas de terra das subestações. Essa conexão é obtida com a utilização do cabo auxiliar. O cabo pára-raios, que poderia fazer esse papel, foi eliminado, visando-se dar à LTC uma aparência a mais próxima possível de uma linha de distribuição.

b) Travessias

Geralmente as subestações de distribuição urbanas são alimentadas através de duas ou mais linhas de transmissão. Assim, quando da falha de uma delas as outras ficam imediatamente sujeitas a uma sobrecarga. Essa sobrecarga se traduz num aumento de corrente e, conseqüentemente, numa elevação da temperatura dos cabos. Esse acréscimo de temperatura, por sua vez, pode acarretar um acentuado rebaixamento dos cabos por dilatação térmica.

Considerando-se que as LTC's atravessam inúmeros obstáculos numa zona urbana, como linhas de distribuição, de telecomunicação, fios trolley, etc., esse rebaixamento dos cabos pode ser tal que reduza a níveis perigosos o clearance entre a LTC e esses obstáculos, podendo resultar daí um curto-circuito com conseqüências extremamente graves. Essa possibilidade é ainda mais factível quando esses obstáculos cruzam a LTC após a sua entrada em operação. Os

órgãos responsáveis podem não avaliar corretamente as distâncias de segurança, colocando aqueles cabos numa altura em que podem ser atingidos pelos condutores energizados da LTC funcionando em regime de emergência. O cabo auxiliar impede a ocorrência dessa situação, além de garantir o desligamento da LTC por curto-circuito no caso da sobrecarga ultrapassar os níveis previstos.

#### c) Segurança

O cabo auxiliar dificulta o contato dos fios das "pipas" e "papagaios" com os cabos condutores energizados. De qualquer forma, as zonas urbanas não são, via de regra, adequadas a essa prática e, no caso de lugares mais descampados como os parques, a LTC deve ser posicionada adequadamente, de forma a ficar afastada dos lugares em que as "pipas" são empinadas.

Contrariamente às LT's, cujas dificuldades de implantação são praticamente invariáveis, as LTC's em áreas urbanas podem se defrontar com dificuldades específicas, que demandam também soluções originais e pontuais, como é o caso mencionado acima.

Faz parte desse contexto ainda as seguintes sugestões, em parte já implantadas em campo:

##### . cabos isolados

O uso de cabos isolados em pequenos trechos pode ser uma boa solução para se evitar a fuga de corrente por contatos esporádicos com galhos de árvores.

##### . cabos expandidos

Os cabos expandidos também podem ser utilizados em determinado trecho onde o nível de interferência máximo admissível esteja acima de um valor estipulado para a LTC.

- . cabos de maior massa (maior relação kg/m)

Esses cabos, com maior relação de massa entre a alma de aço e o alumínio, são utilizados para se vencer grandes vãos e/ou limitar o balanço das fases por efeito de vento.

- . espaçadores entre fases

Os espaçadores permitem um maior grau de compactação pela divisão em "sub-vãos" da LTC, evitando a aproximação das fases por efeito de vento.



## CAPÍTULO 3

### A LINHA DE TRANSMISSÃO COMPACTA: CARACTERIZAÇÃO DAS DIFICULDADES DE IMPLANTAÇÃO

#### 3.1 *LIMITAÇÕES INTRÍNSECAS*

Limitações intrínsecas são aquelas inerentes à compactação de linhas de transmissão, independentemente do local de implantação. O conhecimento abrangente e detalhado dessas dificuldades é condição prévia para um dimensionamento otimizado, a ser desenvolvido no capítulo 4.

##### 3.1.1 Isolador Composto/Isolador Convencional

O isolador composto, conforme descrito no item 2.1.2, é uma peça única, formada de um tarugo de resina impregnada com fibra de vidro e aletas moldadas em material polimérico (figura 3.1).

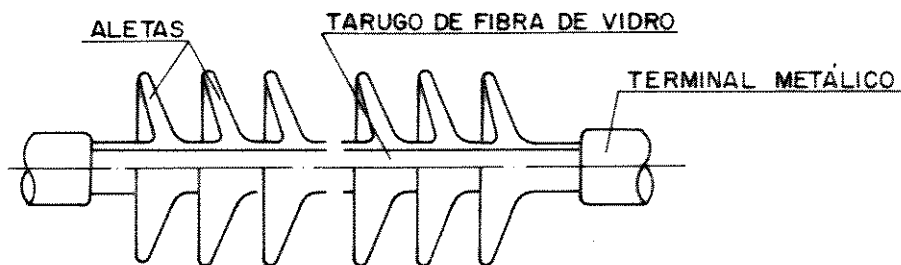


FIGURA 3.1 - ISOLADOR COMPOSTO

O isolador convencional de que se tratará aqui também é uma peça única, moldada em porcelana (figura 3.2). Não se trata, portanto, das cadeias de isoladores cerâmicos ou de vidro do tipo

concha-pino, comumente utilizados em linhas de transmissão (figura 3.3).

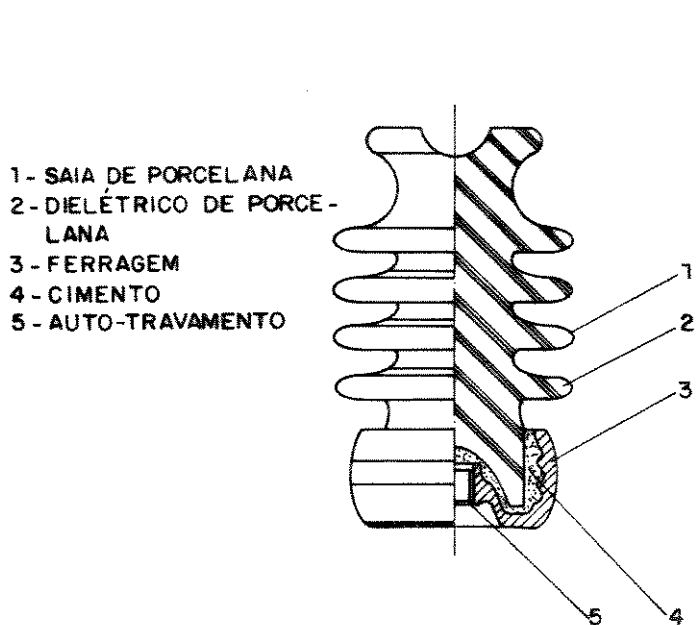


FIGURA 3.2 - ISOLADOR CONVENCIONAL

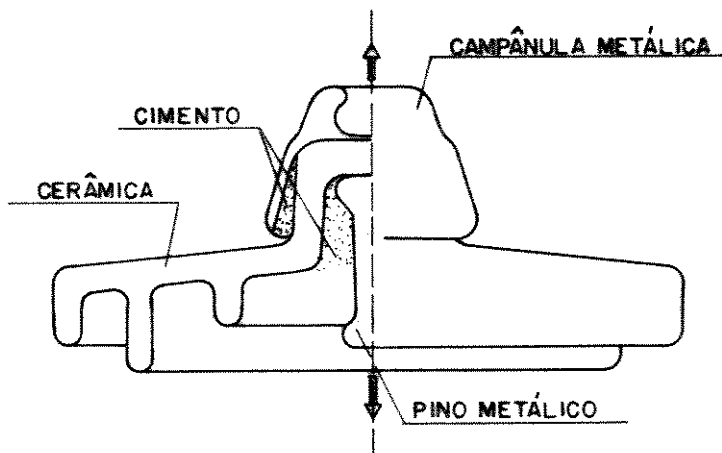


FIGURA 3.3 - ISOLADOR CONCHA-PINO

Procede-se inicialmente uma análise separada de cada isolador quanto às vantagens e desvantagens decorrentes de suas características eletromecânicas. Em seguida, faz-se uma análise comparativa, que servirá de subsídio para a escolha do tipo de isolador nas diversas situações existentes. Essa escolha se constitui numa condição preliminar para o dimensionamento propriamente dito da LTC.

A despeito da ênfase dada às características elétricas, estas estarão estreitamente vinculadas aos aspectos mecânicos mais importantes, de forma a se ter uma visão global do desempenho desses isoladores, com vistas a um dimensionamento o mais otimizado possível da LTC.

## A- ISOLADORES COMPOSTOS

Os isoladores compostos possuem uma alta resistência mecânica aliada a um baixo peso. Um isolador composto com características elétricas equivalentes a uma cadeia de isoladores do tipo concha-pino, apresentará um peso cerca de 10 vezes menor [14]. Essa característica facilita a montagem e diminui os custos de transporte e instalação. A montagem de uma estrutura de emergência será também mais rápida se utilizados isoladores compostos.

Em sistemas de extra-alta e ultra-alta tensão, a carga mecânica de sub-condutores torna complexo o sistema de fixação dos isoladores concha-pino. Em razão da limitação mecânica desses isoladores, torna-se necessário o uso de cadeias em paralelo, o que reduz a resistência dielétrica do conjunto e impõe a necessidade de inclusão de novos discos isolantes. Nesses casos, os isoladores compostos de alta resistência mecânica tornam-se uma alternativa bastante atraente. Em estudos de isolamento de LT's de 1.500kV [22], por exemplo, verificou-se que seriam necessárias 5 cadeias em paralelo com 122 isoladores de vidro cada uma para isolar uma fase. O mesmo efeito isolante poderia ser obtido com um isolador composto de suspensão constituído de 68 aletas.

Além da vantagem do peso, esses isoladores são particularmente indicados em áreas sujeitas a atos de vandalismo por tiro. O material polimérico das aletas sofre uma deformação quando atingido por algum projétil, mantendo todavia inalteradas suas características elétricas, à exceção de uma possível redução do gap entre as aletas, que poderia eventualmente alterar a distância de escoamento. Por outro lado, a inexistência do estilhaçamento típico

observado em cadeias de isoladores de vidro, contribui para desestimular ações desse tipo.

Contrariamente aos isoladores convencionais de porcelana, os isoladores compostos são constituídos de material orgânico, estando assim sujeitos a um envelhecimento gradativo.

As características eletromecânicas desses isoladores deterioram-se pela ação da radiação ultravioleta do sol, do campo elétrico da linha de transmissão e dos esforços mecânicos a que são submetidos. A compreensão detalhada desses fenômenos é, pois, imprescindível para uma correta avaliação da vida útil global da linha.

Mailfert et Alli [15] submeteram vários tipos de isoladores a esforços mecânicos e elétricos concomitantes, visando obter um apanhado geral do desempenho do material orgânico. Suas conclusões indicam que o tarugo de fibra de vidro está sujeito a um efeito de "creep" em decorrência de esforços mecânicos. Internamente isso se traduz por descolamento e fratura das fibras. O campo elétrico, por sua vez, produz sulcos no material orgânico que se espalham como uma árvore de vários ramos ("treeing"). O teste mostrou ainda que a umidade e a temperatura também contribuem para o enfraquecimento das fibras, alterando a resistência dielétrica do material.

O campo elétrico ao longo do isolador varia segundo sua geometria e dimensões. Ao nível de tensão de 230kV, tem sido utilizados anéis anti-corona para reduzir o campo próximo às ferragens de fixação, pois este é o ponto fraco do isolador em termos mecânicos. Pequenas fissuras aí podem permitir a entrada de água que, em contato com o tarugo, acarreta hidrólise, uma reação química que altera suas

características eletromecânicas. A tentativa de reduzir ou equalizar o campo próximo às ferragens do isolador decorre do perfil do gradiente de tensão, que é muito alto na extremidade do isolador junto ao condutor energizado (figura 3.4)[19].

LINHAS EQUIPOTENCIAIS-ISOLADOR COMPOSTO 138 kV

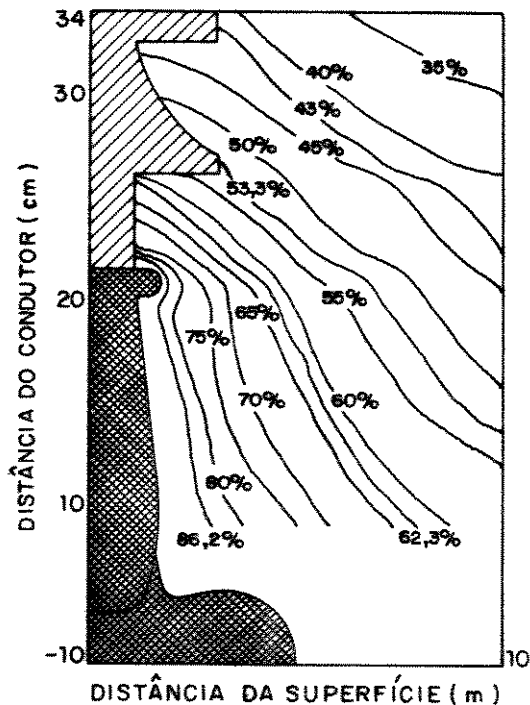


FIGURA 3.4

Os testes levados a efeito pelos autores são úteis na medida em que fornecem uma estimativa do que pode ocorrer com isoladores compostos; contudo, parecem estar dirigidos mais aos fabricantes do que propriamente aos utilitários, haja visto as condições extremas em que foram feitos. Algumas amostras (cubos de resina e fibra de vidro), utilizadas para detecção de "treeing" sob esforços elétricos, foram antes submersas em água a 100°C por 24 h, uma condição inexistente em campo e que apresenta uma difícil correlação de similitude com o envelhecimento natural do material.

A figura 3.5 mostra a curva carga x tempo fornecida por um fabricante nacional de isolador composto. Esse gráfico mostra que a determinação da vida útil do isolador pode ser um parâmetro básico para a estimativa da vida útil da linha de transmissão como um todo. Observa-se que quanto maior o valor da carga inicial, mais rapidamente decai a suportabilidade mecânica do isolador.

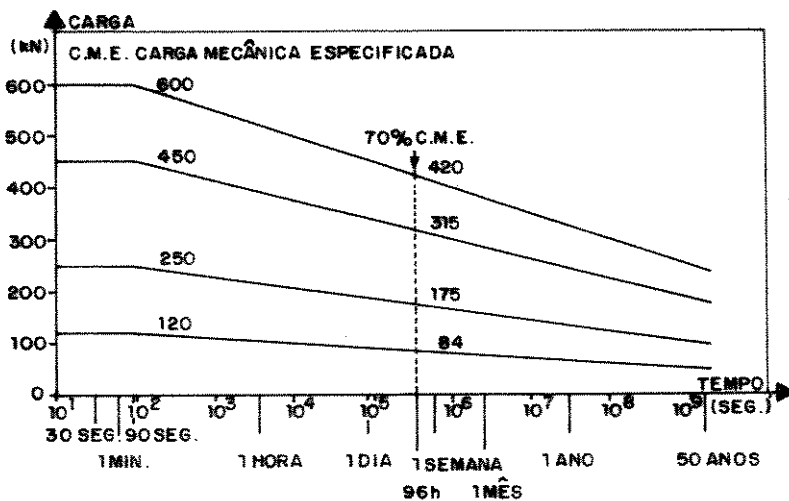


FIGURA 3.5

Ishihara et All [16] sugerem, com base em critérios comumente adotados no Japão, que a carga mecânica a ser suportada no final da vida útil do isolador corresponda ao dobro da máxima carga estimada durante o período de serviço da linha (figura 3.6).

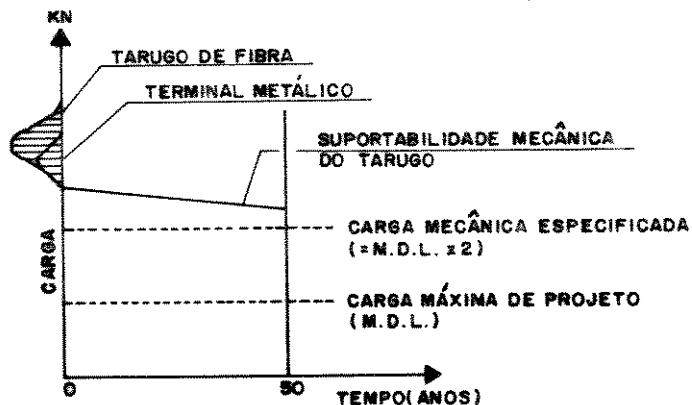


FIGURA 3.6

É de se supor que, nesse caso, a utilização de um coeficiente de segurança de 2 decorra da estimativa de tempos de retorno menores que 50 anos para grandes cargas de vento. No Brasil, é usual a utilização do coeficiente de segurança 3 para isoladores cerâmicos. No entanto, a adoção desse valor para isoladores compostos provavelmente restringiria em muito o máximo valor admissível da soma vetorial da força-peso dos cabos com a força de vento transferida ao isolador. Esta contingência acarretaria necessariamente a utilização de vãos menores, portanto, um maior número de estruturas, o que naturalmente elevaria o custo final de implantação da LTC.

Por outro lado, as curvas apresentadas na figura 3.5 são uma extrapolação de testes de laboratório. Espera-se que as características mecânicas do isolador em campo variem aproximadamente com essas curvas previstas; mas, não existe nenhuma evidência concreta que as confirme, justamente pelo fato das LTC's com isoladores desse tipo não terem mais de vinte anos de vida. Isso sugere a adoção de um coeficiente de segurança ainda maior que 3, ou o estabelecimento de trocas periódicas do isolador. Ambas as possibilidades também se traduzem em aumento de custos.

A figura 3.7 demonstra como são obtidas as curvas apresentadas na figura 3.5 [16]. É aplicada uma carga constante ao tarugo de fibra de vidro até sua ruptura. A partir do instante T3, a resistência do tarugo decai rapidamente, e em T4 ele se rompe. O ponto formado pelo instante T4 com o valor da carga em que o isolador se rompe é unido ao ponto formado pelo instante zero e a carga inicial. Essa linha corresponde então à curva Carga x Tempo para o valor aplicado inicialmente.

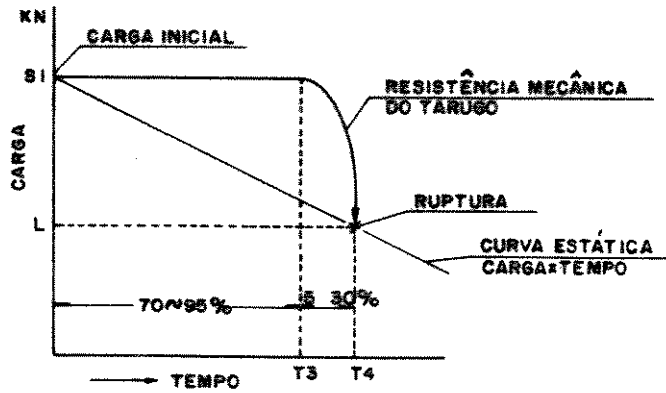


FIGURA 3.7

Uma outra limitação mecânica dos isoladores compostos diz respeito à sua não suportabilidade a esforços de torção. Isto, porém, está relacionado essencialmente a vibrações eólicas decorrentes de grandes vãos em isoladores de suspensão, portanto em linhas de transmissão de classes superiores às deste estudo.

As características físicas dos isoladores compostos são ainda alteradas por dois outros fatores. O primeiro refere-se à ação de pequenas descargas em sua superfície. Se houver uma certa quantidade de depósito de poluentes na superfície do isolador, a chuva, a neblina, ou mesmo o orvalho molhará ou umedecerá a camada de poluentes, que então se torna condutora. A corrente de fuga seca esta camada condutora gerando a formação de caminhos secos ao longo da superfície. A ocorrência de arcos ao longo desses caminhos é acompanhada de altos valores de temperatura e campo elétrico nas terminações do arco. A consequência é a formação de pontos quentes na superfície, onde o material é queimado e onde ocorrem alterações físicas, as quais levam à erosão do material polimérico. Experiências operacionais demonstram que esse tipo de arco é difícil de ser eliminado [17].



Outro fator que provoca alterações nas características físicas do isolador composto é a radiação ultravioleta do sol. Essa radiação provoca a degradação da superfície das aletas em partículas de material que se desprendem e dão ao isolador um aspecto esbranquiçado, além de acarretar ao longo do tempo a formação de microfraturas (menores que 0,1 mm) sobre a superfície do isolador [14].

Prospectos de fabricantes de isoladores compostos tratam o efeito de embranquecimento das aletas como uma "tendência" do revestimento polimérico, afirmando ainda que o ataque é superficial e limitado à profundidade de alguns micra, e que essa reação entra rapidamente em saturação formando uma auto-proteção contra os raios ultravioleta.

Pode-se admitir que a reação de degradação diminua com o tempo, porém não que fique sustada completamente, pois o depósito esbranquiçado é formado de partículas soltas, cuja camada mais externa pode ser removida pela ação da chuva e do vento.

Esses dois últimos fatores mencionados provocam o que se chama de deterioração do isolador composto, que é a principal causa de falhas em serviço. A figura 3.8 ilustra essa situação com dados colhidos de Concessionárias em operação nos Estados Unidos [17].

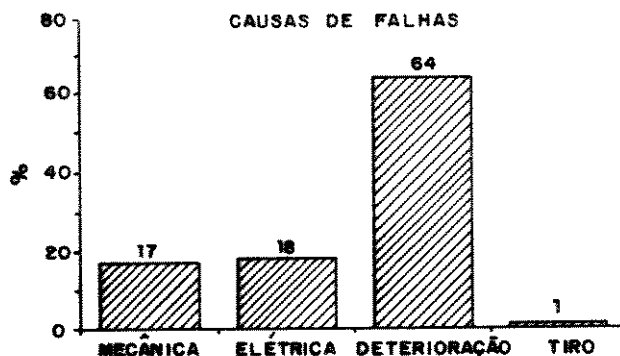


FIGURA 3.8

## B- ISOLADORES CONVENCIONAIS

O isolador convencional mostrado na figura 3.2 tem a seu favor, principalmente, a experiência na utilização da porcelana como isolante, a qual remonta ao início do século. A porcelana é um produto cerâmico obtido pela vitrificação a alta temperatura da argila, do feldspato e da sílica.

Os outros componentes do isolador são o cimento e o metal. Esses três materiais apresentam coeficientes de dilatação térmica muito distintos um do outro, e o correto equacionamento desse problema é que fornece a vida útil do isolador. O cimento, por exemplo, tem a tendência de se expandir com o tempo e, assim, provocar fissuras internas no isolador. Os primeiros isoladores apresentavam falhas também em decorrência dos diferentes coeficientes de dilatação térmica entre a porcelana e a camada vitrificada que a protege [20]. Pode-se afirmar que hoje em dia a questão de adequação dos coeficientes de dilatação está solucionada.

Alguns avanços significativos foram observados nos últimos anos no desenvolvimento tecnológico dos isoladores cerâmicos. Um fabricante desenvolveu uma camada vitrificada de condutividade constante [21], a qual apresenta as seguintes características favoráveis:

a) proporciona uma distribuição mais equânime da tensão ao longo do isolador, evitando a concentração de gradientes de tensão muito elevados no lado da linha,

b) a corrente de fuga aquece o isolador de 3°C a 4°C acima da temperatura ambiente, evitando a condensação de água quando

da ocorrência de neblina e contribuindo para a secagem mais rápida do isolador após a ação da chuva,

c) a probabilidade de descarga em banda seca é diminuída pela presença da camada condutiva. Esta camada estará em paralelo com a banda seca, de modo que a resistência total é sempre menor que a da banda seca. Isto ocasiona uma corrente de fuga maior que, gerando maior temperatura, seca rapidamente uma área maior que a da banda seca e, em alguns casos, até mesmo toda a superfície do isolador, dificultando a formação do arco.

O desempenho desses isoladores, porém, está diretamente ligado à estabilidade da tensão da linha [9]. Se o nível de tensão estiver abaixo do valor nominal, a efetividade da camada condutora será reduzida. Se estiver acima do valor previsto para o isolador, poderá ocorrer superaquecimento ou instabilidade térmica.

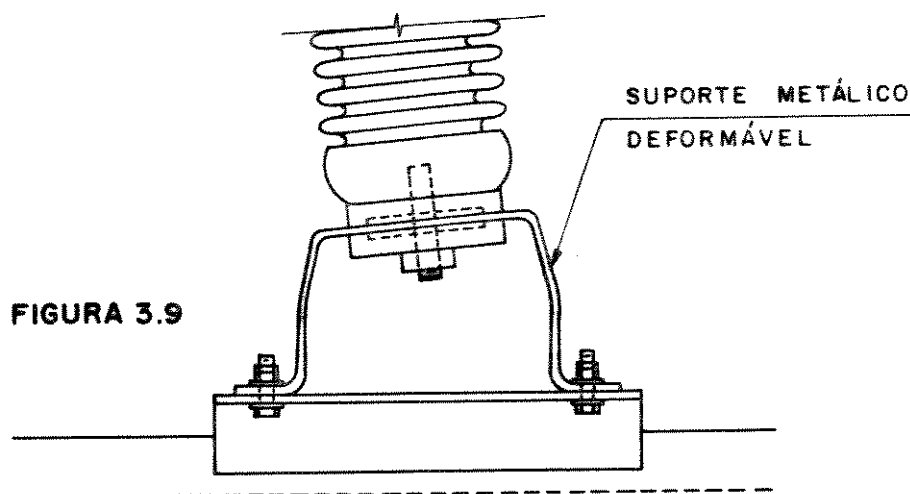
As perdas resistivas também não são desprezíveis, estando freqüentemente nos níveis de perdas corona em tempo úmido. Assim, deve-se fazer um balanço preciso da situação de poluição ambiental para justificar o uso desses isoladores.

O ponto mais vulnerável desse isolador é, no entanto, a indeformabilidade da porcelana. O limite elástico do material é extremamente reduzido e uma sobrecarga mecânica pode facilmente acarretar a fratura do isolador.

Como consequência dessa indeformabilidade, o isolador convencional é muito vulnerável à ação de vandalismo por tiros. Pequenos projéteis podem arrancar lascas consideráveis de material. Um teste de laboratório, levado a efeito por um fabricante [21], consistiu em se quebrar progressivamente as saias de porcelana de um

isolador cerâmico de 35kV, medindo-se a cada quebra a tensão de flashover a seco e sob chuva. O volume cortado de cada saia foi de cerca de 30%. Com apenas uma saia quebrada a tensão de flashover a seco foi 1% menor que a tensão padrão, e a tensão sob chuva 4% menor que a tensão padrão. Com todas as saias quebradas (seis), tanto a tensão a seco como sob chuva foram reduzidas de 7% em relação aos valores padronizados. Esses resultados poderiam indicar, a princípio, que o isolador em campo conseguiria permanecer operando satisfatoriamente, mesmo após várias saias terem sido quebradas por projéteis. Deve-se ressaltar, porém, que o teste não contemplou a situação de depósito de poluentes no isolador, nem foi realizado para níveis de tensão de transmissão. A diminuição da distância de escoamento em isoladores poluídos provocaria certamente uma redução muito mais acentuada nos níveis de tensão de flashover, tanto a seco como sob chuva.

Uma tentativa de se contornar a limitação decorrente da fragilidade da cerâmica é a utilização de fusíveis mecânicos, como os que foram implementados numa LTC urbana de 69kV da COPEL [11]. O fusível é um suporte metálico deformável destinado a absorver esforços decorrentes de rompimento do cabo ou outras cargas anormais (figura 3.9).

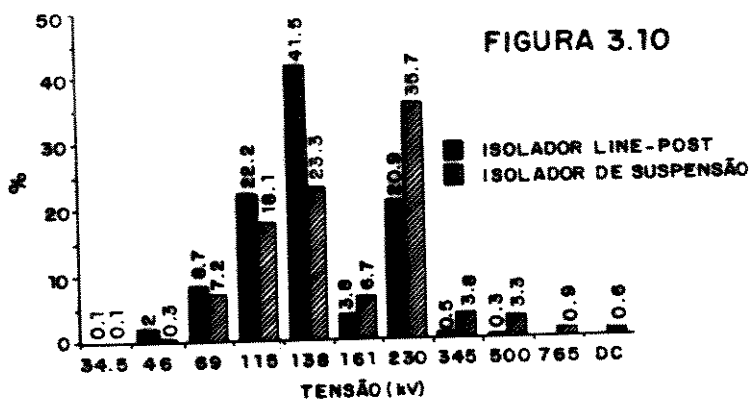


O isolador convencional é, portanto, muito vulnerável a esforços mecânicos, principalmente os que provocam efeitos de cisalhamento. As características elétricas, porém, permanecem praticamente inalteradas durante vários anos. A rigidez dielétrica só será afetada se houver penetração de umidade no corpo cerâmico, isto é, através de perda da proteção da camada vitrificada. Os isoladores atuais, porém, são submetidos a vários testes de porosidade, que asseguram uma adequada resistência à penetração de umidade mesmo em condições adversas, como limpeza com jatos d'água ou situação de chuva intensa com vento.

### C- ANÁLISE COMPARATIVA

Vê-se pelas explanações precedentes que os isoladores compostos e convencionais apresentam vantagens e desvantagens distintas, o que impossibilita classificar genericamente um deles como sendo superior ao outro.

Como contraponto à maior experiência existente em relação aos isoladores convencionais, tem-se que a grande maioria dos isoladores compostos instalados até hoje estão incluídos nas faixas de 138kV e 230kV. A figura 3.10 mostra a distribuição dos isoladores compostos para as várias classes de tensão de linhas de transmissão nos EUA até 1989 [17].



Questionadas sobre a razão da escolha dos isoladores compostos, em detrimento dos isoladores convencionais, as Concessionárias norte-americanas responderam:

<u>MOTIVO</u>	<u>PERCENTUAL</u>
Uso em áreas de alta incidência de vandalismo	28,6
Obtenção de maior experiência	22,8
Menor peso	14,6
Resistência a impacto no poste	8,2
Custo	7,3
Redução de R.I.	6,3
Desempenho sob poluição	5,8
Menor manutenção	3,4
Estética	1,5
Outros	<u>1,5</u>
	100,0

As motivações com percentuais inferiores a 7% são justamente aquelas em que ainda pairam dúvidas quanto à utilização do isolador composto, devendo, pois, estar em redundância com o percentual de 22,8% do item "Obtenção de maior experiência". A tendência é, portanto, que esse percentual diminua nos próximos anos e que a experiência das Concessionárias realmente de forma mais consistente os critérios para utilização de isoladores compostos na compactação de linhas.

De qualquer forma, os dados e informações atualmente disponíveis já permitem elaborar uma análise confiável para direcionar a escolha do uso de isoladores convencionais ou compostos, dependendo da situação. A seguir, relaciona-se as principais situações enfrentadas por uma LTC e a melhor opção de isolamento:

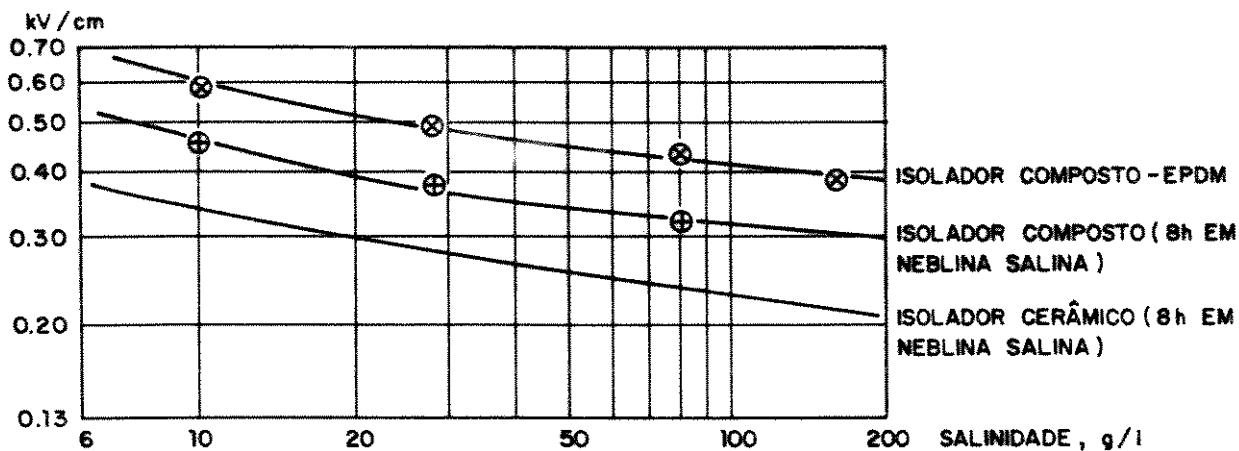
## 1. Áreas de Vandalismo

O maior percentual de vandalismo por tiros situa-se na periferia das grandes cidades. Uma LTC atravessando essa região deverá em princípio estar equipada com isoladores compostos. Porém, se essa região for uma zona costeira ou estiver submetida à ação intensa de poluição por material particulado, deve-se fazer um balanço prévio das probabilidades de falhas decorrentes de vandalismo e da previsão da frequência de ocorrência de flashover, se possível com base no desempenho de linhas já existentes.

## 2. Áreas Poluídas

Em áreas onde for relevante o problema de poluição, deve-se verificar o tipo do poluente mais ativo. O uso de isoladores compostos só se justifica em locais de baixo nível de poluição e sujeitos à ação de limpeza periódica (natural ou artificial).

Apesar de testes de laboratório [18] indicarem que o desempenho dos isoladores compostos sob poluição é superior ao dos isoladores convencionais (figura 3.11), isso é válido apenas para isoladores novos, onde as características elétricas não foram substancialmente alteradas por exposição à radiação ultravioleta, campo elétrico e arcos voltaicos. De fato, se o grau de contaminação for elevado, haverá, como mencionado, uma maior probabilidade de ocorrência de descargas superficiais, as quais contribuem para a deterioração do material polimérico, tornando-o mais suscetível a uma falha.



TESTE DE CONTAMINAÇÃO: RESISTÊNCIA AO SURTO POR CENTÍMETRO DE COMPRIMENTO DA DISTÂNCIA DE FUGA VERSUS SALINIDADE DA NEBLINA - ISOLADOR COMPOSTO COM 1,31m DE DISTÂNCIA DE ESCOAMENTO

FIGURA 3.11

A figura 3.12 mostra a distribuição de isoladores compostos em serviço atualmente nos EUA quanto ao grau de poluição [17].

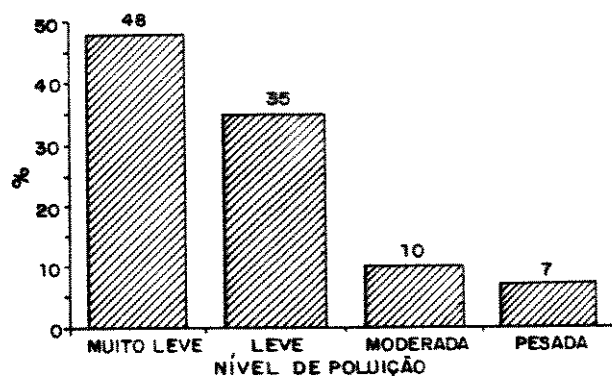


FIGURA 3.12

### 3. Rádio-Interferência

Em razão da melhor distribuição do campo elétrico ao longo de sua superfície, os isoladores convencionais apresentam um desempenho superior aos isoladores compostos em relação aos níveis de rádio-interferência.

Esse fato, porém, não deverá se constituir num parâmetro de escolha do isolador para LTC, pois os níveis de R.I. gerados pelo



cabo condutor são, para a faixa de HV, superiores aos gerados por partes do isolador [9]. Nas LT's, os anéis anti-corona são utilizados invariavelmente a partir do nível de 345kV [9] e exclusivamente nas faixas de EHV e UHV. Deve-se, portanto, utilizar apenas os valores calculados para o cabo como condição limitante da faixa de servidão, em relação aos níveis de R.I.

#### 4. Resistência a Impacto

As estruturas de uma LTC em área urbana estão sujeitas a sofrer impactos por colisões de veículos. O impacto na estrutura tubular é transmitido aos isoladores, que deverão suportá-lo sem quebrar. A superioridade do isolador composto aqui é indiscutível e deve-se utilizá-lo quando a linha percorre regiões de riscos, como avenidas, vias expressas, etc.

É preciso ter em mente que, em áreas urbanas, as LTC's de 138kV e 230kV cruzam vários obstáculos perigosos, como LD's, LTel's, fios trolley, etc., e a segurança para se evitar uma aproximação com esses obstáculos (ou mesmo um contato) deve estar sempre em primeiro lugar, independentemente dos custos diretos e indiretos necessários para tanto.

#### 5. Peso

Os isoladores compostos tem um peso equivalente a 10% do apresentado pelos isoladores convencionais. Isso se traduz num menor custo de transporte e numa maior facilidade de montagem. No entanto, para as linhas nas classes de 138kV e 230kV, o maior peso, em termos

relativos, dos isoladores convencionais, não se constitui num fator limitante à compactação para passagem em área urbana.

#### 6. Manutenção

Sem considerar o problema específico do vandalismo, os isoladores convencionais requerem menos cuidados de manutenção que os isoladores compostos. Isso deve ser levado em conta na escolha do isolador para estruturas que estejam localizadas em áreas de difícil acesso, e/ou que possam provocar transtornos à circulação de veículos e pedestres por ocasião de uma manutenção preventiva ou corretiva.

#### 7. Estética

Em razão de seu aspecto e cor (cinza ou marrom), semelhantes aos isoladores de distribuição, os isoladores convencionais são mais familiares ao grande público que os isoladores compostos. Esses últimos ainda dão uma impressão desagradável pelo progressivo embranquecimento das aletas. Este parâmetro pode ser particularmente importante quando da elevação da classe de tensão de uma LT já existente, utilizando-se a mesma faixa de servidão. Visualmente, a linha de tensão mais elevada deve apresentar a maior semelhança possível com a linha anterior de tensão mais baixa.

#### 8. Custo

Hoje, os isoladores compostos nas classes de 138kV e 230kV têm um custo cerca de 20% superior aos isoladores convencionais. A manutenção também é mais cara, e tanto maior quanto mais longo for o horizonte de tempo considerado. Como contrapartida, os custos de

transporte e montagem para esses isoladores são menores, devido a seu peso reduzido.

Deve-se pois fazer um balanço desses itens para cada situação de implantação da linha, de forma a se ter um embasamento dos custos para cada opção.

O custo pode ser um fator determinante na escolha do tipo de isolador de uma LTC em área urbana. Nunca, porém, poderá estar no mesmo nível de discussão do parâmetro segurança.

### 3.1.2 Distâncias Elétricas

As distâncias elétricas são definidas segundo estudos de isolamento à frequência fundamental, surtos de manobra e atmosféricos e, no caso específico de LTC's, também do movimento de cabos em curto-circuito.

Nas LTC's de 138/230kV as distâncias elétricas devem satisfazer o requisito mais crítico dos estudos de isolamento.

Esse estudo é necessário porque a norma que rege o projeto de linhas de transmissão [34] especifica apenas os valores mínimos admissíveis para distâncias fase-terra, os quais são muito reduzidos, mesmo para os padrões de linhas compactas. Abaixo, indica-se esses valores mínimos admissíveis e a distância fase-terra (ou fase-estrutura) imposta pelo próprio comprimento dos isoladores compostos fabricados no Brasil:

<u>TENSÃO</u>	DISTÂNCIA FASE-TERRA (cm)	
	<u>NBR 5422</u>	<u>ISOL. COMPOSTO</u>
138kV	72	156,2
230kV	118	231,4

As distâncias fase-fase mínimas por sua vez, para níveis de tensão superiores a 50kV, estão sob o mote "não especificado", na página 20 daquela norma.

De uma forma geral, a importância relativa dos critérios de isolação é a seguinte:

<u>PARÂMETRO</u>	<u>IMPORTÂNCIA RELATIVA</u>
1. Tensão em 60 Hz - isolador limpo	secundária
2. Tensão em 60 Hz - isolador poluído	algumas vezes primária
3. Impulso de Manobra	usualmente primária
4. Impulso atmosférico	usualmente primária
5. Movimento de cabos em curto-circuito	algumas vezes primária

Analisemos cada um desses itens separadamente:

1. Tensão a 60 Hz - isolador limpo

A isolação requerida para tensão nominal em 60 Hz é garantida com folga pelas dimensões dos isoladores para cada nível de tensão considerado. Em 138kV, com isoladores limpos e secos, a distância necessária entre a parte energizada e a terra é de apenas 23,6 cm. Esse valor é obtido através da seguinte seqüência [9]:

tensão nominal a 60 Hz (kV)	máxima tensão fase-terra ( $1,1 \times V_{nom}$ ) (kVrms)	tensão crítica de flashover (kV)	"gap" necessário
138	88	93	9,3" = 23,6cm

A média de valores obtidos em ensaios feitos com isoladores convencionais de 138kV [23], confirma essa situação de folga para o critério de tensão a 60 Hz:

Tensão Suportável em Freqüência Industrial a Seco (60s):	320kV
Tensão de Descarga em Freqüência Industrial a Seco:	442kV
Tensão Suportável em Freqüência Industrial sob Chuva (60s):	230kV
Tensão de Descarga em Freqüência Industrial sob Chuva:	391kV

## 2. Tensão a 60 Hz - isolador poluído

O isolamento da LTC em 60 Hz com isolador poluído, contrariamente à situação de isolador limpo, pode constituir-se num parâmetro determinante para o dimensionamento da isolação.

A experiência de LT's em ambiente poluído pode ser utilizada diretamente em LTC's como subsídio para a escolha do tipo de isolador e o seu dimensionamento. Para os níveis de 138kV e 230kV pode-se resumir essa experiência como se segue [9]:

### a) Poluição zero

- ambiente:

- .áreas sem indústrias.
- .áreas com algumas indústrias, porém sujeitas a ventos e chuvas constantes.
- .áreas situadas longe do mar, ou em altas altitudes; em ambos os casos sem sofrer a ação do vento marítimo.

- desempenho de LT's existentes:

.nenhuma falha observada em condições de alta umidade nas linhas de 138kV ou 230kV, mesmo quando equipadas com menos de 10 e 15 isoladores tipo concha-pino, respectivamente.

- distância geométrica de escoamento sugerida:

25,4mm/kVrms.

b) Poluição leve

- ambiente:

.áreas com indústrias não produtoras de poluição pesada (material particulado).

.áreas com alta densidade de indústrias, porém sujeitas a ventos e chuvas constantes.

.áreas expostas a ventos marítimos, porém não próximas da costa.

- desempenho de LT's existentes:

.observado falhas em condições de alta umidade em linhas de 138kV e 230kV com menos de 10 e 15 isoladores tipo concha-pino.

- distância geométrica de escoamento sugerida:

25,4mm/kVrms a 31,75mm/kVrms.

c) Poluição pesada

- ambiente:

.áreas com alta densidade de indústrias.

.áreas próximas à costa submetidas a ventos marítimos.

- desempenho de LT's existentes:

.observado falhas em condições de neblina ou sob ação do vento marítimo em linhas equipadas com isoladores normais, mesmo com 12 e 18 isoladores tipo concha-pino para os níveis de 138kV e 230kV, respectivamente.

- distância geométrica de escoamento sugerida:

38,10mm/kVrms a 44,45mm/kVrms.

d) Poluição muito pesada

- ambiente:

.áreas geralmente pouco extensas, submetidas a poluição industrial de material particulado condutor.

.áreas muito próximas à costa e submetidas a fortes ventos marítimos.

- desempenho de LT's existentes:

.falhas ocorrem em condições de neblina ou sob ação do vento marítimo mesmo quando as linhas são equipadas com isoladores anti-poluição em número maior que 12 e 18 para os níveis de 138kV e 230kV, respectivamente.

- distância geométrica de escoamento sugerida:

50,8mm/kVrms a 63,5mm/kVrms.

As distâncias de escoamento sugeridas acima para cada nível de poluição correspondem à distância geométrica total sobre a superfície do isolador. No entanto, testes demonstraram que a distância efetiva de escoamento varia segundo a distribuição de tensão no isolador [9], a qual é, por sua vez, tanto menos linear quanto mais

próximo estiver o isolador das condições de flashover sob poluição. A figura 3.13 ilustra essa situação, onde a distância de escoamento real é cerca de 70% da distância ideal.

O efeito desse fenômeno é o aumento não linear da probabilidade de ocorrência de flashover à medida que cresce o nível de poluição.

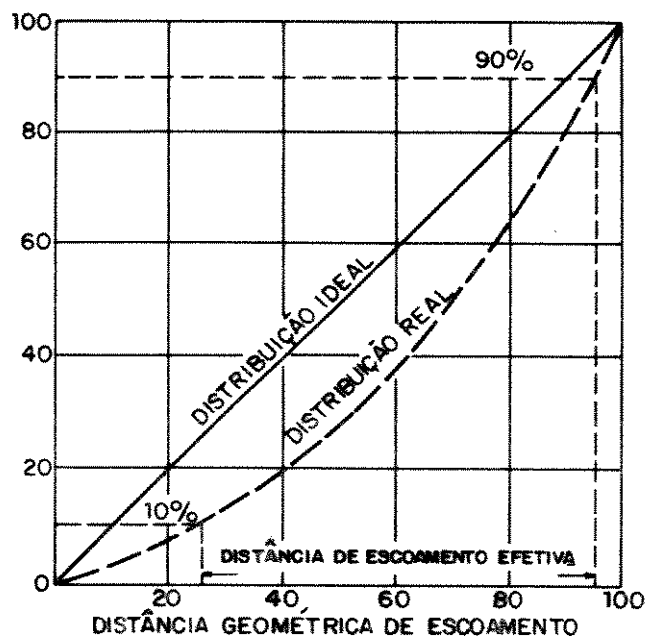


FIGURA 3.13

A figura 3.14 [9] mostra ainda que os isoladores "line-post" apresentam menor resistência à poluição do que montagens em suspensão com isoladores compostos ou com isoladores tipo concha-pino de mesmo comprimento.

Isto é particularmente danoso para LTC's de 138/230kV implantadas em áreas urbanas de alto grau de poluição, principalmente porque até o presente não há isoladores "line-post" com aletas especiais para ambiente poluído.

Os isoladores compostos tipo "line-post" fabricados no Brasil [1] apresentam distâncias de escoamento de 3.999mm e 6.369mm



respectivamente para 138kV e 230kV, ou ainda 45,63mm/kVrms e 43,60mm/kVrms.

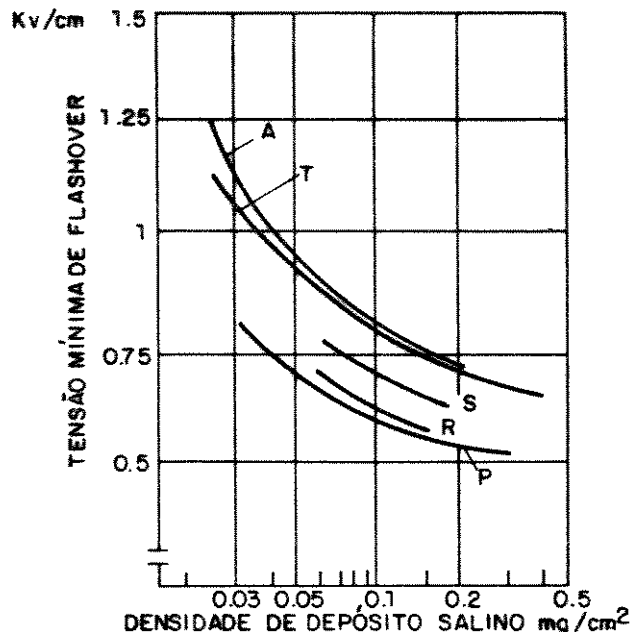


FIGURA 3.14

DESIGNAÇÃO

TIPO

A	cadeia de isoladores tipo concha-pino
T	isolador composto de suspensão (DGE = 114 1/2")
S	isolador composto de suspensão (DGE = 110")
R	isolador composto de suspensão (DGE = 74 1/2")
P	isolador "line-post" (DGE = 49 1/2")

Esses valores demonstram que os isoladores compostos deverão apresentar uma boa performance até o nível de "poluição pesada", mas não para o nível de "poluição muito pesada".

Os isoladores convencionais [21], não disponíveis ainda no mercado nacional, apresentam uma distância de escoamento em 138kV variando de 2.082,8mm a 3.302mm, ou 23,76mm/kVrms a 37,67mm/kVrms e em 230kV variando de 3.505,2mm a 4.241,8mm, ou 23,99mm/kVrms a 29,04mm/kVrms.

Esses valores indicam que para 138kV os isoladores convencionais de maior DGE poderão suportar um nível de poluição

semelhante ao grau de "poluição pesada", enquanto que para 230kV esses isoladores, no máximo, suportariam um ambiente classificado como de "poluição leve". Nota-se aí claramente que a limitação dos isoladores convencionais para esforços mecânicos de flexão - principalmente em 230kV - contribui incisivamente para impedir a obtenção de uma maior distância de escoamento e, conseqüentemente, de um melhor desempenho em ambientes com maior grau de poluição.

### 3. Impulso de Manobra

Nas linhas de transmissão convencionais, os estudos de coordenação de isolamento em relação a impulsos de manobra concentram-se quase que exclusivamente nas sobretensões fase-terra. A pouca atenção dada às sobretensões fase-fase deve-se às grandes distâncias relativas entre fases nessas linhas.

Nas LTC's a situação é inversa. A aproximação das fases torna necessário um estudo mais aprofundado das sobretensões fase-fase, as quais podem se mostrar determinantes no dimensionamento da geometria estrutural. A EPRI também assegura que, se a distância fase-terra considerada for similar ao usualmente empregado em linhas convencionais, os requisitos baseados em desempenho sob impulso atmosférico e isolação à frequência industrial se sobrepõem a considerações de sobretensões fase-terra originadas por impulso de manobra. Conforme se verá no capítulo 4, isso é sempre verdadeiro para isoladores line-post, cujos valores de  $L_i$  (calculados ou retirados diretamente de catálogos de fabricantes) são inclusive superiores ao comprimento das cadeias de isoladores concha-pino, da ordem de 1314mm e 2044mm para 138kV e 230kV respectivamente [6].

Dessa forma, no que tange a impulsos de manobra, os estudos estarão voltados às sobretensões fase-fase.

O resultado das investigações feitas nesse sentido pelo grupo de trabalho de coordenação de isolamento fase-fase da "International Electrotechnical Commission" (IEC) [9] sugere existir uma relação aproximada entre sobretensões de manobra fase-terra e sobretensões de manobra fase-fase.

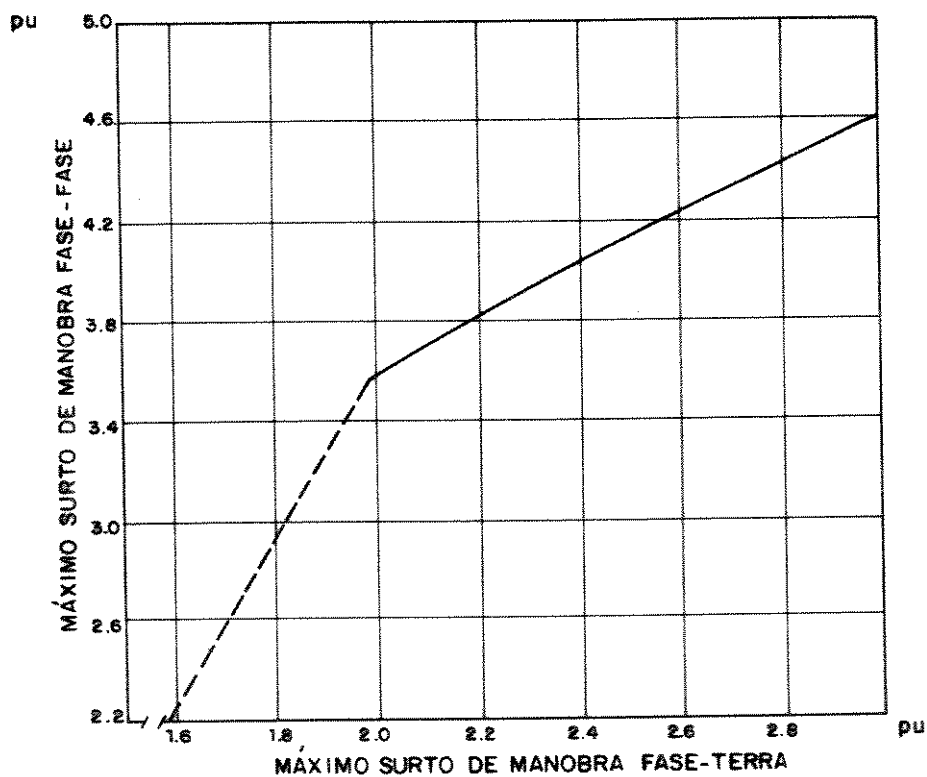


FIGURA 3.15

A figura 3.15 mostra essa relação. A linha cheia representa a curva média dos resultados experimentais obtidos pelo grupo de trabalho da IEC. A linha tracejada representa os resultados obtidos para baixas sobretensões por D. D. Wilson no trabalho "Phase-Phase and Phase-Neutral Switching Surges on 500kV Open-Ended Lines"

(IEEE-TPAS-88-May 1969). O ponto de inflexão é decorrente do ajuste dessas duas curvas e não é de se supor que traduza com exatidão o fenômeno real.

Dois outros trabalhos [28][29] voltados para o estudo da sobretensão de manobra em estruturas compactas chegaram a conclusões idênticas em relação a alguns aspectos. São elas:

a) "Isoladores fase-fase não acarretam uma redução significativa na suportabilidade ao impulso de manobra, tanto em tempo seco como sob chuva".

Obs.: Esta constatação é um adendo útil no estudo do problema do movimento de cabos em curto-circuito e as maneiras de minimizá-lo.

b) "A suportabilidade ao surto de manobra reduz-se em cerca de 10% quando as fases estão sob a estrutura da linha".

Obs.: Esta constatação é importante nos estudos de isolamento de estruturas tipo "raquete" com configurações de fases do tipo "delta" (usualmente em 500kV). Não há porém uma aplicação imediata para LTC's em áreas urbanas com estruturas tubulares.

c) "A 3a. fase em configuração delta parece não afetar a suportabilidade ao impulso de manobra entre as outras duas fases"[28].

"A 3a. fase em configuração delta não afeta a suportabilidade ao impulso de manobra entre as outras duas fases, desde que a amplitude de sua tensão seja inferior à metade da amplitude de tensão da 2a. fase"[29].

Essa última asseveração é confirmada por um terceiro trabalho [30], que demonstra, através de ensaios, que a dependência com relação à 3a. fase só é significativa quando esta se encontra

energizada com a mesma tensão negativa da 2a. fase, ocorrendo uma redução do valor da tensão crítica de descarga de, no máximo, 10% do valor original.

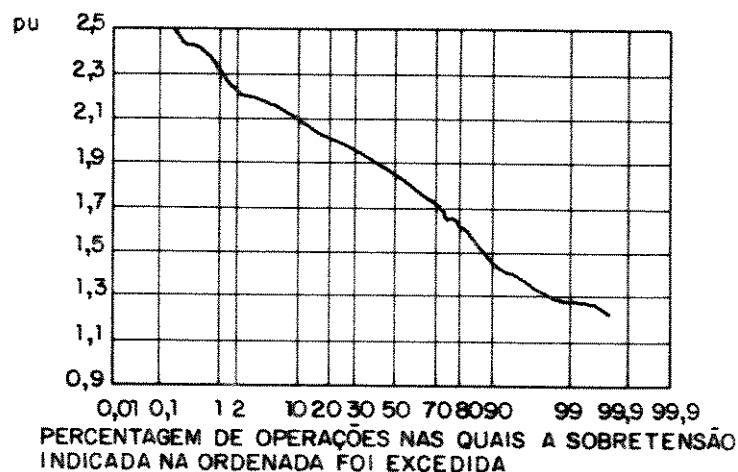
De qualquer forma, na prática, a tensão na 3a. fase não supera a metade da tensão na 2a. fase, não sendo necessário levar em consideração essa influência. Além do mais, as LTC's em áreas urbanas de 138/230kV apresentam quase sempre uma disposição vertical de fases, o que leva a crer que essa pequena influência da 3a. fase seria ainda reduzida em termos probabilísticos, pois, nesse caso, o conjunto não mais pode ser encarado como tendo dois gaps fase-fase em paralelo.

Uma discrepância importante entre o trabalho de Rohlfis e Schneider [29] e o de Vaisman et Alli [30] diz respeito à influência da compactação no tocante à suportabilidade fase-terra ao surto de manobra. O primeiro afirma que a suportabilidade fase-terra decresce de 5% a 11% dependendo da contribuição da componente negativa da 2a. fase. O segundo demonstra que essa redução é desprezível (da ordem de 1% a 2%), o que não afetaria o dimensionamento de isolação para surtos fase-terra.

Ambos os trabalhos constituem-se de ensaios feitos de forma semelhante. Contudo, considerando que no segundo houve também uma variação dos parâmetros "distância fase-fase" e "distância fase-terra", e que, mesmo assim, os resultados mantiveram-se inalterados quanto à pequena redução da suportabilidade fase-terra, a última hipótese parece ser mais factível, o que corrobora também as indicações da EPRI sobre a necessidade de se ater essencialmente às sobretensões fase-fase.

Deve-se ter em mente ainda que a magnitude da sobretensão de manobra depende fundamentalmente da potência de curto-circuito e das características dos equipamentos. Por se tratar de um fenômeno probabilístico, o valor exato não pode ser previsto. Esse valor depende do ponto da onda de tensão em que ocorre o fechamento, bem como da dispersão dos instantes de fechamento do disjuntor.

A figura 3.16 mostra uma distribuição estatística de operações de energização [27].



**FIGURA 3.16**

O dimensionamento da LTC quanto a surtos de manobra terá de se constituir, portanto, numa solução de compromisso entre o grau de compactação desejado e o percentual probabilístico considerado de desligamentos da LTC ao longo do tempo em decorrência das sobretensões que surgirem, já com a previsão de eventuais equipamentos de proteção, como limitadores de surtos e resistências de pré-inserção. O gráfico da figura 3.15 será utilizado como subsídio para o dimensionamento, entrando-se com o valor estimado da sobretensão fase-terra. Os valores máximos típicos de sobretensões fase-terra para diferentes surtos de manobra estão listados na tabela 3.1 [27].

TABELA 3.1 - SOBRETENSÕES DE MANOBRA - VALOR MÁXIMO FASE-TERRA PARA DIFERENTES TIPOS DE MANOBRA

Tipo de Manobra	Sem Equipamentos Especiais			Com Resistor (300 a 600 Ω)		Com Sincronização Sem Resistor
	Valor Máximo em p.u.		Desvio Padrão %	Valor Máximo	Desvio Padrão %	Valor Máximo
	Início Linha	Fim Linha				
Energização de Linhas	1,5 a 2,5	2,0 a 3,0 <sup>(1)</sup>	15 a 20	1,3 a 2,2	4 a 8	1,45 a 1,7
Religamento Tripolar	2,0 a 3,0	3,0 a 5,0 <sup>(2)</sup>	10 a 25	1,2 a 1,7 <sup>(3)</sup> 1,5 a 2,5		1,3 a 1,6
Religamento Monopolar	< 2,0	1,8 a 2,5 <sup>(4)</sup>		< 1,8 <sup>(4)</sup> < 2,3		
Eliminação de Curto	< 2,0	< 2,5		1,5 <sup>(3)</sup>		
Rejeição de Carga	1,25 a 1,75	1,5 a 2,0		1,5 <sup>(3)</sup>		
Ocorrência de Curtos	1,3 a 1,6	1,6 a 2,2				
Abertura de Cargas Indutivas	2,5			1,3 a 1,5 <sup>(3)</sup>		
Abertura de Linhas em Vazio	1,3 a 1,5					
Energização de Linha + Transformador	1,2 a 1,8					
Energização de Bancos de Capacitores	2,0					
Primeira Reignição do Banco de Capacitor	3,0					

- NOTAS : (1) Usando pára-raios estes valores ficam entre 2 e 2,2  
 (2) Valores indicados são pessimistas  
 (3) Com resistor em abertura  
 (4) Presença de reatores na linha

Os valores dessa tabela, obtidos através de um TNA (Analisador Transitório de Redes), são conservativos e podem variar significativamente com a impedância de surto, extensão da linha, características dos disjuntores e transformadores e grau de aterramento da LTC.

O valor da rigidez dielétrica do ar, por sua vez, cresce ainda com o aumento da pressão atmosférica e com a redução da temperatura e umidade ambientes [9]. Esses fatos devem igualmente ser levados em consideração para um dimensionamento mais preciso da LTC quanto à coordenação de isolamento, principalmente se a área urbana estiver situada numa região de características peculiares, seja uma altitude muito elevada ou muito baixa, ou uma temperatura média anual e uma umidade relativa do ar muito altas ou muito baixas.

Obtida uma estimativa (ou estimativas) para o valor da sobretensão fase-terra em pu através da tabela 3.1, tem-se igualmente, através do gráfico da figura 3.15, a estimativa para o valor da sobretensão fase-fase em pu ( $S_{ff}$ ).

Para o dimensionamento da LTC será utilizado o método proposto pela EPRI [9] em sentido inverso, isto é, ao invés de se estipular uma distância fase-fase, para posteriormente se obter o valor máximo admissível de sobretensão fase-terra, entra-se inicialmente com esse valor nas formulações em passos invertidos, até se chegar à distância correspondente, que é o procedimento natural para o dimensionamento de uma LTC.

O valor da tensão suportável ( $V_{ws}$ ) entre fases, estimada para uma dada probabilidade de não ocorrência de "flashover", é dado por:



$$V_{ws} = S_{ff} \cdot V_{ftp} \quad [\text{kV}] \quad (3.1.1)$$

O valor da tensão crítica de flashover corrigido ( $V'_{cf}$ ) é obtido de  $V_{ws}$  pela aplicação do inverso da correção da probabilidade especificada de não ocorrência de flashover para um determinado número de vãos da linha. Essa correção é dada por  $(1-a\sigma)$ , onde  $\sigma$  é o desvio padrão, estipulado em 5% para LTC's [9], e  $a$  é obtido diretamente do gráfico da figura 3.17.

Assim,  $V'_{cf}$  é dado por:

$$V'_{cf} = V_{ws} / (1 - 0,05a) \quad [\text{kV}] \quad (3.1.2)$$

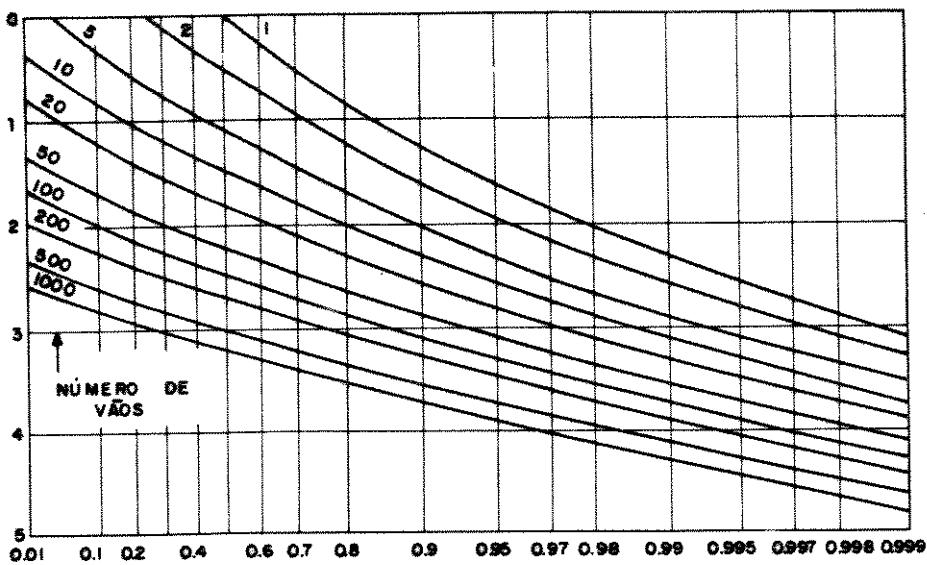
$V'_{cf}$  é o valor corrigido de  $V_{cf}$  para uma dada densidade relativa do ar (RAD) corrigida pelo fator de correção de umidade ( $K_h$ ):

$$V'_{cf} = V_{cf} \cdot \text{RAD} / K_h \quad [\text{kV}] \quad (3.1.3)$$

$$\text{ou, } V_{cf} = V'_{cf} \cdot K_h / \text{RAD} \quad [\text{kV}] \quad (3.1.4)$$

Os valores de RAD e  $K_h$  são obtidos respectivamente através dos gráficos das figuras 3.18 e 3.19.

Com o valor de  $V_{cf}$ , obtém-se, através do gráfico da figura 3.20, a distância (gap) entre fases correspondente.



PROBABILIDADE DE SUPORTABILIDADE [ 9 ]

FIGURA 3.17

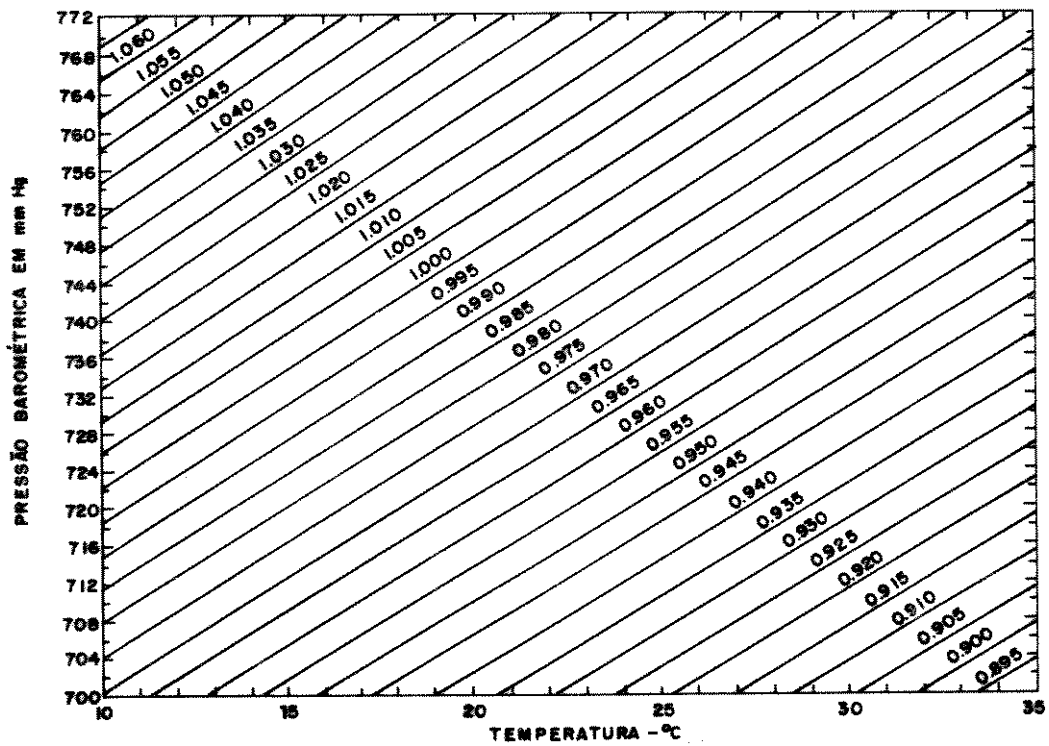
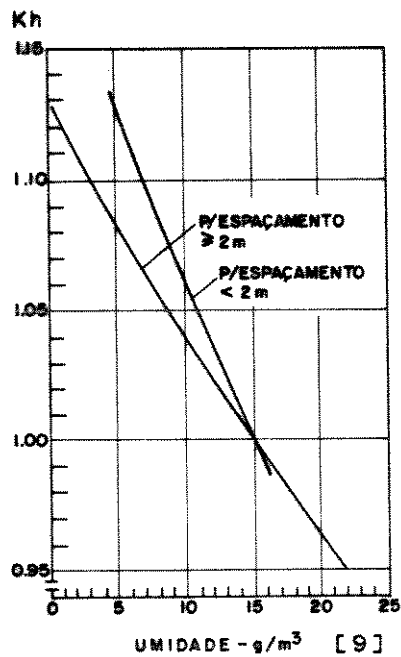
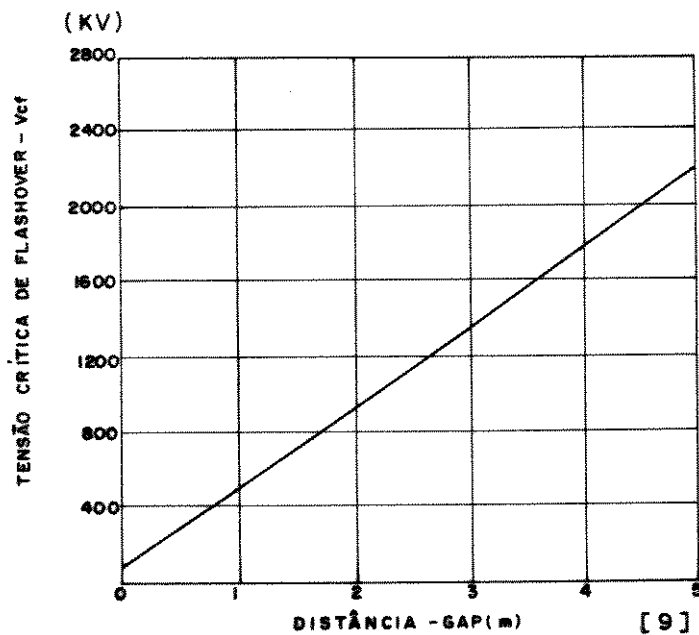


FIGURA 3.18



FATOR DE CORREÇÃO DA UMIDADE DO AR

FIGURA 3.19



DISTÂNCIA ENTRE FASES

FIGURA 3.20

#### 4. Impulso Atmosférico

O comportamento de uma LTC frente a impulsos atmosféricos difere daquele apresentado nas LT's pelas seguintes razões:

- As dimensões reduzidas da LTC restringem a exposição às descargas e, conseqüentemente, contribuem para diminuir o número de desligamentos esperados por ano.

- A redução da distância fase-fase faz aumentar a probabilidade de descargas fase-fase, o que, por sua vez, reduz a possibilidade da ocorrência de arcos auto-extinguíveis quando de uma descarga atmosférica, pois ao menos uma fase não estará instantaneamente no ponto zero da curva de tensão no momento da ocorrência da descarga.

Essas duas razões agem de forma oposta quanto à probabilidade de desligamento da linha por efeito de descargas atmosféricas.

Apesar de alguns autores considerarem que elas se compensam mutuamente [31], os dados atualmente disponíveis permitem supor que a primeira razão tem preponderância sobre a segunda (figura 3.21) [9]. Além disso, vários outros parâmetros contribuem ainda para definir o desempenho global da LTC quanto a surtos atmosféricos: tipo de aterramento, homogeneidade do solo, número de cabos pára-raios, altura das estruturas e nível isocerâunico.

No caso das LTC's atravessando uma área urbana, deve-se levar em conta também a proteção relativa oferecida por sistemas de captação de descargas em edificações próximas ao traçado.

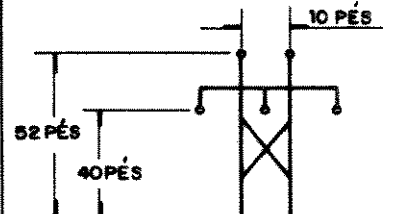
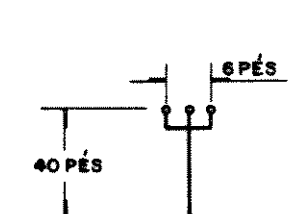
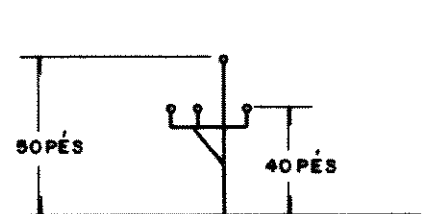
			
CONFIGURAÇÃO	CONVENCIONAL (ATERRADA)	COMPACTA (NÃO ATERRADA)	COMPACTA (ATERRADA)
FREQÜÊNCIA RELATIVA DE DESCARGA	1.0	0.89	0.91

FIGURA 3.21

A figura 3.21 [9] representa uma expectativa de frequência de descargas em função das configurações das estruturas, baseada em dados de campo atualmente disponíveis. É importante salientar que a alternativa de linha compacta sem cabo pára-raios, apesar de estar menos sujeita a descargas atmosféricas, apresentará certamente um maior número de descargas fase-fase ou fase-terra e, portanto, um maior número de desligamentos.

Os estudos de sobretensões atmosféricas em linhas de transmissão baseiam-se geralmente no chamado Modelo Eletrogeométrico. Tratando-se de um modelo que leva em conta essencialmente a maneira pela qual se dá a descarga atmosférica e as características dimensionais do objeto sujeito a ser atingido por ela, torna-se passível de ser utilizado diretamente na análise de LTC's. A influência da compactação se fará notar quanto à probabilidade da linha ser atingida pela descarga, conforme se demonstra a seguir.

A base do Modelo Eletrogeométrico é o estabelecimento de uma relação entre a intensidade da corrente da descarga e a distância mínima capaz de ser atingida pelo último "líder".

A figura 3.22 foi obtida a partir das equações desenvolvidas por Love e Whitehead para a distância de atração e tensão da descarga piloto [27].

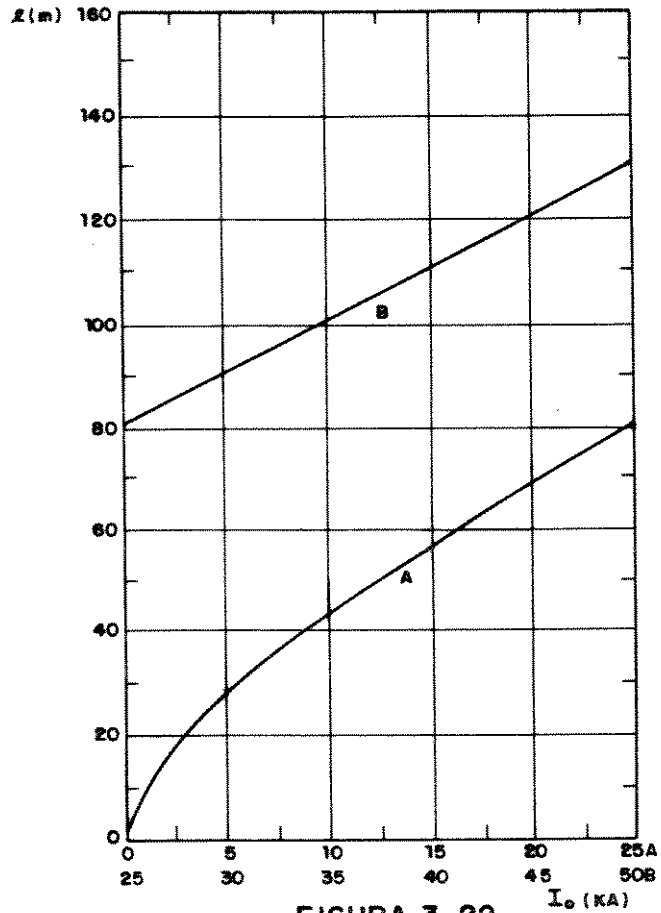


FIGURA 3.22

Uma boa aproximação dessa curva é dada pela equação:

$$l = 2I_0 + 30[1 - \exp(-I_0/68)] \quad (3.1.5)$$

Utiliza-se eventualmente relações ainda mais simplificadas:

$$l = 9Io^{0,65} \quad [27] \quad (3.1.6-a)$$

$$\text{ou, } l = 9,4Io^{0,67} \quad [9] \quad (3.1.6-b)$$

A figura 3.23 [9] mostra o percentual de incidência das descargas em função do nível da corrente em KA:

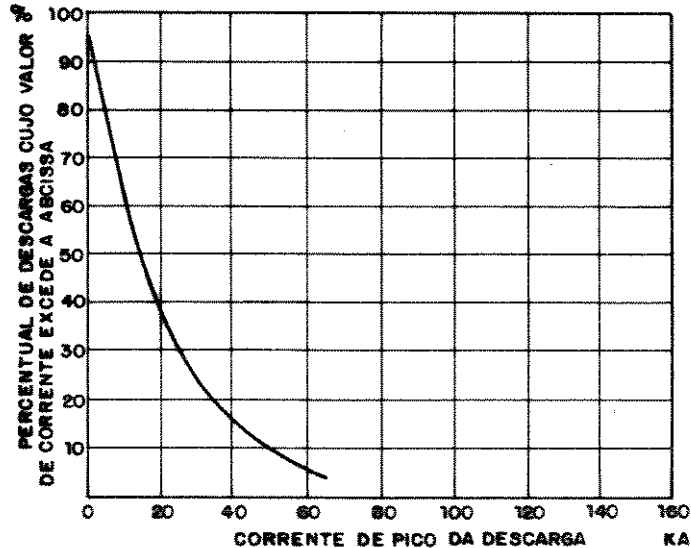


FIGURA 3.23

A tabela 3.2 é uma compilação de testes de laboratório de suportabilidade a impulsos atmosféricos para isoladores convencionais e compostos [21],[23]. Esses dados estão plotados no gráfico da figura 3.24.

Pode-se observar aí que os isoladores convencionais apresentam maior resistência à ocorrência de flashover que os isoladores compostos.

Apesar de cerca de 90% das descargas atmosféricas serem de polaridade negativa [20], a suportabilidade a descargas positivas pelos isoladores corresponde a 78% da suportabilidade que apresentam frente a descargas negativas. Por essa razão, ao se dimensionar a LTC para impulsos atmosféricos de polaridade positiva, está-se, na

**TENSÃO SUPORTÁVEL SOB IMPULSO**  
**ATMOSFÉRICO DE POLARIDADE POSITIVA**

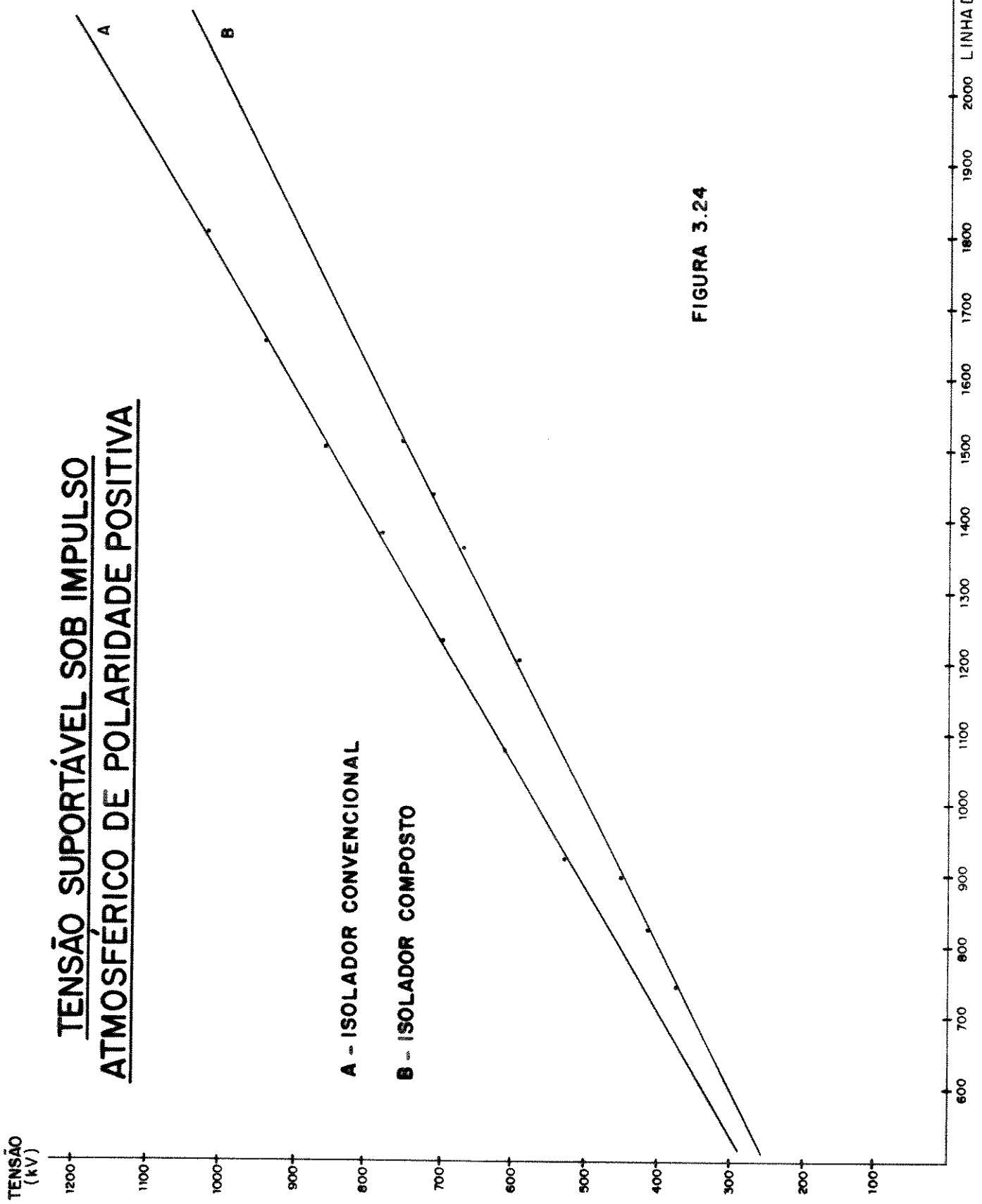


FIGURA 3.24



verdade, dimensionando-a automaticamente também para impulsos de polaridade negativa. Essa conceituação será utilizada no cálculo para determinação da geometria dos cabos pára-raios, explicitado no capítulo 4.

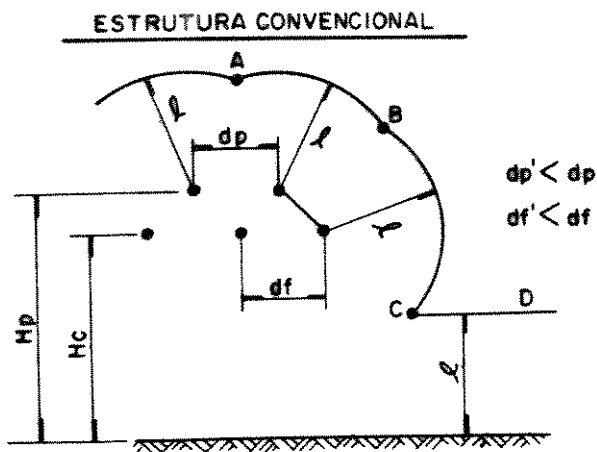
TABELA 3.2

TENSÃO SUPORTÁVEL SOB IMPULSO ATMOSFÉRICO DE POLARIDADE POSITIVA

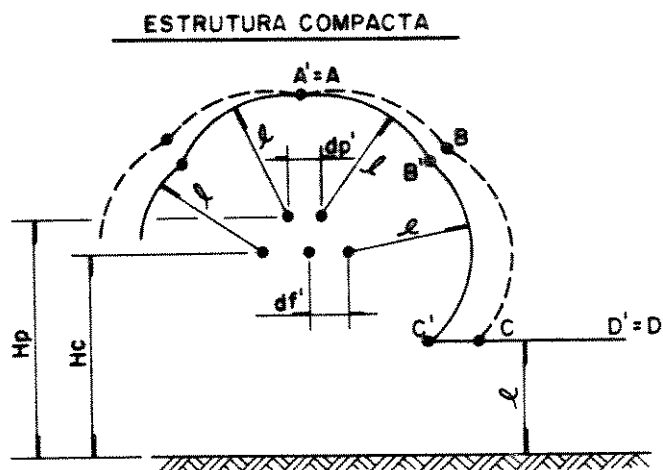
TENSÃO (kV)	LINHA DE ARCO (mm)	
	Is. Convencional	Is. Composto
370		741
410		818
450		895
525	921	
590		1.203
610	1.073	
630		1.280
670		1.357
695	1.226	
710		1.434
750		1.511
780	1.378	
860	1.499	
945	1.651	
1.025	1.803	

A figura 3.25-a mostra a aplicação do Modelo Eletrogeométrico numa linha de transmissão convencional, com a distância de incidência  $l$  relativa a uma determinada intensidade de corrente  $I_0$  referenciada à geometria da estrutura [27].

A figura 3.25-b mostra a aplicação deste Modelo para uma LTC com o mesmo valor de  $l$  e mesma altura de cabos condutores e pára-raios da LT da figura 3.25-a.



**FIGURA 3.25 - a**

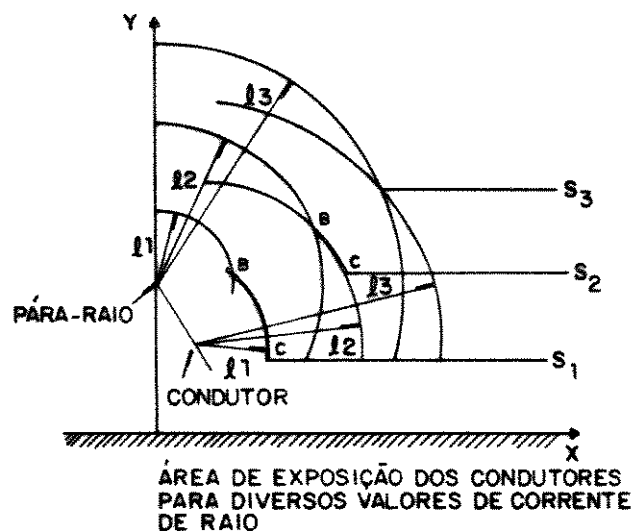


**FIGURA 3.25 - b**

A envoltória da blindagem da figura 3.25-a foi transcrita para a figura 3.25-b com linha tracejada, de forma a se poder comparar a variação acarretada pela compactação da LT.

Observa-se que, no caso da LTC, há uma redução do volume da blindagem para um mesmo valor de  $l$ . Isso significa que existe uma probabilidade menor de que a descarga atinja os cabos pára-raios ou condutores, corroborando assim a primeira das razões (vide página 85) que diferencia a LTC da LT quanto ao comportamento frente a impulsos atmosféricos.

Conforme indica a figura 3.26, o arco de exposição BC, que delimita a região da envoltória em que uma descarga pode atingir diretamente o condutor, diminui com o aumento do valor da corrente de descarga atmosférica, até anular-se para a distância de incidência  $l/3$  (distância crítica), correspondente ao valor de corrente crítica. Nesse ponto, descargas com valores superiores a essa corrente crítica serão desviadas para os cabos pára-raios ou para a terra.



**FIGURA 3.26**

Para correntes menores, o arco de exposição que permite à descarga atingir o condutor aumenta, porém a sobretensão resultante da descarga também será menor.

A isolação da linha, portanto, deve ser definida idealmente como aquela capaz de suportar a sobretensão resultante da incidência de corrente crítica sem provocar o desligamento da linha.

Alterando-se a posição do cabo pára-raios, ou seja, modificando-se o alcance da blindagem, o valor da máxima corrente de descarga que pode alcançar o cabo condutor aumenta ou diminui, conforme varia o ângulo de blindagem. Assim, pode-se posicionar o cabo pára-raios de um modo tal que a corrente máxima, acima da qual o condutor é protegido naturalmente, seja igual à corrente mínima para causar desligamento. Nessa situação, apenas descargas com intensidade de corrente inferiores aos valores mínimos necessários para causar desligamentos atingiriam o cabo condutor.

É importante também conhecer o número de descargas previstas por ano e por comprimento de linha, para análise do desempenho operacional global.

No caso de LTC's equipadas com isoladores poliméricos essa informação auxilia ainda na estimativa de vida útil da linha, ou da periodicidade necessária de manutenção preventiva, em razão dos efeitos danosos provocados nesses isoladores pela intensidade de descargas parciais ou totais.

Darveniza et All [32] sugerem uma formulação empírica para a estimativa de descargas diretas na linha:

$$N1 = \{120[1 - \exp(-H/24,4)] + 7,5\} [1 + 0,1(np-1)] T/48 \text{ [desc/100Km/ano]} \quad (3.1.7)$$

A EPRI [9] sugere um método baseado no ângulo estimado de blindagem dos cabos pára-raios e da distância entre eles (figura 3.27). O número de descargas na linha nesse caso é dado por:

$$N1 = 82T.(4H+dp)/8497 \text{ [desc/100Km/ano]} \quad (3.1.8)$$

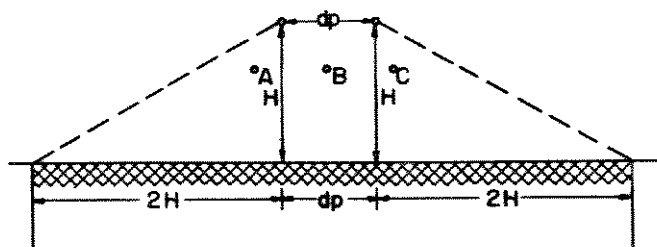


FIGURA 3.27

Nesse último modelo assume-se que a linha colete todas as descargas numa distância lateral correspondente a duas vezes o dobro da altura dos cabos pára-raios.

Em relação à geometria da estrutura, a equação 3.1.7 restringe-se à altura da torre, enquanto que a equação 3.1.8 leva em consideração não apenas a altura do cabo pára-raios como também a distância entre eles, a qual também pode variar na compactação da linha.

A descarga atmosférica numa linha de transmissão pode atingir os cabos condutores, a estrutura ou os cabos pára-raios.

A tensão resultante de uma descarga atmosférica é dada pelo produto da corrente da descarga pelo valor da impedância de surto equivalente "vista" no ponto de incidência.

Quando de uma descarga direta nos cabos condutores, a tensão resultante no ponto de incidência é [27]:

$$V_{rc} = I_o \cdot Z_{sc} / 2 = V_{ri} \quad (3.1.9)$$

$$\text{onde } Z_{sc} = 60 \ln(2\bar{h}_i / r_c) \quad (3.1.10)$$

$$\text{e } \bar{h}_i = h_i - 2S_c / 3 \quad (3.1.11)$$

No caso de descarga atingindo a estrutura, a impedância de surto equivalente é dada pela associação em paralelo da impedância de surto da estrutura com as impedâncias de surto dos cabos pára-raios [27]:

$$Z_{eq} = Z_{st} / (1 + 2Z_{st} / Z_{sp}) \quad (3.1.12)$$

Essa descarga induzirá nos cabos condutores ondas de tensão de amplitudes dependentes das capacitâncias próprias e mútuas desses cabos, e de mesma polaridade. Assim, a cadeia de isoladores mais próxima do ponto de queda da descarga ficará sujeita à diferença entre a tensão no topo da estrutura e a tensão induzida no condutor ( $V_{ri}$ ):

$$V_{rt} = I_o \cdot Z_{eq} \quad (3.1.13)$$

$$V_{ri} = (1 - K_c) V_{rt} = (1 - K_c) I_o \cdot Z_{st} / (1 + 2Z_{st} / Z_{sp}) \quad (3.1.14)$$

onde, p/ 1 cabo pára-raios:

$$K_c = \log(d'p_1 / dp_1) / \log(2H / r_p) \quad (3.1.15-a)$$

e p/ 2 cabos pára-raios:

$$K_c = \log \sqrt{dp'_1 \cdot dp'_2 / dp_1 \cdot dp_2} / \log(2H / \sqrt{dp \cdot r_p}) \quad (3.1.15-b)$$

O valor de  $K_c$  situa-se geralmente entre 0,15 e 0,30 [27], o que alivia substancialmente a solicitação  $V_{ri}$ .

Quando ocorre uma descarga, a ocorrência de corona gera por sua vez um aumento do raio do cabo pára-raios em termos elétricos, o que provoca um acréscimo do valor de  $K_c$ . Contudo, como isso depende da intensidade da corrente de descarga no cabo pára-raios, cujo valor é a priori indeterminado, mesmo após a blindagem efetiva dos cabos condutores, optou-se, conservativamente, em desconsiderar esse efeito benéfico nos cálculos.

O valor de  $Z_{st}$  pode ser previamente estabelecido de modo estimativo. Darveniza et All [32] sugerem a expressão:

$$Z_{st} = 30 \ln[2(H^2 + rbc^2) / rbc^2] \quad (3.1.16-a)$$

sendo  $rbc$  = raio da base do cone equivalente

A EPRI por sua vez utiliza a equação de Jordan:

$$Z_{st} = 60 \ln(H/rbc) + 90rbc/H - 60 \quad (3.1.16-b)$$

sendo  $rbc$  = raio da base do cilindro equivalente

Em um outro trabalho [33] Darveniza sustenta que é mínima a influência da variação da impedância de surto da torre em relação ao número de desligamentos previstos para a linha.

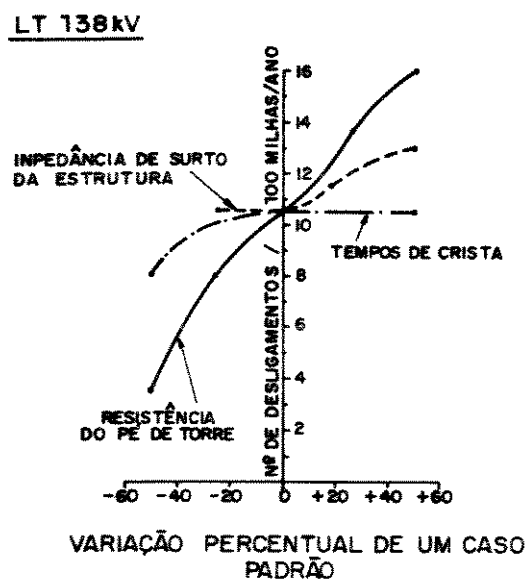


FIGURA 3.28

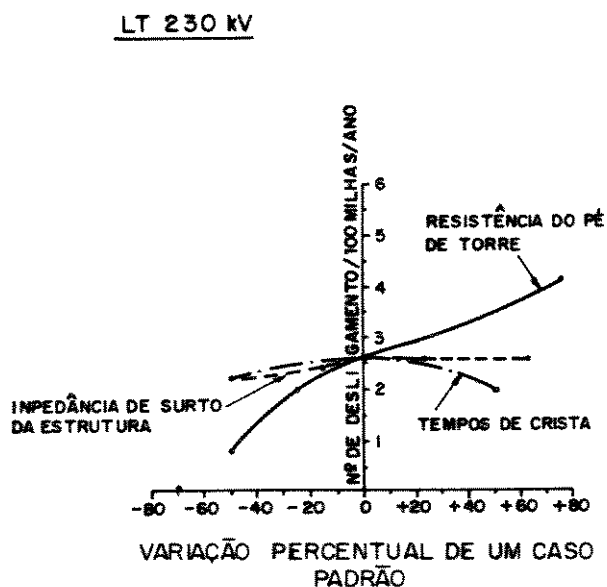


FIGURA 3.29

As figuras 3.28 e 3.29 mostram a influência da impedância de surto da torre, assim como da resistência do pé da torre e do tempo de crista da onda do surto atmosférico no número de desligamentos de uma linha padrão, para os níveis de 138kV e 230kV, respectivamente.

Nota-se que, de fato, em ambos os níveis de tensão a influência da impedância de surto da estrutura é pequena. Porém, a influência da resistência do pé de torre (impedância de aterramento) é grande, o que traz a necessidade de se conhecer, ao menos de forma aproximada, o valor da impedância de surto da estrutura. Isto porque

ambas estão associadas em série e, sendo a impedância de surto da estrutura normalmente superior à resistência de pé de torre (o que é o objetivo de um projeto), o coeficiente de reflexão para as ondas de tensão que atingem a base da torre é negativo, contribuindo para reduzir o crescimento da tensão no topo da estrutura, o que ocorre num tempo relativamente curto devido a pequena altura da estrutura.

As figuras 3.30 e 3.31 [27] mostram essa influência do aterramento nos níveis de tensão no topo da estrutura, para descargas incidindo na estrutura e no meio do vão.

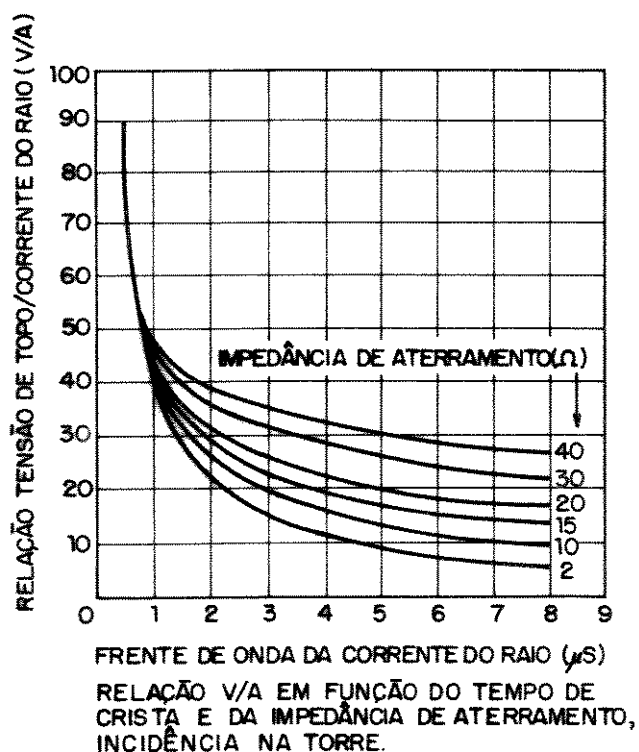


FIGURA 3.30

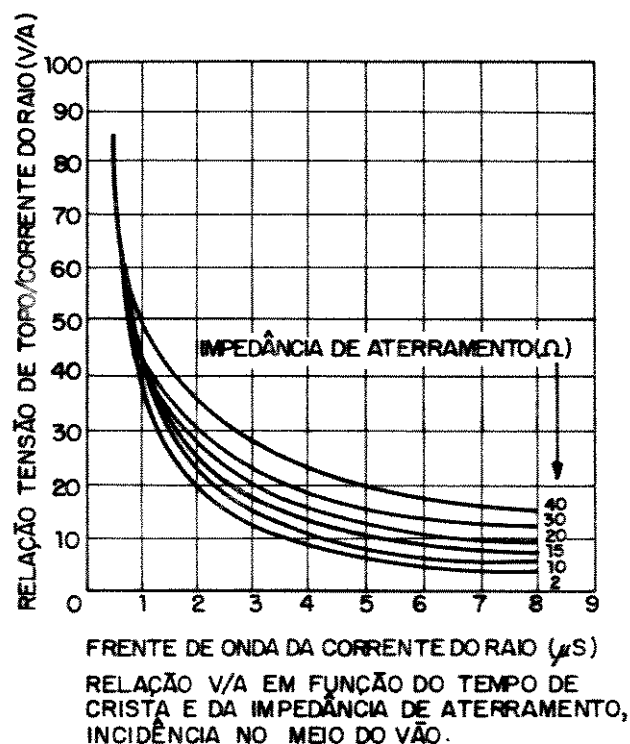


FIGURA 3.31

A tensão a que o isolador fica submetido por ocasião de uma descarga atmosférica na estrutura é, como dito, proporcional à tensão gerada no topo da estrutura, o mesmo valendo para descarga atingindo o cabo pára-raios. Sendo assim, pode-se afirmar, com base



nas figuras acima, que a impedância de aterramento age no sentido de diminuir, com maior ou menor rapidez, a tensão aplicada sobre o isolador.

Quando a descarga atinge o cabo pára-raios, tem-se um nível de tensão no ponto de incidência bastante superior ao gerado pela incidência direta na estrutura, em razão da maior impedância de surto "vista" pela descarga. Assim, o pior caso (maior tensão) ocorrerá no meio do vão de maior extensão. Esta tensão é dada por:

$$V_{mp} = I_o \cdot Z_{sp} / 2 \quad (3.1.17)$$

Do ponto de incidência da descarga partem duas ondas de tensão em sentidos opostos, rumo às estruturas adjacentes. As estruturas apresentam-se como uma descontinuidade para as ondas que chegam pelos cabos pára-raios. Dessa forma, ondas refletidas retornam ao ponto de impacto da descarga atmosférica, enquanto que em cada estrutura são geradas duas ondas refratadas: uma seguindo para o próximo vão pelo cabo pára-raios e a outra descendo pela estrutura até o solo. A tensão no topo da estrutura é então dada por:

$$V_{rt} = C_r \cdot V_{mp} \quad (3.1.18)$$

$$\text{onde } C_r = 2 \cdot Z_{eq} / (Z_{eq} + Z_{sp}) \quad (3.1.19)$$

$$\text{e } Z_{eq} = (Z_{sp} \cdot Z_{st} / Z_{sp} + Z_{st}) \quad (3.1.20)$$

$$\text{assim, } V_{rt} = V_{mp} \cdot Z_{st} / (Z_{st} + Z_{sp} / 2) \quad (3.1.21)$$

E a tensão a ser suportada pelo isolamento será:

$$V_{ri} = (1-K_c) \cdot V_{mp} \cdot Z_{st} / (Z_{st} + Z_{sp} / 2) \quad (3.1.22)$$

As expressões acima foram desenvolvidas considerando-se simplificada a descarga atmosférica como um degrau [55]. Disso decorre que não foram considerados os tempos de propagação da onda atingindo o cabo pára-raios no meio do vão, nem as perdas decorrentes da ionização do ar (corona), efeitos esses que fariam a tensão no topo da estrutura, proveniente de descarga no cabo pára-raios, ser inferior à tensão no topo da estrutura originada por uma descarga de mesma intensidade atingindo diretamente a torre. Assim, a tensão suportada pelo isolador ( $V_{ri}$ ) da equação 3.1.22 terá o mesmo valor da tensão fornecida pela equação 3.1.14. Isso, porém, não traz dificuldades para o dimensionamento da LTC, já que efetivamente se está a favor da segurança, ao se considerar a tensão no topo da estrutura igual (e máxima) para ambos os modos de descarga.

Uma última possibilidade é a da descarga cair próxima à LTC, induzindo uma tensão na linha. De acordo com dados disponíveis [27], essa tensão induzida raramente supera os 500kV. Portanto, linhas de níveis de tensão superiores a 69kV deverão suportar essa sobretensão sem ocorrência de descargas. Testes de laboratórios [23] em isoladores convencionais de 138kV indicam um nível de suportabilidade a impulso atmosférico da ordem de 670kV. Sendo assim, não se considerará esta possibilidade no dimensionamento da LTC.

##### 5. Movimento de Cabos em Curto-Circuito

Na tabela da página 69 esse parâmetro aparece como tendo uma importância relativa classificada de "algumas vezes primária".

Isso porque o estudo de movimento de cabos em curto-circuito é uma necessidade específica das linhas de transmissão compactas.

Dois condutores energizados e em paralelo estão sujeitos a uma força diretamente proporcional ao quadrado da corrente e inversamente proporcional à distância entre eles. Esta força pode ser de atração ou repulsão, dependendo do sentido das correntes nos dois condutores:

$$F = I^2 / df \quad (3.1.23)$$

Se a corrente flui no mesmo sentido em ambos os condutores, a força acarretará atração, caso contrário, repulsão.

Quando da ocorrência de um curto-circuito fase-fase, a corrente fluirá nos dois condutores em sentidos opostos, gerando assim uma força de repulsão. Após o desligamento da linha pelo sistema de proteção, os dois condutores balançam um em direção ao outro, ultrapassando a posição estática anterior e acarretando uma distância fase-fase menor que a de projeto. Se, nesse instante, estiver atuando uma força de vento com uma componente perpendicular de valor considerável num dos cabos, o efeito de diminuição da distância fase-fase pode ser ainda mais agudo, em razão do efeito conjunto da aceleração de um cabo e da frenagem do outro. A diminuição da distância fase-fase numa linha compacta, cuja característica básica é justamente apresentar um reduzido valor para esse parâmetro, poderá acarretar um novo curto-circuito fase-fase, repetindo o processo até o desligamento definitivo da linha, de acordo com a programação de atuação dos relés de proteção.

O equacionamento deste problema poderá determinar soluções que impliquem na necessidade de instalação de espaçadores fase-fase, alteração da geometria das fases, redução de vãos extensos (com o conseqüente aumento do número de estruturas da linha), ou ainda utilização de cabos de maior peso específico.

A EPRI desenvolveu um método prático para avaliação dos efeitos do movimento de cabos em curto-circuito. Estabelecendo uma situação padrão, fez variar cada parâmetro relevante, verificando a contribuição para a respectiva corrente de curto-circuito em pu. O resultado são curvas paramétricas que podem ser utilizadas na determinação de fatores de correção para casos diferentes do padronizado. As figuras 3.32 a 3.41 mostram essas variações para disposições verticais e horizontais de fases das LTC's e serão utilizadas no capítulo 4 nos cálculos de dimensionamento.

Os parâmetros para a situação padrão são:

- bitola do condutor: 795kcm - ACSR Drake
- peso do condutor: 1,626kg/m
- espaçamento entre fases: 0,9144m
- tempo de duração da falta: 10 ciclos
- vão: 183m
- tensão mecânica de trabalho: 2563kgf

### 3.1.3 Distâncias de Segurança

Como distâncias de segurança entende-se aqui as distâncias de travessias e a largura da faixa de servidão.

As distâncias verticais mínimas de travessias dependem essencialmente do obstáculo a ser atravessado e devem ser calculadas

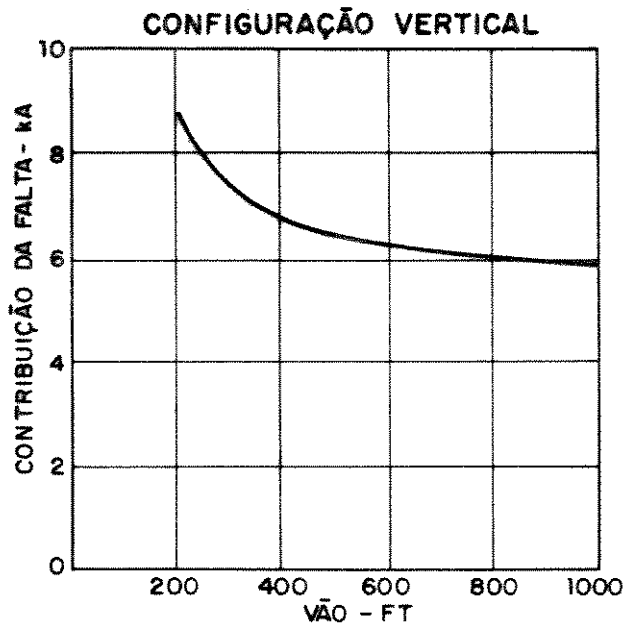


FIGURA 3.32

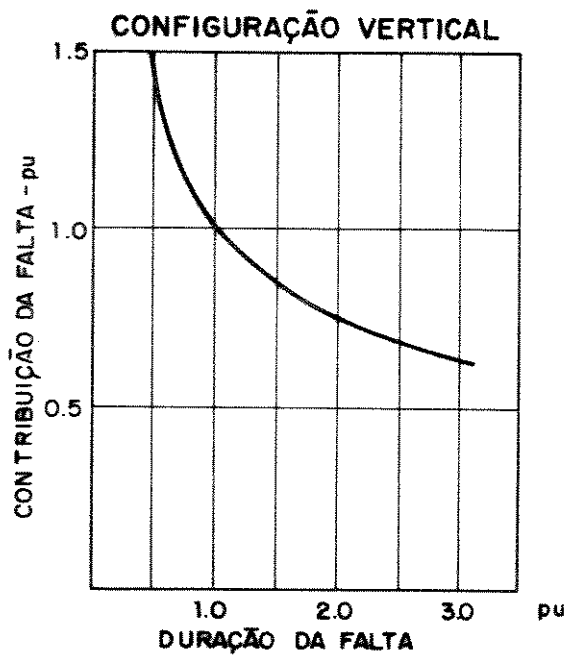


FIGURA 3.33

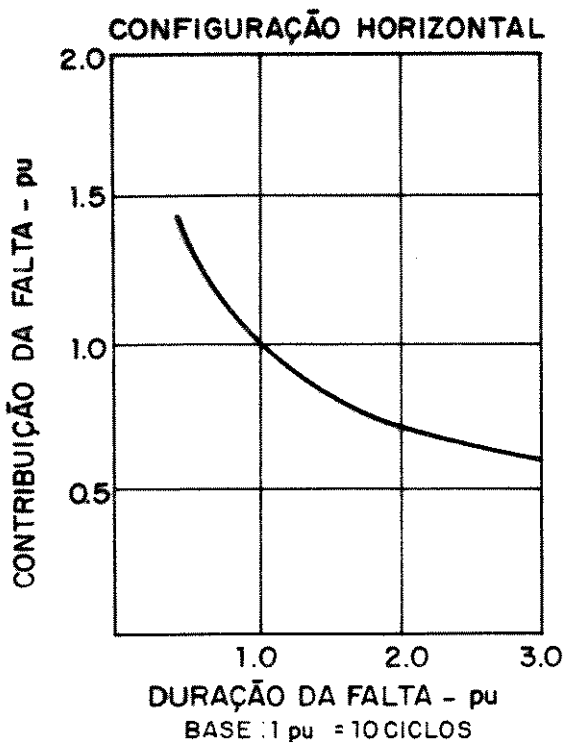


FIGURA 3.34

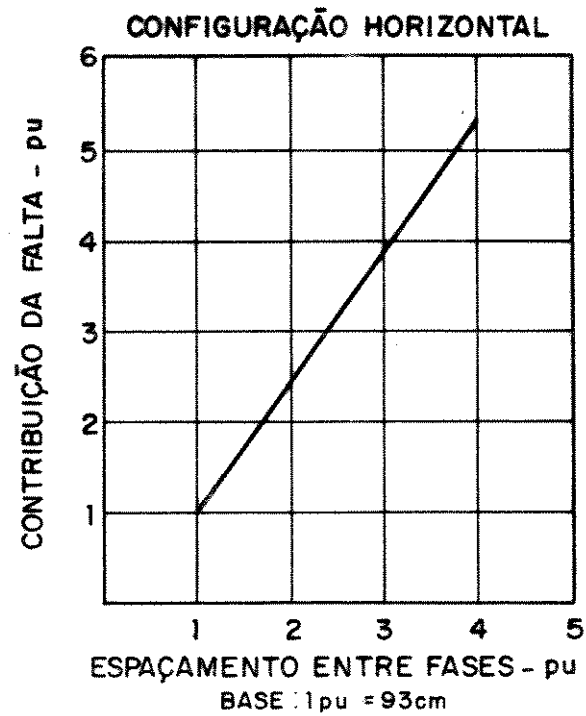


FIGURA 3.35

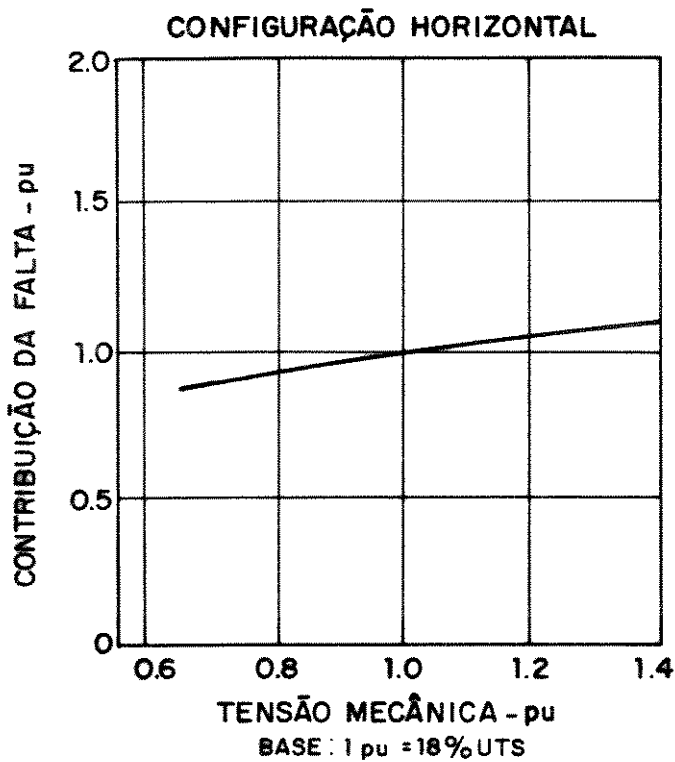


FIGURA 3.36

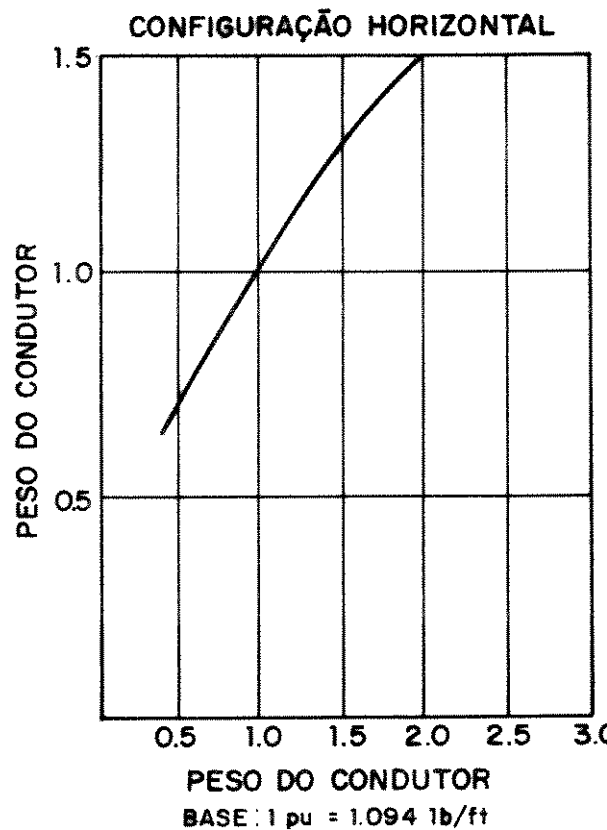


FIGURA 3.37

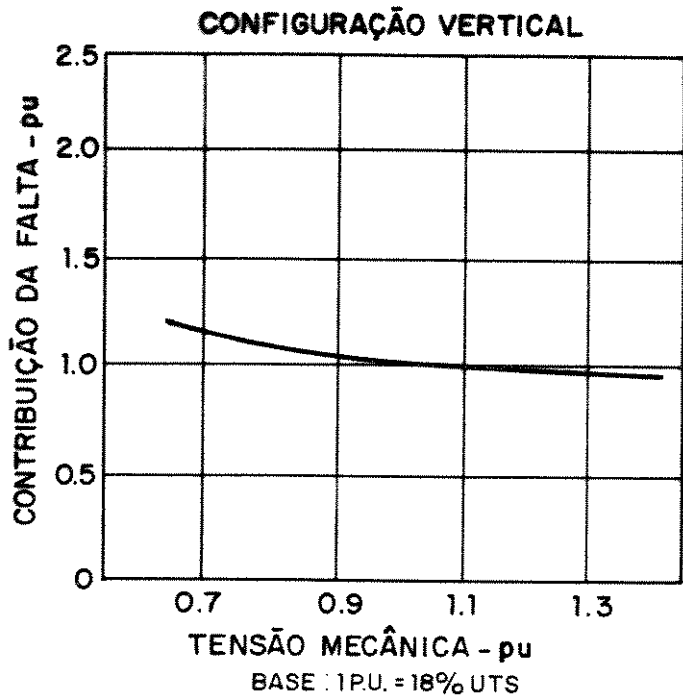


FIGURA 3.38

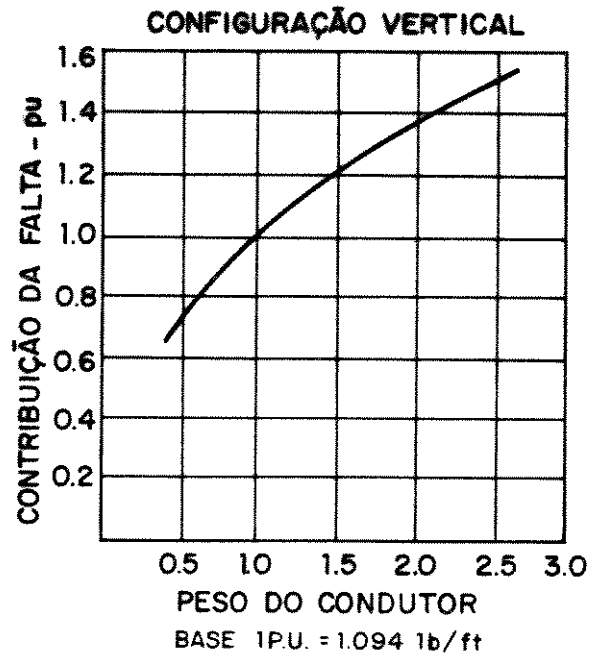


FIGURA 3.39

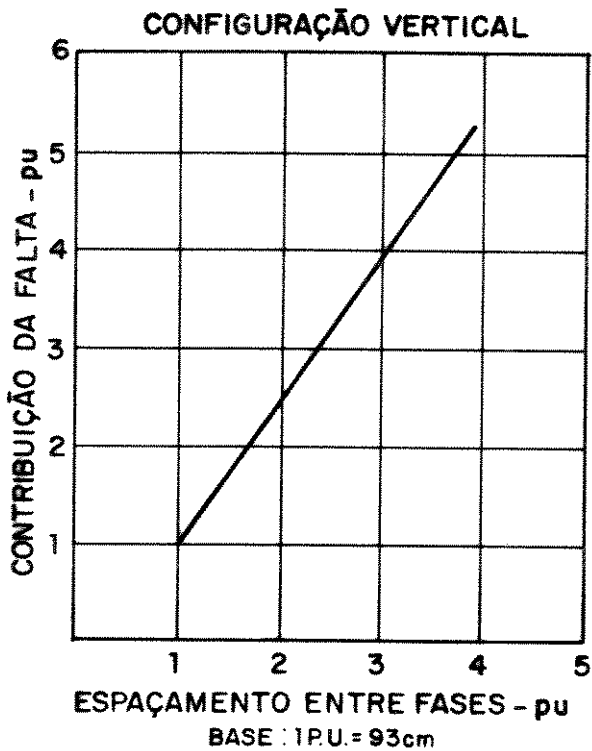


FIGURA 3.40

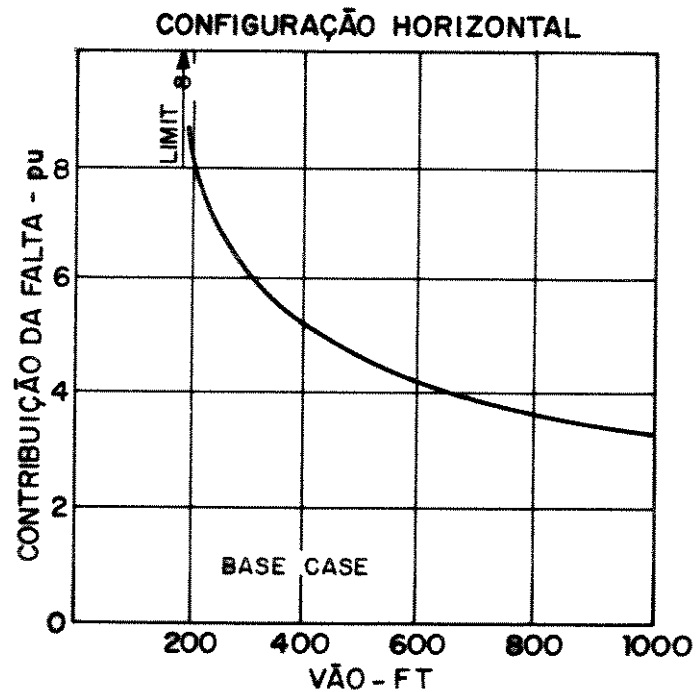


FIGURA 3.41

nas condições mais desfavoráveis: regime operacional de emergência e temperatura ambiente máxima, sem vento.

A largura da faixa de servidão é convencionalmente determinada pelo deslocamento horizontal máximo do cabo e cadeia de isoladores (quando houver) na condição de flecha e vento máximos. No caso de LTC's em área urbana, pode ocorrer que a faixa de servidão calculada desta forma apresente níveis de R.I., T.V.I. ou ruído audível acima dos valores máximos estipulados para os limites da faixa. Nesses casos, a largura da faixa deve ser ajustada pelos critérios dos níveis de interferência máximos admissíveis em cada situação, o que acarretará uma maior variação da largura da faixa ao longo da extensão da LTC.

Apesar da normalização atual não contemplar essa possibilidade, o dimensionamento levado a efeito dessa forma atenderá em qualquer situação, pois a faixa de servidão calculada previamente pelo balanço dos cabos só será ajustada se houver necessidade de se aumentá-la, como decorrência dos níveis de interferência máximos admissíveis estipulados. Verifica-se que, nesse último caso, as LTC's de 138/230kV podem atender integralmente a norma, e mesmo assim apresentar larguras de faixas de servidão muito mais estreitas que as das linhas convencionais.

O mesmo não acontece em relação às distâncias verticais de travessias. Essas são rigidamente especificadas pela norma, em valores numéricos fixos, e não são, a princípio, passíveis de serem alteradas.

A norma brasileira que trata de linhas de transmissão é a NBR 5422 [34], que em sua apresentação adverte: "... a NBR 5422



representa uma estrutura básica de um edifício do setor em questão, estabelecendo em seu conteúdo e nas suas referências toda uma rede de normas onde, necessariamente, as Concessionárias de serviços públicos de energia elétrica, firmas projetistas e fabricantes desse ramo de atividade terão de recorrer" (grifo nosso).

Esta asseveração não deixa margens a incursões mais audaciosas na otimização do projeto de linhas de transmissão. Contudo, supõe-se que uma normalização tenha como finalidade básica fornecer diretrizes de atuação, podendo e devendo ser continuamente aperfeiçoada pela experiência adquirida e por novas técnicas desenvolvidas. E esta é, justamente, a situação dos estudos de compactação de linhas de transmissão. Em vista disso, estabeleceu-se no final deste trabalho algumas considerações e sugestões no sentido de contribuir para um aperfeiçoamento contínuo das normas existentes. A adequação à normalização é um ponto importante nos estudos de compactação e é examinada detalhadamente no item 4.2.6.

Os critérios usuais para determinação das distâncias de segurança são os seguintes:

1. Distância Verticais Mínimas (distâncias de travessia)

A NBR 5422 estabelece valores fixos segundo a natureza do obstáculo atravessado. A tabela a seguir apresenta um quadro comparativo entre essas distâncias e as adotadas pela Concessionária FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A., para linhas de 138kV e 230kV:

OBSTÁCULO	138kV		230kV	
	NBR5422 (m)	FURNAS (m)	NBR5422 (m)	FURNAS (m)
	col.1	col.2	col.3	col.4
1.Locais acessíveis somente a pedestres	6,3	7,0	6,8	7,5
2.Locais acessíveis a máquinas agrícolas	6,8	7,5	7,3	8,0
3.Rodovias Federais e Estaduais de Primeira Classe	8,3	8,7	8,8	9,7
4.Demais Rodovias Estaduais e Rodovias Municipais	8,3	8,7	8,8	9,7
5.Ruas, Avenidas e Estradas de Fazenda	8,3	8,2	8,8	9,2
6.Ferrovias não eletrificadas	9,3	9,7	9,8	10,7
7.Ferrovias eletrificadas ou prevista eletrificação	12,3	12,7	12,8	13,7
8.Linhas de energia elétrica	1,8	3,0	2,9	4,0
9.Linhas de telecomunicações	2,4	3,0	3,5	4,0
10.Estruturas pertencentes a ferrovias eletrificadas	4,3	4,7	4,8	5,7
11.Edificações	4,3	4,7	4,8	5,7
12.Muros	3,3	-	3,8	-
13.Águas navegáveis (h = altura do maior mastro de embarcação)	h+2,3	h+2,7	h+2,8	h+3,7
14.Águas não navegáveis	6,3	7,0	6,8	7,5
15.Veículos rodoviários e ferroviários	3,3	-	3,8	-
16.Linhas futuras de distribuição ou telecomunicação	-	14	-	15

Os valores coligidos de FURNAS baseiam-se na antiga norma NB-182, substituída pela atual NBR 5422. Pode-se notar que a antiga norma era ainda mais restritiva que a atual, sendo que em alguns casos especificava clearances até 90cm maiores. Os valores indicados nas colunas 1 e 3 foram obtidos da equação principal indicada na norma NBR 5422 e transcrita abaixo:

$$DV = a2 + 0,01(Du/\sqrt{3}-50) + W \quad (3.1.24)$$

onde,

$W = 0$ , se:

a) o obstáculo não se insere nos tipos 8, 9 ou 16 da tabela anterior

b) o obstáculo se insere nos tipos 8, 9 ou 16 com uma tensão du inferior a 87kV

$W = 0,01(du/\sqrt{3}-50)$ , se:

o obstáculo se insere no tipo 8 com uma tensão du superior a 87kV

Quando se conhece os valores previstos de surtos de manobra, a norma permite o cálculo por um método alternativo através da seguinte equação (válida para linhas de tensão igual ou superior a 169kV):

$$DV = a_1 + \{1,15 [(\sqrt{2}Du/\sqrt{3})S_{ft} + \sqrt{2}du]/500Kf\}^{1,667} \cdot bc \cdot Cs \quad (3.1.25)$$

onde  $bc = 0$  para condições atmosféricas iguais às condições normais de temperatura e pressão e  $bc = 1,03$  para condições atmosféricas diferentes das condições normais.

Mencione-se aqui, como adendo, que na norma NBR 5422, página 24, o termo  $\sqrt{2}Du$  da equação 3.1.25 aparece erroneamente como  $\sqrt{2}Du$ , fornecendo resultados inexatos para o cálculo de DV. O presidente da Comissão de Estudos de Projeto e Execução de Linhas Aéreas do COBEI (Comitê Brasileiro de Eletricidade), confirmou a incorreção da grafia  $\sqrt{2}Du$  e solicitou que fosse considerada  $\sqrt{2}Du$ .

Essas duas equações impostas pela norma serão utilizadas nos estudos para dimensionamento da LTC (capítulo 4). Os parâmetros a2, a1, Kf e Cs são obtidos diretamente da tabela 3.3, conforme a região ou o obstáculo a ser atravessado pela linha.

TABELA 3.3

Natureza da região ou obstáculo atravessado pela linha ou que dela se aproxime	Distância básica a1 (m)	Coefficiente de segurança Cs	Fator de forma Kf	Distância básica a2 (m)
Locais acessíveis apenas a pedestres	2,8	1,2	1,15	6,0
Locais onde circulam máquinas agrícolas	4,3	1,2	1,15	6,5
Rodovias, ruas e avenidas	4,3	1,2	1,15	8,0
Ferrovias não eletrificadas	6,7	1,2	1,15	9,0
Águas navegáveis *	H+0,8	1,2	1,15	H+2,0
Águas não navegáveis	4,3	1,2	1,15	6,0
Telhados e terraços	2,8	1,2	1,15	4,0
Paredes	1,5	1,0	1,15	3,0
Linhas de energia elétrica	0,0	1,2	1,40	1,2
Linhas de telecomunicação	0,6	1,2	1,40	1,8

\* H = altura do mastro da embarcação

## 2. Faixa de Servidão

Conforme mencionado, a NBR 5422 determina critérios para cálculo da faixa de servidão com base no deslocamento da cadeia de isoladores e do cabo pela ação de vento máximo.

Para LTC's de 138/230kV com configuração horizontal, vertical-circuito duplo ou delta, pode-se desenvolver a expressão primitiva dada na norma para linhas convencionais. O resultado é:

$$L = 2(dr+db+ds/2+Scm.sen\gamma+Du/150) \quad (3.1.26)$$

-Scm é dado por:

$$Scm = Vmax^2.p/(8.18\%.Trp) \quad (3.1.26-a)$$

onde Vmax = vão máximo da linha

(Obs.: Sc genérico é igualmente obtido para o respectivo valor de V)

-  $Y$  é dado por:

$$Y = \arctg(ev/p) \quad (3.1.27)$$

-  $ev$  é dado por:

$$ev = q_0 \cdot \delta \cdot 2rc \cdot \text{sen}^2\theta \quad (3.1.28)$$

-  $q_0$  é dado por:

$$q_0 = 1/2 \cdot \rho \cdot V_p^2 \quad (3.1.29)$$

- determinação de  $\delta$  :

Para linhas atravessando áreas urbanas,  $\delta$  pode ser obtido através da expressão abaixo, deduzida do gráfico da norma NBR 5422:

$$\delta = -0,00025V + 0,70 \quad (3.1.30)$$

- $\rho$  pode ser calculado por:

$$\rho = \frac{1,293 \times (16.0000 + 64t_{\min} - ALT)}{(1 + 0,00367t_{\min}) \times (16.0000 + 64t_{\min} + ALT)} \quad (3.1.31)$$

-  $V_p$  é dado por:

$$V_p = K_r \cdot K_d \cdot (H/10)^{0,125} \cdot V_b \quad (3.1.32)$$

onde  $K_r = 0,67$  para áreas urbanas e  $K_d$  é determinado diretamente do gráfico da figura 3.42.

- determinação de  $V_b$ :

Para um período de retorno de 50 anos,  $V_b$  é obtida diretamente da figura 3.43. Para períodos de retorno diferentes de 50 anos,  $V_b$  pode ser obtida através de:

$$V_b = \beta - \ln[-\ln(1-1/Tr)]/\alpha \quad (3.1.33)$$

$\alpha$  e  $\beta$  são obtidos das figuras 3.44 e 3.45, respectivamente.

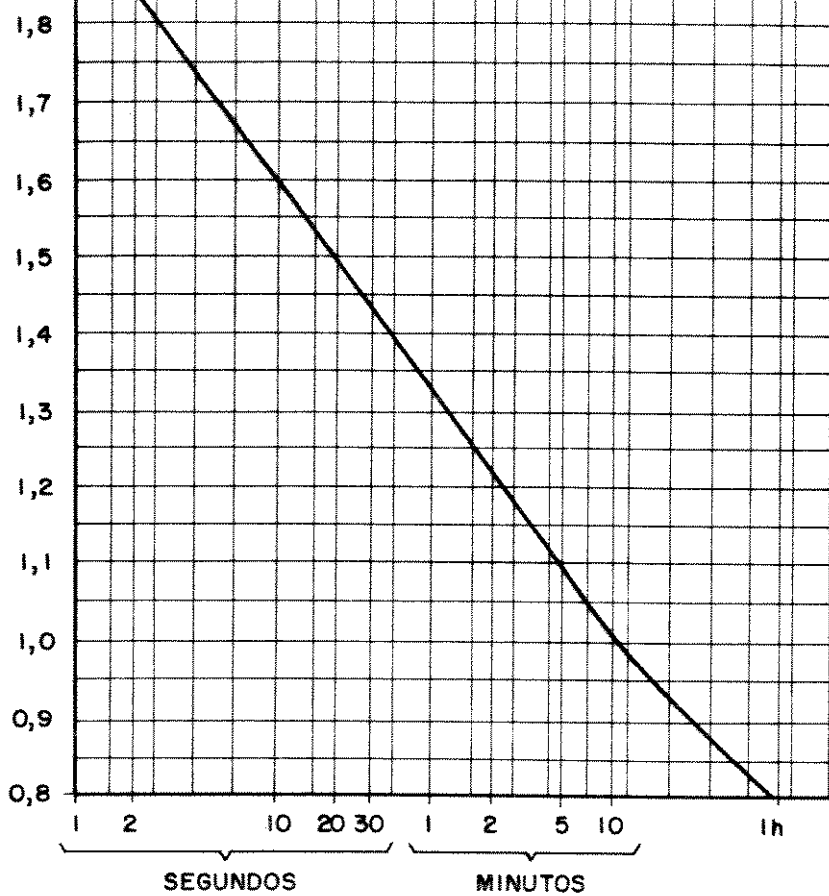


FIGURA 3.42

VELOCIDADE BÁSICA DO VENTO (m/s)

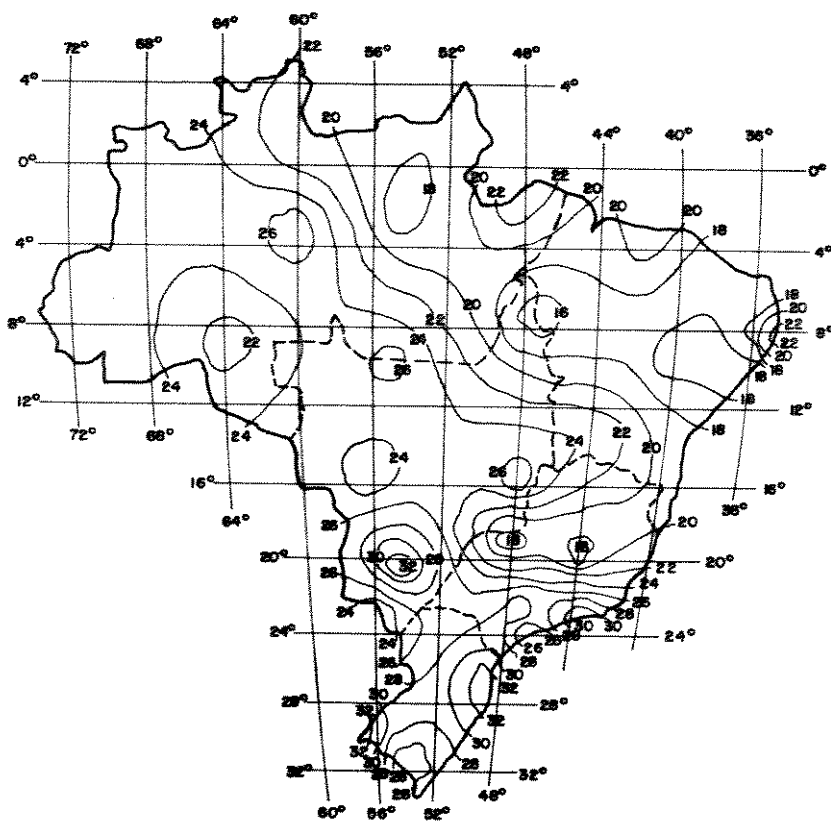


FIGURA 3.43

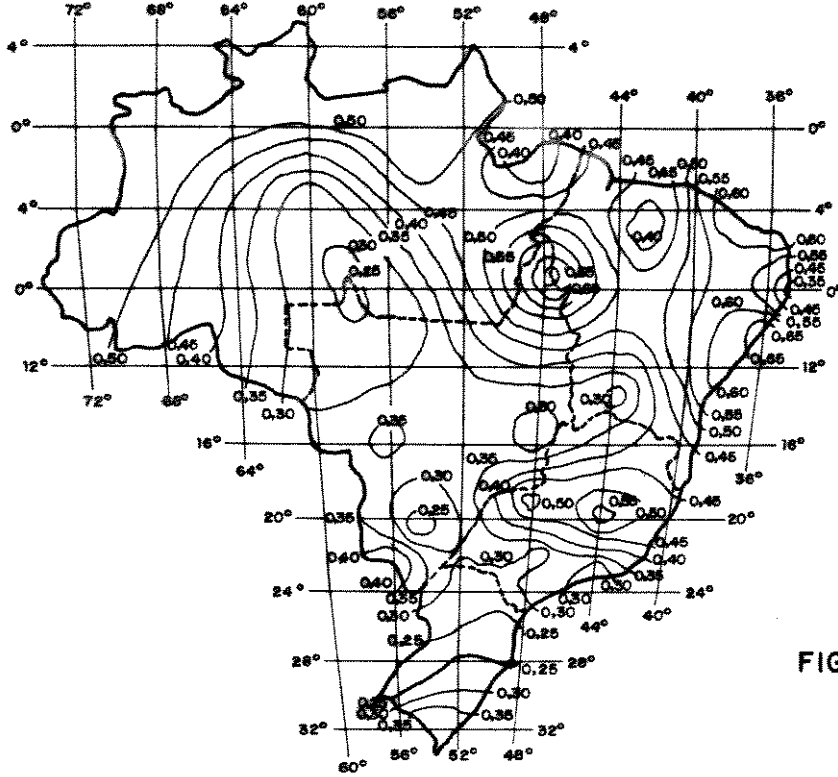


FIGURA 3.44

parâmetro  $\alpha$  da distribuição de Gumbel  $(m/s)^{-1}$

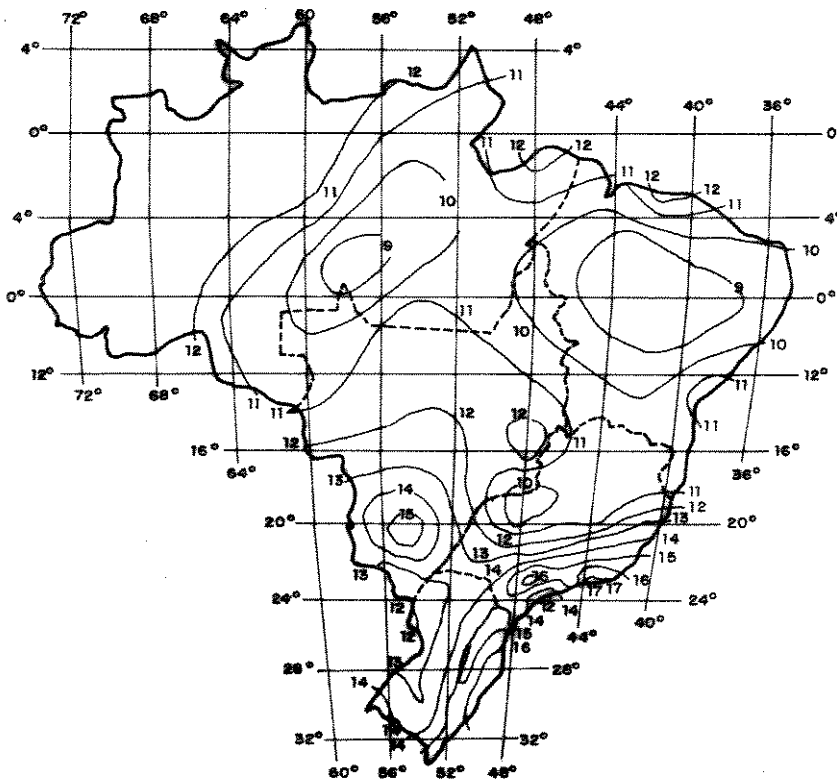


FIGURA 3.45

parâmetro  $\beta$  da distribuição de Gumbel  $(m/s)$

### 3.1.4 Manutenção

A manutenção de linhas de transmissão pode ser executada com a linha energizada ou fora de operação, sendo que a primeira forma também é chamada de "manutenção em linha viva".

#### 1. Manutenção com linha energizada (linha viva)

A manutenção em linha viva pode ser feita das seguintes maneiras:

- a) pessoa no potencial do solo, utilizando equipamento isolante para execução do serviço.
- b) pessoa isolada do solo por algum modo, porém ainda utilizando equipamento isolante para execução do serviço.
- c) pessoa trabalhando no potencial da linha, conectada diretamente a uma das fases.

A possibilidade c é usualmente empregada em linhas de ultra-alta e extra-alta tensão, e se presta bem para reparos nos sub-condutores e ferragens conectados diretamente aos cabos, como grampos de suspensão, espaçadores e amortecedores. Os requisitos para esse tipo de manutenção são a qualidade da isolação à terra da pessoa no potencial da linha e o espaçamento fase-fase disponível.

O problema, no caso das LTC's, é justamente a distância fase-fase. A norma brasileira é omissa quanto à distância mínima admissível entre fases para manutenção ao potencial da linha. A norma



NESC norte-americana, por seu lado, estipula como valores mínimos nesse caso 1,52m e 2,44m respectivamente para 138kV e 230kV.

Vê-se assim que a possibilidade desse tipo de manutenção depende essencialmente do grau de compactação da linha, sendo mais difícil de ser implementada em LTC's com disposição horizontal de fases. A configuração final da estrutura é que determinará, portanto, a viabilidade ou não desse procedimento.

As possibilidades a e b são usualmente empregadas em linhas de distribuição e não podem, evidentemente, ser transpostas indistintamente para LTC's em áreas urbanas.

Em linhas de distribuição (até 13,8kV) a pessoa trabalha com roupa isolante e isola as fases no local do serviço com tubos isolantes providos de abertura longitudinal. Para LTC's de 138/230kV torna-se necessário afastar fisicamente as fases umas das outras, de forma a se obter condições de segurança adequadas. Esse tipo de procedimento não é simples, requerendo uma padronização adequada que, mais uma vez, depende da configuração da estrutura compacta.

A EPRI [9] desenvolveu uma metodologia para manutenção de sua LTC compacta experimental de 138kV. Apesar do procedimento completo ser válido apenas para aquele tipo de configuração, ou para outras linhas com distâncias fase-fase semelhantes, a filosofia básica, isto é, o afastamento das fases para a manutenção, deverá ser observada em todas as LTC's em áreas urbanas.

A figura 3.46 mostra uma estrutura daquela linha sendo preparada para uma manutenção da maneira b mencionada acima, para a troca de um isolador. Note-se as três fases separadas de uma distância conveniente para permitir o trabalho.



FIGURA 3.46

No caso de uma linha de circuito duplo com disposição vertical de fases como a da figura 2.3, a dificuldade está diretamente relacionada com a fase objeto da manutenção. Para uma manutenção num dos isoladores da fase inferior de um dos circuitos, basta afastar as fases inferiores correspondentes aos dois circuitos. Para uma manutenção num dos isoladores da fase do meio, é preciso afastar as duas fases centrais e as duas inferiores, e para uma manutenção nos isoladores das fases superiores é preciso afastar as 6 fases.

## 2. Manutenção em linha desenergizada

Em sistemas de distribuição é possível desligar um trecho de uma linha para facilitar a manutenção. Nas LTC's isso não é absolutamente uma regra, mas uma exceção. De fato, manutenção em LTC's desenergizadas acontecem quase que exclusivamente em situações de emergência e, geralmente sob condições climáticas adversas. O ideal nesses casos é que se proceda ao afastamento das fases no local de reparo, nos moldes do procedimento de manutenção em linha viva.

Tanto no caso de manutenção em linha viva como no de manutenção com a linha desenergizada é preciso considerar alguns aspectos específicos de segurança. A operação dos disjuntores deve estar completamente bloqueada, e o nível de isolação das estruturas adjacentes deve ser reduzido de forma a proteger o local de trabalho contra transitórios de tensão.

A redução do nível de isolação das estruturas adjacentes é feita através de um "semi-jampeamento" do isolador, ou dos braços separadores de fase, por meio de hastes que proporcionem um gap com um nível de tensão disruptiva adequado. Abdul Mousa [35] adverte porém que isto não protege contra sobretensões atmosféricas. Portanto, não se recomenda essa prática em condições atmosféricas desfavoráveis. Além disso, é absolutamente necessário que o aterramento das estruturas adjacentes apresente baixos níveis de resistividade, de forma a evitar que níveis perigosos de sobretensões consigam atingir o local de trabalho.

As dificuldades para manutenção de linhas compactas, principalmente as localizadas em áreas urbanas, aumentam ainda mais a importância de uma escolha adequada do tipo e forma do isolador para uma determinada região, de maneira a diminuir ao máximo a necessidade de manutenções corretivas.

Os custos diretos e indiretos desse tipo de manutenção apresentarão também valores significativamente elevados num primeiro momento, abrangendo, além da aquisição dos equipamentos necessários, dispêndios no aperfeiçoamento de diretrizes operacionais, bem como de treinamento adequado de pessoal.

A manutenção preventiva, por outro lado, pode ser feita por inspeção visual (a olho nu ou com binóculos), com auxílio de termo-detectores, e através da medição dos níveis de R.I., T.V.I. e ruído audível nos limites da faixa de servidão. Esse tipo de inspeção não causa maiores transtornos a terceiros, mesmo em zonas densamente povoadas.

### 3.2 *LIMITAÇÕES EXTRÍNSECAS*

Limitações extrínsecas são aquelas decorrentes da implantação da LTC numa área urbana. Trata-se de dificuldades que surgem na implantação da linha e que normalmente não são consideradas ou então são facilmente solucionáveis nas linhas convencionais atravessando zonas rurais ou de baixa densidade populacional. O conhecimento dessas limitações proporciona um "ajuste fino" no dimensionamento da LTC em área urbana.

#### 3.2.1 Induções Eletrostáticas e Eletromagnéticas

##### 1. Induções Eletrostáticas

Um objeto metálico isolado da terra e próximo a uma linha de transmissão fica sujeito a uma tensão induzida por acoplamento capacitivo devido às capacitâncias mútuas. Quanto maior for a impedância de dispensação para a terra, tanto mais elevada será a tensão induzida. Uma pessoa em contato com a terra tocando esse objeto ficará então sujeita a uma corrente de descarga através do seu corpo, cuja magnitude praticamente independe de sua impedância própria, pois

o objeto sob efeito do campo comporta-se como uma fonte de corrente, com impedância extremamente elevada (da ordem de  $M\Omega$ ).

As LTC's implantadas em áreas urbanas podem dar ensejo a diversas situações em que uma pessoa fique sujeita a uma descarga por indução eletrostática. Pode-se imaginar, por exemplo, uma LTC de 230kV margeando um corredor de ônibus. O ônibus (objeto metálico isolado de grandes dimensões) assemelha-se a um circuito aberto energizado, o qual descarregar-se-á através da primeira pessoa que tocá-lo para subir, ou que, estando em seu interior, tocar o solo quando descer.

A figura 3.47 apresenta os acoplamentos capacitivos existentes na situação de um objeto metálico próximo a uma linha de transmissão.

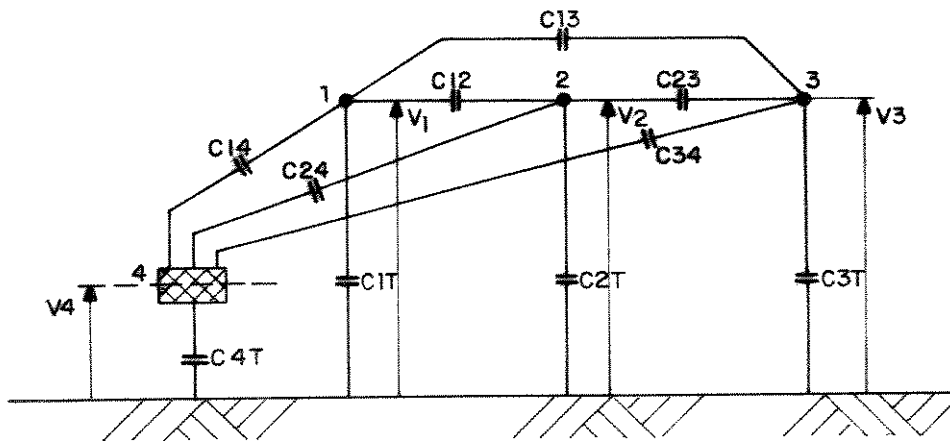


FIGURA 3.47

Pode-se deduzir [36] que a tensão induzida em circuito aberto entre o objeto e a terra é:

$$V_{oc} = V_4 = \frac{Y_{14} \cdot V_1 + Y_{24} \cdot V_2 + Y_{34} \cdot V_3}{Y_{41} + Y_{42} + Y_{43} + Y_{44}} \quad [\text{kV}] \quad (3.2.1)$$

onde  $V_i$  = tensão eficaz da fase  $i$  em kV, e  $Y_{ij} = j\omega C_{ij}$  = admitância entre os elementos  $i$  e  $j$ , em Siemens/m

E a corrente de curto-circuito para terra em valor eficaz é dada por:

$$I_{cc} = (Y_{41}.V_1 + Y_{42}.V_2 + Y_{43}.V_3) \cdot 10^6 \text{ [mA/m]} \quad (3.2.2)$$

$$\text{ou } I_{cc} = V_{oc}(Y_{41} + Y_{42} + Y_{43} + Y_{4t}) \cdot 10^6 \text{ [mA/m]} \quad (3.2.3)$$

Nota-se nas equações 3.2.1 e 3.2.2 que tanto a tensão induzida como a corrente de curto são funções da tensão de operação, e que  $V_{oc}$  independe do comprimento do objeto em que se manifesta o efeito eletrostático, o que não ocorre com  $I_{cc}$ .

No caso de LTC's em áreas urbanas deve-se dirigir a atenção para a determinação dessa corrente de descarga proveniente da indução num determinado objeto, pois será esse o valor da corrente suportada por uma pessoa que toque o objeto.

Como as LTC's em áreas urbanas apresentarão necessariamente vãos relativamente curtos para os padrões usuais de linhas de transmissão, a variação da altura dos condutores do ponto de fixação na estrutura até o ponto de flecha máxima no meio do vão também será pequena. Assim, pode-se considerar constante o campo elétrico ao longo do vão da LTC, ao se tomar a altura média do cabo nesse intervalo.

A suposição de campo elétrico constante permite calcular diretamente o valor da tensão induzida no objeto como função do campo, e, como visto acima, essa aproximação parece ser bastante razoável

para LTC's em áreas urbanas. A seguir, indica-se a determinação dessa tensão para alguns tipos de objetos de acordo com o método desenvolvido pelo comitê 36 do CIGRÉ [36]. Os parâmetros aqui não explicitados encontram-se na Lista de Simbologia e serão utilizados no capítulo 4 no dimensionamento da LTC.

- fio horizontal

Quando o fio está disposto paralelamente ao eixo da linha, seu potencial é dado pelo produto do campo elétrico ao nível do solo pela sua altura efetiva (h):

$$Voc = Es.h \quad (3.2.4)$$

- fio perpendicular

Neste caso deve-se usar a integração do campo elétrico em todo seu comprimento:

$$Eeq = [1/(x2-x1)] \int_{x1}^{x2} E(x)e^{-j\theta(x)}dx \quad (3.2.5)$$

onde,

Eeq = campo elétrico equivalente

x1,x2 = posições dos pontos extremos

E(x) = componente vertical do campo elétrico

$\theta$  = ângulo de fase

$$e Voc = [h/(x2-x1)] \int_{x1}^{x2} E(x)e^{-j\theta(x)}dx \quad (3.2.6)$$

onde,

h = comprimento do fio

- telhado metálico (galpão)

Aqui o campo varia de um ponto a outro da área ocupada pelo telhado e o potencial deve ser estimado como:

$$V_{oc} = \bar{E} \cdot \bar{h} \quad (3.2.7)$$

onde  $\bar{E}$  e  $\bar{h}$  são respectivamente o campo médio e a altura média do telhado.

- objetos volumosos

Para objetos em que as três dimensões apresentam a mesma ordem de grandeza, o potencial é dado por:

$$V_{oc} = K_1 \cdot E_s \cdot \bar{h}_o \quad (3.2.8)$$

onde  $\bar{h}_o = h_o/2 + \Delta$

Valores típicos de  $K_1$  são mostrados nas figuras 3.49 e 3.50 para objetos cuja forma pode ser aproximada para um paralelepípedo ou um cilindro, respectivamente.

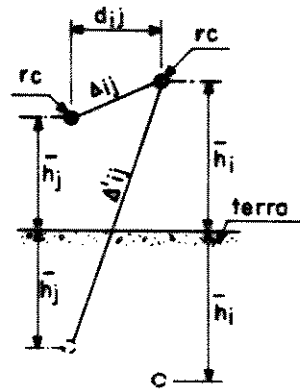
A determinação do campo elétrico ao nível do solo a uma determinada distância da linha será feita através do método sugerido por Moreau e Gary [41]. Os passos são os seguintes:

1) Determinação da matriz dos coeficientes de potenciais

[P]:

Os termos de  $P_{ii}$  e  $P_{ij}$  dessa matriz são obtidos de acordo com a configuração da LTC, conforme indicado na figura 3.48-a:





$$p_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \cdot \text{Log}_e \frac{2\bar{h}_i}{r_{eq}}$$

$$p_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \cdot \text{Log}_e \frac{\Delta'_{ij}}{\Delta_{ij}}$$

onde:

$$\Delta'_{ij} = \sqrt{d_{ij}^2 + (\bar{h}_i + \bar{h}_j)^2}$$

$$\Delta_{ij} = \sqrt{d_{ij}^2 + (\bar{h}_i - \bar{h}_j)^2}$$

$$r_{eq} = R \cdot \sqrt[n]{n \cdot \frac{r_c}{R}}$$

FIGURA 3.48-a

2) Determinação da matriz das capacitâncias [C]:

$$[C] = [P]^{-1}$$

3) Determinação da matriz das densidades de carga [Q]:

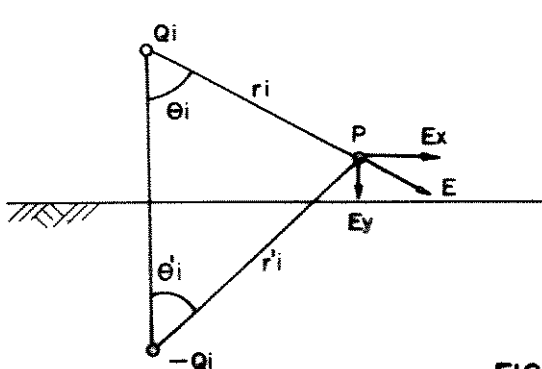
$$[Q] = [C] \cdot [V]$$

onde [V] = matriz das tensões fasoriais nos cabos:

$$[V] = [ V_n \quad (-1/2 - j\sqrt{3}/2)V_n \quad (-1/2 + j\sqrt{3}/2)V_n ]$$

4) Determinação do campo elétrico:

O campo elétrico em um ponto P distando  $r_i$  das fases  $i$  é obtido como ilustrado na figura 3.48-b abaixo [56]:



$$E_x = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^k Q_i (\sin \theta_i / r_i - \sin \theta'_i / r'_i)$$

$$E_y = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^k Q_i (\cos \theta_i / r_i + \cos \theta'_i / r'_i)$$

$$E = \sqrt{|E_x|^2 + |E_y|^2}$$

FIGURA 3.48-b

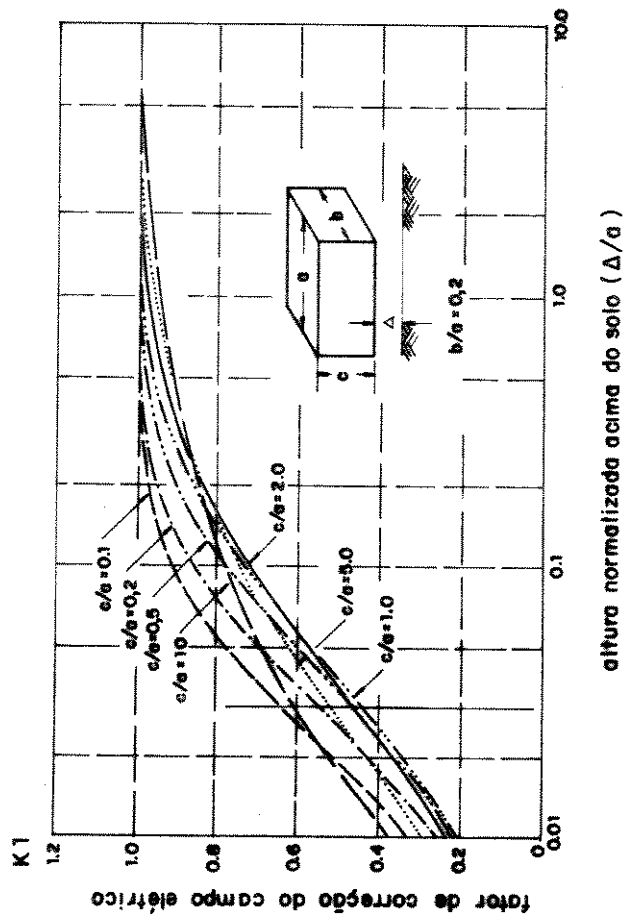


FIGURA 3.49

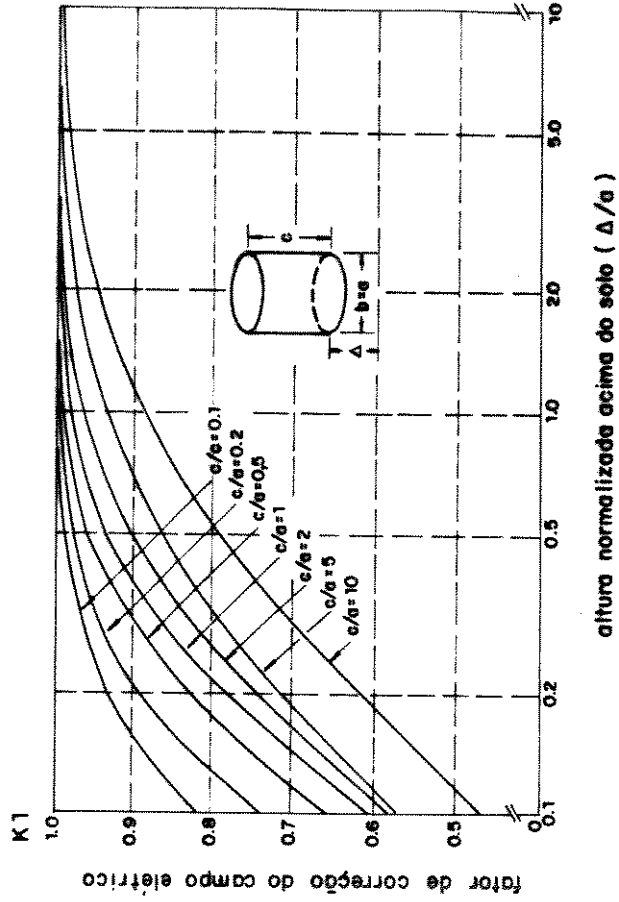


FIGURA 3.50

Ao se impor o ponto P ao nível do solo, a componente horizontal  $E_x$  do campo se anula, e o campo  $E_s$  se reduz à componente vertical  $E_y$ .

As capacitâncias entre o objeto e as fases são, via de regra, menores que 1% da capacitância do objeto para a terra [36]. Dessa forma, as admitâncias do objeto para as fases podem ser desprezadas em relação à admitância para a terra e a equação 3.2.3 toma a forma:

$$I_{cc} = V_{oc} \cdot Y_{4T} \quad (3.2.9)$$

$$\text{ou } I_{cc} = V_{oc} \cdot j\omega C_{4T} \quad (3.2.10)$$

O cálculo de  $C_{4T}$  pode ser obtido por aproximação, fazendo-se uso de uma forma geométrica conhecida para representar o objeto considerado. Veículos auto-motores, inclusive ônibus e caminhões, são geralmente representados por um cilindro horizontal, cuja capacitância por unidade de comprimento é dada por:

$$C_{4T} = 4\pi\epsilon_0 / \ln[(hcl + \sqrt{hcl^2 - rcl^2} / (hcl - \sqrt{hcl^2 - rcl^2})] \quad (3.2.11)$$

onde  $hcl = rcl + \Delta$

Para objetos cuja forma não possa ser aproximada satisfatoriamente por um cilindro, a capacitância pode ser estimada com razoável precisão através de:

$$C = 4\pi\epsilon_0 \Gamma \quad (3.2.12)$$

onde  $\Gamma = (a+b+c)/3$

com  $a, b$  ( $a > b$ ) = principais dimensões horizontais do objeto e  $c$  = altura do objeto.

A capacitância  $C4T$  é dada por:

$$C4T = K2.C \quad (3.2.13)$$

$K2$  é um fator de correção que pode ser obtido dos gráficos das figuras 3.51 e 3.52. Uma vez determinados os valores de  $Voc$  e  $C4T$ ,  $Icc$  pode ser obtida através da equação 3.2.10.

Se o valor de  $Icc$  ou  $Ich$  estiver num nível acima do inicialmente estipulado, pode-se igualmente impor um nível de  $Icc$  máximo tolerável ( $Iccadm$ ), e a partir daí obter-se o valor do campo elétrico correspondente. O passo seguinte seria alterar a configuração inicial da estrutura através de modificações em sua altura e na geometria da disposição das fases, de modo se ter aquele campo elétrico máximo ao nível do solo que correspondesse ao valor imposto de  $Icc = Ich$ .

Para esse caso pode ser utilizada a metodologia de Deno [36], a qual estabelece a seguinte expressão para o campo elétrico máximo permissível:

$$E_{max} = Iccadm / jw\epsilon_0.S \quad (3.2.14)$$

onde  $E_{max}$  = campo elétrico máximo em kV/m e  $S$  = área equivalente do objeto dada por:  $\Delta.C4T/\epsilon_0$  [ $m^2$ ]

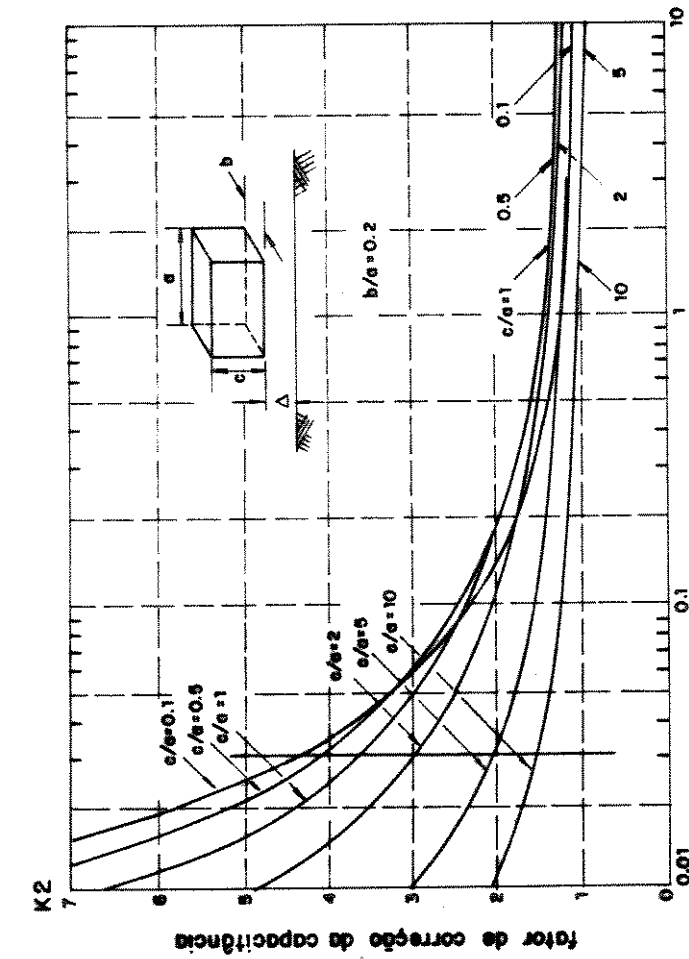


FIGURA 3.51

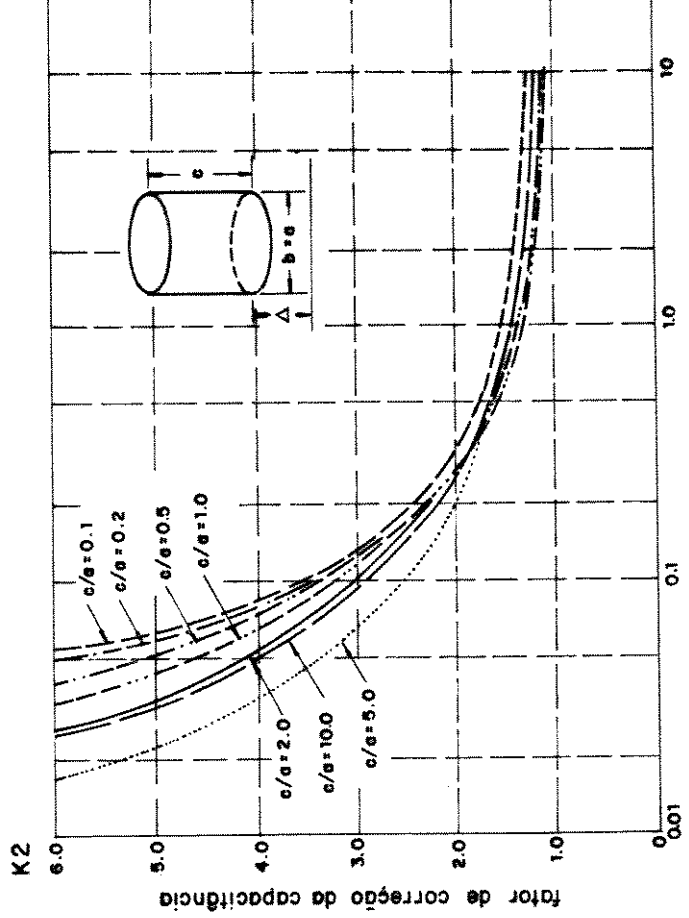


FIGURA 3.52

Assim,

$$E_{\max} = I_{ccadm}/jw\Delta C4t \quad (3.2.15)$$

O valor máximo de  $I_{cc}$  geralmente é estipulado em 1mA para limite de percepção e 5mA para limite de segurança (corrente "let go").

## 2. Induções Eletromagnéticas

As induções decorrentes de campo magnético dependem das magnitudes das correntes indutoras e da quantidade de linhas de fluxo que atravessam a "área" delimitada pelo objeto que sofre a indução e a sua imagem, dada pela profundidade da corrente de retorno pela terra. Assim, o valor da tensão induzida depende também da proximidade do objeto e de sua posição em relação à linha de transmissão. A pior situação, portanto, é para um objeto longo situado paralelamente ao longo da linha e próximo a seu eixo.

Como o valor da tensão induzida depende da corrente indutora, uma linha de distribuição pode induzir potenciais mais elevados do que os que seriam gerados por uma linha de transmissão, principalmente em razão do desbalanceamento de fases mais crítico das LD's. Existem mesmo estudos [36] que afirmam que esse desequilíbrio pode ser tal que o valor da maior corrente em regime seja superior ao da corrente de curto-circuito.

Além do aspecto mencionado acima, existem ainda outras considerações que contribuem para diminuir a importância desse tipo de indução no caso específico de LTC's atravessando áreas urbanas:

I. Como as linhas de alta tensão (138kV e 230kV) não estão sujeitas a grandes desbalanços de fases, a indução de um objeto

próximo à linha se dará essencialmente pelas diferentes distâncias de cada uma das fases ao objeto considerado. Como a característica básica da LTC é justamente a menor distância entre fases, as distâncias de cada uma das fases até o objeto também serão semelhantes, e o valor da tensão induzida final será menor, em decorrência do maior cancelamento mútuo da soma das tensões induzidas separadamente por fase.

II. Conforme será mostrado a seguir, o valor da tensão induzida depende do comprimento do objeto. Em áreas urbanas, porém, é muito difícil uma situação de proximidade de um longo objeto metálico com a linha; ainda mais situado paralelamente ao traçado. Aqui não se faz referência, naturalmente, a linhas de telecomunicações ou distribuição que utilizem a faixa de servidão da LTC, ou mesmo suas estruturas, mas sim a objetos metálicos não energizados, portanto não protegidos e sujeitos a tensões induzidas por campo magnético, como portões metálicos residenciais, grades, tubulações de água, de gás, etc. A análise, pois, enfocará o problema do ponto de vista da segurança humana.

III. A maior altura das LTC's em relação às LD's também diminui o valor da tensão induzida.

Como contrapartida a essas condições favoráveis, existe a possibilidade de um curto-circuito fase-terra de uma LTC, onde o valor da corrente pode ser tal que provoque uma tensão induzida de valor considerável no objeto próximo à linha.

A análise das tensões induzidas por LTC's em áreas urbanas, enfocará dois objetos metálicos padrões: uma cerca ou gradil metálico e um tubo metálico enterrado. Esse estudo está baseado na metodologia desenvolvida nas referências [37], [38] e [39].

Para cercas com  $m$  fios:

$$V_{th} = (1/m) \sum_{f=1}^m \sum_{i=1}^k I_{ci} \cdot Z_{if} \quad (3.2.19)$$

A impedância de Thévenin ou impedância de curto-circuito é obtida simplesmente considerando que os condutores da linha representam fontes de corrente constantes, isto é, não são influenciadas pelo circuito paralelo representado pelo fio da cerca. Para se obter a impedância equivalente de Thévenin, as fontes de corrente são substituídas por circuitos abertos; assim, a impedância de Thévenin é simplesmente a impedância própria do fio da cerca acrescida do aterramento da cerca:

$$Z_{th} = Z_{ff} + Z_{gi} \quad (3.2.20)$$

Se uma pessoa tocar uma cerca aterrada em um dos pontos, a corrente de choque será dada pela tensão de Thévenin dividida pela impedância total do circuito (figura 3.54).

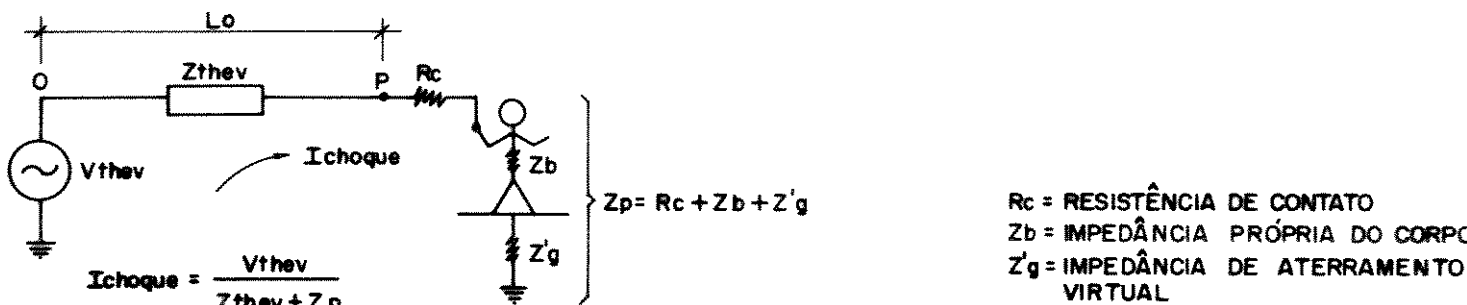


FIGURA 3.54



Os valores distribuídos de  $z_{ff}$  e  $z_{if}$  podem ser determinados a partir das seguintes relações [20]:

$$z_{ff} = 0,000988f + R_f + j0,002894f[\log(r_f/GMD) + \log(D_g/r_f)] \quad [\Omega/km] \quad (3.2.21)$$

$$\text{com } D_g = 658\sqrt{\rho_g / f} \quad [m] \quad (3.2.22)$$

$$z_{if} = 0,000988f + j0,002894f \cdot \log(D_g / \sqrt[3]{d_{1f} \cdot d_{2f} \cdot d_{3f}}) \quad [\Omega/km] \quad (3.2.23)$$

O valor de  $R_f$  para fios de cerca de arame, pode ser estimado conforme a relação abaixo, proposta por Kent C. Jaffa [39]:

$$R_f = 1.180 / (\text{peso do fio em kg/m}) \quad [\Omega/km]$$

Considerando que a impedância mútua entre o condutor e o fio da cerca é um parâmetro distribuído, vem:

$$V_{th} = \left( \sum_{i=1}^k I_{ci} \cdot z_{if} \right) L_o \quad (3.2.24)$$

Pela análise dimensional, tem-se:

$$V_{th} = [A \cdot \Omega/km \cdot km] = [V/km] \cdot km$$

A quantidade  $V/km$  é dimensão de campo elétrico longitudinal. Portanto:

$$V_{th} = E_l \cdot L_o \quad [V] \quad (3.2.25)$$

O valor  $E_l \cdot L_o$  é a tensão existente num ponto da cerca distando  $L_o$  quilômetros do ponto de aterramento.

No caso de uma cerca não aterrada em nenhum ponto, considerada absolutamente isolada da terra, uma pessoa que a tocasse

não sentiria choque, pois estaria configurado um circuito aberto, sem passagem de corrente pela terra (corrente magnética).

A tensão nesse caso é zero exatamente no meio da cerca, assumindo o valor  $\pm E_l.L_o/2$  nas extremidades. A diferença desses valores extremos fornece a tensão total induzida:

$$V_{th} = E_l.L_o/2 - (-E_l.L_o/2) = E_l.L_o$$

O caso mais geral porém, é de uma cerca aterrada em pelo menos dois pontos. A análise de uma cerca multi-aterrada pode ser feita também pela análise parcial e consecutiva de cercas aterradas em dois pontos.

No caso de dois aterramentos, existe uma corrente circulando continuamente no circuito assim formado, a qual é função das impedâncias de aterramento e da impedância própria do fio da cerca, ou seja, da impedância de Thévenin.

Assim, a corrente que circula é dada por:

$$I_m = E_l.L_o/Z_{th} = E_l.L_o/(Z_{g1}+Z_{ff}+Z_{g2}) \quad (3.2.26)$$

$Z_{g1}$  e  $Z_{g2}$  são respectivamente as impedâncias de aterramento nos pontos 1 em  $x=0$  e 2 em  $x=L_o$ . Atribuindo-se o sinal negativo para a corrente que sai do aterramento e positivo para a corrente que entra, escreve-se, para as tensões nos pontos  $x=0$  e  $x=L_o$ :

$$V(x=0) = -I_m.Z_{g1} = -E_l.L_o.Z_{g1}/(Z_{g1}+Z_{ff}+Z_{g2}) \quad (3.2.27a)$$

$$V(x=L_o) = I_m.Z_{g2} = E_l.L_o.Z_{g2}/(Z_{g1}+Z_{ff}+Z_{g2}) \quad (3.2.27b)$$

A figura 3.55 mostra a variação da tensão ao longo da cerca. Nota-se claramente que a tensão induzida é função do comprimento do objeto, e que varia linearmente ao longo dele.

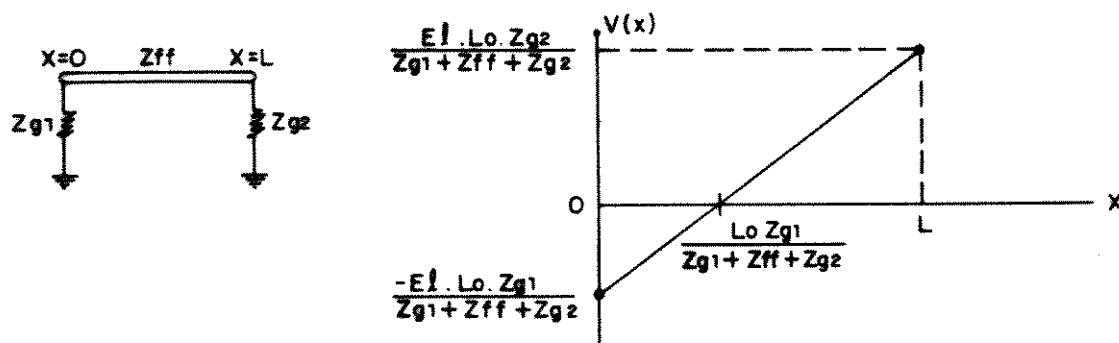


FIGURA 3.55

A impedância  $Z_{ff}$  do fio da cerca pode, na maioria dos casos, ser considerada desprezível em relação às impedâncias de aterramento  $Z_{g1}$  e  $Z_{g2}$ . Isso é ainda mais razoável para cercas de múltiplos fios, que é a configuração usual de cercas ou gradis metálicos. Feita essa consideração, e igualando-se  $Z_{g1}$  a  $Z_{g2}$ , obtém-se os dois extremos da cerca com tensões iguais, independentemente dos valores de  $Z_{g1}$  e  $Z_{g2}$ .

Portanto, um método razoável para mitigar o problema da indução magnética é seccionar eletricamente o objeto metálico em diversos trechos curtos, aterrando os dois extremos de cada trecho de forma a se ter impedâncias de aterramento semelhantes.

Contrariamente ao caso da indução eletrostática, a impedância do corpo humano pode alterar significativamente a corrente que flui para a terra (figura 3.54). Sendo assim, deve-se tomar medidas apropriadas para que a máxima tensão de Thévenin induzida no

objeto não provoque uma corrente superior ao valor pré-determinado (1mA ou 5mA), quando o objeto é tocado por uma pessoa com uma impedância própria estimada segundo condições propositadamente desfavoráveis. Essas condições são:

1. Utilização de um valor de impedância de corpo humano abaixo da média. Segundo alguns autores [38] a impedância humana pode variar de  $500\Omega$  até alguns  $M\Omega$ . Estipular-se-á então conservativamente o valor de  $1K\Omega$  para a impedância  $Z_b$ .

2. Desconsideração de efeitos benéficos existentes, como maior resistência de aterramento virtual devido a asfalto, brita, solados de borracha, etc.

#### B) Tubos Metálicos Enterrados

Jaffa e Stewart [38] desenvolveram um método prático para determinação da tensão induzida em tubos de irrigação metálicos enterrados e paralelos a linhas de distribuição e transmissão. Apesar de enterrados, no caso estudado por eles existiam pontos aflorados na superfície dos tubos de irrigação, para conexão com linhas secundárias, e era nesses pontos que ocorriam choques nos trabalhadores das fazendas.

Nas LTC's em áreas urbanas não existe, a princípio, possibilidade de toque de transeuntes em tubulações metálicas enterradas (água, gás, eletricidade, etc.). A única situação de contato direto com essas tubulações seria uma manutenção subterrânea. Pressupõe-se, no entanto, que isso seria executado por funcionários

especializados, providos de equipamentos de segurança adequados, como roupas e luvas isolantes.

Uma outra possibilidade de problema ocasionado por indução eletromagnética, que exige um monitoramento mais cuidadoso, é a da indução de tubos nos quais circulam correntes contínuas para proteção contra a corrosão. Esse sistema é utilizado no Brasil pela PETROBRÁS em seus oleodutos, e a corrente induzida pode ser tal que interfira no sistema de controle da corrente contínua injetada na tubulação. Contudo, também esta situação não é usual em áreas urbanas de cidades de médio e grande porte, pois esses oleodutos seguem das refinarias até os respectivos terminais de derivados de petróleo, os quais situam-se, via de regra, na periferia das grandes cidades.

Como a indução eletromagnética depende essencialmente do valor das correntes de fase e da geometria de sua disposição, pode-se transcrever o método desenvolvido por Jaffa e Stewart para o caso de LTC's em áreas urbanas, que, como visto, apresenta alguns casos em que é importante se ter um conhecimento da magnitude das tensões induzidas e das formas de minimizar seus efeitos.

As figuras 3.56 a 3.64 mostram a variação do campo elétrico longitudinal induzido por unidade de corrente de fase indutora, em função da distância do eixo da linha, para várias geometrias de disposição de fases e níveis de desbalanço.

Os níveis de desbalanço em amplitude compreendem 5%, 10% e 15%, sendo que ao nível de 5% foi incluída uma defasagem de  $3^\circ$  no ângulo de fase. Como era previsto, quanto maior o nível de desbalanço, maior o campo elétrico longitudinal induzido. Nota-se ainda que o

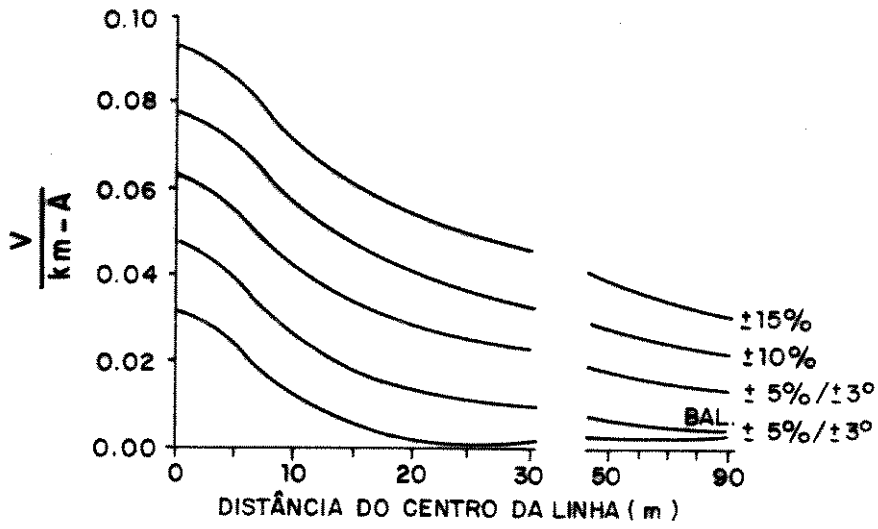


FIGURA 3.56

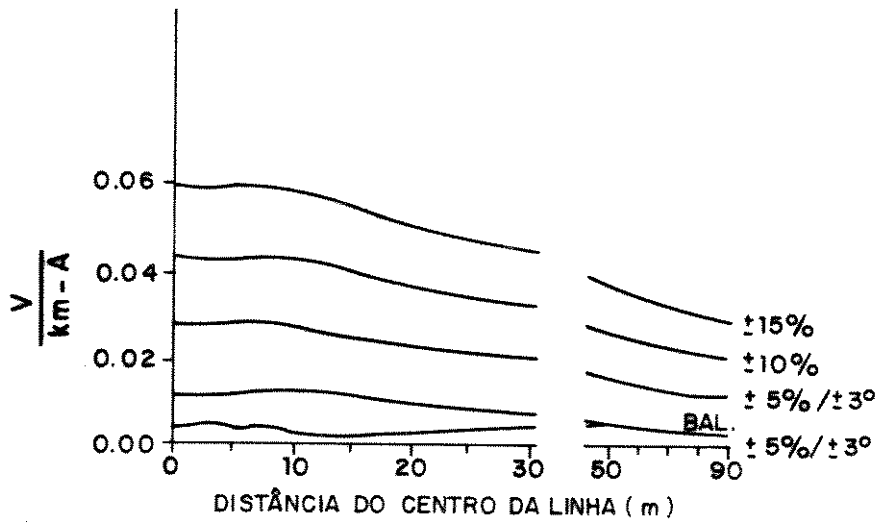


FIGURA 3.57

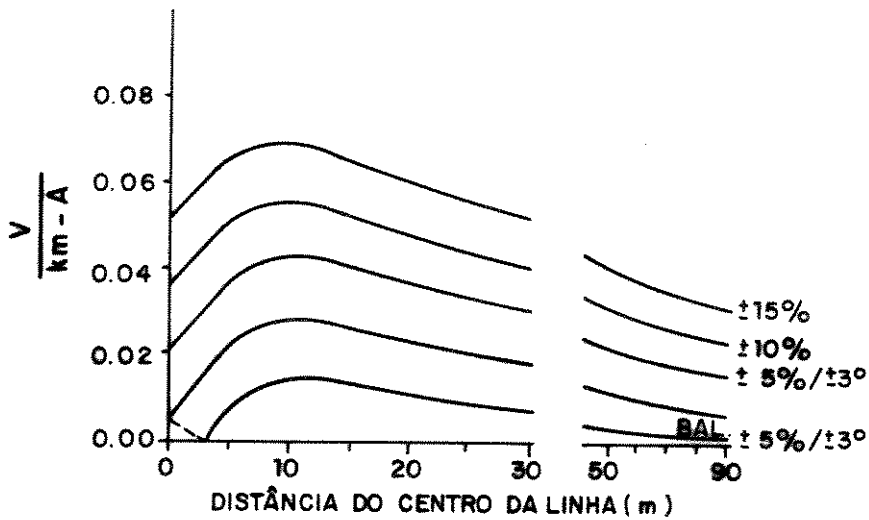


FIGURA 3.58

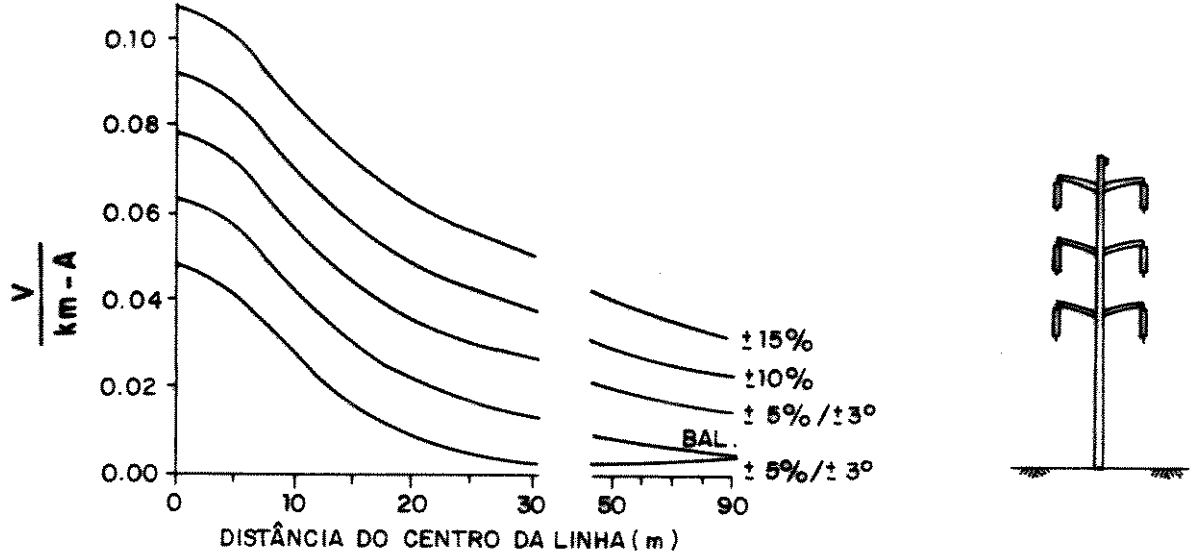


FIGURA 3.59

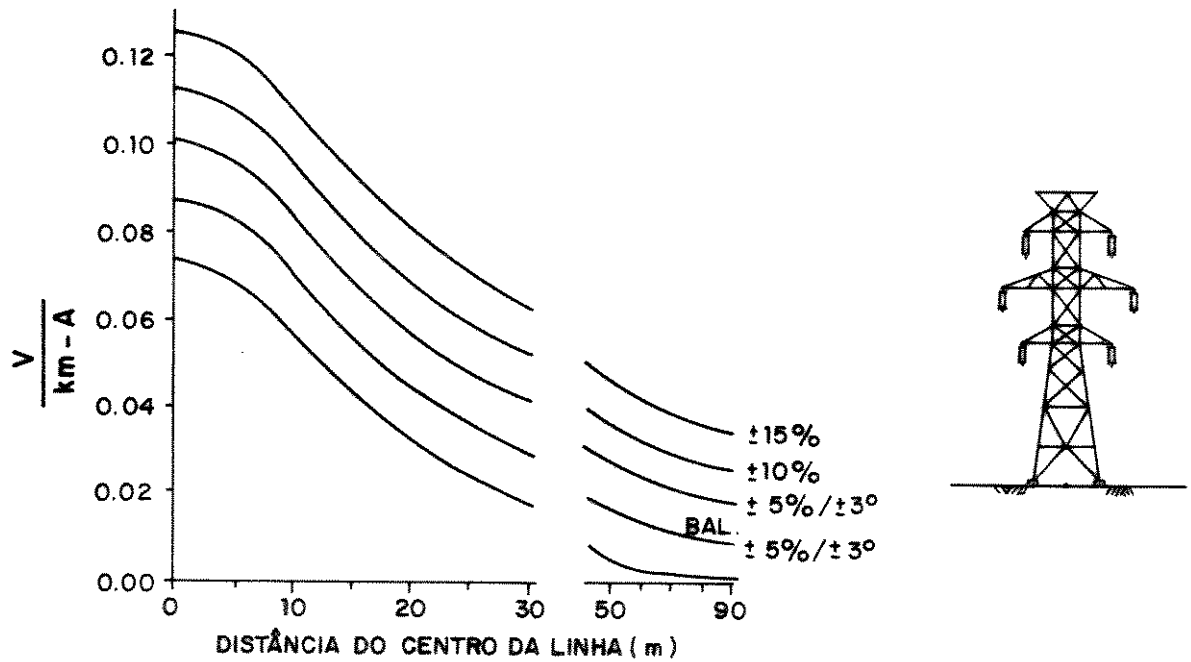


FIGURA 3.60

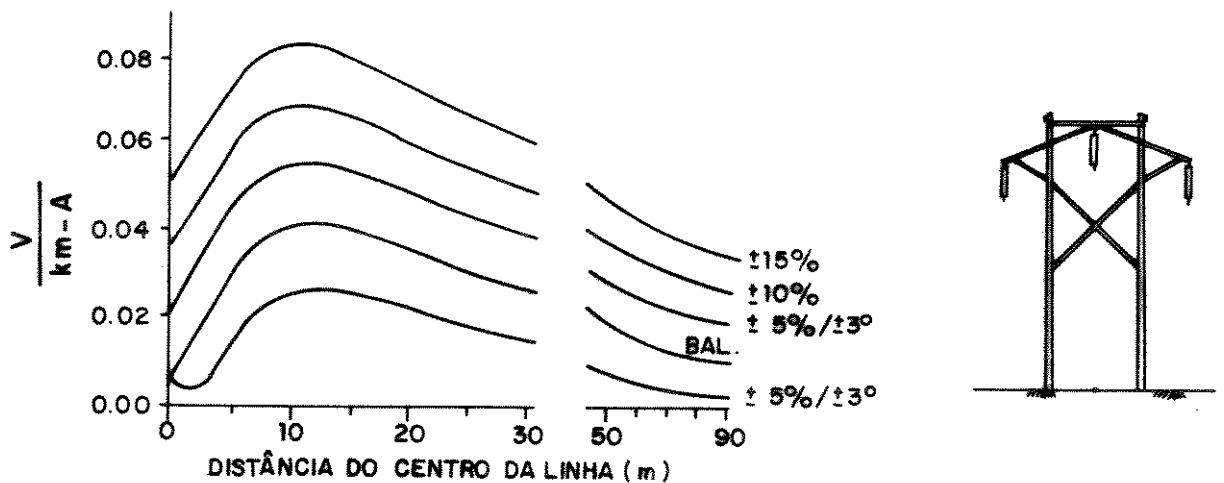


FIGURA 3.61

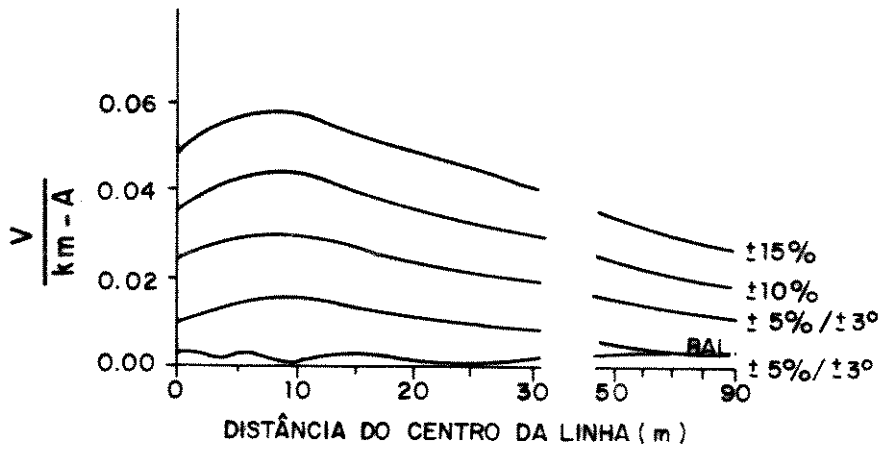


FIGURA 3.62

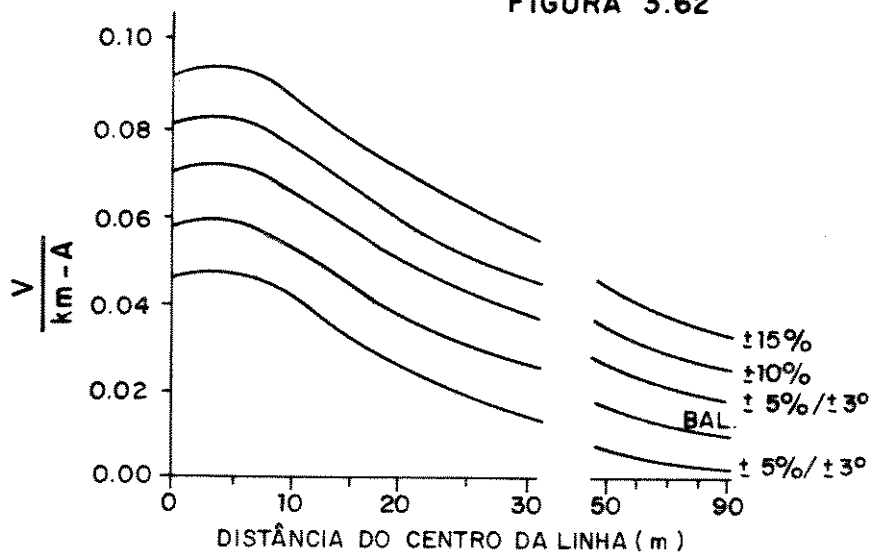


FIGURA 3.63

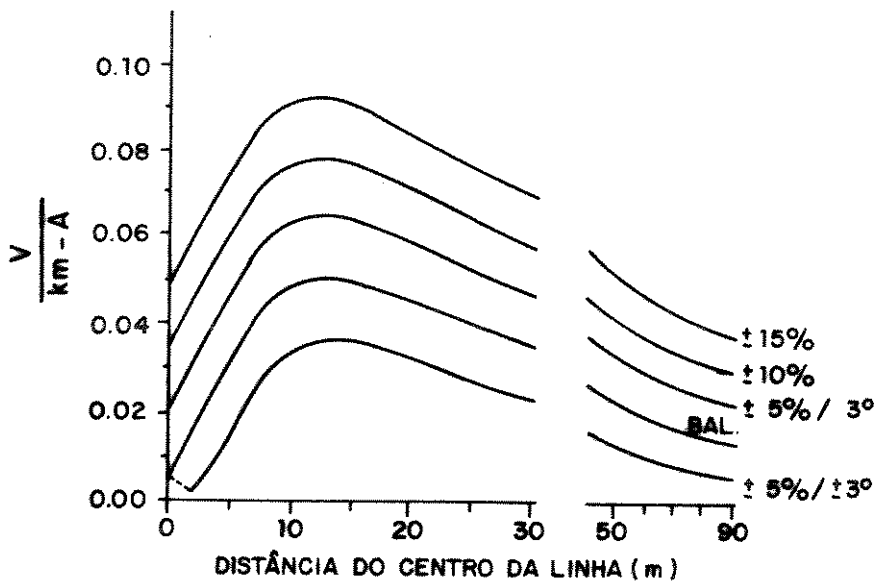


FIGURA 3.64



desbalanço de 5% com a defasagem de  $3^\circ$  pode se compor de tal forma que gere um campo menor do que o campo gerado com fases balanceadas.

O valor obtido na ordenada (em V/km.A) é multiplicado pelo valor da corrente de fase e pelo fator de correção de tensão mostrado na figura 3.65. O resultado fornece a tensão de Thévenin no final da tubulação, ou seja, o maior valor de tensão induzida.

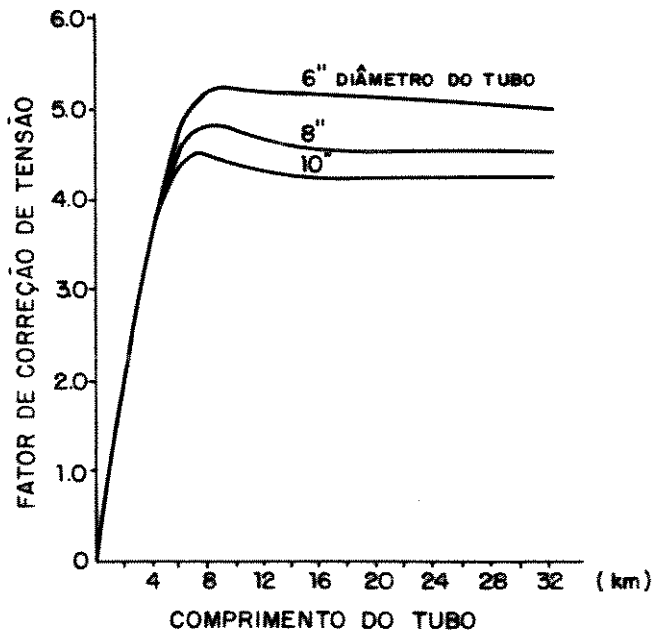


FIGURA 3.65

Como medidas para minimizar o efeito da indução eletromagnética transcreve-se a seguir as sugeridas pelo autor deste trabalho na referência [40]:

a) arranjo conveniente de fases

Uma linha de transmissão com disposição de fases em delta gera um campo elétrico longitudinal sensivelmente inferior ao das linhas de configuração horizontal ou vertical.

b) cabo pára-raios de baixa impedância

Como a tensão induzida é função dos cabos condutores das linhas de transmissão que tenham passagem de corrente, pode-se considerar também a corrente induzida no cabo pára-raios. Essa corrente, porém, tem um sentido inverso do das correntes nos condutores principais, pois de acordo com a lei de Lenz ela circula num sentido tal que procura gerar um campo que se contraponha ao campo que a gerou. Portanto, ajuda a diminuir a influência do campo total que atinge a cerca ou tubo e, conseqüentemente, a tensão induzida nesses objetos.

Assim, se no trecho paralelo a uma cerca ou tubo, o cabo pára-raios de aço for substituído por um outro de menor impedância, como o do tipo ACSR (cabo de alumínio com alma de aço), ou mesmo de cobre, o valor da corrente induzida nesse cabo aumentará e, por conseguinte, também a sua influência "benéfica" na redução da tensão nas cercas e tubos.

c) transposição de fases

A transposição de fases é um recurso útil para minimizar o desbalanceamento das fases em decorrência das induções mútuas, e conseqüentemente reduzir o campo elétrico longitudinal. A dificuldade nesse caso é que, tanto para as tubulações como para as cercas, a transposição tem de ser completa no intervalo de paralelismo, de modo a se ter o máximo cancelamento possível de tensão induzida.

Para o caso específico de tubos de irrigação, podem ainda ser estudadas as seguintes possibilidades:

d) Uso de cordoalhas para "melhorar" o aterramento dos tubos. Essa medida contudo só é eficaz quando se obtém uma resistência menor do que a fornecida pela própria tubulação.

e) Uso de uma "fonte" de tensão, formada por cabos horizontais enterrados para neutralizar a tensão induzida.

Uma restrição é a proximidade desses cabos com as LD's e LT's, pois isso aumenta o acoplamento que ocorre numa falta causada por tensão induzida por surto atmosférico.

f) Isolamento dos tubos de irrigação ou troca por tubos isolantes. Ambas as soluções são, evidentemente, totalmente eficientes.

A dificuldade no caso do isolamento de tubos, que pode ser feito através de fitas isolantes industriais, reside na dificuldade prática de implementação num tubo já enterrado, ou o aumento do custo no caso de um projeto de instalação.

A possibilidade da troca dos tubos metálicos por tubos isolantes fornece uma solução definitiva para o problema. Existe todavia também aqui uma ressalva: se for feita a troca em apenas um trecho, considerado como o mais crítico, os pontos de união com o restante dos tubos metálicos ficam configurados como interrupções físicas, sujeitos portanto ao maior valor de tensão induzida no respectivo trecho.

### 3.2.2 Aterramento

Nas LT's em EHV e UHV, o aterramento das estruturas segue geralmente disposições já pré-estabelecidas segundo o nível de resistividade do solo. Quanto mais elevado for esse valor, maior será a quantidade de "fios contrapeso" conectados à base das torres metálicas. Nos casos mais desfavoráveis as torres são interligadas entre si por esses fios, que são fitas ou cordoalhas metálicas enterradas geralmente a uma profundidade de 50cm no solo.

O aterramento da linha, além de prover um desempenho adequado frente a descargas atmosféricas, deve também propiciar níveis compatíveis de potenciais de passo e de toque. Além disso, a linha com estruturas aterradas funciona ainda como um "anexo" das respectivas malhas de terra das subestações fonte e carga, contribuindo significativamente para o escoamento de correntes no caso de elevação do potencial dessas malhas. Esse efeito é geralmente levado em conta no dimensionamento da malha de terra das subestações, pois, caso contrário, a malha poderia ou ser superdimensionada ou apresentar níveis incompatíveis de potenciais de passo.

No caso de LTC's atravessando áreas urbanas, o problema se reveste de maior complexidade. Já a maior densidade populacional traz a necessidade de se obter valores absolutamente confiáveis de potenciais de passo e de toque junto às estruturas. No entanto, exatamente por se tratar de área urbana, isso é especialmente difícil de se conseguir.

Sempre que possível deve se fazer uso de fios contrapeso interligando as estruturas. Esse tipo de aterramento proporciona uma

boa equalização de potencial e, no caso de falta para a terra, propicia uma atuação efetiva da corrente circulante (corrente de blindagem) no sentido de atenuar a indução eletromagnética em objetos metálicos próximos à linha. Esse último efeito também é proporcionado pelos cabos pára-raios (vide item 3.2.1- tópico 2 -Induções Eletromagnéticas, parte B - tubos metálicos enterrados).

No entanto, inúmeras interferências físicas normalmente encontradas em áreas urbanas, como fundações de construções, redes subterrâneas de água, de luz, de gás, de sistemas de telecomunicação, etc., podem dificultar ou mesmo impedir a utilização de fios contrapeso. Resta o recurso das hastes de aterramento que, mesmo possibilitando o aterramento das estruturas, apresentam deficiências na equalização dos potenciais de superfície quando comparadas aos fios contrapeso.

O consenso atual é considerar a influência do sistema de aterramento como um todo, onde os fios contrapeso das estruturas das linhas de transmissão e as malhas das respectivas subestações interagem entre si, na transferência de potenciais e escoamento de correntes de curto provenientes de surtos atmosféricos e de manobras. Isso permite, conforme mencionado, otimizar o dimensionamento das malhas de terra das subestações. Essa filosofia, todavia, traz um sério inconveniente no caso de uma LTC instalada em área urbana: uma elevação de potencial na subestação fonte (geralmente situada na região suburbana da cidade), seria transferida diretamente para as áreas centrais da cidade.

Tem-se, portanto, uma situação em que várias pessoas poderão ficar submetidas a potenciais de passo e de toque,

provenientes da elevação do potencial da malha de uma subestação, os quais dificilmente podem ser minimizados em virtude das características de ocupação do solo nas áreas urbanas.

A melhor solução seria redirecionar o traçado da linha de modo que atravessasse áreas menos sujeitas a interferências, possibilitando assim a utilização de fios contrapeso, num arranjo tal que fornecesse níveis adequados de potenciais de passo e toque.

De qualquer forma, considerar-se-á aqui a situação mais desfavorável, ou seja, a necessidade real de uma LTC atravessar uma área urbana densamente povoada, que é o objeto desse estudo. Nessa situação, é temerário aplicar-se a filosofia de sistema de aterramento compartilhado, da forma mencionada acima.

Em vista disso propõe-se aqui uma solução que enfoca principalmente o aspecto da segurança das pessoas que conviverão com a LTC em área urbana (figura 3.66), em detrimento de um possível acréscimo de custos decorrente de um redimensionamento das malhas de terra das subestações. Nesta solução, a LTC é desconectada eletricamente das subestações fonte e carga numa distância tal que a elevação do potencial do solo no ponto em que as estruturas passam a estar conectadas eletricamente, seja da ordem de 2% a 5% da elevação de potencial da malha (terra remoto). Isso vale não só para cabos pára-raios como também para o cabo de segurança (quando houver) que interliga eletricamente as estruturas (vide item 2.3.2 - O Estado da Arte).

Analisemos os efeitos desse procedimento nas diversas situações de elevação do potencial das malhas e das estruturas da LTC, explicitadas na figura 3.66.

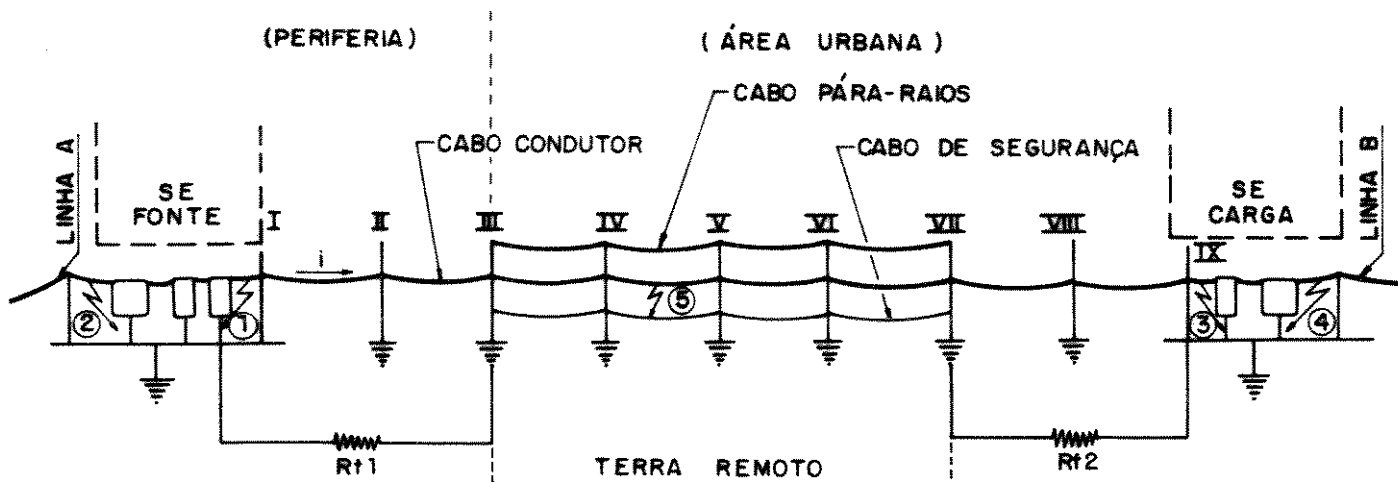


FIGURA 3.66 : ESQUEMA DE ATERRAMENTO DE UMA LTC

O potencial pode subir pelo efeito de correntes de curto originadas por surtos atmosféricos ou de manobra na própria LTC ou em outras linhas.

### 1. Elevação do Potencial da Malha de Terra da Subestação

Fonte

#### 1.1 devido à própria linha

Nessa situação (1) a corrente é escoada pela própria malha de terra da subestação, e o efeito de elevação de potencial nas estruturas da LTC é praticamente inexistente. A corrente de curto se fecha dentro dos limites da malha da subestação.

#### 1.2 devido à linha A

Nessa situação (2) as estruturas mais próximas da subestação (I e II) ficarão sujeitas a níveis de potenciais

correspondentes às curvas eqüipotenciais que saem dos limites da malha de terra. Se essas estruturas estivessem conectadas por cabo à malha, poderiam transmitir potenciais perigosos para dentro da área urbana. Estando desconectadas, a elevação de potencial que se verifica na primeira estrutura conectada eletricamente às outras (estrutura III), será tanto menor quanto maior for a sua distância da subestação fonte, decorrente do menor valor da resistência mútua  $R_{t1}$ . Os potenciais nas estruturas I e II serão, naturalmente, elevados; contudo, essas primeiras estruturas, mais próximas à subestação fonte, situam-se em geral nas regiões periféricas das grandes cidades e podem ser aterradas quase sempre através de contrapesos, o que garante níveis de potenciais de passo adequados. As subestações fonte localizam-se, de fato, na periferia das grandes cidades. Recebem linhas em tensões nas faixas de EHV ou UHV e abaixam para o nível de HV, para transmissão aos centros consumidores (subestações carga).

## 2. Elevação do Potencial da Malha de Terra da Subestação

Carga

### 2.1 devido à própria linha

Nesse caso (3) a corrente buscará o caminho da malha da subestação fonte. A maior parte da corrente fluirá pela terra, e uma parcela seguirá pelos cabos pára-raios e de segurança através das impedâncias de aterramento das estruturas. Se as estruturas I, II, VIII e IX estivessem interligadas às respectivas subestações, a quase totalidade da corrente de curto escoaria pelos cabos pára-raios e de segurança, e a parcela que escoaria através das impedâncias de



aterramento das estruturas seria ainda menor. Porém, mesmo desacopladas, é de se supor que as correntes através dos aterramentos das estruturas serão mínimas quando comparadas à corrente que seguirá pela terra. Trata-se de um sistema de divisor de corrente que pode ser simulado conhecendo-se as impedâncias de aterramento e as impedâncias próprias dos cabos. Deve-se assim atuar nas estruturas críticas de modo a se obter uma impedância de aterramento adequada, através do aumento do número de hastes ou da utilização de hastes profundas. Isto pode ser feito após a locação final das estruturas e antes do lançamento de cabos.

## 2.2 devido à linha B

Este caso (4) é análogo ao do item 1.2, com a ressalva de que as estruturas VIII e IX situam-se numa área urbana. Não são portanto, a princípio, passíveis de serem aterradas através de fios contrapesos. Se não se puder diminuir a impedância de aterramento através do aumento do número de hastes ou da colocação de hastes profundas, deve-se procurar meios para diminuir o valor da máxima corrente que pode passar pelo corpo humano como decorrência dos potenciais de passo e de toque junto às estruturas. Uma camada isolante de asfalto ou borracha sintética, aplicada em redor da estrutura numa área convenientemente delimitada pode constituir-se numa solução para o problema.

### 3. Falta para terra na própria linha

Neste caso (5) seria desejável que a LTC estivesse interligada às subestações, pois assim a maior parte da corrente escoaria pelas respectivas malhas de terra e não se teria uma elevação grande de potencial nas estruturas adjacentes à falta.

A experiência mostra, porém, que as faltas em 60 Hz são extremamente raras nas linhas de transmissão. No sistema FURNAS, que possui milhares de quilômetros de linhas em EHV e UHV, registrou-se, nos últimos 25 anos, apenas dois casos de falha de LT comprovadamente devido à falta simples de 60 Hz. A quase totalidade das falhas deveu-se à descargas atmosféricas, que dão início então a um arco voltaico de 60 Hz ("flashover").

No caso de LTC's em áreas urbanas, pode-se afirmar que a probabilidade de queda de raio direto na linha é muito menor que nas LT's, não só pelas menores dimensões das estruturas, mas também porque a linha passa geralmente por regiões já protegidas por sistemas de pára-raios instalados em edificações. Também a topografia da região a ser atravessada pode ser um fator favorável na redução da probabilidade de queda de raios. O traçado dentro da área urbana (contrariamente ao de LT's em área rural) deve assim ser posicionado, sempre que possível, ao longo das regiões de menor altitude.

Dessa forma, no que tange à queda de raios, quanto maior for o número e a altura das edificações próximas a LTC (com sistemas instalados de proteção contra descargas atmosféricas), assim como a proteção relativa oferecida pela topografia da região, menor será a probabilidade de ocorrência de flashover iniciado por descarga na

linha. Considerando estritamente o Modelo Eletrogeométrico pode-se afirmar que em alguns casos específicos (passagem junto a grandes avenidas com prédios altos, por exemplo), essa possibilidade é praticamente nula. É quase a mesma probabilidade de uma descarga atingir uma linha de distribuição numa área urbana densamente povoada.

Já em relação à utilização do cabo de segurança (item 2.3.2) o problema se reveste de maior gravidade. Este cabo foi concebido como proteção pressupondo-se uma interligação às subestações, de modo a poder atuar como um condutor da corrente de curto na hipótese de rompimento do cabo condutor ou de uma diminuição acentuada do "clearance" quando da linha operando em regime de emergência. Como a questão de travessias em áreas urbanas é primordial do ponto de vista de segurança para as LTC's de 138kV e 230kV, o cabo de segurança se constitui numa desejável garantia extra.

Aqui deve-se adotar uma solução de compromisso. É possível eliminar o cabo de segurança na medida em que se conseguir o mesmo grau de segurança em travessias sem sua instalação. Isto pode ser feito pela utilização de estruturas mais altas, pela maior tração do cabo no trecho entre duas ancoragens e pelo ajuste de um nível máximo menor de corrente e de tempo de operação em regime de emergência. Se se optar em manter o cabo de segurança, então as impedâncias de aterramento das estruturas III e VII devem poder ser reduzidas pelas formas já mencionadas, de modo a se ter potenciais de passo e de toque compatíveis com os valores máximos admissíveis.

### 3.2.3 R.I. (Rádio-Interferência)

A frequência randômica do efeito corona produz correntes que se propagam ao longo do condutor, as quais, por sua vez, geram um campo que se estende para fora do eixo da linha. O ruído assim produzido encontra-se predominantemente na faixa de amplitude modulada dos sinais de rádio, decrescendo com o aumento da frequência.

O nível de R.I. é uma função que depende da bitola do condutor, das condições de sua superfície, do espaçamento entre fases, da tensão e das condições meteorológicas. Essas condições meteorológicas incluem, além da situação de chuva (pior condição), variações de umidade e densidade do ar, assim como o efeito de vento. Além disso, existe um efeito sazonal que aparentemente independe desses fatores [9] e que pode fazer variar o nível de R.I. em até 12 dB. A situação de chuva provoca facilmente um incremento no nível de ruído de até 22 dB em relação ao nível existente em tempo seco.

O sinal de rádio por sua vez também varia do dia para a noite, sendo igualmente afetado pelas condições climáticas. Em vista disso, um comitê de estudos da IEEE estabeleceu em 1965 critérios para avaliação da qualidade de recepção com base na relação sinal/ruído. A tabela abaixo apresenta esses critérios, os quais são aceitos pelas Concessionárias brasileiras:

<u>Relação Sinal/Ruído(dB)</u>	<u>Qualidade de Recepção</u>
> 32	Excelente
27↔32	Muito bom, ruído praticamente imperceptível
22↔27	Satisfatório, ruído claramente perceptível
16↔22	Ruído muito evidente, palavras compreensíveis
6↔16	Inteligível apenas com intensa concentração
< 6	Ininteligível

No caso de áreas urbanas existem ainda dois efeitos distintos em relação à recepção do sinal de rádio. De acordo com medições efetuadas [9], o incremento do nível de ruído provocado por tempestades com queda de raios é de cerca de 26 dB em áreas urbanas, contra 23 dB em áreas periféricas e 20 dB em áreas rurais. Por outro lado, as estações transmissoras em cidades de médio e grande porte são posicionadas de forma a que o nível de sinal seja máximo em áreas urbanas, o que pode atenuar o primeiro efeito.

Devido às inúmeras variáveis que interferem no nível de rádio-interferência, é praticamente impossível determinar com precisão o nível de R.I. a uma dada distância do eixo de uma linha de transmissão. A esse respeito, Moreau e Gary, autores de um complexo método de predição de R.I. [41], afirmam na primeira parte de seu trabalho: "a instabilidade do estado da superfície do condutor torna as tentativas de predição exata do nível de rádio-interferência uma 'grande ilusão'". O comitê CIGRÉ/IEEE [42], por sua vez, afirma: "não existe nenhum método analítico puro para predição de R.I., embora alguns sejam rotulados dessa forma".

O que se pode fazer é lançar mão de métodos comparativos, isto é, métodos que fornecem expressões empíricas para a estimativa do nível de R.I. de uma dada linha com base em resultados obtidos previamente em uma outra linha.

Esse método não é muito adequado para LTC's por duas razões. Primeiramente porque existem relativamente poucas LTC's de 138kV e 230kV em operação, portanto poucos dados medidos em campo. Em segundo lugar porque as LTC's, contrariamente às LT's, podem sofrer alterações substanciais em sua geometria, as quais dependem das

condições de implantação, o que torna uma comparação direta ainda menos confiável.

Entretanto serão feitas duas considerações que auxiliarão a obtenção de valores de rádio-interferência, pelo método comparativo, confiáveis o suficiente para balizar com segurança as alterações na faixa de servidão calculada previamente por efeito da ação do vento. São elas:

1) Os níveis de R.I. serão calculados para a condição de chuva intensa, que, além de acarretar o maior nível possível de R.I., é absolutamente predominante em relação às outras variáveis [41][42]. Dessa forma, pode-se considerar o ruído assim produzido como sendo máximo e constante ao longo do tempo.

2) Nas equações do método comparativo, os valores de gradiente máximo e médio na superfície do condutor serão calculados de modo exato, e não apenas estimados com base em sua bitola. Isso porque esses gradientes também são afetados pelas capacitâncias mútuas dos condutores, as quais crescem na medida em que a distância entre fases diminui, o que é, evidentemente, uma característica básica das LTC's.

Com base nessas duas considerações, pode-se obter valores de R.I. confiáveis para o dimensionamento de qualquer configuração de LTC.

No Brasil, o Ministério das Comunicações estabeleceu, através da Portaria número 1048 de 10.09.76, o nível do sinal radiofônico mínimo a ser protegido. Essa Portaria estabelece que:

"Toda emissora terá o seu sinal protegido contra interferências prejudiciais dentro de sua área de serviço útil. O sinal mínimo a ser protegido, no limite desta área e para uma frequência de 1MHz, é de 66dB" [12].

Tomando esse valor de 66dB e os dados constantes da tabela da página 149, estabelece-se o seguinte critério para o valor máximo admissível de ruído a uma dada distância transversal ao eixo da linha, que poderá ser igual ou não ao limite da faixa de servidão da LTC calculada anteriormente:

TABELA 3.4

ZONA	TEMPO BOM:		CHUVA INTENSA:	
	sinal/ruído (dB)	ruído máximo (dB)	sinal/ruído (dB)	ruído máximo (dB)
RESIDENCIAL	27(muito bom)	39	22(satisf.)	44
COMERCIAL/ INDUSTRIAL	22 (satisf.)	44	16 (compreens.)	50

Dentre as várias expressões existentes para determinação do nível de R.I. [42], selecionou-se a proposta pela SHIOBARA do Japão, que além dos parâmetros encontrados em outros métodos, incorpora também a altura dos condutores e ainda inclui a determinação do gradiente no condutor sob chuva. A formulação é a seguinte:

$$E_i = A + 40 \log(2rc/2,53) + 20 \log(\bar{h}_i/Dt^2) - 12[\log(f/1000)]^2 - 17[\log(f/1000)]$$

onde, (3.2.28)

$A = [(3,7g_{mi} - 12,2) \pm 3]$  para tempo bom e válido para  $12 \text{ kV/cm} \leq g_{mi} \leq 22 \text{ kV/cm}$

$A = [10,5g_{p3} - (g_{p3}/2)^2 - 31]$  para chuva intensa e para  $g_{p3} \leq 17 \text{ kV/cm}$

$A = [4,375g_{p3} - (g_{p3}/4)^2 + 19,5]$  para chuva intensa e para  $g_{p3} > 17 \text{ kV/cm}$

e  $g_{p3} = g_{m3} [1 + (B \cdot rc/100R) \cos \varphi] / (1 + B \cdot rc/100R)$

sendo,

$$B = 2(n-1) \text{sen}(\pi/n) \quad \text{e} \quad \varphi = 0^\circ \text{ p/ } n=1 \text{ e } n=3$$

$$\varphi = 45^\circ \text{ p/ } n=4$$

$$\varphi = 90^\circ \text{ p/ } n=2$$

$g_{m3}$  = gradiente máximo da fase mais baixa, convencionado como sendo a fase 3.

O gradiente máximo no condutor será calculado, como já mencionado, de forma precisa. Para tanto, far-se-á uso do método desenvolvido por Moreau e Gary [41], já parcialmente utilizado no estudo sobre indução eletrostática (item 3.2.1):

O gradiente médio na superfície do condutor é dado por:

$$g_{ai} = (1/n) \cdot q_i / (2\pi \epsilon_0 \cdot rc) \quad (3.2.29)$$

Para linhas trifásicas de potencial  $V_n$ ,  $q_i$  pode ser determinado de forma matricial através da expressão:

$$[Q] = [C] \cdot [V]$$

A matriz de capacitâncias  $[C]$  requer o cálculo da matriz de coeficientes de potencial  $[P]$ . A determinação das matrizes  $[P]$ ,  $[C]$



e [V] está indicada em detalhes no item 3.2.1, tópico 1 - Induções Eletrostáticas.

Obtida a matriz [Q], tem-se, através da equação 3.2.29, os valores de  $g_{a1}$ ,  $g_{a2}$  e  $g_{a3}$ .

O valor de  $g_{mi}$  é então dado por:

$$g_{mi} = g_{ai}[1+(n-1)rc/R] \quad (3.2.30)$$

Os valores  $g_{m1}$ ,  $g_{m2}$  e  $g_{m3}$  substituídos na equação 3.2.28 fornecerão os níveis de ruído  $E_1$ ,  $E_2$  e  $E_3$ , respectivamente para cada fase. Se o valor de ruído máximo devido a uma fase for pelo menos 3dB superior ao da segunda fase de maior ruído, então pode-se afirmar que o ruído devido a linha trifásica ( $E_{tr}$ ) é o próprio ruído máximo devido a uma das fases [42].

Se a diferença entre o ruído máximo das duas fases de maior ruído, gerando  $E_{1max}$  e  $E_{2max}$ , for inferior a 3dB, então o ruído devido as três fases é dado por:

$$E_{tr} = (E_{1max}+E_{2max})/2 + 1,5 \quad [dB] \quad (3.2.31)$$

O método descrito acima pode ser aplicado em LTC's de 138kV e 230kV. No entanto, para LTC's de 138kV que possuam configurações semelhantes às estudadas pela EPRI [9], o nível de R.I. a uma dada distância da linha pode ser obtido diretamente dos gráficos das figuras 3.67 a 3.78.

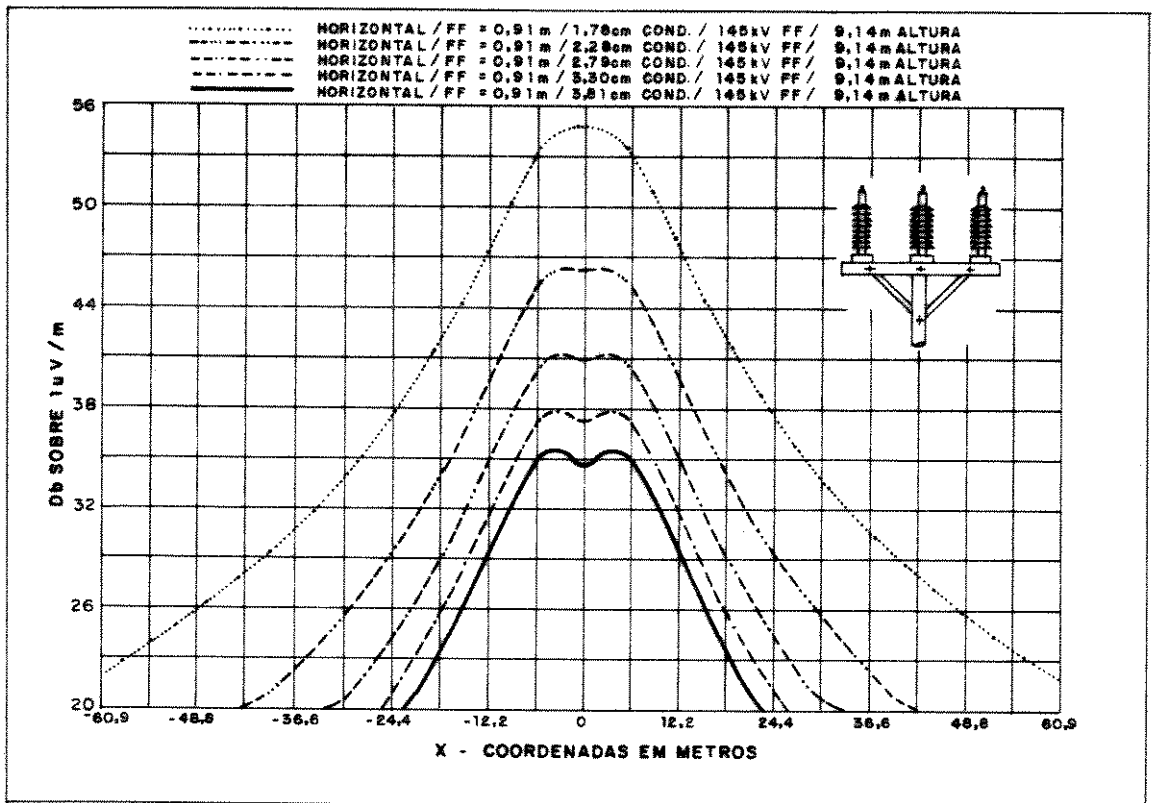


FIGURA 3.67 - Efeito do diâmetro do condutor no perfil de rádio - interferência (configuração horizontal).

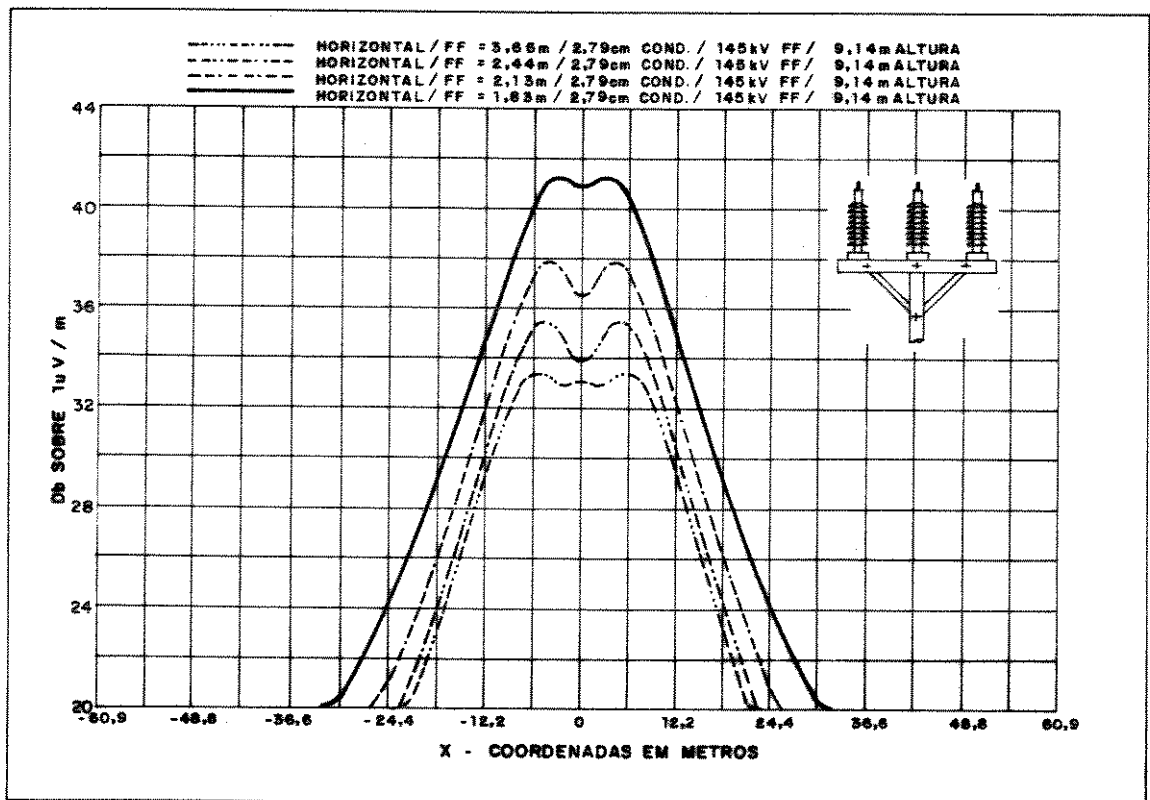


FIGURA 3.68 - Efeito do espaçamento entre condutores no perfil de rádio - interferência (configuração horizontal)

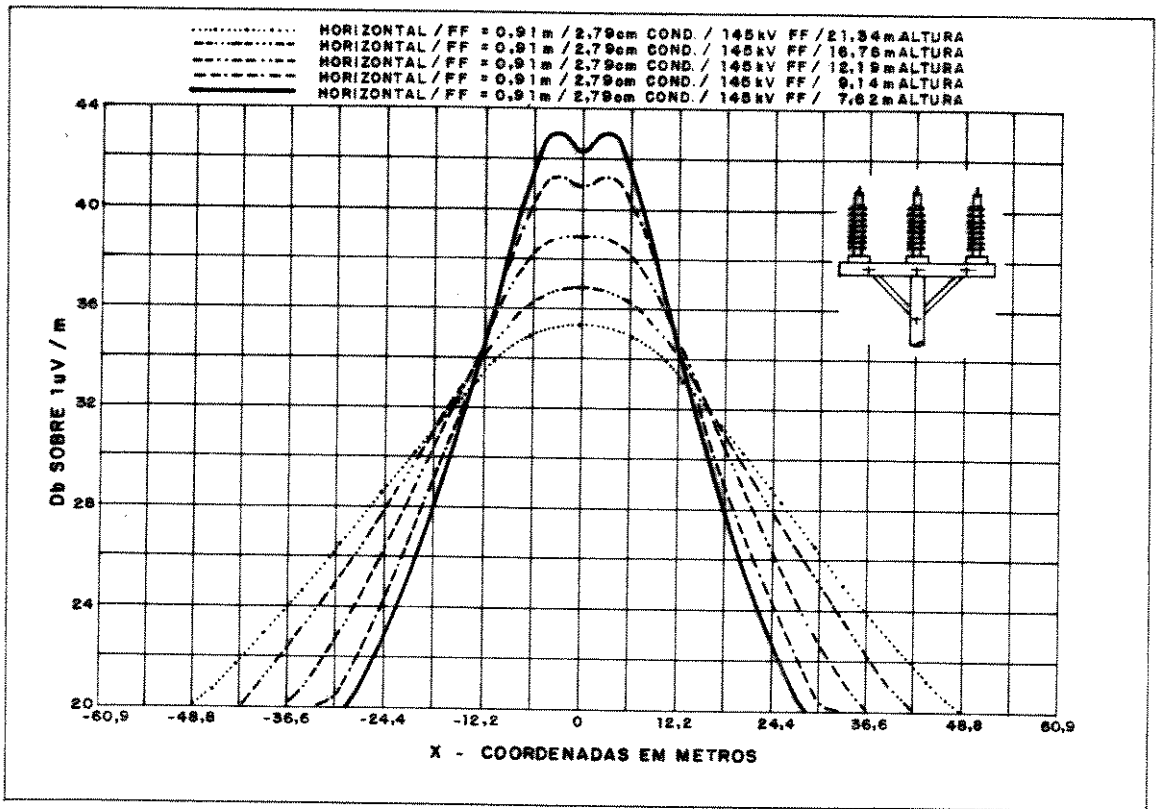


FIGURA 3.69- Efeito da altura do condutor no perfil de rádio - interferência (configuração horizontal).

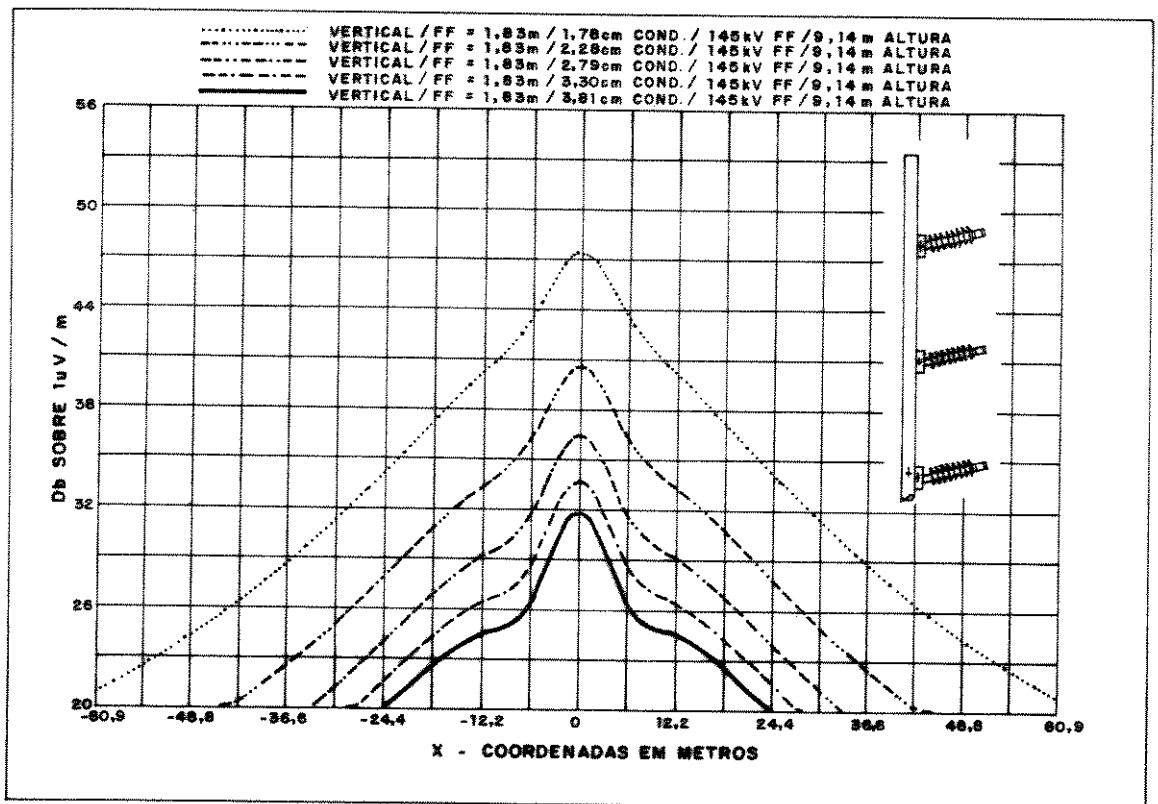


FIGURA 3.70- Efeito do diâmetro do condutor no perfil de rádio - interferência (configuração vertical).

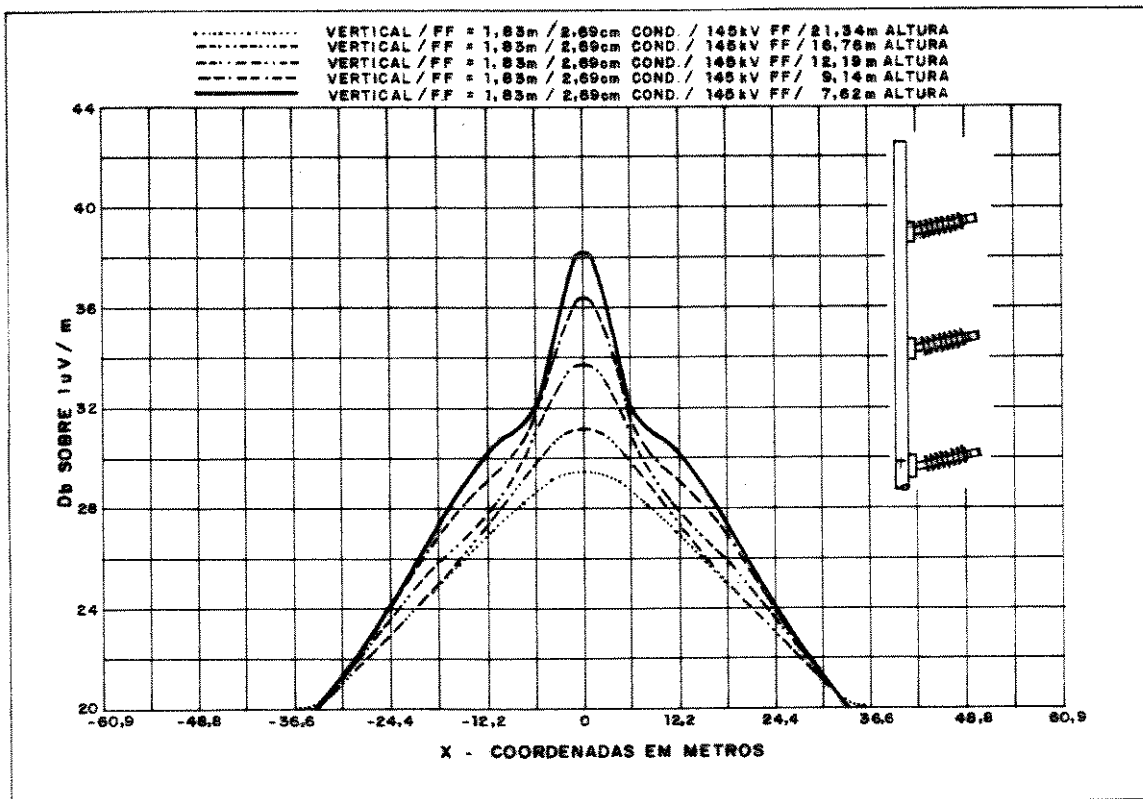


FIGURA 3.71- Efeito da altura do condutor no perfil de rádio - interferência (configuração vertical).

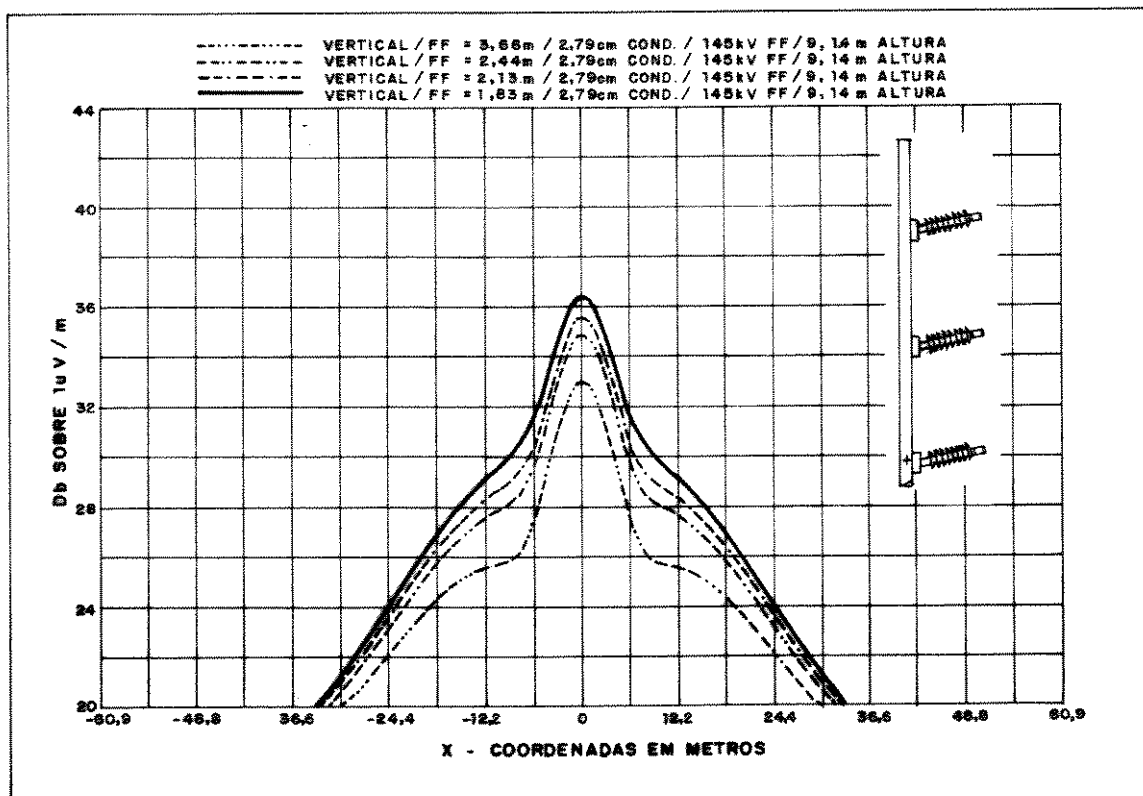


FIGURA 3.72- Efeito do espaçamento entre condutores no perfil de rádio-interferência (configuração vertical).

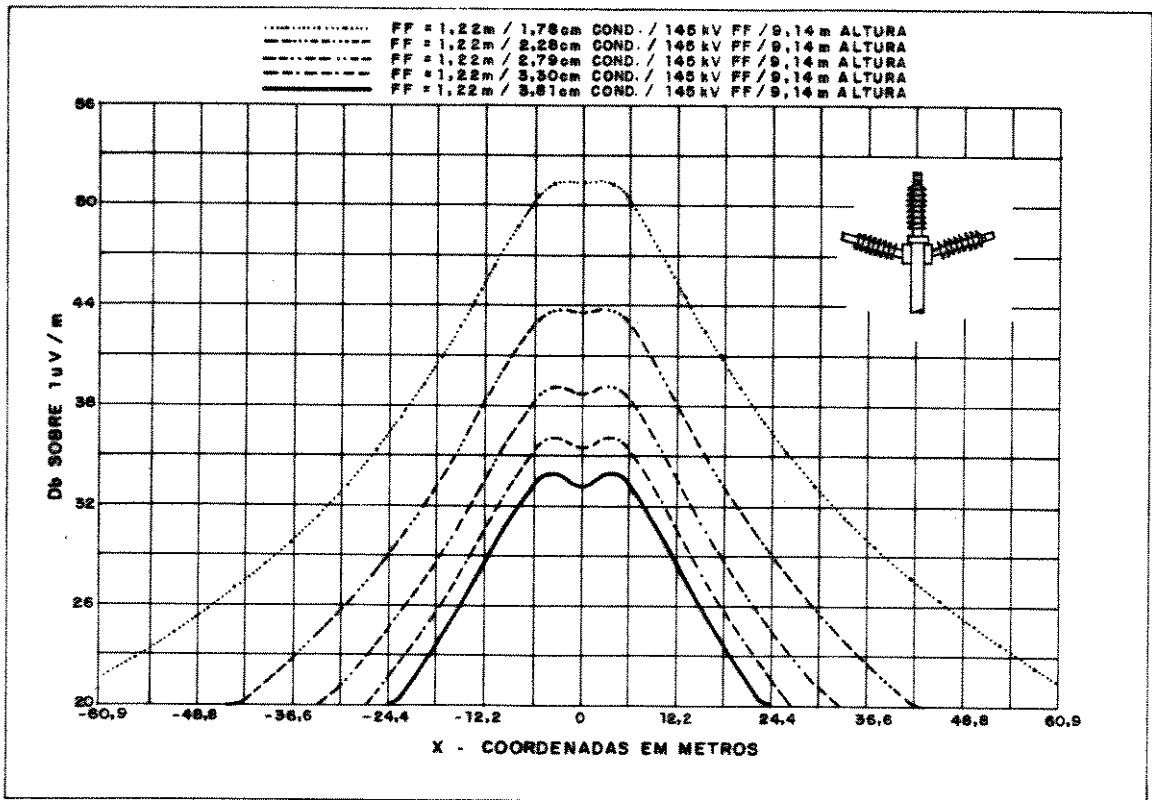


FIGURA 3.73- Efeito do diâmetro do condutor no perfil de rádio - interferência (configuração delta ).

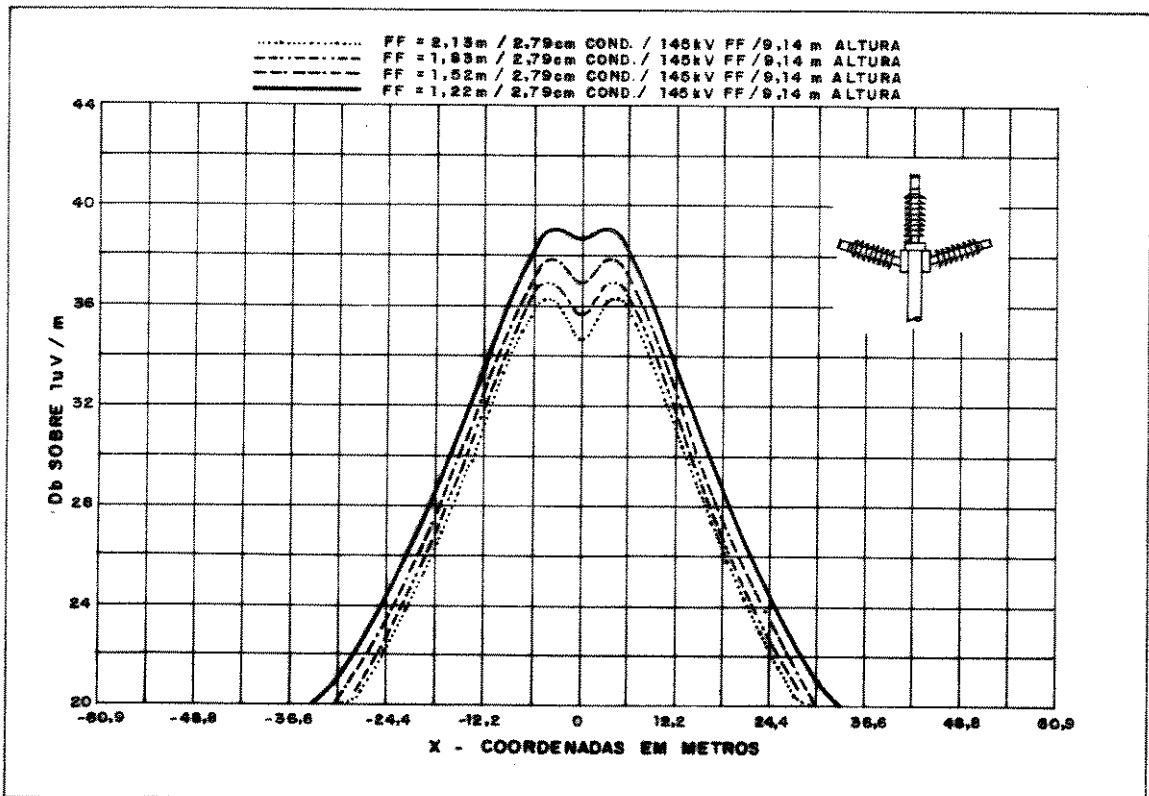


FIGURA 3.74- Efeito do espaçamento entre condutores no perfil de rádio- interferência (configuração delta )

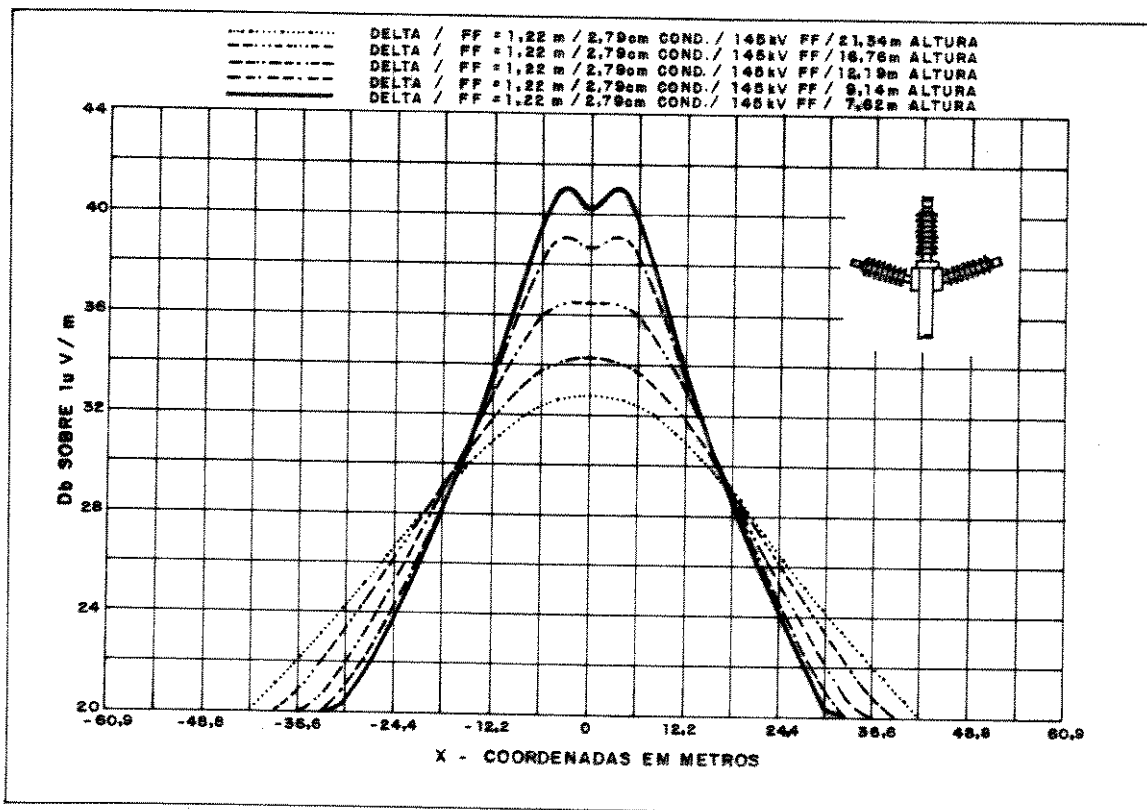


FIGURA 3.75- Efeito da altura do condutor no perfil de rádio - interferência (configuração delta).

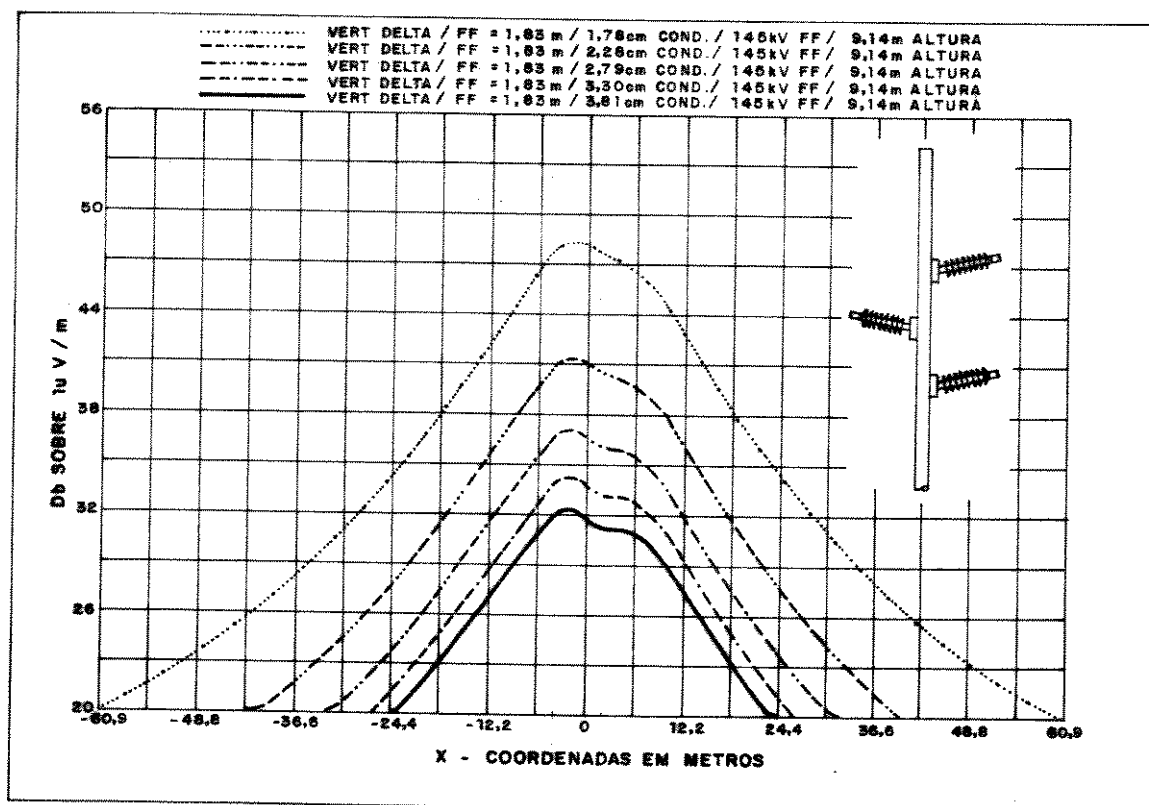


FIGURA 3.76- Efeito do diâmetro do condutor no perfil de rádio - interferência (configuração delta).

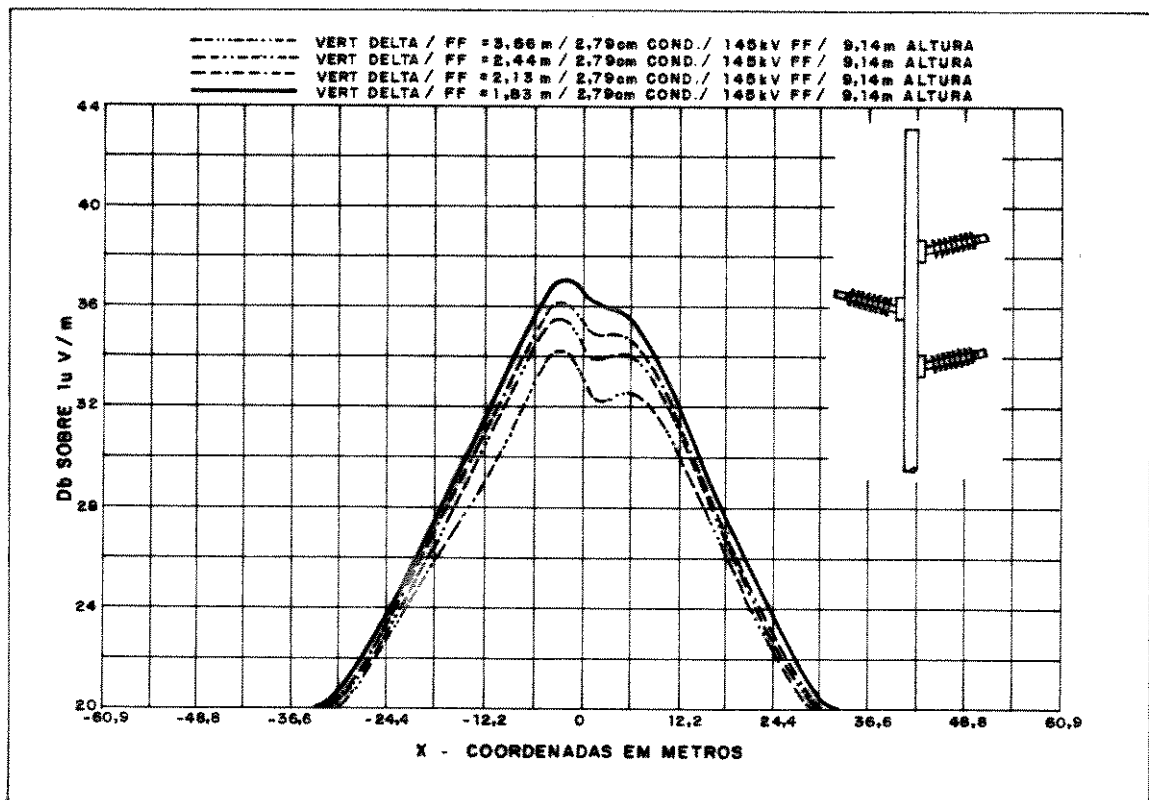


FIGURA 3.77- Efeito do espaçamento entre condutores no perfil de rádio - interferência (configuração delta).

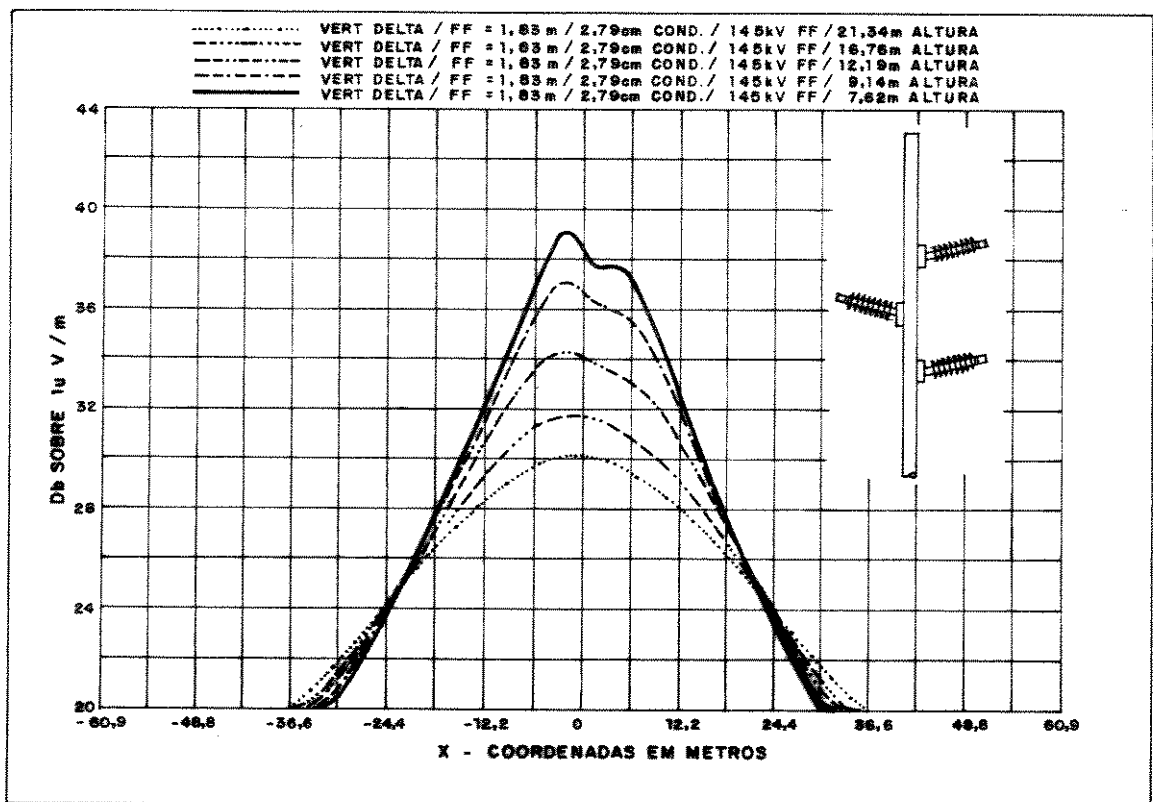


FIGURA 3.78- Efeito da altura do condutor no perfil de rádio - interferência (configuração delta).

### 3.2.4 T.V.I. (T.V.-Interferência)

Conforme visto no item anterior, o ruído produzido pelo efeito corona das linhas de transmissão decresce com o aumento da frequência. Assim, a faixa de frequência modulada não é afetada pelo ruído. No entanto, o sinal de vídeo também pode sofrer interferências, conquanto num grau menor que a R.I., e geralmente apenas em condições de chuva [43].

Aqui faz-se referência exclusivamente a descargas corona do tipo condutor-ar ou metal-ar. Descargas metal-metal, apesar de gerarem ruídos de frequências muito mais altas que as descargas metal-ar [9], são devidas geralmente à má fixação e ajuste das ferragens, sendo portanto facilmente eliminadas ou minimizadas através de uma manutenção adequada, o que não ocorre com descargas metal-ar, que são funções das características mecânicas e elétricas da linha.

A tabela a seguir indica as faixas de frequência utilizadas nos serviços de radiodifusão:

<u>Frequência (MHz)</u>	<u>Função</u>	<u>Modulação</u>
0,535 - 1,605	rádio - faixa AM	AM
54 - 88	TV - VHF, canais 2 a 6	Áudio - FM Vídeo - AM
88 - 108	rádio - faixa FM	FM
174 - 216	TV - VHF, canais 7 a 13	Áudio - FM Vídeo - AM

A necessidade de se conhecer o nível de interferência em sinais de TV está praticamente restrita à situação de implantação de



LTC's em áreas urbanas. De fato, as interferências ocasionadas por LT's ou LTC's em áreas rurais, via de regra, restringem-se aos níveis de R.I. e ruído audível no limite da faixa de servidão, porém sem se constituir numa condição limitante para o seu ajuste.

Os estudos nesse campo estarão baseados no método proposto pela EPRI [9], o qual procura estimar a magnitude da componente de energia gerada pela descarga condutor-ar capaz de atingir o espectro do sinal televisivo.

Conhecendo-se a relação entre frequência e ruído, é possível estimar a componente de T.V.I. a partir do nível de R.I. calculado. Essa correção é dada pela expressão:

$$\Delta B_f = -20 \log(f/1000) \pm 5 \text{ dB}$$

Uma outra correção é estabelecida para ajustar as diferentes larguras de banda do rádio e da TV. Considera-se que para o rádio essa largura é da ordem de 5 KHZ, e para a TV, 3 MHz. Essa segunda correção é dada por:

$$\Delta B_o = 20 \log(\sqrt{F_2 / F_1})$$

onde,

$$F_2 = \text{largura de banda desejada} = 3 \text{ MHz}$$

$$F_1 = \text{largura de banda de referência} = 5 \text{ kHz}$$

Assim,

$$\Delta B_o = 20 \log(\sqrt{3 / 0,005}) = 27,8 \text{ dB}$$

Para a determinação de  $\Delta B_f$ , é utilizada a condição mais desfavorável, isto é, o menor valor de frequência a ser protegido, que é dado pelo canal 2, da ordem de 54 MHz. Se for garantida a não interferência desse sinal no limite da faixa, então pode-se assegurar que todos os outros canais não sofrerão interferência. Portanto,

$$\Delta B_f = -20 \log 54 \pm 5 \text{ dB} = -34,6 \text{ dB} \pm 5 \text{ dB}$$

A correção total é:

$$\Delta B_f + \Delta B_o = -7 \text{ dB} \pm 5 \text{ dB} \quad (3.2.32)$$

Essa correção será feita no valor de  $E_{tr}$  obtido da equação 3.2.28. O valor encontrado deverá satisfazer o critério de ruído máximo admissível para o limite da faixa de servidão. A tabela abaixo [9] indica os níveis usualmente considerados de sinal-ruído e de qualidade de recepção:

<u>Relação Sinal-Ruído (dB)</u>	<u>Qualidade de Recepção</u>
> 36	Excelente
27 ↔ 36	Muito Bom
17 ↔ 26	Bom
4 ↔ 16	Fraco
-10 ↔ -3	Muito fraco
< -10	Intolerável

Até o presente não existe nenhuma diretriz do Ministério das Comunicações do Brasil quanto à intensidade mínima do nível televisivo a ser gerado pelas Emissoras. Sendo assim, utilizou-se a metodologia estipulada pelo "Federal Communication Commission" (FCC) dos EUA, que estabelece dois padrões de transmissão: "A" e "B". O padrão "A" corresponde a um sinal com imagem excelente, sem presença de ruído. O padrão "B" corresponde a um sinal com imagem adequada, sem presença de ruído.

O mínimo valor regulamentado de sinal para os canais 2 a 6 é 47 dB para o padrão "B", e 68 dB para o padrão "A". Esses valores

erão utilizados nos cálculos não apenas por ser o canal 2 o mais suscetível a interferências, mas também porque os níveis mínimos estipulados para outras faixas de frequência são mais altos.

Com base nesses valores, e do constante na tabela da página anterior, estabelece-se os seguintes critérios para o valor máximo admissível de ruído no limite da faixa de servidão da LTC:

**TABELA 3.5**

ZONA	PADRÃO "A"		PADRÃO "B"	
	Sinal/Ruído (dB)	Ruído máximo admiss. (dB)	Sinal/Ruído (dB)	Ruído máximo admiss. (dB)
RESIDENCIAL	27 (muito bom)	41	27 (muito bom)	20
COMERCIAL/ INDUSTRIAL	17 (bom)	51	17 (bom)	30

Apesar desse critério ser aparentemente mais restritivo do que o utilizado para R.I. (tabela 3.4), é preciso levar em conta que o nível de incerteza da interferência real no sinal de televisão é muito grande. O desvio  $\pm 5$ dB corresponde a 71% do valor médio de -7dB na correção de R.I. para T.V.I. Por outro lado, com mais razão ainda que as emissões radiofônicas, as emissões de sinais televisivos são direcionadas sobretudo para a área urbana, o que faz pensar que, na maioria dos casos, o padrão "A" pode ser considerado nos cálculos. Já existem, inclusive, emissoras direcionadas exclusivamente para as áreas urbanas das grandes cidades.

No dimensionamento da LTC em área urbana essas variáveis devem ser todas consideradas.

### 3.2.5 Ruído Audível

Da mesma forma que R.I. e T.V.I., o ruído audível origina-se do efeito corona. Contrariamente aos dois anteriores, porém, esse tipo de interferência é muito mais localizado, sendo que a principal causa do aparecimento do ruído audível são as gotas de água de chuva que ficam suspensas sob o condutor. O fenômeno é, portanto, transitório, apesar de naturalmente também depender do gradiente de tensão na superfície do condutor.

O gráfico da figura 3.79 [9] mostra a diferença do nível de ruído audível gerado por um condutor seco e outro sob chuva pesada.

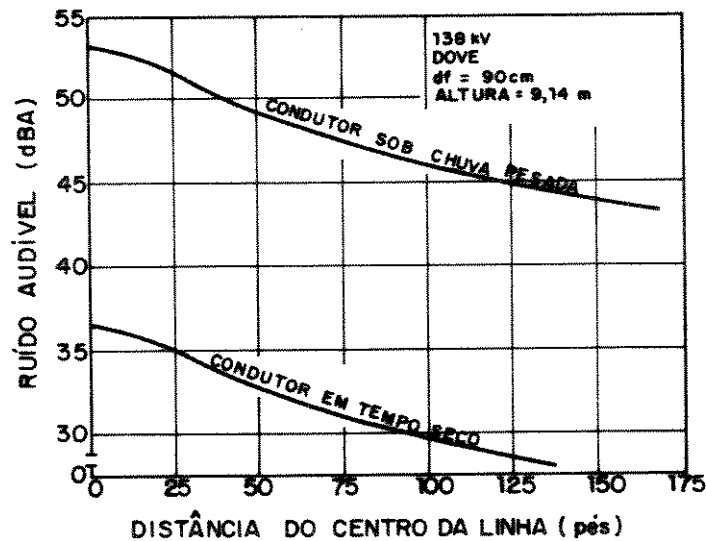


FIGURA 3.79

Essas curvas foram levantadas para uma linha de 138kV com características desfavoráveis em relação a ruído audível, qual sejam:

grau extremo de compactação (91cm de distância fase-fase) e condutor de bitola relativamente pequena (Dove - 328,5mm<sup>2</sup>). Com base nessas curvas, a EPRI considera que as LTC's não deverão causar problemas de ruído audível.

Apesar dessa afirmação parecer ser corroborada pela tabela abaixo [44], no caso específico de LTC's em áreas urbanas é fundamental obter-se uma estimativa mais precisa dos efeitos decorrentes do ruído audível gerado, de forma a se ter plena segurança de que a implantação da linha não causará transtornos à população.

<u>Ruído a uma dada dist. do centro da linha (dBA)</u>	<u>Probabilidade de recebimento de queixas da população</u>
< 52,5	baixa - sem queixas
52,5 ↔ 59	moderada - algumas queixas
> 59	alta - muitas queixas

A escala normalmente utilizada para se medir o ruído audível é em "dBA". Essa escala abrange inteiramente o espectro de freqüências, mas dá um "peso" maior à faixa de 500 Hz a 3.000 Hz, onde o ouvido humano é mais sensível.

Em seu estudo sobre o impacto nas pessoas do ruído audível gerado pelas linhas de transmissão, Keast [44] levanta alguns aspectos importantes, que devem ser considerados no dimensionamento da LTC em área urbana:

1. Um ruído ocasional é menos perturbador que um ruído contínuo de mesma intensidade, numa variação logarítmica. Presume-se que um ruído ocorrendo em um décimo do tempo de um determinado período, a uma determinada intensidade, é tão perturbador quanto um

outro ruído ocorrendo durante todo o período, porém com uma intensidade menor em 10 dBA.

2. Comunidades rurais e suburbanas são muito mais suscetíveis a incômodos causados por ruídos provenientes de linhas do que comunidades urbanas. Isso, naturalmente, decorre da maior quantidade de ruído ambiental nas áreas urbanas, o que ajuda a mascarar o ruído da linha.

3. De um modo geral, considera-se que no caso de chuva pesada, o próprio ruído da chuva abafa o ruído gerado pela linha. Isso porém não é válido para todos os casos, dependendo essencialmente da intensidade da chuva, do material que recebe o impacto das gotas e da velocidade do vento.

A essas constatações deve-se acrescentar ainda uma outra, decorrente do surgimento do "fato novo". Realmente, quando surge alguma construção onde nada havia antes, a atenção das pessoas é imediatamente dirigida para aquele ponto. Com a atenção dirigida para a LTC, as pessoas ficam mais inclinadas a serem infortunadas pelo ruído audível.

Tendo em vista essas considerações, pode-se imaginar que para o caso de LTC em área urbana, a situação mais desfavorável seria uma LTC de 230kV passando junto a um hospital, maternidade ou escola, num dia de neblina intensa. Para casos assim, ou semelhantes, estipula-se um valor conservativo de 46 dBA (justificado mais adiante) como valor máximo admissível passível de atingir uma pessoa. Isso não significa que necessariamente no limite da faixa de servidão esse valor precisa ser obedecido, mas sim que, num local com as condições

descritas acima, onde as pessoas permanecem longo tempo próximas à linha, o nível máximo de intensidade sonora que poderá atingi-las não deve ser superior a 46 dBA. Isso sugere a criação de uma "segunda faixa de servidão", em cujos limites aquele valor precisa ser obedecido. A tabela 3.6 apresenta os níveis máximos de intensidade sonora que se admitirá em cada caso.

TABELA 3.6

EDIFICAÇÃO	NÍVEL MÁX. LIMITE DA 2ª FAIXA(dBA)
hospitais, maternidades, escolas	46
residências	50
outros	52,5

Os níveis máximos admissíveis acima podem parecer a primeira vista muito conservativos, já que a tabela da página 166 indica que níveis de ruído até 52,5 dBA não dão origem a queixas da população.

Contudo, uma LTC em área urbana deve se inserir no meio o mais completamente possível, isto é, o mais desapercivelmente possível, não devendo dar nenhum ensejo a preocupações ou inquietações na população. Por isso, o critério tem de ser mais restritivo. Um nível de ruído que não incomode não significa que não seja notado, pois continua sendo um ruído audível.

Keast [44] demonstra em seu trabalho, através de dados coletados que, para o nível de 46dBA, não existe nenhuma reação da comunidade, mesmo quando o ruído não é abafado por alguma outra fonte

de som. O que torna esse resultado ainda mais interessante é que foi obtido em zonas suburbanas, onde a população nunca havia sido exposta antes a ruído audível decorrente de efeito corona. Por essa razão, adotou-se conservativamente este valor para a situação de uma LTC junto a hospitais, maternidades e escolas. Já o nível de 50 dBA está a um meio termo deste último e do nível de 52,5 dBA (nível "sem queixas"). Se ainda se considerar que em situação de chuva as janelas das residências geralmente permanecem fechadas, então esse valor de 50 dBA parece bastante adequado e conservativo.

Os métodos de cálculo de Ruído Audível [45] abrangem a determinação de quatro tipos diferentes de intensidade sonora:

\*L 50: nível com probabilidade de ser excedido em 50% do tempo durante chuva.

\*L 5: nível com probabilidade de ser excedido em 5% do tempo durante chuva.

\*Média: nível médio de ruído esperado durante chuva.

\*Chuva Pesada: considerado como o nível máximo de ruído produzido pela linha.

No caso em estudo deve-se considerar apenas um dos dois níveis mais desfavoráveis: "L5" ou "Chuva Pesada", que aliás são muito próximos [45].

Os métodos existentes para cálculo de ruído audível geralmente são válidos para uma determinada geometria de estrutura e/ou nível de tensão [45].

Sendo assim, adotou-se para o dimensionamento das LTC's o método desenvolvido pela FGH da Alemanha, que é válido



excepcionalmente para qualquer geometria de linha sem restrição da tensão de operação.

A expressão abaixo fornece o nível de ruído audível sob chuva pesada gerado por uma fase da linha:

$$A_{ni} = 2g_{mi} + 18 \log n + 45 \log(2rc) - 10 \log Dt - 0,3 \text{ [dBA]} \quad (3.2.33)$$

Para uma linha de transmissão trifásica, o ruído total é dado por:

$$SL = 10 \log \sum_{i=1}^P 10^{A_{ni}/10} \quad (3.2.34)$$

onde  $P$  = número total de fases (3 para circuito simples e 6 para circuito duplo).

## CAPÍTULO 4

### CRITÉRIOS PARA DETERMINAÇÃO DA VIABILIDADE DE IMPLANTAÇÃO EM ÁREA URBANA E DIMENSIONAMENTO DA LINHA DE TRANSMISSÃO COMPACTA

Procede-se neste capítulo ao dimensionamento da LTC com base nos tópicos desenvolvidos no capítulo 3. Como dito anteriormente, cada caso real apresentará problemas e dificuldades específicas; contudo, estabeleceu-se aqui um roteiro de dimensionamento com exemplos elucidativos que pode ser utilizado na análise de um caso real, de modo a se poder avaliar com segurança a viabilidade de implantação da LTC em área urbana.

#### 4.1 ASPECTOS PRELIMINARES

##### 4.1.1 Potência a ser transmitida

O bloco de potência a ser transmitido da subestação periférica para a subestação de consumo se constitui no parâmetro básico para a definição da geometria da estrutura, do número de circuitos, e mesmo do número de linhas a ser implantado dentro da área urbana.

Admite-se que o nível de potência a ser transmitido já esteja previamente estabelecido, assim como a tensão de transmissão. Essa suposição é factível, pois a necessidade de se levar um bloco de potência a um determinado local, a partir de uma subestação já existente, é que impõe a necessidade de construção da LTC em área urbana. Também o incremento da potência característica (item 2.2.3) é

encarado aqui como uma condição favorável para a implantação da LTC em área urbana, mas não como um parâmetro básico ou uma meta, como é o caso de LTC's de UHV em áreas rurais. O ganho na capacidade natural de transmissão obtido pela compactação deverá otimizar posteriormente o projeto global em seus aspectos técnico-econômicos, podendo eventualmente dar ensejo a estudos para adequação dos sistemas de compensação de reativos.

#### 4.1.2 Viabilidade Física Macroscópica

O primeiro passo para implantação da LTC em área urbana é verificar a viabilidade de sua implantação física dentro da cidade, isto é, a determinação do traçado da linha.

Nas LT's implantadas em áreas rurais, a determinação do traçado da linha é relativamente simples: através de cartas geográficas e aerofotogrametria estabelece-se um traçado básico, riscado na própria carta geográfica. Depois, corre-se esse traçado básico no campo fazendo-se ajustes para escolha dos melhores pontos de travessia de obstáculos. Procura-se manter a linha com o menor número possível de deflexões e com o menor valor possível para os respectivos ângulos, ou seja, procura-se otimizar o traçado deixando-o o mais curto e retilíneo possível.

No caso de LTC's em áreas urbanas as dificuldades são muito maiores. Primeiramente, não se conhece as dimensões exatas das estruturas a serem implantadas (suposição nossa para dimensionamento otimizado) e nem tampouco as faixas de servidão. Se se estimar a faixa de servidão com um valor muito pequeno, pode acontecer que após a

determinação do valor real, a implantação da linha mostre ser inviável. Um valor muito grande pode levar à suposição errônea de que a implantação da linha é inviável num determinado trecho, não o sendo na realidade.

Consideraremos nos cálculos a configuração formada por estrutura tubular e isolador tipo line-post (polimérico ou convencional). Esses isoladores são disponíveis em dimensões padrões para 138kV e 230kV; contudo, vamos dimensioná-los na suposição de que se possa estipular um comprimento ótimo para uma determinada situação. Isto por duas razões: primeiramente porque é uma tendência natural a adequação do fabricante às necessidades do cliente e não o inverso; em segundo lugar porque, mesmo hoje, havendo uma necessidade premente de um determinado tipo de isolador com características eletro-mecânicas específicas, o fabricante poderá eventualmente atender aquela solicitação, apesar do maior custo apresentado pelo produto.

A determinação da viabilidade física de implantação de uma LTC em área urbana é, portanto, uma solução de compromisso: deve-se imaginar uma configuração "adequada" da linha (estrutura e faixa de servidão), para se verificar "in loco" os pontos críticos de implantação. Esta verificação se reveste, evidentemente, de grande subjetividade por parte de quem faz essa inspeção preliminar, sendo tanto mais precisa quanto maior for a experiência pessoal.

De qualquer forma, estabelece-se a seguir um modelo para essa inspeção de campo abrangendo faixas de dimensões físicas das LTC's (figura 4.1).

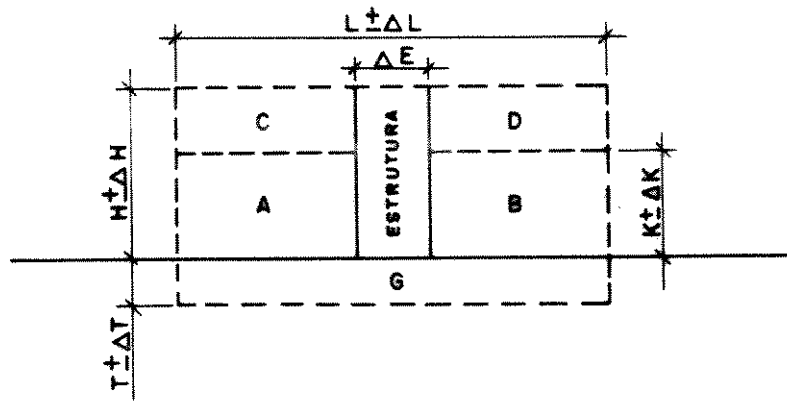


FIGURA 4.1: ÁREAS DE INFLUÊNCIA DA L

TABELA 4.1

	138 kV				230 kV			
	DISP. VERTICAL (m)		CIRC. DUPLO	DISP. HORIZONTAL (m)	DISP. VERTICAL (m)		CIRC. DUPLO	DISP. HORIZONTAL (m)
	CIRC. SIMPLES				CIRC. SIMPLES			
	UNILATERAL	TRIANGULAR		UNILATERAL	TRIANGULAR			
$H \pm \Delta H$	$12 \pm 2$	$12 \pm 2$	$12 \pm 2$	$12 \pm 2$	$19 \pm 4$	$19 \pm 4$	$19 \pm 4$	$19 \pm 4$
$L \pm \Delta L$	$5 \pm 0,2$	$10 \pm 0,5$	$10 \pm 0,5$	$11 \pm 0,5$	$6,5 \pm 1$	$13 \pm 2$	$13 \pm 2$	$14 \pm 2$
$K \pm \Delta K$	$9,30 \pm 1,00$	$9,30 \pm 1,00$	$9,30 \pm 1,00$	$9,30 \pm 1,00$	$9,85 \pm 1,00$	$9,85 \pm 1,00$	$9,85 \pm 1,00$	$9,85 \pm 1,00$
$T \pm \Delta T$	$2,3 \pm 0,8$	$2,3 \pm 0,8$	$2,3 \pm 0,8$	$2,3 \pm 0,8$	$2,3 \pm 0,8$	$2,3 \pm 0,8$	$2,3 \pm 0,8$	$2,3 \pm 0,8$

Na figura 4.1 e tabela 4.1 acima,  $\Delta H$  corresponde à variação da altura da estrutura,  $\Delta L$  a variação da faixa de servidão,  $\Delta K$  a variação do clearance e  $\Delta T$  a variação da profundidade de engastamento da estrutura. Esses valores, exclusivamente orientativos para essa etapa de estudos, foram estimados com base em cálculos já efetuados de dimensionamento de LTC [2].

Com auxílio de equipamento de topografia o inspetor de campo anotará os pontos que afloram nas áreas A, B, C e D (obstáculos). Por exemplo, de um modo geral é de se esperar que atinjam as áreas A e B obstáculos como: canteiros, tubulações, gradís, árvores pequenas, etc. As áreas C e D podem ser perfuradas por

obstáculos como: linhas de distribuição e de telecomunicações, árvores, construções, etc.

Obstáculos que surgem nas áreas A e B geralmente não acarretam maiores dificuldades, exceto quando se tratar de objetos metálicos isolados da terra ou objetos metálicos longos correndo paralelamente ao eixo da LTC.

Já obstáculos que atingem as áreas C e D exigirão estudos específicos de adequação quando encontrarem-se junto ao limite da faixa de servidão, e até mesmo a necessidade de mudança do traçado, caso estiverem mais próximos do eixo da LTC.

Também devem ser anotados os locais de aproximação com escolas, hospitais, etc., assim como características singulares das regiões atravessadas.

As soluções desses problemas serão também, naturalmente, aproximadas, e após a determinação da configuração final da LTC, far-se-á uma nova confrontação para averiguação da viabilidade física. De qualquer forma, considera-se que a linha é viável fisicamente nessa etapa de estudos se for possível atender os procedimentos indicados para as dificuldades listadas nas tabelas seguintes:

**TABELA 4.2 - INTERFERÊNCIAS**

ÁREA	OBSTÁCULO	EXTENSÃO (m)	ALTURA (m)	PROCEDIMENTO
A e B	objeto não-metálico	curta	até $k-\Delta k-3$	--
			acima de $k-\Delta k-3$	impedir acesso de pessoas
		longa	até $k-\Delta k-3$	anotar no traçado
			acima de $k-\Delta k-3$	impedir acesso de pessoas
	objeto metálico	curta	até $k-\Delta k-3$	verificar/prever existência de aterramento
			acima de $k-\Delta k-3$	idem acima e impedir acesso de pessoas
		longa	até $k-\Delta k-3$	verificar/prever aterramento e elaborar projeto para obtenção de níveis adequados de potenciais de passo e de toque
			acima de $k-\Delta k-3$	idem acima e impedir acesso de pessoas
	LD, L. Tel	curta	----	projeto de travessia
		longa	----	projeto de travessia e estudo de indução

**TABELA 4.2 - INTERFERÊNCIAS (continuação)**

ÁREA	OBSTÁCULO	EXTENSÃO (m)	ALTURA (m)	PROCEDIMENTO
C e D	objeto não-metálico	curta	----	verificar possibilidade de travessia com estrutura especial, remanejamento ou execução de variante
		longa	----	efetuar variante
	objeto metálico	curta	----	verificar possibilidade de travessia com estrutura especial e projeto de aterramento, remanejamento ou variante
		longa	----	efetuar variante
	LD, L. Tel.	curta	----	verificar possibilidade de remanejamento ou efetuar variante
		longa	----	verificar possibilidade de remanejamento, incorporação ou efetuar variante



**TABELA 4.2 - INTERFERÊNCIAS (continuação)**

ÁREA	OBSTÁCULO	EXTENSÃO (m)	ALTURA (m)	PROCEDIMENTO
G	objeto metálico	curta	----	anotar ponto no traçado para balisar implantação das estruturas
		longa	----	verificar possibilidade de variante ou checar potenciais de toque por afloramento e/ou manutenção subterrânea e escolher previamente locais para implantação de estruturas

\* Obs.: Extensão curta: objeto de comprimento até 3 vezes a altura  
Extensão longa: objeto de comprimento superior a 3 vezes a altura

**TABELA 4.3 - APROXIMAÇÕES**

TIPO	PROCEDIMENTO
hospitais, escolas e maternidades	prever projeto específico de RI, TVI e ruído audível
áreas descampadas	prever projeto específico para segurança contra acesso de pessoas e jogos de crianças

**TABELA 4.4 - ÁREAS DE PASSAGEM**

SITUAÇÃO	PROCEDIMENTO
inacessibilidade	efetuar variante
região não protegida contra descargas atmosféricas	prever projeto de proteção
região sob poluição de gases	dimensionamento específico ou proteção dos isoladores
região sob poluição de material particulado	dimensionamento específico de isoladores

#### 4.1.3 Grau de Compactação Necessário ou Possível

Após completados os procedimentos anteriores, o projetista poderá estimar com maior precisão a configuração das estruturas e disposição de fases da LTC. Essa etapa de dimensionamento pode, inclusive, levar à escolha de estruturas diferentes para determinados trechos e, até mesmo, se a região permitir, à utilização de uma ou outra estrutura convencional (torre treliçada), quando da necessidade de grandes deflexões ou obtenção de clearances elevados para superação de obstáculos, dando origem a linhas mistas.

O dimensionamento propriamente dito da LTC deve ser feito, portanto, para cada trecho de configuração distinta. Assim, a LTC pode apresentar diferentes valores para as dimensões físicas das estruturas e, naturalmente, também para as faixas de servidão. Em

outras palavras, o grau de compactação é variável de acordo com as circunstâncias e atendimento dos procedimentos mencionados nas tabelas precedentes.

Aqui, a atenção é dirigida exclusivamente ao estudo preliminar para determinação da viabilidade física de implantação da LTC. Não são enfocados os aspectos econômicos dessa implantação, os quais, já nessa etapa preliminar podem ser levantados em paralelo, e eventualmente determinar a inviabilidade de implantação da LTC, sustando a continuidade do dimensionamento. Supõe-se sempre que a LTC é viável do ponto de vista econômico, independentemente dos tipos e quantidades de estruturas, isoladores e cabos considerados.

O grau de compactação necessário da LTC será dado pelo dimensionamento da LTC através dos cálculos dos parâmetros discutidos no item 3. Esse grau de compactação poderá ainda ser modificado por restrições referentes à interação ao meio ambiente e adequação à normalização existente, o que determinará o grau de compactação possível da LTC e, conseqüentemente, a sua configuração final.

Para propiciar uma melhor visualização e acompanhamento do dimensionamento, define-se aqui o grau de compactação como sendo o inverso da variação exponencial da área gerada pela seção transversal da LTC:

$$gc = 100 / \{ \exp[0,01L(T+H)] \} \quad (4.1)$$

onde L, T e H são as dimensões apresentadas na fig. 4.1.

Essa proporcionalidade exponencial inversa dá uma boa correlação da dificuldade real em se obter um maior grau de compactação da linha. De fato, esse é um parâmetro essencialmente

orientativo no projeto da LTC. Seu uso sistemático proporciona ao projetista uma capacidade de avaliação imediata e segura do nível de otimização da compactação da linha. Assim ele pode, após determinado tempo, saber se para uma dada configuração de LTC o grau de compactação obtido até então é razoável ou ainda não. Se é efetivamente necessária a repetição de cálculos já efetuados, ou se o ganho que adviria disso em termos percentuais seria irrelevante.

#### 4.1.4 Determinação da Configuração Inicial

Com base nas anotações de traçado e nos procedimentos indicados no item 4.1.1, escolher-se-á as configurações aproximadas das estruturas para permitir o dimensionamento específico da LTC.

As figuras 4.2 a 4.13 constituem sugestões de estruturas para essa fase do dimensionamento [47]. Nesse estudo, considera-se que poderão existir várias configurações de estruturas para uma mesma LTC, dimensionadas segundo as necessidades existentes em cada trecho do traçado, e em conformidade com os critérios expostos. Não se cogitará a necessidade de se adequar forçosamente o traçado da LTC em virtude da existência (ou disponibilidade) de uma única configuração de estrutura.

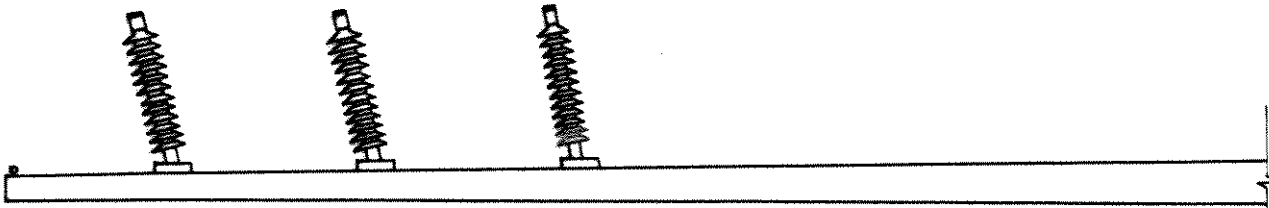


FIGURA 4.4

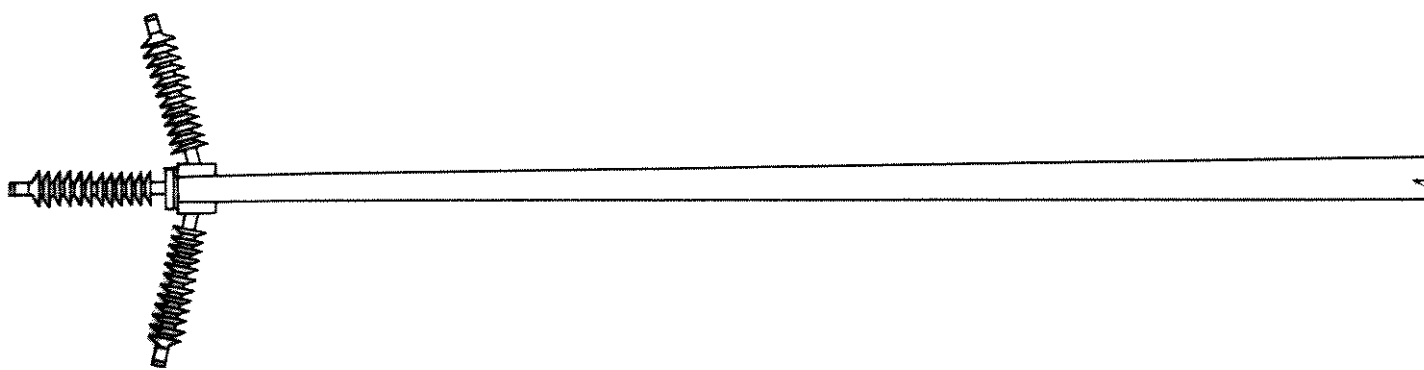


FIGURA 4.3

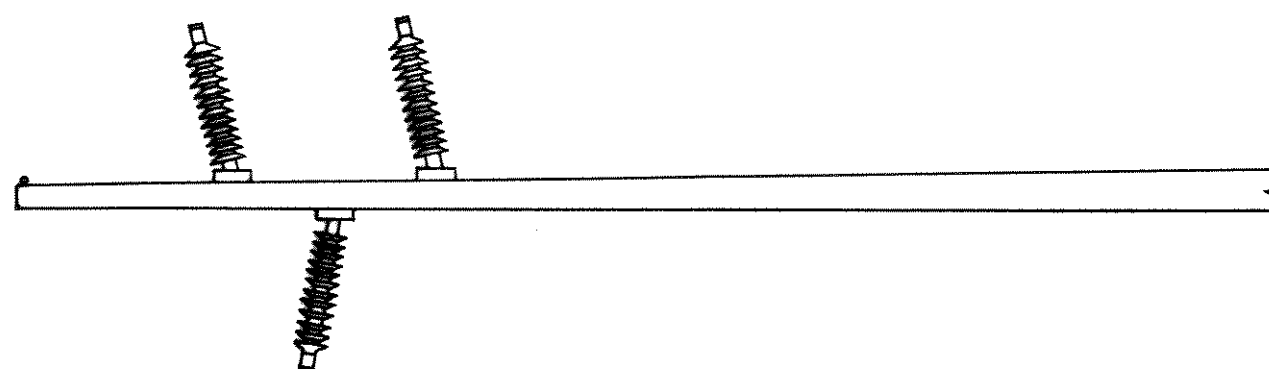


FIGURA 4.2

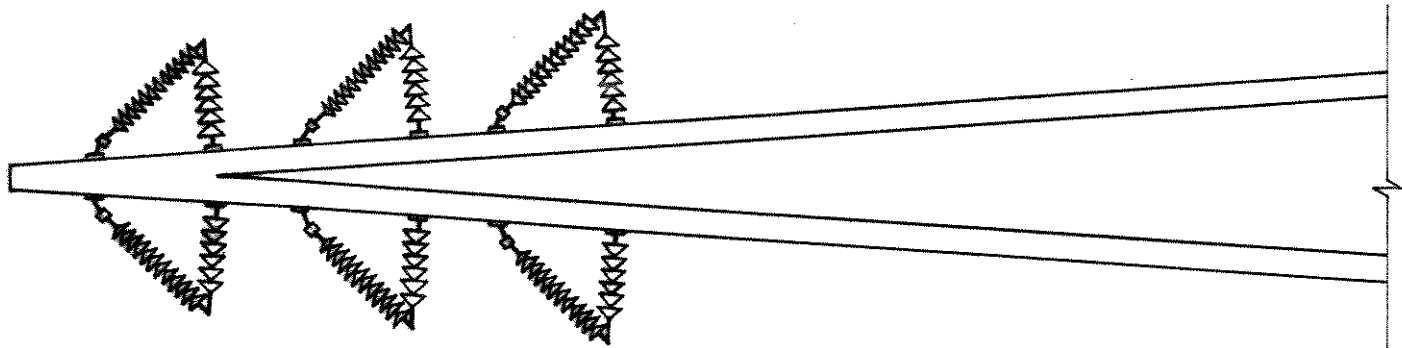


FIGURA 4.7

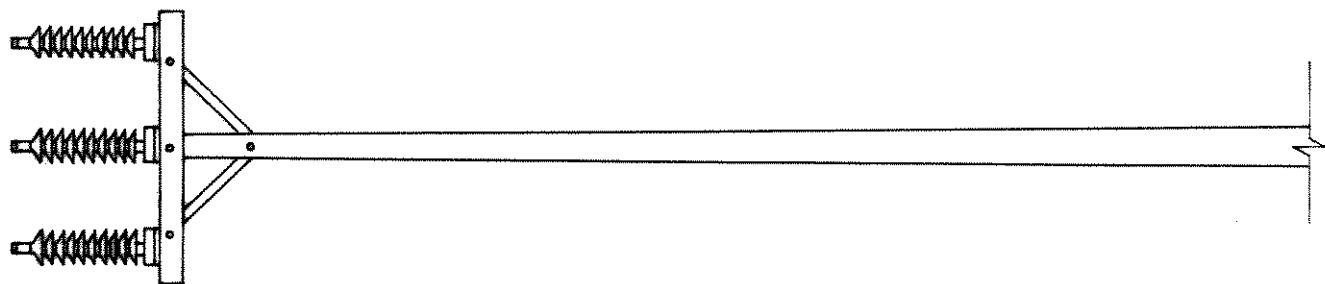


FIGURA 4.6

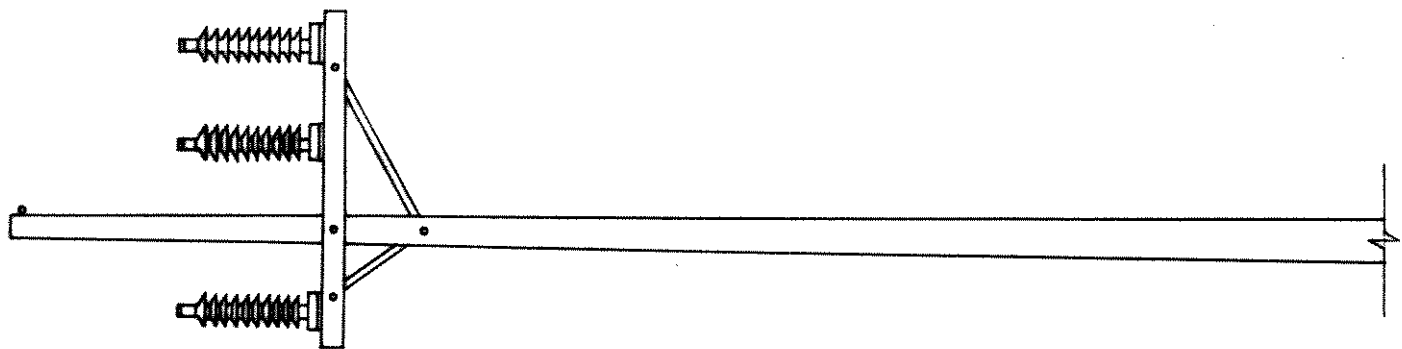


FIGURA 4.5

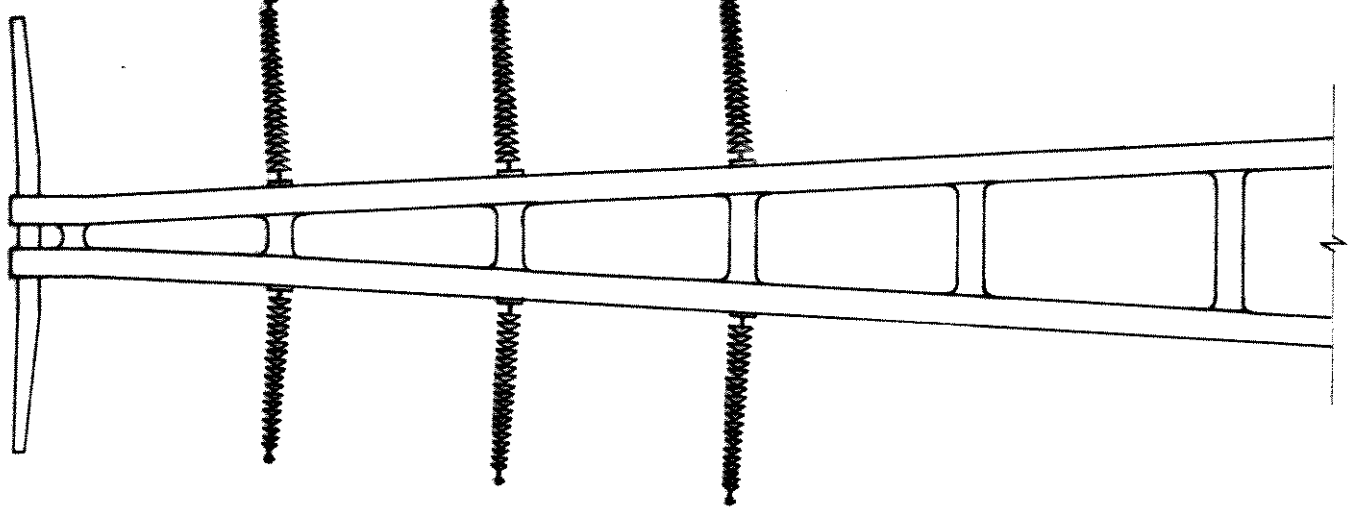


FIGURA 4.10

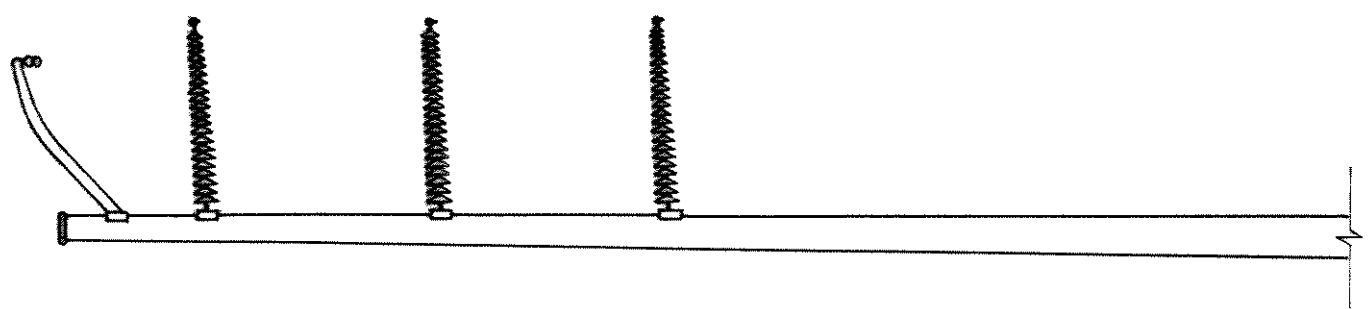


FIGURA 4.9

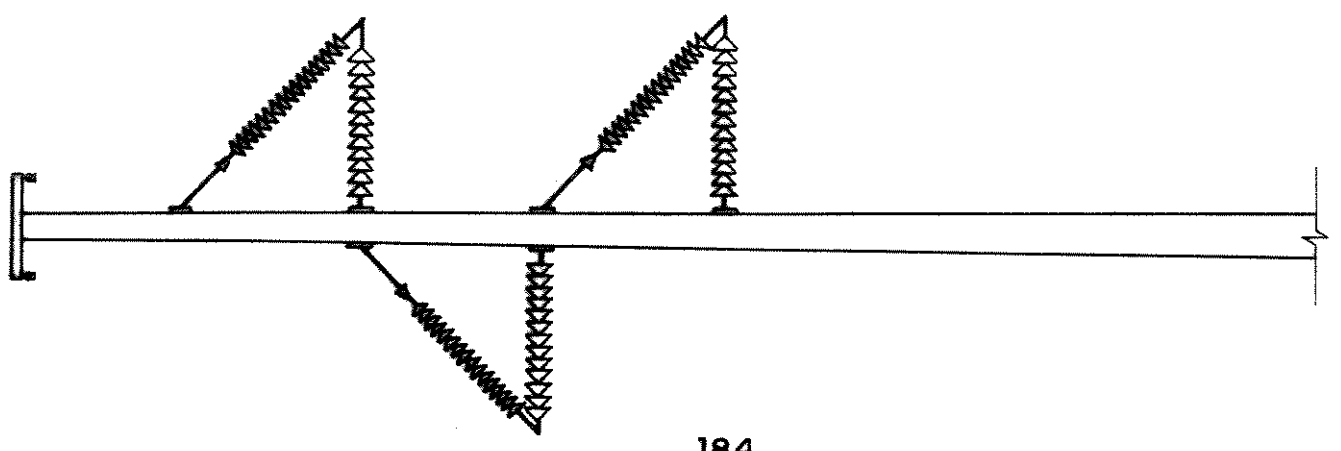


FIGURA 4.8

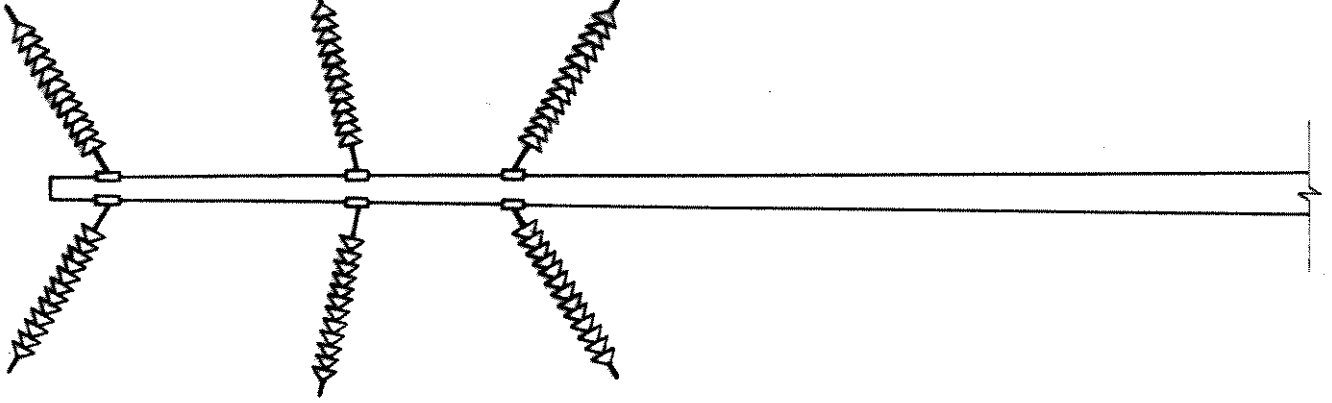


FIGURA 4.13

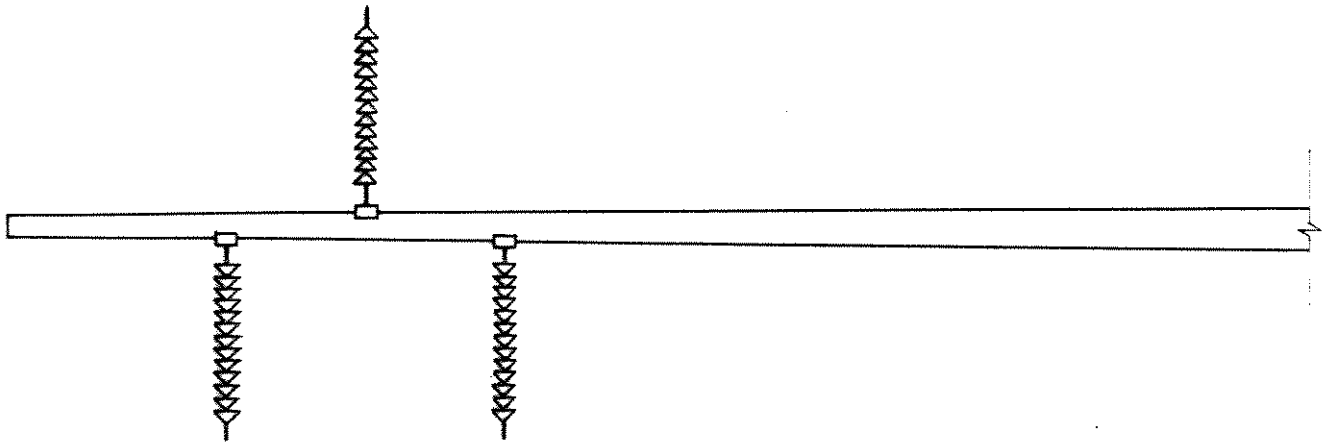


FIGURA 4.12

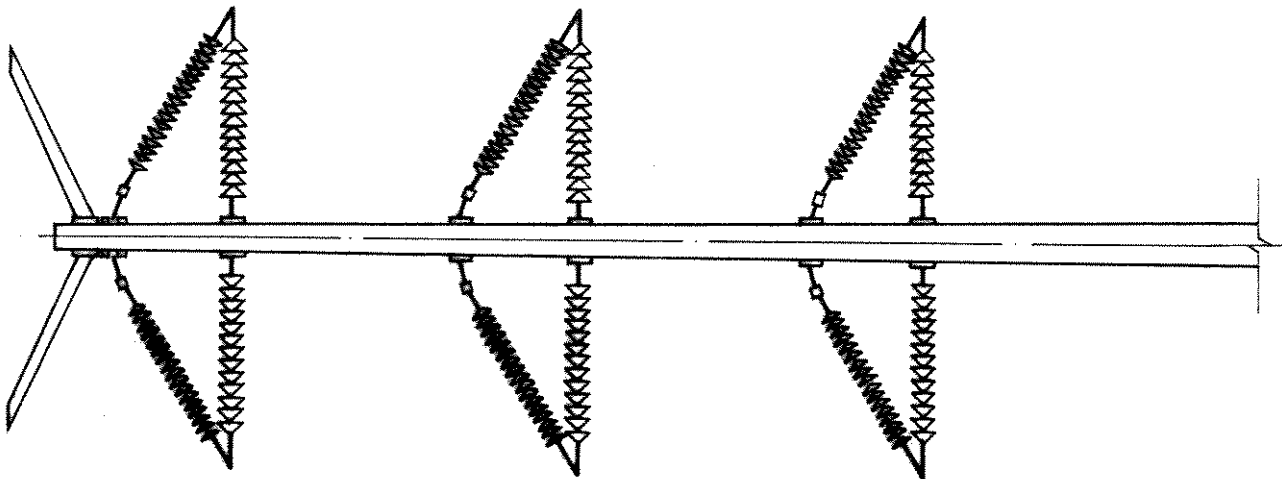


FIGURA 4.11



## 4.2 O DIMENSIONAMENTO DA LTC

### 4.2.1 Cálculo de Distâncias Elétricas

Com base nas indicações descritas no item 3.1.1 - parte C (Isolador Composto/Isolador Convencional - análise comparativa), e nos itens do tópico 4.1 - Aspectos Preliminares, assim como em dados de ante-projeto, as seguintes informações são conhecidas para o cálculo das distâncias elétricas de uma LTC:

- Características da LTC:

- . estrutura: poste cônico de aço.
- . tensão: 138kV.
- . disposição: vertical - circuito simples - triangular (figura 4.8).
- . extensão: 18 km.
- . extensão em área não sujeita à proteção contra descargas atmosféricas: 6 km.
- . isolação: isolador line-post convencional em toda a extensão.
- . vão mínimo estimado: 80m.
- . vão máximo estimado: 220m.
- . número de vãos estimados: 200.
- . altura máxima das estruturas: 14m.
- . distância vertical inicial entre o topo da estrutura (altura do cabo pára-raios) e a fase 1, e entre as fases 1 e 3: 2m.

. cabo condutor: "Cardinal", peso próprio: 1,8283 kg/m, diâmetro nominal: 30,38mm, carga de ruptura:  $Trp = 15.345 \text{ kgf}$ .

. tração de trabalho: 18% de  $Trp$ .

. cabo pára-raios: cabo de aço EHS 3/8", peso próprio: 0,406 kg/m, diâmetro nominal: 3,05mm, carga de ruptura: 6.986Kgf.

. corrente prevista de curto-circuito: 16.400A / 8ciclos.

- Características da região atravessada:

. pressão atmosférica: 736mmHg.

. temperatura média anual: 23°C.

. umidade média: 10g/m<sup>3</sup>.

. nível isocerâunico: 50 dias/ano com tempestades com descargas atmosféricas.

. grau de poluição: leve.

A) DIMENSIONAMENTO DO ISOLADOR OU DETERMINAÇÃO DA

DISTÂNCIA FASE-TERRA:

Isolamento à frequência industrial sob poluição

A faixa de distância geométrica de escoamento (DGE) sugerida para a situação de poluição leve é de 25,4mm/kVrms a 31,75mm/kVrms.

A distância total de escoamento (DTE) que o isolador deverá apresentar será portanto:

$DTE = \text{Tensão fase-terra máxima} \times DGE$

Utilizando por segurança o DGE máximo de 31,75mm/kVrms:

$DTE = (138 \times 1,1/\sqrt{3}) \cdot 31,75 = 2.783\text{mm}$

De acordo com a figura 3.13, vê-se que a distância de escoamento necessária é cerca de 70% da distância de escoamento

nominal do isolador, nas proximidades de ocorrência de flashover por contaminação. O procedimento natural aqui é estipular uma margem de segurança sobre o valor do DTE encontrado inicialmente. A aplicação dessa margem de segurança, qualquer que seja seu valor, não significa a eliminação da possibilidade de ocorrência de flashover, mas sim a redução da probabilidade de sua ocorrência. Espera-se, porém, que se a região permanecer na condição de poluição leve, o isolador possa ser limpo natural e periodicamente, não ocorrendo portanto flashover nos "picos" de poluição depositada em seu corpo.

Estipulando em 20% a margem de segurança, o novo DTE' será:

$$DTE' = 1,2 DTE = 3.340\text{mm}$$

Esse valor é inferior à distância de escoamento do isolador composto nacional, que é de 3.999mm [1], porém é superior a do isolador convencional importado, que é de 3.302mm [21]. Portanto, pelo critério de frequência industrial, o isolador composto está superdimensionado, e o convencional, subdimensionado.

O comprimento do isolador composto nacional é de 1.537mm, sendo 1.279mm de corpo e 259mm de ferragem [1]. Segundo o critério exposto acima, o comprimento desse isolador ( $L_i$ ) poderia ser reduzido, calculado como se segue:

$$L_i = (3.340/3.999) \cdot 1.279 + 259 = 1.327\text{mm}$$

O isolador composto dimensionado seria, pois, 211mm mais curto que o disponível no mercado.

A linha de arco ( $L_a$ ) pode ser estimada como sendo o corpo do isolador acrescido de 2 passos entre aletas [1]. Considerando o passo utilizado no isolador nacional de 38,5mm, vem:

$$L_a = (3.340/3.999) \times 1279 + 2 \times 38,5 = 1.145 \text{mm}$$

Para a LTC em estudo está previsto o uso de isolador convencional em toda a sua extensão. Esse isolador apresenta um comprimento de 1.612,9mm [21], e, contrariamente ao isolador composto, deverá ter seu comprimento acrescido linearmente:

$$L_i = 3.340/3.302 \times 1.612,9 = 1.631 \text{mm.}$$

A distância fase-terra será, pois, de 1.631mm.

O isolador convencional dimensionado é, portanto, 18mm mais longo que o existente no mercado.

A linha de arco do isolador convencional corresponde a 85,43 % do comprimento do seu corpo [21]. Assim, tem-se:

$$L_a = 0,8543 \times 1.631 = 1.393 \text{mm.}$$

## B) DETERMINAÇÃO DA DISTÂNCIA FASE-FASE:

### 1. Impulso de Manobra

Estipula-se inicialmente um valor para sobretensão fase-terra decorrente de surto de manobra de acordo com a tabela 3.1. Os valores dessa tabela são bastante conservativos, conforme indica também a figura 3.16, que mostra que numa operação de energização da linha, a probabilidade que a sobretensão ultrapasse 2,5 pu é de cerca de apenas 0,12%.

Não se considerará as sobretensões decorrentes de religamento tripolar, não apenas pelos valores de sobretensão máximos extremamente elevados (entre 3 e 5 pu), mas também porque este é um procedimento absolutamente inusual, podendo-se eliminá-lo já no projeto da subestação.

Posto isto, verifica-se que o caso mais desfavorável corresponde à manobra "Energização de Linhas", que gera uma sobretensão máxima da ordem de 3 pu.

Através da figura 3.15 obtém-se o valor aproximado de sobretensão fase-fase, de 4,6 pu (Sff).

O valor de pico da tensão fase/terra (Vftp) é:

$$V_{ftp} = 138\sqrt{2}/\sqrt{3} = 112,7\text{kV}$$

Da equação 3.1.1 vem:

$$V_{ws} = 4,6 \times 112,7 = 518,42\text{kV}$$

Impondo uma probabilidade de 99% de que a tensão suportável entre fases não seja excedida, obtém-se, do gráfico da figura 3.17, para 200 vãos, o valor de  $\underline{a}$  igual a 3,88. Da equação 3.1.2 tem-se o valor corrigido para a tensão crítica de flashover (V'cf):

$$V'_{cf} = 518,42/(1-0,05 \times 3,88) = 643,2\text{kV}$$

Para pressão de 736mmHg e temperatura de 23°C, obtém-se, da figura 3.18, uma densidade relativa (RAD) de 0,975. Para uma umidade de 10g/m<sup>3</sup> tem-se, através do gráfico da figura 3.19, um fator de correção Kh igual a 1,06.

Da equação 3.1.4 vem o valor da tensão crítica de flashover não corrigida:

$$V_{cf} = (643,2 \times 1,06)/0,975 = 699,3\text{kV}$$

Com o valor de Vcf, obtém-se, através do gráfico da figura 3.20 uma distância necessária entre fases (gap) de 1,5m. Este valor é superior ao utilizado na LTC experimental estudada pela EPRI, que é da ordem de 91cm, porém, permite já um excelente grau de compactação pelo critério de sobretensão de manobra.

## 2. Movimento de Cabos em Curto-Circuito

É preciso agora verificar se a distância entre fases calculada acima (1,5m) é suficiente para se evitar um curto-circuito fase-fase pelo movimento de cabos quando da reenergização da linha.

Com base nos valores para a situação padrão e nas curvas paramétricas (figuras 3.32 a 3.41), pode-se montar a seguinte tabela:

CORREÇÃO PARA	POR UNIDADE	FIGURA	FATOR DE CORREÇÃO
Duração da corrente de curto	$\frac{8}{10} = 0,8$	3.33	1,12
Tração de trabalho	$\frac{2.762}{2.563} = 1,08$	3.38	1,00
Espaçamento entre fases	$\frac{1,5}{0,91} = 1,65$	3.40	1,71
Peso do condutor	$\frac{1.828,3}{1.626} = 1,12$	3.39	1,02

A correção total é o produto dos fatores de correção, que resulta em 1,95.

Da figura 3.32 vê-se que a corrente máxima admissível para a situação padrão com vão de 220 m (722 ft) é 6.200 A.

Para a situação representada, a máxima corrente de curto-circuito admissível seria:

$$6.200 \times 1,95 = 12.090 \text{ A}$$

Esse valor está bem aquém do nível previsto de 16.400 A.

Uma solução é aumentar a distância entre fases. Isso se faz obtendo-se linearmente o novo fator de correção:

$$(16.400/12.090) \times 1,71 = 2,32$$

A figura 3.40 mostra que, para o fator de correção de 2,32 , o espaçamento entre fases correspondente é 1,92 pu. Como a condição inicial é 91cm, a distância entre fases necessária agora é:  
 $df = 1,92 \times 0,91 = \underline{1,75m}$ .

Se o acréscimo do espaçamento entre fases de 1,50m calculado anteriormente para esse valor de 1,75m for demasiado, isto é, se for crítico do ponto de vista do grau de compactação desejado, pode-se procurar também diminuir o vão máximo da LTC ou inserir espaçadores entre fases, o que significa criar sub-vãos.

O valor do vão máximo admissível também é obtido pela correção linear da corrente máxima admissível:

$$6.200 \times (16.400 / 12.090) = 8.410 \text{ A}$$

A figura 3.32 mostra que esse valor de corrente é suportável para um vão máximo de 71,6m (235 ft). Portanto, se se optar em manter a distância entre fases de 1,50m o vão máximo da LTC não poderá ultrapassar 71,6m. Ou então, pode-se reduzi-lo de 220m para 215m (com a necessária verificação de campo), e dividi-lo em 3 seções de 71,6m , com a inserção de espaçadores fase-fase (pág.77 - item a).

C) DETERMINAÇÃO DA GEOMETRIA DOS CABOS PÁRA-RAIOS E ALTURA MÁXIMA DOS CONDUTORES NA ESTRUTURA EM ZONAS NÃO PROTEGIDAS CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS:

A disposição dos cabos pára-raios e altura máxima dos condutores na estrutura serão determinadas segundo o desempenho estabelecido ou esperado em surtos atmosféricos.

Conforme mencionado, uma LTC atravessando uma área urbana de uma cidade de médio ou grande porte, terá provavelmente uma parte

de seu trajeto à sombra de sistemas já instalados de proteção contra descargas atmosféricas. Nesse caso, pode-se afirmar que a probabilidade de queda direta de uma descarga na LTC nesse trecho do trajeto é praticamente a mesma de uma descarga numa linha de distribuição passando na mesma região. A utilização de cabos pára-raios nessa situação não só é dispensável como até inconveniente, se se considerar que poderão servir para a propagação de um surto ocorrido num outro trecho da linha, o qual poderá induzir tensões em objetos metálicos paralelos ao eixo da LTC.

Vamos considerar então um trecho do traçado em que não exista previamente uma proteção contra descargas atmosféricas, o que se dá geralmente na periferia da cidade ou nas proximidades de parques e outros locais descampados.

O dimensionamento da geometria dos cabos pára-raios e altura das estruturas é calculado segundo os passos abaixo:

I) Inicialmente determina-se o valor da corrente máxima admissível de surto atmosférico.

A corrente máxima admissível é aquela que gera uma tensão ainda suportável sobre o isolador, não causando flashover. A pior situação, ou seja, o menor valor de corrente de surto acima do qual existirá o flashover, ocorre na queda direta da descarga sobre os condutores.

A tensão que aparece sobre o isolador é dada pela equação 3.1.9:

$$V_{ri} = I_o \cdot Z_{sc} / 2$$



Para determinar  $I_o$ , impõe-se  $V_{ri}$  como a máxima tensão suportável sob impulso para o valor de  $L_a$  calculado do isolador.

Com o valor calculado de  $L_a=1.393\text{mm}$  para o isolador convencional, tem-se, do gráfico da figura 3.24, um valor máximo de tensão suportável sob impulso atmosférico de polaridade positiva de 805kV.

Portanto,  $V_{ri} = 805\text{kV}$ .

Na análise das descargas em cabos condutores serão utilizadas as seguintes equações:

$$I_o = 2.V_{ri}/Z_{sc} \quad (3.1.9)$$

$$Z_{sc} = 60\ln(2\bar{h}_i/rc) \quad (3.1.10)$$

$$\bar{h}_i = h_i - 2S_c/3 \quad (3.1.11)$$

$$S_c = V^2 \times p / (8 \times 0,18 \times T_{rp}) \quad (3.1.26-a)$$

Deve-se inicialmente procurar determinar a situação mais desfavorável. Isso significa encontrar o menor valor de  $I_o$  acima do qual ocorrerá flashover.  $I_o$  é mínimo para  $Z_{sc}$  máximo.  $Z_{sc}$  é máximo para  $\bar{h}_i$  máximo. Por sua vez,  $\bar{h}_i$  será máximo para  $h_i$  máximo e  $S_c$  mínimo.  $S_c$  será mínimo para o menor valor de  $V$  estimado, que é de 80m, e  $h_i$  será máximo para o maior valor de  $H$  previsto, que é de 14m.

Evidentemente, não é de se esperar que para a implantação do vão mínimo, sejam utilizadas as estruturas de maior altura. Porém, desenvolvendo-se os cálculos para essa situação hipotética, assegura-se que nenhuma outra disposição física da linha estará sujeita a flashover em decorrência de um  $I_o$  menor.

Existe ainda uma outra possibilidade de se ter um valor de  $h_i$  maior. Seria no caso de uma distância vertical menor que 2m entre o cabo pára-raios e o condutor da fase mais elevada, acarretando um valor menor para  $d_{pi}$ . Isso faria crescer o acoplamento capacitivo KC (equação 3.1.15-b), propiciando um menor valor de  $V_{rt}$  (equação 3.1.14), o que é um efeito benéfico e não desprezível. Deve-se atentar, porém, que uma menor distância entre os cabos condutor e pára-raios exigiria que esse último fosse fixado num ponto mais afastado da estrutura, o que pode se mostrar indesejável do ponto de vista estético, além de dificultar os procedimentos para manutenção da LTC.

Deve-se, pois, impor uma limitação a esse afastamento do cabo pára-raios com base no ponto de fixação do cabo condutor. Tendo em vista as considerações acima, a diretriz será a seguinte: "O mínimo valor que poderá assumir a distância vertical existente entre o cabo pára-raios e o condutor de fase mais elevada, será tal que, quando da determinação do ponto de fixação do cabo pára-raios, a sua distância de afastamento da estrutura seja de, no máximo, 70% do comprimento (ou da projeção horizontal) do isolador line-post da fase mais elevada". Isso permitirá incrementar a condição conservativa de cálculo estipulada, bem como otimizar o cálculo subsequente de  $V_{rt}$ .

Feitas essas considerações, tem-se:

$$S_c = 80^2 \times 1,823 / 8 \times 0,18 \times 15.345 = 0,53m$$

$$h_i = H - 2 = 12m \text{ (valor inicial)}$$

$$\bar{h}_i = 12 - 2 \times 0,53 / 3 = 11,65m$$

$$Z_{sc} = 60 \ln(2 \times 11,65 / 0,01519) = 440 \Omega$$

$$I_o = 2 \times 805 / 440 = 3,66 \text{ kA} \approx 3,6 \text{ kA (conservativamente)}$$

Os cabos pára-raios deverão, portanto, ser posicionados de forma que descargas com correntes superiores a 3,6 kA sejam desviadas para a terra ou para os próprios cabos pára-raios.

A determinação da distância média de atração da descarga atmosférica ( $l$ ) é dada em sua forma mais precisa pela equação 3.1.5:

$$l = 2 \times 3,6 + 30 [1 - \exp(-3,6/6,8)] = 19,5\text{m.}$$

Conforme descrito no item 3.1.2, tópico 4 - Impulso Atmosférico, deve-se posicionar o cabo pára-raios de tal forma, que a blindagem anule a possibilidade de uma descarga com distância de atração superior a 19,5m poder atingir os cabos condutores. A figura 4.14 mostra que isso é obtido inicialmente fixando-se o cabo pára-raios no ponto  $\underline{P}$ , distando cerca de 810mm da estrutura e com o cabo condutor fixado no ponto  $\underline{C}$ , a 1.631mm da estrutura, que é o comprimento do isolador convencional dimensionado no tópico A - Distância fase-terra.

Adotando o valor máximo estipulado para a distância de fixação do cabo pára-raios em 70% do comprimento do isolador line-post, obtem-se o ponto  $\underline{P}'$ , distando 1.142mm da estrutura. O ponto  $\underline{P}'$  permite a fixação do cabo condutor no ponto  $\underline{C}'$ , distando agora 1,2m do topo da estrutura. A altura  $h_i$  aumentou, portanto, em 0,8m.

Os cálculos precedentes devem agora ser refeitos para se verificar a influência desse aumento da altura do cabo no valor mínimo da corrente  $I_o$ :

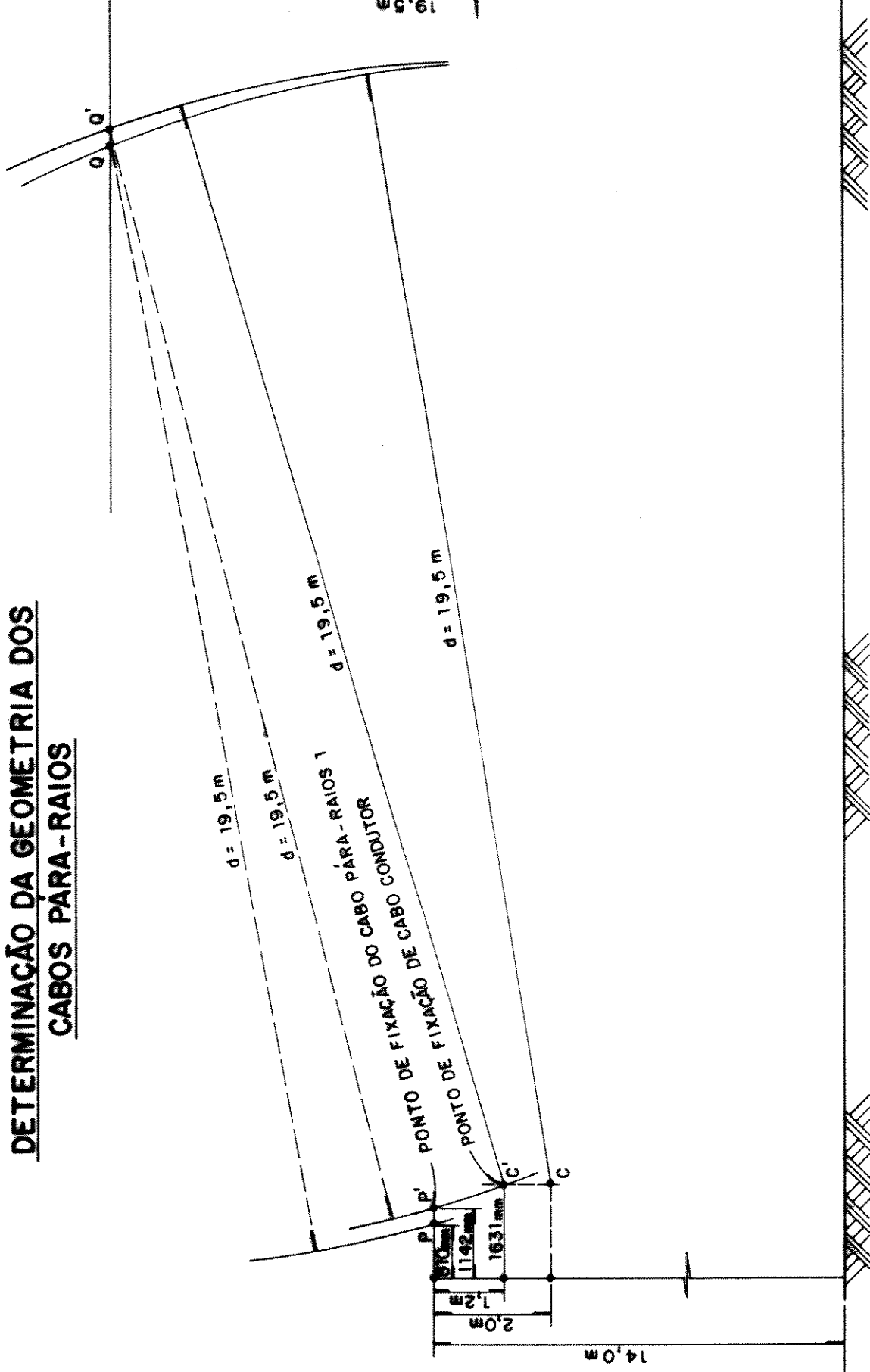
$$h_{i'} = H - 1,2 = 12,8\text{m}$$

$$\overline{h_{i'}} = 12,8 - 2 \times 0,53/3 = 12,45\text{m}$$

$$Z_{sc'} = 60 \ln(2 \times 12,45/0,01519) = 444 \Omega$$

$$I_{o'} = 2 \times 805/444 = 3,63 \text{ kA} \approx \underline{3,6 \text{ kA}}$$

**DETERMINAÇÃO DA GEOMETRIA DOS CABOS PARA-RAIOS**



**FIGURA 4.14**

O aumento da altura do cabo não traz, portanto, nenhuma variação no valor conservativo adotado de  $I_0 = 3,6 \text{ KA}$ .

A figura 4.15 mostra a configuração da LTC dimensionada até agora. Por uma questão de estética, optou-se em manter a mesma posição relativa inicial entre os conjuntos de suportes das fases 1 e 2.

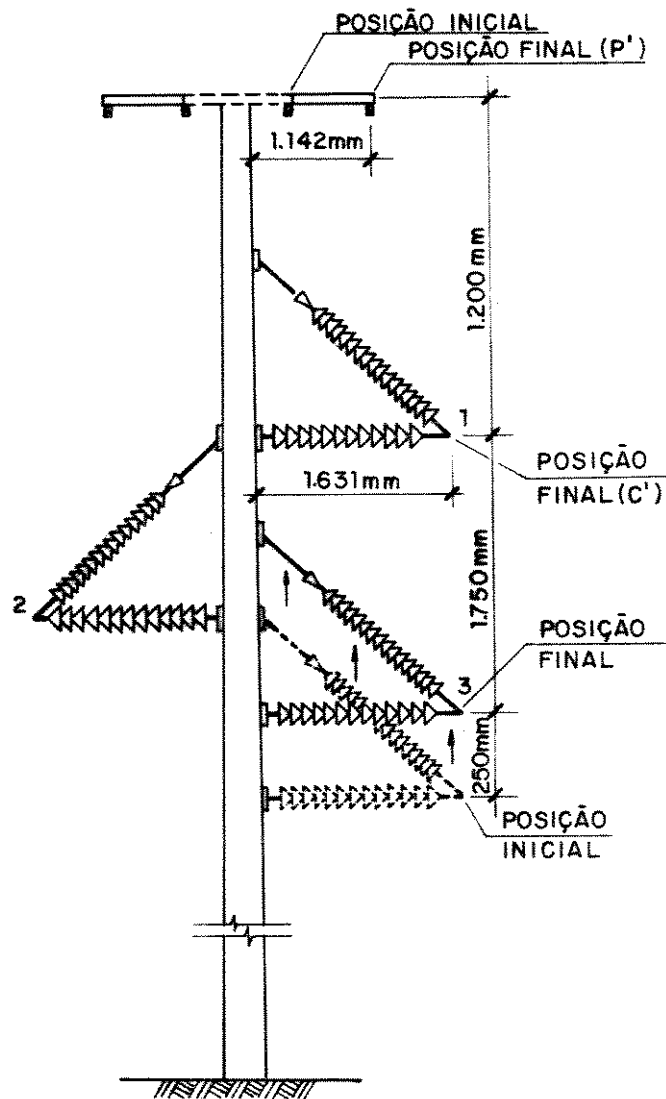


FIGURA 4.15

Correntes de descargas atmosféricas superiores a 3,6kA serão desviadas para os cabos pára-raios ou para a terra.

II) O próximo passo consiste em determinar o valor da corrente de descarga  $I_o$  que pode atingir o cabo pára-raios sem provocar flashover.

Se a descarga atingir o cabo pára-raios, poderá fazê-lo ao longo de um vão ou diretamente sobre a estrutura.

Para o estudo dos efeitos da descarga atingindo o topo da estrutura, tem-se as equações:

$$I_o = V_{rt}/Z_{eq} \quad (3.1.13)$$

$$Z_{eq} = Z_{st}/(1+2Z_{st}/Z_{sp}) \quad (3.1.12)$$

$$V_{rt} = V_{ri}/(1-KC) \quad (3.1.14)$$

$$KC = \log \sqrt{dp'1 \cdot dp'2} / dp1 \cdot dp2 / \log(2H/\sqrt{dp \cdot rp}) \quad (3.1.15-b)$$

Considerando que os dois cabos pára-raios estarão posicionados simetricamente ao eixo longitudinal da estrutura (figura 4.15), obtem-se, por inspeção da figura 4.14:

$$dp'1 = \sqrt{(14 + 12,8)^2 + (1,631 - 1,142)^2} = 26,804m$$

$$dp'2 = \sqrt{(14 + 12,8)^2 + (1,631 + 1,142)^2} = 26,943m$$

$$dp1 = \sqrt{1,2^2 + (1,631 - 1,141)^2} = 1,296m$$

$$dp2 = \sqrt{1,2^2 + (1,631 + 1,142)^2} = 3,022m$$

$$dp = 2 \times 1,142 = 2,284m$$

Das características da linha:  $H = 14m$  e  $rp = 0,001525m$ .

Os valores acima, substituídos na equação 3.1.15-b, fornecem  $KC = \underline{0,42}$ .

Este valor é superior ao geralmente encontrado nas LT's, o qual situa-se, via de regra, entre 0,15 e 0,30 [27]. Isso demonstra o maior acoplamento que se obtém na compactação de linha, o que é um

efeito benéfico do ponto de vista da suportabilidade a descargas atmosféricas.

Novamente, impõe-se a tensão induzida no isolador ( $V_{ri}$ ), como o maior valor suportável sem ocorrência de flashover, que, como visto, é de 805kV.

Assim, da equação 3.1.14 determina-se  $V_{rt}$ :

$$V_{rt} = 805 / (1 - 0,42) = \underline{1.387,9kV}$$

A determinação de  $Z_{st}$  será feita através da equação 3.1.16-b, para estrutura tubular aproximando-se de um cilindro equivalente. Isso porque os postes de aço apresentam uma conicidade muito pequena [5] quando comparada à das estruturas treliçadas convencionais [48], nas quais é usual a aproximação por um cone, com a base delimitada pelo círculo que circunscreve os quatro pontos de afloramento das grelhas dos pés da torre.

Para  $H = 14m$ ,  $r_{bc} = 0,547m$  [5]

$$\text{Daí, } Z_{st} = 60 \ln(14/0,547) + 90 \times 0,547 / 14 - 60 = 138 \Omega$$

$Z_{sp}$  é calculado de forma análoga à  $Z_{sc}$ :

$$Z_{sp} = 60 \ln(2\overline{hg}/r_p)$$

Igualmente para  $\overline{hg}$  e  $S_g$ :

$$\overline{hg} = hg - 2S_g/3 \quad | \quad S_g = V^2 \times p / 8 \times 0,18 \times T_{rp}$$

Assim,

$$S_g = 80^2 \times 0,406 / 8 \times 0,18 \times 6.986 = 0,26m$$

$$\overline{hg} = 14 - 2 \times 0,26 / 3 = 13,83m$$

$$\text{e } Z_{sp} = 60 \ln(2 \times 13,83 / 0,001525) = 588 \Omega$$

a impedância equivalente fica:  $Z_{eq} = 138 / (1 + 2 \times 138 / 588) = 94 \Omega$

Da equação 3.1.13, vem:

$$I_o = 1.387,9 / 94 = 14,76 \text{ kA} \approx \underline{14,7 \text{ kA}} \text{ (conservativamente)}$$

III) No caso da descarga atingir o cabo pára-raios no vão entre as estruturas, a pior situação se dará numa queda no meio do maior vão da linha, porque nessa situação a impedância de surto "vista" pela descarga será máxima.

Analogamente às situações anteriores, impõe-se o valor de tensão induzida no isolador igual ao maior valor suportável sem ocorrência de flashover (805kV). As equações para essa situação são:

$$I_o = 2.V_{mp}/Z_{sp} \quad (3.1.17)$$

$$V_{mp} = V_{ri}/(1-KC).[Z_{st}/(Z_{st}+Z_{sp}/2)] \quad (3.1.22)$$

$$\text{Daí, vem: } V_{mp} = 805/(1-0,42)[138/(138+588/2)] = 4.344,8\text{kV}$$

$$I_o = 4.344,8 \times 2 / 588 = 14,77\text{kA} \approx \underline{14,7\text{kA}} \text{ (conservativamente)}$$

Conforme já era esperado (vide esclarecimentos na página 98), o valor de  $I_o$  encontrado foi igual ao do caso anterior.

De acordo com o gráfico da figura 3.23, a probabilidade que uma corrente de descarga suplante 3,6 kA é de 87%. Isso significa dizer que se a linha não tivesse cabo pára-raios, na ocorrência de descarga sobre os condutores, haveria 87% de probabilidade de ocorrência de flashover, ou seja, 87% de chance de ocorrer desligamento da linha. Com a instalação dos cabos pára-raios, a probabilidade de desligamento da linha quando de uma descarga cai para 47%, que é a probabilidade indicada pelo gráfico da figura 3.23 de que uma descarga suplante o valor de 14,7 kA.

Mesmo essa probabilidade de 47% pode parecer a primeira vista um tanto excessiva, mas deve-se observar que essa é a probabilidade de desligamento para uma descarga atingindo diretamente



a LTC. A probabilidade que uma descarga atinja a LTC porém, depende do nível isocerânico da região atravessada e das dimensões físicas da linha como um todo: do volume gerado pelo produto da área da seção longitudinal da estrutura pelo comprimento da linha que não esteja à sombra de nenhum outro sistema de proteção atmosférica. Mesmo em lugares descampados, como parques e regiões periféricas, a existência de árvores de alturas superiores às estruturas da LTC nas proximidades de seu eixo já reduz a probabilidade da linha ser atingida.

Nesse ponto deve-se estimar, para a LTC em dimensionamento, o valor de um parâmetro bastante usual em linhas convencionais, qual seja: o nº de descargas em 100 km de linha durante um ano (N1).

Da equação 3.1.7, obtem-se a 1ª estimativa de N1 (N11):

$$N11 = \{120[1-\exp(-14/24,4)]+7,5\}[1+0,1(2-1)]50/48$$

$$N11 = \underline{69 \text{ descargas}/100 \text{ km/ano}}$$

Pela equação 3.1.8 proposta pela EPRI, tem-se a 2ª estimativa (N12):

$$N12 = [82 \times 50 \times (4 \times 14 + dp)]/8497$$

O valor de dp equivale a duas vezes a distância do ponto de fixação do cabo pára-raios até a superfície da estrutura, acrescido do diâmetro da seção transversal da estrutura tubular no ponto de fixação, o qual pode ser obtido facilmente no catálogo do fabricante do poste [5]. Para efeito de cálculo estipula-se aqui esse diâmetro em 100mm.

$$\text{Assim, } dp = 2 \times 1,142 + 0,1 = 2,38\text{m}$$

$$\text{e } N12 = \underline{28 \text{ descargas}/100 \text{ km/ano}}$$

A primeira equação foi desenvolvida para linhas de transmissão convencionais, atendo-se apenas à altura das estruturas, nível isocerâunico e número de cabos pára-raios.

A segunda equação foi desenvolvida para LTC's, e é função também da distância entre os cabos pára-raios. A diferença do número de descargas encontrado para as duas equações ( $N_{11} = 69$  e  $N_{12} = 28$ ) mostra, portanto, a influência da compactação na expectativa de queda de descargas nas linhas.

Considerando, pois, o valor da estimativa  $N_{12} = 28$  descargas/100km/ano, pode-se agora estimar para a LTC o número de desligamentos/100km/ano ( $N_d$ ). Como a probabilidade de desligamento da linha quando da ocorrência de descarga é de 47%, vem:

$$N_d = 0,47 \times 28 = 13,2 \text{ desligamentos/100 km/ano}$$

Como o trecho da LTC que passa por regiões que não estão à sombra de sistemas de proteção contra descargas atmosféricas é estimado em 6 km, o número de desligamentos previstos ( $N_d$ -ano) será:

$$N_d\text{-ano} = 6/100 \times 13,2 = 0,79 \approx \underline{1 \text{ desligamento/ano}}$$

Caso se tivesse optado por isoladores compostos, esse parâmetro seria utilizado para se ajustar a expectativa de vida útil do isolador pelos efeitos de deterioração já mencionados, com base nas características eletromecânicas fornecidas pelo fabricante.

#### 4.2.2 Cálculo de Distâncias de Segurança

Nessa etapa do dimensionamento já terão sido determinadas as dimensões dos isoladores e o ponto de fixação do cabo pára-raios.

Para o dimensionamento desenvolvido neste tópico estipula-se as seguintes informações:

- Características da LTC:

- . tensão: 230kV.
- . sobretensão de manobra fase-terra máxima prevista: 3pu.
- . disposição: vertical-circuito duplo (figura 4.11).
- . raio da seção transversal da estrutura no ponto de fi-

xação do cabo mais baixo: 290mm.

- . isolamento: isolador line-post composto  
comprimento dimensionado (Li): 2.406mm.  
ângulo de inclinação com a horizontal: 5°.
- . arranjo: 2 cabos condutores por fase distando de 40cm.
- . altura máxima das estruturas: 18m.
- . cabo condutor: "Hawk", peso próprio: 0,9779 kg/m, diâmetro nominal: 21,79mm, carga de ruptura: 8.673 kgf.
- . tração a 60°C: 14% da carga de ruptura.
- . vão máximo: 220m.

- Características da região a ser atravessada:

- . área urbana da cidade de Recife.
- . altitude média: 10m.
- . média das temperaturas mínimas anuais:  $t_{min}=14^{\circ}C$ .
- . esforço máximo de vento previsto: rajada de 30s com período de retorno de 20 anos.

. obtáculos a atravessar: linhas de distribuição de 13,8kV

e uma LTC de 138kV.

## A) DETERMINAÇÃO DAS DISTÂNCIAS DE TRAVESSIAS

### 1 - Travessia sobre linhas de 13,8kV

Segundo a norma NBR 5422, para linhas desse nível de tensão só é permitida a utilização da expressão indicada em 3.1.24:

$$DV = a_2 + 0,01 (D_u/\sqrt{3}-50)$$

Da tabela 3.3, obtem-se:  $a_2 = 1,2$

$$DV = 1,2 + 0,01 (230/\sqrt{3}-50) = \underline{2,03m}$$

A menor distância vertical que pode existir entre o condutor mais baixo da LTC de 230kV e os condutores da LD de 13,8kV é, pois, de 2,03m.

Isso não significa dizer que os cabos condutores das LTC de 230kV devem ser lançados obedecendo essa distância mínima, mas sim que, na pior condição operacional, ou seja, com temperatura do condutor a 60°C, sem vento, essa distância precisa ser obedecida.

### 2 - Travessia sobre LTC de 138kV

Aqui pode-se utilizar as duas equações propostas pela norma NBR 5422 (equações 3.1.24 e 3.1.25).

1ª equação:

$$DV = a_2 + 0,01(D_u/\sqrt{3}-50) + 0,01(d_u/\sqrt{3}-50)$$

$$DV = 1,2 + 0,01(230/\sqrt{3}-50) + 0,01(138/\sqrt{3}-50) = \underline{2,32m}$$

2ª equação:

$$DV' = a_1 + \{1,15 [(\sqrt{2} \cdot D_u/\sqrt{3}) S_{ft} + \sqrt{2} \cdot d_u] / 500 K_f\}^{1,667} \cdot b_c \cdot C_s$$

Da tabela 3.3, obtem-se:

$$a_1 = 0$$

$$C_s = 1,2$$

$$K_f = 1,4$$

Para condições atmosféricas variáveis,  $b_c = 1,03$ .

Assim,

$$DV' = 0 + \{1,15 [(\sqrt{2} \cdot 230 / \sqrt{3}) + 3 + \sqrt{2} \cdot 138] / 500 \cdot 1,4\}^{1,667} \\ \times 1,03 \times 1,2$$

$$DV' = \underline{1,78m}$$

O valor de DV' não poderá ser considerado caso seja inferior à primeira parcela de DV da 1ª equação (D1):

$$D1 = 1,2 + 0,01(230/\sqrt{3}-50) = \underline{2,03m}$$

Isso significa dizer que é preciso considerar obrigatoriamente a distância calculada pela primeira equação, de 2,32m. Se o valor de DV' (2ª fórmula) fosse superior a esse valor de D1 e inferior ao valor de DV (1ª fórmula), a distância vertical mínima de projeto seria o próprio DV'. Isso aconteceria, por exemplo, para uma sobretensão fase-terra de 3,4 pu, que forneceria DV' = 2,09m

#### B) DETERMINAÇÃO DA LARGURA DA FAIXA DE SERVIDÃO

Conforme já mencionado, a faixa de servidão calculada será posteriormente ainda "ajustada" (item 4.2.4) pelos níveis admissíveis de R.I., T.V.I. e ruído audível.

Para determinação dessa largura básica da faixa de servidão procede-se os cálculos em sentido inverso ao apresentado no item 3.1.3 - Distâncias de Segurança.

- Velocidade de vento de projeto (Vp):

Da equação 3.1.32:

$$Vp = Kr \cdot Kd \cdot (H/10)^{0,125} \cdot Vb$$

Para Tr = 20 anos, Vb é dado por:

$$Vb = B - \ln[-\ln(1-1/20)]/\alpha$$

Dos gráficos das figuras 3.44 e 3.45, tem-se, para a região de Recife:  $\alpha = 0,35$  e  $\beta = 10$

$$\text{Portanto, } V_b = 10 - \ln[\ln(1-1/20)]/0,35 = 18,5 \text{ m/s}$$

Do gráfico da figura 3.42, para uma rajada de 30 segundos, obtem-se  $K_d = 1,43$ .

Conforme indicado no item 3.1.3, o coeficiente de rugosidade de terreno para a área urbana é  $K_r = 0,67$ .

$$\text{Assim, } V_p = 0,67 \times 1,43 (18/10)^{0,125} \times 18,5 = \underline{19,1 \text{ m/s}}$$

- Determinação da massa específica do ar:

Da equação 3.1.31:

$$\rho = [1,293 / (1 + 0,00367 \times 14)] [(16.000 + 64 \times 14 - 10) / (16.000 + 64 \times 14 + 10)] = \underline{1,228 \text{ kg/m}^3}$$

- Determinação da pressão dinâmica de referência:

Da equação 3.1.29:

$$q_0 = 1/2 \times 1,228 \times (19,1)^2 = 223,99 \text{ N/m}^2 = \underline{22,4 \text{ kgf/m}^2}$$

- Determinação do fator de efetividade:

Da equação 3.1.30:

$$\delta = -0,00025 \times 200 + 0,70 = \underline{0,65}$$

- Determinação da carga transversal unitária:

Considera-se a situação mais desfavorável, com o vento atingindo perpendicularmente o vão, ou seja,  $\theta = 90^\circ$ .

Da equação 3.1.28:

$$e_v = 22,4 \times 0,65 \times 0,02179 \text{ sen}^2(90) = \underline{0,32 \text{ kgf/m}}$$

- Determinação do ângulo de balanço do cabo:

Da equação 3.1.27:

$$Y = \text{arctg}(0,32/0,9769) = \underline{18,13^\circ}$$

- Determinação da flecha máxima prevista:

Da equação 3.1.26-a:

$$Scm = (220^2 \times 0,9779) / (8 \times 0,14 \times 8673) = \underline{4,87m}$$

- Determinação da faixa de servidão:

Da equação 3.1.26:

$$L = 2(0,29 + 2,406 \cos 5^\circ + 0,4/2 + 4,87 \sin 18,13^\circ + 230/150)$$

$$L = \underline{11,87m}$$

Com esse valor de 11,87m, fica patente o extraordinário ganho que se obtém em termos de largura de faixa, quando se compara à apresentada por uma linha de 230kV convencional, da ordem de 38m. Vale dizer que a flecha das linhas convencionais, naturalmente, também é bem maior, assim como o vão médio para o cálculo da faixa.

Aqui pode-se verificar o grau de compactação obtido com essa faixa de servidão. Da tabela 4.1 e equação 4.1, considerando uma profundidade de engastamento de 2,3m, tem-se, para a faixa de servidão mínima prevista de 11m um gc máximo de 10,72%, e para a faixa mínima de 15m um gc mínimo de 4,76%.

No caso em estudo, para a faixa de 11,87m, o grau de compactação obtido é gc = 8,98%, valor bastante satisfatório tendo em vista a variação exponencial desse parâmetro.

#### 4.2.3 Cálculo de induções

##### A) INDUÇÃO ELETROSTÁTICA

Ilustra-se a seguir uma situação em que se deve verificar o nível de indução eletrostática ocasionado por uma LTC em área urbana.

Considere-se uma parada de ônibus situada no limite da faixa de servidão de 11m do traçado projetado de uma LTC de 230kV, de configuração e dimensões mostradas na figura 4.16. Com base na verificação de campo estima-se que a parada está localizada aproximadamente no meio de um vão de 185m.

Quando o ônibus encosta na parada de ônibus, fica sujeito a uma indução por acoplamento capacitivo com os condutores da LTC. A energia não é automaticamente descarregada em razão do ônibus estar isolado da terra pelos pneus.

A primeira pessoa que tocar no ônibus e ao mesmo tempo no solo, para subir ou descer, ficará sujeita à corrente de descarga decorrente da indução. Esse valor de corrente não poderá ser maior que o máximo estipulado segundo critérios adotados, seja de 1mA como limite de percepção, ou 5mA como corrente "let go".

Primeiramente determina-se a tensão induzida,

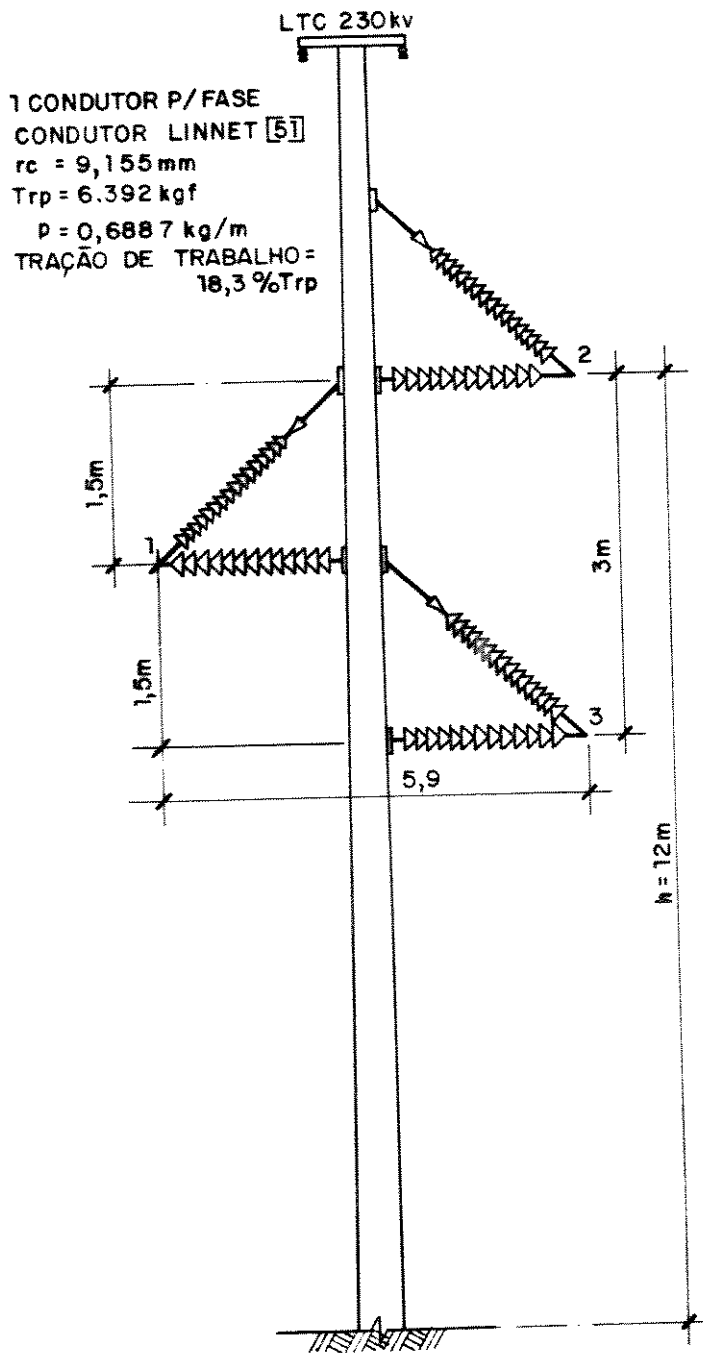


FIGURA 4.16



que é dada pela equação 3.2.8:  $Voc = K1.Es.\overline{h0}$

Os passos para isso são os seguintes:

I) Determinação do fator de correção da tensão induzida (K1):

A forma de um ônibus pode ser aproximada a um cilindro horizontal, ou a um paralelepípedo.

Transpondo as dimensões padrões de um ônibus [49] para o paralelepípedo mostrado na figura 3.49, vem:

$$a = 12m$$

$$b = 2,6m$$

$$\Delta/a = 0,0375$$

$$c = h0 = 3,4m$$

$$c/a = 0,2833$$

$$\Delta = 0,45m$$

Para os valores de  $\Delta/a$  e  $c/a$  acima, obtém-se, do gráfico da figura 3.49,  $K1 = 0,43$ .

II) Determinação do campo elétrico ao nível do solo (Es):

a) matriz dos coeficientes de potenciais [P]:

Conforme exemplificado na figura 3.48-a, tem-se, no caso em estudo, o arranjo apresentado na figura 4.17.

Os valores de  $\Delta'_{ij}$  são determinados a partir de  $\overline{h1}$ ,  $\overline{h2}$  e  $\overline{h3}$ .

$\overline{h2}$  é obtido conforme já feito no item 4.2.1:

$$\overline{h2} = 12 - 2Sc/3$$

$$\text{sendo } Sc = 185^2 \times 0,6887 / 8 \times 0,183 \times 6.392 = 2,52m$$

$$\overline{h2} = 10,32m$$

Considerando constante as distâncias entre fases ao longo do vão, vem:  $\overline{h1} = 8,82m$  e  $\overline{h3} = 7,32m$

ARRANJO DAS FASES

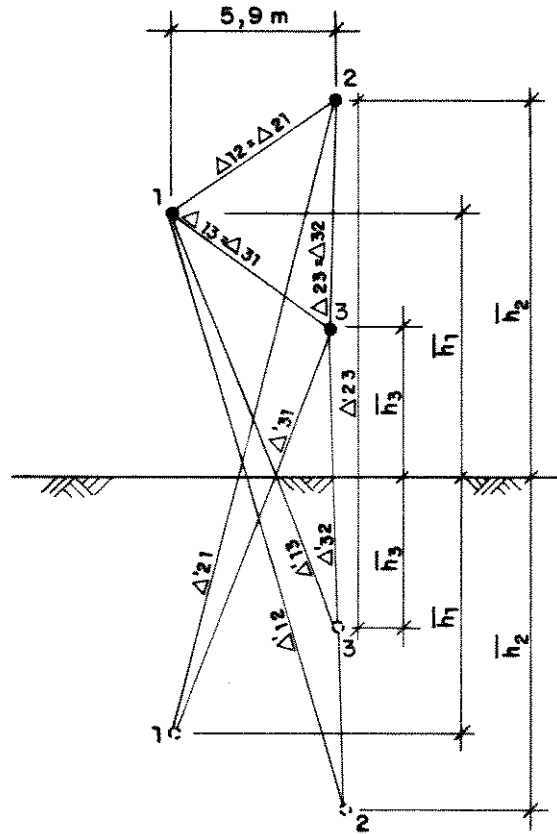


FIGURA 4.17

Assim,

$$\Delta'_{13} = \Delta'_{31} = \sqrt{(\bar{h}_1 + \bar{h}_3)^2 + 5,9^2} = 17,185\text{m}$$

$$\Delta'_{12} = \Delta'_{21} = \sqrt{(\bar{h}_1 + \bar{h}_2)^2 + 5,9^2} = 20,029\text{m}$$

$$\Delta'_{23} = \Delta'_{32} = \bar{h}_2 + \bar{h}_3 = 17,640\text{m}$$

Os valores de  $\Delta_{ij}$  são determinados diretamente da figura 4.17:

$$\Delta_{13} = \Delta_{31} = \Delta_{12} = \Delta_{21} = \sqrt{1,5^2 + 5,9^2} = 6,088\text{m}$$

$$\Delta_{23} = \Delta_{32} = 3\text{m}$$

Os elementos  $P_{ii}$  e  $P_{ij}$  da matriz  $[P]$  são determinados conforme indicado na figura 3.48-a:

$$\begin{aligned}
 P_{ii} &= (1/2\pi\epsilon_0) \cdot \ln(2\bar{h}_i/req) \\
 P_{ij} &= (1/2\pi\epsilon_0) \cdot \ln(\Delta'_{ij}/\Delta_{ij}) \\
 p/n=1 &\Rightarrow req=rc
 \end{aligned}$$

Efetuando-se o cálculo, vem:

$$\begin{aligned}
 P_{11} &= 136,021 \times 10^9 & P_{12} &= 21,416 \times 10^9 & P_{13} &= 18,662 \times 10^9 \\
 P_{21} &= 21,416 \times 10^9 & P_{22} &= 138,846 \times 10^9 & P_{23} &= 31,859 \times 10^9 \\
 P_{31} &= 18,662 \times 10^9 & P_{32} &= 31,859 \times 10^9 & P_{33} &= 132,669 \times 10^9
 \end{aligned}$$

$$[P] = \begin{vmatrix} 136,021 & 21,416 & 18,662 \\ 21,416 & 138,846 & 31,859 \\ 18,662 & 31,859 & 132,669 \end{vmatrix} \times 10^9 \text{ (m/F)}$$

b) matriz das capacitâncias  $[C]$ :

$$[C] = [P]^{-1}$$

Assim,

$$[C] = \begin{vmatrix} 7,621 & -0,984 & -0,836 \\ -0,984 & 7,749 & -1,723 \\ -0,836 & -1,723 & 8,069 \end{vmatrix} \times 10^{-12} \text{ (F/m)}$$

c) matriz das densidades de carga  $[Q]$ :

$$[Q] = [C] \cdot [V]$$

$$[Q] = [C] \cdot \left[ \begin{array}{ccc} 230 & (-1/2 - j\sqrt{3}/2)230 & (-1/2 + j\sqrt{3}/2)230 \end{array} \right] \frac{10^{-12}}{\sqrt{3}} \quad [C/m]$$

$$[Q] = [1962,167 + j29,465 \quad -919,334 - j1886,629 \quad -922,061 + j1950,238] \frac{10^{-12}}{\sqrt{3}}$$

De modo análogo à figura 3.48-b, tem-se a seguinte situação (figura 4.18 - s/esc):

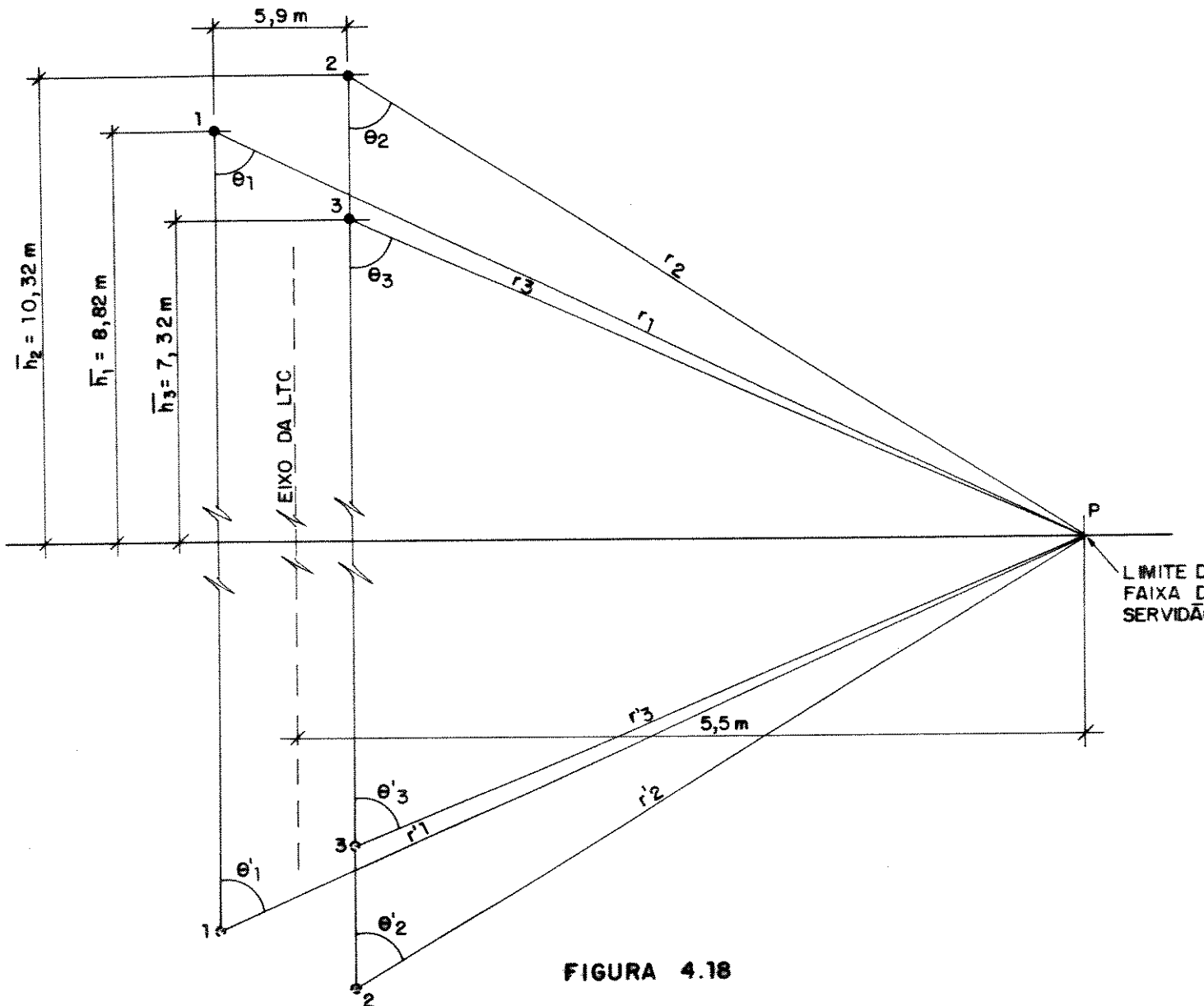


FIGURA 4.18

Conforme demonstrado no item 3.2.1, para um ponto ao nível do solo, o campo  $E_s$  é a própria componente  $E_y$ :

$$E_s = E_y = (1/2\pi\epsilon_0) \sum_{i=1}^K Q_i (\cos\theta_i/r_i + \cos\theta'_i/r'_i)$$

Como, nesse caso,  $\theta_i = \theta'_i$  e  $r_i = r'_i$ :

$$E_s = (1/\pi\epsilon_0) \sum_{i=1}^K Q_i \cos\theta_i/r_i$$

Da figura 4.18, vem:

$$r_1 = 12,215\text{m} \quad \theta_1 = 43,77^\circ$$

$$r_2 = 10,630\text{m} \quad \theta_2 = 13,87^\circ$$

$$r_3 = 7,751\text{m} \quad \theta_3 = 19,20^\circ$$

Portanto,

$$E_s = (1 \times 10^{-12} / \pi \epsilon_0 \sqrt{3}) [(1.962,167 + j29,465) \cos 43,77^\circ / 12,215 + \\ + (-919,334 - j1.886,629) \cos 13,87^\circ / 10,630 + \\ + (-922,061 + j1.950,283) \cos 19,20^\circ / 7,751]$$

$$E_s = (1 \times 10^{-12} / \pi \epsilon_0 \sqrt{3}) (-80,308 + j67,056) = 2,17 \underline{140,14^\circ}$$

$$|E_s| = \underline{2,17 \text{ kV/m}}$$

Este valor de campo elétrico de 2,17kV/m ao nível do solo no limite da faixa de servidão, é superior ao normalmente encontrado no limite das faixas de linhas convencionais, da ordem de 1kV/m [43]. Isso, porém, deve-se aos seguintes fatores:

1 - A pequena altura dos cabos na estrutura compacta, quando comparada à das estruturas convencionais.

2 - O limite considerado da faixa de servidão de 5,5m a partir do eixo da LT, distância essa bastante reduzida quando comparada à das linhas convencionais, da ordem de 19m.

III) determinação da altura média do objeto ( $\bar{h}_o$ ):

$$\bar{h}_o = c/2 + \Delta = 2,15\text{m}$$

Assim, da equação 3.2.8, vem:

$$V_{oc} = 0,43 \times 2,17 \times 2,15 = \underline{2,01\text{kV}}$$

A próxima etapa é a determinação da capacitância para a

terra ( $C_{4t}$ ):

Para se utilizar diretamente a expressão da equação 3.2.11, a forma do ônibus deve ser aproximada por um cilindro horizontal:

$$. h_{cl} = \bar{h}_o = 2,15\text{m}$$

$$. \text{raio do cilindro: } r_{cl} = c/2 = 1,7\text{m}$$

Da equação 3.2.11:

$$C_{4t} = 4\pi\epsilon_0 / \ln[(2,15 + \sqrt{2,15^2 - 1,7^2}) / (2,15 - \sqrt{2,15^2 - 1,7^2})]$$

$$C_{4t} = \underline{7,805 \times 10^{-11} \text{ F/m}}$$

Com os valores calculados de  $V_{oc}$  e  $C_{4T}$ , determina-se, através da equação 3.2.10, o valor da corrente de curto-circuito ou corrente de choque:

$$I_{cc} = V_{oc} \cdot j\omega C_{4T}$$

$$I_{cc} = 2,01 \times 10^3 \cdot j2\pi 60 \times 7,805 \times 10^{-11}$$

$$I_{cc} = 5,914 \times 10^{-5} \angle 90^\circ$$

$$|I_{cc}| \approx \underline{0,06 \text{ mA/m}}, \text{ ou } I_{cc} = I_{ch} = 0,06 \times 12\text{m} = \underline{0,72 \text{ mA}}$$

A corrente de choque encontrada está abaixo do limite de percepção de 1mA, sendo, portanto, plenamente satisfatória.

## B) INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA

Objetos metálicos com comprimento mínimo da ordem de grandeza dos vãos da LTC, e que estejam posicionados aproximadamente em paralelo a seu eixo, devem ser estudados quanto à tensão eletromagnética induzida pela linha.

O pior caso (máxima indução) ocorre para objetos localizados exatamente em paralelo ao eixo linha, situação em que o fluxo concatenado é máximo [40].

Para determinar com maior clareza os casos que devem ser estudados, estabelece-se aqui o seguinte critério: "Será passível de verificação de tensão induzida, todo objeto metálico de comprimento mínimo da ordem de grandeza do vão da linha e que cruze seu eixo uma ou mais vezes com ângulo igual ou inferior a  $60^\circ$ , sendo o percurso considerado paralelo na área delimitada pelo eixo da LTC até 30m de distância transversal do eixo".

Essa indicação visa corrigir uma falha existente na norma NBR 5422, bem como nas normas internas das empresas concessionárias de energia elétrica, as quais fazem menção apenas ao ângulo de travessia. A NBR 5422 estipula, por exemplo, um ângulo mínimo de travessia de  $60^\circ$  para tubulações metálicas e  $15^\circ$  para linhas elétricas, rodovias, teleféricos e vias navegáveis. Já a empresa FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS determina um ângulo de  $90^\circ$  para cruzamento de suas linhas com tubulações metálicas. Em ambos os casos, um objeto metálico que cruzasse a linha dentro dos ângulos mínimos estabelecidos e que, em seguida ao cruzamento, percorresse seu traçado paralelamente à linha, estaria dentro das especificações. Isso evidentemente não é razoável, posto que a tensão induzida existirá no trecho em paralelo.

A determinação de 30m do eixo da LTC como delimitação da área a ser estudada, deveu-se à observação dos gráficos de campo elétrico longitudinal apresentados nas figuras 3.56 a 3.64. Esses gráficos demonstram que a parcela mais significativa do campo elétrico longitudinal gerado pela linha situa-se nessa região, até 30m do seu eixo.

Para a análise da indução eletromagnética considera-se uma LTC com as seguintes características:

- . linha: LTC 138kV com configuração mostrada na figura 4.19 .

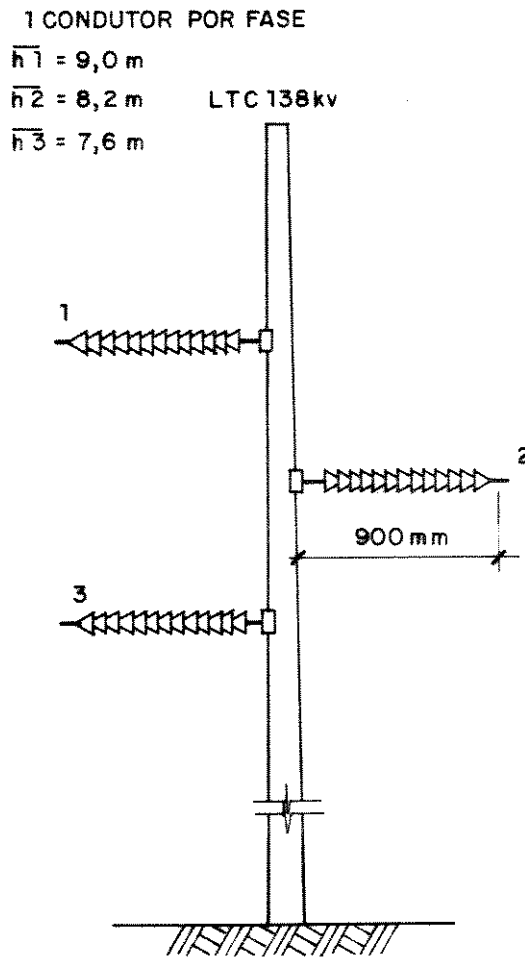


FIGURA 4.19



As linhas de 138kV são mais críticas do ponto de vista da indução eletromagnética quando comparadas às linhas de 230kV, porque para um mesmo nível de potência transmitida, as correntes nos condutores são maiores.

. corrente nominal: 300 A com grau máximo de desbalanço previsto de 5%.

. resistividade do solo:  $\rho_g = 100 \Omega\text{m}$ .

E os objetos metálicos com as seguintes características:

1 - Um gradil de uma indústria, afastado 10m do eixo da LTC a partir da fase 2, com 45m de percurso dentro da zona de paralelismo, formado por 20 barras de ferro fundido de 3cm de diâmetro, espaçadas entre si de 10cm, com mourões de concreto de 2m de altura distando 20m um do outro.

2 - Uma tubulação metálica enterrada de 8" de diâmetro correndo paralelamente a 20m do eixo da LTC a partir das fases 1 e 3, num percurso de 6km.

1 - Gradil metálico

Considera-se aqui a condição mais desfavorável do ponto de vista da segurança humana, ou seja, o gradil aterrado apenas no ponto inicial, com sua extremidade em aberto.

Ainda visando a condição mais desfavorável, fica estabelecido que a impedância de aterramento no ponto inicial seja nula, assim como a resistência de contato ( $R_c$ ) da pessoa que toca o gradil (na extremidade em aberto) bem como sua impedância virtual de

aterramento  $Z'g$ , ou seja, impõe-se  $Z_p =$  impedância própria do corpo (figura 3.54).

Sendo assim, a equação 3.2.20 se reduz a:  $Z_{th} = Z_{ffeq}$

onde  $Z_{ffeq}$  é a impedância equivalente em paralelo das 20

barras de ferro fundido:  $Z_{ffeq} = Z_{ff}/20$

Considerando que a distância média geométrica de uma área circular de raio  $r$  é  $GMD = 0,7788r$  [24], a equação 3.2.21 fica:

$$z_{ff} = 0,000988f + R_f + j0,00289f[\log(1/0,7788) + \log(D_g/r_f)] \quad \Omega/\text{km}$$

A resistividade média do ferro fundido é de  $87\mu\Omega \cdot \text{cm}^2/\text{cm}$  [50]. Para barras de 0,03m de diâmetro a resistência por unidade de comprimento é, pois:

$$R_f = 87 \times 10^{-6} / \pi (0,03)^2 / 4 = 0,00123 \quad \Omega/\text{m} = 1,23 \quad \Omega/\text{km}$$

Da equação 3.2.22, vem:

$$D_g = 658 \sqrt{(\rho_g / f)} = 849,5\text{m}$$

Assim,

$$z_{ff} = 0,000988 \times 60 + 1,23 + j0,002894 \times 60 [\log(1/0,7788) + \log(849,5/0,03)]$$

$$z_{ff} = 1,29 + j0,79 \quad \Omega/\text{Km}$$

$$\text{e } Z_{th} = z_{ff}/20 = 0,0645 + j0,0395 \quad \Omega/\text{Km}$$

A tensão de Thévenin é dada pela equação 3.2.19:

$$V_{th} = (1/m) \sum_{f=1}^m \sum_{i=1}^k I_{ci} \cdot Z_{if}$$

sendo que nesse caso  $m$  é o número de barras do gradil.

Supondo que a fase 1 esteja desbalanceada positivamente (pior condição) em relação à corrente nominal:

$$I_{c1} = 300 \times 5\% = 315 \text{ A e } I_{c2} = I_{c3} = 300 \text{ A}$$

$$V_{th} = 15,75 \sum_{f=1}^m Z_{1f} + 15 \sum_{f=1}^m (Z_{2f} + Z_{3f}) \quad [\text{V}]$$

A equação 3.2.23 mostra que  $Z_{1f} = Z_{2f} = Z_{3f} = Z_f$

A tensão de Thévenin fica então:

$$V_{th} = 45,75 \sum_{f=1}^m Z_f \quad [V], \text{ ou } V_{th} = 45,75 \sum_{f=1}^m z_f \quad [V/km]$$

A impedância mútua é então dada por (equação 3.2.23):

$$z_f = 0,000988f + j0,002894f \cdot \log(849,5 / \sqrt[3]{d_{1f} \cdot d_{2f} \cdot d_{3f}}) \quad [\Omega/Km]$$

Considerando as barras igualmente espaçadas de 10cm no gradil, e numeradas de 1 a 20 de baixo para cima, tem-se a situação da figura 4.20 abaixo:

$$d_{11} = \sqrt{(\bar{h}_1 - 0,1)^2 + 10,9^2} = 14,072 \text{ m}$$

$$d_{21} = \sqrt{(\bar{h}_2 - 0,1)^2 + (9,1)^2} = 12,183 \text{ m}$$

$$d_{31} = \sqrt{(\bar{h}_3 - 0,1)^2 + 10,9^2} = 13,231 \text{ m}$$

$$e \ z_1 = 0,0593 + j0,3144 \ \Omega/Km$$

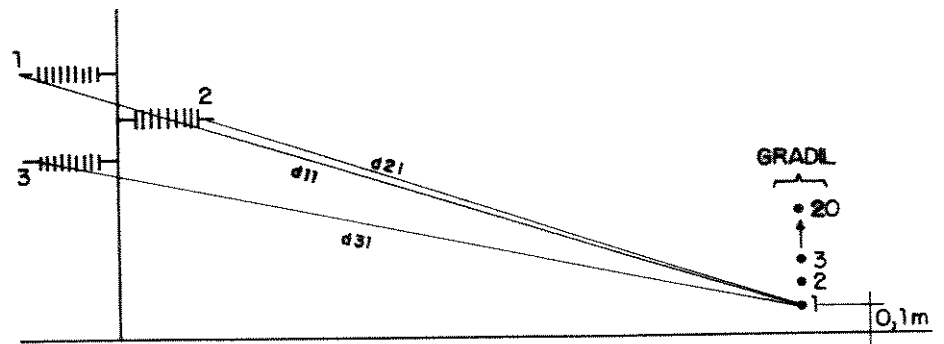


FIGURA 4.20

Analogamente,

$$z_2 = 0,0593 + j0,3147$$

$$z_3 = 0,0593 + j0,3151$$

$$z_4 = 0,0593 + j0,3156$$

$$z_5 = 0,0593 + j0,3158$$

$$z_6 = 0,0593 + j0,3162$$

$$z_7 = 0,0593 + j0,3165$$

$$z_8 = 0,0593 + j0,3169$$

$$z_9 = 0,0593 + j0,3172$$

$$z_{10} = 0,0593 + j0,3176$$

$$z_{11} = 0,0593 + j0,3179$$

$$z_{12} = 0,0593 + j0,3183$$

$$z_{13} = 0,0593 + j0,3186$$

$$z_{14} = 0,0593 + j0,3189$$

$$z_{15} = 0,0593 + j0,3193$$

$$z_{16} = 0,0593 + j0,3196$$

$$z_{17} = 0,0593 + j0,3199$$

$$z_{18} = 0,0593 + j0,3203$$

$$z_{19} = 0,0593 + j0,3206$$

$$z_{20} = 0,0593 + j0,3209$$

$$\text{Dessa forma, } \sum_{f=1}^{20} z_f = 1,1860 + j6,3543$$

$$\text{e } V_{th} = 45,75 \sum_{f=1}^{20} z_f = 54,26 + j290,71 \quad [\text{V/Km}]$$

A tensão máxima induzida ( $V_{th}'$ ) a 45m do ponto aterrado na zona de paralelismo e a impedância de Thévenin naquele ponto serão respectivamente:

$$V_{th}' = V_{th} \times 0,045 = 2,44 + j13,08 \quad [\text{V}]$$

$$Z_{th}' = Z_{th} \times 0,045 = 0,0029 + j0,0018 \quad [\Omega]$$

Conforme esquema mostrado na figura 3.54, a corrente de choque será:

$$I_{ch} = V_{th}' / (Z_{th}' + Z_p)$$

$$I_{ch} = (2,44 + j13,08) / [(0,0029 + j0,0018) + Z_p]$$

Para que a corrente de choque não ultrapasse o limite de percepção de 1mA, a impedância  $Z_p$  do corpo deverá ser:

$$Z_p = [(2,44 + j13,08) - (0,0029 + j0,0018) \times 10^{-3}] / 1 \times 10^{-3}$$

$$Z_p = 13.305 \Omega = 13,30 \text{ k}\Omega$$

Esse é um valor de resistência humana não raro de ser encontrado, porém, como determinou-se conservativamente a impedância padrão humana em 1k $\Omega$ , a corrente que fluiria pelo corpo seria de 13,30 mA, superior inclusive ao nível máximo "let go" de 5mA.

A solução é revestir a área em torno do gradil com uma camada de material isolante (asfalto, cimento, etc), que garanta o nível mínimo de isolamento, evidentemente numa largura que impeça o toque na cerca com os pés fora dessa área. No caso em foco, a espessura do material empregado deve garantir uma resistência adicional mínima de 12,30 k $\Omega$ .

## 2 - Tubulação metálica

Conforme mencionado em 3.2.1, é bastante improvável a ocorrência de choques por toque de transeuntes com tubulações metálicas enterradas expostas à indução eletromagnética.

Suponhamos então uma situação em que haja a possibilidade de um toque involuntário de um funcionário de manutenção, situação em que se deve estimar a corrente de choque que se produziria.

Para uma tubulação posicionada a 10m do eixo da LTC e para um desbalanço estimado de 5%, o máximo campo elétrico longitudinal gerado na tubulação por unidade de corrente, extraído do gráfico da figura 3.57, é: 0,03 V/km.A.

Para  $I = 300$  A o campo elétrico longitudinal é:

$$E_l = 300 \times 0,03 = 9 \text{ V/km}$$

O coeficiente de tensão para uma tubulação de 8", extraído do gráfico da figura 3.65 é 4,79.

A tensão de Thévenin será:

$$V_{th} = 4,79 \times 9 = 43,11 \text{ V}$$

$$\text{e } I_{ch} = 43,11/Z_p \text{ [A]}$$

Para que a corrente de choque não exceda o limite de percepção de 1mA, a resistência do corpo deverá ser de pelo menos:

$$Z_p = 43,11/0,001 = 43,11 \text{ k}\Omega$$

A solução para esse caso é prover o funcionário de manutenção com luvas e/ou botas de material isolante que proporcionem um acréscimo da resistência do corpo em, no mínimo, 42,11 kΩ.

#### 4.2.4 Cálculo de Interferências

Conforme já mencionado, o cálculo das interferências é necessário para se ajustar os limites da faixa de servidão previamente calculada pelo critério de balanço dos cabos por efeito de vento.

Nessa etapa do estudo empregar-se-ão os dados da LTC de 230kV utilizados no cálculo de indução eletrostática, já que esse nível de tensão é o mais crítico do ponto de vista de interferências. O estudo de R.I. é ainda ilustrado adicionalmente com um exemplo de uma LTC de 138kV.

##### A) R.I. (RÁDIO-INTERFERÊNCIA)

É preciso inicialmente determinar os valores de gradiente médio e máximo na superfície do condutor da LTC de 230kV.

A matriz das densidades de carga [Q] é a mesma já determinada no estudo de indução eletrostática:

$$[Q] = [1962,167 + j29,465 \quad -919,334 - j1886,629 \quad -922,061 + j1950,283] \frac{10^{-12}}{\sqrt{3}}$$

Os gradientes médios para cada condutor são dados pela equação 3.2.29:

$$g_{ai} = (1/n) \cdot (q_i / 2\pi\epsilon_0 \cdot r_c)$$

onde  $n = 1$  e  $r_c = 0,009155\text{m}$  (cabo LINNET)

Dessa forma,  $g_{a1} = 22,25\text{kV/cm}$

$g_{a2} = 23,80\text{kV/cm}$

$g_{a3} = 24,46\text{kV/cm}$

Como existe apenas 1 subcondutor por fase, tem-se, da equação 3.2.30, que o gradiente máximo ( $g_{mi}$ ) é o próprio valor do gradiente médio calculado no condutor ( $g_{ai}$ ).

Os valores calculados para  $g_{ai} = g_{mi}$  estão acima do limite máximo para aplicação da equação 3.2.28 (22kV/cm), que fornece o nível de ruído gerado pela LTC. Contudo, conforme se verá a seguir, o gradiente nos cabos condutores necessita, efetivamente, apresentar um valor inferior a 22kV/cm.

De fato, poder-se-ia a princípio imaginar e questionar uma situação em que o nível de gradiente encontrado fosse superior ao limite da aplicação da equação, mas que, não obstante, apresentasse um ruído no limite da faixa de servidão igual ou inferior aos valores máximos estipulados na tabela 3.4. Nessa situação hipotética se estaria procurando diminuir o nível de gradiente nos cabos sem necessidade.

Porém, tal não é o caso, conforme se demonstra a seguir:

Suponha-se que o cabo LINNET, que apresenta um pequeno diâmetro (18,31mm) quando comparado a outros cabos comumente utilizados em 230kV, como o GROSBEAK (25,15mm), o TERN (27,03mm) e o CANARY (29,52mm), gerasse nesse nível de tensão o gradiente máximo admissível de 22kV/cm. Suponha-se ainda, para se evitar crescer de 1,5 dB o valor do ruído audível, que as outras 2 fases estejam num gradiente tal que gerem um ruído igual ou inferior a 36 dB, 3dB a menos que o ruído máximo admissível em zona residencial (tabela 3.4).

Impondo 39 dB como o valor de ruído gerado, e adotando um valor conservativo de  $\bar{h}_i = \bar{h}_3 = 7,32m$ , a equação para proteção de um sinal de 1 MHz fica:

$$39 = [(3,7 \times 22 - 12,2)] + 40 \log(1,831/2,530) + 20 \log(7,32/Dt^2)$$

A distância transversal  $Dt$  para um nível de ruído de 39 dB seria nesse caso de 11,1m, ou seja, a faixa de servidão total da LTC seria de 22,2m. Esse valor de faixa, porém, é incompatível com uma linha compacta de 230kV para passagem em área urbana, e mais ainda no caso de 138kV. Portanto, não se corre o risco de se proceder uma alteração desnecessária na configuração da LTC ao se procurar reduzir o gradiente de tensão nos cabos e o conseqüente ruído gerado.

É preciso agora efetuar mudanças na LTC através de tentativas, de modo a adequá-la aos níveis máximos de ruído estipulados na tabela 3.4:

1ª Tentativa: 2 cabos LINNET com  $ds = 40\text{cm}$ .

Inicialmente, determina-se a nova matriz de capacitâncias para os novos valores  $P_{ii}$ :

$$P_{ii} = [1/(2\pi\epsilon_0)] \cdot [\ln(2\bar{h}_i/req)]$$

onde,

$$req = R\sqrt{n(rc/R)} = 0,2\sqrt{2 \times 0,009155 / 0,2} = 0,060514\text{m}$$

$$[P] = \begin{vmatrix} 102,058 & 21,416 & 18,662 \\ 21,416 & 104,882 & 31,859 \\ 18,662 & 31,859 & 98,706 \end{vmatrix} \times 10^9 \text{ (m/F)}$$

$$[C] = [P]^{-1} = \begin{vmatrix} 10,414 & -1,694 & -1,422 \\ -1,694 & 10,847 & -3,181 \\ -1,422 & -3,181 & 11,427 \end{vmatrix} \times 10^{-12} \text{ (F/m)}$$



$$[Q] = [C] \cdot [V]$$

$$[Q] = \frac{10^{-12}}{\sqrt{3}} [2753,605 + j54,275 \quad -1271,333 - j2794,024 \quad -1275,347 - j2909,527]$$

Analogamente ao caso inicial, e para  $n=2$ , tem-se:

$$ga_1 = 15,61 \text{ kV/cm}$$

$$ga_2 = 17,41 \text{ kV/cm}$$

$$ga_3 = 18,01 \text{ kV/cm}$$

Os gradientes máximos  $g_{mi}$  são dados pela equação 3.2.30:

$$g_{mi} = g_{ai} [1 + (n-1)r/R]$$

Assim,

$$g_{m1} = 16,32 \text{ kV/cm}$$

$$g_{m2} = 18,21 \text{ kV/cm}$$

$$g_{m3} = 18,83 \text{ kV/cm}$$

Utiliza-se agora o método apresentado em 4.2.4:

a) Tempo Bom

Para o limite de faixa de 5,5m e sinal protegido de 1MHz, a equação 3.2.28 fornece:

$$E_1 = [(3,7 \times 16,32 - 12,2) \pm 3] + 40 \log(1,831/2,530) + 20 \log[8,82/(5,5^2)]$$

$$E_1 = 31,8 \pm 3 \text{ dB}$$

Analogamente:

$$E_2 = 40,2 \pm 3 \text{ dB}$$

$$E_3 = 39,5 \pm 3 \text{ dB}$$

Como o ruído máximo gerado por uma fase (40,2±3dB) não é pelo menos 3dB superior ao segundo maior valor gerado (39,5±3dB), o ruído devido às três fases é:

$$E_{tr} = [(E_2 + E_3)/2] + 1,5 = 41,4 \pm 6 \text{ dB}$$

Este valor significa que na condição de tempo bom, espera-se que o ruído produzido pela LTC a 5,5m de distância transversal do eixo da linha seja de 41,4 dB em 50% do período, podendo variar para mais ou para menos no restante do período em até 6dB.

Visando a condição mais desfavorável, ainda se poderia considerar nos cálculos o valor máximo como sendo a média de 41,4 dB acrescida da incerteza de 6 dB, o que resultaria em 47,4 dB. No entanto, conforme mencionado no item 3.2.3, as variáveis que interferem nos níveis de ruído são de tal monta, que julgou-se temerário impor esse critério. Parece bastante razoável considerar-se a média como um parâmetro confiável para estudo.

No caso em foco vê-se, portanto, que a linha atende aos critérios de ruído máximo admissível em tempo bom no limite de sua faixa de servidão para estabelecimentos comerciais e industriais, mas não para residências (tabela 3.4).

Aqui deve-se determinar uma faixa de servidão específica para os trechos em que a LTC passar junto a residências. Para tanto, basta impor o ruído máximo gerado pela linha em 39 dB, conforme estipulado na tabela 3.4:

$$[(E_2+E_3)/2]+1,5 = 39 \Rightarrow E_2+E_3 = 75 \text{ dB}$$

Assim,

$$75 = (3,7 \times 18,21 - 12,2) + (3,7 \times 18,83 - 12,2) + 2 \times 40 \log \frac{1,831}{2,530} + 20 \log \frac{10,32}{Dt^2} + 20 \log \frac{7,32}{Dt^2}$$

$$\text{e } Dt = \underline{6,3\text{m}}$$

Portanto, no caso da LTC passar próxima a residências deve-se utilizar uma faixa de servidão de 12,6m, ao invés dos 11m iniciais, pelo critério de rádio-interferência em tempo bom.

b) Chuva Intensa

Inicialmente determina-se o valor do gradiente  $gp_3$  para o cabo mais baixo conforme eq. 3.2.28 para chuva intensa:

$$gp_3 = gm_3 [1+(B.rc/100R) \cos\varphi]/(1+B.rc/100R)$$

$$R = 0,2m$$

$$\text{Para } n = 2: B = 2 \text{ e } \varphi = 90^\circ$$

$$gp_3 = 18,83/(1 + 2 \times 0,9155/20) = \underline{17,25 \text{ kV/cm}}$$

como  $gp_3 > 17\text{kV/cm}$ , o primeiro termo da equação 3.2.28 deve ser substituído por:

$$[4,375 \times 17,25 - (17,25/4)^2 + 19,5] = 76,37\text{kV/cm}$$

Para o limite de faixa de 5,5m, vem:

$$E_{tr} = 76,37 + 40\log(1,831/2,530) + 20\log[7,32/(5,5)^2] = \underline{58,4 \text{ dB}}$$

Este valor está acima dos limites de ruído fixados na tabela 3.4 para chuva intensa em zonas residenciais (44dB) e zonas comerciais (50dB).

A distância transversal mínima ( $D_t$ ) para zonas residenciais é obtida impondo-se o limite de 44dB:

$$44 = 76,37 + 40\log(1,831/2,530) + 20\log(7,32/D_t^2)$$

$$D_t = \underline{12,62m}$$

E a faixa de servidão necessária seria de 25,24m.

Analogamente, para zonas comerciais e industriais:

$$50 = 76,37 + 40\log(1,831/2,530) + 20\log(7,32/D_t^2)$$

$$D_t = \underline{8,93m}, \text{ e a faixa de servidão: } \underline{17,86m}.$$

Observa-se que o critério de chuva intensa para rádio-interferência é extremamente restritivo, dificultando sobremaneira a instalação da LTC. Deve-se, portanto, analisar a real necessidade de sua aplicabilidade com base nas características da região atravessada.

De fato, o número de dias por ano com chuva intensa pode ser tão reduzido em uma dada região, que esse critério não se justifique absolutamente. Aqui uma solução de bom senso e voltada especificamente para as singularidades da região atravessada é a melhor alternativa. Por exemplo, a utilização desse critério apenas junto a hospitais e maternidades (considerados como zona residencial) e em regiões onde o número previsto de dias por ano com chuva intensa e o período de precipitação contínua sejam pequenos o suficiente para que se considere aceitável a aplicação somente do critério para tempo bom.

De qualquer forma, ainda não estão esgotadas as possibilidades para redução dos gradientes de tensão nos cabos e a conseqüente rádio-interferência. Seguem mais duas tentativas nesse sentido, substituindo o cabo LINNET por outros de maior diâmetro.

2ª Tentativa: 2 cabos CANARY por fase espaçados de 40cm.

Para o cabo CANARY,  $r_c = 0,01476m$

Analogamente à 1ª tentativa,

$$r_{eq} = 0,2 \sqrt{2 \times 0,01476 / 0,2} = 0,076837m$$

Repetindo-se os passos da 1ª tentativa, obtem-se:

$$g_{a1} = 10,21kV/cm \qquad g_{m1} = 10,96kV/cm$$

$$g_{a2} = 11,47kV/cm \qquad e \qquad g_{m2} = 12,31kV/cm$$

$$g_{a3} = 11,89kV/cm \qquad g_{m3} = 12,77kV/cm$$

a) Tempo Bom

Para a distância de 5,5m do eixo da LTC (Dt), em tempo bom, os níveis de ruído obtidos são:

$$E1 = 24,1 \text{ dB (ajustado)}$$

$$E2 = 26,7 \text{ dB}$$

$$E3 = 25,4 \text{ dB}$$

$$\text{e } E_{tr} = (E2 + E3)/2 + 1,5 = \underline{27,6 \text{ dB}}$$

O valor de E1 não poderia ser calculado por  $g_{m1} = 10,96 \text{ kV/cm}$ , porque esse gradiente está abaixo do limite mínimo de  $12 \text{ kV/cm}$ . Assim, impôs-se conservativamente o valor mínimo de  $12 \text{ kV/cm}$  para o cálculo de E1.

b) Chuva Intensa

Para a mesma distância transversal de 5,5m, em situação de chuva intensa, tem-se:

$$g_{p3} = 11,13 \text{ kV/cm}$$

Como  $g_{p3} < 17 \text{ kV/cm}$ , o primeiro termo da equação 3.2.28

fica:

$$[10,5 \times 11,13 - (11,13/2)^2 - 31] = 54,90 \text{ kV/cm}$$

E o ruído gerado:

$$E_{tr} = 54,90 + 40 \log(2 \times 1,476/2,530) + 20 \log[7,32/(5,5)^2] = \underline{45,3 \text{ dB}}$$

Com os dados adotados nessa tentativa, a LTC passa a atender integralmente (com faixa de 11m) o critério de rádio-interferência para tempo bom, e parcialmente para o caso de chuva intensa. Para esse último, a LTC poderá manter sua faixa de 11m apenas próxima a zonas comerciais e industriais. Contudo, já se pode antever

uma substancial redução da distância de aproximação requerida para zonas residenciais, quando se compara os resultados do ruído gerado com os obtidos pela 1ª tentativa.

- distância mínima requerida do eixo da LTC em situação de chuva intensa para zonas residenciais:

$$44 = 54,90 + 40 \log(2,952/2,530) + 20 \log(7,32/Dt^2)$$

$$Dt = \underline{5,91m}$$

A faixa mínima requerida é, pois, de 11,82m.

Esse valor de faixa de servidão pode mostrar-se já plenamente satisfatório para o local em que se pretenda implantar a LTC. Contudo, se ainda assim este se mostrar inexecutável para a instalação da linha, pode-se tentar reduzi-lo ainda mais:

3ª tentativa: 2 cabos BITTERN por fase espaçados de 40cm.

Para o cabo BITTERN, tem-se  $rc = 0,017085m$

$$\text{Analogamente } req = 0,2 \sqrt{2 \times 0,017085 / 0,2} = 0,082668m$$

Repetindo-se os passos da 1ª e 2ª tentativas, obtem-se:

$$ga1 = 8,96kV/cm \qquad gm1 = 9,73kV/cm$$

$$ga2 = 10,11kV/cm \qquad e \qquad gm2 = 10,97kV/cm$$

$$ga3 = 10,47kV/cm \qquad gm3 = 11,36kV/cm$$

Todos os valores de  $gm_i$  agora estão abaixo do limite mínimo de 12kV/cm. Porém, se se impor para cada fase o nível mínimo de 12kV/cm, pode-se afirmar com segurança que o ruído gerado pela LTC não ultrapassará o valor calculado.

Para tempo bom, com  $Dt = 5,5m$  e fazendo  $gm1 = gm2 = gm3 = 12kV/cm$ :

$$Etr = (E1+E2)/2 + 1,5 = (26,7+28,1)/2 + 1,5 = \underline{28,9 \text{ dB}}$$

Para chuva intensa, com  $g_m3 = 12\text{kV/cm}$ , obtem-se:

$$g_{p3} = 10,25\text{kV/cm}$$

O primeiro termo da equação 3.2.28 fica:

$$[10,5 \times 10,25 - (10,25/2)^2 - 31] = 50,36\text{kV/cm}$$

E o ruído gerado:

$$E_{tr} = 50,36 + 40 \log(2 \times 1,7085/2,530) + 20 \log[7,32/(5,5)^2] = \underline{43,3 \text{ dB}}$$

Portanto, com os dados adotados nessa alternativa, a LTC atenderá integralmente os critérios para tempo bom e chuva intensa para o máximo valor admissível de rádio-interferência, no limite da faixa de servidão previamente estabelecida.

Vale dizer que as alternativas podem ser setoriais, isto é, utilizadas de forma otimizada apenas em determinadas situações, de modo a se conseguir reduções de rádio-interferência em locais específicos de passagem da LTC.

Nessa etapa do dimensionamento é necessário fazer um estudo retrospectivo, para se verificar as implicações nos cálculos precedentes. Suponha-se que se tenha adotado os dados da 3ª tentativa num determinado trecho, o qual abrange o vão da parada de ônibus utilizado como exemplo no estudo de indução eletrostática.

As alturas médias dos cabos devem se manter, de modo a se garantir as distâncias verticais mínimas previamente estipuladas. Para não se alterar as alturas das estruturas, e conseqüentemente o grau de compactação da linha, a flecha também deverá ser a mesma. Como o cabo BITTERN tem um peso próprio superior ao cabo LINNET, o vão terá então de ser reduzido. As características mecânicas do cabo BITTERN são:  $T_{rp} = 15.170 \text{ kgf}$ ,  $p = 2,134 \text{ kg/m}$  [51].

Para a flecha calculada  $S_c = 2,52\text{m}$ , o vão necessário para o cabo BITTERN é obtido impondo-se  $V$  como incógnita na equação para determinação de  $S_c$  (vide página 210):

$$V^2 \times 2,134/8 \times 0,183 \times 15.170 = 2,52$$

$$V = \underline{162\text{m}}$$

Conseqüentemente, o vão em questão terá de ser reduzido de 185m para 162m. Uma nova inspeção de campo faz-se necessária para se verificar a viabilidade dessa redução.

Aqui não há necessidade de se preocupar com a faixa de servidão previamente calculada de 11m. Como essa faixa é função do ângulo de balanço dos condutores por efeito de vento, e o cabo BITTERN é mais pesado que o cabo LINNET, o valor da faixa segundo critérios mecânicos seria ainda inferior a 11m. O pequeno acréscimo decorrente da utilização de 2 cabos por fase, de 20cm para a largura parcial da faixa de servidão, é irrelevante para interferir nesse resultado e, portanto, para a determinação da viabilidade de implantação.

O cálculo da indução eletrostática porém, necessita ser integralmente refeito. Isto porque ao se utilizar um cabo de maior diâmetro, está-se, na verdade, aumentando as capacitâncias próprias dos condutores, o que acarreta evidentemente um maior efeito de acoplamento capacitivo, gerando assim uma maior corrente  $I_{cc}$  de choque.

A matriz  $[Q]$  das densidades de carga implicitamente calculada na terceira tentativa é:

$$[Q] = \frac{10^{-12}}{\sqrt{3}} [2949,706 + j61,462 \quad -1357,681 - j3035,843 \quad -1361,975 + j3166,204]$$



E o campo elétrico ao nível do solo a 5,5m de distância do eixo da LTC é:

$$E_s = (1 \times 10^{-12} / \pi \epsilon_0 \sqrt{3}) [2.949,706 + j61,462] \cos 43,77^\circ / 12,215 +$$

$$+ (-1.357,681 - j3.035,843) \cos 13,87^\circ / 10,630 +$$

$$+ (-1.361,975 + j3.166,204) \cos 19,20^\circ / 7,751]$$

$$E_s = 3,34 \angle 135,86^\circ \quad [\text{kV/m}]$$

$$|E_s| = \underline{3,34 \text{ kV/m}}$$

Repetindo-se os passos do item 4.2.3:

$$V_{oc} = 0,43 \times 3,34 \times 2,15 = 3,09 \text{ kV}$$

$$I_{cc} = 3,09 \times 10^3 \times j2\pi 60 \times 7,805 \times 10^{-11}$$

$$I_{cc} = 9,092 \times 10^{-5} \angle 90^\circ$$

$$|I_{cc}| = \underline{0,091 \text{ mA/m}}, \text{ ou } I_{cc} = I_{ch} = 0,091 \times 12 \text{ m} = \underline{1,092 \text{ mA}}$$

Este valor está agora acima do limite estipulado de percepção de 1mA. A solução padrão consiste em impor a corrente de 1mA como a corrente máxima admissível I<sub>ccadm</sub>, e através do método de Deno [36], determinar o correspondente campo elétrico máximo E<sub>max</sub>. Procedese então os necessários ajustes na geometria da estrutura, de modo a se ter esse campo E<sub>max</sub> ao nível do solo (vide metodologia na página 124). No entanto, como isso significaria alterar obrigatoriamente a configuração da estrutura, e conseqüentemente o seu grau de compactação, o projetista deve verificar antes, preferencialmente, o efeito que se produziria com um ligeiro deslocamento do eixo da LTC.

Para o caso de uma LTC de 138kV, pode-se igualmente utilizar o método analítico, ou consultar diretamente os gráficos desenvolvidos pela EPRI. Os gráficos a serem consultados para uma LTC

de 138kV com configuração semelhante a da figura 4.19, por exemplo, são os das figuras 3.76, 3.77 e 3.78. Como os perfis de rádio-interferência não são exatamente simétricos em relação ao eixo da LTC, em razão da disposição das fases, deve-se ater ao semi-plano esquerdo dos gráficos, que apresentam os maiores valores de ruído.

Como também não se deseja, a princípio, interferir na geometria da linha, basta restringir à análise ao gráfico da figura 3.76, que mostra os perfis de ruído em função do diâmetro do condutor.

Para uma faixa de servidão de 8m, ou seja, para uma distância transversal  $D_t$  de 4m, verifica-se que os cabos com diâmetro igual ou superior a 2,28cm geram níveis de R.I. inferiores a 39dB, atendendo integralmente o critério para tempo bom.

O cabo de menor diâmetro que atende a essa especificação é o cabo HERON, com diâmetro nominal de 2,295cm [51].

#### B) T.V.I. (TV-INTERFERÊNCIA)

Conforme explanado no item 3.2.4, a pior condição para T.V.I. é a situação de chuva. Serão assim utilizados os resultados obtidos para essa condição na determinação dos níveis de R.I.

O nível de T.V.I. é obtido aplicando-se a correção de  $-7\text{dB} \pm 5\text{dB}$  (item 3.2.4) ao valor obtido de rádio-interferência.

Para cidades de médio e grande porte, é razoável considerar-se o padrão "A" (imagem excelente, sem presença de ruído) de transmissão em área urbana. Essa constatação, aliás, poderá ser facilmente verificada em campo.

Na segunda tentativa de redução do nível de R.I., utilizando-se 2 cabos CANARY por fase, obteve-se um nível de ruído sob chuva intensa de 45,3 dB, para uma faixa de servidão de 11m.

O nível de T.V.I. no limite dessa faixa será então:

$$E_{t1} = 45,3 - 7\text{dB} \pm 5\text{dB} = 38,3 \text{ dB} \pm 5 \text{ dB}$$

O valor médio de 38,3 dB atende integralmente ao critério exposto na tabela 3.5, que estabelece valores de ruído máximo admissíveis de 41 dB e 51 dB, respectivamente para zonas residenciais e comerciais/industriais.

Novamente, faz-se referência à média, sem levar em conta a incerteza inserida. Deve-se considerar, porém, que esse valor de incerteza de  $\pm 5$  dB, além de elevado, estaria sendo aplicado a um valor já proveniente do nível máximo de R.I. em situação de chuva intensa, cuja periodicidade inclusive pode ser bastante pequena em relação aos períodos de tempo bom ou chuva leve.

De fato, a utilização da média somada ao nível máximo de incerteza de 5 dB é um critério excessivamente rigoroso, o qual poderia gerar um acréscimo da faixa de servidão que, mesmo sendo pequeno, poderia inviabilizar desnecessariamente a implantação da LTC.

A faixa calculada previamente de 11m, atende, portanto, integralmente o critério de T.V.I. para o padrão "A" de transmissão.

Se fosse considerada a incerteza no caso mais desfavorável, o ruído máximo admissível para o cálculo de Dt teria de ser reduzido em 5dB, e o valor final seria  $38,3 + 7 - 5 = 40,3\text{dB}$ . Para esse valor, a Dt mínima é igualmente obtida da equação 3.2.28:

$$40,3 = [10,5 \times 11,13 - (11,13/2)^2 - 31] + 40 \log(2,952/2,530) + 20 \log(7,32/Dt^2)$$

$$Dt = \underline{7,31\text{m}}$$

Esse valor de  $Dt = \underline{7,31m}$  impõe uma faixa de servidão de 14,62m; 3,62m mais larga, portanto, que a faixa original de 11m.

A proteção para o chamado padrão "B" de transmissão (imagem adequada, sem ruído) é muito mais difícil. Como é um sinal mais fraco, o nível de ruído máximo admissível da faixa é muito exíguo: 20 dB para zonas residenciais e 30 dB para zonas comerciais/industriais (tabela 3.5).

Nem mesmo com os resultados obtidos pela terceira tentativa no cálculo de R.I., se teria um resultado satisfatório para a faixa de 11m sob esse critério:

$$E_{t1} = 43,3 - 7 = 36,3 \text{ dB}$$

As distâncias transversais mínimas requeridas nesse caso para se atender aos critérios da tabela 3.5 seriam:

- zonas residenciais:

$$20+7=[10,5 \times 10,25 - (10,25/2)^2 - 31] + 40 \log(3,417/2,530) + 20 \log(7,32/Dt^2)$$

$$Dt = \underline{14,02m}$$

- zonas comerciais/industriais:

$$30+7=[10,5 \times 10,25 - (10,25/2)^2 - 31] + 40 \log(3,417/2,530) + 20 \log(7,32/Dt^2)$$

$$Dt = \underline{7,88m}$$

Portanto, para zonas residenciais a faixa total requerida seria de 28,04m, e para zonas comerciais/industriais, de 15,76m.

Esses valores estão naturalmente muito acima dos usualmente empregados em LTC's de 230kV, e para áreas urbanas de cidades de médio e grande porte são efetivamente impraticáveis. No entanto, como já mencionado, nessas áreas os sinais podem ser classificados, via de regra, como padrão "A", o que torna possível a passagem de LTC's com faixas de servidão mais estreitas.

O chamado padrão "B" de transmissão, é geralmente encontrado em regiões situadas a alguns quilômetros da periferia das cidades grandes e médias. Nessas regiões, no entanto, o espaço disponível para implantação de linhas também é maior, podendo comportar faixas de servidão de larguras semelhantes às calculadas acima.

É preciso considerar também que em lugares de baixa densidade populacional, é muito mais fácil desviar o traçado da linha, de modo a se evitar a aproximação com residências. Isto é feito rotineiramente na materialização de traçados de linhas de 345kV e 500kV. Linhas compactas de 138kV e 230kV apresentam naturalmente uma flexibilidade muito maior para implementação de variantes no traçado.

### C) RUÍDO AUDÍVEL

Utiliza-se a seguir, novamente, para exemplificar o estudo de ruído audível, os dados da LTC de 230kV da 2ª tentativa de redução do nível de R.I.

Inicialmente, verifica-se o nível de ruído audível no limite da faixa de servidão de 11m, calculada segundo critérios mecânicos.

Os dados existentes são:

$$n = 2 \qquad \qquad \qquad g_{m1} = 10,96\text{kV/cm}$$

$$r_c = 1,476\text{cm} \qquad \qquad \qquad g_{m2} = 12,31\text{kV/cm}$$

$$D_t = 5,5\text{m} \qquad \qquad \qquad g_{m3} = 12,77\text{kV/cm}$$

O nível de ruído audível por fase é dado pela equação

3.2.33:

$$A_{ni} = 2g_{mi} + 18\log n + 45\log(2r_c) - 10\log D_t - 0,3 \quad [\text{dBA}]$$

Substituindo os dados, vem:

$$AN1 = 40,8 \text{ dBA}$$

$$AN2 = 43,5 \text{ dBA}$$

$$AN3 = 44,4 \text{ dBA}$$

O nível de ruído audível é dado pela equação 3.2.34:

$$SL = 10 \log \sum_{i=1}^P 10^{Ani/10}$$

$$SL = 10 \log [10^{4,08} + 10^{4,35} + 10^{4,44}] = \underline{47,9 \text{ dBA}}$$

De acordo com os critérios apresentados na tabela 3.6, a LTC poderá passar junto a residências e outros locais com a faixa de servidão de 11m, com exceção de hospitais, maternidades e escolas. Para essas edificações, o ruído máximo admissível é de 46 dBA. A distância transversal mínima em cujo limite esse valor é esperado é obtida por tentativas. No caso em estudo, essa distância é de 8,5m.

$$p / Dt = 8,5m: \begin{cases} AN1 = 38,9 \text{ dBA} \\ AN2 = 41,6 \text{ dBA} \\ AN3 = 42,5 \text{ dBA} \end{cases}$$

$$SL = 10 \log [10^{3,89} + 10^{4,16} + 10^{4,25}] = \underline{46 \text{ dBA}}$$

Portanto, junto àquelas edificações o eixo da LTC deverá estar afastado de 8,5m.

As distâncias transversais encontradas nos estudos de R.I., T.V.I. e ruído audível, têm de ser respeitadas nas várias situações previstas na implantação da LTC em área urbana. Isso não significa dizer que a faixa de servidão precisa ser aumentada em toda a sua extensão. No exemplo tomado da LTC de 230kV, a faixa de servidão

permanece em 11m, calculada através de critérios mecânicos segundo dispõe a norma NBR 5422.

Apenas nos pontos em que a linha passar junto às edificações citadas, e nas condições climáticas consideradas, as distâncias transversais mínimas devem ser obedecidas e, naturalmente, apenas no lado voltado para essas edificações.

Abaixo, reproduz-se as distâncias transversais mínimas necessárias encontradas com os dados considerados na segunda tentativa de redução de R.I. para a LTC de 230kV, cujos valores suplantam a metade da faixa de servidão considerada, ou seja, suplantam os 5,5m:

R.I. - zonas residenciais sob chuva intensa:

Dt= 5,91m

T.V.I. - zonas residenciais sob chuva intensa, padrão "A" de recepção de imagem e máximo nível de incerteza:

Dt= 7,31m

Ruído Audível - aproximação a hospitais, maternidades e escolas em chuva intensa:

Dt= 8,50m

Com base nas distâncias transversais mínimas acima, far-se-á um ajuste do traçado dentro da área urbana, o qual pode consistir de pequenas modificações de trajeto ou até uma completa reformulação do traçado, situação essa que exigirá então a repetição da verificação da Viabilidade Física Macroscópica (item 4.1.2).

#### 4.2.5 Interação ao Meio Ambiente

A interação ao meio ambiente é hoje, felizmente, uma preocupação de primeira ordem em todos os empreendimentos que, de uma forma ou de outra, provocam alterações nas características originais de uma região. No Brasil, é obrigatório a elaboração do "Relatório de Impacto ao Meio Ambiente" (RIMA), cuja aprovação prévia é condição irretorquível para a execução do empreendimento.

As linhas de transmissão inserem-se, evidentemente, de forma total nesse contexto, e a compactação de suas dimensões físicas não reduz em nada os cuidados que se deve ter a respeito.

É certo que as LTC's em áreas urbanas são menos suscetíveis de causar danos ao meio ambiente, já que, via de regra, sua implantação se dá em regiões já completamente alteradas pelo homem, como é o caso das regiões densamente povoadas de cidades de médio e grande porte. Nesses locais, os cuidados restringem-se ao estudo detalhado de interferências e induções, conforme visto nos tópicos anteriores, bem como ao aspecto estético, que deve aproximar-se o mais possível de linhas de distribuição existentes. Assim, pode-se afirmar que está fora de cogitação, por exemplo, o uso de feixes com 3 subcondutores por fase nesses locais, dada a agressividade visual que essa montagem acarreta.

As bases das estruturas de uma LTC em área urbana devem também ser protegidas por blocos de concreto armado, de forma a impedir que a estrutura tombe no caso de impacto frontal de algum veículo. Esses blocos, naturalmente, devem harmonizar-se com o meio ambiente, sendo que uma solução típica é o seu aproveitamento como



base para vasos de planta, ou eles mesmos se constituindo em canteiros. Fica implícita, portanto, a necessidade de um projeto paisagístico.

Deve-se igualmente evitar que as pessoas possam subir pelas estruturas, sendo que o ideal é que os transeuntes não possam sequer tocá-las. Isso pode ser conseguido, por exemplo, com plantas espinhosas nos canteiros mencionados anteriormente.

Podem existir, contudo, alguns casos em que a LTC esteja frente a uma região de maior área verde, e é nesses locais que os estudos de implantação devem se revestir de maior cautela.

Suponha-se, a título de exemplo, que a LTC necessite cruzar uma extensa área verde de um parque urbano. O projetista deve ter em mente que o "intruso" é ele, que a LTC é na verdade um "corpo estranho", que precisa ser inserido naquela região. Portanto, não é a região que precisa se adaptar à LTC, e sim o inverso.

Primeiramente, far-se-á um estudo exaustivo de todos os setores de traçado possíveis dentro do parque, escolhendo-se aquele que menos agrida o local, seja em termos de eventuais cortes de árvores, seja em termos visuais.

Depois, será preciso fazer uma ampla análise das faunas fixas e móveis existentes. Em alguns parques, mesmo de dimensões reduzidas, ocorrem ondas migratórias cíclicas de aves, que às vezes permanecem vários dias no local. Essa é a fauna móvel. As faunas fixas e móveis não podem ser molestadas de forma alguma pela presença da linha.

No capítulo 2, item 2.2.5 - Minimização da Agressão ao Meio Ambiente, viu-se que a incidência de pousos de pássaros em

condutores vai rareando à medida que cresce o gradiente na superfície do condutor.

Os estudos a respeito [9] indicam que os pousos de pássaros cessam com um gradiente de superfície da ordem de 23kV/cm. O pouso em si não acarreta danos para o pássaro. O problema existe quando, sendo a ave de porte considerável, ao tentar alçar vôo, reduza as distâncias fase-fase ou fase-terra a um valor tal que provoque um fechamento de arco voltaico sobre seu corpo. Essa situação é mais provável em condições de neblina ou chuva. A ave seria assim eletrocutada e ainda provocaria o desligamento da linha.

Ressalte-se aqui que a preocupação do projetista nesse caso deve estar voltada, única e exclusivamente, para a obtenção de meios que preservem a vida dos animais do local, e em qualquer circunstância. O desligamento da linha é, evidentemente, um efeito que precisa ser evitado, mas está em segundo plano.

Também considerações de custos não podem impor-se em detrimento da melhor solução possível para a proteção da fauna. Auditore e Hobbs [52] afirmam que: "quantificar, em termos monetários, impactos ambientais (excetuando-se o valor de pássaros) é muito difícil". Na realidade, isso não é apenas difícil, mas inqualificável e im procedente. Nesse mesmo trabalho [52], Auditore e Hobbs informam que na África do Sul, quando ocorre um desligamento de linha por eletrocução de uma ave, a energia demora a ser restabelecida porque a ave eletrocutada cai em chamas nos arbustos sob a linha, provocando incêndios localizados que impedem o seu religamento. É realmente de se questionar se cabe avaliar esse fato apenas em termos de custos decorrentes do tempo de desligamento da linha...

Conforme visto, gradientes superficiais da ordem de 23kV/cm impedem o pouso de pássaros e mesmo a aproximação de animais trepadores, como o esquilo. Esses níveis de gradientes foram obtidos para as condições iniciais de cálculo de R.I. de uma LTC de 230kV (item 4.2.4). Assim, numa primeira análise, a linha nessas condições protegeria adequadamente a fauna do parque.

A dificuldade aqui reside no nível de ruído audível produzido, que também é uma agressão imediata à Natureza. Dessa forma, sugere-se que o incremento do nível de gradiente superficial como solução para proteção da fauna seja utilizado preferencialmente em lugares descampados, e com baixo índice de população de animais. Uma LTC que gere um alto nível de ruído audível, pode se constituir num elemento muito perturbador do ecossistema, se estiver próxima a uma certa concentração de árvores.

A solução ideal é diminuir o grau de compactação da LTC, aumentando as distâncias entre fases para um valor tal que comprovadamente impeça a eletrocução de aves de maior porte. O ligeiro aumento do impacto visual é largamente compensado pelo grau de proteção oferecido.

A pior situação do ponto de vista de segurança das aves, é para as LTC's de configuração horizontal como as das figuras 4.5 e 4.6. Os pássaros podem acomodar-se enfileiramente nas traves de sustentação dos cabos nas estruturas e até mesmo fazer lá os seus ninhos. A solução proposta nesse caso pela EPRI [9], é a colocação de poleiros largos sobre as traves, atraindo a atenção dos pássaros preferencialmente sobre eles.

Uma outra situação que, conquanto rara, também exige uma análise mais aprofundada sobre a interação ao meio ambiente, é a de uma LTC nos moldes da figura 2.12, com "baixo" nível de gradiente superficial (menor que 11,5kV/cm), atravessando uma zona de proteção ambiental. Nessa situação, devido às dimensões reduzidas da LTC, os pássaros podem não ver a linha, chocando-se contra os cabos pára-raios ou condutores.

A proteção aqui tem de ser no sentido de tornar mais visível a linha, o que pode ser conseguido com a instalação de esferas de sinalização ou de lâmpadas Neon de tensão auto-induzida [53].

#### 4.2.6 Adequação à Normalização Existente

Conforme mencionado no item 3.1.2, as distâncias fase-terra mínimas impostas pela norma NBR 5422 são bastante reduzidas, não se constituindo num fator limitante à compactação de linhas de 138kV e 230kV.

As distâncias fase-fase mínimas por sua vez, para linhas de nível de tensão superiores a 50kV estão sob o mote "não especificado" naquela norma, deixando, portanto, também em relação a esse parâmetro, ampla liberdade de dimensionamento.

A única restrição à distância fase-fase refere-se às linhas de circuito duplo. Para essas a norma estabelece a distância df mínima através de:

$$df = 0,37\sqrt{Sc} + 0,0076.Du$$

Seja pois uma LTC de 230kV semelhante a da figura 2.3 com distância entre fases dos dois circuitos igual à distância horizontal entre as fases 1 e 3 da LTC da figura 4.16, ou seja, 5,9m.

Substituindo esses dados na equação anterior, vem:

$$Sc = \underline{125,9m}$$

Este valor de flecha corresponde a LT's de grande porte e não se aplica a linhas compactas. Para melhor visualização, substituiu-se esse valor de flecha na equação 3.1.26-a para alguns tipos de cabos, de modo a se ter os vãos máximos em que a distância de 5,9m entre fases dos dois circuitos pode ser mantida. Os valores obtidos são os seguintes:

- . cabo LINNET: vão de 796m.
- . cabo CARDINAL: vão de 1.233m.
- . cabo GROSBEAK: vão de 1.261m.

Esses vãos, evidentemente, estão muito acima dos esperados na implantação de LTC's em áreas urbanas.

Assim, pode-se afirmar que a norma brasileira NBR 5422 não é restritiva à compactação de linhas de transmissão no tocante às distâncias fase-fase e fase-terra.

O mesmo não se pode dizer em relação às distâncias verticais mínimas estipuladas. Para essas últimas, deve-se recorrer às equações 3.1.24 ou 3.1.25, e aos dados da tabela 3.3.

A rigidez na aplicabilidade dessas equações gera alguns resultados aparentemente incongruentes, como o obtido no exemplo do item 4.2.2, tópico A - Determinação das distâncias de travessias. Naquele exemplo, uma LTC de 230kV necessitaria manter um clearance de 2,03m na travessia sobre uma LD de 13,8kV e um clearance de 2,32m na

travessia sobre uma LTC de 138kV; uma diferença de apenas 29cm para um aumento de 10 vezes na tensão da linha atravessada.

A norma NESC americana, apesar de estipular valores mínimos também para distâncias fase-fase e fase-terra, deixa a cargo da respectiva Concessionária a aplicabilidade ou não do que é ali recomendado [9]. Fica a seu critério a utilização de outros valores que não os especificados, desde que isso não gere uma diminuição do nível de segurança oferecido ao público.

A norma brasileira por seu lado, é rígida quanto a esse aspecto, e no entanto não isenta o projetista em caso de acidente, mesmo que todas as determinações tenham sido seguidas.

Já a filosofia adotada pela NESC americana, com seu caráter eminentemente diretivo e orientativo, não só permite uma evolução mais rápida e consistente dos estudos de otimização de projetos, como também, em contrapartida, dá ensejo a um aperfeiçoamento contínuo das próprias disposições normativas, lastreadas por dados colhidos em campo e não apenas através de considerações empíricas.

As linhas compactas em áreas urbanas são particularmente sensíveis a esses problemas. Abaixo, faz-se uma análise sobre o que a normalização dispõe genericamente em relação às distâncias verticais mínimas, e as situações efetivamente encontradas numa área urbana:

1 - Travessias sobre rodovias, ruas e avenidas

Da tabela 3.3, tem-se que a distância básica a<sub>2</sub> para utilização da expressão geral de cálculo (equação 3.1.24) é, nesse caso, de 8,0m.

Esse valor fixo de 8,0m é genérico, e vale para regiões rurais, suburbanas e urbanas. Mas, como ele já foi estabelecido evidentemente para o caso mais desfavorável considerado, restringe em demasia a determinação do clearance em regiões onde aquela situação absolutamente não tem possibilidade de ocorrer. Com o valor de  $a_2 = 8\text{m}$ , a distância vertical mínima para uma LTC de 138kV é de 8,3m, e para uma LTC de 230kV, 8,8m.

Em áreas urbanas, a altura dos veículos está automaticamente limitada pela altura de obstáculos já existentes, como linhas de distribuição e telecomunicação, fios trolley, passarelas, etc., sem contar que em algumas cidades não é permitido o trânsito de caminhões de carga em determinadas vias.

Em áreas urbanas não existe, portanto, nenhuma justificativa para utilização do valor fixo de 8m. Esse valor pode comprometer a passagem da LTC em determinado trecho, forçando a modificação do traçado, com conseqüente elevação de custos.

Além do mais, um valor fixo hipotético pode facilmente não abranger todos os casos possíveis. Pode-se pensar, por exemplo, numa pessoa em pé na carroceria de um caminhão, com os braços levantados ou segurando verticalmente uma viga de alumínio de 3m de comprimento...

O que se propõe é que o valor de  $a_2$  seja móvel, isto é, que seja determinado pelo próprio projetista, o qual arbitrará o seu valor após um estudo abrangente da situação específica enfrentada pela LTC. No exemplo do caminhão, se existe uma lei proibindo o transporte de pessoas na carroceria (e existe realmente), não há, de fato, porque se prever essa contingência na determinação do clearance da LTC,

apesar de que a aplicação do valor fixo pressupõe uma abrangência de todos os casos possíveis.

No sistema de a2 móvel, porém, seriam previstos os casos que efetivamente ocorrem em determinada região, e particularmente em áreas urbanas. Cite-se, por exemplo, uma situação de um trabalhador numa escada, colando um cartaz de out-door. Essa situação seria certamente prevista, e o clearance adotado protegeria adequadamente o trabalhador.

## 2 - Locais acessíveis somente a pedestres

O valor fixo de a2 para esse caso é de 6m. Em áreas urbanas é muito raro a existência de um local acessível somente a pedestres. Mesmo nos chamados calçadões dos grandes centros urbanos, não é raro ver-se pessoas montadas a cavalo, especialmente policiais, o que já se configura numa situação de inaplicabilidade do valor rígido estipulado para a2.

A norma NESC americana [54] menciona uma situação interessante, e bastante comum em áreas urbanas acessíveis somente a pedestres. A situação é aquela encontrada em dias de chuva, em locais de intensa movimentação de pedestres, onde as pessoas mais altas, para facilitar seu deslocamento e evitar esbarrões, erguem ao máximo seus guarda-chuvas (com pontas metálicas) quando do cruzamento com outras pessoas. A distância formada pela pessoa alta com os braços erguidos, elevando ao máximo o guarda-chuva, serviu de parâmetro para a escolha do clearance necessário para essa situação de travessia de linhas. O estudo desse caso, e de outros semelhantes, só foi possível devido à autonomia dada às Concessionárias para determinação do clearance, as



quais fizeram uso dos valores normatizados apenas de forma orientativa.

### 3 - Telhados e terraços

O valor de a2 especificado para esse caso é de 4m.

Aqui, questiona-se o próprio estabelecimento de uma normalização. FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS, por exemplo, não admite nenhuma construção dentro das faixas de servidão de suas linhas. Pode-se dizer, mais apropriadamente, que a empresa escolhe o traçado de suas linhas de forma a evitar a passagem sobre construções. Imagine-se uma família vivendo numa casa que esteja sob uma LT de 750kV...

Mas mesmo em níveis mais baixos de tensão, como é o caso das LTC's desse estudo, esta situação tem de ser evitada sem nenhuma exceção. Basta que se pense nos níveis de R.I., T.V.I. e ruído audível encontrados nos cálculos precedentes.

Um valor de a2 de 4m implica que os clearances mínimos sobre os telhados das casas para linhas de 138kV e 230kV, serão respectivamente de 4,3m e 4,8m. Um morador, que subisse ao telhado de sua casa para instalar uma antena de televisão de um certo comprimento, já poderia dar ensejo a um acidente fatal.

### 4 - Ferrovias

A NBR 5422 estabelece um a2 de 9m para ferrovias não eletrificadas, e de 12m para ferrovias eletrificadas ou com previsão de eletrificação (com cálculo permitido apenas através da eq.3.1.24).

Esses valores igualmente parecem ser excessivos. A linha de contato de uma ferrovia eletrificada está a uma altura de 5,5m em

relação ao trilho, e o ponto de fixação do cabo suporte em catenária na estrutura está à aproximadamente 7,40m do trilho. Se se considerar o ponto energizado mais alto de uma via férrea posicionado a 7,5m do trilho, o clearance mínimo para linhas de 138kV e 230kV seria respectivamente de 4,8m e 5,3m.

Uma LTC de 230kV deveria, portanto, atravessar uma ferrovia eletrificada guardando uma distância de 5,3m no ponto de maior aproximação entre a sua catenária e o cabo de 3kVcc da via férrea. E, no entanto, na travessia de uma LTC de 138kV, a distância requerida seria, como visto, de apenas 2,32m, menos da metade da distância requerida para atravessar a via férrea eletrificada com 3kVcc.

Também não caberia aqui considerações sobre indução eletrostática nos trens, já que os trilhos são aterrados.

#### 5 - Veículos rodoviários e ferroviários

Para a passagem de uma linha de transmissão sobre esses veículos, a norma estipula um a2 de 3m(com cálculo pela eq.3.1.24).

Porém, como para passagem sobre rodovias, ruas e avenidas, o valor de a2 é de 8m, entende-se que esse valor de 3m só se aplica a carros parados, isto é, veículos em estacionamentos e garagens.

Tem-se assim a determinação de um valor fixo de a2 para uma situação que, se não impossível, é bastante rara de acontecer.

Em vista do exposto, julga-se oportuno a mudança de filosofia da norma brasileira NBR 5422, passando de um caráter impositivo para um eminentemente orientativo. O projetista poderá

determinar o valor do clearance mínimo necessário numa determinada situação, assumindo naturalmente plena responsabilidade pelos valores indicados.

#### 4.2.7 Determinação da Configuração Final

Após o dimensionamento feito segundo os critérios precedentes, a LTC pode exibir uma configuração final totalmente distinta da inicial.

A LTC precisa adaptar-se a todas as características encontradas na área urbana, de modo que é possível encará-la como um conjunto de sub-linhas de configurações próprias. A determinação da configuração final da LTC é, portanto, o resultado de estudos localizados para cada trecho.

A configuração inicial, por exemplo, pode prever uma LTC de 230kV de circuito duplo semelhante a da figura 2.3 para um certo traçado previsto, e posteriormente mostrar-se inviável sob algum critério de dimensionamento. A solução pode ser a divisão da LTC em duas linhas de disposição vertical com circuito simples, de traçados diferenciados, e que voltem a constituir uma linha única após o final do trecho em que houve a dificuldade.

A necessidade de grandes deflexões (maiores que 90°) podem obrigar à implantação de uma estrutura treliçada convencional, mesmo em detrimento dos aspectos estéticos da linha.

O tipo de isolamento, como visto, também pode variar segundo a região atravessada. Em casos extremos de poluição, por

exemplo, pode ser necessário o uso de isoladores de 230kV numa linha de 138kV, ou a mudança do traçado, se a LTC for de 230kV.

Tudo isso pode fazer a LTC em área urbana--contrariamente às LT'S ou LTC's em áreas rurais--assemelhar-se a um mosaico de linhas de configurações distintas, de forma que se torne até difícil reconhecer tratar-se da mesma linha em vários trechos do seu traçado.

Assim, a otimização do dimensionamento da LTC será tanto maior quanto maior for o grau de liberdade de que se dispuser para ajuste da sua configuração em determinados trechos. Se a Concessionária dispor de apenas um tipo de estrutura ou de isolador, a linha não poderá ser otimizada segundo esses critérios técnicos, e o custo final será indubitavelmente maior.

#### **4.3 PROBLEMAS USUAIS DE IMPLANTAÇÃO**

A implantação de uma LTC em área urbana pode se defrontar com alguns problemas típicos, cuja análise é feita a seguir:

##### **1 - Alteração do viário**

Após o dimensionamento completo da LTC, isto é, após a determinação de sua configuração final, decorre um prazo maior ou menor até a efetiva construção da linha. Durante esse prazo, cuja duração depende geralmente da disponibilidade de recursos, o viário pode sofrer mudanças significativas por efeito de obras diversas, o que pode inviabilizar parcial ou totalmente a instalação da LTC nos trechos alterados. Ocorrendo isso, o dimensionamento efetuado naqueles trechos também estará perdido.

Para evitar ou minimizar esse problema, o projetista deve munir-se do maior número de informações possíveis junto à prefeitura. Deve estar a par de todas as obras em andamento e das futuras, mantendo esse cadastro sempre atualizado durante o dimensionamento da LTC.

A implantação de LT's leva em conta, de uma maneira geral, o princípio da antiguidade, ou seja, o empreendimento já implantado tem prioridade sobre o projetado. Nas linhas convencionais, por exemplo, se uma LT necessitar cruzar um oleoduto existente, cabe a ela ajustar o traçado de modo a atravessá-lo com um ângulo adequado. Se a situação for inversa, isto é, se o empreendimento for a LT, caberá à PETROBRÁS dispor seu traçado para obtenção de um ângulo de travessia adequado, e assim por diante. A desapropriação de um terreno para a passagem de uma LT, só ocorre quando todas as alternativas de mudança do traçado estiverem esgotadas.

Uma LTC em área urbana encontrará não um, mas inúmeros empreendimentos já prontos, tendo portanto que se adaptar a essa contingência. Um projeto completo e aprovado não significa uma linha implantada, e o hiato de tempo até sua efetiva construção, pode fazer com que a prefeitura dê prioridade a outras obras que, a seu juízo, tenham um interesse social mais imediato.

## 2 - Utilização indevida das estruturas da LTC

As estruturas da LTC, diferentemente das estruturas de LD's, devem estar protegidas contra a aproximação de pessoas.

Se não houver proteção, as estruturas estarão sujeitas aos mesmos problemas existentes em LD's, como a fixação de faixas e a ação de pichadores. Essa situação se configura num risco de vida real.

Não é razoável dimensionar-se o clearance de uma LTC com base na possibilidade de uma pessoa subir numa escada apoiada na estrutura para fixação de uma faixa. E menos ainda no caso da ação de pichadores.

A primeira hipótese pode ser contornada com a construção de defensas apropriadas, que impossibilitem ou dificultem o apoio de uma escada. O segundo caso, o dos pichadores, é mais difícil de ser resolvido, dado o atrevimento com que esses indivíduos praticam esses atos. Um aviso claro, fixado rigidamente à estrutura da LTC, proibindo a pichação ou colagem, e alertando para o risco de vida, pode se constituir numa boa medida dissuasória.

De qualquer forma, os pichadores, sem exceção, têm consciência de que a pichação é um ato condenável. Passa a ser uma situação análoga a dos "surfistas de trem", que arriscam a vida em cima das composições de vias férreas eletrificadas. Ninguém pensaria em aumentar a altura do fio de contato da rede ferroviária para dar maior segurança aos "surfistas".

### 3 - Vias secundárias

As vias secundárias podem estar dentro da área urbana e não serem atravessadas por LD's, passarelas, fios trolley, etc., não apresentando portanto uma limitação quanto à altura do veículo em tráfego.

Nessa situação, deve-se verificar a altura dos veículos que passam na via, inclusive se ela é utilizada para transporte de cargas especiais. Esses parâmetros devem ser considerados na determinação do clearance de uma LTC que atravesse a via.

#### 4 - Manutenção Corretiva

Contrariamente às LD's, a manutenção de LTC's em áreas urbanas é complexa (item 3.1.4), requerendo medidas especiais de segurança.

Manutenções corretivas ou de emergência significam transtornos imediatos a pedestres e motoristas, pela intervenção parcial ou total das vias de circulação.

A melhor forma de se evitar esse problema é uma manutenção preventiva abrangente e contínua.

#### 5 - Traçado ocupado por LD

Se no traçado ideal da LTC, houver um ou mais trechos onde exista uma LD, a primeira iniciativa é verificar a possibilidade de remanejamento da LD, a qual é facilmente adaptável a outro traçado, sem grande elevação de custo.

A possibilidade de utilização das próprias estruturas da LTC como suportes para cabos de LD's é factível para o nível de 13,8kV, desde que respeitadas as distâncias mínimas requeridas, utilizando-se pára-raios de linha de 13,8kV e, no abaixamento para tensões residenciais de 127/220 V; a utilização, quando necessário, de um transformador regulador que elimine a tensão induzida por efeito eletromagnético.

## 6 - Interferência em redes subterrâneas

Quanto maior a altura das estruturas da LTC, maior a distância de engastamento requerida no solo, e maior a probabilidade de interferência física com redes subterrâneas de água, luz, esgoto e telefonia.

O projetista deve munir-se do mapeamento atualizado dessas redes para definição da posição das estruturas. Se não existir o mapeamento, ou se este apresentar-se falho, deve-se fazer uma sondagem à percussão.



## CAPÍTULO 5

### CONCLUSÃO

Este trabalho se configura, em seu conjunto, num roteiro pormenorizado para o dimensionamento de uma LTC em área urbana.

Mesmo a abordagem de alguns aspectos estritamente teóricos constitui, com efeito, um subsídio importante para a análise de uma situação real.

Nesse contexto está o estudo das características eletromecânicas dos isoladores compostos e convencionais (item 3.1.1). Uma consulta a esse item possibilita ao projetista escolher o tipo de isolador que mais se adapte às características da região a ser atravessada pela LTC, antes mesmo de prover o efetivo dimensionamento otimizado do isolador. Por outro lado, a menção feita a algumas restrições inerentes ao isolador composto, como a alteração contínua de suas características eletro-mecânicas ao longo do tempo, deve ser vista aqui como uma análise da situação presente, portanto sujeita a retificações futuras quando de um substancial desenvolvimento dessa tecnologia, o que sem dúvida virá a ocorrer.

As diretrizes indicadas no tópico sobre Manutenção (item 3.1.4) abrangem os principais aspectos a serem observados do ponto de vista da segurança humana. Para uma situação específica de LTC em área urbana, essas diretrizes constituem-se igualmente em subsídios para o desenvolvimento de um plano específico e otimizado de manutenção preventiva e corretiva.

Também inserida no campo estritamente teórico está o estudo sobre Aterramento (item 3.2.2). Uma consulta a esse tópico proverá

igualmente o projetista das informações necessárias para se aterrar de modo seguro uma LTC em área urbana.

Os demais sub-itens do capítulo 3 foram todos explicitados em forma de exemplos, no dimensionamento da LTC levado a efeito no capítulo 4.

Um aperfeiçoamento possível no estudo de Distâncias Elétricas (item 3.1.2) seria a utilização de uma modelagem mais real da onda de impulso atmosférico. Ainda que a utilização do degrau de tensão não traga dificuldades para o dimensionamento da LTC (vide página 98), um estudo mais aprofundado para a determinação do desempenho da linha frente a surtos atmosféricos, exigiria conhecer-se as perdas por efeito corona quando de uma descarga no cabo pára-raios, assim como a probabilidade de uma descarga atingir diretamente o topo da estrutura.

Os estudos para determinação dos níveis de R.I. (item 3.2.3) e T.V.I. (item 3.2.4) estão por sua vez vinculados à formulação empírica desenvolvida pela SHIOBARA do Japão. Aqui, a maior dificuldade observada diz respeito às limitações para aplicação da expressão, referentes aos níveis máximo e mínimo admissíveis de gradientes de potencial na superfície do condutor. Novamente, apesar dessa dificuldade não restringir o dimensionamento da LTC, já que, como visto no capítulo 4, gradientes que ultrapassassem aqueles limites dariam origem a faixas de servidão incompatíveis com a implantação de uma LTC em área urbana, a existência de limites de aplicação mais dilatados possibilitaria uma maior versatilidade no balisamento da faixa de servidão. Isto permitiria, por exemplo, encontrar níveis de faixa de servidão mais adequados em áreas de implantação mais fácil (áreas periféricas). Este é, portanto, um aspecto que poderá ser

aperfeiçoado, quando do desenvolvimento de uma formulação mais abrangente para a determinação dessas interferências.

A metodologia para a determinação das Distâncias de Segurança (item 3.1.3) baseou-se, como não poderia deixar de ser, na norma NBR 5422. O nível de detalhes inserido nesse estudo permite, porém, a elaboração de um projeto de LTC em qualquer região do território nacional.

Visto a importância que assume em áreas urbanas, o tópico das Induções Eletrostáticas e Eletromagnéticas (item 3.2.1) foi igualmente desenvolvido em detalhes, de forma a possibilitar a determinação desses parâmetros em qualquer situação de aproximação de objetos metálicos junto ao eixo da LTC. A parte relativa ao cálculo dessas interferências (item 4.2.4) mostrou que, para a população da área urbana, os efeitos da indução eletrostática são mais comuns, isto é, ocorrem com maior frequência que os efeitos decorrentes da indução eletromagnética. Por outro lado, o estudo também demonstrou que a magnitude desses efeitos é menos relevante no caso da indução eletrostática (onde a corrente de choque máxima, no caso do toque no ônibus, não chegou a suplantiar o limite de percepção estipulado de 1mA no cálculo inicial), enquanto que para a indução eletromagnética houve necessidade de se estipular medidas especiais de isolamento (camada de asfalto ou outro material que propiciasse uma resistência de pelo menos 12,3 k $\Omega$  no caso de toque no gradil metálico).

O aspecto limitante que se mostrou mais restritivo para passagem da LTC em área urbana foi o nível de ruído audível gerado (itens 3.2.5 e 4.2.4). Todavia, como esse ruído aparece apenas em situação de chuva ou neblina intensa, pode-se prever que um aperfeiçoamento na diretriz

de aplicação deste parâmetro, seria um método que levasse em conta o índice pluviométrico médio da região atravessada.

O conceito de Grau de Compactação (item 4.1.3), pode igualmente ser desenvolvido de forma a se inserí-lo nos métodos para determinação dos níveis de R.I., T.V.I. e ruído audível.

Os cálculos desenvolvidos através de exemplos no capítulo 4 (itens 4.2.1, 4.2.2, 4.2.3 e 4.2.4), demonstram inequivocamente que o dimensionamento da LTC requer alguns cuidados normalmente não considerados nas linhas convencionais. A maior complexidade do projeto, decorrente desses cálculos, é contudo largamente compensada pela possibilidade de implantação de uma linha de alta tensão de aspecto visual não agressivo, de traçado versátil, e com uma necessidade de faixa de servidão muito menor do que uma linha convencional.

Ainda na parte relativa ao dimensionamento da LTC, justificou-se a inserção do tópico exclusivo sobre Interação ao Meio Ambiente (item 4.2.5), pela importância que esse assunto tem adquirido nos últimos tempos.

Da mesma forma, a Adequação à Normalização Existente (item 4.2.6) tem uma importância bastante significativa na compactação de linhas de transmissão. Observou-se, pelas várias situações analisadas, que a Norma NBR 5422 poderia ser mais flexível, o que redundaria em proveito não apenas para o desenvolvimento de novas tecnologias (como é o caso da compactação de linhas), como para o próprio aperfeiçoamento da norma, evitando um descompasso muito acentuado entre as diretrizes impostas e a realidade que se apresenta em campo.

O tópico referente aos Problemas Usuais de Implantação (item 4.3) analisou as dificuldades "típicas" quando da instalação de uma LTC em área urbana. Ressalte-se, porém, que a linha compacta apresenta freqüentemente características específicas, consentâneas à região a ser atravessada. Essas características, quando detectadas, poderão enriquecer a gama das situações estudadas, constituindo assim novos subsídios para a análise de casos semelhantes.

O aspecto custo também poderá ser abordado oportunamente, quando se dispuser de dados suficientes para uma análise confiável desse parâmetro. De qualquer forma, pode-se afirmar que o custo depende essencialmente da região atravessada e do traçado final da LTC. Estima-se que uma LTC de 69kV [11] apresente um custo cerca de duas vezes superior ao de uma linha convencional de mesmo nível de tensão instalada em área rural. Já o sistema de cabos subterrâneos acarretaria um custo cerca de quatro vezes superior ao da instalação de uma LTC desse nível de tensão. Para o nível de 138kV, o custo de instalação com cabos subterrâneos seria evidentemente muito maior, mormente se utilizados cabos com refrigeração interna a óleo, como faz a ELETROPAULO em áreas restritas da cidade de São Paulo, sensíveis à alteração ambiental. No caso da tensão de 230kV, a própria inexistência no mercado nacional de cabos para esse nível de tensão, praticamente inviabiliza essa possibilidade.

Atualmente, o reduzido número de linhas de transmissão compactas no Brasil na faixa de HV, não permite uma extrapolação confiável de dados sobre custos de implantação. Essa situação, no entanto, tende a se reverter nos próximos anos, gerando um incremento quantitativo e

qualitativo desses fatores, o que permitirá uma avaliação prévia cada vez mais consistente dos custos de implantação do empreendimento.

As linhas de transmissão compactas de 138/230kV instaladas em área urbana, se constituem assim numa solução que busca conciliar as crescentes necessidades de consumo de energia elétrica com um mínimo de transtornos à população, apresentando um custo certamente compatível com os benefícios obtidos.

A diretriz básica adotada neste estudo quanto à viabilidade de implantação da LTC, considerando-a como um "corpo estranho" que precisa adaptar-se à região a ser atravessada, e não o inverso, fez delinear de modo nítido as dificuldades reais a serem suplantadas para sua instalação em área urbana.

É preciso observar que a situação ideal do ponto de vista de implantação das LTC's, é inserir os respectivos estudos de projeto dentro dos planos diretores das cidades de médio e grande porte, como uma obra pública de mesmo alcance social das demais, usufruindo assim de um estudo compartilhado de viabilidade de implantação. Esse expediente redundaria numa otimização dos projetos das LTC's, possibilitando a definição de um traçado mais econômico e uma menor interferência no meio ambiente. Nessa situação, as vantagens das linhas de transmissão compactas sobre as convencionais tornar-se-iam ainda mais nítidas.

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

- 1 - ESPECIFICAÇÕES Técnicas - Eletrovidro
- 2 - PUCCINELLI, Roberto Carneiro (Júnior) - LT Compacta 230 kV Recife - Estudo Preliminar de Viabilidade de Implantação - Monassa Consultoria e Projetos Ltda. - 1988
- 3 - ZONA de Proteção de Aeródromos - Ministério da Aeronáutica - Portaria nº 1141/G6MS de 8 de Dezembro de 1987
- 4 - NORMA 223-3150-04/01 - Telebrás - Jun.1977
- 5 - ESPECIFICAÇÕES Técnicas - Conipost
- 6 - CRITÉRIOS para Projeto Eletromecânico - Cemig - Relatório OT/PL3-2225-E - 29 junho 1987
- 7 - SISTEMA de Transmissão de Itaipú - Furnas Centrais Elétricas - Centro de Treinamento de Linhas de Transmissão - Módulo XII
- 8 - ELSNER, G. et Alli - Special Design Reduces Environmental Impact of the 400 kV Berlin Line - CIGRÉ - 1978
- 9 - BARTHOLD, L. et Alli - Transmission Line Reference Book/115-138kV Compact Line Design - California - Electric Power Research Institute - 1978 - 177 p.
- 10 - ZOBEL, E. S. et Alli - EHV and UHV Transmission Lines: Electrical, Structural and Environmental Desing, Concepts and Evaluations - Washington, D.C. - U. S. - DEPARTMENT OF ENERGY - Mar. 1982
- 11 - LOEWENTHAL, Claude Franck et Alli - Experiência com uma LT 69kV Urbana - COPEL - VI SNPTE - Camboriú - 1981
- 12 - SONCIN, Antônio et Alli - R.I. e T.V.I. em Decorrência de LT's 138kV Urbanas Compactas da COPEL - VII SNPTE - Brasília - 1983

- 13 - SAMICO, Roberto Antônio de Melo - Comunicação Privada - 1992
- 14 - GUIDE for Application of Composite Insulators - IEEE - 1985
- 15 - MAILFERT, R. et Alli - Effect of the Superposition of Electric, Mechanical and Environmental Stresses on the Fatigue Behavior of Composite Insulating Materials - CIGRÉ - France - 1978
- 16 - ISHIHARA, Takeshi et Alli - Aging Degradation of the Mechanical Properties of Composite Insulators and it's Analytical Approaches - IEE-TPD - USA - Jan. 1988
- 17 - SCHNEIDER, H. et Alli - Nonceramic Insulators for Transmission Lines - IEE-TPD - New York - Out. 1989
- 18 - PARGAMIN, L. & HUC, J. - Composite Insulators for Lines 220kV and Above - Laboratoire Haute Tension de Bazet, Ceraver - France
- 19 - CHERNEY, E. A. & STONKUS, D. J. - Non-ceramic Insulators for Contaminated Environments - IEE-TPAS - New York - Jan. 1981
- 20 - KNOWLTON, Archer E. - Standard Handbook for Electrical Engineers - New York - McGraw-Hill - 1949 - 2311 p.
- 21 - ESPECIFICAÇÕES Técnicas - Isoladores Line-Post - Lapp - 1977
- 22 - TEIVELIS, Fábio - Compactação de Linhas de Transmissão - Sua Influência para os Sistemas de Transmissão Futuros - Eletrobrás - Rio de Janeiro
- 23 - ENSAIOS Executados pelo Laboratório Central de Eletrotécnica e Eletrônica de Curitiba - Cerâmica Santana - Curitiba - Jun. 1988
- 24 - STEVENSON, William D. Jr.- Elementos de Análise de Sistemas de Potência - São Paulo - Mc GRAW-HILL - 1974 - 348 p.



- 25 - FERNANDES, J. H. M. et Alli - 500kV Compact Line of Eletronorte - Brazil - Conception, Electrical and Mechanical Design - CIGRÉ - Paris - 1990
- 26 - PINHEIRO, Ricardo Pinto et Alli - Torres para Linhas Compactas do Segundo Circuito 500kV da Interligação Norte-Nordeste, no Sistema Eletronorte - 1ª Parte - Estudos Elétricos - VIII SNPTE - São Paulo - 1986
- 27 - D'AJUZ, Ary et Alli - Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamento - Rio de Janeiro - EDUFF - 1987 - 425 p.
- 28 - ZOBEL, E. S. et Alli - Narrower Transmission Corridors Made Possible with new Compacted Conductor Support Systems for EHV and UHV Lines - CIGRÉ - USA - 1980
- 29 - ROHLFS, A. F. & SCHNEIDER, H. M. - Switching Impulse Strength of Compacted Transmission Line Flat and Delta Configurations - IEE-TPAS - USA - Abril 1983
- 30 - VAISMAN, R. et Alli - Estudo do Isolamento de Estruturas Compactas - CEPEL - 1981
- 31 - ROSA, Ramón de la et Alli - Contributions to Lightning Research for Transmission Line Compaction - IEEE-TPAS - México - Abr. 1988
- 32 - DARVENIZA, M. et Alli - Modelling for Lightning Performance Calculations - IEE-TPAS - Austrália - Nov/Dez. 1979
- 33 - CHOY, Liew Ah & DARVENIZA, M - A Sensitivity Analysis of Lightning Performance Calculations for Transmission Lines - IEEE - Summer Power Meeting - Los Angeles - July 1970
- 34 - PROJETO de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica - Procedimento - NBR 5422 - ABNT - Jun. 1985

- 35 - MOUSA, Abdul M. - New Method Proposed for Working De-energized Transmission Lines - Transmission & Distribution - USA - p.26-28 - Mar. 1983
- 36 - BRASIL, Dalton O. C. et Alli - Efeitos Induzidos em Instalações Metálicas Próximas às Linhas de Transmissão - CIGRÉ - Grupo 36 - Brasil/Argentina - Mai. 1986
- 37 - TAFLOVE, Allen & DABKOWSKI, John - Prediction Method for Buried Pipeline Voltages Due to 60 Hz AC Inductive Coupling - Part I - Analysis - IEEE-TPAS - Los Angeles - Mai/Jun. 1979
- 38 - JAFFA, Kent C. & STEWART, John B. - Magnetic Field Induction from Overhead Transmission and Distribution Power Lines on Buried Irrigation Pipelines - IEEE-TPAS - Vancouver - Mar.1981
- 39 - JAFFA, Kent C. - Magnetic Field Induction from Overhead Transmission and Distribution Power Lines on Parallel Fences - IEEE-TPAS - Minneapolis - Abr. 1981
- 40 - PUCCINELLI, Roberto Carneiro (Júnior) - Induções Eletromagnéticas em Cercas e Tubos Metálicos Enterrados Próximos a Linhas de Transmissão e Distribuição - UNICAMP - Campinas - 1990
- 41 - MOREAU, Marcel R. & GARY, Claude H. - Predetermination of the Radio-Interference Level for High Voltage Transmission Lines - Excitation Function and Field Calculating Method - IEEE - Portland -Mai. 1971
- 42 - JUETTE, G. W. et Alli - Comparison of Radio Noise Prediction Methods with CIGRÉ/IEEE Survey Results - IEEE - San Francisco - Mai. 1972

- 43 - KABA, Naim (Filho) - Definição das Estruturas para LT'S Futuras do Sistema Tronco de Suprimento do Mato Grosso - ELETRO-NORTE - 1989
- 44 - KEAST, David N. - Assessing the Impact of Audible Noise from AC Transmission Lines: A Proposed Method - IEEE-TPAS -New York - Mai/Jun. 1980
- 45 - COMBER, M. et Alli - A Comparison of Methods for Calculating Audible Noise of High Voltage Transmission Lines - IEEE-TPAS - New York - Out. 1982
- 46 - ALEXANDROV, G. N. - Scientific and Engineering Principles of Creating Compact Lines with Increased Natural Capacity - CIGRÉ - Symposium Leningrad - 1991
- 47 - ESTUDOS e Pesquisas para Otimização de Estruturas Visando Redução da Faixa de Servidão - Monasa Consultoria e Projetos Ltda. - São Paulo - 1979
- 48 - SARGENT, Michael A. & DARVENIZA, Mat - Tower Surge Impedance - IEEE-TPAS - New York - Mai. 1968
- 49 - ESPECIFICAÇÕES Técnicas - TECTRONIC - 1986
- 50 - MARKS, Lionel S. - Mechanical Engineer's Handbook - New York - Mc Graw-Hill - 1951 - 2236 p.
- 51 - ESPECIFICAÇÕES Técnicas de Cabos ACSR - Alcoa/Alcan-Alumínio e Termocanáda
- 52 - AUDITORE, F. A. & HOBBS, J. C. A. - Environmental Considerations in Moves Towards the Compaction of 11 to 66kV Overhead Lines - CIGRÉ -Symposium Leningrad - 1991

- 53 - PUCCINELLI, Roberto Carneiro (Júnior) - Sinalização Noturna de Linhas de Transmissão - Monasa Consultoria e Projetos Ltda. - São Paulo - 1988
- 54 - CLAPP, Allen L. - Relationships of National Electrical Safety Code Vertical Clearances and Potentially Conflicting Activity - IEEE-TPAS - Vancouver - Nov. 1985
- 55 - FONSECA, Cláudio dos Santos - Comunicação Privada - 1992
- 56 - KABA, Naim (Filho) - Estudo Sobre Campos Elétricos com Base na Metodologia Desenvolvida no "Transmission Line Reference Book - 345kV and Above - EPRI - Second Edition - 1982" - São Paulo