Transmissão de Energia Elétrica

Linhas Aéreas

RUBENS DARIO FUCHS

2

LTC / EFEI

OUTRAS OBRAS DO NOSSO FUNDO EDITORIAL

CLOSE, Charles M. – *Análise de Circuitos Lineares*. Vols. 1 e 2
CREDER, Hélio – *Instalações Elétricas*
DINIZ, Aroldo B. e FREIRE, Gabriel F. O. – *Ondas Eletromagnéticas*
ELLISON, A. J. – *Conversão Eletromecânica de Energia*
GRAY, Paul E., DEWITT, David, Boothroyd, A. R. e GIBBONS, James F. – *Eletrônica Física e Modelos de Circuito de Transistores*
GRAY, Paul E. e SEARLE, Campbell L. – *Princípios Eletrônicos de Eletrônica*. Vols. 1 a 3
GRAY, Alexander e Wallace, G. A. – *Eletrotécnica*
GRONNER, Alfred D. – *Análise de Circuitos Transistores*
HOUPIS, Constantine H. e LUBELFELD, Jerzy – *Técnica de Pulsos*
MELLO, Hilton Andrade de e INTRATOR, Edmond – *Dispositivos Semicondutores*
NOVO, Darcy Domingues – *Eletrônica Aplicada*. Vols. 1 e 2
SEARLE, Campbell L., BOOTHROYD, A. R., ANGELO, E. J., Jr., GRAY, Paul E. e PEDERSON, Donald O. – *Propriedades Elementares de Circuitos dos Transistores*
SILVESTER, P. – *Campos Eletromagnéticos Modernos*
SLEMON, Gordon R. – *Equipamentos Magnetelétricos – Transdutores, Transformadores e Máquinas*. Vols. 1 e 2
SMITH, Ralph J. – *Circuitos, Dispositivos e Sistemas*. Vols. 1 e 2
STOUT, Melville S. – *Curso Básico de Medidas Elétricas*
WEEDY, B. M. – *Sistemas Elétricos de Potência*
WELLAUER, Max – *Introdução à Técnica das Altas Tensões*

TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Linhas Aéreas

Volume 2

TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Linhas Aéreas

Teoria das Linhas em Regime Permanente

Volume 2

ENG. RUBENS DARIO FUCHS

M. Sc., L. D., Professor Titular da
Escola Federal de Engenharia de Itajubá

LIVROS TÉCNICOS E CIENTÍFICOS EDITORA
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

CAPA / AG Comunicações visual ltda

(Preparada pelo Centro de Catalogação-na-fonte do
SINDICATO NACIONAL DOS EDITORES DE LIVROS, RJ)

F966t

Fuchs, Rubens Dario.
Transmissão de energia elétrica: linhas aéreas; teoria das linhas em regime permanente. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos; Itajubá, Escola Federal de Engenharia, 1977.
p. ilust.

Apêndice: Tabelas
Bibliografia.

1. Distribuição de energia elétrica 2. Energia elétrica 3. Linhas elétricas — Aéreas I. Título II. Título: Teoria das linhas em regime permanente

77-0337

CDD – 621.3192
CDU – 621.315.1

LIVROS TÉCNICOS E CIENTÍFICOS EDITORA S.A.
Avenida Venezuela, 163 – ZC-14
20.000 – Rio de Janeiro, RJ
1977
Impresso no Brasil

À minha querida esposa e filhas

Magda

Cecília Elizabeth

Celina Dária

Célia Inês

Annelise

Danielle

Prefácio

Em 1968 foi publicada um coleção de *Notas de Aula*, preparadas do afogadilho, com o fim único de acompanhamento das preleções da disciplina *Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica*, que, nessa época, era introduzida no currículo de graduação do curso de Engenheiros Eletricistas da Escola Federal de Engenharia de Itajubá. Sua repercussão foi imediata, exigindo sucessivas reimpressões, dada a inesperada procura não somente pelos alunos a quem se destinavam, como também, e principalmente, por engenheiros militantes no ramo. Imperfeições e incorreções por certo as havia, e deviam ser sanadas. Originalidade, nenhuma, exceto, talvez, o idioma português.

Durante o processo de revisão e complementação, a idéia de transformá-las em livro foi tomando corpo. O estímulo de colegas foi decisivo. A ambição também cresceu: não bastava um livro-texto para cursos normais de graduação em Engenharia Elétrica. Devia servir também aos cursos de pós-graduação e aos engenheiros no exercício da profissão. Uma edição experimental, feita em 1973, em "multilith", também se esgotou rapidamente, comprovando o interesse pelo assunto.

É, antes de tudo, uma compilação bibliográfica. Porém, em se considerando a escassez de material bibliográfico à disposição de estudantes e engenheiros em geral, terá, sem dúvida alguma, sua utilidade. Informações baseadas na experiência profissional foram incluídas, onde cabível.

A bibliografia de referência consultada está indicada no final de cada capítulo. É variada em suas origens, na presunção de que, estando o Brasil procurando sua própria tecnologia, devemos buscar a composição das boas práticas de qualquer origem, para atingir um ótimo nosso. É também bastante atualizada.

O tratamento dado aos diversos tópicos é aquele que se poderia chamar de clássico, procurando-se, dentro do possível, a generalização dos processos de enfoque de problemas de mesma natureza. Processos gráficos de cálculo e análise das condições de operação das linhas foram empregados por sua natureza *fotográfica*. A análise qualitativa dos fenômenos merece especial destaque.

Se bem que seria desejável, não foi possível estabelecer linhas divisórias nítidas, visando a uma limitação na extensão com que os diversos tópicos deveriam ser tratados em cursos de graduação e quais as partes que deveriam ser conservadas nos cursos de pós-graduação como base de programa. Nestes, os conhecimentos na profundidade desejada raramente saem dos livros-texto, e sim de artigos e obras especializadas, de estudo e interpretação obrigatória.

Aparentemente. espaço demais foi dedicado à análise da operação das linhas através da teoria das ondas, pois para a maioria dos problemas de ordem prática, a análise de seu comportamento pela teoria dos circuitos elétricos é suficiente e leva aos mesmos resultados numéricos. Mas, em geral, não os explica nem os justifica, o que é inadmissível em Engenharia. E problemas há em que somente um profundo conhecimento dessa teoria permite alcançar resultados satisfatórios. Este é, por exemplo, o caso do estudo das linhas extra longas que, possivelmente, deverão ser implantadas para um melhor aproveitamento do potencial energético da bacia amazônica.

O estudo das indutâncias e capacitâncias, através dos coeficientes de campo e de potencial, foi adotado por apresentarem maiores recursos e flexibilidade para um tratamento generalizado, sendo o conceito das Distâncias Médias Geométricas introduzido no final, para permitir o uso das clássicas tabelas de reatâncias em cálculos práticos.

No final do texto, em forma de apêndices, foram incluídas tabelas consideradas úteis, destacando-se as tabelas de características físicas, mecânicas e elétricas de condutores padronizados, todas convertidas ao sistema métrico. Incluíram-se também tabelas de reatâncias indutivas e capacitivas unitárias, elaboradas no Centro de Processamento de Dados da EFEI, com auxílio do computador digital, para cabos múltiplos de 2, 3, 4 e 6 subcondutores e diversos espaçamentos padronizados.

Como o estudante de hoje, desde o seu primeiro semestre nas Escolas de Engenharia, já é treinado para o uso dos computadores, tanto digitais como analógicos, como o era no uso da régua de cálculo, foi omitida a solução de problemas nesses tipos de máquinas ou a apresentação de programas, na suposição de que, quando esta matéria lhe for apresentada, já no final de seu curso, esteja em condições de escrever seus próprios programas. No tratamento matemático, cuidou-se da formulação que facilitasse o uso desses recursos de cálculo. Considerando que os resultados obtidos por processos de cálculo em computadores que hoje tendem a requintes de sofisticação são apenas tão possíveis de confiança quanto os dados de entrada, observações nesse sentido são feitos onde se faz necessário.

No final dos capítulos, em que se julgou conveniente, incluiu-se uma série de exercícios típicos resolvidos e outros por resolver, usando-se, freqüentemente, características aproximadas de linhas reais existentes no Brasil, a fim de familiarizar o estudante com as mesmas.

Um trabalho como este não poderia ser completado sem a colaboração de muitos. Por certo pecaria por omissão numa tentativa de relacionar tantos que tornaram esta obra viável. Sou, pois, profundamente grato a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram com seu trabalho, críticas, sugestões e estímulo para sua concretização.

Escola Federal de Engenharia de Itajubá
Julho de 1977

Rubens Dario Fuchs

Simbologia e Abreviações

Símbolos	*Significado*
a	Operador $e^{j120°} = -\frac{1}{2} + j\sqrt{\frac{3}{2}}$
a_{ii}	Coeficientes de potencial (de Maxwell) próprios
a_{ij}	Coeficientes de potencial (de Maxwell) mútuos
$[a]$	Matriz de transformação das componentes simétricas
$[A]$	Matriz de coeficientes de potencial (de Maxwell)
A	Ampères (abr.)
$\dot{A}$	Constante generalizada dos quadripolos
$[\dot{A}]$	Matriz da constante $\dot{A}$ de uma linha trifásica
b	Susceptância capacitiva, pressão barométrica
b_{ii}	Susceptância capacitiva própria
b_{ij}	Susceptância capacitiva mútua
B	Densidade de campo magnético ou indução magnética
$[B]$	Matriz das susceptâncias capacitivas
$\dot{B}$	Constante generalizada dos quadripolos
$[\dot{B}]$	Matriz da constante $\dot{B}$ de uma linha trifásica
C	Capacitância por unidade de comprimento. Coulomb (abr.)
C_{io}	Capacitância parcial entre condutor e solo
C_{ij}	Capacitância parcial entre condutores
C_a, C_b, C_c	Capacitâncias aparentes das fases a, b e c
C_s	Capacitância de serviço
C_{11}	Capacitância de seqüência positiva
C_{22}	Capacitância de seqüência negativa
C_{00}	Capacitância de seqüência nula

$C_{12}, C_{21}, C_{10}, C_{01}, C_{20}, C_{02}$	Capacitância entre circuitos seqüenciais
$[C]$	Matriz das capacitâncias
$[C_{eq}]$	Matriz das capacitâncias da linha trifásica, sem cabos pára-raios equivalente
$\dot{C}$	Constante generalizada dos quadripolos
$[\dot{C}]$	Matriz da constante $\dot{C}$ de uma linha trifásica
d	Diâmetro dos condutores
d_{eq}	Diâmetro de um condutor cilíndrico equivalente a um condutor múltiplo de mesmo gradiente
d_{ij}	Distância entre condutores i e j
D	Densidade de fluxo elétrico. Determinante de uma matriz
D_{ij}	Distância do condutor i e a imagem do condutor j
D_{SL}	Raio médio geométrico dos condutores múltiplos
DMG	Distância média geométrica
D_m	Distância média geométrica entre fasês de um mesmo circuito
D_{m_i}	Distância média geométrica entre condutores e imagens dos condutores vizinhos
D_{I}	Distância média geométrica entre condutores de circuitos paralelos, de mesma fase
D_{II}	Distância média geométrica entre condutores de circuitos paralelos, de fases diferentes
$\dot{D}$	Constante generalizada dos quadripolos
$[\dot{D}]$	Matriz da constante $\dot{D}$ de uma linha trifásica
e	Número-base dos logaritmos naturais = 2,71828 . . .
E	Gradiente de potencial, intensidade de campo elétrico. Energia
E_{CRV}	Gradiente crítico visual (de Peek)
f	Freqüência
f_{ii}	Coeficientes de campo magnético próprios
f_{ij}	Coeficientes de campo magnético mútuos
$[F]$	Matriz das indutâncias de um sistema de condutores
F	farad (abr.)
g	Condutância por unidade de comprimento
G	Condutância total de uma linha
$[G]$	Matriz das condutâncias de n condutores
G_{ij}	Co-fator de uma matriz
G	10^9 (GIGA)
$/G/$	Valor em "por unidade" de uma grandeza G
h	Altitude, horas
h_i	Altura média do condutor genérico i sobre o solo
h_m	Altura média geométrica dos condutores sobre o solo

H	Intensidade de campo magnético
H_i	Altura de fixação de um condutor genérico
H	Henry (abr.)
Hz	Hertz (abr.)
i	Corrente elétrica – valor instantâneo, condutor genérico
I	Corrente elétrica — módulo
$\dot{I}_a, \dot{I}_b, \dot{I}_c, \ldots$	Fasores das correntes nas fases $a, b, c, \ldots$
$[\dot{I}]$	Vetor de correntes
$I_m\{\dot{C}\}$	Parte imaginária de um conplexo $\dot{C}$
j	Condutor genérico, ou operador
J	Joule (abr.)
K	Constantes de proporcionalidade, quilo (abr.)
kA	$10^3 \cdot$ A
km	$10^3 \cdot$ m
kV	$10^3 \cdot$ V
kVA	$10^3 \cdot$ VA
kVAr	$10^3 \cdot$ VAr
kW	$10^3 \cdot$ W
l	Comprimento
L	Indutância
m	Coeficiente de superfície dos condutores
m	Metro (abr.)
m	Número de elementos
M	Mega — 10^6
MVA	$10^6 \cdot$ VA
MVAr	$10^6 \cdot$ VAr
MW	$10^6 \cdot$ W
n, N	Número de elementos, potência aparente
$\dot{N}$	Potência complexa
p	Operador
P	Potência ativa
Pi	Circuito equivalente de linha
pu	Por unidade
q, Q	Carga elétrica
Q	Potência reativa
r	Raio de um condutor, resistência elétrica por unidade de comprimento de um condutor
r_{eq}	Raio de um condutor cilíndrico equivalenre a um con-
R	Raio do círculo que passa pelo centro dos subcondutores em um condutor múltiplo. Resistência elétrica total de um condutor.
RMG	Raio Médio Geométrico
$R_e\{\dot{C}\}$	Parte real de um complexo $\dot{C}$

t	Tempo, temperatura em °C
T	Período, temperatura em °K
Tee	Circuito equivalente de linha
u	Valor instantâneo da tensão
U	Tensão entre fase e neutro (módulo)
$\dot{U}$	Fasor de tensão
U_Δ	Tensão entres fases (módulo)
$[\dot{U}]$	Vetor de tensões
v	Velocidade ou celeridade de propagação
V	Volt (abr.)
W	Watt (abr.)
x	Deslocamento, distância genérica
x_L	Reatância indutiva por unidade de comprimento
x_C	Reatância capacitiva em uma unidade de comprimento
x'_L	Reatância indutiva em ohm/km para espaçamento de 1 m
x'_C	Reatância capacitiva em Mohm · km para espaçamento de 1 m
x''_L	Fator de espaçamento indutivo
x''_C	Fator de espaçamento capacitivo
x'''_L	Fator indutivo de acoplamento mútuo entre dois circuitos
x'''_C	Fator capacitivo de acoplamento mútuo entre dois circuitos
X_L	Reatância indutiva total
X_C	Reatância capacitiva total
$x_{L_{00}}$	Reatância indutiva de seqüência nula
$x_{L_{11}}$	Reatância indutiva de seqüência positiva
$x_{L_{22}}$	Reatância indutiva de seqüência negativa
y	Admitância por unidade de comprimento
Y	Admitância total
z	Impedância por unidade de comprimento
Z	Impedância total
Z_c	Impedância característica
Z_0	Impedância natural ou impedância de surtos
Z_{00}	Impedância de seqüência nula
Z_{11}	Impedância de seqüência positiva
Z_{22}	Impedância de seqüência negativa
α	Função de atenuação, ângulo
α_t	Coeficiente de aumento de resistência com a temperatura
β	Função de fase
β_i	Ângulos

$\dot{\gamma}$	Função de propagação
δ	Densidade relativa do ar, coeficiente de desuniformidade
Δ	Variação incremental
ϵ	Permissividade do meio
ϵ_0	Permissividade do vácuo = 8,859 · 10^{-12} [A·s/V·m]
ϵ_r	Permissividade relativa do meio
θ	Ângulo de potência da linha
$[\lambda_i]$	Vetor de transformação
μ	Constante de permeabilidade magnética
μ_0	Constante de permeabilidade do vácuo = $4\pi \cdot 10^{-7}$ $\left[\frac{V \cdot s}{A \cdot m}\right]$
μ_r	Constante de permeabilidade relativa
π	Pi = 3,14159 . . .
ρ	Resistividade elétrica
ψ	Ângulo de fator de potência
ϕ	Fluxo magnético, ângulo do fator de potência
ω	Freqüência angular
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AIEE	*American Institute of Electrical Engineers*
EdeF	*Eletricité de France*
EHV	Equipe de projeto *Extra High Voltage Research Program General Electric — Edison Institute*
IEE	*The Institute of Electrical Engineers* — Londres
IEEE	*Institute of Electrical and Electronics Engineers*
CEMIG	Centrais Elétricas de Minas Gerais S. A.
CESP	Centrais Elétricas de São Paulo S. A.
CHESF	Cia. Hidroelétrica do São Francisco S. A.
FURNAS	Centrais Elétricas de Furnas S. A.
CPFL	Companhia Paulista de Força e Luz S. A.

1

Sumário

7

Indutância, Reatância Indutiva das Linhas de Transmissão

7.1 — INTRODUÇÃO

No estudo do desempenho das linhas de transmissão, com o qual nos ocupamos nos Caps. 3, 4 e 5, verificamos que o transporte da energia elétrica é decisivamente influenciado pelos valores de seus parâmetros elétricos. Sua determinação, dentro de um mínimo rigor matemático, é, portanto, necessária. Esse rigor matemático deverá, porém, ser compatível com o grau de confiança que podemos depositar nos dados de projeto, quase nunca perfeitamente definidos. Neste capítulo e nos três que se seguem estudaremos as formas de determinar os seus valores.

Os valores das indutâncias das linhas de transmissão dependem de sua configuração física e do meio no qual se encontram os condutores. É, pois, interessante buscar um processo generalizado de cálculo, que permita calcular essas grandezas, quaisquer que sejam as formas dos condutores, sua disposição relativa e meio em que forem colocados. Por outro lado, processos rápidos de cálculo são também desejáveis para os casos de rotina, sendo objeto de atenção neste capítulo.

No desenvolvimento matemático que se segue, somente serão consideradas tensões e correntes alternadas, de forma senoidal, e todo o raciocínio se desenvolverá com relação às linhas aéreas. A indutância de linhas em cabos não será abordada.

7.2 — RELAÇÕES FUNDAMENTAIS

Consideremos um condutor cilíndrico, retilíneo, de comprimento infinito, maciço, homogêneo e isolado, suficientemente afastado do solo e de quaisquer outros condutores que conduzam correntes, de forma que não seja influenciado pelos mesmos. Esse condutor é percorrido por uma corrente I [A], que produz um campo magnético concêntrico com o condutor. A intensidade desse campo magnético é proporcional à intensidade da corrente e pode ser representado em um plano perpendicular ao condutor por linhas de fluxo concêntricas, como o demonstraram as experiências de Faraday.

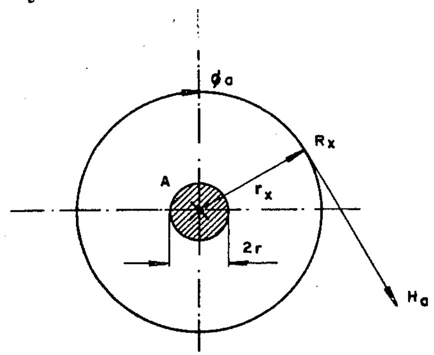


Fig. 7.1 — *Campo magnético em torno de condutor cilíndrico.*

Esse campo magnético existe tanto no interior como no exterior do condutor, no espaço que o envolve. O fluxo magnético total será igual à soma dos fluxos internos e externos.

7.2.1 — Fluxo Magnético Externo de um Condutor

Seja r [m] o raio do condutor descrito e P_x um ponto situado a uma distância r_x [m] de seu eixo central, como na Fig. 7.1.

Pela lei circuital de Ampère se demonstra facilmente que a intensidade de campo magnético em P_x é dada por:

$$\dot{H}_a = \frac{\dot{I} \cdot n}{l_x} \quad [\text{A/m}] \tag{7.1}$$

na qual valem:

$\dot{H}$ — vetor intensidade de campo;

$\dot{I}$ — valor eficaz da corrente que flui no condutor em [A];

n — número de espiras percorridas pela corrente $\dot{I}$;

l_x — comprimento da linha de fluxo que contém P_x.

Para o caso particular, teremos:

$$n = 1; \quad l_x = 2\pi\, r_x \quad [\text{m}];$$

logo, a intensidade de campo em P_x será:

$$\dot{H}_a = \frac{\dot{I}}{2\pi\, r_x}. \tag{7.2}$$

A intensidade de campo em um ponto qualquer de um campo magnético pode ser relacionada com a *densidade de campo* ou *indução magnética* naquele ponto através da *constante de permeabilidade do meio*:

$$\dot{B}_a = \mu\, \dot{H}_a\, [\text{V} \cdot \text{s/m}^2] \quad \text{ou} \quad [\text{weber/m}^2], \tag{7.3}$$

sendo:

$$\mu = \mu_o\, \mu_r; \tag{7.4}$$

$\mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7}$ [V · s/A · m] — permeabilidade do vácuo;

μ_r — permeabilidade relativa: para o ar, $\mu_r = 1$.

Teremos, introduzindo em (7.3) os valores dados por (7.2) e (7.4):

$$\dot{B}_a = 2 \cdot 10^{-7} \frac{\dot{I}}{r_x} [\text{V} \cdot \text{s/m}^2] \text{ ou } [\text{weber/m}^2]. \tag{7.5}$$

O fluxo magnético externo ao condutor estende-se, a partir de sua superfície, com intensidades decrescentes, até se tornar nulo no infinito. Ele abarcará, portanto, qualquer condutor situado a uma distância finita.

Consideremos, como mostra a Fig. 7.2, um segundo condutor B, cujo centro se encontra a uma distância d [m] do centro de A. Ambos possuem um comprimento infinito e somente o condutor A conduz a corrente $\dot{I}$ [A]:

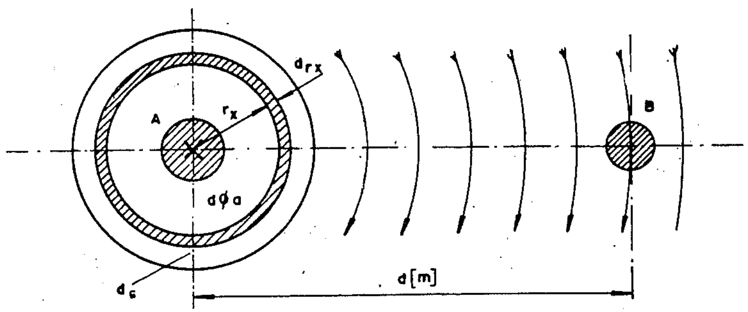


Fig. 7.2 — *Fluxo magnético do condutor A abarcando o condutor B.*

Imaginemos um cilindro fictício de espessura dr_x [m], de comprimento unitário, envolvendo o condutor A a uma distância r_x [m] de seu centro.

Um fluxo elementar $d\phi_a$ será contido pelas paredes do cilindro, atravessando uma secção:

$$dS = dr_x \cdot l = dr_x, \text{ pois } l = 1 \quad [\text{m}].$$

Será então:

$$d\phi_a = \dot{B}_a \cdot dS = \dot{B} dr_x$$

ou, conforme a Eq. (7.5):

$$d\phi_a = 2 \cdot 10^{-7} \frac{\dot{I}}{r_x} dr_x \quad [\text{V} \cdot \text{s}]. \tag{7.6}$$

O fluxo magnético externo do condutor A, situado no espaço compreendido entre a sua superfície e a superfície oposta do condutor B, envolvendo-o, será, se considerarmos muito pequenos os raios de A e B, comparados com a distância entre seus eixos d:

$$\phi_a = \int_r^d 2 \cdot 10^{-7} \frac{\dot{I}}{r} dr_x$$

ou

$$\phi_a = 2 \cdot 10^{-7} \dot{I} Ln \left(\frac{d}{r}\right) \quad \text{ou} \quad [\text{weber/m}]. \tag{7.7}$$

Para um condutor de comprimento l_A, teremos:

$$\phi_A = 2 \cdot 10^{-7} \dot{I} l_A \, Ln \left(\frac{d}{r}\right) \, [\text{V} \cdot \text{s}] \quad \text{ou} \quad [\text{weber}]. \tag{7.8}$$

7.2.2 — Fluxo Magnético Interno de um Condutor

Consideremos uma secção através do condutor A, percorrido pela corrente $\dot{I}$ [A], que admitimos como uniformemente distribuída em seu

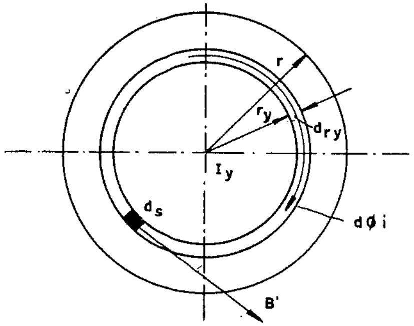


Fig. 7.3 — *Fluxo magnético interno de um condutor.*

interior, produzindo linhas de fluxo magnéticas (Fig. 7.3). Separemos em seu interior um cilindro de paredes infinitesimais, de raio r_y e espessura dr_y. As paredes do cilindro, de comprimento unitário, são percorridas pelo fluxo $d\phi_{iy}$, produzido pela parcela de corrente $\dot{I}_y$ que flui na parte do condutor limitada pelo cilindro.

Para distribuição uniforme da corrente no interior do condutor, temos:

$$\dot{I}_y = \dot{I} \frac{r_y^2}{r^2} \quad [\text{A}].$$

Aplicando a lei de Ampère, teremos:

$$\oint \dot{B} \, dS = \mu \, \dot{I}_y.$$

Como no cilindro dr_y podemos considerar $\dot{B}$ constante, temos:

$$\oint \dot{B} \, dS = B \oint dS = \dot{B} \cdot 2 \pi r_y \tag{7.9}$$

e

$$\mu \dot{I}_y = \mu \, \dot{I} \frac{r_y^2}{r^2} \, ;$$

logo, introduzindo esses valores em (7.9), temos:

$$2\pi \dot{B} r_y = \pi \frac{r_y^2}{r^2}$$

ou

$$\dot{B} = \frac{\mu}{2\pi} \, \dot{I} \, \frac{r_y^2}{r^2}. \tag{7.10}$$

O volume de material do cilindro infinitesimal de comprimento unitário é:

$$dv = 2\pi r_y \cdot dr_y \tag{7.11}$$

e a energia armazenada pelo campo magnético no interior do condutor:

$$E = \frac{1}{2\mu} \int_o^r B^2 \, dv = \frac{1}{2} L I^2 \quad [\text{W} \cdot \text{s}], \tag{7.12}$$

na qual introduzimos os valores de B e dv dados pelas Eqs. (7.10) e (7.11), para obter:

$$E = \frac{1}{2\mu} \int_o^r \left(\frac{\mu \dot{I} r_y}{2\pi\ r} \right)^2 \cdot 2\pi r_y\, dr_y = \frac{\mu\ I^2}{4\pi r^4} \int_o^r r_y^3\, dy$$

ou

$$\dot{E} = \frac{\mu\ \dot{I}^2}{16} = \frac{L\ \dot{I}^2}{2}\ ; \qquad (7.13)$$

como, porém:

$$L = \frac{\phi_i}{\dot{I}}\ ,$$

teremos:

$$\phi_i = \frac{\mu\ \dot{I}}{8\ \pi} \quad [\mathrm{V \cdot s/m}]$$

ou, introduzindo o valor de $\mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7}$:

$$\phi_i = \frac{1}{2} \cdot 10^{-7} \quad [\mathrm{V \cdot s/m}]. \qquad (7.14)$$

7.2.3 — Fluxo Magnético Total de um Condutor Cilíndrico Maciço

O fluxo magnético total associado a um condutor que conduz uma corrente $\dot{I}_a$, considerada desde o eixo que passa por seu centro até a uma distância d [m] desse eixo, será:

$$\phi = \phi_a + \phi_i \quad [\mathrm{V \cdot s/m}]. \qquad (7.15)$$

Substituindo ϕ_a e ϕ_i pelos valores encontrados em (7.7) e (7.12), teremos, para um metro de condutor:

$$\phi = 2 \cdot 10^{-7}\, \dot{I} \left(\frac{1}{4} + Ln \frac{d}{r} \right) \quad [\mathrm{V \cdot s/m}]. \qquad (7.16)$$

Se lembrarmos que:

$$\frac{1}{4} = Ln\ e^{1/4},$$

a Eq. (7.16) se torna:

$$\phi = 2 \cdot 10^{-7}\, \dot{I} \left(Ln\ e^{1/4} + Ln \frac{d}{r} \right) = 2 \cdot 10^{-7}\, \dot{I}\ Ln \frac{d}{re^{-1/4}}. \qquad (7.17)$$

Se fizermos $re^{-1/4} = r'$, teremos, finalmente:

$$\phi = 2 \cdot 10^{-7}\, \dot{I}\ Ln \frac{d}{r'} \quad [\mathrm{V \cdot s/m}]. \qquad (7.18)$$

O raio $r' = r\, e^{-1/4}$ pode ser interpretado como sendo o raio de um condutor fictício, teórico, que, não possuindo fluxo interno, produz, no entanto, o mesmo fluxo total ϕ que seria produzido pela corrente $\dot{I}$ [A] ao percorrer o condutor sólido real examinado.

Portanto, nos cálculos do fluxo produzido por condutores cilíndricos maciços, devemos substituir seus raios externos reais por:

$$r' = re^{-1/4} = 0{,}7788r, \qquad (7.19)$$

se empregarmos a Eq. (7.18) ou qualquer outra dela derivada.

Observa-se também que o termo logarítmico da Eq. (7.16) representa os limites para os quais o fluxo é considerado.

7.3 — FLUXO DE ACOPLAMENTO ENTRE DOIS CONDUTORES

Consideremos, na Fig. 7.4, dois condutores A e B, separados entre si de uma distância d [m]. Os dois condutores são cilíndricos, retilíneos e paralelos, isolados entre si. Seus raios são, respectivamente, r_a e r_b. Conduzem as correntes $\dot{I}_a$ e $\dot{I}_b$, respectivamente.

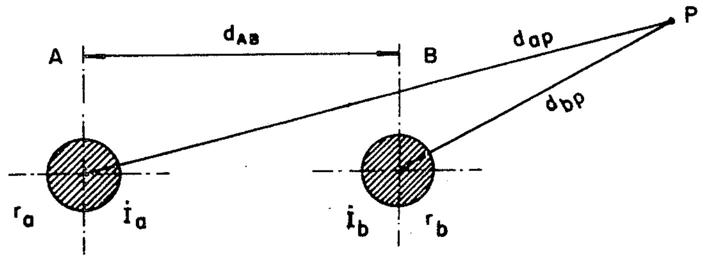


Fig. 7.4 — *Sistema de dois condutores paralelos.*

Consideremos, inicialmente, o condutor A. Ele é enlaçado pelo fluxo produzido pela própria corrente $\dot{I}_a$, interno e externo. O fluxo externo considerado será aquele que se estende desde a sua superfície até um ponto arbitrário P, situado a uma distância d_{aP} do condutor A (o raio r_a é insignificante em relação a d_{aP}). Teremos, de acordo com a Eq. (7.18):

$$\phi_{aPa} = 2 \cdot 10^{-7}\, \dot{I}_a\, Ln \frac{d_{aP}}{r'_a} \quad [\mathrm{V \cdot s/m}]. \qquad (7.20)$$

O condutor A será igualmente enlaçado pelo fluxo que a corrente $\dot{I}_B$ produz externamente ao condutor B, que se estende igualmente a P, cujo valor é dado por:

$$\phi_{aPb} = 2 \cdot 10^{-7}\, \dot{I}_b\, Ln\, \frac{d_{bP}}{d_{AB}} \quad [\mathrm{V \cdot s/m}]. \tag{7.21}$$

O fluxo enlaçante total será, então:

$$\phi_{aP} = \phi_{aPa} + \phi_{aPb} = 2 \cdot 10^{-7} \left(\dot{I}_a\, Ln\, \frac{d_{aP}}{r'_a} + \dot{I}_b\, Ln\, \frac{d_{bP}}{d_{AB}} \right). \tag{7.22}$$

Desdobrando os termos logarítmicos:

$$\phi_{aP} = 2 \cdot 10^{-7} \left(\dot{I}_a\, Ln\, \frac{1}{r'_a} + \dot{I}_b\, Ln\, \frac{1}{d_{AB}} + \dot{I}_a\, Ln\, d_{aP} + \right.$$

$$\left. + \dot{I}_b\, Ln\, d_{bP} \right) \quad [\mathrm{V \cdot s/m}]. \tag{7.23}$$

Se admitirmos que os dois condutores formem um circuito, teremos que $\dot{I}_b = -\dot{I}_a$. A Eq. (7.23), após um rearranjo em seus termos, se transforma em:

$$\phi_{aP} = 2 \cdot 10^{-7} \left(\dot{I}_a\, Ln\, \frac{1}{r'_a} + \dot{I}_b\, Ln\, \frac{1}{d_{AB}} + \dot{I}_a\, Ln\, \frac{d_{aP}}{d_{bP}} \right) \quad [\mathrm{V \cdot s/m}]. \tag{7.24}$$

Imaginemos que o ponto P se afaste mais e mais de A e B. O valor da relação $\dfrac{d_{aP}}{d_{bP}}$ tende então para a unidade. A Eq. (7.24) se transforma em:

$$\phi_a = 2 \cdot 10^{-7} \left[\dot{I}_a\, Ln\, \frac{1}{r'_a} + \dot{I}_b\, Ln\, \frac{1}{d_{AB}} \right] \tag{7.25}$$

Efetuando o mesmo raciocínio com relação ao condutor B, encontraremos:

$$\phi_b = 2 \cdot 10^{-7} \left[\dot{I}_b\, Ln\, \frac{1}{r'_b} + \dot{I}_a\, Ln\, \frac{1}{d_{AB}} \right] \quad [\mathrm{V \cdot s/m}]. \tag{7.26}$$

As Eqs. (7.25) e (7.26) constituem um sistema, que podemos escrever sob a forma:

$$\begin{bmatrix} \phi_a \\ \phi_b \end{bmatrix} = 2 \cdot 10^{-7} \begin{bmatrix} Ln\, \dfrac{1}{r'_a} & Ln\, \dfrac{1}{d_{AB}} \\ Ln\, \dfrac{1}{d_{AB}} & Ln\, \dfrac{1}{r'_b} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \end{bmatrix} \quad [\mathrm{V \cdot s/m}]. \tag{7.27}$$

7.3.1 — Indutâncias dos Condutores

A Eq. (7.27) pode ser escrita simbolicamente como

$$[\phi] = k\,[F]\,[\dot{I}]. \tag{7.28}$$

Lembrando a definição de indutância:

$$[\phi] = [L]\,[I], \tag{7.29}$$

concluímos, se comparamos as Eqs. (7.28) e (7.29):

$$L = k\,[F] \quad [\mathrm{H/m}].$$

Portanto:

$$\begin{bmatrix} L_a \\ L_b \end{bmatrix} = 2 \cdot 10^{-7} \begin{bmatrix} Ln\, \dfrac{1}{r'_a} & Ln\, \dfrac{1}{d_{AB}} \\ Ln\, \dfrac{1}{d_{AB}} & Ln\, \dfrac{1}{r'_b} \end{bmatrix} \quad [\mathrm{H/m}]. \tag{7.30}$$

7.3.2 — Reatância Indutiva dos Condutores

Uma corrente alternada senoidal $\dot{I}$, de freqüência f [Hz], ao percorrer um elemento de circuito que possui indutância L [H] provoca no mesmo uma queda de tensão calculável pela expressão:

$$\Delta\dot{U} = 2\pi f\, \dot{I}\, L \quad [\mathrm{V}]. \tag{7.31}$$

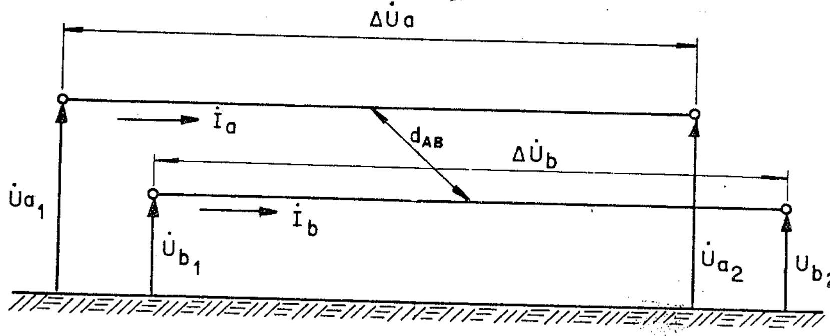


Fig. 7.5 — *Quedas indutivas de tensão nos condutores A e B.*

Portanto, as correntes $\dot{I}_a$ e $\dot{I}_b$, ao percorrerem os condutores A e B, produzirão nos mesmos quedas de tensão $\Delta\dot{U}_a$ e $\Delta\dot{U}_b$, que podemos definir através da equação:

$$\begin{bmatrix} \Delta\dot{U}_a \\ \Delta\dot{U}_b \end{bmatrix} = 4 \cdot 10^{-7} \cdot \pi \cdot f \begin{bmatrix} Ln\,\dfrac{1}{r'_a} & Ln\,\dfrac{1}{d_{AB}} \\ Ln\,\dfrac{1}{d_{AB}} & Ln\,\dfrac{1}{r'_b} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \end{bmatrix} \quad [\text{V}], \qquad (7.32)$$

que interpretamos através da Fig. 7.5.

7.3.3 — Condutores com Retorno pelo Solo

Admitamos que um condutor A, de raio r_a, cilíndrico e retilíneo, esteja suspenso a uma altura h [m] sobre o solo, sendo paralelo ao mesmo. Admitamos ainda que o solo seja ideal, isto é, um condutor perfeito e homogêneo. O solo constitui o retorno do circuito do condutor A.

Uma vez que o percurso da corrente através do solo não pode ser estabelecida, podemos admitir um condutor equivalente em seu lugar. Esse condutor, por ora considerado ideal, é paralelo ao condutor A, encontrando-se a uma profundidade da superfície do solo igual à altura do condutor A sobre o mesmo, como mostra a Fig. 7.6. Esse condutor recebe o nome de *condutor-imagem*.

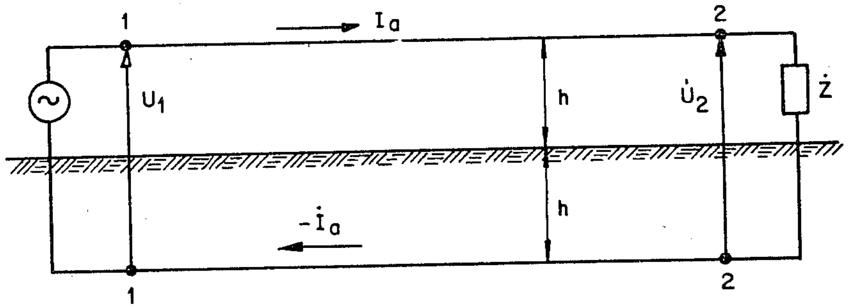


Fig. 7.6 — *Condutor com retorno pelo solo.*

A Eq. (7.25), aplicada ao sistema assim formado, tomará a seguinte forma:

$$\phi_a = 2 \cdot 10^{-7}\,\dot{I}_a \left(Ln\,\frac{1}{r'_a} - Ln\,\frac{1}{2h} \right) \quad [\text{V} \cdot \text{s/m}] \qquad (7.33a)$$

$$\phi_a = 2 \cdot 10^{-7}\,\dot{I}_a\,Ln\,\frac{2h}{r'_a} \quad [\text{V} \cdot \text{s/m}]. \qquad (7.33b)$$

Admitamos agora que, ao invés de um condutor, tenhamos dois condutores com retorno pelo solo, nas mesmas condições anteriores. Cada condutor terá o seu condutor-imagem, como mostra a Fig. 7.7.

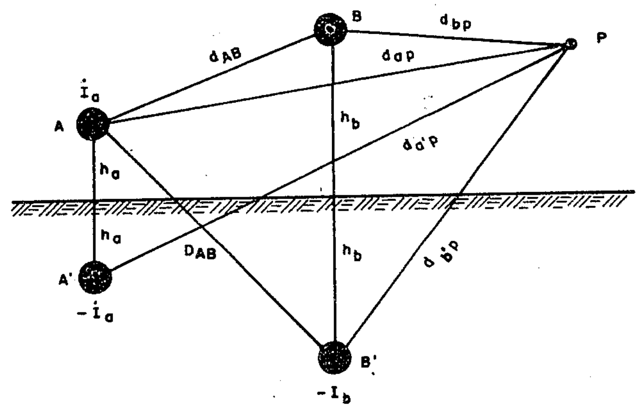


Fig. 7.7 — *Dois condutores com retorno pelo solo.*

Consideremos, no sistema assim formado, somente o condutor A, e marquemos novamente o ponto de referência P. Com o mesmo raciocínio usado no Item 7.2, obtemos o fluxo total que enlaça o condutor A:

$$\phi_{aP} = 2 \cdot 10^{-7} \left(\dot{I}_a\,Ln\,\frac{d_{aP}}{r'_a} + \dot{I}_b\,Ln\,\frac{d_{bP}}{d_{AB}} - \right.$$

$$\left. - \dot{I}_a\,Ln\,\frac{d_{a'P}}{2h_a} - \dot{I}_b\,Ln\,\frac{d_{b'P}}{D_{AB}} \right) \quad [\text{V} \cdot \text{s/m}]. \qquad (7.34)$$

Essa equação pode ser posta sob a seguinte forma:

$$\phi_{aP} = 2 \cdot 10^{-7} \left(\dot{I}_a\,Ln\,\frac{1}{r'_a} - \dot{I}_a\,Ln\,\frac{1}{2h_a} + \right.$$

$$\left. + \dot{I}_a\,Ln\,\frac{d_{aP}}{d_{a'P}} + \dot{I}_b\,Ln\,\frac{D_{AB}}{d_{AB}} - \dot{I}_b\,Ln\,\frac{d_{b'P}}{d_{bP}} \right) \quad [\text{V} \cdot \text{s/m}]. \qquad (7.35)$$

Considerando, novamente, o ponto P afastando-se dos condutores e suas imagens, teremos:

$$\phi_a = 2 \cdot 10^{-7} \left[\dot{I}_a \left(Ln\,\frac{1}{r'_a} - Ln\,\frac{1}{2h_a} \right) + \dot{I}_b\,Ln\,\frac{D_{AB}}{d_{AB}} \right] \quad [\text{V} \cdot \text{s/m}]$$

ou

$$\dot{\phi}_a = 2 \cdot 10^{-7} \left(\dot{I}_a \, Ln \frac{2h_a}{r'_a} + \dot{I}_b \, Ln \frac{D_{AB}}{d_{AB}} \right) \quad [\text{V} \cdot \text{s/m}]. \qquad (7.36a)$$

Com o mesmo raciocínio para o condutor b, obtemos:

$$\dot{\phi}_b = 2 \cdot 10^{-7} \left(\dot{I}_a \, Ln \frac{D_{AB}}{d_{AB}} + \dot{I}_b \, Ln \frac{2h_b}{r'_b} \right) \quad [\text{V} \cdot \text{s/m}]. \qquad (7.36b)$$

Portanto, o sistema da Fig. 7.7 poderá ser descrito pela equação:

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi}_a \\ \dot{\phi}_b \end{bmatrix} = 2 \cdot 10^{-7} \begin{bmatrix} Ln \dfrac{2h_a}{r'_a} & + Ln \dfrac{D_{AB}}{d_{AB}} \\ Ln \dfrac{D_{AB}}{d_{AB}} & + Ln \dfrac{2h_b}{r'_b} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \end{bmatrix} \quad [\text{V} \cdot \text{s/m}]. \qquad (7.37)$$

Pela definição da indutância, teremos a matriz das indutâncias:

$$[L] = 2 \cdot 10^{-7} \begin{bmatrix} Ln \dfrac{2h_a}{r'_a} & Ln \dfrac{D_{AB}}{d_{AB}} \\ Ln \dfrac{D_{AB}}{d_{AB}} & Ln \dfrac{2h_b}{r'_b} \end{bmatrix} \quad [\text{H/m}]. \qquad (7.38)$$

Observando as Eqs. (7.30) e (7.38), verificamos que em suas matrizes encontramos dois tipos de termos:

— os termos das diagonais, que dizem respeito aos próprios condutores: são suas *indutâncias próprias* ou *auto-indutâncias*;

— os termos fora da diagonal mostram a influência dos condutores vizinhos, representando, pois, as *indutâncias mútuas*.

As linhas aéreas de transmissão são construídas tendo seus condutores a alturas finitas sobre o solo, e são paralelas ao mesmo. Em condições normais de operação, em que as correntes nas linhas trifásicas são razoavelmente equilibradas, as correntes no solo são insignificantes e seu efeito sobre os valores das indutâncias ou das reatâncias indutivas pode ser desprezado. O mesmo não acontece quando da ocorrência de faltas assimétricas em sistemas aterrados, quando sua influência pode ser marcante.

Por outro lado, como veremos mais adiante, o solo nunca é ideal. Ele possui resistência, devendo-se atribuir-lhe, igualmente, indutância. Também não é homogêneo. Seus efeitos são incluídos nos cálculos, empregando-se, para tanto, os resultados dos trabalhos de Carson e outros notáveis pesquisadores [7].

Os condutores das linhas aéreas de transmissão, ao serem suspensos, tomam a forma aproximada de catenárias, de forma que sua altura sobre o solo é também variável. Para os cálculos elétricos, é usual efetuar-se uma correção para se ter em conta esse fato. Tal correção considera a superfície do solo como sendo plana e os condutores, suspensos em suas extremidades a uma mesma altura sobre o mesmo, como mostra a Fig. 7.8, sem considerar as normais irregularidades do perfil altimétrico do eixo da linha.

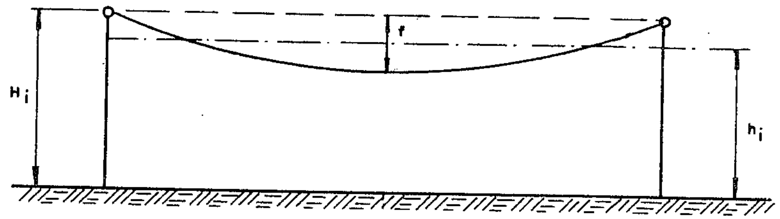


Fig. 7.8 — *Correção da altura das linhas.*

As alturas que devem ser consideradas nos cálculos são calculadas por intermédio da expressão:

$$h_i = H_i - 0{,}7 f_i \text{ [m]}, \qquad (7.39)$$

sendo:

H_i [m] — altura do condutor sobre o solo, no ponto de sua suspensão, junto à estrutura;

f_i [m] — flecha de um condutor ou cabo genérico i, estimada para um vão médio da linha e sob condições de temperatura média, no estado final.

7.4 — REATÂNCIA INDUTIVA DE UM GRUPO DE N CONDUTORES

Para um sistema composto de n condutores $A, B, C, \ldots, N$, de raios $r_a, r_b, r_c, \ldots, r_n$, paralelos entre si e ao solo ideal, podemos escrever sua equação com base nas considerações feitas no item anterior:

$$[L] = k \begin{bmatrix} Ln\,\frac{2h_a}{r'_a} & Ln\,\frac{D_{AB}}{d_{AB}} & Ln\,\frac{D_{AC}}{d_{AC}} & \ldots\ldots Ln\,\frac{D_{AN}}{d_{AN}} \\ Ln\,\frac{D_{AB}}{d_{AB}} & Ln\,\frac{2h_b}{r'_b} & Ln\,\frac{D_{BC}}{d_{BC}} & \ldots\ldots Ln\,\frac{D_{BN}}{d_{BN}} \\ Ln\,\frac{D_{AC}}{d_{AC}} & Ln\,\frac{D_{BC}}{d_{BC}} & Ln\,\frac{2h_c}{r'_c} & \ldots\ldots Ln\,\frac{D_{CN}}{d_{CN}} \\ Ln\,\frac{D_{AN}}{d_{AN}} & Ln\,\frac{D_{BN}}{d_{BN}} & Ln\,\frac{D_{CN}}{d_{CN}} & \ldots\ldots Ln\,\frac{2h_n}{r'_n} \end{bmatrix} \text{[H/m]}. \qquad (7.40a)$$

Nos cálculos em que o efeito da presença do solo puder ser desprezado, a equação acima tomará a seguinte forma:

$$[L] = k \begin{bmatrix} Ln\,\frac{1}{r'_a} & Ln\,\frac{1}{d_{AB}} & Ln\,\frac{1}{d_{AC}} & \ldots\ldots Ln\,\frac{1}{d_{AN}} \\ Ln\,\frac{1}{d_{AB}} & Ln\,\frac{1}{r'_b} & Ln\,\frac{1}{d_{BC}} & \ldots\ldots Ln\,\frac{1}{d_{BN}} \\ Ln\,\frac{1}{d_{AC}} & Ln\,\frac{1}{d_{BC}} & Ln\,\frac{1}{r'_c} & \ldots\ldots Ln\,\frac{1}{d_{CN}} \\ Ln\,\frac{1}{d_{AN}} & Ln\,\frac{1}{d_{BN}} & Ln\,\frac{1}{d_{CN}} & \ldots\ldots Ln\,\frac{1}{r'_n} \end{bmatrix} \text{[H/m]}. \qquad (7.40b)$$

As matrizes acima são válidas para o cálculo das reatâncias indutivas, exceto pela constante k, cujo valor muda para:

$$k' = 12{,}5664 \cdot f \cdot 10^{-7}.$$

Nos cálculos dos parâmetros das linhas de transmissão, a unidade de comprimento preferida é o quilômetro.

A fim de obtermos a reatância indutiva em [ohm/km], a constante deverá ser:

$$k' = 12{,}5664 \cdot f \cdot 10^{-4}.$$

A equação das reatâncias indutivas será então:

$$[x_L] = k'[F] \text{ [ohm/km]}. \qquad (7.41)$$

Examinando a matriz $[F]$ das Eqs. (7.40), vemos que são simétricas em torno da diagonal e sua lei de formação é facilmente estabelecida. Ela constitui a matriz básica para os nossos desenvolvimentos analíticos, através dos quais procuraremos estabelecer os métodos de cálculo das

indutâncias e reatâncias indutivas das linhas. Uma notação mais simples, a esta altura, é conveniente. Esta servirá para introduzir os *coeficientes de campo* empregados por alguns autores.

Sejam:

$$f_{ii} = k\,Ln\,\frac{2h_i}{r'_i} \quad \text{[H/km]} \qquad (7.42)$$

os termos da diagonal, que recebem o nome de *coeficientes de campo próprios* e

$$f_{ij} = k\,Ln\,\frac{D_{ij}}{d_{ij}} \quad \text{[H/km]} \qquad (7.43)$$

os termos genéricos fora da diagonal, que recebem o nome de *coeficientes de campo mútuos*.

A matriz da Eq. (7.40) se torna, então:

$$[F] = \begin{bmatrix} f_{aa} & f_{ab} & f_{ac} & \ldots\ldots & f_{an} \\ f_{ab} & f_{bb} & f_{bc} & \ldots\ldots & f_{bn} \\ f_{ac} & f_{bc} & f_{cc} & \ldots\ldots & f_{cn} \\ \cdot & & & & \\ \cdot & & & & \\ f_{an} & f_{bn} & f_{cn} & \ldots\ldots & f_{nn} \end{bmatrix} \qquad (7.44)$$

As quedas de tensão indutivas ao longo da linha podem ser calculadas pela equação:

$$[\Delta\dot{U}] = w[F]\,[\dot{I}] \quad \text{[V/km]}, \qquad (7.45)$$

na qual valem:

$[\Delta\dot{U}]$ — vetor das quedas de tensão em [V/km];

ω — $2\pi f$;

$[F]$ — matriz dos coeficientes de campo;

$[\dot{I}]$ — vetor das correntes nos condutores em [A].

7.5 — RAIO MÉDIO GEOMÉTRICO DOS CABOS CONDUTORES

Como já foi mencionado no Cap. 2, os condutores usados em linhas de transmissão são construídos por encordoamento de um número variável de fios metálicos cilíndricos maciços, obtendo-se, dessa forma, condutores das mais variadas características mecânicas e composições. A sua subdivisão em secções parciais menores e o conseqüente encordoamento constituem uma necessidade mecânica e também de natureza elétrica, como veremos no Cap. 9.

Não é difícil concluir que os coeficientes de campo próprios dos cabos devem refletir essas condições, a fim de que o fator encordoamento seja tomado em devida consideração nos cálculos elétricos. É preciso, pois, determinar um fator de correção a ser empregado nas Eqs. (7.42) e (7.43). Esse fator pode ser determinado através da Eq. (7.25), desde que se façam algumas concessões nas hipóteses de cálculo. A principal destas se refere à distribuição uniforme da corrente por todos os filamentos que compõem o cabo e que, veremos, não é absolutamente exata.

Consideremos um circuito elétrico composto de um condutor A e de seu retorno B. O condutor A, como mostra a Fig. 7.9, é composto de n fios elementares 1, 2, 3, ..., n, cada qual conduzindo uma parcela $1/n$ [A] da corrente total. O condutor B é composto de m fios elementares, $a, b, c, \ldots, m$, que conduzem em seu todo a mesma corrente $-I$ [A], ou seja, $-I/m$ [A] individualmente. O sinal negativo indica que a corrente em B tem sentido oposto àquele que tem em A. A presença do solo não será considerada neste caso.

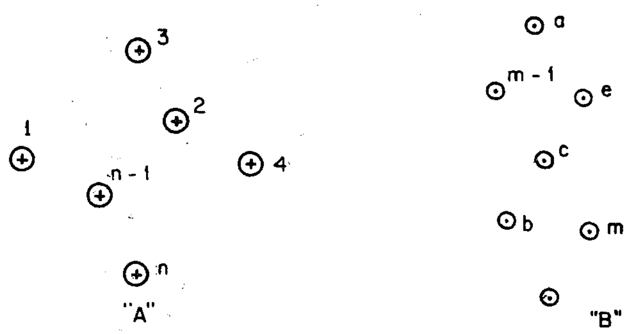


Fig. 7.9 — *Circuito consistindo em condutores compostos.*

De acordo com as Eqs. (7.36), poderemos escrever para os filamentos do condutor A, com a condição de que:

$$f_{11} = f_{22} = f_{33} = \ldots$$

e

$$f_{aa} = f_{bb} = f_{cc} = \ldots, \qquad (7.46)$$

pois são de mesmos diâmetros:

$$\begin{bmatrix} \phi_{1B} \\ \phi_{2B} \\ \phi_{3B} \\ \vdots \\ \phi_{nB} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{11}\, f_{12}\, f_{13} \ldots f_{1n} \\ f_{12}\, f_{11}\, f_{23} \ldots f_{2n} \\ f_{13}\, f_{32}\, f_{11} \ldots f_{3n} \\ f_{n1}\, f_{n2}\, f_{n3} \ldots f_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\dot{I}}{n} \\ \frac{\dot{I}}{n} \\ \frac{\dot{I}}{n} \\ \frac{\dot{I}}{n} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} f_{a1}\, f_{b1}\, f_{c1} \ldots f_{m1} \\ f_{a2}\, f_{b2}\, f_{c2} \ldots f_{m2} \\ f_{a3}\, f_{b3}\, f_{c3} \ldots f_{m3} \\ f_{an}\, f_{bn}\, f_{cn} \ldots f_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\dot{I}}{m} \\ \frac{\dot{I}}{m} \\ \frac{\dot{I}}{m} \\ \frac{\dot{I}}{m} \end{bmatrix} \qquad (7.47)$$

Pela definição de indutância:

$$[\phi] = \frac{1}{n}\, [L]\, [\dot{I}] \quad \text{e} \quad n[\phi] = [L]\, [I],$$

a Eq. (7.47) pode ser escrita da forma:

$$[\phi] = \left\{ \frac{1}{n} [F_A] - \frac{1}{m} [F_B] \right\} [I]$$

ou

$$n[\phi] = \left\{ [F_A] - \frac{n}{m} [F_B] \right\} [I] = [L]\, [I],$$

logo,

$$[F_A] - \frac{n}{m} [F_B] = [L].$$

Portanto:

$$[L] = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} & \ldots & f_{1n} \\ f_{21} & f_{11} & f_{23} & \ldots & f_{2n} \\ f_{31} & f_{32} & f_{11} & \ldots & f_{3n} \\ \cdot & & & & \\ \cdot & & & & \\ f_{n1} & f_{n2} & f_{n3} & \ldots & f_{11} \end{bmatrix} - \frac{n}{m} \begin{bmatrix} f_{a1} & f_{b1} & f_{c1} & \ldots & f_{m1} \\ f_{a2} & f_{b2} & f_{c2} & \ldots & f_{m2} \\ f_{a3} & f_{b3} & f_{c3} & \ldots & f_{m3} \\ & & & & \\ & & & & \\ f_{an} & f_{bn} & f_{cn} & \ldots & f_{mn} \end{bmatrix} \cdot \qquad (7.48)$$

Uma vez que as distâncias entre as filamentos que compõem cada um dos condutores são muito pequenas, comparadas com as distâncias entre os condutores, podemos, perfeitamente, introduzir o conceito do fluxo médio por filamento ou valor médio da indutância por filamento:

$$L_m = \frac{L_1 + L_2 + L_3 + \ldots + L_n}{n} \text{ [henry/m]} \tag{7.49}$$

e, como todos os filamentos de um condutor estão em paralelo, teremos o valor da indutância do cabo:

$$L_A = \frac{L_m}{n} = \frac{L_1 + L_2 + L_3 + \ldots + L_n}{n^2} \text{ [henry/m].} \tag{7.50}$$

Introduzindo nessa expressão os valores de L_a, L_b, L_c, ..., L_n, obtidos de 7.48, após a substituição dos coeficientes de campo e a racionalização, teremos:

$$L_A = 2 \cdot 10^{-7}\, Ln \frac{\sqrt[n \cdot m]{D_{a1}d_{b1} \ldots d_{a2}d_{b2} \ldots d_{a3}d_{b3} \ldots d_{an}d_{bn} \ldots}}{\sqrt[n^2]{(r'_A)^n d_{21}d_{31} \ldots d_{12}d_{32} \ldots d_{13}d_{23} \ldots d_{1n}d_{2n} \ldots}} \cdot \tag{7.51}$$

Na expressão (7.51), o numerador do termo logarítmico é a $n \cdot m$ raiz de um produto das $n \cdot m$ distâncias entre cada um dos filamentos de um condutor e os filamentos do outro condutor, ou seja:

$$D_m = \sqrt[n \cdot m]{d_{a1}d_{b1} \ldots d_{a2}d_{b2} \ldots d_{a3}d_{b3} \ldots d_{an}d_{bn}}, \tag{7.52}$$

que recebe o nome de *distância média geométrica* — *DMG* — entre filamentos (ou condutores).

A expressão do denominador do termo logarítmico é a n^2 raiz de um produto de n distâncias entre filamentos e n vezes r'_A:

$$D_{sA} = \sqrt[n^2]{(r'_A)^n d_{21}d_{31} \ldots d_{12}d_{32} \ldots d_{13}d_{23} \ldots d_{1n}d_{2n}}, \tag{7.53}$$

que recebe o nome de *raio médio geométrico* — *RMG* — do condutor A. Será então:

$$L_A = 2 \cdot 10^{-7}\, Ln \frac{D_m}{D_{sA}} \text{ [henry/m]} \tag{7.54a}$$

e analogamente:

$$L_B = 2 \cdot 10^{-7}\, Ln \frac{D_m}{D_{sB}} \text{ [henry/m].} \tag{7.54b}$$

Teremos igualmente:

$$\phi_A = 2 \cdot 10^{-7}\, \dot{I}_a\, Ln \frac{D_m}{D_{sA}} \text{ [V · s/m]} \tag{7.55a}$$

$$\phi_B = 2 \cdot 10^{-7}\, \dot{I}_b\, Ln \frac{D_m}{D_{sB}} \text{ [V · s/m].} \tag{7.55b}$$

Se compararmos essas expressões com (7.18), referente a um condutor cilíndrico maciço, veremos que elas só diferem entre si pelo seu termo logarítmico. Se as distâncias entre filamentos de um condutor forem pequenas em comparação à distância entre os eixos dos condutores d_{AB}, as Eqs. (7.55*a*) e (7.55*b*) poderão ser simplificadas para, admitindo uma forma genérica:

$$\phi_i = 2 \cdot 10^{-7}\, \dot{I}_i\, Ln \frac{d_{ij}}{D_{si}} \text{ [V · s/m].}$$

D_{sA} ou D_{sB}, raios médios geométricos dos condutores, podem ser interpretados como sendo raios de condutores cilíndricos fictícios, capazes de produzir fluxos externos de mesmo valor que os fluxos totais produzidos pelos condutores reais correspondentes.

Portanto, sendo conhecida a composição dos cabos condutores, é possível calcular, através de (7.53), o seu *RMG*, valor esse que sempre deve ser empregado nos cálculos das indutâncias. Não obstante, o emprego da Eq. (7.53) deveria ser limitado somente aos condutores homogêneos, como os cabos de cobre ou alumínio puros. Teremos para estes, sendo r seu raio externo:

— cabos com 7 fios: $D_s = 0{,}726\, r$;

— cabos com 19 fios: $D_s = 0{,}758\, r$;

— cabos com 37 fios: $D_s = 0{,}768\, r$;

— cabos com 61 fios: $D_s = 0{,}772\, r$;

— cabos com 91 fios: $D_s = 0{,}774\, r$;

— cabos com 127 fios: $D_s = 0{,}776\, r$.

Observa-se que o aumento do número de fios indica nítida convergência para:

$$D_s = 0{,}7788\, r,$$

que é, conforme vimos, o *RMG* de um condutor cilíndrico maciço.

De um modo geral, na prática, raramente será necessário determinar por cálculo os *RMG* dos cabos condutores. Dada a dificuldade de se considerarem, nos cálculos, todos os fatores modificativos, prefere-se lançar mão de *RMG* obtidos através de medição da indutância em um grande número de amostras de cabos de composições padronizadas. Seus valores médios são encontrados nas tabelas de características elétricas dos cabos condutores, publicadas pelos diversos fabricantes desse material, principalmente em se tratando de cabos não homogêneos (ver Ap. II).

Para o cálculo da indutância de condutores que possuem uma forma qualquer, como aqueles usados em barramentos de subestações, o conceito do *RMG* pode ser estendido (ver referências bibliográficas 1 e 2). Mencionamos, no entanto:

a — barra de secção retangular, com largura *a* [m] e espessura *b* [m]:

$$D_s = k\,(a + b), \tag{7.56}$$

sendo k uma constante que varia de 0,2231 a 0,2237, dependendo da relação entre a e b;

b — secção anular de raio interno r_i e raio externo r_e:

$$Ln\, D_s = Ln\, r_e - \frac{r_i^4}{r_e^2 - r_i^2}\, Ln \frac{r_e}{r_i} + \frac{3r_i^2 - r_e^2}{4(r_e^2 - r_i^2)}. \tag{7.57}$$

Com a introdução do conceito do *RMG*, os coeficientes de campo próprios passarão a ser escritos da seguinte forma:

$$f_{ii} = 2 \cdot 10^{-7}\, Ln \frac{1}{D_s} \quad [\text{henry/m}], \tag{7.58}$$

sendo que D_s compreende também r, no caso dos condutores cilíndricos maciços.

As expressões para o cálculo dos coeficientes de campo mais freqüentemente empregadas serão, se incluirmos o efeito do solo ideal:

$$f_{ii} = 4{,}6052 \cdot 10^{-4} \log \frac{2h_i}{D_s} \quad [\text{henry/km}] \tag{7.59}$$

$$f_{ij} = 4{,}6052 \cdot 10^{-4} \log \frac{D_{ij}}{d_{ij}} \quad [\text{henry/km}]. \tag{7.60}$$

7.6 — INDUTÂNCIAS E REATÂNCIAS INDUTIVAS DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO

Fixados esses conceitos iniciais, poderemos passar ao cálculo das indutâncias e reatâncias indutivas das linhas de transmissão. Partindo da premissa de que os sistemas comerciais de energia elétrica são normalmente trifásicos, admitimos igualmente que as tensões aplicadas aos transmissores das linhas de transmissão sejam simétricas, quando em operação normal. Em operação sob condições de faltas, as tensões aplicadas serão desequilibradas. Disso decorre a necessidade da determinação das reatâncias indutivas, de seqüências positiva e nula das linhas de transmissão.

Tendo como ponto de partida as matrizes definidas por (7.40*a*) ou (7.40*b*), é possível, através de simples transformação matricial linear, obter as reatâncias indutivas de seqüência positiva e seqüência nula. É uma forma elegante e direta, apropriada para a solução em computadores digitais, que, porém, deveremos deixar para o final deste capítulo, pois não podemos perder de vista certos conceitos físicos que serão abordados empregando-se um desenvolvimento do tipo clássico.

Dessa forma, abordaremos inicialmente o problema da determinação das reatâncias indutivas de seqüência positiva, para, em seguida, determinarmos aquelas de seqüência nula. Por ocasião dessa parte do estudo, o processo acima referido será exposto.

A presença dos cabos pára-raios que protegem as linhas contra as descargas atmosféricas tem sido normalmente desprezada nos cálculos das reatâncias de seqüência positiva, porém incluída naqueles das reatâncias de seqüência nula. Verificou-se, no entanto, que, nas linhas de altíssimas tensões, nos casos em que os cabos pára-raios fossem aterrados, sua influência não mais deveria ser desprezada inteiramente também nos cálculos das reatâncias de seqüência positiva. A teoria que desenvolveremos é perfeitamente aplicável a esses casos.

7.6.1 — Linha Trifásica Simples, sem Cabos Pára-Raios

Consideremos inicialmente uma linha trifásica, a circuito simples, sem cabos pára-raios. Sejam a, b e c os seus condutores de fase, que são percorridos pelas correntes $\dot{I}_a$, $\dot{I}_b$ e $\dot{I}_c$, de um sistema trifásico. A equação de fluxos do sistema assim formado será:

$$\begin{bmatrix} \phi_a \\ \phi_b \\ \phi_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{aa} & f_{ab} & f_{ac} \\ f_{ab} & f_{bb} & f_{bc} \\ f_{ac} & f_{bc} & f_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix} \quad [\text{V} \cdot \text{s/km}]. \tag{7.61}$$

Os coeficientes de campo, sendo funções das dimensões físicas das linhas, indicam que os valores das indutâncias e, conseqüentemente, das reatâncias indutivas de cada uma das fases poderão não ser iguais, ocasionando, portanto, um desequilíbrio nas correntes das três fases, mesmo quando as tensões a elas aplicadas estejam eqüilibradas no início da linha. Esse desequilíbrio, em geral, é bastante pequeno e, em primeira aproximação, é desprezado. Quando se desejam obter valores exatos e que considerem esses desequilíbrios, podem-se aplicar fatores corretivos, como se verifica na bibliografia indicada no fim deste capítulo [9, 10 e 11].

Por ora, consideraremos que o sistema se mantenha equilibrado. Nessas condições:

$$\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = 0.$$

Consideremos apenas o fluxo na fase a, ϕ_a; seu valor é máximo no instante em que $i_a = I_{máx}$. Nesse mesmo instante, nas fases b e c, teremos $i_b = i_c = -\dfrac{1}{2} I_{máx}$. Será então:

$$\phi_{a\text{máx}} = I_{\text{máx}} \left[f_{aa} - \frac{1}{2} (f_{ab} + f_{ac}) \right]. \quad (7.62a)$$

Aplicando o mesmo raciocínio às fases b e c, obteremos:

$$\phi_{b\text{máx}} = I_{\text{máx}} \left[f_{bb} - \frac{1}{2} (f_{ab} + f_{bc}) \right] \quad (7.62b)$$

$$\phi_{c\text{máx}} = I_{\text{máx}} \left[f_{cc} - \frac{1}{2} (f_{ac} + f_{bc}) \right]. \quad (7.62c)$$

Pela definição de indutância, teremos:

$$L_a = f_{aa} - \frac{1}{2} (f_{ab} + f_{ac}) \quad [\text{H/km}] \quad (7.63a)$$

$$L_b = f_{bb} - \frac{1}{2} (f_{ab} + f_{bc}) \quad [\text{H/km}] \quad (7.63b)$$

$$L_c = f_{cc} - \frac{1}{2} (f_{ac} + f_{bc}) \quad [\text{H/km}]. \quad (7.63c)$$

Estas são denominadas *indutâncias aparentes* das três fases da linha de transmissão. Não possuem propriamente um significado físico, porém são aquelas que são sentidas pela fonte que alimenta a linha. A Fig. 7.10 ilustra esse fato:

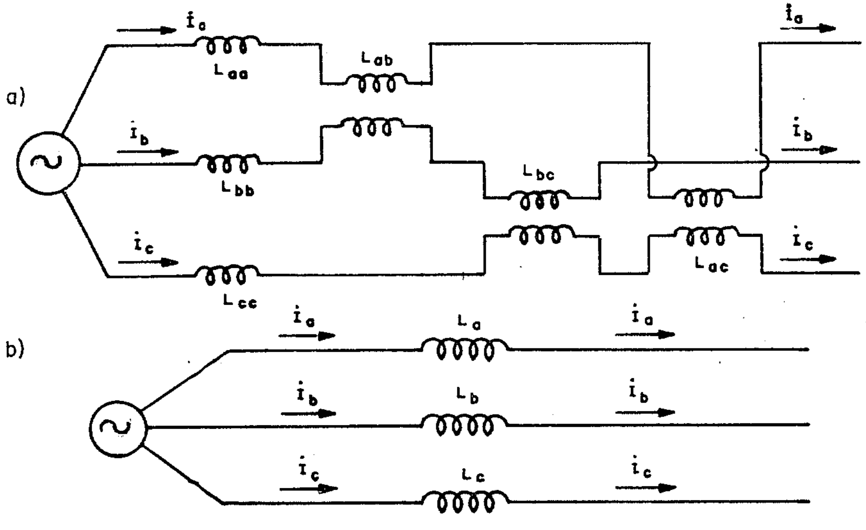


Fig. 7.10 — *Indutâncias das linhas trifásicas: a) acoplamentos indutivos em linha trifásica simples, b) indutâncias aparentes da linha.*

Consideremos um trecho de comprimento unitário de uma linha de transmissão (Fig. 7.11), a cujo início aplicamos um sistema de três tensões equilibradas. As correntes que fluirão serão $\dot{I}_a$, $\dot{I}_b$ e $\dot{I}_c$, que provocarão em cada uma das fases as quedas das fases de tensão:

$$\Delta \dot{U}_a = \dot{I}_a j w L_a \quad [\text{V}] \quad (7.64a)$$

$$\Delta \dot{U}_b = \dot{I}_b j w L_b \quad [\text{V}] \quad (7.64b)$$

$$\Delta \dot{U}_c = \dot{I}_c j w L_c \quad [\text{V}], \quad (7.64c)$$

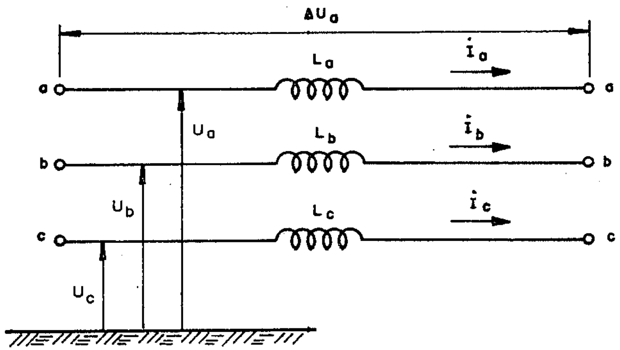


Fig. 7.11 — *Quedas de tensão nas linhas trifásicas.*

portanto o sistema somente se manterá equilibrado se ocorrer $L_a = L_b = L_c$, o que será possível se os coeficientes de campo próprios e mútuos forem iguais. Nessas condições:

$$f_{aa} = f_{bb} = f_{cc} = \overline{f}_{aa}$$

e

$$f_{ab} = f_{bc} = f_{ac} = \overline{f}_{ab},$$

para se obter:

$$L_a = L_b = L_c = \overline{f}_{aa} - \overline{f}_{ab} \quad [\text{H/km}]$$

ou

$$L_s = \overline{f}_{aa} - \overline{f}_{ab} \quad [\text{H/km}]; \quad (7.65)$$

L_s recebe o nome de *indutância de serviço* e é a *indutância de seqüência positiva*.

Para que os coeficientes de campo próprios f_{ii} sejam iguais, é preciso que:

a — os raios médios geométricos dos condutores D_s sejam iguais. Essa condição é automaticamente cumprida, pois em linhas trifásicas normais esse é sempre o caso;

b — as alturas h_i dos três condutores sejam iguais. Essa condição é facilmente cumprida, principalmente nos níveis mais altos de tensão, nos quais a construção normal é em lençol horizontal.

Quanto aos coeficientes de campo mútuos, estes só serão iguais se conseguirmos a igualdade das distâncias d_{ij} e D_{ij}. A primeira parte da condição é cumprida por meio de uma disposição em triângulo eqüilátero, como mostra a Fig. 7.12.

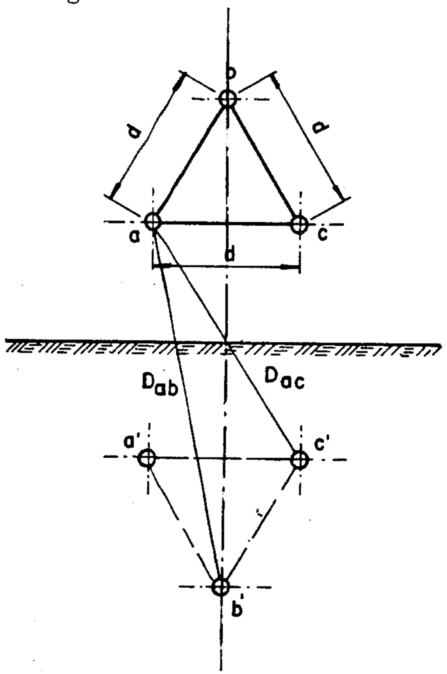


Fig. 7.12 — *Disposição triangular dos condutores.*

Essa disposição, como qualquer outra, não satisfaz a condição de igualdade dos termos D_{ij}. Portanto, considerando-se o efeito do solo, haverá sempre um certo grau de desequilíbrio. Exceto para o cálculo das impedâncias de seqüência nula, na maioria dos casos de linhas de transmissão de energia elétrica em freqüência industrial o efeito da presença do solo pode ser desprezado. Nesse caso, a disposição em triângulo eqüilátero satisfaz tanto a igualdade dos coeficientes de campo próprios como mútuos.

A disposição triangular simétrica é em geral empregada apenas em linhas de baixas e médias tensões, com circuitos simples, em virtude de problemas relacionados com o dimensionamento econômico das estruturas e problemas com a colocação de cabos pára-raios.

A indutância de seqüência positiva ou de serviço para essas linhas será:

$$L_s = \bar{\jmath}_{aa} - \bar{\jmath}_{ab}. \qquad \text{(Eq. 7.65)}$$

Introduzindo os valores de $\bar{\jmath}_{aa}$ e $\bar{\jmath}_{ab}$ das Eqs. (7.59) e (7.60), nas quais consideramos $2h_i \cong D_{ij} = 1$, obtemos:

$$L_s = 4{,}6052 \cdot 10^{-4} \left(\log \frac{1}{D_s} - \log \frac{1}{d} \right)$$

$$L_s = L_{11} = 4{,}6052 \cdot 10^{-4} \log \frac{d}{D_s} \ \text{[H/km]}. \qquad (7.66)$$

Uma simetria elétrica média entre as extremidades de uma linha de transmissão pode ser obtida através de uma rotação cíclica de seus condutores. Essa rotação consiste em dividir a linha, ou trechos da linha, em três lances de igual comprimento, transpondo-se os condutores no final de cada lance, de forma que a corrente de uma fase seja transportada ao longo de 1/3 do comprimento da linha em cada uma das posições nas estruturas, como mostra a Fig. 7.13*a* e *b*. Tal construção equilibra as linhas eletromagneticamente, considerando-se ou não a presença do solo ou de cabos pára-raios.

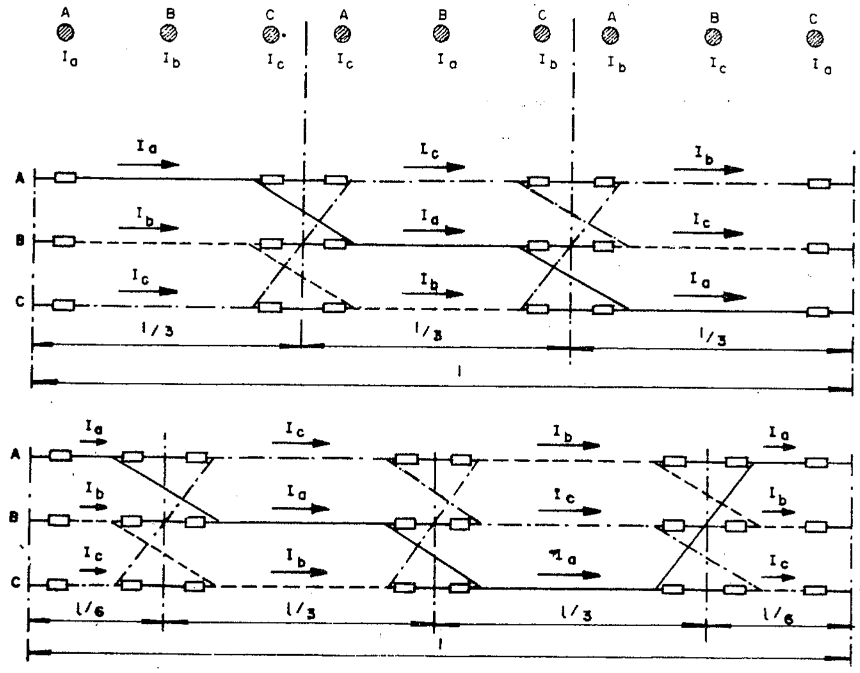


Fig. 7.13 — *Esquemas de transposição nas linhas trifásicas a circuito simples.*

Se designarmos por A, B e C as posições dos pontos de suspensão dos cabos nas estruturas, a corrente $\dot{I}_a$, por exemplo, fluirá em um condutor suspenso na posição A na distância de 1/3 do comprimento da linha, em condutor suspenso na posição B em 1/3 e, na posição C, em 1/3. O mesmo acontecerá para as demais fases.

Para cada um dos lances da linha podemos escrever uma equação, válida para um terço de seu comprimento. A queda de tensão total será:

$$[\Delta\dot{U}] = j\left\{\frac{\omega}{3}[F_1] + \frac{\omega}{3}[F_2] + \frac{\omega}{3}[F_3]\right\}[\dot{I}] \qquad (7.67a)$$

ou

$$[\Delta\dot{U}] = j\frac{\omega}{3}\{[F_1] + [F_2] + [F_3]\}[\dot{I}] \qquad (7.67b)$$

que, desenvolvida, será:

$$[\Delta\dot{U}] = j\frac{\omega}{3}\left\{\begin{bmatrix} f_{AA} & f_{AB} & f_{AC} \\ f_{BA} & f_{BB} & f_{BC} \\ f_{CA} & f_{CB} & f_{CC}\end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f_{CC} & f_{CA} & f_{CB} \\ f_{AC} & f_{AA} & f_{AB} \\ f_{BA} & f_{BC} & f_{BB}\end{bmatrix}\begin{bmatrix} f_{BB} & f_{BC} & f_{BA} \\ f_{CB} & f_{CC} & f_{CA} \\ f_{AB} & f_{AC} & f_{AA}\end{bmatrix}\right\}\begin{bmatrix}\dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c\end{bmatrix}.$$

Efetuando a operação indicada, e lembrando que:

$$f_{AB} = f_{BA}; \quad f_{AC} = f_{CA} \quad \text{e} \quad f_{BC} = f_{CB},$$

temos, ordenando:

$$[\Delta\dot{U}] = j\frac{\omega}{3}\begin{bmatrix}(f_{AA}+f_{BB}+f_{CC}) & (f_{AB}+f_{AC}+f_{BC}) & (f_{AB}+f_{AC}+f_{BC}) \\ (f_{AB}+f_{AC}+f_{BC}) & (f_{AA}+f_{BB}+f_{CC}) & (f_{AB}+f_{AC}+f_{BC}) \\ (f_{AB}+f_{AC}+f_{BC}) & (f_{AB}+f_{AC}+f_{BC}) & (f_{AA}+f_{BB}+f_{CC})\end{bmatrix}\times$$

$$\times\begin{bmatrix}\dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c\end{bmatrix} \qquad (7.68)$$

Na matriz da Eq. (7.68) todos os termos da diagonal são iguais, como também os termos fora da diagonal. Isso nos permite definir coeficientes de campo médios:

$$\overline{f}_{aa} = \frac{1}{3}(f_{AA}+f_{BB}+f_{CC}) = \frac{k}{3}\left[Ln\frac{2h_a}{D_s} + Ln\frac{2h_b}{D_s} + Ln\frac{2h_c}{D_s}\right] \qquad (7.69)$$

$$\overline{f}_{aa} = 2\cdot 10^{-4}\,Ln\frac{2h_m}{D_s}$$

$$\overline{f}_{ab} = 2\cdot 10^{-4}\,Ln\frac{D_{mi}}{D_m} \qquad (7.70)$$

em que valem:

$D_m = \sqrt[3]{d_{ab}d_{bc}d_{ac}}$ — distância média geométrica entre condutores; (7.71a)

$D_{mi} = \sqrt[3]{D_{ab}D_{bc}D_{ac}}$ — distância média geométrica entre condutores e as imagens de seus vizinhos; (7.71b)

$h_m = \sqrt[3]{h_a h_b h_c}$ — altura média geométrica entre condutores. (7.71c)

A matriz das indutâncias da linha transposta será:

$$[F] = \begin{bmatrix}\overline{f}_{aa} & \overline{f}_{ab} & \overline{f}_{ab} \\ \overline{f}_{ab} & \overline{f}_{aa} & \overline{f}_{ab} \\ \overline{f}_{ab} & \overline{f}_{ab} & \overline{f}_{aa}\end{bmatrix} \qquad (7.72)$$

e a reatância indutiva de seqüência positiva, ou de serviço, de acordo com a Eq. (7.65), será:

$$x_{L_s} = \omega(\overline{f}_{aa} - \overline{f}_{ab})$$

$$x_{L_s} = 2\cdot 10^{-4}\,\omega\left(Ln\frac{2h_m}{D_s} - Ln\frac{D_{mi}}{D_m}\right)$$

ou

$$x_{L_s} = 2\cdot 10^{-4}\,\omega\left(Ln\frac{D_m}{D_s} + Ln\frac{2h_m}{D_{mi}}\right). \qquad (7.73a)$$

Nas construções normais das linhas, o valor da relação $\frac{2h_m}{D_{mi}}$ é bastante próximo da unidade, enquanto que $\frac{D_m}{D_s}$ tem, normalmente, valores superiores a uma centena, o que nos permite desprezar, sem incorrer em erro maior, o segundo termo do segundo membro da Eq. (7.73a).

Assim, podemos determinar a reatância de seqüência positiva simplesmente através da equação:

$$x_{L_s} = 12{,}566371\cdot 10^{-4} f\,Ln\frac{D_m}{D_s} \quad [\text{ohm/km}] \qquad (7.73b)$$

ou

$$x_{L_s} = 28{,}935325\cdot 10^{-4} f\log\frac{D_m}{D_s} \quad [\text{ohm/km}]. \qquad (7.73c)$$

Portanto, a indutância de seqüência positiva ou de serviço nada mais é do que o valor médio das indutâncias aparentes de cada uma das fases de uma linha trifásica não transposta. Porém, somente para as linhas transpostas possui real significado físico, pois nestas poderá representar qualquer uma das três fases. É a indutância de seqüência positiva ou de serviço que é empregada normalmente nos cálculos elétricos de desempenho.

Até pouco tempo atrás, considerava-se boa a norma de construção de linhas aéreas de transmissão com secções de transposição de comprimento máximo de 40 [km], fazendo-se quantas secções completas em uma linha quantas fossem necessárias para que esse limite não fosse ultrapassado. Mais recentemente, dado o custo adicional das estruturas de transposição, que são sempre especiais, como também por se ter verificado que estas, por alguma razão não muito bem explicada, também estavam mais sujeitas a danos por descargas elétricas atmosféricas ou surtos internos de sobretensão, seu número foi grandemente reduzido. Há mesmo uma tendência, nas linhas curtas, a abandonar o seu emprego. O desequilíbrio provocado pela não adoção das transposições é relativamente pequeno, provocando, no entanto, um deslocamento do ponto neutro. Esse deslocamento deverá ser mantido em limites estreitos, a fim de que as correntes de seqüência nula dele decorrentes não façam atuar os sistemas de proteção.

A Fig. 7.13 mostra dois esquemas de transposições normalmente empregados. No esquema da Fig. 7.13*a* são empregadas apenas duas estruturas especiais e, no esquema da Fig. 7.13*b*, três estruturas especiais. São eletricamente equivalentes, porém no segundo esquema, no final da linha, existe a mesma seqüência de fases que havia no seu início.

7.6.2 — Linha Trifásica Simples, com Cabos Pára-Raios

Sejam A, B e C os cabos condutores e R um cabo pára-raio, como mostra a Fig. 7.14. A equação das quedas de tensão para esta linha poderá ser escrita, para coeficientes de campo definidos como em (7.59) e (7.60):

$$\begin{bmatrix} \Delta\dot{U}_a \\ \Delta\dot{U}_b \\ \Delta\dot{U}_c \\ \hdashline \Delta\dot{U}_r \end{bmatrix} = j\omega \left[\begin{array}{ccc:c} f_{aa} & f_{ab} & f_{ac} & f_{ar} \\ f_{ba} & f_{bb} & f_{bc} & f_{br} \\ f_{ca} & f_{cb} & f_{cc} & f_{cr} \\ \hdashline f_{ra} & f_{rb} & f_{rc} & f_{rr} \end{array}\right] \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \\ \hdashline \dot{I}_r \end{bmatrix} \quad [\text{V/km}]. \qquad (7.74a)$$

Os cabos pára-raios podem ser multiaterrados, isto é, aterrados em todas as estruturas, ou podem ser isolados. Neste último caso, sem perderem sua eficiência na proteção das linhas, servem para circuitos de telecomunicações. Os isoladores empregados são de baixa tensão disruptiva, permitindo abertura de arcos nos pontos de aterramento, quando atingidos por descargas atmosféricas. Uma vez aberto o arco, comportam-se como cabos aterrados, cumprindo sua finalidade.

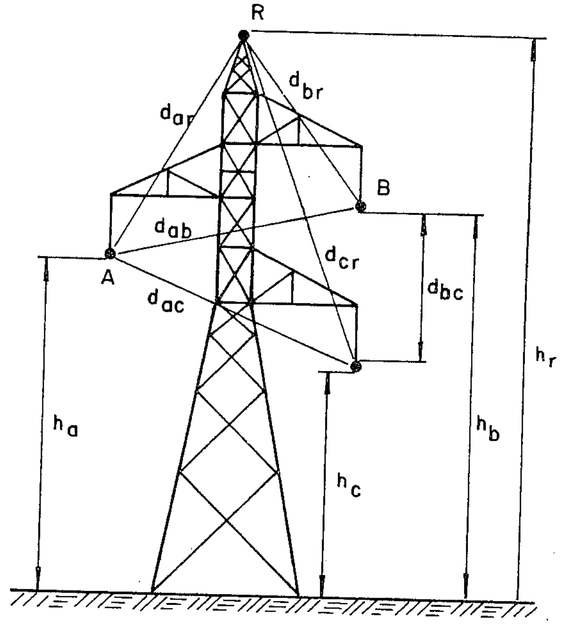


Fig. 7.14 — *Linha com um cabo pára-raios.*

No caso dos cabos isolados, não há correntes induzidas no cabo pára-raios, portanto, $I_r = 0$.

Os valores das reatâncias indutivas e das indutâncias não são, absolutamente, afetados pela existência desses cabos. Estes, entre suas extremidades, ficam submetidos a uma diferença potencial calculável pela equação:

$$\Delta U_r = j\omega\,[f_{ra}\; f_{rb}\; f_{rc}\; f_{rr}] \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \\ 0 \end{bmatrix} \quad [\text{V/km}]. \qquad (7.74b)$$

Para um sistema equilibrado,

$$\dot{I}_b = a^2\dot{I}_a$$

e

$$\dot{I}_c = a,$$

logo,

$$\Delta U_r = j\omega \, [f_{ra} \; f_{rb} \; f_{rc}] \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ a^2 \dot{I}_a \\ a\dot{I}_a \end{bmatrix} \text{[V/km]}. \qquad (7.75)$$

Para as linhas com pára-raios aterrados, a Eq. (7.74) nos dá meios para determinar o valor da corrente $\dot{I}_r$, que circula ao longo da linha, entra no solo através de estruturas, voltando ao cabo por outra estrutura, como mostra a Fig. 7.15.

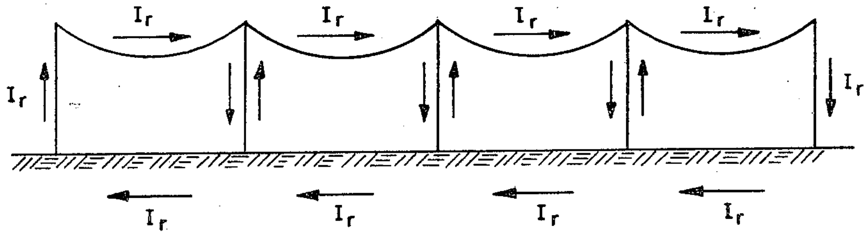


Fig. 7.15 — *Circulação de correntes em pára-raios multiaterrados.*

Essas correntes produzem perdas de energia nos cabos, estruturas e solo, que nem sempre são destituídas de significado econômico. Além da resistência e da indutância dos cabos pára-raios, a resistência e a indutância do solo também influenciam o seu valor. Estas últimas serão introduzidas mais adiante (ver Item 7.10).

A Eq. (7.74) pode ser escrita de forma generalizada, como matriz particionada. Neste caso, será válida para linhas trifásicas com qualquer número de condutores e cabos pára-raios:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{U}_f \\ \hline \Delta \dot{U}_R \end{bmatrix} = j\omega \left[\begin{array}{c|c} F_{FF} & F_{FR} \\ \hline F_{RF} & F_{RR} \end{array}\right] \begin{bmatrix} \dot{I}_F \\ \dot{I}_R \end{bmatrix} \text{[V/km]}. \qquad (7.76)$$

Desenvolvendo a equação, teremos:

$$[\Delta \dot{U}_F] = j\omega \, ([F_{FF}]\,[I_F] + [F_{FR}]\,[\dot{I}_R]) \qquad (7.77)$$

$$0 = j\omega \, ([F_{RF}]\,[\dot{I}_F] + [F_{RR}]\,[\dot{I}_R]); \qquad (7.78)$$

da Eq. (7.78) podemos obter o valor de $[\dot{I}_R]$ para introduzi-lo em (7.77):

$$[\dot{I}_R] = -j\,[F_{RR}]^{-1}\,[F_{RF}]\,[\dot{I}_F] \qquad (7.79)$$

e

$$[\Delta \dot{U}_F] = j\omega \, ([F_{FF}] - [F_{FR}]\,[F_{RR}]^{-1}\,[F_{RF}])\,[\dot{I}_F] \text{ [V/km]}. \qquad (7.80)$$

Comparando essa equação com a da linha sem cabos pára-raios, vemos que ela difere daquela por um termo de correção:

$$-\,[F_{FR}]\,[F_{RR}]^{-1}\,[F_{RF}], \qquad (7.81)$$

somando a ela algebricamente.

No caso de uma linha com um cabo pára-raios, teremos os seguintes fatores de correção:

$$[\Delta x_L] = j\omega \, [f_{ar} \; f_{br} \; f_{cr}] \left[\frac{1}{f_{rr}}\right] \begin{bmatrix} f_{ar} \\ f_{br} \\ f_{cr} \end{bmatrix}$$

ou

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{U}_{ca} \\ \Delta \dot{U}_{cb} \\ \Delta \dot{U}_{cc} \end{bmatrix} = j\omega \begin{bmatrix} \dfrac{f_{ar}^2}{f_{rr}} & \dfrac{f_{ar} f_{br}}{f_{rr}} & \dfrac{f_{ar} f_{cr}}{f_{rr}} \\ \dfrac{f_{ar} f_{br}}{f_{rr}} & \dfrac{f_{br}^2}{f_{rr}} & \dfrac{f_{br} f_{cr}}{f_{rr}} \\ \dfrac{f_{ar} f_{cr}}{f_{rr}} & \dfrac{f_{br} f_{cr}}{f_{rr}} & \dfrac{f_{cr}^2}{f_{rr}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix} \text{[V/km]}. \qquad (7.82)$$

Na linha transposta, os fatores de correção são todos iguais a:

$$\Delta x_L = \omega \left(\frac{\bar{f}_{ar}^2}{f_{rr}} \right)$$

pois

$$f_{ar} = f_{br} = f_{cr} = f_{ar} = k \, Ln \, \frac{\sqrt[3]{D_{ar} D_{br} D_{cr}}}{\sqrt[3]{d_{ar} d_{br} d_{cr}}};$$

logo,

$$\Delta x_L = \omega \left[\frac{k \left(Ln \, \dfrac{\sqrt[3]{D_{ar} D_{br} D_{cr}}}{\sqrt[3]{d_{ar} d_{br} d_{cr}}} \right)^2}{Ln \, \dfrac{2h_r}{D_{sr}}} \right]. \qquad (7.83a)$$

A equação da linha trifásica sem cabos pára-raios equivalente será:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{U}_a \\ \Delta \dot{U}_b \\ \Delta \dot{U}_c \end{bmatrix} = j\omega \begin{bmatrix} \left(\bar{f}_{aa} - \dfrac{\bar{f}_{ar}^2}{f_{rr}}\right) & \left(\bar{f}_{ab} - \dfrac{\bar{f}_{ar}^2}{f_{rr}}\right) & \left(\bar{f}_{ab} - \dfrac{\bar{f}_{ar}^2}{f_{rr}}\right) \\ \left(\bar{f}_{ab} - \dfrac{\bar{f}_{ar}^2}{f_{rr}}\right) & \left(\bar{f}_{aa} - \dfrac{\bar{f}_{ar}^2}{f_{rr}}\right) & \left(\bar{f}_{ab} - \dfrac{\bar{f}_{ar}^2}{f_{rr}}\right) \\ \left(\bar{f}_{ab} - \dfrac{\bar{f}_{ar}^2}{f_{rr}}\right) & \left(\bar{f}_{ab} - \dfrac{\bar{f}_{ar}^2}{f_{rr}}\right) & \left(\bar{f}_{aa} - \dfrac{\bar{f}_{ar}^2}{f_{rr}}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix} \text{[V]}. \qquad (7.83b)$$

Empregando a Eq. (7.65) para definir a reatância indutiva de seqüência positiva, teremos:

$$x_{L_s} = \omega\,(\overline{f}_{aa} - f_{ab}) = \omega \left[\left(\overline{f}_{aa} - \frac{\overline{f}^{\,2}_{ar}}{f_{rr}} \right) - \left(\overline{f}_{ab} - \frac{\overline{f}^{\,2}_{ar}}{f_{rr}} \right) \right]$$

ou

$$x_{L_s} = \overline{f}_{aa} - \overline{f}_{ab}$$

ou

$$x_{L_s} = 12{,}566371 \cdot 10^{-4} f \, Ln \, \frac{D_m}{D_s} \quad \text{[ohm/km]} \qquad \text{(Eq. 7.73}b\text{)}$$

$$x_{L_s} = 28{,}935325 \cdot 10^{-4} f \log \frac{D_m}{D_s} \quad \text{[ohm/km]}, \qquad \text{(Eq. 7.73}c\text{)}$$

o que mostra que *a presença de cabos pára-raios não exerce influência sobre o valor da reatância indutiva de seqüência positiva das linhas de transmissão trifásicas transpostas*.

7.6.3 — Linhas Trifásicas a Circuito Duplo

Consideremos uma linha trifásica a circuito duplo, ou seja, uma linha em que dois circuitos que operam em paralelo sejam suportadas em uma mesma estrutura, como na Fig. 7.16. Consideremos igualmente duas linhas trifásicas a circuito simples, cujos eixos sejam paralelos, e sitos a uma distância finita um do outro, como mostra a Fig. 7.17, e determinemos os valores das indutâncias de seus condutores.

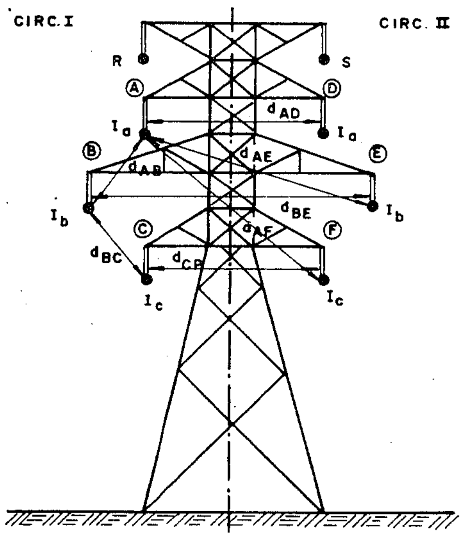


Fig. 7.16 — *Linha trifásica a circuito duplo.*

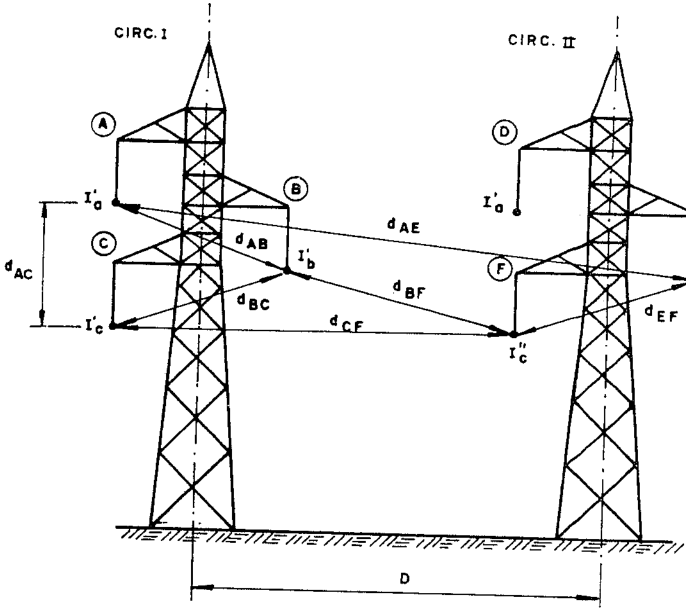


Fig. 7.17 — *Duas linhas trifásicas simples em paralelo.*

7.6.3.1 — Linhas Idênticas

Admitamos, inicialmente, que ambos os circuitos em paralelo sejam idênticos, de forma que cada um transporte a metade da potência total, isto é, cada um dos condutores transporta a metade da corrente de cada fase. Sejam A, B, C, D, E e F os condutores de fases e R e S os cabos pára-raios, como mostra a Fig. 7.16. Sejam $\dot{I}_a$, $\dot{I}_b$, $\dot{I}_c$, $\dot{I}_d$, $\dot{I}_e$ e $\dot{I}_f$ as correntes de fase nos condutores. A equação dos fluxos em função das correntes poderá ser escrita na forma da Eq. (7.38) e será da ordem 8 × 8, uma vez que deverá indicar o enlaçamento de todos os fluxos do sistema:

$$\begin{bmatrix} \phi_a \\ \phi_b \\ \phi_c \\ \hdashline \phi_r \\ \phi_s \\ \hdashline \phi_d \\ \phi_e \\ \phi_f \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{ccc:cc:ccc} f_{aa} & f_{ab} & f_{ac} & f_{ar} & f_{as} & f_{ad} & f_{ae} & f_{af} \\ f_{ba} & f_{bb} & f_{bc} & f_{br} & f_{bs} & f_{bd} & f_{be} & f_{bf} \\ f_{ca} & f_{cb} & f_{cc} & f_{cr} & f_{cs} & f_{cd} & f_{ce} & f_{cf} \\ \hdashline f_{ra} & f_{rb} & f_{rc} & f_{rr} & f_{rs} & f_{rd} & f_{re} & f_{rf} \\ f_{sa} & f_{sb} & f_{sc} & f_{sr} & f_{ss} & f_{sd} & f_{sc} & f_{sf} \\ \hdashline f_{da} & f_{db} & f_{dc} & f_{dr} & f_{ds} & f_{dd} & f_{de} & f_{df} \\ f_{ea} & f_{eb} & f_{ec} & f_{er} & f_{es} & f_{ed} & f_{ee} & f_{ef} \\ f_{fa} & f_{fb} & f_{fc} & f_{fr} & f_{fs} & f_{fd} & f_{fe} & f_{ad} \end{array}\right] \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \\ \hdashline \dot{I}_r \\ \dot{I}_s \\ \hdashline \dot{I}_d \\ \dot{I}_e \\ \dot{I}_f \end{bmatrix} \qquad (7.84a)$$

Essa equação pode ser particionada e escrita simbolicamente da seguinte forma:

$$\left[\begin{array}{c} \phi_{\mathrm{I}} \\ \hdashline \phi_{PR} \\ \hdashline \phi_{\mathrm{II}} \end{array}\right] = \left[\begin{array}{c:c:c} F_{\mathrm{I}} & F_{PR\cdot\mathrm{I}} & F_{\mathrm{II}\cdot\mathrm{I}} \\ \hdashline F_{\mathrm{I}\cdot PR} & F_{PR} & F_{\mathrm{II}\cdot PR} \\ \hdashline F_{\mathrm{I}\cdot\mathrm{II}} & F_{PR\cdot\mathrm{II}} & F_{\mathrm{II}} \end{array}\right] \left[\begin{array}{c} \dot{I}_{\mathrm{I}} \\ \hdashline \dot{I}_{PR} \\ \hdashline \dot{I}_{\mathrm{II}} \end{array}\right] \qquad (7.84b)$$

Dela podemos obter duas equações, uma para cada circuito:

a — Circuito I:

$$\left[\begin{array}{c} \phi_{\mathrm{I}} \\ \hdashline \phi_{PR} \end{array}\right] = \left[\begin{array}{c:c:c} F_{\mathrm{I}} & F_{PR\cdot\mathrm{I}} & F_{\mathrm{II}\cdot\mathrm{I}} \\ \hdashline F_{\mathrm{I}\cdot PR} & F_{PR} & F_{\mathrm{II}\cdot PR} \end{array}\right] \left[\begin{array}{c} \dot{I}_{\mathrm{I}} \\ \hdashline \dot{I}_{PR} \\ \hdashline \dot{I}_{\mathrm{II}} \end{array}\right] \qquad (7.84c)$$

b — Circuito II:

$$\left[\begin{array}{c} \phi_{PR} \\ \hdashline \phi_{\mathrm{II}} \end{array}\right] = \left[\begin{array}{c:c:c} F_{\mathrm{I}\cdot PR} & F_{PR} & F_{\mathrm{II}\cdot PR} \\ \hdashline F_{\mathrm{I}\cdot\mathrm{II}} & F_{PR\cdot\mathrm{II}} & F_{\mathrm{II}} \end{array}\right] \left[\begin{array}{c} \dot{I}_{\mathrm{I}} \\ \dot{I}_{PR} \\ \dot{I}_{\mathrm{II}} \end{array}\right] \qquad (7.84d)$$

Temos que:

$\left[\begin{array}{c:c} F_{\mathrm{I}} & F_{PR\cdot\mathrm{I}} \\ \hdashline F_{\mathrm{I}\cdot PR} & F_{PR} \end{array}\right]$ — representa a matriz dos coeficientes de campo do circuito I, incluindo o efeito dos pára-raios;

$\left[\begin{array}{c} F_{\mathrm{II}\cdot\mathrm{I}} \\ F_{\mathrm{II}\cdot PR} \end{array}\right]$ — representa o efeito que as correntes do circuito II exercem sobre o circuito I e vice-versa, dada a duplicidade das influências mútuas.

Admitindo circuitos idênticos, temos $\dot{I}_a = \dot{I}_d$, $\dot{I}_b = \dot{I}_e$ e $\dot{I}_c = \dot{I}_f$. Logo, $[\dot{I}_{\mathrm{I}}] = [\dot{I}_{\mathrm{II}}] = [\dot{I}]$. Decorre daí que:

$$[\phi_{\mathrm{I}}] = [F_{\mathrm{I}}]\,[I] + [F_{PR\cdot\mathrm{I}}]\,[\dot{I}_{PR}] + [F_{\mathrm{II}\cdot\mathrm{I}}]\,[\dot{I}]$$

$$[\phi_{PR}] = [F_{\mathrm{I}\cdot PR}]\,[\dot{I}] + [F_{PR}]\,[\dot{I}_{PR}] + [F_{\mathrm{II}\cdot PR}]\,[\dot{I}]$$

ou

$$[\phi_{\mathrm{I}}] = [F_{\mathrm{I}} + F_{\mathrm{II}\cdot\mathrm{I}}]\,[\dot{I}] + [F_{PR\cdot\mathrm{I}}]\,[\dot{I}_{PR}]$$

$$[\phi_{PR}] = [F_{\mathrm{I}\cdot PR} + F_{\mathrm{II}\cdot PR}]\,[\dot{I}] + [F_{PR}]\,[\dot{I}_{PR}]$$

ou ainda

$$\left[\begin{array}{c} \phi_{\mathrm{I}} \\ \hdashline \phi_{PR} \end{array}\right] = \left[\begin{array}{c:c} (F_{\mathrm{I}} + F_{\mathrm{II}\cdot\mathrm{I}}) & F_{PR\cdot\mathrm{I}} \\ \hdashline (F_{\mathrm{I}\cdot PR} + F_{\mathrm{II}\cdot PR}) & F_{PR} \end{array}\right] \left[\begin{array}{c} I \\ \hdashline I_{PR} \end{array}\right]$$

Para o circuito II, uma equação idêntica poderá ser obtida.

Substituindo os coeficientes de campo nas matrizes parciais, obtemos a equação de um circuito de uma linha a circuito duplo.

$$\left[\begin{array}{c} \phi_A \\ \phi_B \\ \phi_C \\ \hdashline \phi_R \\ \phi_S \end{array}\right] = \left[\begin{array}{ccc:cc} (f_{aa} + f_{ad}) & (f_{ab} + f_{ae}) & (f_{ac} + f_{af}) & f_{ar} & f_{as} \\ (f_{ab} + f_{bd}) & (f_{bb} + f_{be}) & (f_{bc} + f_{bf}) & f_{br} & f_{ts} \\ (f_{ac} + f_{cd}) & (f_{tc} + f_{ce}) & (f_{cc} + f_{cf}) & f_{cr} & f_{cs} \\ \hdashline (f_{ar} + f_{rd}) & (f_{br} + f_{re}) & (f_{cr} + f_{rf}) & f_{rr} & f_{rs} \\ (f_{as} + f_{sd}) & (f_{bs} + f_{se}) & (f_{cs} + f_{sf}) & f_{rs} & f_{ss} \end{array}\right] \left[\begin{array}{c} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \\ \hdashline \dot{I}_r \\ \dot{I}_s \end{array}\right] \qquad (7.85a)$$

Essa equação pode ser reduzida a uma equação de matriz 3×3, empregando-se a mesma técnica exposta no Item 7.5.2, ficando os efeitos dos cabos pára-raios incorporados aos coeficientes de campo da nova matriz.

Também neste caso, para efeito de determinação das indutâncias e reatâncias indutivas de seqüência positiva, na maioria das linhas o efeito do solo e dos cabos pára-raios é mínimo, podendo, a priori, ser desprezado. A equação dos fluxos se torna, então:

$$\begin{bmatrix} \phi_a \\ \phi_b \\ \phi_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (f_{aa} + f_{ad}) & (f_{ab} + f_{ae}) & (f_{ac} + f_{af}) \\ (f_{ab} + f_{ba}) & (f_{bb} + f_{be}) & (f_{bc} + f_{bf}) \\ (f_{ac} + f_{cd}) & (f_{bc} + f_{ce}) & (f_{cc} + f_{cf}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix} \;[\mathrm{V \cdot s/m}]. \qquad (7.85b)$$

As indutâncias aparentes serão:

$$L_a = (f_{aa} + f_{ad}) - \frac{1}{2}\,[(f_{ab} + f_{ae}) + (f_{ac} + f_{af})]\;[\mathrm{H/km}] \qquad (7.86a)$$

$$L_b = (f_{bb} + f_{be}) - \frac{1}{2}\,[(f_{ab} + f_{bd}) + (f_{bc} + f_{bf})]\;[\mathrm{H/km}] \qquad (7.86b)$$

$$L_c = (f_{cc} + f_{cf}) - \frac{1}{2}\,[(f_{ac} + f_{cd}) + (f_{bc} + f_{ce})]\;[\mathrm{H/km}]. \qquad (7.86c)$$

Para o circuito II, obteremos, seguindo desenvolvimento idêntico:

$$L_d = (f_{dd} + f_{ad}) - \frac{1}{2}\,[(f_{de} + f_{be}) + (f_{bd} + f_{cd})]\;[\mathrm{H/km}] \qquad (7.87a)$$

$$L_e = (f_{ee} + f_{be}) - \frac{1}{2}\,[(f_{de} + f_{ae}) + (f_{be} + f_{ce})]\;[\mathrm{H/km}] \qquad (7.87b)$$

$$L_f = (f_{ff} + f_{cf}) - \frac{1}{2}\left[(f_{df} + f_{af}) + (f_{ef} + f_{bf})\right] \text{ [H/km]}. \qquad (7.87c)$$

Quando ambos os circuitos são iguais, pode-se demonstrar, e sugerimos que o leitor o faça, que $L_a = L_d$; $L_b = L_e$ e $L_c = L_f$.

As indutâncias aparentes das três fases não são iguais entre si. A simetria elétrica pode ser obtida por dois processos.

a — Disposição simétrica dos condutores — Os condutores nas linhas a circuito duplo podem ser dispostos segundo os vértices de um hexágono, como mostra a Fig. 7.18, quando desprezamos os efeitos dos pára-raios e do solo. Nessas condições, demonstra-se facilmente que:

$$L_A = L_B = L_C = L_D = L_E = L_F = k \, Ln \, \frac{\sqrt{3}\, d}{2D_s} \text{ [henry/km]}. \qquad (7.88)$$

A disposição hexagonal é pouco utilizada em virtude do maior peso requerido para as estruturas, apesar de dispensar as transposições. É fora de cogitação quando se trata de duas linhas trifásicas simples em paralelo.

b — Emprego de transposição — Empregando-se transposições, conseguem-se equilibrar eletricamente também as linhas de transmissão a circuito duplo.

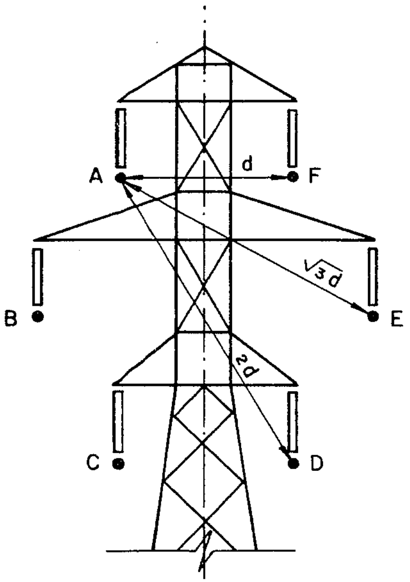


Fig. 7.18 — *Disposição hexagonal.*

Na Fig. 7.19*a* está indicado um esquema de transposição comumente empregado em linhas a circuito duplo, ou linhas em paralelo. Pode ser realizado com duas ou três estruturas especiais, dependendo da necessidade ou não de manter as seqüências de fase nas estruturas terminais.

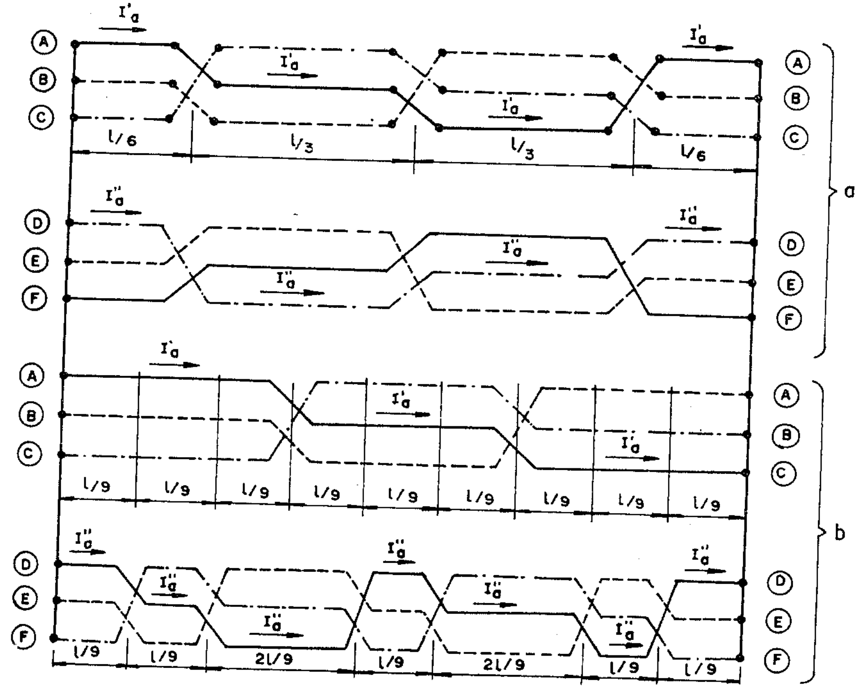


Fig. 7.19 — *Esquemas de transposição de linhas trifásicas a circuito duplo.*

Na Fig. 7.19*b* está indicado um esquema de transposição que emprega 9 estruturas especiais, por secção. Sua particularidade reside no fato de que, nas indutânias de serviço, desaparece a influência mútua dos dois circuitos. Seu custo é, no entanto, proibitivo.

As indutâncias de seqüência positiva, ou de serviço, constituem as indutâncias das linhas transpostas e, como vimos, podem ser calculados pelo valor médio das indutâncias aparentes. Teremos:

$$L_s = \frac{L_A + L_B + L_C}{3} = \frac{(f_{aa} + f_{bb} + f_{cc}) + (f_{ad} + f_{be} + f_{cf})}{3} -$$

$$- \left[\frac{(f_{ab} + f_{ac} + f_{bc})}{3} + \frac{(f_{ae} + f_{af} + f_{bd} + f_{bf} + f_{ca} + f_{ce})}{6}\right] \text{ [H/km]}. \qquad (7.89)$$

Substituindo os coeficientes de campo por suas expressões, obteremos, após sua racionalização:

$$L_s = 4{,}6052 \cdot 10^{-4}\left(\log\frac{\sqrt[3]{d_{ab}d_{bc}d_{ac}}}{D_s} + \log\frac{\sqrt[6]{d_{ae}d_{af}d_{bd}d_{bf}d_{ca}d_{ce}}}{\sqrt[6]{d_{ad}d_{be}d_{cf}}}\right)\ \text{[H/km]}. \tag{7.90}$$

Essa equação difere daquela da linha simples, Eq. (7.73), pelo segundo termo do segundo membro, que nada mais é do que a indutância mútua entre os dois circuitos:

$$M_s = 4{,}6052 \cdot 10^{-4}\log\frac{\sqrt[6]{d_{ae}d_{af}d_{bd}d_{bf}d_{cd}d_{cf}}}{\sqrt[3]{d_{ae}d_{af}d_{ce}}}\ \text{[H/km]}. \tag{7.91}$$

Designemos:

$$\sqrt[3]{d_{ad}d_{be}d_{cf}} = D_{\mathrm{I}} \tag{7.92}$$

$$\sqrt[6]{d_{ae}d_{af}d_{bd}d_{bf}d_{ca}d_{ce}} = D_{\mathrm{II}}. \tag{7.93}$$

A Eq. (7.90) pode ser escrita:

$$L_s = 4{,}6052 \cdot 10^{-4}\log\frac{D_m D_{\mathrm{II}}}{D_s D_{\mathrm{I}}}\ \text{[H/km]} \tag{7.94}$$

e a reatância indutiva de seqüência positiva por condutor de uma linha a circuito duplo:

$$x_L = 28{,}935325 \cdot 10^{-4} f \log\frac{D_m D_{\mathrm{II}}}{D_s D_{\mathrm{I}}}\ \text{[ohm/km]}. \tag{7.95}$$

Notemos a lei de formação de D_{I} e D_{II}:

D_{I} — distância média geométrica entre condutores que conduzem as correntes de mesma fase;

D_{II} — distância média geométrica entre condutores que conduzem correntes de fases diferentes.

A posição relativa dos condutores de fase de cada circuito influi no valor da indutância de serviço, que pode ser deduzido, por exemplo, se, na Fig. 7.16, no circuito II, fizermos circular a corrente da fase a pelo condutor na posição F e a corrente de fase c no condutor da posição D. Nesse caso, aumentará o valor de D_{I} e diminuirá o de D_{II}.

Tal disposição é denominada *mínima indutância*. Teremos, então:

$$D'_{\mathrm{I}} = \sqrt[3]{d_{af}\, d_{be}\, d_{cd}}\ \text{[m]} \tag{7.96a}$$

$$D''_{\mathrm{II}} = \sqrt[6]{d_{ae}\, d_{ad}\, d_{bd}\, d_{bf}\, d_{ce}\, d_{cf}}\ \text{[m]}. \tag{7.96b}$$

7.6.3.2 — Linhas Diferentes

Em linhas a circuito duplo é usual que ambos os circuitos sejam idênticos. Pode, no entanto, ocorrer que uma linha, em uma primeira etapa, seja construída apenas com um dos circuitos e, posteriormente, completada com condutores de características diferentes daqueles usados inicialmente (deve haver apenas compatibilidade entre a resistência mecânica das estruturas e uma eventual solicitação adicional provocada pelos condutores modificados). Neste caso, os dois circuitos terão condutores que, além de resistências elétricas diferentes, terão, igualmente, *RMG* (D_s) diferentes entre si.

Ocorre, outrossim, e muito freqüentemente, que em uma mesma faixa de servidão se encontrem linhas operando em paralelo, construídas não só com condutores diferentes, mas também com estruturas de configuração e dimensões diferentes.

Em ambos os casos, não só as intensidades das correntes em cada linha ou circuito serão diferentes, como também poderão estar defasadas entre si, de forma que poderá não haver correspondência entre os máximos das correntes nos condutores de mesma fase em ambos os circuitos.

A distribuição das correntes entre os circuitos ou linhas paralelas será inversamente proporcional a suas impedâncias, como mostra a Fig. 7.20.

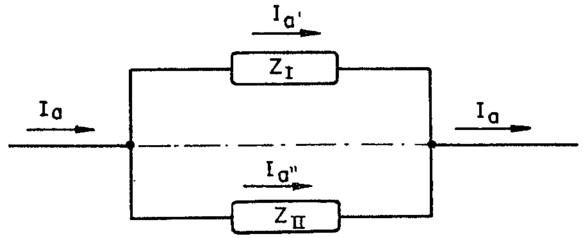


Fig. 7.20 — *Distribuição das correntes entre linhas paralelas diferentes.*

Esse defasamento é, em geral, muito pequeno para linhas de mesma classe de tensão, de forma que pode ser desprezado, calculando-se as indutâncias para cada circuito tendo em conta apenas as suas diferenças físicas:

$$x_{L_{\mathrm{I}}} = 28{,}935 \cdot 10^{-4} f \log\frac{D_{m_{\mathrm{I}}}}{D_{s_{\mathrm{I}}}} \cdot \frac{D_{\mathrm{II}}}{D_{\mathrm{I}}}\ \text{[ohm/km]} \tag{7.97a}$$

$$x_{L_{\mathrm{II}}} = 28{,}935 \cdot 10^{-4} f \log\frac{D_{m_{\mathrm{II}}}}{D_{s_{\mathrm{II}}}} \cdot \frac{D_{\mathrm{II}}}{D_{\mathrm{I}}}\ \text{[ohm/km]}, \tag{7.97b}$$

em que $D_{s_{\mathrm{I}}}$ e $D_{s_{\mathrm{II}}}$ são os *RMG* dos condutores de cada circuito e $D_{m_{\mathrm{I}}}$ e $D_{m_{\mathrm{II}}}$, as suas *DMG*.

Quando duas ou mais linhas de tensões diferentes ocupam a mesma faixa, ou uma mesma estrutura (paralelismo físico), mesmo que alimentadas através de uma mesmo barramento primário, a intervenção dos transformadores em uma ou em ambas pode introduzir defasamentos ainda maiores. Nessas condições, o valor da indutância mútua é, em geral, muito menor e pode ser inclusive desprezado nos cálculos.

Em cálculos elétricos de desempenho, é comum substituir-se uma linha dupla por seu circuito elétrico equivalente. Tomaremos, então:

$$L_{eq} = \frac{L_{s_I} \cdot L_{s_{II}}}{L_{s_I} + L_{s_{II}}} \text{ [henry/km]} \quad \text{e} \quad x_{eq} = \frac{x_{L_I} \cdot x_{L_{II}}}{x_{L_I} + x_{L_{II}}}. \tag{7.98}$$

Quando ambos os circuitos são idênticos, a expressão acima se torna:

$$x_{L_{eq}} = \frac{x_L}{2} = 14{,}4675 \cdot 10^{-4} f \log \frac{D_m}{D_s} \frac{D_{II}}{D_I} \text{ [ohm/km]}. \tag{7.99}$$

7.6.3.3 — Várias Linhas em Paralelo

O procedimento neste caso, é o mesmo: determinam-se as indutâncias próprias de cada uma das linhas às quais devem ser somadas todas as indutâncias mútuas entre uma linha considerada e as demais do circuito.

$$x_{L_I} = x_{L_{PI}} + x_{M_{II \cdot I}} + x_{M_{III \cdot I}} + \ldots + x_{M_{n-I}}$$

$$L_{s_I} = L_{s_{PI}} + M_{s_{II \cdot I}} + M_{sIII \cdot I} + \ldots + M_{s_{n-I}} \tag{7.100a}$$

$$x_{L_{II}} = x_{L_{PII}} + x_{M_{I \cdot II}} + x_{M_{III \cdot II}} + \ldots + x_{M_{n-II}}$$

$$L_{s_{II}} = L_{s_{PII}} + M_{s_{I \cdot II}} + M_{sIII \cdot II} + \ldots + M_{s_{n-II}} \tag{7.100b}$$

$$x_{L_{III}} = x_{L_{PIII}} + x_{M_{I \cdot n}} + x_{M_{III \cdot n}} + \ldots + x_{M(n-I)n}$$

$$L_{s_{III}} = L_{s_{PIII}} + M_{s_{I \cdot m}} + M_{s_{III-n}} + \ldots + M_{s(n-I)-n} \tag{7.100c}$$

$x_{L_{pi}}$ — reatâncias indutivas próprias de cada linha;

$x_{M_{s_{ij}}}$ — reatâncias indutivas mútuas entre pares de linhas.

7.7 — CONDUTORES MÚLTIPLOS

No Cap. 2 foram descritos e comentados os condutores múltiplos empregados nas linhas de transmissão. Distanciados relativamente pouco entre si — distâncias padronizadas de 6, 9, 15 e 18″ — e conduzindo correntes de mesmo sentido, seus fluxos magnéticos se compõem em um único, como mostra a Fig. 7.21.

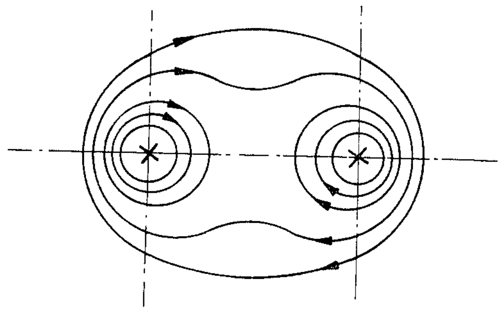


Fig. 7.21 — *Composição das linhas de fluxo magnético em condutores múltiplos.*

A fim de determinarmos o valor da indutância por condutor múltiplo, devemos considerar esse condutor substituído por um condutor equivalente cilíndrico, com um RMG tal que o fluxo magnético que venha produzir seja igual ao fluxo magnético total produzido pelos subcondutores que compõem o condutor múltiplo. Nessas condições, o problema fica resumido na determinação do RMG desse condutor equivalente.

Consideremos uma linha trifásica, como mostra a Fig. 7.22, na qual cada condutor de fase é composto de n subcondutores iguais, distribuídos na periferia de um círculo de raio r [m]. Seja D_s os RMG dos cabos empregados como subcondutores e A, B e C os centros dos círculos que os contêm. Sejam $\dot{I}_a$, $\dot{I}_b$ e $\dot{I}_c$ as correntes em cada uma das fases, distribuídas pelos n subcondutores de acordo com as suas reatâncias individuais, de forma que no condutor múltiplo da fase A se têm as correntes $\dot{I}_{A_1}$, $\dot{I}_{A_2}$, $\dot{I}_{A_3}$, ... etc.

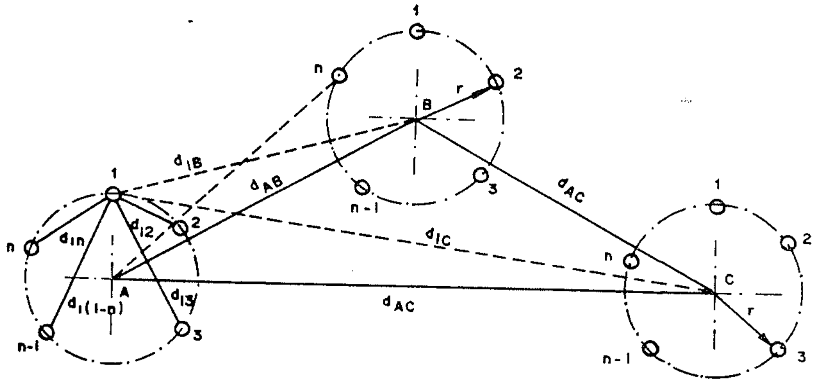


Fig. 7.22 — *Condutores múltiplos em linha trifásica.*

Se a esse sistema aplicássemos a Eq. (7.38), encontraríamos uma equação de ordem $3n$. Esse processo é adotado em alguns programas para cálculo de reatâncias indutivas em computadores digitais. As equações de ordem $3n$ são reduzidas a equações de ordem 3 por um processo de redução de matrizes conhecido como *bundling*, sendo a solução efetuada após essa redução. Esse processo, em termos de tempo de computação, é mais dispendioso, não sendo nem mesmo compensado pelo aumento no grau de precisão, portanto, perfeitamente dispensável.

A introdução de duas considerações simplificativas levam a uma solução mais imediata, sem, no entanto, comprometer a precisão dos cálculos, conforme foi verificado por cálculos comparativos:

a — as distâncias entre fases (centros dos círculos de raio r) são normalmente muito grandes quando comparadas com os valores de r, de forma que as distâncias entre os subcondutores de duas fases entre si podem ser consideradas iguais às distâncias entre os centros dos círculos que os inscrevem, mesmo no caso das futuras tensões ultra-elevadas, quando $r \simeq 0{,}5$ [m]. Essa simplificação poderá ser aplicada sem reservas, pois as distâncias entre fases, devido à não linearidade das tensões disruptivas de *gaps* grandes [15], aumentam de forma não proporcional à tensão;

b — os fluxos magnéticos produzidos individualmente pelas correntes que fluem nos subcondutores de cada fase se compõem formando um único campo magnético, de forma que a influência das diversas fases entre si é provocada pelos campos magnéticos compostos. Estes são deformados, pois os fluxos magnéticos enlaçados pelos subcondutores mais externos são menores do que aqueles dos subcondutores internos, do que resultam indutâncias diferentes. Essa distribuição irregular pode, no entanto, ser considerada pequena, podendo ser desprezada a diferença entre indutâncias dos subcondutores. No caso de r muito grande, tal assertiva é parcialmente verdadeira.

Face a essas hipóteses, podemos considerar as correntes $\dot{I}$ uniformemente distribuídas pelos subcondutores de cada fase:

$$\dot{I}_n = \frac{\dot{I}}{n} \quad [\text{A}]. \tag{7.101}$$

Consideremos inicialmente o subcondutor 1, da fase A. O fluxo que enlaça esse condutor, devido às correntes nos subcondutores da fase A, será:

$$\phi_{1A} = \dot{I}_n\,(f_{11} + f_{12} + f_{13} + \ldots + f_{1n}). \tag{7.102}$$

Introduzindo as expressões que definem os coeficientes de campo, teremos:

$$\phi_{1A} = 4{,}6052 \cdot 10^{-4}\,\dot{I}_n \left(\log\frac{1}{D_s} + \log\frac{1}{d_{12}} + \right.$$

$$\left. + \log\frac{1}{d_{13}} + \ldots + \log\frac{1}{d_{1n}}\right); \tag{7.103a}$$

como $\dot{I}_n = \dot{I}_A/n$, teremos:

$$\phi_{1A} = 4{,}6052 \cdot 10^{-4}\,\frac{\dot{I}_A}{n}\left(\log\frac{1}{D_s} + \log\frac{1}{d_{12}} + \right.$$

$$\left. + \log\frac{1}{d_{13}} + \ldots + \log\frac{1}{d_{1n}}\right) \tag{7.103b}$$

O subcondutor 1 da fase A também está concatenado com os fluxos das fases B e C. Em virtude da simplificação admitida, podemos escrever:

$$\phi_1 = \phi_{1A} + \phi_{B1} + \phi_{C1}, \tag{7.104}$$

sendo:

$$\phi_{B1} = \dot{I}_B f_{AB} = 4{,}6052 \cdot 10^{-4}\,\dot{I}_B \log\frac{1}{d_{AB}} \tag{7.105a}$$

$$\phi_{C1} = \dot{I}_C f_{AC} = 4{,}6052 \cdot 10^{-4}\,\dot{I}_C \log\frac{1}{d_{AC}}; \tag{7.105b}$$

portanto:

$$\phi_1 = 4{,}6052 \cdot 10^{-4}\,\frac{\dot{I}_A}{n}\left(\log\frac{1}{D_s} + \log\frac{1}{d_{12}} + \right.$$

$$\left. + \log\frac{1}{d_{13}} + \log\frac{1}{d_{1n}}\right) + \dot{I}_B \log\frac{1}{d_{AB}} + \log\frac{1}{d_{AC}}$$

ou:

$$\phi = 4{,}6052 \cdot 10^{-4}\,\dot{I}_A \log\frac{1}{\sqrt[n]{D_s\, d_{12}\, d_{13} \ldots d_{1n}}} +$$

$$+ \dot{I}_B \log\frac{1}{d_{AB}} + \dot{I}_C \log\frac{1}{d_{AC}} \tag{7.106}$$

Admitindo que o sistema seja equilibrado, consideremos o instante em que $\dot{I}_A = I_{\text{máx}}$, quando:

$$\dot{I}_B = \dot{I}_C = -\frac{1}{2}\,I_{\text{máx}}$$

para obter:

$$\phi_1 = 4{,}6052 \cdot 10^{-4} I_{máx} \log \frac{1}{\sqrt[n]{d_s\, d_{21}\, d_{13} \ldots d_{1n}}} -$$

$$- \frac{1}{2} \log \frac{1}{d_{AB}} - \frac{1}{2} \log \frac{1}{d_{AC}}$$

ou:

$$\phi_1 = 4{,}6052 \cdot 10^{-4} I_{máx} \log \frac{\sqrt[2]{d_{AB} d_{AC}}}{\sqrt[n]{D_s\, d_{12}\, d_{13} \ldots d_{1n}}}. \quad (7.107)$$

Havendo n subcondutores por fase, teremos n equações idênticas à Eq. (7.107). Cada subcondutor terá, portanto, uma indutância igual a:

$$L_1 = \frac{\phi_1}{I_n} = \frac{n\phi_1}{I_{máx}};$$

logo,

$$L_1 = 4{,}6052 \cdot 10^{-4}\, n \log \frac{\sqrt[2]{d_{AB} d_{AC}}}{\sqrt[n]{D_s\, d_{12}\, d_{13} \ldots d_{1n}}} \quad [\text{H/km}]. \quad (7.108)$$

Havendo n subcondutores idênticos em paralelo por fase, será:

$$L_A = \frac{L_1}{n} = 4{,}6052 \cdot 10^{-4} \log \frac{\sqrt{d_{AB} d_{AC}}}{\sqrt[n]{D_s\, d_{12}\, d_{13} \ldots d_{1n}}}. \quad (7.109a)$$

Efetuando o mesmo raciocínio com subcondutores das outras fases, teremos:

$$L_B = 4{,}6052 \cdot 10^{-4} \log \frac{\sqrt{d_{AB} d_{BC}}}{\sqrt[n]{D_s\, d_{12}\, d_{13} \ldots d_{1n}}} \quad [\text{henry/km}] \quad (7.109b)$$

$$L_B = 4{,}6052 \cdot 10^{-4} \log \frac{\sqrt{d_{AC} d_{BC}}}{\sqrt[n]{D_s\, d_{12}\, d_{13} \ldots d_{1n}}} \quad [\text{henry/km}]. \quad (7.109c)$$

A reatância indutiva de seqüência positiva ou de serviço será:

$$x_{L_s} = \omega \frac{(L_A + L_B + L_C)}{3} = 28{,}935325 \cdot 10^{-4} f \log \frac{\sqrt[3]{d_{AB} d_{BC} d_{AC}}}{\sqrt[n]{D_s\, d_{12}\, d_{13} \ldots d_{1n}}}. \quad (7.110)$$

Comparando essa expressão com a Eq. (7.73*b*), constatamos que o numerador do termo logarítmico é a própria *DMG* da linha trifásica simples, D_m. O denominador desse termo está em lugar de D_s. Trata-se, portanto, do *RMG* do condutor múltiplo de n subcondutores de *RMG* próprios iguais a D_s. Teremos:

$$D_{s_L} = \sqrt[n]{D_s\, d_{12}\, d_{13}\, d_{14} \ldots d_{1n}} \quad [\text{m}]. \quad (7.111)$$

A Eq. (7.110) pode, então, ser escrita da seguinte forma:

$$x_{L_s} = 28{,}935325 \cdot 10^{-4} f \log \frac{D_m}{D_{s_L}} \quad [\text{ohm/km}]. \quad (7.112)$$

7.8 — CÁLCULO DAS REATÂNCIAS INDUTIVAS DE SEQÜÊNCIA POSITIVA POR MEIO DE TABELAS

A equação mais geral para o cálculo das reatâncias indutivas de seqüência positiva, abrangendo as linhas a circuito duplo e linhas com condutores múltiplos, pode ser obtida introduzindo-se em (7.95) o *RMG* dos condutores múltiplos, definido pela Eq. (7.111):

$$x_{L_s} = 28{,}935325 \cdot 10^{-4} f \log \frac{D_m}{D_{s_L}} \cdot \frac{D_{II}}{D_I} \quad [\text{ohm/km}]. \quad (7.113)$$

Essa equação pode ser desmembrada da seguinte forma:

$$x_{L_s} = x'_L + x''_L + x'''_L \quad [\text{ohm/km}], \quad (7.114)$$

na qual valem:

$$x'_L = 28{,}935325 \cdot 10^{-4} f \log \frac{1}{D_{s_L}} \quad [\text{ohm/km}] \quad (7.115a)$$

$$x''_L = 28{,}935325 \cdot 10^{-4} f \log D_m \quad [\text{ohm/km}] \quad (7.115b)$$

$$x'''_L = 28{,}935325 \cdot 10^{-4} f \log \frac{D_{II}}{D_I} \quad [\text{ohm/km}]. \quad (7.115c)$$

Um exame dessas reatâncias indutivas parciais mostra que as três possuem, além do parâmetro comum representado pela freqüência, apenas um parâmetro particular. As freqüências nos sistemas comerciais, hoje em uso, são poucas. Na realidade, apenas duas: 50 [Hz] e 60 [Hz], o que, sob o ponto de vista de elaboração de tabelas de reatâncias, é bastante adequado.

x'_L — Denominado *reatância indutiva para o espaçamento de um metro*, além de depender da freqüência, depende também dos *RMG* dos condutores. Estes são tabelados de acordo com as bitolas padronizadas dos diversos tipos de condutores. Sendo o número de condutores padronizados limitado, como também o é o número de condutores múltiplos possíveis, com os espaçamentos igualmente padronizados, é fácil organizar tabelas de valores de x'_L em função das freqüências, bitolas dos condutores ou subcondutores e número e espaçamentos destes no caso dos condutores múltiplos.

No Ap. III do presente volume encontramos as Tabelas:

III.1 — Características Elétricas dos Cabos de Cobre Nus.

III.2 — Características Elétricas dos Cabos de Alumínio — CA.

III.3 — Características Elétricas dos Cabos de Alumínio-Aço — CAA.

Nelas se encontram os valores dos *RMG* e x'_L para condutores singelos, em 50 [Hz] e 60 [Hz].

No mesmo apêndice ainda encontramos as Tabelas.:

III.3*a* — Reatâncias Indutivas de Condutores Múltiplos CAA em 60 [Hz].

Nelas podemos ler diretamente valores de reatâncias indutivas para o espaçamento de 1 [m], x'_L, para condutores múltiplos, de 2, 3, 4 e 6 subcondutores, com espaçamentos padronizados de 6, 9, 12, 15 e 18 polegadas, além daquelas para condutores singelos.

x''_L — Denominado *fator de espaçamento indutivo*, depende da freqüência e das distâncias médias geométricas entre condutores de mesmo circuito:

$$D_m = \sqrt[3]{d_{ab}\, d_{bc}\, d_{ac}} \quad [\text{m}]. \qquad (\text{Eq. } 7.71a)$$

Os valores de x''_L, em função da freqüência f [Hz] e das distâncias D_m, podem ser lidos diretamente nas tabelas do Ap. III.

III.4 — Fator de Espaçamento Indutivo a 50 [Hz].

III.5 — Fator de Espaçamento Indutivo a 60 [Hz].

x'''_L — Denominado *reatância indutiva mútua entre dois circuitos*, é função da freqüência e da relação entre as *DMG*, D_{II} [Eqs. (7.93) e (7.96*b*)] e D_I [Eqs. (7.92) e (7.96*a*)].

As tabelas do Ap. III:

III.6 — Reatância Indutiva Mútua entre Dois Circuitos a 50 [Hz].

III.7 — Reatância Indutiva Mútua entre Dois Circuitos a 60 [Hz] fornecem valores para x'''_L em [ohm/km] em função da relação D_{II}/D_I.

As tabelas assim elaboradas permitem a determinação direta, por simples adição de valores parciais, das reatâncias indutivas de serviço de quaisquer linhas de transmissão, com condutores simples, sejam elas a circuitos simples ou duplos, ou em paralelo com outras.

No caso das linhas a circuito simples, teremos simplesmente:

$$x_L = x'_L + x''_L. \qquad (7.116)$$

Quando houver mais de dois circuitos em paralelo, teremos:

$$x_L = x'_L + x''_L + (x'''_L)_1 + (x'''_L)_2 + \ldots + (x'''_L)_n. \qquad (7.117)$$

7.9 — IMPEDÂNCIAS DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO

São definidas como a soma complexa da resistência à corrente alternada dos cabos condutores e de sua reatância indutiva na freqüência do sistema:

$$\dot{z} = r_c + j\omega L_s = r_c + jx_{L_s} \ [\text{ohm/km}]. \qquad (7.118)$$

Da mesma forma como foi definida uma matriz de indutâncias, ou de reatâncias indutivas, podemos definir uma matriz de impedâncias:

$$[Z] = \begin{bmatrix} \dot{z}_{aa} & \dot{z}_{ab} & \dot{z}_{ac} & \ldots & \dot{z}_{ar} & \dot{z}_{as} \\ \dot{z}_{ab} & \dot{z}_{bb} & \dot{z}_{bc} & \ldots & \dot{z}_{br} & \dot{z}_{bs} \\ \dot{z}_{ac} & \dot{z}_{bc} & \dot{z}_{cc} & \ldots & \dot{z}_{cr} & \dot{z}_{cs} \\ \cdot & & & & & \\ \cdot & & & & & \\ \cdot & & & & & \\ \dot{z}_{ar} & \dot{z}_{br} & \dot{z}_{cr} & \ldots & \dot{z}_{rr} & \dot{z}_{rs} \\ \dot{z}_{as} & \dot{z}_{bs} & \dot{z}_{cs} & \ldots & \dot{z}_{rs} & \dot{z}_{ss} \end{bmatrix} \quad [\text{ohm/km}]. \qquad (7.119)$$

Sendo r_c [ohm/km] a resistência dos condutores de uma fase de um circuito (ver Cap. 9), se a linha for construída com condutores múltiplos de n subcondutores, devemos lembrar que sua resistência será igual a $1/n$ daquela do condutor simples.

Com a mesma técnica de redução de matrizes usada no Item 7.6.2, é possível reduzi-la à dimensão 3 × 3, desde que represente uma linha trifásica, a circuito simples ou duplo.

7.10 — RESISTÊNCIA E REATÂNCIA INDUTIVA DE CIRCUITOS COM RETORNO PELO SOLO

7.10.1 — Introdução

Nos capítulos anteriores determinamos as expressões para o cálculo das reatâncias indutivas das linhas aéreas de transmissão, considerando como ponto de partida sistemas trifásicos equilibrados. Essas reatâncias, conforme nos ensina a teoria das *componentes simétricas*, são, nos sistemas desequilibrados, as reatâncias indutivas de seqüência positiva e as de seqüência negativa, iguais entre si. A determinação das reatâncias indutivas de seqüência nula (ou zero) é, portanto, necessária, a fim de que também os sistemas desequilibrados possam ser examinados.

Lembramos que, nos sistemas trifásicos, as componentes de seqüência nula das correntes são iguais em módulo e fase, fluindo nos condutores de fase e retornando por um percurso que consiste somente no solo, num condutor neutro, nos cabos pára-raios ou numa combinação dos mesmos. Uma vez que o retorno comumente se dá pelo solo, ou pelo solo em paralelo com outro percurso, como os cabos pára-raios, para a determinação das reatâncias indutivas e resistências às correntes de seqüência nula é necessário empregar métodos que tomam em devida consideração a resistividade do solo, bem como a distribuição das correntes no mesmo. Foi verificado que tanto a resistência como a reatância de seqüência nula são afetadas pelos mesmos fatores; é usual considerar o seu desenvolvimento simultaneamente. Deixamos para o Cap. 9 o exemplo numérico do cálculo das matrizes das resistências.

Um estudo desse tipo deve, forçosamente, envolver uma grande dose de trabalho experimental, e elementos empíricos são, em geral, contidos nas expressões finais. O problema foi extensamente analisado por pesquisadores europeus (Rudenberg Mayr e Pollaczek) e norte-americanos (Carson e Campbell), tendo-se destacado os trabalhos de J. R. Carson, divulgados em 1926 nos Estados Unidos, propondo métodos de cálculo cujos resultados mais se aproximam dos valores medidos em instalações reais.

7.10.2 — Método Exato* de Carson

Carson [7] considerou condutores paralelos ao solo, admitindo a resistividade como uniforme e tendo extensão infinita. Demonstrou que as impedâncias próprias e mútuas de circuitos com retorno pelo solo são iguais às impedâncias para um circuito envolvendo solo perfeito — no qual se pode considerar um condutor-imagem à mesma profundidade que a altura do condutor sobre o solo (Item 7.3.3) acrescida de um fator de correção $P + jQ$, aplicável a ambas as impedâncias. Esse fator de correção é função de duas variáveis p e θ, que definiremos mais adiante [6].

* Carson apresentou sua equação em forma de série. O método "exato" aqui descrito emprega apenas os quatro primeiros termos da série [17].

A função $P + jQ$ é comum às impedâncias próprias e mútuas, porém as variáveis p e θ são diferentes para as duas.

Consideremos, como mostra a Fig. 7.23, dois condutores a e b, a uma altura h_a e h_b sobre o solo, com suas imagens a distâncias D_{ab} e D_{ba}, respectivamente.

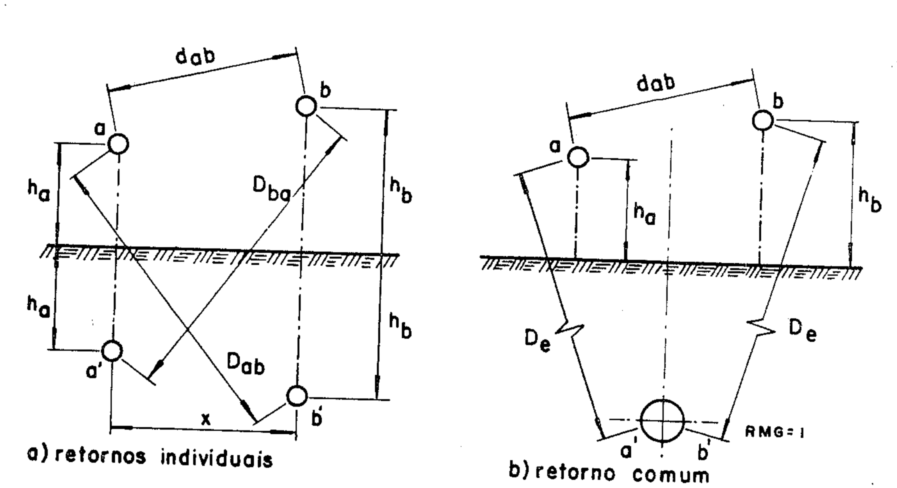


Fig. 7.23 — *Condutores com retorno pelo solo.*

Carson definiu:

a — impedância própria dos circuitos de retorno pelo solo:

$$z_p = r_c + j28{,}935 \cdot 10^{-4} f \log \frac{2h_1}{D_{sL}} + 25{,}134 \cdot 10^{-4} f (P + jQ) \quad \text{[ohm/km]}; \tag{7.120}$$

b — impedância mútua dos circuitos de retorno pelo solo:

$$z_M = 28{,}935 \cdot 10^{-4} f \log \frac{D_{ab}}{d_{ab}} + 25{,}134 \cdot 10^{-4} f \, (P + jQ) \ \text{[ohm/km]}. \tag{7.121}$$

Os valores de P e Q são determinados em função das variáveis p e θ por expressões deduzidas pelo próprio Carson. As variáveis p e θ são diferentes para as impedâncias próprias e mútuas. Teremos:

a — para as impedâncias próprias:

$$\theta = 0$$

$$p_i = 5{,}620 \cdot 10^{-3} h_i \sqrt{\frac{f}{\rho}}, \tag{7.122}$$

onde ρ é a resistividade do solo em [ohm/m³].

b — para as impedâncias mútuas:

$$\theta_{ij} = \text{tg}^{-1} \frac{x_{ij}}{h_i + h_j} \tag{7.123}$$

$$P_{ij} = 28{,}1004 \cdot 10^{-4} D_{ij} \sqrt{\frac{f}{\rho}} \tag{7.124}$$

Para a determinação de P e Q, Carson derivou equações aplicáveis em três campos de variação de p. Para problemas relacionados com sistemas de energia elétrica, em geral $p < 0{,}25$, devendo-se usar as expressões:

$$P = \left[\frac{\pi}{8} - \frac{p}{3\sqrt{2}} \cos\theta + \frac{p^2}{16} \cos 2\theta \left(0{,}6728 + Ln \frac{2}{p}\right) + \right.$$
$$\left. + \frac{p^2}{16} \cdot \theta \text{ sen } 2\theta\right] \text{ [ohm/km]} \tag{7.125}$$

$$Q = \left[- 0{,}0386 + \frac{1}{2} Ln \frac{2}{p} + \frac{1}{3\sqrt{2}} p \cos\theta\right] \text{ [ohm/km].} \tag{7.126}$$

Nos casos em que $p > 0{,}25$, equações mais completas deverão ser empregadas [6, 7, 17].

Com os valores P e Q calculados, obtemos matrizes de correção das matrizes de resistência dos cabos e de suas reatâncias indutivas, de ordem igual ao número de condutores. A matriz das impedâncias corrigidas será:

$$[\dot{Z}_{corr}] = \begin{bmatrix} r_{aa} & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & r_{bb} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_{cc} & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & \dots & r_{rr} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & r_{ss} \end{bmatrix} + k \begin{bmatrix} P_{aa} & P_{ab} & P_{ac} & \dots & P_{ar} & P_{as} \\ P_{ba} & P_{bb} & P_{bc} & \dots & P_{br} & P_{bs} \\ P_{ca} & P_{cb} & P_{cc} & \dots & P_{cr} & P_{cs} \\ \vdots & & & & & \\ P_{ra} & P_{rb} & P_{rc} & \dots & P_{rr} & P_{rs} \\ P_{sa} & P_{sb} & P_{sc} & \dots & P_{rs} & P_{ss} \end{bmatrix} +$$
$$+ j \left\{ \begin{bmatrix} x_{aa} & x_{ab} & x_{ac} & \dots & x_{ar} & x_{as} \\ x_{ab} & x_{bb} & x_{bc} & \dots & x_{br} & x_{bs} \\ x_{ac} & x_{bc} & x_{cc} & \dots & x_{cr} & x_{cs} \\ \vdots & & & & & \\ x_{ra} & x_{rb} & x_{rc} & \dots & x_{rr} & x_{rs} \\ x_{sa} & x_{sb} & x_{sc} & \dots & x_{sr} & x_{ss} \end{bmatrix} + k \begin{bmatrix} Q_{aa} & Q_{ab} & Q_{ac} & \dots & Q_{ar} & Q_{as} \\ Q_{ba} & Q_{bb} & Q_{bc} & \dots & Q_{br} & Q_{bs} \\ Q_{ca} & Q_{cb} & Q_{cc} & \dots & Q_{cr} & Q_{cs} \\ \vdots & & & & & \\ Q_{ra} & Q_{rb} & Q_{rc} & \dots & Q_{rr} & Q_{rs} \\ Q_{sa} & Q_{sb} & Q_{sc} & \dots & Q_{sr} & Q_{ss} \end{bmatrix} \right\} \tag{7.127}$$

para $k = 25{,}134 \cdot 10^{-4} f$. (Eq. 7.121)

A matriz de impedâncias resultante pode ser reduzida em seguida a uma matriz 3 × 3, empregando-se o processo indicado no Item 7.6.2. Em seus termos estarão incluídos os fatores de correção devidos às características do solo e à presença dos cabos pára-raios.

Para efeito de cálculo das impedâncias de seqüência positiva, também neste caso os termos de correção podem ser desprezados, pois sua influência sobre o valor total é mínima. O mesmo não ocorre com as impedâncias de seqüência nula, uma vez que o solo, em paralelo com os cabos pára-raios, constituem os percursos das correntes dessa seqüência.

7.10.3 — Método Aproximado

Uma aproximação simplificativa, que normalmente introduz erros toleráveis, tem sido usada há bastante tempo [3, 6, 11]. Consiste em desprezar os termos das Eqs. (7.125) e (7.126) que contenham θ. Nessas condições, o termo de correção da resistência devido ao solo torna-se constante e proporcional à freqüência do sistema, enquanto que o termo de correção da reatância indutiva é proporcional à resistividade do solo e inversamente proporcional à freqüência.

Nessas condições, as impedâncias próprias e mútuas são dadas por:

$$\dot{z}_i = r_{c_i} + 9{,}88 \cdot 10^{-4} f + j28{,}935325 \cdot 10^{-4} \cdot f$$
$$\cdot \log \frac{658{,}368 \sqrt{\rho/f}}{D_{s_i}} \text{ [ohm/km]} \tag{7.128}$$

$$\dot{z}_{ij} = 9{,}88 \cdot 10^{-4} f + j28{,}935325 \cdot 10^{-4} \cdot f \cdot$$
$$\cdot \log \frac{658{,}368 \sqrt{\rho/f}}{d_{ij}} \text{ [ohm/km].} \tag{7.129}$$

Analisando as expressões (7.128) e (7.129), cujos termos imaginários nada mais são do que os coeficientes de campo corrigidos, multiplicados por $2\pi f$, observamos que a correção foi feita substituindo-se nos coeficientes de campo próprios (Eq. 7.59) o termo $2h_i$ por aquela expressão, e nos coeficientes de campo mútuo igualmente o termo D_{ij}.

Teremos então, tomando em consideração a resistividade do solo:

$$f^*_{ii} = 4{,}6052 \cdot 10^{-4} \log \frac{D_e}{D_s} \text{ [H/km]} \tag{7.130}$$

$$f^*_{ij} = 4{,}6052 \cdot 10^{-4} \log \frac{D_e}{d_{ij}} \text{ [H/km],} \tag{7.131}$$

sendo:

$$D_e = 658{,}368\sqrt{\rho/f} \quad [\text{m}]. \tag{7.132}$$

A distância D_e pode ser interpretada como sendo a distância entre os condutores e um único condutor de diâmetro unitário, que serve de retorno às correntes que fluem nos condutores da linha, pois os valores de D_e são em geral muito grandes, comparados com a distância horizontal x (Fig. 7.21) entre condutores.

A Tab. 7.1 fornece valores de ρ para diversos tipos de terrenos, bem como valores de D_e para f = 60 Hz.

Tabela 7.1 — Resistividades Típicas de Solos e Distâncias Equivalentes de Imagens [6].

	ρ ohm/m³	D_e [m]
Água do mar	0,01 – 1,0	8,5 – 85,0
Solo pantanoso	10 – 100	268,8 – 850,0
Terra seca	1 000	2 688
Pedregulho	10^7	268 800
Arenito	10^9	2 688 000
Valor médio de grande número de medições	100	850

Este último processo, conforme foi mencionado, representa uma simplificação do anterior, dito exato. De imediato surge uma indagação sobre o grau de confiabilidade que lhe podemos atribuir, já que sua vantagem é evidente, tanto para cálculos manuais como para cálculos em computadores digitais, principalmente em termos relacionados com os tempos de processamento.

O processo simplificado vem sendo empregado praticamente desde a introdução da teoria de Carson, e tem conduzido a resultados considerados satisfatórios, quando resultados de cálculo de correntes de curto-circuito são comparados, por exemplo, com correntes medidas em instalações reais. O advento dos computadores digitais permitiu o emprego de métodos mais sofisticados de cálculo a custo equivalente ou menor do que o dos métodos mais simplificados executados manualmente; estes vêm sendo empregados mais ou menos indiscriminadamente, sem uma indagação maior sobre um correspondente aumento na confiabilidade dos resultados obtidos.

No caso da determinação das reatâncias de seqüência nula, poderão, em cálculos comparativos, surgir diferenças de até 10%, o que, à primeira vista, pode ser uma condenação do método simplificado. Isso, no entanto, não deve ocorrer se atentarmos simplesmente para o fato de que

nem mesmo esse grau de certeza podemos ter quanto aos valores da resistividade do solo. Para esta, o projetista pode contar no máximo com valores obtidos por amostragem ao longo da linha, nas condições existentes na época em que foram realizadas as medidas, pois podem variar. É típico o caso de solos areníticos, no interior do Brasil, nos quais foram medidas resistividades da ordem de 10 000 [ohm/m³] em época das secas e da ordem de 1 000 [ohm/m³] com o solo molhado.

Na maioria dos casos práticos, pode-se empregar o método simplificado que, mesmo para cálculos em computadores digitais, representa substancial economia com relação ao método exato.

7.11 — IMPEDÂNCIAS DE SEQÜÊNCIA NULA DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO

A maneira mais fácil e direta de se determinarem as impedâncias de seqüência nula é através de transformação matricial. Por meio desta obtemos não só as impedâncias de seqüência nula, como também de seqüências positivas e negativas, além das impedâncias interseqüenciais. A transformação é definida da seguinte maneira [16]:

$$[\dot{Z}_s] = [A]^{-1}\,[\dot{Z}_{\text{corr}}]\,[A], \tag{7.133}$$

na qual temos:

$[\dot{Z}_s]$ — matriz de impedância seqüenciais;

$[\dot{Z}_{\text{corr}}]$ — matriz de impedâncias corrigidas para efeito do solo e reduzida à linha trifásica equivalente;

$$[A] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} = \text{matriz de transformação;}$$

$$[A]^{-1} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} = \text{inversa da matriz de transformação;}$$

$$a = -\frac{1}{2} + j\,\frac{\sqrt{3}}{2} = e^{j120^\circ} \text{ — operador.}$$

Se designarmos $\dot{Z}_{ii}$ e $\dot{Z}_{ij}$ como os termos da matriz corrigida e reduzida à matriz trifásica equivalente, efetuando a operação indicada pela Eq. (7.133)* encontraremos:

$$\dot{Z}_{11} = \dot{Z}_{22} = \frac{1}{3}(\dot{Z}_{aa} + \dot{Z}_{bb} + \dot{Z}_{cc}) - \frac{1}{3}(\dot{Z}_{ab} + \dot{Z}_{ac} + \dot{Z}_{bc}) \quad (7.134)$$

$$\dot{Z}_{oo} = \frac{1}{3}(Z_{aa} + Z_{bb} + Z_{cc}) + \frac{2}{3}(\dot{Z}_{ab} + \dot{Z}_{ac} + \dot{Z}_{bc}) \quad (7.135)$$

$$\dot{Z}_{12} = \frac{1}{3}(\dot{Z}_{aa} + a^2\dot{Z}_{bb} + a\dot{Z}_{cc}) + \frac{2}{3}(a\dot{Z}_{ab} + a^2\dot{Z}_{ac} + \dot{Z}_{bc}) \quad (7.136a)$$

$$\dot{Z}_{21} = \frac{1}{3}(\dot{Z}_{aa} + a\dot{Z}_{bb} + a^2\dot{Z}_{cc}) + \frac{2}{3}(a^2\dot{Z}_{ab} + a\dot{Z}_{ac} + \dot{Z}_{bc}) \quad (7.136b)$$

$$\dot{Z}_{10} = \dot{Z}_{02} = \frac{1}{3}(\dot{Z}_{aa} + a\dot{Z}_{bb} + a^2\dot{Z}_{cc}) - \frac{1}{3}(a^2\dot{Z}_{ab} + a\dot{Z}_{ac} + \dot{Z}_{bc}) \quad (7.136c)$$

$$\dot{Z}_{01} = \dot{Z}_{20} = \frac{1}{3}(\dot{Z}_{aa} + a^2\dot{Z}_{bb} + a\dot{Z}_{cc}) - \frac{1}{3}(a\dot{Z}_{ab} + a^2\dot{Z}_{ac} + \dot{Z}_{bc}). \quad (7.136d)$$

No caso das linhas a circuito duplo, o processo de transformação é o mesmo, aplicando-se a transformação linear à equação da linha trifásica sem pára-raios equivalente, obtida pela redução da matriz da Eq. (7.84b) à ordem 3×3 da forma conhecida.

7.11.1 — Linhas a Circuito Simples sem Cabos Pára-Raios

A matriz das impedâncias corrigidas será, separando reais de imaginários:

$$[Z_{corr}] = \begin{bmatrix} (r_a + 9{,}88 \cdot 10^{-4} f) & 9{,}88 \cdot 10^{-4} f & 9{,}88 \cdot 10^{-4} f \\ 9{,}88 \cdot 10^{-4} f & (r_b + 9{,}88 \cdot 10^{-4} f) & 9{,}88 \cdot 10^{-4} f \\ 9{,}88 \cdot 10^{-4} f & 9{,}88 \cdot 10^{-4} f & (r_c + 9{,}88 \cdot 10^{-4} f) \end{bmatrix} +$$

$$+ j\omega \begin{bmatrix} f^*_{aa} & f^*_{ab} & f^*_{ac} \\ f^*_{ab} & f^*_{bb} & f^*_{bc} \\ f^*_{ac} & f^*_{bc} & f^*_{cc} \end{bmatrix} \text{ [ohm/km]}. \quad (7.137)$$

* $\dot{Z}_{12}$, $\dot{Z}_{21}$, $\dot{Z}_{10}$, $\dot{Z}_{01}$, $\dot{Z}_{02}$ e $\dot{Z}_{20}$ são impedâncias mútuas interseqüenciais e só têm sentido nas linhas não transpostas, em que as impedâncias seqüenciais só podem ser definidas pela matriz $\dot{Z}_s$. São nulas nas linhas transpostas.

Podemos aplicar as Eqs. (7.134) e (7.135) separadamente à parte real, obtendo para $r_a = r_b = r_c$:

$$r_{11} = r_{22} = \frac{1}{3}[3(r_a + 9{,}88 \cdot 10^{-4} f)] - \frac{1}{3}[3(9{,}88 \cdot 10^{-4} f)]$$

$$r_{11} = r_{22} = r_a, \quad (7.138)$$

o que mostra, como era de se esperar, que a resistividade do solo em nada influencia o valor da resistência de seqüência positiva.

Para a parte imaginária, teremos, pela Eq. (7.34):

$$x_{L_1} = j\frac{\omega}{3}(f^*_{aa} + f^*_{bb} + f^*_{cc}) - j\frac{\omega}{3}(f^*_{ab} + f^*_{ac} + f^*_{bc});$$

como, normalmente,

$$f^*_{aa} = f^*_{bb} = f^*_{cc} = k\,Ln\frac{D_e}{D_{s_L}}$$

e, por definição:

$$f^*_{ab} = k\,Ln\frac{D_e}{d_{ab}},$$

$$f^*_{ac} = k\,Ln\frac{D_e}{d_{ac}},$$

$$f^*_{bc} = k\,Ln\frac{D_e}{d_{bc}},$$

$$x_{L_1} = j\frac{3\omega}{3}\,Ln\frac{D_e}{D_{s_L}} - j\frac{3\omega}{3}\,k\,Ln\frac{D_e}{\sqrt[3]{d_{ab}d_{ab}d_{bc}}}$$

ou

$$x_{L_1} = j\omega k\,Ln\frac{\sqrt[3]{d_{ab}d_{bc}d_{ac}}}{D_{s_L}} = j\omega k\,Ln\frac{D_m}{D_{s_L}} \text{ [ohm/km];}$$

portanto,

$$x_{L_2} = x_{L_1} = j28{,}935325 \cdot 10^{-4} f \log\frac{D_m}{D_{s_L}}. \quad \text{(Eq. 7.112)}$$

Portanto, empregando o método aproximado para o cálculo dos fatores de correção do solo, a influência deste também não é sentida no valor da reatância indutiva de seqüência positiva. Calculados pelo processo exato, sua influência, mesmo que pequena, ficará evidenciada nas expressões obtidas. Deixamos ao leitor, a título de exercício, essa verificação.

As resistências de seqüência nula serão, pela Eq. (7.135):

$$r_o = \frac{1}{3}[3(r_a + 9{,}88 \cdot 10^{-4} f)] + \frac{2}{3}[3(9{,}88 \cdot 10^{-4} f)]$$

$$r_o = r_a + 29{,}64 \cdot 10^{-4} f \quad [\text{ohm/km}]. \tag{7.139}$$

As reatâncias de seqüência nula serão, também pela Eq. (7.135):

$$x_{L_o} = j\,\frac{\omega}{3}\,(3f^*_{aa}) + f\,\frac{2\omega}{3}\,(f^*_{ab} + f^*_{ac} + f^*_{ad}).$$

Substituindo os coeficientes de campo por suas expressões, encontraremos:

$$x_{L_o} = j28{,}935325 \cdot 10^{-4} f \log \frac{D_e}{D_s} + j28{,}935325 \cdot 10^{-4} f \log \frac{D_e^2}{(\sqrt[3]{d_{ab}d_{ac}d_{bc}})^2}$$

ou

$$x_{L_o} = j\left(28{,}935325 \cdot 10^{-4} f \log \frac{D_e^3}{D_s(\sqrt[3]{d_{ab}d_{ac}d_{bc}})^2}\right) \quad [\text{ohm/km}], \tag{7.140}$$

que é a expressão que permite calcular a reatância de seqüência nula de uma linha simples, sem cabos pára-raios.

A Eq. (7.140) pode ser decomposta da seguinte forma:

$$x_{L_o} = 28{,}935325 \cdot 10^{-4} f \log \frac{1}{D_s} - 2(28{,}935325 \cdot 10^{-4} f \log D_m) +$$

$$+ 3(28{,}935325 \cdot 10^{-4} f \log D_e). \tag{7.141}$$

Designando $x_e = 28{,}935325 \cdot 10^{-4} f \log D_e$ (7.142), podemos reconhecer na Eq. (7.141) os termos:

$$x'_L = 28{,}935325 \cdot 10^{-4} f \log \frac{1}{D_{s_L}} \qquad \text{(Eq. 7.115}a\text{)}$$

$$x''_L = 28{,}935325 \cdot 10^{-4} f \log D_m, \qquad \text{(Eq. 7.115}b\text{)}$$

a Eq. (7.141) se transforma em:

$$x_{L_o} = x'_L - 2x''_L + 3x_e \quad [\text{ohm/km}], \tag{7.142}$$

permitindo-nos o uso das tabelas pré-calculadas para x'_L e x''_L, como exposto no Item 7.7. O valor de x_e podemos obter em função de f e ρ da Tab. III.13, no Ap. III.

7.11.2 — Linhas a Circuito Simples com Cabos Pára-Raios

A transformação matricial que empregamos para obter as impedâncias de seqüência positiva e nula definidas pelas Eqs. (7.134) e (7.135) é indicada para cálculos através de computadores digitais, operando com valores numéricos, qualquer que seja a configuração da linha. Aconselhamos ao leitor elaborar um programa para o processamento desses cálculos, da forma exposta, por computadores digital. Para cálculos manuais, esse processo é trabalhoso e demorado, preferindo-se recorrer ao uso das tabelas pré-calculadas. Para tanto, é conveniente dispor de equações do tipo das Eqs. (7.114) e (7.142). Poderíamos chegar a elas a partir das Eqs. (7.134) e (7.135), cujos termos teríamos que buscar nas matrizes de impedâncias, literais, corrigidas e reduzidas, envolvendo trabalho bastante complexo. Podemos contornar esse problema facilmente, da maneira que se segue.

Consideremos um circuito trifásico (Fig. 7.2) cujos condutores a, b e c possuem um RMG igual a D_{s_a}. O retorno é representado por um único condutor fictício, cujo RMG admitimos ser igual à unidade.

A Fig. 8.17 pode ser interpretada como enrolamento de uma espira de um circuito acoplado, ao qual se aplica uma tensão U_o a cada enrolamento, que é percorrido por uma corrente I_o. Nessas condições, das leis fundamentais dos circuitos temos:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_o \\ \dot{U}_o \\ \dot{U}_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{z}_{aa} & \dot{z}_{ab} & \dot{z}_{ac} \\ \dot{z}_{ab} & \dot{z}_{bb} & \dot{z}_{bc} \\ \dot{z}_{ac} & \dot{z}_{bc} & \dot{z}_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_o \\ \dot{I}_o \\ \dot{I}_o \end{bmatrix} \tag{7.143}$$

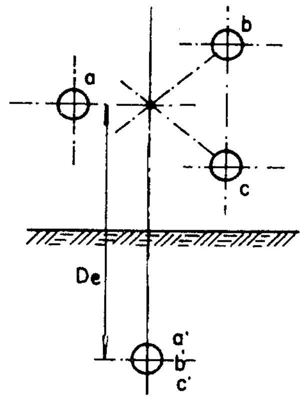


Fig. 7.24 — *Três condutores com retorno pelo solo.*

em que $\dot{z}_{aa}$, $\dot{z}_{bb}$ e $\dot{z}_{cc}$ são as auto-impedâncias, que podem ser determinadas pela Eq. (7.128), e $\dot{z}_{ab}$, $\dot{z}_{ac}$ e $\dot{z}_{bc}$ são as impedâncias mútuas que podemos calcular a partir da Eq. (7.129).

Da equação acima podemos obter:

$$\frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_o} = \dot{z}_o = \frac{\dot{z}_{aa} + \dot{z}_{bb} + \dot{z}_{cc}}{3} + \frac{2(\dot{z}_{ab} + \dot{z}_{ac} + \dot{z}_{bc})}{3} \;; \qquad (7.144)$$

esta é idêntica à Eq. (7.135), o que comprova o acerto da solução.

a — Linha a circuito simples com um cabo pára-raios — Admitamos uma linha trifásica simples com um cabo pára-raios r multiaterrado, cujo RMG designaremos D_{s_r}, sendo d_{ar}, d_{br} e d_{cr} as suas distâncias aos cabos condutores. Podemos escrever a seguinte equação:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_o \\ \dot{U}_o \\ \dot{U}_o \\ \hline 0 \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{ccc|c} \dot{z}_{aa} & \dot{z}_{ab} & \dot{z}_{ac} & \dot{z}_{ar} \\ \dot{z}_{ab} & \dot{z}_{bb} & \dot{z}_{bc} & \dot{z}_{br} \\ \dot{z}_{ac} & \dot{z}_{bc} & \dot{z}_{cc} & \dot{z}_{cr} \\ \hline \dot{z}_{ar} & \dot{z}_{br} & \dot{z}_{cr} & \dot{z}_{rr} \end{array}\right] \begin{bmatrix} \dot{I}_o \\ \dot{I}_o \\ \dot{I}_o \\ \hline \dot{I}_r \end{bmatrix} . \qquad (7.145)$$

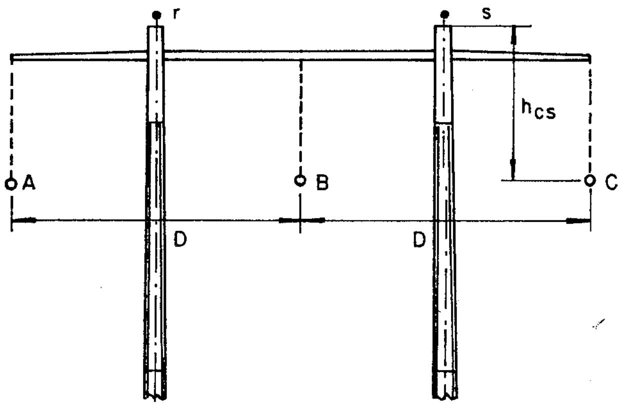


Fig. 7.25 — *Linha simples com dois cabos pára-raios.*

Admitindo valores médios, ou se condutores de fase forem transpostos, teremos:

$$\bar{\dot{z}}_{aa} = \dot{z}_{bb} = \dot{z}_{cc} = r_a + 9{,}88 \cdot 10^{-4} f + j28{,}935325 \cdot 10^{-4} f \log \frac{D_e}{D_{s_a}} \qquad (7.146)$$

$$\bar{\dot{z}}_{ab} = \dot{z}_{bc} = \dot{z}_{ac} = 9{,}88 \cdot 10^{-4} f + j28{,}935325 \cdot 10^{-4} f \log \frac{D_e}{D_m} \qquad (7.147)$$

$$\bar{\dot{z}}_{ar} = \dot{z}_{br} = \dot{z}_{cr} = 9{,}88 \cdot 10^{-4} f + j28{,}935325 \cdot 10^{-4} f \log \frac{D_e}{D_{m_r}} , \qquad (7.148)$$

sendo:

$$D_{m_r} = \sqrt[3]{d_{ar} d_{br} d_{cr}} \qquad (7.149)$$

$$z_{rr} = r_c + 9{,}88 \cdot 10^{-4} f + j28{,}935325 \cdot 10^{-4} f \log \frac{D_e}{D_{s_r}} . \qquad (7.150)$$

Logo, da Eq. (7.145) podemos obter:

$$\dot{U}_o = \bar{\dot{z}}_{aa} \dot{I}_o + 2\bar{\dot{z}}_{ab} \dot{I}_o + \bar{\dot{z}}_{ar} \dot{I}_r$$

$$0 = \dot{z}_{rr} \dot{I}_r + 3\bar{\dot{z}}_{ar} \dot{I}_o ,$$

que, resolvidas simultaneamente, nos dão:

$$\bar{\dot{z}}_o = \bar{\dot{z}}_{aa} + 2\bar{\dot{z}}_{ab} - 3 \frac{(\bar{\dot{z}}_{aa})^2}{\dot{z}_{rr}} \quad \text{[ohm/km]}. \qquad (7.151)$$

Para empregar as tabelas de reatâncias indutivas para a obtenção de valores parciais, faremos:

$$\bar{\dot{z}}_{aa} = r_a + 9{,}8869 \cdot 10^{-4} \cdot f + j(x'_{L_a} + x_e) \qquad (7.152)$$

$$\bar{\dot{z}}_{ab} = 9{,}8869 \cdot 10^{-4} \cdot f + j(x_e - x''_L) \qquad (7.153)$$

$$\bar{\dot{z}}_{ar} = 9{,}8869 \cdot 10^{-4} \cdot f + j(x_e - x''_{L_r}) \qquad (7.154)$$

$$\bar{\dot{z}}_{rr} = r_c + 9{,}8869 \cdot 10^{-4} \cdot f + j(x'_{L_r} + x_e) . \qquad (7.155)$$

Para a Eq. (7.154), x''_{L_r} é obtido das tabelas de fatores de espaçamento indutivo em função de D_{mr}, e x'_{L_r}, na Eq. (7.155), das tabelas de reatâncias unitárias para os cabos próprios para pára-raios.

Se, da Eq. (7.151), eliminarmos o último termo, estaremos eliminando a influência do cabo pára-raios e a equação se transformará na Eq. (7.144).

b — Linha a circuito simples com dois cabos pára-raios — Sejam r e s os cabos pára-raios cujos RMG são iguais, D_{s_r}. A equação do sistema será:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_o \\ \dot{U}_o \\ \dot{U}_o \\ \hline 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{ccc|cc} \dot{z}_{aa} & \dot{z}_{ab} & \dot{z}_{ac} & \dot{z}_{ar} & \dot{z}_{as} \\ \dot{z}_{ab} & \dot{z}_{bb} & \dot{z}_{bc} & \dot{z}_{br} & \dot{z}_{bs} \\ \dot{z}_{ac} & \dot{z}_{bc} & \dot{z}_{cc} & \dot{z}_{cr} & \dot{z}_{cs} \\ \hline \dot{z}_{ar} & \dot{z}_{br} & \dot{z}_{cr} & \dot{z}_{rr} & \dot{z}_{rs} \\ \dot{z}_{as} & \dot{z}_{bs} & \dot{z}_{cs} & \dot{z}_{rs} & \dot{z}_{ss} \end{array}\right] \begin{bmatrix} \dot{I}_o \\ \dot{I}_o \\ \dot{I}_o \\ \hline \dot{I}_r \\ \dot{I}_s \end{bmatrix} . \qquad (7.156)$$

Admitindo valores médios, ou linha transposta, teremos, além das igualdades indicadas no item anterior (7.146, 7.147 e 7.148), mais as seguintes:

$$\dot{z}_{ar} = \dot{z}_{br} = \dot{z}_{cr} = \dot{z}_{as} = \dot{z}_{bs} = \dot{z}_{cs} \tag{7.157}$$

$$\dot{z}_{rr} = \dot{z}_{ss}. \tag{7.158}$$

Nessas condições, a equação acima fica reduzida a:

$$\dot{U}_a = \dot{\bar{z}}_{aa}\dot{I}_o + 2\dot{\bar{z}}_{ab}\dot{I}_o + \dot{\bar{z}}_{ar}(\dot{I}_r + \dot{I}_s)$$

$$0 = (\dot{z}_{rr} + \dot{z}_{ss})(\dot{I}_r + \dot{I}_s) + 6\dot{\bar{z}}_{ar}\dot{I}_o,$$

cuja solução simultânea nos dá:

$$\dot{z}_{o_L} = \dot{\bar{z}}_{aa} + 2\dot{\bar{z}}_{ab} - \frac{6\dot{\bar{z}}^2_{ar}}{\dot{z}_{rr} + \dot{z}_{rs}}, \tag{7.159}$$

na qual $\dot{\bar{z}}_{aa}$; $\dot{\bar{z}}_{ba}$, $\dot{\bar{z}}_{ar}$ e $\dot{z}_{rr}$ podem ser calculadas como no item anterior e

$$\dot{z}_{rs} = 9{,}88 \cdot 10^{-4} f + j28{,}935 \cdot 10^{-4} f \log \frac{D_e}{d_{rs}} \tag{7.160}$$

ou

$$\dot{z}_{rs} = 9{,}88 \cdot 10^{-4} f + j(x_e - x_L''), \tag{7.161}$$

sendo x_L'' obtido das tabelas de *Fatores de Espaçamento Indutivo* em função de d_{rs} e x_e na Tab. III.13 em função de ρ.

7.11.3 — Linha Trifásica a Circuito Duplo com Dois Cabos Pára-Raios

Admitamos que a linha seja simétrica com relação ao seu eixo longitudinal e que ambos os circuitos sejam iguais, com correntes $\dot{I}_o$ [A] em cada condutor de fase. Lançamos mão do processo de sobreposição. As impedâncias próprias de cada circuito são aquelas determinadas no item *b* para a linha simples, com dois cabos pára-raios. A impedância mútua poderá ser calculada a partir da equação:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_o \\ \dot{U}_o \\ \dot{U}_o \\ \hline 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{ccc|cc} \dot{z}_{ad} & \dot{z}_{ae} & \dot{z}_{af} & \dot{z}_{ar} & \dot{z}_{as} \\ \dot{z}_{bd} & \dot{z}_{be} & \dot{z}_{bf} & \dot{z}_{br} & \dot{z}_{bs} \\ \dot{z}_{cd} & \dot{z}_{ce} & \dot{z}_{cf} & \dot{z}_{cr} & \dot{z}_{cs} \\ \hline \dot{z}_{ar} & \dot{z}_{br} & \dot{z}_{cr} & \dot{z}_{rr} & \dot{z}_{rs} \\ \dot{z}_{as} & \dot{z}_{bs} & \dot{z}_{cs} & \dot{z}_{rs} & \dot{z}_{ss} \end{array}\right] \begin{bmatrix} \dot{I}_o \\ \dot{I}_o \\ \dot{I}_o \\ \hline \dot{I}_r \\ \dot{I}_s \end{bmatrix} \tag{7.162}$$

Admitindo valores médios, ou linha transposta, teremos a seguinte igualdade:

$$\dot{\bar{z}}_{ad} = \dot{z}_{be} = \dot{z}_{cf} = 9{,}8869 \cdot 10^{-4} f + + j28{,}935 \cdot 10^{-4} f \log \frac{D_e}{D_{\mathrm{I}}} \tag{7.163a}$$

$$= 9{,}8869 \cdot 10^{-4} \cdot f + j(x_e - x_{M_{\mathrm{I}}}) \tag{7.163b}$$

$$\dot{\bar{z}}_{ae} = \dot{z}_{af} = \dot{z}_{bd} = \dot{z}_{bf} = \dot{z}_{ed} = \dot{z}_{ce} = 9{,}8869 \cdot 10^{-4} \cdot f +$$

$$+ j28{,}935 \cdot 10^{-4} \cdot f \log \frac{D_e}{D_{\mathrm{II}}} \tag{7.164a}$$

$$= 9{,}8869 \cdot 10^{-4} \cdot f + j(x_e - x_{M_{\mathrm{II}}}) \tag{7.164b}$$

$$\dot{\bar{z}}_{ar} = \dot{z}_{br} = \dot{z}_{cr} = \dot{z}_{as} = \dot{z}_{bs} = \dot{z}_{cs} =$$

$$= 9{,}8869 \cdot 10^{-4} f + j28{,}935 \cdot 10^{-4} \cdot f \log \frac{D_e}{D_{m_r}} \tag{7.165a}$$

$$= 9{,}8869 \cdot 10^{-4} f + j(x_e - x_L''). \tag{7.165b}$$

Neste caso x_L'' é obtido em função de:

$$D_{m_r} = \sqrt[3]{d_{ar}d_{br}d_{cr}d_{as}d_{bs}d_{cs}} \tag{7.166}$$

das tabelas de fatores espaçamento indutivo.

Obtemos, então, apenas três equações:

$$\dot{U}_o = \dot{\bar{z}}_{ad}\dot{I}_o + 2\dot{\bar{z}}_{ae}\dot{I}_o + \dot{\bar{z}}_{ar}(\dot{I}_r + \dot{I}_s) \tag{7.167a}$$

$$0 = 3\dot{\bar{z}}_{ar}\dot{I}_o + \dot{\bar{z}}_{rr}\dot{I}_r + \dot{\bar{z}}_{rs}\dot{I}_s \tag{7.167b}$$

$$0 = 3\dot{\bar{z}}_{ar}\dot{I}_o + \dot{\bar{z}}_{rs}\dot{I}_r + \dot{\bar{z}}_{ss}\dot{I}_s. \tag{7.167c}$$

Sua solução será, para $\dot{z}_{o_M}$:

$$\dot{z}_{o_M} = \dot{z}_{ad} + 2\dot{\bar{z}}_{ae} - \frac{6\dot{\bar{z}}^2_{ar}}{\dot{\bar{z}}_{rr} + \dot{\bar{z}}_{rs}}. \tag{7.168}$$

Essa expressão pode ser usada, nas matrizes de impedâncias de seqüência nula para cálculos de curto-circuito, se deseja destacar a influência mútua de dois circuitos em paralelo.

A impedância de seqüência nula total por condutor de fase será obtida pela soma dos termos das Eqs. (7.152) e (7.163):

$$\dot{z}_o = \dot{z}_{oL} + \dot{z}_{oM} = \dot{\bar{z}}_{aa} + \dot{z}_{ad}$$

$$+ 2(\dot{\bar{z}}_{ab} + \dot{\bar{z}}_{ae}) - \frac{12\dot{\bar{z}}^2_{ar}}{\dot{z}_{rr} + \dot{z}_{rs}} \quad \text{[ohm/km]}. \tag{7.169}$$

Para linhas não idênticas em paralelo valem as mesmas considerações feitas para o cálculo das reatâncias de seqüência positiva.

A impedância de seqüência nula, por fase, da linha simples equivalente a uma linha a circuito duplo será igual ao valor obtido pela Eq. (7.169) dividido por 2:

$$\dot{z}_{oeq} = \frac{\dot{z}_o}{2} \quad \text{[ohm/km]}. \tag{7.170}$$

Com a eliminação de seus últimos termos, as Eqs. (7.168) e (7.169) poderão ser usadas em linhas a circuito duplo, sem cabos pára-raios, ou cabos pára-raios isolados.

Nota: Nos cálculos práticos de correntes de curto-circuito, é usual empregar apenas as reatâncias de seqüência nula ($X_o = I_m\{\dot{z}_o\}$), como também, sem perigo de incorrer um erro muito grande, se podem desprezar os últimos termos dos segundos membros das Eqs. (7.151), (7.159), (7.169), no caso das linhas que atravessam regiões de terrenos de baixas resistividades do solo ($\rho < 50$).

7.11.4 — Linhas com Condutores Múltiplos

O cálculo das impedâncias de seqüência nula em linhas com condutores múltiplos não altera o problema, bastando que, nas equações de $\dot{z}_a$, o valor de r_a corresponda à resistência de cada condutor múltiplo e, no cálculo da reatância, o *RMG* D_{s_a} seja substituído por D_{s_L}, como definido pela Eq. (7.111).

7.12 — LINHAS COM DESEQUILÍBRIO ELETROMAGNÉTICO

Como já foi mencionado anteriormente, existe uma tendência ao abandono das transposições em linhas de altas e altíssimas tensões. O desequilíbrio eletromagnético disso resultante é, em geral, pequeno, mas poderá atingir valores tais, que produza correntes de seqüência nula não inteiramente desprezíveis e que possam mesmo interferir com os esquemas de proteção. Não cabe neste texto mais do que essa advertência e a sugestão para que o leitor recorra aos artigos da bibliografia indicada no fim deste capítulo [12, 13 e 14] e à nota de rodapé do Item 7.11.

7.13 — EXERCÍCIOS

1. Calcular a reatância indutiva de uma linha rural monofásica construída com 2 condutores de cobre maciço n.º 6 AWG, espaçados entre si de 2,24 [m]. Freqüência 60 [Hz].

Solução

O cálculo poderá ser realizado para a obtenção da reatância em [ohm/km] de condutor ou em [ohm/km] de linha. Teremos:

a — por condutor:

$$L_a = 4{,}6052 \cdot 10^{-4} \log \frac{d_{ab}}{D_{s_a}} \quad \text{[henry/km]};$$

da tabela de características dos condutores obtemos:

$$D_{s_a} = 0{,}001603 \quad \text{[m]};$$

logo,

$$L_a = 4{,}6052 \cdot 10^{-4} \log \frac{2{,}24}{0{,}001603} = 4{,}6052 \cdot 10^{-4}$$

$$\log 1\,397{,}38$$

$$L_a = 1{,}44848 \quad \text{[mH/km]}$$

$$x_{L_a} = 2\pi f \cdot 1{,}448480 \cdot 10^{-3} = 0{,}54600 \text{ [ohm/km]};$$

b — por circuito monofásico:

$$L_a = 9{,}2104 \cdot 10^{-4} \log \frac{d_{ab}}{D_{s_a}} \quad \text{[henry/km] de linha};$$

$$L_a = 9{,}2104 \cdot 10^{-4} \log \frac{2{,}24}{0{,}001603} = 2{,}89696 \quad \text{[mH/km]}$$

$$x_{L_a} = 2\pi f \cdot 2{,}89696 \cdot 10^{-3} = 1{,}09215 \text{ [ohm/km]}.$$

2. Admitindo que os dois condutores da linha do Exerc. 1 estejam a uma altura média de 6,78 [m] sobre o solo, determinar sua reatância indutiva, considerando solo ideal.

Solução

De acordo com a Eq. (7.38) teremos, considerando na linha monofásica $\dot{I}_b = -\dot{I}_a$:

$$\begin{bmatrix} x_{L_a} \\ x_{L_b} \end{bmatrix} = 4\pi f\, 10^{-4} \begin{bmatrix} Ln \dfrac{2h_a}{r'_a} & -Ln \dfrac{D_{ab}}{d_{ab}} \\ -Ln \dfrac{D_{ab}}{d_{ab}} & Ln \dfrac{2h_a}{r'_b} \end{bmatrix} \quad \text{[ohm/km]},$$

logo, para $f = 60$ [Hz]:

$$x_{L_a} = 753{,}98224 \cdot 10^{-4} \left[Ln \frac{2h_a}{r'_a} - Ln \frac{D_{ab}}{d_{ab}} \right] \quad \text{[ohm/km]}$$

para

$$h_a = 6{,}78 \text{ [m]}, \; r'_a = 0{,}001603 \text{ [m]}$$

$$D_{ab} = \sqrt{(15)^2 + (2{,}24)^2} = 15{,}1633 \text{ [m]}$$

$$d_{ab} = 2{,}24 \text{ [m]}$$

$$x_{L_a} = 753{,}98224 \cdot 10^{-4} \left[Ln \frac{13{,}56}{0{,}001603} - Ln \frac{15{,}1633}{2{,}24} \right]$$

$$x_{L_a} = 0{,}537634 \text{ [ohm/km]}.$$

Observação: Comparando esse resultado com o do exercício anterior, verificamos que o erro relativo causado pela não consideração do efeito do solo é de 0,153%. Portanto, para esse tipo de linhas pode-se desprezar a presença do solo no cálculo das reatâncias indutivas de seqüência positiva.

3. Uma linha monofásica *sui generis* foi construída empregando-se 3 condutores ACSR 4/0 AWG espaçados entre si de 1 [m]. O retorno foi construído com 2 cabos de cobre 4/0 AWG, distanciados entre si, como mostra a Fig. 7.26, de 2 [m]. A distância entre os condutores de ida e os de retorno é de 1 [m]. Calcular a reatância indutiva unitária de cada um dos condutores e a reatância indutiva unitária da linha, para 60 [Hz].

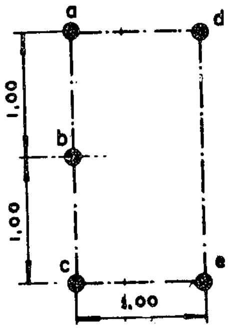


Fig. 7.26 — *Linha do Exerc. 3.*

Solução

Empregamos a Eq. (7.54), para a qual devemos calcular:

$$D_m = \sqrt[m \cdot n]{d_{ad} \cdot d_{ae} \cdot d_{bd} \cdot d_{be} \cdot d_{cd} \cdot d_{ce}} \qquad \text{(Eq. 7.52)}$$

$$D^*_{s_a} = \sqrt[9]{D^3_{s_a} \, d^2_{ab} \, d^2_{bc} \, d^2_{ac}} \qquad \text{(Eq. 7.53)}$$

$$D^*_{s_b} = \sqrt[4]{D^2_{s_b} \, d^2_{de}}.$$

Teremos:

$$d_{ad} = 1{,}00; \; d_{ae} = 2{,}235; \; d_{bd} = 1{,}414;$$

$$d_{be} = 1{,}414; \; d_{ce} = 2{,}235; \; d_{cd} = 1{,}00;$$

logo,

$$D_m = \sqrt[6]{(1)^2 \cdot (2{,}235)^2 \cdot (1{,}414)^2} = \sqrt[3]{3{,}16} = 1{,}465 \text{ [m]}.$$

Das tabelas dos condutores obtemos:

$$D_{s_a} = 0{,}00248$$

$$D_{s_b} = 0{,}004813;$$

logo,

$$D^*_{s_a} = \sqrt[9]{(2{,}480 \cdot 10^{-3})^3 \cdot 1^2 \cdot 2^2 \cdot 1^2} = 10^{-1} \sqrt[9]{52{,}1}$$

$$D^*_{s_b} = \sqrt[4]{(4{,}813 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 2^2} = 10^{-2} \sqrt[4]{92{,}5}$$

$$D^*_{s_a} = 0{,}155 \text{ [m]}$$

$$D^*_{s_b} = 0{,}031 \text{ [m]}.$$

Teremos então:

$$L_a = 4{,}6052 \cdot 10^{-4} \log \frac{1{,}465}{0{,}155} = 4{,}48 \cdot 10^{-4} \text{ [H/km]}$$

$$L_b = 4{,}6052 \cdot 10^{-4} \log \frac{1{,}465}{0{,}031} = 7{,}72 \cdot 10^{-4} \text{ [H/km]}$$

$$L_{ab} = 4{,}6052 \cdot 10^{-4} \log \frac{(1{,}465)^2}{0{,}155 \cdot 0{,}031} = 12{,}2 \cdot 10^{-4} \text{ [H/km]}$$

$$x_{L_a} = w \cdot 4{,}48 \cdot 10^{-4} = 0{,}1688 \text{ [ohm/km]}$$

$$x_{L_b} = w \cdot 7{,}72 \cdot 10^{-4} = 0{,}2910 \text{ [ohm/km]}$$

$$x_{L_{ab}} = w \cdot 12{,}2 \cdot 10^{-4} = 0{,}4598 \text{ [ohm/km]}.$$

4. Um cabo CA é composto de 7 tentos de 4,8006 [mm] de diâmetro. Qual é o seu *RMG*? (Fig. 7.27.)

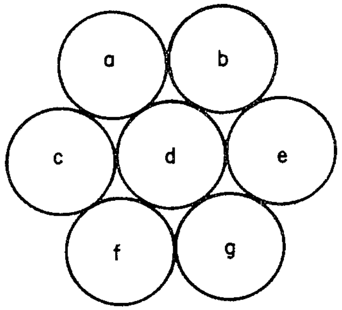


Fig. 7.27 — *Cabo de alumínio CA de 7 tentos.*

Solução

Para $n = 7$, $n^2 = 49$, logo, há 49 produtos de distâncias:

$$d_{ab} = d_{af} = 2r$$

$$d_{ad} = 4r$$

$$d_{ac} = d_{ae} = 2\sqrt{3}\ r;$$

logo,

$r' = 0{,}7788\,r$	7 termos
$2r =$	24 termos
$4r =$	6 termos
$2\sqrt{3r} =$	12 termos
	49 termos

logo,

$$D_s = \sqrt[49]{(r')^7\,(2r)^{24}\,(4r)^6\,(2\sqrt{3}r)^{12}}\ ;$$

logo,

$$D_s = 2{,}177\ r = 2{,}177 \cdot 2{,}4003 = 5{,}215\ [\text{mm}].$$

5. Determinar a expressão para o cálculo, em função de r, do *RMG* de um cabo CAA 6/1, admitindo que a sua alma de aço não participe da condução da corrente.

6. Uma linha primária rural de 13,8 [kV] é construída de acordo com a norma PB-45, com cabos CAA n.º 4 *AWG*. Determinar as reatâncias indutivas aparentes de cada fase e a reatância indutiva de serviço, ou de seqüência positiva.

Solução

De acordo com a norma acima mencionada, a montagem dos cabos é feita sobre cruzetas padronizadas, com espaçamentos indicados na Fig. 7.28. Teremos, desprezando o efeito do solo ideal, as Eqs. (7.59) e (7.60) devidamente modificadas:

$$f_{ii} = 4{,}6052 \cdot 10^{-4} \log \frac{1}{D_s}\ [\text{H/km}]$$

$$f_{ij} = 4{,}6052 \cdot 10^{-4} \log \frac{1}{d_{ij}}\ [\text{H/km}];$$

das tabelas de características de cabos, obtemos para o cabo CAA n.º 4 AWG:

$$[D_s = 0{,}00127\ [\text{m}];]$$

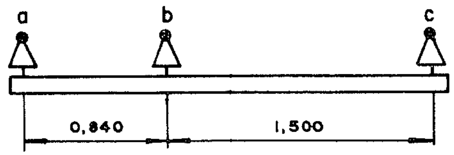


Fig. 7.28 — *Cruzeta para 15 [kV].*

logo,

$$f_{aa} = 4.6052 \cdot 10^{-4} \log \frac{10^5}{127} = 1{,}333756 \cdot 10^{-3}\ [\text{H/km}]$$

$$f_{bc} = 4{,}6052 \cdot 10^{-4} \log \frac{1}{1{,}5} = -\ 0{,}0810935 \cdot 10^{-3}\ [\text{H/km}]$$

$$f_{ab} = 4{,}6052 \cdot 10^{-4} \log \frac{1}{0{,}84} = +\ 0{,}0348709 \cdot 10^{-3}\ [\text{H/km}]$$

$$f_{ac} = 4{,}6052 \cdot 10^{-4} \log \frac{1}{2{,}38} = -\ 0{,}1734212 \cdot 10^{-3}\ [\text{H/km}].$$

De acordo com a Eq. (7.65), encontraremos:

$$L_a = f_{aa} - \frac{1}{2}(f_{ab} + f_{ac}) = \left[1{,}333756 - \frac{1}{2}(0{,}0348709 - 0{,}1734212)\right]10^{-3}$$

$$L_a = 1{,}403031 \cdot 10^{-3}\ [\text{H/km}]$$

$$L_b = f_{bb} - \frac{1}{2}(f_{ab} + f_{bc}) = \left[1{,}333756 - \frac{1}{2}(0{,}0348709 - 0{,}0810935)\right]10^{-3}$$

$$L_b = 1{,}356867 \cdot 10^{-3}\ [\text{H/km}]$$

$$L_c = f_{cc} - \frac{1}{2}(f_{ac} + f_{bc}) = \left[1{,}333756 = \frac{1}{2}(-0{,}1734212 - 0{,}0810935)\right]10^{-3}$$

$$L_c = 1{,}461013 \cdot 10^{-3}\ [\text{H/km}].$$

As reatâncias indutivas a 60 [Hz], calculadas a partir dos valores acima, são:

$$x_{L_A} = 0{,}528943\ [\text{ohm/km}];$$

$$x_{L_B} = 0{,}511539\ [\text{ohm/km}];$$

$$x_{L_C} = 0{,}550802\ [\text{ohm/km}].$$

A reatância indutiva de seqüência positiva será:

$$x_L = 0{,}530428\ [\text{ohm/km}].$$

A reatância de seqüência positiva ou de serviço também poderia ter sido determinada pela expressão (7.73*c*):

$$x_L = 28{,}935325 \cdot 10^{-4} f \log \frac{D_m}{D_s}\ [\text{ohm/km}]$$

para 60 [Hz] e $D_m = \sqrt[3]{1{,}5 \cdot 0{,}84 \cdot 2{,}34} = 1{,}434$ [m]

$$x_L = 0{,}174 \log \frac{1{,}434}{0{,}00127} = 0{,}53117\ [\text{ohm/km}]$$

ou ainda, com o emprego das tabelas de cálculo:

$$x_L = x'_L + x''_L.$$

Na tabela de reatâncias indutivas a 1 [m] dos cabos CAA encontramos, para o cabo n.º 4 AWG:

$$x'_L = 0{,}502895\ [\text{ohm/km}].$$

Da tabela do fator de espaçamento indutivo, para $D_m = 1{,}434$ [m], encontramos:

$$x''_L = 0{,}02711;$$

logo,

$$x_L = x'_L + x''_L = 0{,}502895 + 0{,}02711 = 0{,}530005\ [\text{ohm/km}].$$

7. Repetir o exercício anterior, considerando a presença do solo ideal, a uma altura média de 8,00 [m] sob a linha.

Solução

Neste caso, de acordo com as Eqs. (7.42) e (7.43), os coeficientes de campo se tornam:

$$f_{ii} = k\, Ln \frac{2h_i}{r_i'} \qquad \text{(Eq. 7.42)}$$

$$f_{ij} = k\, Ln \frac{D_{ij}}{d_{ij}}. \qquad \text{(Eq. 7.43)}$$

Temos:

$d_{ab} = 0{,}840$ [m]; $h_a = h_b = h_c = 8{,}00$ [m]

$d_{bc} = 1{,}500$ [m]; $r'_i = 0{,}00127$ [m]

$d_{ac} = 2{,}340$ [m].

As distâncias entre condutores e suas imagens podem ser expressas em função de h_i, h_j e d_{ij}. Através da geometria pode-se verificar que:

$$D_{ij} = \sqrt{4h_i \cdot h_j + d_{ij}^2}$$

$$D_{ab} = \sqrt{4 \cdot 8{,}00 \cdot 8{,}00 + (0{,}84)^2} = 16{,}022035\ [\text{m}]$$

$$D_{bc} = \sqrt{4 \cdot 8{,}00 \cdot 8{,}00 + (1{,}50)^2} = 16{,}070159\ [\text{m}]$$

$$D_{bc} = \sqrt{4 \cdot 8{,}00 \cdot 8{,}00 + (2{,}38)^2} = 16{,}176044\ [\text{m}].$$

Os coeficientes de campo se tornam:

$$f_{aa} = f_{bb} = f_{cc} = 2 \cdot 10^{-4}\, Ln \frac{2 \cdot 8{,}00}{0{,}00127} = 1{,}88826 \cdot 10^{-3}\ [\mathrm{H/km}]$$

$$f_{ab} = 2 \cdot 10^{-4}\, Ln \frac{16{,}022035}{0{,}84} = 0{,}589664 \cdot 10^{-3}\ [\mathrm{H/km}]$$

$$f_{bc} = 2 \cdot 10^{-4}\, Ln \frac{16{,}070159}{1{,}50} = 0{,}4742998 \cdot 10^{-3}\ [\mathrm{H/km}]$$

$$f_{ac} = 2 \cdot 10^{-4}\, Ln \frac{16{,}176044}{2{,}38} = 0{,}383286 \cdot 10^{-3}\ [\mathrm{H/km}].$$

As indutâncias aparentes são:

$$L_a = f_{aa} - \frac{1}{2}(f_{ab} + f_{ac}) - \left[1{,}88826 - \frac{1}{2}(0{,}589664 + 0{,}383286)\right] 10^{-3}$$

$$L_a = 1{,}401785 \cdot 10^{-3}\ [\mathrm{H/km}]$$

$$L_b = f_{bb} - \frac{1}{2}(f_{ab} + f_{bc}) = \left[1{,}88826 - \frac{1}{2}(0{,}589664 + 0{,}472998)\right] 10^{-3}\ [\mathrm{H/km}]$$

$$L_b = 1{,}356929 \cdot 10^{-3}\ [\mathrm{H/km}]$$

$$L_c = f_{cc} - \frac{1}{2}(f_{ac} + f_{bc}) = \left[1{,}88826 - \frac{1}{2}(0{,}383286 + 0{,}472998)\right] 10^{-8}$$

$$L_c = 1{,}460118 \cdot 10^{-3}\ [\mathrm{H/km}].$$

As reatâncias indutivas aparentes são:

$$x_{L_a} = 0{,}52847\ [\mathrm{ohm/km}]$$

$$x_{L_b} = 0{,}51156\ [\mathrm{ohm/km}]$$

$$x_{L_c} = 0{,}55046\ [\mathrm{ohm/km}].$$

A reatância indutiva de seqüência positiva, ou de serviço, será:

$$x_L = 0{,}530163\ [\mathrm{ohm/km}].$$

Nota: Comparando os resultados com os do exercício anterior, observamos:

a — o efeito do solo é marcante nos valores dos coeficientes de campo;

b — a diferença entre os valores das reatâncias de seqüência positiva é da ordem de 0,05%;

c — a maior diferença observada nos valores das reatâncias aparentes é de 0,08%.

8. Calcular as reatâncias indutivas aparentes e de seqüência positiva para a linha de transmissão da Fig. 7.29 da classe de 66/69 [kV], 60 [Hz], construída com cabos CA — Código OXLIP e empregando como pára-raios um cabo de RMG = 0,000897 [m], aterrado em todas as estruturas. Flecha média dos condutores 1,5 [m]. Flecha média do cabo pára-raios 1,2 [m]. Resistividade do solo ρ = 100 [ohm/m³].

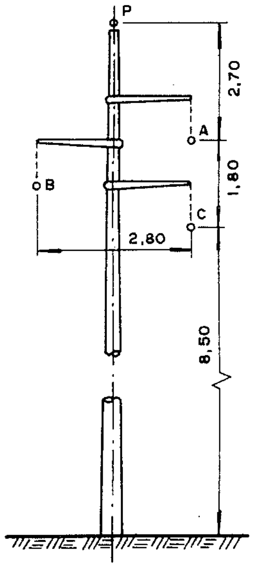


Fig. 7.29 — *Linha de 69 [kV] para os Exercs. 8 (do Cap. 7) e 5 (do Cap. 8).*

Os RMG dos cabos são:

a — condutores — D_s = 0,004812 [m] (Tab. III.2);

b — pára-raios — D_{s_r} = 0,000897 [m].

A — Relações geométricas

Da Fig. 7.27 obtemos:

a — alturas médias dos condutores: aplicando a Eq. (7.39):

$$h_i = H_i - 0{,}7\, f_i$$

$$h_a = 9{,}25\ [\text{m}]$$

$$h_b = 8{,}35\ [\text{m}]$$

$$h_c = 7{,}45\ [\text{m}]$$

$$h_p = 12{,}16\ [\text{m}];$$

b — distâncias entre condutores: da geometria:

$$d_{ab} = d_{bc} = 2{,}94\ [\text{m}];\ d_{ap} = 3{,}05\ [\text{m}];\ d_{cp} = 4{,}8\ [\text{m}]$$

$$d_{ac} = 1{,}80\ [\text{m}];\ d_{bp} = 3{,}91\ [\text{m}];$$

c — distâncias entre condutores e imagens:

$$D_{ij} = \sqrt{4\, h_i h_j + d_{ij}^2}$$

$$D_{ab} = 17{,}82\ [\text{m}]; \qquad D_{ap} = 21{,}43\ [\text{m}]$$

$$D_{ac} = 16{,}70\ [\text{m}]; \qquad D_{bp} = 20{,}53\ [\text{m}]$$

$$D_{bc} = 16{,}05\ [\text{m}]; \qquad D_{cp} = 19{,}63\ [\text{m}].$$

B — Matriz das reatâncias indutivas.

a — Sem considerar o plano de solo.

Empregaremos a Eq. (7.74), com os coeficientes de campo determinados por meio das Eqs. (7.59) e (7.60) para $2h_1 = D_{ij} = 1$:

$$[x_L] = \omega [F]\ [\text{ohm/km}].$$

Sendo:

$$f_{ii} = 4{,}6052 \cdot 10^{-4} \log \frac{1}{D_{s_i}} \qquad \text{(Eq. 7.59)}$$

$$f_{ij} = 4{,}6052 \cdot 10^{-4} \log \frac{1}{d_{ii}}, \qquad \text{(Eq. 7.60)}$$

a matriz será, considerando que é simétrica:

$$[x_L] = \begin{bmatrix} 0{,}4024 & -0{,}0813 & -0{,}0459 & -0{,}0841 \\ — & 0{,}4024 & -0{,}0813 & -0{,}1028 \\ — & — & 0{,}4024 & -0{,}1183 \\ — & — & — & 0{,}5290 \end{bmatrix}$$

Essa matriz pode ser reduzida à matriz da linha trifásica equivalente, subtraindo da mesma a matriz de redução (Eq. 7.82), cujos termos são:

— na diagonal: $\Delta x_{ii} = \dfrac{\omega f_{ir}^2}{f_{rr}}$;

— fora da diagonal: $\Delta x_{ij} = \omega \dfrac{f_{ir} \cdot f_{ir}}{f_{rr}}$;

$$[\Delta x_L] = \begin{bmatrix} 0{,}0134 & 0{,}0163 & 0{,}0188 \\ — & 0{,}0200 & 0{,}0230 \\ — & — & 0{,}0265 \end{bmatrix};$$

portanto:

$$[x_{Leq}] = \begin{bmatrix} 0{,}3890 & -0{,}0976 & -0{,}0648 \\ — & 0{,}3824 & -0{,}1043 \\ — & — & 0{,}3759 \end{bmatrix}$$

As reatâncias aparentes são:

$$x_a = 0{,}4702\ [\text{ohm/km}]$$

$$x_b = 0{,}4834\ [\text{ohm/km}]$$

$$x_c = 0{,}4605\ [\text{ohm/km}]$$

A reatância indutiva de seqüência positiva é:

$$x_{11} = 0{,}4714\ [\text{ohm/km}].$$

b — Considerando um plano de solo ideal

Podemos empregar a Eq. (7.73) com os coeficientes de campo definidos pelas Eqs. (7.59) e (7.60):

$$f_{ii} = 4{,}6052 \cdot 10^{-4} \log \frac{2h_i}{D_{s_i}}$$

$$f_{ij} = 4{,}6052 \cdot 10^{-4} \log \frac{D_{ij}}{d_{ij}}$$

ou, como alternativa, podemos determinar uma matriz de correção cujos elementos serão:

— na diagonal: $\Delta f_{ii} = 4{,}6052 \cdot 10^{-4} \log 2h_i$;

— fora da diagonal: $\Delta f_{ij} = 4{,}6052 \cdot 10^{-4} \log D_{ij}$,

obtendo-se a matriz das reatâncias indutivas:

$$[x_L] = \omega\,[F] + \omega\,[\Delta F]$$

para o presente exercício:

$$\omega[\Delta F] = \begin{bmatrix} 0{,}2200 & 0{,}2172 & 0{,}2123 & 0{,}2311 \\ — & 0{,}2123 & 0{,}2093 & 0{,}2276 \\ — & — & 0{,}2037 & 0{,}2245 \\ — & — & — & 0{,}2406 \end{bmatrix}$$

A matriz das reatâncias indutivas será:

$$[x_L] = \begin{bmatrix} 0{,}6224 & 0{,}1359 & 0{,}1664 & 0{,}1470 \\ — & 0{,}6147 & 0{,}1280 & 0{,}1248 \\ — & — & 0{,}6061 & 0{,}1062 \\ — & — & — & 0{,}7696 \end{bmatrix}$$

A matriz da linha trifásica, sem cabos pára-raios, equivalente será:

$$[x_{Leq}] = \begin{bmatrix} 0{,}5943 & 0{,}1120 & 0{,}1477 \\ — & 0{,}5945 & 0{,}1108 \\ — & — & 0{,}5914 \end{bmatrix}$$

As reatâncias indutivas aparentes serão:

$$x_a = 0{,}4645;$$
$$x_b = 0{,}4831;$$
$$x_c = 0{,}4622.$$

A reatância indutiva de seqüência positiva será:

$$x = 0{,}4700\ [\Omega/\text{km}].$$

C — Considerando o solo real com $\rho = 100$ [ohm/m²]

— *Processo simplificado*

A matriz das reatâncias indutivas, na qual não foi considerado o solo (caso *a*), poderá ser utilizada, bastando que a cada um de seus elementos acrescentemos o termo:

$$4{,}6052 \cdot 10^{-4} \cdot \omega \log D_e.$$

Conforme podemos concluir pela comparação das Eqs. (7.59) e (7.130), sendo:

$$D_e = 658{,}368\sqrt{\rho/f} \qquad \text{(Eq. 7.132)}$$

para o caso presente, teremos: $\rho = 100$ e $f = 60$:

$$D_e = 849{,}9494\ [\text{m}]$$

e o termo de correção será:

$$\Delta x_L = 0{,}5085\ [\Omega/\text{km}].$$

A matriz das reatâncias será:

$$[x_L] = \left[\begin{array}{ccc|c} 0{,}9109 & 0{,}4272 & 0{,}4626 & 0{,}4244 \\ — & 0{,}9109 & 0{,}4272 & 0{,}4057 \\ — & — & 0{,}9109 & 0{,}3902 \\ \hline — & — & — & 1{,}0375 \end{array}\right]$$

e sua matriz reduzida:

$$[x_{Leq}] = \begin{bmatrix} 0{,}7373 & 0{,}2612 & 0{,}3030 \\ & 0{,}7511 & 0{,}2746 \\ & & 0{,}7641 \end{bmatrix}$$

As reatâncias indutivas de serviço serão:

$$x_a = 0{,}4552 \text{ [ohm/km]};$$

$$x_b = 0{,}4832 \text{ [ohm/km]};$$

$$x_c = 0{,}4753 \text{ [ohm/km]}.$$

A reatância indutiva de seqüência positiva será:

$$x_{11} = 0{,}4712 \text{ [ohm/km]}.$$

— *Processo exato*: $\rho = 100$ [ohm/m³]

Seguindo o processo delineado no Item 7.10.2, de acordo com a Eq. (7.126), teremos a seguinte equação para os termos de correção:

$$\Delta x_c = 0{,}002513 \left[-0{,}0386 + \frac{1}{2} Ln \frac{2}{p} + \frac{1}{3\sqrt{2}} p \cos\theta \right]. \quad \text{(Eq. 7.126)}$$

Essa equação é válida para todos os elementos da matriz, variando p e θ para os termos da diagonal e para os termos fora da diagonal.

1 — Termos da diagonal:

$$\theta = 0$$

$$p_i = 5{,}620 \cdot 10^{-3} h_i \sqrt{\frac{f}{\rho}} \quad \text{(Eq. 7.122)}$$

Introduzindo os valores de h_i, f e ρ, teremos:

$$p_a = 40{,}26741 \cdot 10^{-3}; \quad p_c = 32{,}43159 \cdot 10^{-3};$$

$$p_b = 36{,}34950 \cdot 10^{-3}; \quad p_p = 52{,}93532 \cdot 10^{-3}.$$

2 — Termos fora da diagonal:

$$\theta_{ij} = \text{tg}^{-1} \frac{x_{ij}}{h_i + h_j} \quad \text{(Eq. 7.123)}$$

$$p_{ij} = 28{,}1004 \cdot 10^{-4} D_{ij} \sqrt{\frac{f}{\rho}}. \quad \text{(Eq. 7.124)}$$

Substituindo os valores de h_i, h_j, D_{ij}, f e ρ:

$$\theta_{ab} = 9{,}0396° = 0{,}15777 \text{ rad}; \quad p_{ab} = 38{,}7879 \cdot 10^{-3}$$

$$\theta_{ac} = 9{,}5180° = 0{,}16612 \text{ rad}; \quad p_{ac} = 36{,}3500 \cdot 10^{-3}$$

$$\theta_{bc} = 10{,}0491° = 0{,}17539 \text{ rad}; \quad p_{bc} = 34{,}9352 \cdot 10^{-3}$$

$$\theta_{ap} = 3{,}7414° = 0{,}06530 \text{ rad}; \quad p_{ap} = 46{,}6455 \cdot 10^{-3}$$

$$\theta_{bp} = 3{,}9047° = 0{,}06815 \text{ rad}; \quad p_{bp} = 44{,}6866 \cdot 10^{-3}$$

$$\theta_{cp} = 4{,}0835° = 0{,}07127 \text{ rad}; \quad p_{cp} = 42{,}7276 \cdot 10^{-3}$$

A matriz de correção será, então:

$$[\Delta x_{corr}] = \begin{bmatrix} 0{,}2900 & 0{,}2928 & 0{,}3032 & 0{,}2792 \\ — & 0{,}2976 & 0{,}3006 & 0{,}2824 \\ — & — & 0{,}3061 & 0{,}2857 \\ & & — & 0{,}2699 \end{bmatrix}$$

Somando a matriz de correção à matriz das reatâncias indutivas da linha com solo ideal (caso *b*), teremos:

$$[x_{Lcorr}] = \left[\begin{array}{ccc|c} 0{,}9124 & 0{,}4287 & 0{,}4694 & 0{,}4262 \\ — & 0{,}9123 & 0{,}4286 & 0{,}4072 \\ — & — & 0{,}9122 & 0{,}3919 \\ \hline — & — & — & 1{,}0395 \end{array}\right] \text{ [ohm/km]}.$$

A matriz da linha trifásica, sem cabos pára-raios, equivalente será:

$$[x_{Leq}] = \begin{bmatrix} 0{,}7377 & 0{,}2617 & 0{,}3089 \\ — & 0{,}7528 & 0{,}2751 \\ — & — & 0{,}7645 \end{bmatrix} \text{ [ohm/km]}.$$

As reatâncias indutivas aparentes serão:

$$x_a = 0{,}4524 \text{ [ohm/km]};$$

$$x_b = 0{,}4846 \text{ [ohm/km]};$$

$$x_c = 0{,}4725 \text{ [ohm/km]}.$$

A reatância de seqüência positiva será:

$$x_{11} = 0{,}4698 \quad [\text{ohm/km}].$$

Comentário

A tabela que se segue apresenta os resultados obtidos pelas diversas maneiras de calcular empregadas:

	Sem Efeito do Solo	*Com Efeito do Solo — ρ = 100 Ω/m³*		
		Solo Ideal	*Solo Real — Método Simplificado*	*Solo Real — Método Exato*
x_a	0,4702	0,4645	0,4552	0,4525
x_b	0,4834	0,4831	0,4832	0,4846
x_c	0,4605	0,4622	0,4753	0,4725
x_{11}	0,4714	0,4700	0,4712	0,4698

Comparando os resultados, verificamos que o efeito do solo é mais marcante nas reatâncias aparentes, enquanto que, nas reatâncias de seqüência positiva, sua influência praticamente não se faz sentir, podendo-se mesmo atribuir boa parte das diferenças observadas a erros nas aproximações no desenrolar dos cálculos. A diferença de valores atribuível ao fato de se considerar ou não o solo perfeito pode ser verificada pelo segundo termo do segundo membro da Eq. (7.73):

$$\Delta x_L = 28{,}935 \cdot 10^{-4} f \log \frac{2h_m}{D_{mi}}$$

$$\Delta x_L = 28{,}935 \cdot 10^{-4} f \log \frac{\sqrt[3]{h_a h_b h_c}}{\sqrt[3]{D_{ab} D_{bc} D_{ac}}}$$

Substituindo os valores numéricos, teremos:

$$\Delta x_L = 0{,}0009.$$

Portanto, para o cálculo das reatâncias de seqüência positiva pode-se desprezar o efeito do solo. Como foi demonstrado no Item 7.6.2, os pára-raios são igualmente desprezados.

Podemos verificar numericamente a validade da Eq. (7.73c):

$$x_{11} = 28{,}935 \cdot 10^{-4} f \log \frac{D_m}{D_s}$$

para

$$D_m = \sqrt[3]{2{,}94 \cdot 2{,}94 \cdot 1{,}80} = 2{,}496 \text{ m}$$

$$D_s = 0{,}00812 \quad [\text{m}]$$

$$x_{11} = 0{,}4713 \quad [\text{ohm/km}].$$

9. Determinar a reatância indutiva de seqüência positiva da linha do exercício anterior, usando as tabelas de reatâncias indutivas do Ap. III.

10. Nos estudos preliminares de uma linha para T.E.E. — 750 [kV] foram fixadas as dimensões constantes da Fig. 7.30. Estudos econômicos indicaram para as fases 4 cabos CAA 1 351 CM (45 × 7), espaçados de 18″ e para os cabos pára-raios, em número de dois, cabos Alumo weld/ 7 × 5 AWG. Flecha dos condutores na condição diária, 12,80 [m], e dos cabos pára-raios, 11,5 [m]. A linha atravessa terrenos variados, podendo-se admitir a resistividade média do solo igual a 100 [ohm/m³]. Determinar a reatância indutiva de seqüência positiva considerando todos os fatores intervenientes, comparando os resultados com aqueles obtidos por meio das tabelas do Ap. III.

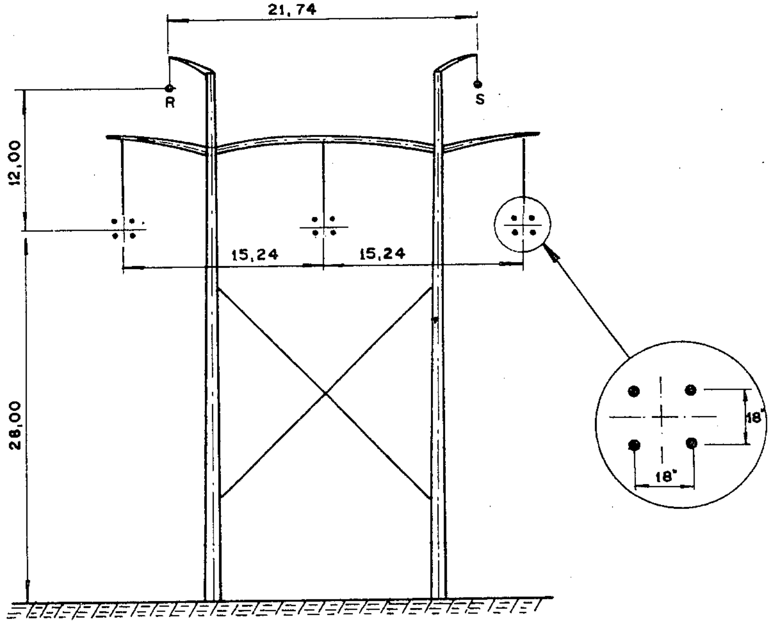


Fig. 7.30 — *LT de 750 kV do Exerc. 10.*

11. Repetir o exercício anterior, considerando os cabos pára-raios isolados.

12. Determinar, para a linha descrita no Exerc. 8 (do Cap. 8) e ilustrada na Fig. 8.23, as reatâncias de seqüências positiva e nula, empregando a matriz $[x_{eq}]$ e as equações diretas. Fatores de correção do solo pelo método aproximado, para $\rho = 100$ [ohm/m³].

Solução do Exerc. 8 do Cap. 8

$$h_a = h_b = h_c = 19{,}5 - 0{,}7 \cdot 9{,}7 = 12{,}7 \quad [\text{m}]$$

$$h_r = 29{,}5 - 0{,}7 \cdot 9{,}0 = 23{,}2 \quad [\text{m}]$$

$$d_{ab} = d_{bc} = 10{,}0 \quad [\text{m}]$$

$$d_{ac} = 20{,}0 \quad [\text{m}]$$

$$d_{ap} = d_{cq} = 10{,}98 \quad [\text{m}]$$

$$d_{bp} = d_{bq} = 12{,}51 \quad [\text{m}]$$

$$d_{aq} = d_{cp} = 19{,}81 \quad [\text{m}].$$

— Do Ex. 8 do Cap. 7:

$$D_e = 849{,}9494 \quad [\text{m}].$$

— Da tabela dos condutores III.3:

$$D_s = 0{,}01021 \quad [\text{m}];$$

logo,

$$D_{s_L} = \sqrt[2]{0{,}01021 \cdot 0{,}40} = 0{,}06391 \quad [\text{m}].$$

— Da tabela dos cabos pára-raios: Tab. III.12*a* para HSS — 1/2″, para 30 [A]:

$$D_{s_r} = 3{,}54463 \cdot 10^{-9} \quad [\text{m}].$$

Com os dados acima, construímos a matriz das reatâncias indutivas:

$$[x_L] = \begin{array}{c} \qquad\qquad F_1 \qquad\qquad\qquad\qquad F_2 \\ \left[\begin{array}{ccc|cc} 0{,}8027 & 0{,}4217 & 0{,}3695 & 0{,}5953 & 0{,}3702 \\ 0{,}4217 & 0{,}8027 & 0{,}4217 & 0{,}4049 & 0{,}4049 \\ 0{,}3695 & 0{,}4217 & 0{,}8027 & 0{,}3702 & 0{,}5953 \\ \hline 0{,}5953 & 0{,}4049 & 0{,}3703 & 2{,}0624 & 0{,}3986 \\ 0{,}3703 & 0{,}4049 & 0{,}5953 & 0{,}3986 & 2{,}0624 \end{array}\right] \\ \qquad\qquad F_3 \qquad\qquad\qquad\qquad F_4 \end{array}$$

Efetuando a redução da matriz para a matriz 3 × 3 equivalente, usando a técnica exposta no Item 7.6.2, empregando a Eq. (7.80):

$$[x_{eq}] = [F_1] - [F_2]\,[F_4]^{-1}\,[F_3];$$

logo,

$$[x_{eq}] = \begin{bmatrix} 0{,}5981 & 0{,}2628 & 0{,}1953 \\ 0{,}2628 & 0{,}6637 & 0{,}2628 \\ 0{,}1953 & 0{,}2628 & 0{,}5981 \end{bmatrix}$$

Teremos:

$$x_{11} = x_{22} = x_s = \overline{f}_{aa} - \overline{f}_{ab} = 0{,}6200 - 0{,}2403$$

$$x_{11} = x_{22} = x_s = 0{,}3797 \quad [\text{ohm/km}]$$

$$x_{oo} = \overline{f}_{aa} + 2\overline{f}_{ab} = 0.6200 + 2{,}02403$$

$$x_{oo} = 1{,}1006 \quad [\text{ohm/km}].$$

13. Repetir o exercício anterior, empregando as tabelas de reatâncias indutivas.

14. A linha de transmissão de 138 [kV] da U. H. de Itutinga à S. E. de Lavras, da CEMIG, construída com estruturas de concreto armado, como mostra a Fig. 7.31. São empregados condutores geminados CAA 2 × 4/0 (Penguin), admitindo um espaçamento de 0,40 [m] entre sub-

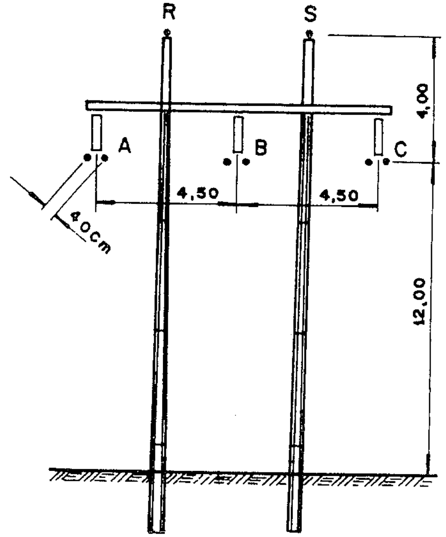


Fig. 7.31 — *LT de 138 [kV] dos Exercs. 14 (do Cap. 7) e 13 (do Cap. 8).*

condutores, com flecha média de 6,5 [m] e cabos pára-raios de aço HSS galvanizados, de diâmetro nominal igual a 5/16″, cuja flecha é de 6,00 m, calcular as reatâncias indutivas de seqüência positiva e nula.

15. As linhas de transmissão de 735 [kV] da *Hydro-Quebec* empregam 4 condutores CAA 1 351 MCM, composição 45/7, cujo *RMG* é de 0,0459 pés, espaçados de 18″. O espaçamento horizontal das fases é de 50 pés. Os dois pára-raios, constituídos por cabos de aço HSS de 7/16″ de diâmetro, estão separados entre si de 70,5 pés. Altura média dos condutores, 65 pés, e dos cabos pára-raios, 112,75 pés. Resistividade média do solo, 100 [ohm/m]. Calcular as reatâncias indutivas de seqüências positiva e nula.

16. Uma linha de 500 [kV] emprega 3 cabos CAA 954 MCM 54/7 por fase, espaçados de 18″, dispostos horizontalmente, com um espaçamento entre fases de 40 pés. Desprezando os efeitos do solo e dos pára-raios, determinar sua reatância indutiva de seqüência positiva.

17. A linha ilustrada na figura de um sistema de 138 [kV] (CESP) a circuito duplo é construída com condutores tipo CAA 266,8 MCM

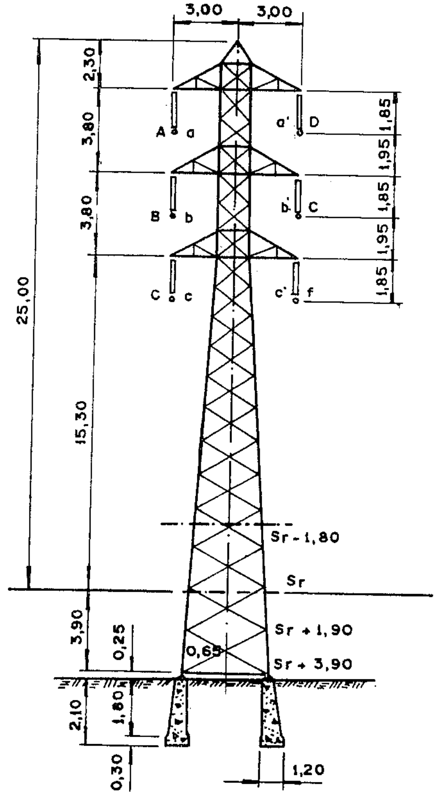


Fig. 7.32 — *LT de 138 kV — circuito duplo (Exerc. 17 dos Caps. 7 e 8).*

(Partridge), cujas flechas têm 6,5 [m]. Os cabos pára-raios são constituídos por cabos de aço galvanizado (7 fios) tipo HS, diâmetro nominal de 1/2″. Admitindo a resistividade média do terreno igual a 100 [ohm/m³], flechas dos pára-raios 6,0 [m], calcular:

a — reatâncias indutivas de seqüência positiva;

b — reatâncias indutivas de seqüência nula.

Solução

RMG cabos condutores — 0,00661 [m] (Tab. III.3).

RMG cabos pára-raios — $0{,}00564 \cdot 10^{-9}$ [m] (Tab. III.12*a*, para 30 [A]).

A — Empregando a Eq. (7.95)

Da geometria da linha (seqüência de fases indicadas):

$$D_m = \sqrt[3]{3{,}8 \cdot 3{,}8 \cdot 7{,}6} = 4{,}8 \quad [\text{m}];$$

$$D_{\text{II}} = \sqrt[6]{(7{,}1)^4 \cdot (9{,}7)^2} = 7{,}88 \quad [\text{m}];$$

$$D_{\text{I}} = \sqrt[3]{(6{,}0)^3} = 6{,}00 \quad [\text{m}].$$

a — Reatâncias de seqüência positiva:

$$x_{11} = 28{,}935 \cdot 10^{-4} \cdot f \log \frac{D_m}{D_s} \cdot \frac{D_{\text{II}}}{D_{\text{I}}}.$$

Introduzindo os valores, obtemos:

$$x_{11} = 0{,}5170 \text{ [ohm/km]}.$$

b — Reatância de seqüência positiva invertendo a seqüência de fases no circuito II:

$$D_{\text{II}} = \sqrt[6]{(6{,}00)^2 \cdot (7{,}1)^2 \cdot (9{,}7)^2} = 7{,}44 \quad [\text{m}];$$

$$D_{\text{I}} = \sqrt[3]{(9{,}2)^2 \cdot 6{,}00} = 8{,}28 \quad [\text{m}].$$

Teremos:

$$x_{11} = 0{,}4886 \quad [\text{ohm/km}].$$

B — Através da matriz das reatâncias corrigidas pelo processo de Carson simplificado

De acordo com a Eq. (7.85), a matriz das reatâncias indutivas da linha a circuito duplo será:

$$[x] = \left[\begin{array}{ccc|c} 0{,}2605 & 0{,}7686 & 0{,}6930 & 0{,}3813 \\ 0{,}7686 & 1{,}2605 & 0{,}7686 & 0{,}3461 \\ 0{,}6930 & 0{,}7686 & 1{,}2605 & 0{,}3186 \\ \hline 0{,}7626 & 0{,}6922 & 0{,}6372 & 2{,}4613 \end{array}\right].$$

A reatância indutiva de seqüência positiva por condutor será, se não considerarmos os efeitos dos cabos pára-raios:

$$x_{11} = \overline{x}_{aa} - \overline{x}_{ab} = 1{,}2605 - 0{,}7434$$

$$x_{11} = 0{,}5171 \quad [\text{ohm/km}].$$

A matriz das reatâncias indutivas não é simétrica neste caso. Sua redução à matriz 3 × 3 da linha trifásica simples equivalente é feita da seguinte maneira:

$$\left[\begin{array}{c} \dot{U}_F \\ \hline \dot{U}_{PR} \end{array}\right] = \left[\begin{array}{c|c} x_F & x_{FPR} \\ \hline x_{PRF} & x_{PR} \end{array}\right] \left[\begin{array}{c} \dot{I}_F \\ \hline \dot{I}_{PR} \end{array}\right]$$

$$[\dot{U}_F] = [x_F]\,[\dot{I}_F] + [x_{FPR}]\,[\dot{I}_{PR}]$$

$$[\dot{U}_{PR}] = [x_{PRF}]\,[\dot{I}_F] + [x_{PR}]\,[\dot{I}_{PR}]$$

para $[\dot{U}_{PR}] = 0$, cabos pára-raios aterrados:

$$-\,[x_{PRF}]\,[\dot{I}_F] = [x_{PR}]\,[\dot{I}_{PR}]$$

$$[\Delta x_{\text{corr}}] = -\,[x_{FPR}]\,[x_{PR}]^{-1}\,[x_{PRF}]$$

ou

$$[\Delta x_{\text{corr}}] = \frac{1}{x_{rr}} \begin{bmatrix} x_{ar}x_{ra} & x_{ar}x_{rb} & x_{ar}x_{rc} \\ x_{br}x_{ra} & x_{br}x_{rb} & x_{br}x_{rc} \\ x_{cr}x_{ra} & x_{cr}x_{rb} & x_{cr}x_{rc} \end{bmatrix}.$$

Substituindo os valores, obtemos:

$$[\Delta x_{\text{corr}}] = -\begin{bmatrix} 0{,}1181 & 0{,}1072 & 0{,}0987 \\ 0{,}1072 & 0{,}0973 & 0{,}0896 \\ 0{,}0987 & 0{,}0896 & 0{,}0825 \end{bmatrix};$$

portanto:

$$[x_{\text{eq}}] = [x_1] - [\Delta x_{\text{corr}}] = \begin{bmatrix} 1{,}1424 & 0{,}6614 & 0{,}5943 \\ 0{,}6614 & 1{,}1632 & 0{,}6790 \\ 0{,}5943 & 0{,}6790 & 1{,}1780 \end{bmatrix}.$$

A reatância indutiva de seqüência positiva será:

$$x_{11} = \overline{x}_{aa} - \overline{x}_{ab} = 1{,}1612 - 0{,}6449$$

$$x_{11} = 0{,}5163 \quad [\text{ohm/km}].$$

A reatância indutiva de seqüência nula será:

$$x_{oo} = \overline{x}_{aa} + 2\overline{x}_{ab} = 1{,}1612 + 1{,}2898$$

$$x_{oo} = 2{,}4510 \quad [\text{ohm/km}].$$

18. Determinar as reatâncias indutivas de seqüências positiva e nula, empregando as tabelas de reatâncias unitárias e por transformação linear direta, da linha descrita no exercício anterior.

19. Em uma faixa de servidão estreita foram construídas duas linhas de 69 [kV], idênticas àquela descrita no Exerc. 8, que operam em paralelo. Sendo as distâncias entre seus eixos de 6,20 [m], calcular as reatâncias indutivas de seqüências positiva e nula, para $\rho = 100$ [ohm/m³].

20. A Fig. 7.33 mostra a silhueta de uma estrutura de suspensão da LT de 460 [kV] entre U. H. Jupiá e a S. E. de Cabreúva, a circuito duplo.

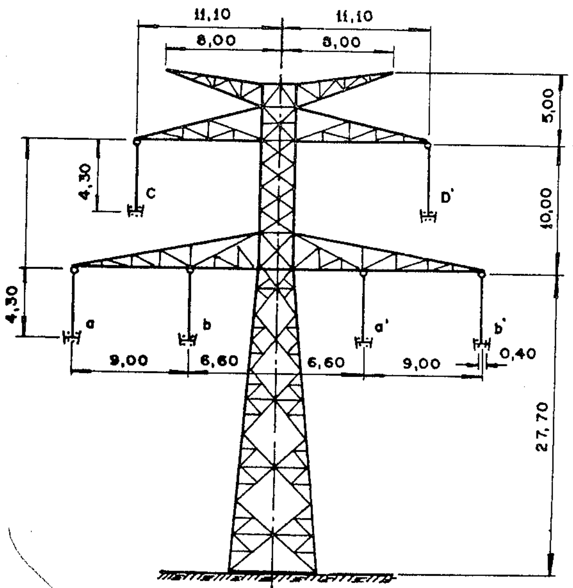


Fig. 7.33 — *LT de 460 kV dos Exercs. 20 (do Cap. 7) e 22 (do Cap. 8.)*

Seus condutores múltiplos são constituídos de 4 cabos CAA Grosbeark separados de 0,40 m. Admitir cabos pára-raios de aço galvanizado tipo HSS de 1/2" de diâmetro nominal e uma resistividade do solo de 1 000 [ohm/m³]. Admitindo flechas médias de 13,4 [m] para os condutores e de 12,5 [m] para os pára-raios, determinar, pelos três processos:

a — reatâncias indutivas aparentes;

b — reatâncias indutivas de seqüência positiva;

c — reatâncias indutivas de seqüência nula.

21. De uma subestação elevadora saem duas linhas de 138 [kV] como aquela descrita no Exerc. 17, operando em paralelismo físico e elétrico. A distância entre seus eixos longitudinais é de 12 [m]. Determinar as reatâncias indutivas de seqüências positiva e nula e comparar os resultados com os da linha individual.

22. Determinar a reatância indutiva de seqüência nula da linha descrita no Exerc. 8, pelos três processos expostos.

A — Empregando as equações exatas de Carson somente para as reatâncias indutivas:

$$x_{oo} = \frac{1}{3}(x_{aa} + x_{bb} + x_{cc}) + \frac{2}{3}(x_{ab} + x_{ac} + x_{bc}). \quad \text{(Eq. 7.135)}$$

As reatâncias parciais foram calculadas no Exerc. 8 (processo exato). Da matriz 3 × 3 da linha equivalente:

$$x_{oo} = \frac{1}{3}(0{,}7377 + 0{,}7528 + 0{,}7645) + \frac{2}{3}(0{,}2617 + 0{,}3089 + 0{,}2751)$$

$$x_{oo} = 1{,}3155 \quad \text{[ohm/km]}.$$

B — Pelo método de Carson simplificado

Da matriz de x_{eq} do processo simplificado do Exerc. 8:

$$x_{oo} = \frac{1}{3}(0{,}7373 + 0{,}7511 + 0{,}7641) +$$

$$+ \frac{2}{3}(0{,}2612 + 0{,}3030 + 0{,}2746)$$

$$x_{oo} = 1{,}3100 \quad \text{[ohm/km]}.$$

C — Pelas tabelas

A equação das reatâncias indutivas de seqüência nula será:

$$x_{oo} = \overline{x}_{aa} + 2\overline{x}_{ab} - 3\,\frac{\overline{x}_{ar}^2}{\overline{x}_{rr}}, \quad \text{(Eq. 7.151)}$$

sendo:

$$\overline{x}_{aa} = x'_L + x_e \quad \text{(da Eq. 7.152)}$$

$$\overline{x}_{ab} = x_e - x''_L \quad \text{(da Eq. 7.153)}$$

$$\overline{x}_{ar} = x_e - x''_{L_r} \quad \text{(da Eq. 7.154)}$$

$$\overline{x}_{rr} = x'_{L_r} + x_e. \quad \text{(da Eq. 7.155)}$$

a — Da Tab. III.2 do Ap. III, para o cabo código OXLIP:

$$x'_L = 0{,}40243 \quad \text{[ohm/km]}.$$

b — Da Tab. III.13 do Ap. III, para $\rho = 100$ [ohm/m³]:

$$x_e = 0{,}50869 \quad \text{[ohm/km]}.$$

c — Da Tab. III.5, para

$$D_m = \sqrt[3]{2{,}94 \cdot 2{,}94 \cdot 1{,}8} = 2{,}4964 \quad \text{[m]},$$

$$x''_L = 0{,}06909 \quad \text{[ohm/km]};$$

para:

$$D_{m_r} = \sqrt[3]{3{,}05 \cdot 4{,}8 \cdot 3{,}91} = 3{,}8539 \quad \text{[m]},$$

interpolando linearmente:

$$x''_{L_r} = 0{,}10177 \quad \text{[ohm/km]}.$$

$$D — x'_{L_R} = 28{,}935 \cdot 10^{-4} f \log \frac{1}{0{,}000897}$$

$$X'_{L_r} = 0{,}529 \quad \text{[ohm/km]};$$

logo,

$$x_{aa} = 0{,}40243 + 0{,}50869 = 0{,}9111 \quad \text{[ohm/km]};$$

$$x_{ab} = 0{,}50869 - 0{,}0609 = 0{,}4396 \quad \text{[ohm/km]};$$

$$x_{ar} = 0{,}50869 - 0{,}10177 = 0{,}4069 \quad [\text{ohm/km}];$$

$$x_{rr} = 0{,}529 + 0{,}50869 = 1{,}03769 \quad [\text{ohm/km}];$$

portanto:

$$x_{oo} = 0{,}9111 + 2(0{,}4396) - \frac{3(0{,}4069)^2}{1{,}03769}$$

$$x_{oo} = 1{,}3116 \quad [\text{ohm/km}].$$

Observação: Para esta linha, qualquer dos resultados é aceitável.

23. Determinar a impedância de seqüência nula da linha descrita no Exerc. 14, admitindo $\rho = 1\,500$ [ohm/m³], sendo empregados dois cabos pára-raios de aço de 3/8″ de diâmetro (tipo HS).

Solução

Poderemos efetuar os cálculos pela Eq. (7.162) e calcular as impedâncias parciais pelas Eqs. (7.149), (7.150), (7.151) e (7.153). Preferimos, no entanto, recorrer às tabelas de reatâncias. Teremos:

$$\dot{z}_{oo} = \dot{z}_{aa} + 2\dot{z}_{ab} - \frac{6(\dot{z}_{ar})^2}{\dot{z}_{rr} + \dot{z}_{rs}} \cdot \qquad \text{(Eq. 7.159)}$$

Cálculo das impedâncias parciais:

1 — $\dot{z}_{aa} = r_a + 0{,}9869 \cdot 10^{-3} f + j(x'_L + x_e)$ (Eq. 7.152)

x'_L — obtemos da tabela de reatâncias dos condutores compostos — III.3.*a*:

$$x'_L = 0{,}2092 \quad [\text{ohm/km}];$$

x_e — obtemos da Tab. III.13 para $\rho = 1500$:

$$x_e = 0{,}600 \quad [\text{ohm/km}];$$

r_a — obtemos da Tab. III.3:

$$r_a = 0{,}5 \cdot 0{,}1005 = 0{,}0525 \quad [\text{ohm/km}];$$

logo,

$$\dot{z}_{aa} = 0{,}05025 + 0{,}05921 + j0{,}8092$$

$$\dot{z}_{aa} = 0{,}08595 + j0{,}8092 \quad [\text{ohm/km}].$$

2 — $\dot{z}_{ab} = 0{,}9860 + 10^{-3} f + j(x_e - x''_L)$ (Eq. 7.153)

x''_L — obtemos da Tab. III.5, em função de:

$$D_m = \sqrt[3]{d_{ab}d_{bc}d_{ac}} = \sqrt[3]{4{,}5 \cdot 4{,}5 \cdot 9{,}0} = 5{,}70 \quad [\text{m}]$$

$$x''_L = 0{,}13125 \quad [\text{ohm/km}];$$

logo,

$$\dot{z}_{ab} = 0{,}05921 + j(0{,}600 - 0{,}13125)$$

$$\dot{z}_{ab} = 0{,}05921 + j0{,}46875 \quad [\text{ohm/km}].$$

3 — $\dot{z}_{ar} = 0{,}9869 \cdot 10^{-3} f + j(x_e - x''_L)$ (Eq. 7.154)

x_e — 0,600 [ohm/km] (ver Tab. III.13)

x''_L — obtemos da Tab. III.5, em função de:

$$D_{Mr} = \sqrt[6]{d_{ar}d_{br}d_{cr}d_{as}d_{bs}d_{cs}}$$

$$D_{mr} = \sqrt{(4{,}95)^4 \cdot (10{,}7)^2} = 6{,}40 \quad [\text{m}];$$

logo,

$$x''_L = 0{,}13998 \quad [\text{ohm/km}]$$

e

$$\dot{z}_{ar} = 0{,}059214 + j0{,}46002 = 0{,}475\, e^{j82{,}7} \quad [\text{ohm/km}]$$

$$(\dot{z}_{ar})^2 = 0{,}2256\, e^{j165{,}4^\circ} \quad [\text{ohm/km}].$$

4 — $\dot{z}_{rr} = r_c + 0{,}059214 + j(x'_L + x_e)$

— r_r e x'_L — obtemos da Tab. III.12, admitindo-se correntes de curto-circuito elevadas ($I > 60$ [A]).

Teremos:

$$r_c = 3{,}11 \quad [\text{ohm/km}]$$

$$x'_L = 1{,}192 \quad [\text{ohm/km}]$$

$$\dot{z}_{rr} = 3.1692 + j1{,}792 \quad [\text{ohm/km}].$$

5 — $\dot{z}_{rs} = 0{,}9869 \cdot 10^{-3} f + j(x_e - x''_L)$ [ohm/km] (da Eq. 7.161)

x''_L — obtido da Tab. III.5 em função de:

$$d_{rs} = 7{,}00 \quad [\text{m}];$$

logo,

$$\dot{z}_{rs} = 0{,}059214 + j0{,}45362 \quad \text{[ohm/km]}.$$

$$6 - \dot{z}_{rr} + \dot{z}_{rs} = 3{,}2284 + j2{,}2453 = 3{,}92\ e^{j34{,}8°}$$

$$7 - \dot{z}_{OL} = \dot{z}_{aa} + 2\dot{z}_{ab} - \frac{6\dot{a}^2_{zr}}{\dot{z}_{rr} + \dot{z}_{rs}}.$$

Substituindo os valores parciais:

$$\dot{z}_{OL} = 0{,}10437 + j1{,}7829 - \frac{6 \cdot 0{,}2256\ e^{j165{,}4}}{3{,}92\ e^{j37{,}8}}$$

$$\dot{z}_{OL} = 0{,}10437 + j1{,}7829 - 0{,}34531\ e^{j127{,}6} \quad \text{[ohm/km]}$$

ou

$$\dot{z}_{OL} = 0{,}31314 + j1{,}50786 \quad \text{[ohm/km]}.$$

24. Uma linha de 500 [kV] é construída com 3 cabos CAA, código RAIL por fase e protegida por dois cabos Alumoweld 7 × 8. Admitindo uma altura média dos condutores sobre o solo $h_a = h_c = 20{,}40$ [m] e $h_b = 26{,}50$ [m] e dos cabos pára-raios de 35,00 [m], determinar as reatâncias indutivas de seqüências positiva e negativa dessa linha. A linha

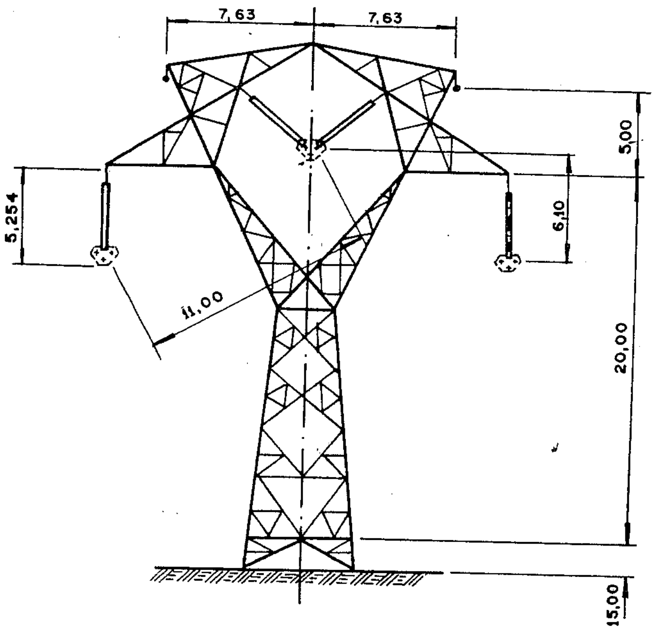


Fig. 7.34 — *Linha de 500 kV (Exercs. 23 do Cap. 7 e 15 do Cap. 8).*

atravessa regiões de solo de características muito diferentes, podendo-se adotar $\rho = 100$ [ohm/m³]. A Fig. 7.34 mostra sua silhueta. Distância entre os condutores, 18″.

25. Determinar as correntes nos cabos pára-raios da linha descrita no Exerc. 12, empregando as reatâncias parciais aí calculadas bem como as resistências parciais no Exerc. 5 do Cap. 9, aumentando os termos próprios de 1 [ohm] para compensar resistências de estruturas, conexões etc. Admitir que a linha esteja transmitindo 400 [MW], sob $\cos\phi = 1$.

Solução

A equação válida é a seguinte, derivada da Eq. (7.79):

$$\dot{I}_R = -[\dot{Z}_{RR}]^{-1}[\dot{Z}_{RF}][\dot{I}].$$

Do Exerc. 12 obtemos $[X_{RR}]$ e $[X_{RF}]$; do Exerc. 5 do Cap. 9 obtemos $[R_{RR}]$ e $[R_{RF}]$, logo:

$$[\dot{I}_R] = -\{([R_{RR}] + j[X_{RR})^{-1} \times ([R_{RF}] + j[X_{RF}])\}[\dot{I}_F];$$

acrescentando 1 [ohm] aos termos da diagonal de $[R_{RR}]$, teremos:

$$\begin{bmatrix}\dot{I}_R\\ \dot{I}_F\end{bmatrix} = -\left\{\left(\begin{bmatrix}4{,}10450 & 0{,}05950\\ 0{,}05950 & 4{,}10450\end{bmatrix} + j\begin{bmatrix}2{,}0624 & 0{,}3986\\ 0{,}3986 & 2{,}0624\end{bmatrix}\right)^{-1} \times\right.$$

$$\left.\times\left(\begin{bmatrix}0{,}05662 & 0{,}05669 & 0{,}05662\\ 0{,}05662 & 0{,}05669 & 0{,}05662\end{bmatrix} + j\begin{bmatrix}0{,}5953 & 0{,}4049 & 0{,}3703\\ 0{,}3703 & 0{,}4049 & 0{,}5953\end{bmatrix}\right)\right\} \times$$

$$\times I\begin{bmatrix}1\\ a^2\\ a\end{bmatrix}.$$

Efetuando as operações indicadas, obteremos:

$$\begin{bmatrix}I_R\\ I_F\end{bmatrix} = -\begin{bmatrix}0{,}02812 + j0{,}04110\\ -0{,}04368 - j0{,}01263\end{bmatrix} \times I = -\begin{bmatrix}0{,}04980\ e^{j55{,}621}\\ 0{,}04547\ e^{j163{,}873}\end{bmatrix} \times I.$$

Transmitindo a corrente:

$$I = \frac{400\ 000}{\sqrt{3} \cdot 345} = 669{,}39\ \text{[A]},$$

as correntes nos cabos pára-raios serão, respectivamente:

$$\dot{I}_R = 33{,}336\ e^{-j124{,}379°} \quad \text{[A]};$$

$$\dot{I}_S = 30{,}437\, e^{j16{,}127°} \quad [A].$$

26. Admitindo que as correntes calculadas no exercício anterior provoquem perdas por efeito Joule nos cabos pára-raios, estruturas e solo, calcular o seu valor, por quilômetro de linha.

Solução

Teremos em cada circuito de pára-raios:

$$\Delta P_i = I_i^2 \cdot R_{ii};$$

logo,

$$\Delta P_R = I_R^2 \cdot R_{rr} = (33{,}336)^2 \cdot 4{,}1045 = 4561{,}28 \quad [W/km];$$

$$\Delta P_S = I_S \cdot R_{ss} = (30{,}437)^2 \cdot 4{,}1045 = 3802{,}46 \quad [W/km];$$

as perdas totais, por quilômetro, são $\Delta P = 8363{,}74$ [W/km].

Comentário

Essas perdas podem justificar economicamente o isolamento dos cabos pára-raios, situando-se em faixa de ordem de grandeza de perdas por Corona, com tempo bom (ver Cap. 10).

27. Se a linha do Exerc. 8 fosse construída com os cabos pára-raios isolados, qual seria a diferença de potencial, entre o receptor e o transmissor, induzida nesses cabos pela corrente de 50 [A]?

28. Calcular as perdas de energia nos cabos pára-raios e solo, provocadas pelas correntes I_R e I_S da linha descrita no Exerc. 23.

29. Qual a tensão induzida nos cabos pára-raios da linha do Exerc. 23, se os mesmos forem isolados?

30. Determinar as correntes nos cabos pára-raios da LT de 460 [kV] ilustrada na Fig. 7.30, empregando os dados do Exerc. 20, quando a linha estiver transmitindo 1 300 [MW].

31. Uma linha telefônica corre paralelamente à linha descrita no Exerc. 23, estando seu eixo a uma distância de 30 [m] do eixo da linha de energia elétrica. A linha telefônica é constituída por dois condutores de cobre n.º 8 AWG, a uma altura de 8 [m], em média, sobre o solo. Distância entre os fios telefônicos, 0,40 [m]. Calcular a tensão induzida na linha telefônica.

32. Suponha-se que o circuito II da linha descrita no Exerc. 17 esteja desenergizado para manutenção, enquanto que o circuito I opera normalmente. A linha possui um comprimento de 50 [km] e abastece

uma indústria, sendo alimentada por um barramento de tensão constante e igual a 138 [kV], quando ocorre um curto-circuito trifásico metálico junto ao receptor.

a — Admitindo que os condutores do circuito que se encontra desenergizado estejam aterrados somente junto ao transmissor, deseja-se conhecer o valor do potencial induzido em cada um dos condutores, junto ao receptor.

b — Qual o valor das correntes de circulação no cabo pára-raios e nos condutores do circuito desenergizado, se estes estiverem também aterrados em diversos pontos ao longo da linha?

33. A linha do Exerc. 8 tem apresentado um número de desligamentos excessivo por descargas atmosféricas. Uma das formas de reduzir o valor das ondas de sobretensão consiste em reduzir a impedância natural da linha. Sugere-se que isso é possível colocando-se mais um cabos pára-raios multiaterrado, porém embaixo dos condutores, fixado aos postes, a 1 m abaixo do condutor inferior. Verificar a viabilidade dessa sugestão.

7.14 — BIBLIOGRAFIA

1 — BIERMANNS, J. — *Hochspannung und Hochleistung.* Carl Hauser, Munique, 1949.

2 — BORNEMANN, H. — *Bau und Berrechnung von Leitungen und Leitungsnetzen.* Technischer Verlag Herbert Cran — Berlim, W35, 1956.

3 — CLARKE, E. — *Circuit Analysis of A-C Power Systems.* John Wiley e Sons, Inc., Nova Iorque, 1950.

4 — LEWIS, W. A. — *The Transmission of Electric Power.* Illinois Institute of Technology, Chicago, 1964. Vol. 2.

5 — TARBOUX, J. G. — *Introduction to Electric Power Systems.* The International Text-Book Co., Scranton, Pensilvânia, 1950.

6 — WAGNER, C. F. e EVANS, R. D. — *Symmetrical Components.* McGraw-Hill Book Co., Nova Iorque, 1933.

7 — CARSON, J. R. — *Wave Propagation in Overhead Wires With Ground Return.* Bell System Tech.-Jour., Nova Iorque, outubro de 1926. Vol. 5, págs. 539-555.

8 — GUILE, A. E. e PETERSON, W. — *Electrical Power Systems.* Oliver & Boyd, Edinburg, 1969. Vol. 1.

9 — SUNDE, E. D. — *Earth Conduction Effects in Transmission Systems.* Dover Publications, Inc., Nova Iorque, 1968.

X 10 — DALLA VERDE, A. — *Le Grandi Linnee di Transmissione d'Energia — Calcolazzione Elettrica.* Libreria Editrice Politecnica Cesar Tamburini, Milano, 1947.

11 — CENTRAL STATION ENGINEERS — *Electrical Transmission and Distribution Reference Book.* Westinghouse, East Pittsburgh, 1950. 4.ª edição.

12 — GROSS, E. T. B. e HESSE, M. B. — *Electromagnetic Unbalance of Untransposed Transmission Lines.* AIEE Transactions, Nova Iorque, 1953. Vol. 72. Págs. 1 923-1 936.

13 — ——————e NELSON, S. W. — *Electromagnetic Unbalance of Untransposed Transmission Lines II*. AIEE Transactions, Nova Iorque, 1955. Vol. 74. Parte III. *B*. Págs. 887-893.

14 — ———, PRINNAN, J. H. e HOCHUM, E. — *Electromagnetic Unbalance of Untransposed Transmission Lines III*. AIEE Transactions, Nova Iorque. Vol. 78. Parte III. Págs. 1 362-1 371.

15 — PROJECTO EHV — *EHV Transmission Line Reference Book*. Edison Electric Institute, Nova Iorque, 1968.

16 — STEVENSON, W. D. — *Elements of Power System Analysis*. McGraw-Hill Book Co., Inc., Nova Iorque, 1962.

17 — DOMMEL, H. W. — Discussões sobre "Electromagnetic Effects of Overhead Transmission Lines". Transactions IEEE, Nova Iorque, Vol. PAS 93, maio/junho 1974. Pág. 900.

8

Capacitâncias, Reatâncias e Susceptâncias Capacitivas das Linhas de Transmissão

8.1 — GENERALIDADES

Os condutores das linhas de transmissão de energia elétrica energizadas apresentam diferenças de potencial entre si e também com relação ao solo. Estas indicam a presença de cargas elétricas distribuídas ao longo desses mesmos condutores. Uma linha de transmissão comporta-se, portanto, como um capacitor de vários eletrodos, tendo como eletrodos os próprios condutores e o solo. Assim sendo, uma linha de transmissão, ao ser energizada, absorve da fonte cargas elétricas necessárias ao seu carregamento, da mesma maneira que um capacitor.

Aplicando-se uma tensão alternada senoidal a uma linha de transmissão, a carga elétrica dos condutores em um ponto qualquer varia de acordo com valores instantâneos das diferenças de potencial aí existentes entre condutores ou entre o condutor e o solo. O fluxo das cargas elétricas constitui uma corrente, e, por ser causada pelo processo de carregamento e descarregamento cíclico das linhas, quando estas de encontram sob tensão, é denominado *corrente de carga* da linha. É quase insignificante em linhas aéreas *curtas* e poderá atingir valores elevados em linhas longas. Nas linhas em cabos subterrâneos ou submarinos, seu valor pode comprometer a capacidade útil de transporte de energia destes. Pode afetar decisivamente o comportamento elétrico das linhas, como vimos.

O desenvolvimento analítico que faremos seguirá uma sistemática semelhante à que foi desenvolvida no Cap. 7.

8.2 — RELAÇÕES FUNDAMENTAIS

A carga elétrica de um condutor cilíndrico retilíneo, longo, isolado e suficientemente longe do solo e de outros condutores carregados, distribui-se uniformemente sobre a sua superfície, formando ao seu redor um campo elétrico, homogêneo, cujas superfícies eqüipotenciais são também cilíndricas, e concêntricas com o condutor.

Da Física lembramos que o campo elétrico é vetorial, de natureza newtoniana. Obedece, pois, à lei geral da gravitação. Pode ser representado simbolicamente por linhas de fluxo elétrico, ou linhas de força, que emanam da superfície de um condutor de carga positiva e terminam em um outro de carga negativa.

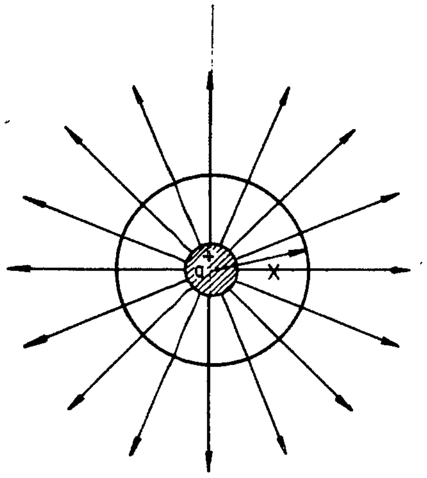


Fig. 8.1 — *Campo elétrico homogêneo.*

O número de linhas de força que emanam da superfície de um condutor é numericamente igual ao número de coulombs de sua carga elétrica, por convenção.

A Fig. 8.1 representa uma secção através de um condutor cilíndrico, maciço, retilíneo e isolado, possuindo, pois, um campo elétrico homogêneo. Seja q [coulomb] o valor instantâneo da carga em um metro linear de condutor, distribuída uniformemente sobre a sua superfície. Por convenção, é igual a q o número de linhas de força que emanam radialmente de sua superfície, em um metro de condutor.

Consideremos uma superfície cilíndrica de raio x [m] concêntrica com o condutor. Essa superfície é eqüipotencial. Sua área será, por metro linear de condutor, igual a $2\pi x$. Por convenção, o número de linhas de fluxo que atravessa essa superfície é igual a q. Logo, a densidade de fluxo elétrico aí será:

$$D = \frac{q}{s} = \frac{q}{2\pi x} \text{ [coulomb/m}^2\text{] ou [As/m}^2\text{].} \qquad (8.1)$$

Da Física lembramos que a *intensidade de campo elétrico* é definida como:

$$E = \frac{D}{\epsilon} = \frac{q}{2\pi x \cdot \epsilon} \text{ [V/m],} \qquad (8.2)$$

na qual temos:

$\epsilon = \epsilon_o \epsilon_r$ — permissividade do meio;

$\epsilon_o = 8{,}859 \cdot 10^{-12}$ [farad/m] ou [A·s/V·m] — permissividade absoluta ou do vácuo;

ϵ_r — permissividade relativa do meio. Depende do meio no qual se propaga o fluxo elétrico. Para o vácuo, $\epsilon_r = 1$; no ar, para a maioria das aplicações, como nas linhas elétricas, pode ser tomada como igual à unidade.

Devemos ainda recordar:

a — a intensidade de campo elétrico E [V/m] em um ponto P situado nesse campo é numericamente igual à força em newton que atua sobre uma carga de um coulomb colocada nesse ponto;

b — para se deslocar uma carga de um coulomb de um ponto de potencial mais alto realiza-se um trabalho. Este é numericamente igual à diferença de potencial entre os pontos considerados.

Consideremos um condutor longo, retilíneo, possuindo uma carga positiva de q [coulomb/m]. Os pontos P_1 e P_2 estão colocados, respectivamente, a distâncias D_1 e D_2 do centro condutor. A carga positiva no condutor exercerá uma força de repulsão sobre uma carga positiva colocada no campo.

Como D_2 é maior do que D_1, trabalho deve ser realizado para deslocar uma carga de P_2 para P_1, pois P_1 está em potencial mais elevado do que P_2. A diferença de potencial é igual à quantidade de trabalho realizado por coulomb de carga deslocada.

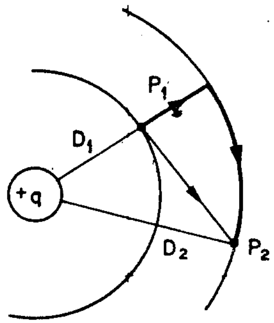


Fig. 8.2 — *Diferença de potencial entre dois pontos no campo da carga q.*

Por outro lado, se uma carga de um coulomb se desloca de P_1 para P_2, há um dispêndio de energia e a quantidade de trabalho realizado, ou a energia em [newton·metro], é a queda de tensão entre P_1 e P_2. A fim de determinar a queda de tensão entre os dois pontos, basta determinar a diferença de potencial entre as eqüipotenciais que passam pelos pontos P_1 e P_2, através da integração da variação da intensidade de campo ao longo do percurso radial, entre as superfícies eqüipotenciais.

O valor instantâneo da diferença de potencial entre P_1 e P_2 será:

$$u_{12} = \int_{D_1}^{D_2} E dx = \int_{D_1}^{D_2} \frac{q}{2\pi E x} dx$$

$$v_{12} = \frac{q}{2\pi\epsilon} Ln \frac{D_2}{D_1} \text{ [volt].} \tag{8.3}$$

O valor da queda de tensão expresso pela Eq. (8.3) tanto poderá ser negativo como positivo, dependendo do sinal da carga q e do fato de se considerar a queda de tensão desde um ponto próximo ao condutor energizado e um ponto mais remoto ou vice-versa. O sinal de q pode ser positivo ou negativo e o termo logarítmico é positivo ou negativo, dependendo do fato de D_2 ser maior ou menor de D_1.

8.2.1 — Diferença de Potencial entre Dois Condutores Carregados

Sejam dois condutores cilíndricos, retos e paralelos, de comprimento infinito e raios r_a e r_b. A distância entre seus eixos é de D [m]. Consi-

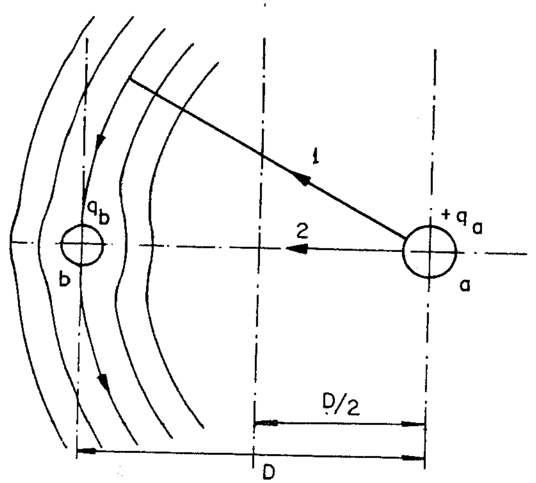


Fig. 8.3 — *Deformação do campo elétrico do condutor a pela presença do condutor b.*

deremos inicialmente que apenas o condutor a possua uma carga q [coulomb/m], enquanto que o condutor b está sem carga. O campo elétrico criado pelo condutor a é homogêneo, exceto nas proximidades do condutor b, onde será deformado pela presença deste, cuja superfície é uma superfície do campo do condutor a, de mesmo valor que a eqüipotencial que passa pelo centro de b, desde que r_b seja suficientemente pequeno em comparação com a distância D.

A diferença de potencial entre as superfícies dos condutores a e b será numericamente igual ao trabalho despendido para deslocar uma carga $+q_a$ desde a superfície do condutor a até a superfície do condutor b, independentemente do caminho percorrido. De acordo com a Eq. (8.3), teremos $D_2 = D$ e $D_1 = r_a$:

$$u_{ab} = \frac{q_a}{2\pi\epsilon} \int_{r_2}^{D} \frac{1}{x} dx = \frac{q_a}{2\pi\epsilon} Ln \frac{D}{r_a} \text{ [V].} \tag{8.4a}$$

Se considerarmos agora que foi retirada a carga do condutor a e colocada uma carga q_b no condutor b, com o mesmo raciocínio teremos a diferença de potencial devido à carga em b, sendo:

$$D_2 = r_b \quad \text{e} \quad D_1 = D$$

$$u_{ab} = \frac{q_a}{2\pi\epsilon} \int_{D}^{r_b} \frac{1}{x} dx = \frac{q_b}{2\pi\epsilon} Ln \frac{r_b}{D} \text{ [V].} \tag{8.4b}$$

A diferença de potencial devido à atuação simultânea das cargas será:

$$u_{ab} = \frac{q_a}{2\pi\epsilon} Ln \frac{D}{r_a} + \frac{q_b}{2\pi\epsilon} Ln \frac{r_b}{D} \text{ [V].} \tag{8.5}$$

Para o caso em que $q_a = q$ e $q_b = -q$, teremos:

$$u_{ab} = \frac{q}{2\pi\epsilon}\left(Ln \frac{D}{r_a} + Ln \frac{D}{r_b}\right)$$

ou

$$u_{ab} = \frac{q}{2\pi\epsilon} Ln \frac{D^2}{r_a r_b} \text{ [V].} \tag{8.6}$$

Se os dois condutores forem idênticos, $r_a = r_b = r$, teremos:

$$u_{ab} = \frac{q}{2\pi\epsilon} Ln \frac{D^2}{r^2} = \frac{q}{\pi\epsilon} Ln \frac{D}{r} \text{ [V].} \tag{8.7}$$

8.2.2 — Diferença de Potencial Entre um Condutor e um Neutro

É facilmente demonstrável, e a maioria dos textos de Física o faz, que, no caso de dois condutores paralelos, com cargas $+q$ e $-q$, possuindo os mesmos raios $r_a = r_b = r$, existirá entre os mesmos, à distância $D/2$ [m] de seus eixos, um plano XY sobre o qual todos os pontos possuem potencial nulo. Esse plano pode ser, portanto, assimilado a um condutor neutro.

Definindo *capacitância* como *carga por unidade de potencial*, teremos então:

$$C_{ab} = \frac{q}{U_{ab}} \frac{\pi\epsilon}{Ln\, D/r} \quad \text{[F/m]}, \tag{8.8}$$

para uma carga q especificada em coulomb por metro de condutor.

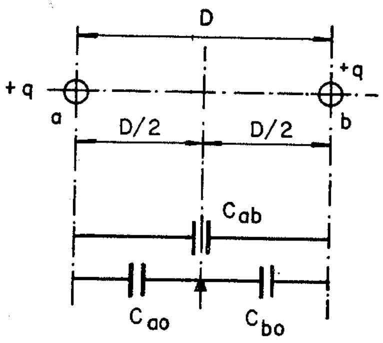


Fig. 8.4 — *Capacitância entre dois condutores e neutro.*

De acordo com a Fig. 8.4, a capacitância entre os condutores a e b pode ser decomposta em duas capacitâncias parciais e iguais, referidas ao plano XY de potencial nulo. Teremos:

$$C_{ao} = C_{bo} = 2C_{ab};$$

logo, pela Eq. (8.8), teremos:

$$u_{ao} = \frac{q}{C_{ao}} = \frac{q}{2C_{ab}} \quad \text{ou} \quad u_{ao} = \frac{q}{2\pi\epsilon} Ln \frac{D}{r} \quad \text{[V]}; \tag{8.9a}$$

$$u_{bo} = \frac{q}{C_{bo}} = \frac{q}{2C_{ab}} \quad \text{ou} \quad u_{bo} = \frac{q}{2\pi\epsilon} Ln \frac{D}{r} \quad \text{[V]}. \tag{8.9b}$$

8.2.3 — Diferença de Potencial Entre um Condutor e o Solo

O solo terrestre, como vimos, é condutor de eletricidade. Os condutores das linhas aéreas de transmissão de energia elétrica encontram-se suspensos a uma altura finita sobre o solo e deste isolados, de forma que o seu campo elétrico também é influenciado pela proximidade do solo. Um condutor nessas condições comporta-se como um capacitor composto de um eletrodo cilíndrico longo, paralelo a um eletrodo plano, como mostra a Fig. 8.5.

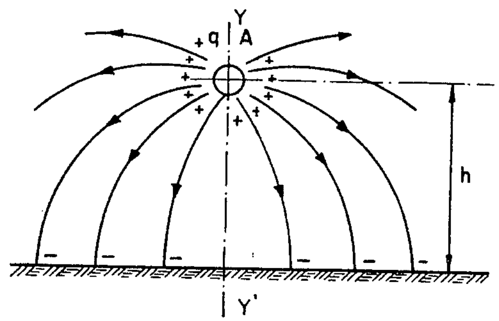


Fig. 8.5 — *Campo elétrico de um condutor suspenso sobre o solo.*

À carga q [coulomb/m] existente na superfície do condutor corresponde uma carga $-q$ [coulomb/m] distribuída sobre a superfície do solo, onde terminam as linhas de fluxo que emanam da superfície do condutor A.

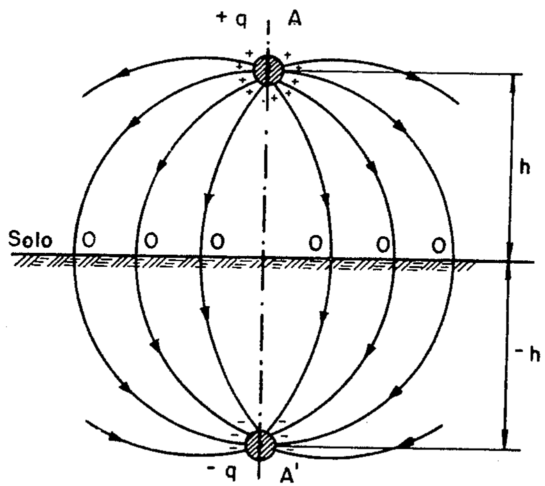


Fig. 8.6 — *Campo elétrico entre o condutor A e sua imagem.*

Sobre o eixo YY', como na Fig. 8.6, imaginemos um outro condutor A', a uma profundidade $-h$ [m] da superfície do solo, ou seja, a uma distância $2h$ [m] do condutor A. Imaginemos que nesse condutor A' esteja concentrada toda a carga $-q$ [coulomb/m]. O campo elétrico terá, então, a forma indicada na Fig. 8.6.

O plano correspondente ao solo, que contém o eixo de simetria XX', terá, portanto, potencial nulo. O condutor A' recebe o nome de *condutor-imagem* de A.

Um sistema assim formado pode ser descrito pela Eq. (8.9). A diferença de potencial entre o condutor A e o solo será:

$$u_{ao} = \frac{Q}{2\pi\epsilon} Ln \frac{2h}{r} \quad [V]. \tag{8.10}$$

No estudo das linhas de transmissão de energia, os potenciais dos condutores são normalmente referidos a um neutro, de potencial nulo, considerando-se o solo como tal. Daí decorre que o conceito de condutor-imagem é útil no estudo das capacitâncias das linhas de transmissão.

8.2.4 — Campo Elétrico de Dois Condutores Suspensos Sobre o Solo

Consideremos, como mostra a Fig. 8.7, dois condutores a e b, suspensos sobre o solo a alturas h_a e h_b, respectivamente. Seus raios externos são r_a e r_b e suas imagens a' e b', situadas às profundidades h_a e h_b.

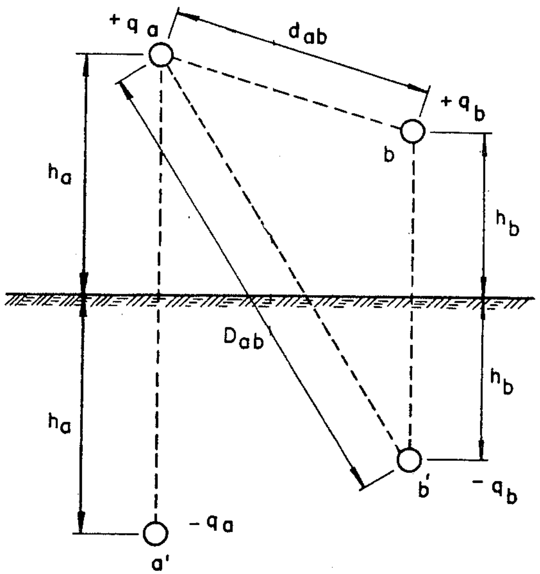


Fig. 8.7 — *Dois condutores suspensos sobre o solo e suas imagens.*

Seja $+q_a$ o valor instantâneo da carga uniformemente distribuída por unidade de comprimento na superfície do condutor a e $+q_b$, o valor instantâneo da carga do condutor b. Suas imagens terão, respectivamente, as cargas $-q_a$ e $-q_b$.

O potencial instantâneo do condutor com relação ao solo u_a será devido à sua carga própria, à carga de sua imagem e às cargas de b e b'. Nessas condições, de acordo com as Eqs. (8.3) e (8.10), teremos:

$$u_a = \frac{1}{2\pi\epsilon}\left[q_a\, Ln \frac{2h_a}{r_a} + q_b\, Ln \frac{r_b}{d_{ab}} - q_b\, Ln \frac{r_b}{D_{ab}}\right]$$

ou

$$u_a = \frac{1}{2\pi\epsilon} q_a\, Ln \frac{2h_a}{r_a} + \frac{1}{2\pi\epsilon} q_b\, Ln \frac{D_{ab}}{d_{ab}}. \tag{8.11a}$$

O potencial do condutor b com relação ao solo será, igualmente:

$$u_b = \frac{1}{2\pi\epsilon} q_b\, Ln \frac{2h_b}{r_b} + \frac{1}{2\pi\epsilon} q_a\, Ln \frac{D_{ab}}{d_{ab}}. \tag{8.11b}$$

Essas duas equações constituem um sistema de equações que podemos pôr sob forma matricial:

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \end{bmatrix} = \frac{1}{2\pi\epsilon}\begin{bmatrix} Ln \dfrac{2h_a}{r_a} & Ln \dfrac{D_{ab}}{d_{ab}} \\ Ln \dfrac{D_{ab}}{d_{ab}} & Ln \dfrac{2h_b}{r_b} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} q_a \\ q_b \end{bmatrix} \quad [V]. \tag{8.12}$$

Observamos:

a — a matriz é simétrica em torno da diagonal;

b — os termos da diagonal representam os potenciais devidos às cargas dos próprios condutores e de suas imagens. São, pois, termos próprios;

c — os termos fora da diagonal mostram a influência das cargas do condutor vizinho e de sua imagem sobre cada um dos condutores. São termos mútuos.

8.2.5 — Campo Elétrico de um Número Qualquer de Condutores Suspensos Sobre o Solo

Consideremos n condutores suspensos sobre o solo, como mostra a Fig. 8.8. Os condutores, designados $a, b, c, \ldots, n$, cujos raios são $r_a, r_b, r_c, \ldots, r_n$, estão suspensos sobre o solo a alturas $h_a, h_b, h_c, \ldots, h_n$ e possuem as cargas $q_a, q_b, q_c, \ldots, q_n$. Suas imagens, como mostra a figura, possuem cargas iguais, de polaridades opostas.

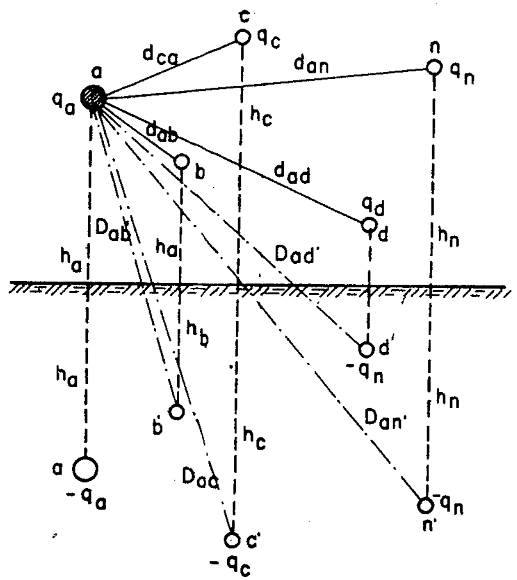


Fig. 8.8 — *Sistema de n condutores suspensos sobre o solo e suas imagens.*

Desenvolvendo o mesmo raciocínio usado no item anterior, poderíamos escrever um sistema de n equações com n termos. Preferimos, no entanto, escrever a equação matricial, cuja lei de formação foi estabelecida para o caso dos dois condutores:

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \\ \vdots \\ u_n \end{bmatrix} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \begin{bmatrix} Ln\,\frac{2h_a}{r_a} & Ln\,\frac{D_{ab}}{d_{ab}} & Ln\,\frac{D_{ac}}{d_{ac}} & \dots & Ln\,\frac{D_{an}}{d_{an}} \\ Ln\,\frac{D_{ab}}{d_{ab}} & Ln\,\frac{2h_b}{r_b} & Ln\,\frac{D_{bc}}{d_{bc}} & \dots & Ln\,\frac{D_{bn}}{d_{bn}} \\ Ln\,\frac{D_{ac}}{d_{ac}} & Ln\,\frac{D_{bc}}{d_{bc}} & Ln\,\frac{2h_c}{r_c} & \dots & Ln\,\frac{D_{cn}}{d_{cn}} \\ \vdots & & & & \\ Ln\,\frac{D_{an}}{d_{an}} & Ln\,\frac{D_{bn}}{d_{bn}} & Ln\,\frac{D_{cn}}{d_{cn}} & \dots & Ln\,\frac{2h_n}{r_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_a \\ q_b \\ q_c \\ \vdots \\ q_n \end{bmatrix} \text{[V]}. \quad (8.13)$$

A matriz acima definida é denominada *matriz dos coeficientes de potencial*, ou dos *coeficientes do campo elétrico*, de Maxwell. Relacionando tensões com cargas elétricas, os coeficientes de potencial têm como dimensão [V/A·s] e sua unidade é [km/farad].

Os termos da diagonal, genericamente,

$$a_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon}\, Ln\, \frac{2h_a}{r_a} \quad \text{[km/farad]}, \qquad (8.14a)$$

são denominados *coeficientes de potencial próprios*.

E os termos fora da diagonal, genericamente:

$$a_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon}\, Ln\, \frac{D_{ij}}{d_{ij}} \quad \text{[km/farad]}, \qquad (8.14b)$$

são denominados *coeficientes de potencial mútuos*.

Conforme se verifica, os valores dos coeficientes de potencial dependem exclusivamente do meio em que os condutores se encontram, representado pela permissividade do meio ϵ e das dimensões físicas dos condutores e da linha.

A distância entre um condutor i e a imagem de seu vizinho pode ser calculada em função de h_i e h_j e d_{ij}, através da expressão:

$$D_{ij} = \sqrt{4h_ih_j + d_{ij}^2} \quad \text{[m]}, \qquad (8.15)$$

facilmente dedutível por simples relações geométricas na Fig. 8.7.

Substituindo ϵ (em farad/km) por seu valor numérico (ver Item 8.1) nas linhas aéreas de transmissão, teremos:

$$a_{ii} = 18 \cdot 10^6\, Ln\, \frac{2h_i}{r_i} \quad \text{[km/farad]} \qquad (8.16a)$$

e

$$a_{ij} = 18 \cdot 10^6\, Ln\, \frac{D_{ij}}{d_{ij}} \quad \text{[km/farad]} \qquad (8.16b)$$

ou, se preferirmos, em logaritmos decimais:

$$a_{ii} = 4{,}14468 \cdot 10^7 \log \frac{2h_i}{r_i} \quad \text{[km/farad]} \qquad (8.16c)$$

e

$$a_{ij} = 4{,}14468 \cdot 10^7 \log \frac{D_{ij}}{d_{ij}} \quad \text{[km/farad]}. \qquad (8.16d)$$

Considerando-se um sistema de condutores energizado por correntes alternadas senoidais, cargas e tensões podem ser representadas por fasores. A Eq. (8.13) toma a seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_a \\ \dot{U}_b \\ \dot{U}_c \\ \vdots \\ \dot{U}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{aa} & a_{ab} & a_{ac} & \dots & a_{an} \\ a_{ab} & a_{bb} & a_{bc} & \dots & a_{bn} \\ a_{ac} & a_{bc} & a_{cc} & \dots & a_{cn} \\ \vdots & & & & \\ a_{an} & a_{bn} & a_{cn} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{Q}_a \\ \dot{Q}_b \\ \dot{Q}_c \\ \vdots \\ \dot{Q}_n \end{bmatrix} \text{[V]} \quad \text{(Eq. 8.13)}$$

ou, simbolicamente,

$$[\dot{U}] = [\dot{A}]\,[\dot{Q}] \quad [\text{V}]. \tag{8.17}$$

Se atentarmos para a definição de capacitância: carga por unidade de potencial, ou

$$C = \frac{\dot{Q}}{\dot{U}} \quad [\text{farad}],$$

poderemos escrever:

$$\dot{Q} = \dot{C} \cdot \dot{U} \quad [\text{coulomb}]$$

ou

$$[\dot{Q}] = [\dot{C}]\,[\dot{U}]. \tag{8.18}$$

Da Eq. (8.16) obtemos

$$[\dot{Q}] = [\dot{A}]^{-1}\,[\dot{U}] \quad [\text{coulomb}]. \tag{8.19}$$

Comparando (8.18) com (8.19), concluímos que a matriz inversa da matriz dos coeficientes de potencial, $[A]^{-1}$, nada mais é do que a matriz de capacitâncias de um sistema de n condutores:

$$[\dot{C}] = [\dot{A}]^{-1}, \tag{8.20}$$

na qual cada um dos elementos tem a dimensão de capacitância.

Consideremos as capacitâncias parciais de um sistema de n condutores, como mostra a Fig. 8.9.

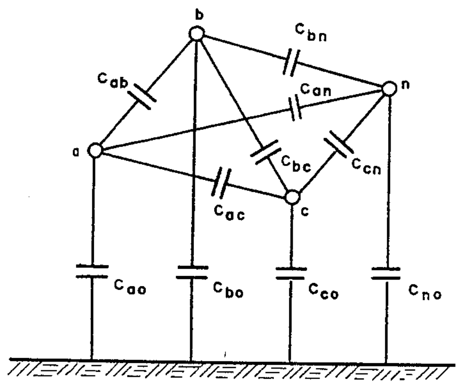


Fig. 8.9 — *Capacitâncias entre condutores e dos condutores ao solo.*

Sendo $\dot{U}_a$, $\dot{U}_b$, $\dot{U}_c$, ..., $\dot{U}_n$ as diferenças de potencial a que estão submetidos os condutores a, b, c, ..., n com relação ao solo, as cargas em cada um dos condutores poderão ser determinadas em função das capacitâncias parciais e das tensões. Seja para o condutor a:

$$\dot{Q}_a = C_{ao}\dot{U}_a + C_{ab}(\dot{U}_a - \dot{U}_b) + C_{ac}(\dot{U}_a - \dot{U}_c) + \ldots + C_{an}(\dot{U}_a - \dot{U}_n)$$

ou

$$\begin{aligned}\dot{Q}_a = (C_{ao} + C_{ab} + C_{ac} + \ldots + C_{an})\dot{U}_a - C_{ab}\dot{U}_b - \\ - C_{ac}\dot{U}_c - \ldots - C_{an}\dot{U}_n \quad [\text{coulomb/km}].\end{aligned} \tag{8.21}$$

Se C_{ao} for a capacitância entre condutores e solo referida a um quilômetro de condutor e C_{ab}, C_{ac} etc. forem as capacitâncias entre condutores, também referidas a um quilômetro, as cargas $\dot{Q}_i$ serão as cargas distribuídas sobre um quilômetro de superfície de condutor.

Para cada um dos demais condutores poderemos escrever uma equação idêntica à Eq. (8.21), o que nos permite formular para todo o sistema uma equação do tipo da Eq. (8.18), cuja matriz será:

$$[C] = \begin{bmatrix} (C_{ao} + C_{ab} + C_{ac} + \ldots + C_{an}) & -C_{ab} & -C_{ac} & \ldots & -C_{an} \\ -C_{ab} & C_{bo} + C_{ab} + C_{bc} + \ldots + C_{bn}) & -C_{bc} & \ldots & -C_{bn} \\ -C_{ac} & -C_{bc} & (C_{co} + C_{ac} + C_{bc} + \ldots + C_{bn}) & \ldots & -C_{cn} \\ \vdots & & \vdots & & \\ -C_{an} & -C_{bn} & -C_{cn} & \ldots & (C_{ao} + C_{an} + C_{bn} + \ldots) \end{bmatrix} [\text{F/km}] \tag{8.22}$$

Os elementos dessa matriz devem ser iguais aos elementos da matriz dos coeficientes de campo invertida $[A]^{-1}$, pois ambas representam o mesmo sistema físico. Nessas condições, calculados os valores de $[A]^{-1}$, poderemos, por simples comparação de elementos das duas matrizes, determinar as capacitâncias parciais C_{io} e C_{ij}.

Seja, pois, a matriz [A] invertida:

$$[A]^{-1} = \frac{1}{D}\begin{bmatrix} G_{aa} & G_{ab} & G_{ac} & \ldots & G_{an} \\ G_{ab} & G_{bb} & G_{bc} & \ldots & G_{bn} \\ G_{ac} & G_{bc} & G_{cc} & \ldots & G_{cn} \\ \vdots & & & & \vdots \\ G_{an} & G_{bn} & G_{cn} & \ldots & G_{nn} \end{bmatrix} \quad [\text{F/km}], \tag{8.23}$$

na qual D é o determinante da matriz [A] e G_{ii} e G_{ij} seus cofatores.

Teremos, comparando termo a termo:

$$
\left.
\begin{aligned}
C_{ao} + C_{ab} + C_{ac} + \ldots + C_{an} &= \frac{G_{aa}}{D} \\
C_{bo} + C_{ab} + C_{bc} + \ldots + C_{bn} &= \frac{G_{bb}}{D} \\
C_{co} + C_{ac} + C_{bc} + \ldots + C_{cn} &= \frac{G_{cc}}{D} \\
C_{no} + C_{an} + C_{bn} + \ldots + C_{(n-1)n} &= \frac{G_{nn}}{D};
\end{aligned}
\right\} \quad (8.24)
$$

$$
\left.
\begin{aligned}
C_{ab} &= -\frac{G_{ab}}{D}; \quad C_{bc} = -\frac{G_{bc}}{D} \\
G_{ac} &= -\frac{G_{ac}}{D}; \quad G_{bn} = -\frac{G_{bn}}{D} \\
C_{an} &= -\frac{G_{an}}{D}; \quad C_{cn} = -\frac{G_{cn}}{D}.
\end{aligned}
\right\} \quad (8.25)
$$

Por substituição das Eqs. (8.25) nas Eqs. (8.24) obtemos os valores das capacitâncias parciais entre condutores e solo:

$$
\left.
\begin{aligned}
C_{ao} &= \frac{G_{aa} + G_{ab} + G_{ac} + \ldots + G_{an}}{D} \ [\text{F/km}] \\
C_{bo} &= \frac{G_{bb} + G_{ab} + G_{bc} + \ldots + G_{bn}}{D} \ [\text{F/km}] \\
C_{co} &= \frac{G_{cc} + G_{ac} + G_{bc} + \ldots + G_{cn}}{D} \ [\text{F/km}] \\
C_{no} &= \frac{G_{nn} + G_{an} + G_{bn} + \ldots + G_{(n-1)n}}{D} \ [\text{F/km}].
\end{aligned}
\right\} \quad (8.26)
$$

Já vimos que os coeficientes de campo dependem do valor da permissividade do meio, ϵ, e das dimensões físicas do sistema de condutores,

portanto as capacitâncias parciais, determinadas em função desses coeficientes, apresentam a mesma dependência.

8.3 — CAPACITÂNCIAS DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO

As equações deduzidas no item anterior permitem a determinação das expressões que definem as capacitâncias das linhas de transmissão; valem para condições idealizadas: condutores de secção cilíndrica, retos, isolados entre si e com relação ao solo e correndo paralelamente entre si e ao solo. Infelizmente, isso não acontece nas linhas reais:

a — as linhas de transmissão são normalmente construídas mediante o emprego de cabos como condutores, cuja superfície, como vimos, não possui curvatura única;

b — os cabos suspensos entre duas estruturas tomam a forma de uma catenária, variando a sua altura sobre o solo, mesmo quando os terrenos atravessados são planos. Essa variação aumenta ainda mais quando os terrenos atravessados não são planos, como geralmente ocorre;

c — as estruturas de sustentação, principalmente quando metálicas, estão no mesmo potencial que o solo, comportando-se como eletrodos, aumentando as capacidades parciais entre condutores e o solo;

d — os isoladores, ou as cadeias de isoladores, também se comportam como capacitores colocados entre os condutores e as estruturas.

Dos fatores acima enumerados, apenas o primeiro não representa maior fonte de erros, enquanto que, para os demais, apenas correções parciais poderão ser feitas, e, assim mesmo, de caráter empírico.

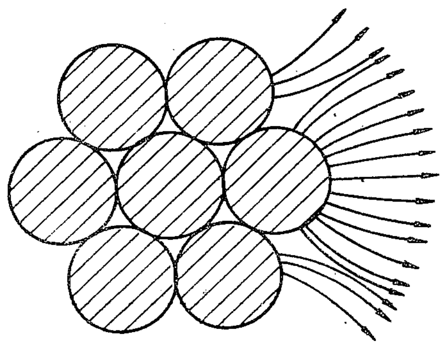


Fig. 8.10 — *Campo elétrico deformado nas proximidades de um cabo.*

O encordoamento de fios metálicos para a obtenção de cabos faz com que as superfícies destes não possuam curvatura única. As linhas de fluxo elétrico emanam das superfícies dos condutores em direção normal a elas. As superfícies dos cabos, no entanto, se apresentam com setores de curvaturas diferentes do que aquela do círculo circunscrito ao mesmo e que tangencia seus filamentos (Fig. 8.10). Em virtude desse fato, as linhas de fluxo elétrico se acumulam nas regiões próximas aos pontos de contato dos filamentos, criando zonas de maior densidade de fluxo.

No entanto, essa deformação é normalmente desprezada, pois:

a — a distância entre condutores e entre estes e o solo é, em geral, muito grande quando comparada com o diâmetro dos condutores e a zona de perturbação;

b — nas linhas de altas e altíssimas tensões são empregados cabos de grandes diâmetros e número elevado de fios na capa externa, cuja superfície tende, portanto, a uma curvatura única, minimizando a deformação produzida;

c — nos condutores múltiplos, os campos elétricos de cada um dos subcondutores se compõem para formar um único, reduzindo, assim, ainda mais o efeito das irregularidades.

Face a essas considerações, conclui-se que, para o cálculo das capacitâncias, é suficiente o emprego do raio externo dos condutores desprezando-se qualquer eventual influência da distorção do campo.

A fim de compensar a variação da altura dos condutores, tem-se recomendado a mesma correção no valor da altura empregada no cálculo das indutâncias.

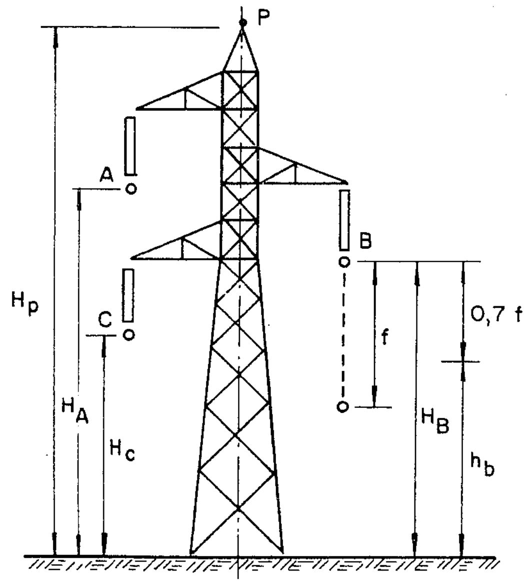


Fig 8.11 — *Correção das alturas dos condutores, para o cálculo de capacitância.*

Sejam H_A, H_B e H_C as alturas de suspensão dos condutores nas estruturas e seja f [m] a flecha nas condições de temperatura média, sem vento. Nessas condições, nos cálculos das capacitâncias deve-se empregar:

$$h_a = H_A - 0{,}7\,f$$

$$h_b = H_B - 0{,}7\,f \qquad \text{(Eq. 7.39)}$$

$$h_c = H_C - 0{,}7\,f.$$

Igualmente para os cabos pára-raios:

$$h_p = H_p - 0{,}7\,f_p. \qquad (8.27)$$

Essa correção, se bem que imperfeita, é considerada satisfatória.

A fim de compensar os efeitos produzidos pelos fatores dos itens *c* e *d*, Dalla Verde recomenda que se aumente o valor das capacitâncias parciais entre fase e terra em cerca de 5% de seu valor.

Nas idealizações feitas, admitimos ser a superfície terrestre um plano eqüipotencial de potencial nulo. Na realidade, tudo indica que esse plano está a uma determinada profundidade sob a mesma, possivelmente na região dos lençóis freáticos aí existentes. Sua exata localização sob uma linha é desconhecida, e impraticável sua determinação. O erro daí decorrente, em verdade pequeno, pode sobrepujar, no entanto, os erros dos demais fatores enumerados. Habitualmente não se efetua qualquer correção, mesmo empírica (ver Item 10.5.2).

8.3.1 — Capacitância das Linhas Monofásicas

Os condutores *a* e *b* da Fig. 8.12 representam os condutores de uma linha monofásica, acoplados capacitivamente entre si e o solo pelas capacitâncias parciais indicadas.

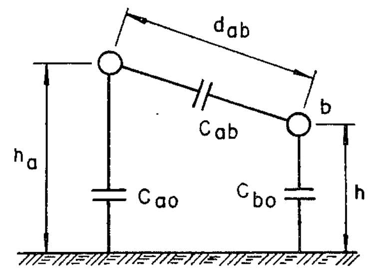


Fig. 8.12 — *Capacidades parciais da linha monofásica.*

Empregando a Eq. (8.14*b*), teremos:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_a \\ \dot{U}_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{aa} & a_{ab} \\ a_{ab} & a_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{Q}_a \\ \dot{Q}_b \end{bmatrix} \tag{8.28}$$

que, pela Eq. (8.23), tem a seguinte solução:

$$\begin{bmatrix} \dot{Q}_a \\ \\ \dot{Q}_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dfrac{G_{aa}}{D} & \dfrac{G_{ab}}{D} \\ \\ \dfrac{G_{ab}}{D} & \dfrac{G_{bb}}{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_a \\ \\ \dot{U}_b \end{bmatrix} \tag{8.29}$$

De acordo com a Eq. (8.22), temos igualmente:

$$\begin{bmatrix} \dot{Q}_a \\ \dot{Q}_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{ao} + C_{ab} & -C_{ab} \\ -C_{ab} & C_{bo} + C_{ab} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_a \\ \dot{U}_b \end{bmatrix}; \tag{8.30}$$

como (8.29) e (8.30) devem ser iguais, temos:

$$C_{ao} + C_{ab} = \frac{G_{aa}}{D} \qquad C_{ab} = -\frac{G_{ab}}{D} \tag{8.31}$$

$$C_{bo} + C_{ab} = \frac{G_{bb}}{D}$$

ou

$$C_{ao} = \frac{G_{aa}}{D} + \frac{G_{ab}}{D}$$

$$\tag{8.32}$$

$$G_{bo} = \frac{G_{bb}}{D} + \frac{G_{ab}}{D}.$$

Como:

$$\frac{G_{ab}}{D} = \frac{a_{bb}}{a_{aa}\,a_{bb} - a_{ab}^2}; \qquad \frac{G_{bb}}{D} = \frac{a_{aa}}{a_{aa}\,a_{bb} - a_{ab}^2}$$

e

$$\frac{G_{ab}}{D} = -\frac{a_{ab}}{a_{aa}\,a_{bb} - a_{ab}^2},$$

teremos:

$$C_{ao} = \frac{a_{bb} - a_{ab}}{a_{aa}\,a_{bb} - a_{ab}^2} \quad \text{[F/km]} \tag{8.33a}$$

$$C_{bo} = \frac{a_{aa} - a_{ab}}{a_{aa}\,a_{bb} - a_{ab}^2} \quad \text{[F/km]} \tag{8.33b}$$

$$C_{ab} = \frac{a_{ab}}{a_{aa}\,a_{bb} - a_{ab}^2} \quad \text{[F/km]}. \tag{8.33c}$$

C_{ao} e C_{bo} são *capacitâncias parciais* entre os condutores a e b e o solo;

C_{ab} é a *capacitância parcial* entre os condutores a e b.

Na Fig. 8.13 está representado o circuito elétrico equivalente de uma linha monofásica, alimentada por um gerador. Este *sente* as suas capacitâncias parciais como se alimentasse um circuito do tipo daquele representado na figura, que pode ser substituído por um único capacitor equivalente, cujo valor é dado pela expressão:

$$C_s = C_{ab} + \frac{C_{ao}\,C_{bo}}{C_{ao} + C_{bo}} \quad \text{[F/km]}. \tag{8.34}$$

Essa capacitância equivalente recebe o nome de *capacitância aparente* da linha. No caso das linhas monofásicas, ela se confunde com a chamada *capacitância de serviço.*

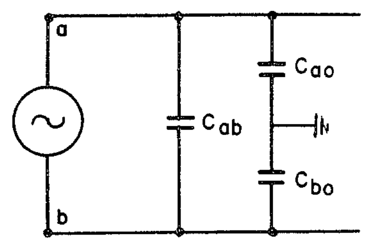


Fig. 8.13 — *Circuito equivalente das capacitâncias de uma LT monofásica.*

A fim de se obterem os valores numéricos das capacitâncias de serviço C_s, determinam-se os valores dos coeficientes de potencial através da Eq. (8.15), que, introduzidos nas Eqs. (8.33), nos dão os valores das capacitâncias parciais. A capacitância de serviço será determinada pela Eq. (8.34).

Quando a linha monofásica for construída com condutores de mesmos diâmetros e suspensos a uma mesma altura, teremos:

$$r_a = r_a = r$$

e

$$h_a = h_b = h;$$

logo,

$$a_{aa} = a_{bb}.$$

Nessas condições, as Eqs. (8.33) se tornam:

$$C_{ao} = C_{bo} = \frac{a_{aa} - a_{ab}}{a_{aa}^2 - a_{ab}^2} = \frac{1}{a_{aa} + a_{ab}} \quad [\text{F/km}] \tag{8.35a}$$

$$C_{ab} = \frac{a_{ab}}{a_{aa}^2 - a_{ab}^2} \quad [\text{F/km}]. \tag{8.35b}$$

Substituindo esses novos valores das capacitâncias parciais na Eq. (8.34), teremos:

$$C_s = \frac{1}{2(a_{aa} - a_{ab})} \quad [\text{F/km}]\,; \tag{8.36}$$

introduzindo os coeficientes de potencial.

$$C_s = \frac{1}{2\left(18 \cdot 10^6\, Ln\, 2h/r - 18 \cdot 10^6\, Ln\, \dfrac{D_{ij}}{d_{ij}}\right)}$$

$$C_s = \frac{1}{36 \cdot 10^6\, Ln\, \dfrac{d}{r} \cdot \dfrac{2h}{D}} \tag{8.37a}$$

ou, empregando logaritmos decimais:

$$C_s = \frac{0{,}0120616 \cdot 10^{-6}}{log\, \dfrac{d}{r} \cdot \dfrac{2h}{D}} \quad [\text{F/km}]. \tag{8.37b}$$

Nas linhas monofásicas reais, em geral d é consideravelmente menor do que h, portanto $\dfrac{2h}{D}$ pode ser geralmente considerado igual à unidade,

sem incorrermos em erros apreciáveis. Logo, para a maior parte das aplicações basta empregar a expressão:

$$C_s = \frac{0{,}0120616 \cdot 10^{-6}}{\log \dfrac{d}{r}} \quad [\text{F/km}]. \tag{8.38}$$

As expressões (8.37) e (8.38) são aplicáveis para a determinação da capacitância de serviço por *quilômetro de linha*. Quando desejarmos conhecê-la *por quilômetro de condutor*, teremos:

$$C_s = \frac{0{,}0241232 \cdot 10^{-6}}{\log \dfrac{d}{r}} \quad [\text{F/km}]. \tag{8.39}$$

8.3.2 — Capacitâncias das Linhas de Transmissão Trifásicas

Como já vimos na introdução deste capítulo, cada condutor de uma linha de transmissão está acoplado capacitivamente com os demais condutores que se encontram em sua proximidade, com os cabos pára-raios e com o próprio solo. O valor da capacitância existente entre um condutor e os demais com que está acoplado representa as chamadas *capacitâncias parciais* das linhas de transmissão. Um circuito elétrico equivalente a esse acoplamento pode ser bastante complexo, dependendo do número de condutores intervenientes. Assim, em uma linha trifásica simples com um cabo pára-raios, cada cabo condutor será acoplado com os dois outros cabos, com o pára-raios e o solo, como mostra a Fig. 8.19; nesta está indicado o acoplamento do condutor a, numa linha a circuito duplo.

As *capacitâncias aparentes* são capacitâncias fictícias entre os condutores e um neutro de potencial nulo (solo), que produzem sobre um gerador que alimenta a linha o mesmo efeito que as capacitâncias parciais acopladas (Fig. 8.18). Estas têm significado físico de que carecem as primeiras. Elas tomam em devida consideração as diferenças entre valores instantâneos das tensões, não podendo ser obtidas pelos usuais processos de redução de circuitos e transformação triângulo-estrela e vice-versa. As capacitâncias aparentes, no entanto, põem em evidência o desequilíbrio elétrico das linhas de transmissão, que também só pode ser anulado por intermédio das transposições.

Para cálculos de desempenho das linhas, é usual considerar as linhas equilibradas, podendo-se definir uma capacitância válida para qualquer uma das fases da linha, que é a chamada *capacitância de seqüência positiva*, ou *de serviço*. É a capacitância que empregamos nos circuitos equivalentes e modelos matemáticos das linhas de transmissão, desenvolvidos no Cap. 5. Ela é derivável, como veremos, a partir das capacitâncias aparentes ou por transformação linear direta. As capacitâncias de seqüência nula, empregadas em cálculos de curto-circuito que envolvem linhas muito longas, podem ser determinadas diretamente a partir das capacitâncias parciais ou por transformação linear direta.

8.3.2.1 — Linha Trifásica Simples, sem Cabos Pára-Raios

Consideremos uma linha trifásica simples, sem cabos pára-raios, cujos cabos condutores são designados a, b, e c, estando a alturas médias sobre o solo iguais a, respectivamente, h_a, h_b e h_c. Sejam $\dot{U}_a$, $\dot{U}_b$ e $\dot{U}_c$ os seus potenciais com relação ao solo. De acordo com a Eq. (8.13), teremos:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_a \\ \dot{U}_b \\ \dot{U}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{aa} & a_{ab} & a_{ac} \\ a_{ab} & a_{bb} & a_{bc} \\ a_{ac} & a_{bc} & a_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{Q}_a \\ \dot{Q}_b \\ \dot{Q}_c \end{bmatrix} . \quad [\mathrm{V}], \qquad (8.40)$$

na qual os elementos a_{ii} e a_{ij} são os coeficientes de potencial calculáveis através das Eqs. (8.14). Da Eq. (8.40) obtemos:

$$\begin{bmatrix} \dot{Q}_a \\ \dot{Q}_b \\ \dot{Q}_c \end{bmatrix} = \frac{1}{D} \begin{bmatrix} G_{aa} & G_{ab} & G_{ac} \\ G_{ab} & G_{bb} & G_{bc} \\ G_{ac} & G_{bc} & G_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_a \\ \dot{U}_b \\ \dot{U}_c \end{bmatrix} \quad [\mathrm{coulomb/km}]. \qquad (8.41)$$

As capacitâncias parciais serão, empregando as Eqs. (8.25) e (8.26):

$$C_{ao} = \frac{G_{aa} + G_{ab} + G_{ac}}{D}, \quad C_{bo} = \frac{G_{bb} + G_{ab} + G_{bc}}{D} \quad \text{e} \quad C_{co} = \frac{G_{cc} + G_{ac} \times G_{bc}}{D}$$

$$C_{ab} = -\frac{G_{ab}}{D}; \quad C_{ac} = -\frac{G_{ac}}{D} \quad \text{e} \quad C_{bc} = -\frac{G_{bc}}{D}.$$

Essas capacitâncias podem ser representadas pelo circuito equivalente da Fig. 8.14 e pela Eq. (8.42), derivada da Eq. (8.22):

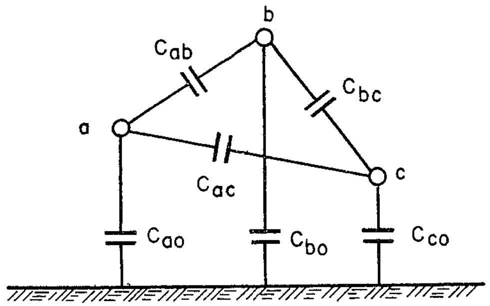


Fig. 8.14 — *Circuito equivalente capacitivo de uma linha trifásica simples.*

$$\begin{bmatrix} \dot{Q}_a \\ \dot{Q}_b \\ \dot{Q}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (C_{ao} + C_{ab} + C_{ac}) & -C_{ab} & -C_{ac} \\ -C_{ab} & (C_{bo} + C_{ab} + C_{bc}) & -C_{bc} \\ -C_{ac} & -C_{bc} & (C_{co} + C_{ac} + C_{bc}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_a \\ \dot{U}_b \\ \dot{U}_c \end{bmatrix} . \qquad (8.42)$$

Esse sistema de capacitâncias pode ser substituído por um sistema de três capacitâncias equivalentes, uma por fase, como mostra a Fig. 8.15.

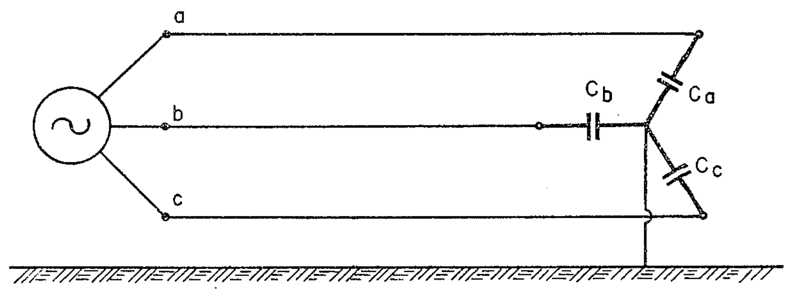


Fig. 8.15 — *Capacitâncias equivalentes de uma linha trifásica simples.*

Para efetuarmos a passagem do circuito da Fig. 8.14 para o da Fig. 8.15, ou seja, a fim de determinarmos os valores de C_a, C_b e C_c, devemos considerar os instantes em que ocorrem os máximos acoplamentos capacitivos entre as fases.

Nos sistemas trifásicos normais, a seguinte condição é assegurada:

$$\dot{U}_a + \dot{U}_b + \dot{U}_c = 0. \qquad (8.43)$$

Assim sendo, no instante em que u_a tem seu valor máximo $U_{\text{máx}}$, a carga no condutor a será também $Q_{\text{máx}}$, enquanto que, nos condutores b e c, as tensões serão, respectivamente, $u_b = u_c = -\frac{1}{2} U_{\text{máx}}$. Se considerarmos 120° elétricos mais tarde, teremos $u_b = U_{\text{máx}}$, logo $Q_b = Q_{\text{máx}}$ e $u_a = u_c = -\frac{1}{2} U_{\text{máx}}$, e assim sucessivamente.

Se, portanto, fizermos essas considerações para as equações individuais retratadas na equação matricial (8.42), teremos:

para $u_a = U_{\text{máx}}$:

$$Q_{a\text{máx}} = \left[(C_{ao} + C_{ab} + C_{ac}) + \frac{1}{2} (C_{ab} + C_{ac}) \right] U_{\text{máx}};$$

para $u_b = U_{\text{máx}}$:

$$Q_{b\text{máx}} = \left[(C_{bo} + C_{ab} + C_{bc}) + \frac{1}{2}(C_{ab} + C_{bc})\right] U_{\text{máx}};$$

para $u_c = U_{\text{máx}}$:

$$Q_{c\text{máx}} = \left[(C_{co} + C_{ac} + C_{bc}) + \frac{1}{2}(C_{ac} + C_{bc})\right] U_{\text{máx}}$$

ou

$$Q_{a\text{máx}} = \left[C_{ao} + \frac{3}{2}(C_{ab} + C_{ac})\right] U_{\text{máx}};$$

$$Q_{b\text{máx}} = \left[C_{bc} + \frac{3}{2}(C_{ab} + C_{bc})\right] U_{\text{máx}};$$

$$Q_{c\text{máx}} = \left[C_{cc} + \frac{3}{2}(C_{ac} + C_{bc})\right] U_{\text{máx}}.$$

Se lembrarmos que $C = Q/U$, teremos:

$$C_a = C_{ao} + \frac{3}{2}(C_{ab} + C_{ac}) \quad \text{[F/km]}; \tag{8.44a}$$

$$C_b = C_{bo} + \frac{3}{2}(C_{ab} + C_{bc}) \quad \text{[F/km]}; \tag{8.44b}$$

$$C_c = C_{co} + \frac{3}{2}(C_{ac} + C_{bc}) \quad \text{[F/km]}. \tag{8.44c}$$

Essas são as capacitâncias equivalentes de uma linha trifásica, excitada por tensões senoidais trifásicas. Elas põem em destaque o desequilíbrio eletrostático existente nas linhas de transmissão. Para que haja equilíbrio, é necessário que as três sejam iguais. Para tanto, todos os seus termos devem ser iguais, o que só será possível se elementos da diagonal da matriz $[A]^{-1}$ forem iguais entre si, assim como os termos fora da diagonal também devem ser iguais entre si. Assim sendo, as capacitâncias entre fase e solo serão iguais e as capacitâncias entre fase serão também iguais entre si. Portanto, a matriz [A] terá que ser uma matriz com termos iguais na diagonal e termos iguais fora da diagonal.

No Cap. 7 vimos que foi possível obter uma matriz de coeficientes de campo nessas condições, empregando-se *transposições cíclicas* da linha. O mesmo, como veremos, é possível também neste caso. Consideremos a

linha dividida em três trechos de comprimento igual. Para facilitar, admitamos que tenha um comprimento unitário. Acompanhando o esquema das transposições, aqui repetido na Fig. 8.16 para maior clareza, teremos, aplicando a Eq. (8.13) a cada um dos trechos:

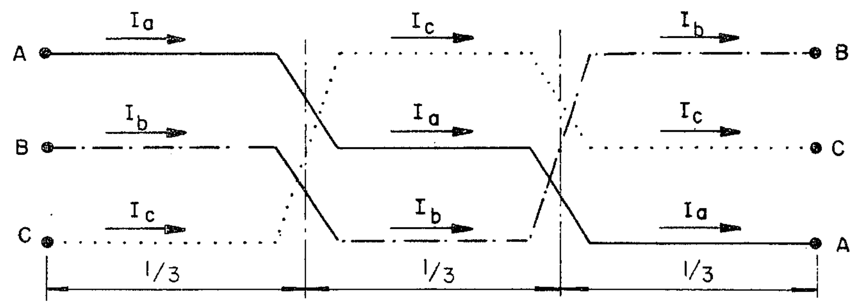


Fig. 8.16 — *Transposição em linha trifásica.*

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_a \\ \dot{U}_b \\ \dot{U}_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3}\left\{\begin{bmatrix} a_{aa} & a_{ab} & a_{ac} \\ a_{ab} & a_{bb} & a_{bc} \\ a_{ac} & a_{bc} & a_{cc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_{ac} & a_{bc} & a_{cc} \\ a_{aa} & a_{ab} & a_{ac} \\ a_{ab} & a_{bb} & a_{bc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_{ab} & a_{bb} & a_{bc} \\ a_{ac} & a_{bc} & a_{cc} \\ a_{aa} & a_{ab} & a_{ac} \end{bmatrix}\right\}\begin{bmatrix} \dot{Q}_a \\ \dot{Q}_b \\ \dot{Q}_c \end{bmatrix}.$$

Efetuando as operações indicadas:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_a \\ \dot{U}_b \\ \dot{U}_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} (a_{aa}+a_{bb}+a_{cc}) & (a_{ab}+a_{bc}+a_{ac}) & (a_{ab}+a_{bc}+a_{ac}) \\ (a_{ab}+a_{bc}+a_{ac}) & (a_{aa}+a_{bb}+a_{cc}) & (a_{ab}+a_{bc}+a_{ac}) \\ (a_{ab}+a_{bc}+a_{ac}) & (a_{ab}+a_{bc}+a_{ac}) & (a_{aa}+a_{bb}+a_{cc}) \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \dot{Q}_a \\ \dot{Q}_b \\ \dot{Q}_c \end{bmatrix}. \tag{8.45}$$

Vemos que a Eq. (8.45) apresenta todos os termos da diagonal iguais entre si, como também o são os termos fora da diagonal.

Na diagonal temos:

$$\bar{a}_{aa} = \frac{1}{3}(a_{aa} + a_{bb} + a_{cc}). \tag{8.46}$$

Substituindo os coeficientes de potencial por suas expressões dadas pela Eq. (8.15):

$$\bar{a}_{aa} = \frac{1}{3} \cdot 18 \cdot 10^6 \left(Ln\,\frac{2h_a}{r_a} + Ln\,\frac{2h_b}{r_b} + Ln\,\frac{2h_c}{r_c}\right)$$

ou, lembrando que nas linhas normais temos sempre $r = r_a = r_b = r_c$:

$$\overline{a}_{aa} = 18 \cdot 10^6 \, Ln \, \frac{2\sqrt[3]{h_a\, h_b\, h_c}}{r} \quad [\text{km/F}] \tag{8.47a}$$

ou, se preferirmos:

$$\overline{a}_{aa} = 4{,}14468 \cdot 10^7 \log \frac{2h_m}{r} \quad [\text{km/F}], \tag{8.47b}$$

sendo:

$$h_m = \sqrt[3]{h_a h_b h_c} \qquad \text{(Eq. 7.71c)}$$

a altura média geométrica dos condutores.

Fora da diagonal temos:

$$\overline{a}_{ab} = \frac{1}{3}\,(a_{ab} + a_{ac} + a_{bc}) \tag{8.48}$$

com os valores de a_{ij} da Eq. (8.15):

$$\overline{a}_{ab} = \frac{1}{3} \cdot 18 \cdot 10^6 \left(Ln \, \frac{D_{ab}}{d_{ab}} + Ln \, \frac{D_{ac}}{d_{ac}} + Ln \, \frac{D_{bc}}{d_{bc}} \right);$$

logo,

$$\overline{a}_{ab} = 18 \cdot 10^6 \, Ln \, \frac{\sqrt[3]{D_{ab}D_{ac}D_{bc}}}{\sqrt[3]{d_{ab}d_{ac}d_b}} \quad [\text{km/F}] \tag{8.49}$$

ou

$$\overline{a}_{ab} = 4{,}14468 \cdot 10^7 \log \frac{D_{mi}}{D_m} \quad [\text{km/F}], \tag{8.50}$$

definindo:

$D_{mi} = \sqrt[3]{D_{ab}D_{bc}D_{ac}}$ — distância média geométrica entre um condutor e a imagem de seu vizinho; (Eq. 7.71b)

$D_m = \sqrt[3]{d_{ab}d_{bc}d_{ac}}$ — distância média geométrica entre condutores. (Eq. 7.71)

A Eq. (8.45) torna-se, portanto:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_a \\ \dot{U}_b \\ \dot{U}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{a}_{aa} & \overline{a}_{ab} & \overline{a}_{ab} \\ \overline{a}_{ab} & \overline{a}_{aa} & \overline{a}_{ab} \\ \overline{a}_{ab} & \overline{a}_{ab} & \overline{a}_{aa} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{Q}_a \\ \dot{Q}_b \\ \dot{Q}_c \end{bmatrix}. \tag{8.51}$$

Efetuando a inversão da matriz acima, encontraremos:

$$D = (\overline{a}_{aa} - \overline{a}_{ab})^2\,(\overline{a}_{aa} + 2\overline{a}_{ab}) \tag{8.52a}$$

$$G_{aa} = (\overline{a}^2_{aa} - \overline{a}^2_{ab}) \tag{8.52b}$$

$$G_{ab} = G_{ac} = G_{bc} = -\,\overline{a}_{ab}(\overline{a}_{aa} - \overline{a}_{ab}). \tag{8.52c}$$

Os termos da matriz invertida serão:

— na diagonal:

$$\frac{(\overline{a}^2_{aa} - \overline{a}^2_{ab})}{(\overline{a}_{aa} - \overline{a}_{ab})^2(\overline{a}_{aa} + 2\overline{a}_{ab})} = \frac{\overline{a}_{aa} + \overline{a}_{ab}}{(\overline{a}_{aa} - \overline{a}_{ab})(\overline{a}_{aa} + 2\overline{a}_{ab})}\,; \tag{8.53}$$

— fora da diagonal:

$$\frac{-\,a_{ab}(\overline{a}_{aa} - \overline{a}_{ab})}{(\overline{a}_{aa} - \overline{a}_{ab})^2(a_{aa} + 2a_{ab})} = -\,\frac{\overline{a}_{ab}}{(\overline{a}_{aa} - \overline{a}_{ab})(\overline{a}_{aa} + 2\overline{a}_{ab})}. \tag{8.54}$$

Finalmente, substituindo esses valores nas expressões das capacitâncias parciais, obteremos:

$$C_{ao} = C_{bo} = C_{co} = C_o = \frac{1}{\overline{a}_{aa} + 2\overline{a}_{ab}} \quad [\text{F/km}] \tag{8.55}$$

e

$$C_{ab} = C_{ac} = C_{bc} = C_{ab} = \frac{\overline{a}_{ab}}{(\overline{a}_{aa} - \overline{a}_{ab})(\overline{a}_{aa} - 2\overline{a}_{ab})} \quad [\text{F/km}]. \tag{8.56}$$

A capacitância média entre fase e solo, $\overline{C}_o$, é a capacitância de seqüência nula de uma linha trifásica simples.

Se, nas Eqs. (8.44), substituirmos as capacitâncias parciais por seus valores médios, encontraremos:

$$C_a = C_b = C_c = C_s = \overline{C}_o + 3\overline{C}_{ab} \tag{8.57}$$

e, pela introdução de $\overline{C}_o$ e $\overline{C}_{ab}$ pelas Eqs. (8.55) e (8.56), teremos:

$$C_s = \frac{1}{\overline{a}_{aa} - \overline{a}_{ab}} \quad [\text{F/km}], \tag{8.58}$$

que é a *capacitânia de seqüência positiva*, ou *de serviço*.

Se na Eq. (8.58), substituirmos os coeficientes de potencial pelas Eqs. (8.47*a*) e (8.50), encontraremos:

$$C_s = \frac{0{,}02412 \cdot 10^{-6}}{\log \dfrac{D_m}{r}\left[\dfrac{1}{\sqrt{1+\left(\dfrac{D_m}{2h_m}\right)^2}}\right]} \quad [\text{F/km}]. \tag{8.59}$$

Como, normalmente, $2h_m \simeq D_m$, a expressão (8.59) pode ser reduzida a:

$$C_s = \frac{0{,}02412 \cdot 10^{-6}}{\log \dfrac{D_m}{r}} \quad [\text{F/km}], \tag{8.60}$$

que é a forma clássica encontrada na literatura para o cálculo das capacitâncias de seqüência positiva.

8.3.2.1.1 — Capacitâncias das Linhas com Condutores Múltiplos

Seja um condutor múltiplo composto de n subcondutores, dispostos uniformemente sobre o círculo de raio R, cujo centro se encontra a uma altura h [m] sobre o solo, sendo $h >> R$ (em geral $H > 30R$). Os subcondutores são mantidos em posição no meio do vão através de espaçadores convenientemente distribuídos e, nos pontos de suspensão, através de ferragens apropriadas. Tanto as ferragens como os espaçadores são feitos de materiais condutores, de forma que, dentro do rigor requerido na solução de problemas de desempenho das linhas, pode-se admitir que as cargas elétricas se distribuem uniformemente sobre as superfícies dos condutores. Seus potenciais serão, portanto, iguais.

Seja Q [coulomb/km] a carga unitária de todo o condutor, de forma que cada subcondutor terá uma carga Q/n [coulomb/km], sendo U o seu gradiente de potencial com relação ao solo.

Para cada subcondutor, teremos:

$$\dot{U} = \frac{\dot{Q}}{n}(a_{11} + a_{12} + a_{13} + \ldots + a_{1n}) \tag{8.61a}$$

$$\dot{U} = \frac{\dot{Q}}{n}(a_{22} + a_{21} + a_{23} + \ldots + a_{2r}) \tag{8.61b}$$

$$\dot{U} = \frac{\dot{Q}}{n}(a_{33} + a_{31} + a_{32} + \ldots + a_{3n}) \tag{8.61c}$$

. . . .

$$\dot{U} = \frac{\dot{Q}}{n}(a_{nn} + a_{n1} + a_{n2} + \ldots + a_{n(n-1)}). \tag{8.61d}$$

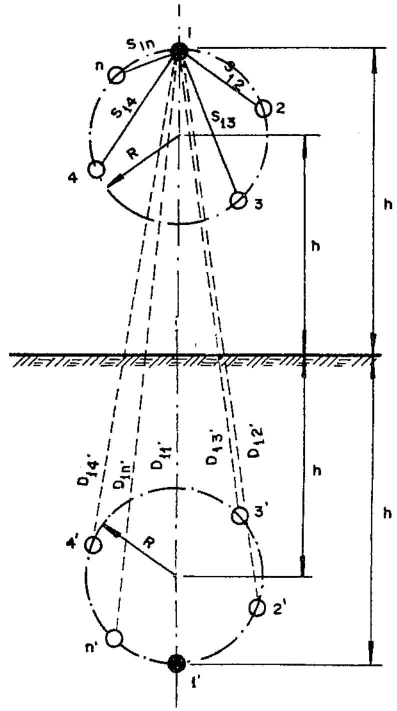


Fig. 8.17 — *Condutor múltiplo e sua imagem.*

Os coeficientes de campo, expressos em função dos condutores e suas imagens, serão:

$$a_{ii} = k \; Ln \frac{2h_i}{r_i}\,; \qquad \text{(Eq. 8.16}a\text{)}$$

$$a_{ij} = k \; Ln \frac{D_{ij}}{s_{ij}}\,, \qquad \text{(Eq. 8.16}b\text{)}$$

nas quais fizemos $4{,}14468 \cdot 10^7 = k$ e $d_{ij} = s_{ij}$.

Por hipótese, temos que:

a — $r_1 = r_2 = r_3 = \ldots = r_n$

b — $D_{11}' = D_{12}' = D_{13}' = \ldots = D_{1n}' \simeq 2h$

c — $s_{13} = s_{24} = s_{35} = \ldots$

$s_{14} = s_{25} = s_{37} = \ldots,$

portanto:

$$a_{11} = a_{22} = a_{33} = \ldots = a_{nn} = k\,Ln\,\frac{2h}{r}.$$

$$a_{12} = k\,Ln\,\frac{2h}{s_{12}};\quad a_{13} = k\,Ln\,\frac{2h}{s_{13}};\quad a_{1n} = k\,Ln\,\frac{2h}{s_{1n}}$$

$$a_{21} = k\,Ln\,\frac{2h}{s_{12}};\quad a_{23} = k\,Ln\,\frac{2h}{s_{12}};\quad a_{2n} = k\,Ln\,\frac{2h}{s_{13}}\quad \text{etc.,}$$

o que permite escrever:

$$(a_{11} + a_{12} + a_{13} + \ldots) = (a_{22} + a_{21} + a_{23} + \ldots) =$$
$$= (a_{33} + a_{31} + a_{32} + \ldots) = \text{etc.};$$

logo,

$$\dot{U} = \frac{\dot{Q}}{n}\left(k\,Ln\,\frac{1}{r} + k\,Ln\,\frac{2h}{s_{13}} + \ldots + k\,Ln\,\frac{2h}{s_{1n}}\right)$$

ou

$$\dot{U} = \frac{\dot{Q}}{n}\cdot k\left(Ln\,\frac{1}{r} + Ln\,\frac{2h}{s_{12}} + Ln\,\frac{2h}{s_{13}} + \ldots + Ln\,\frac{2h}{s_{1n}}\right)$$

$$\dot{U} = \frac{\dot{Q}}{n}\cdot k\left(n\,Ln\,2h + Ln\,\frac{1}{r\,s_{12}\,s_{13}\ldots s_{1n}}\right)$$

e finalmente:

$$\dot{U} = \dot{Q}k\,Ln\,\frac{2h}{\sqrt[n]{r s_{12}\,s_{13}\ldots s_{1n}}}\quad [\text{kV/m}]. \tag{8.62}$$

Admitamos agora que o condutor múltiplo acima seja substituído por um condutor único e cilíndrico de raio externo R_e, de forma que a carga unitária total ainda seja $\dot{Q}$ [coulomb/km], suspenso como seu centro a uma altura h [m] sobre o solo. De acordo com a Eq. (8.10), o seu potencial com relação ao solo será:

$$\dot{U} = \dot{Q}\,k\,Ln\,\frac{2h}{R_e}. \tag{Eq. 8.10a}$$

Se compararmos as Eqs. (8.62) e (8.10a), teremos:

$$R_e = \sqrt[n]{r s_{12}\,s_{13}\ldots s_{1n}}. \tag{8.63}$$

R_e pode ser interpretado como o raio de um condutor cilíndrico fictício que, possuindo a mesma carga $\dot{Q}$ [coulomb/m], produz o mesmo campo elétrico que o condutor múltiplo. Possui, pois, em sua superfície, o mesmo gradiente de potencial que cada um dos subcondutores, para a condição $h >> R$.

No caso, analisamos o condutor múltiplo isoladamente, influenciado apenas pela carga elétrica do solo, longe de quaisquer outras cargas. No caso das linhas de transmissão de energia elétrica isso não ocorre. A presença das cargas elétricas nos condutores das demais fases irá alterar a distribuição dos campos elétricos em torno dos condutores múltiplos, deformando-os. Os subcondutores externos estarão mais sujeitos a essa deformação do que os mais internos, que terão um gradiente de potencial mais elevado. Esse fato é de grande importância no estudo do *efeito Corona*, quando é necessário determinar o valor máximo desses gradientes para o dimensionamento dos condutores nas linhas de tensões acima de 300 [kV] (Cap. 10).

Para os cálculos elétricos de desempenho, o erro admitido em se considerando apenas os valores médios dos potenciais é plenamente justificado.

Nas linhas com condutores múltiplos os coeficientes de potencial próprios passam, então, a ser escritos:

$$a_{ii} = 4{,}14468\quad 10^7 \log\frac{2h}{R_e}\quad [\text{km/F}]. \tag{8.64}$$

8.3.2.2 — Linha Trifásica Simples com um Cabo Pára-Raios

A Fig. (8.17) mostra a silhueta de uma estrutura da linha trifásica a circuito simples, protegida por um cabo pára-raios. A equação dos potenciais desta linha, de acordo com a Eq. (8.13), será:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_a \\ \dot{U}_b \\ \dot{U}_c \\ \hdashline \dot{U}_r \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{ccc:c} a_{aa} & a_{ab} & a_{ac} & a_{ar} \\ a_{ab} & a_{bb} & a_{bc} & a_{br} \\ a_{ac} & a_{bc} & a_{cc} & a_{cr} \\ \hdashline a_{ar} & a_{br} & a_{cr} & a_{rr} \end{array}\right] \begin{bmatrix} \dot{Q}_a \\ \dot{Q}_b \\ \dot{Q}_c \\ \hdashline \dot{Q}_r \end{bmatrix} \; [\mathrm{V}]. \qquad (8.65)$$

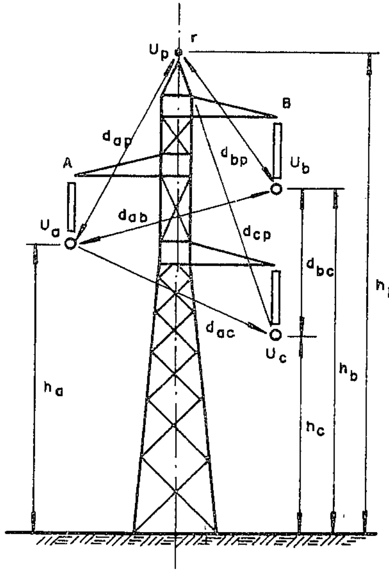


Fig. 8.18 — *LT trifásica simples com um cabo pára-raios.*

A equação das capacitâncias parciais correspondentes ao mesmo sistema será:

$$\begin{bmatrix} Q_a \\ Q_b \\ Q_c \\ \hdashline Q_r \end{bmatrix} \left[\begin{array}{ccc:c} (C_{ao} + C_{ar} + C_{ab} + C_{ac}) & -C_{ab} & -C_{ac} & -C_{ar} \\ -C & (C_{bo} + C_{br} + C_{ab} + C_{bc}) & -C_{bc} & -C_{br} \\ -C_{ac} & -C_{bc} & (C_{co} + C_{cr} + C_{ac} + C_{bc}) & -C_{cr} \\ \hdashline -C_{ar} & -C_{br} & -C_{cr} & (C_{cr} + C_{ar} + C_{br} + C_{ro}) \end{array}\right] \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \\ \hdashline U_r \end{bmatrix} \qquad (8.66)$$

Conforme vimos no capítulo anterior, os pára-raios das linhas de transmissão podem ser isolados ou multiaterrados. A Fig. 8.18 mostra os circuitos capacitivos das capacitâncias parciais das linhas, em ambos os casos.

Um e outro casos podem ser analisados com o auxílio das Eqs. (8.61) e (8.62), bastando, para isso, considerar as condições de contorno adequadas.

a — Linha com cabos pára-raios isolados — O cabo pára-raios não poderá ter cargas próprias, portanto $\dot{Q}_r = 0$. As cargas existentes nos cabos condutores induzirão eletrostaticamente uma diferença de potencial entre o cabo pára-raios e o solo. Este atuará como um divisor de potencial, não influenciando o valor dos potenciais nos cabos condutores, como mostram a Fig. 8.19*b* e a Eq. (8.65). Se, nesta equação, substituirmos $\dot{Q}_r = 0$, ela se transformará numa equação 3×3, sem os coeficientes de potencial referentes aos cabos pára-raios. Sua solução conduz à matriz $[A]^{-1}$, igualmente 3×3. Se, na Eq. (8.66), igualarmos Q_r a zero, obteremos os potenciais U_r, aos quais ficarão submetidos os pára-raios. Esses potenciais exercerão influência sobre as cargas dos condutores de fase. Para determinar os valores das capacitâncias parciais, os elementos da matriz [C] da Eq. (8.66) deverão ser comparados com os elementos da matriz $[A]^{-1}$ da Eq. (8.65). Isso só será possível mediante a redução da matriz [C] a outra matriz 3×3 equivalente.

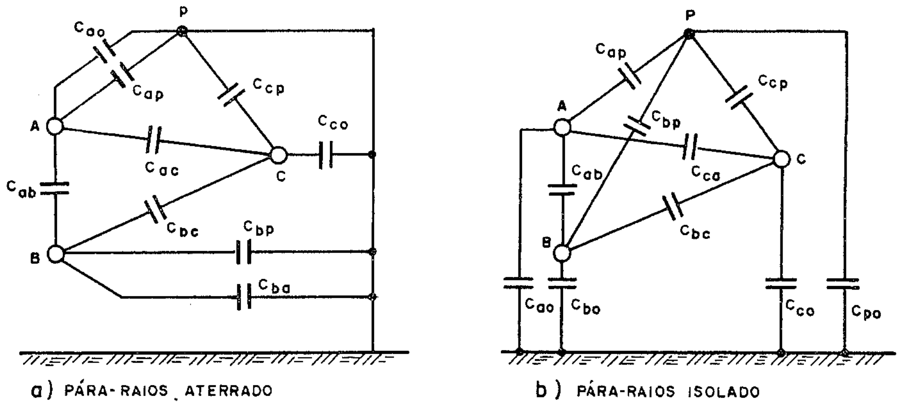


Fig. 8.19 — *Circuito elétrico das capacitâncias parciais nas linhas trifásicas.*

Nessas linhas, porém, é necessário determinar os valores dos potenciais nos pára-raios para efeito de dimensionamento de seu isolamento. Também os gradientes de potencial que ocorrem nos mesmos devem ser conhecidos. Para tanto, recorremos à Eq. (8.66), em cuja última linha fazemos $\dot{Q}_r = 0$:

$$\dot{U}_r = \frac{C_{ar}\dot{U}_a + C_{br}\dot{U}_b + C_{cr}\dot{U}_c}{C_{ar} + C_{br} + C_{cr} + C_{ro}}$$

ou

$$\dot{U}_r = \frac{(C_{ar} + a^2C_{br} + aC_{cr})\,\dot{U}}{C_{ar} + C_{br} + C_{cr} + C_{ro}} \; [\mathrm{V}]. \qquad (8.67)$$

As capacitâncias parciais na Eq. (8.63) são calculadas da forma vista, através das Eqs. (8.25) e (8.26), para o que é necessário efetuar a inversão da matriz dos coeficientes de potencial (8.65).

O mesmo processo é válido para linhas com dois ou mais cabos pára-raios, obtendo-se uma tensão para cada um.

b — Linha com cabos pára-raios multiaterrados — Neste caso, haverá cargas $\dot{Q}_r$ no cabo pára-raios, que aí chegam por condução desde o solo. Seu potencial será o mesmo que o potencial do solo, portanto nulo. Seu valor influenciará o valor das capacitâncias parciais, aparentes e de seqüência nula, não afetando o valor das capacitâncias de seqüência positiva, como veremos.

Para o cálculo das capacitâncias dos cabos condutores, podemos procurar uma linha sem cabos pára-raios, equivalente, através da redução das matrizes dos coeficientes de potencial, empregando a mesma técnica usada para essa redução no capítulo anterior, ou seja, os coeficientes de potencial próprios e mútuos deverão ser corrigidos para terem em devida conta a presença desses cabos. A matriz a ser invertida será, então, uma matriz 3 × 3.

Efetuando essa redução, encontraremos a seguinte matriz:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_a \\ \dot{U}_b \\ \dot{U}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{aa} - \dfrac{a_{ar}^2}{a_{rr}} & a_{ab} - \dfrac{a_{ar}a_{br}}{a_{rr}} & a_{ac} - \dfrac{a_{ar}a_{cr}}{a_{rr}} \\ a_{ab} - \dfrac{a_{ar}a_{br}}{a_{rr}} & a_{bb} - \dfrac{a_{br}^2}{a_{rr}} & a_{bc} - \dfrac{a_{br}a_{cr}}{a_{rr}} \\ a_{ac} - \dfrac{a_{ar}a_{cr}}{a_{rr}} & a_{bc} - \dfrac{a_{br}a_{cr}}{a_{rr}} & a_{cc} - \dfrac{a_{cr}^2}{a_{rr}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{Q}_a \\ \dot{Q}_b \\ \dot{Q}_c \end{bmatrix} \quad (8.68)$$

ou, usando da notação simplificada:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_a \\ \dot{U}_b \\ \dot{U}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{aa} & A_{ab} & A_{ac} \\ A_{ab} & A_{bb} & A_{bc} \\ A_{ac} & A_{bc} & A_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{Q}_a \\ \dot{Q}_b \\ \dot{Q}_c \end{bmatrix} \text{ [V]}. \quad (8.69)$$

A matriz $[A]^{-1}$ obtida a partir da matriz da Eq. (8.65) fornece os elementos para o cálculo das capacitâncias parciais e aparentes da linha trifásica equivalente, empregando-se as Eqs. (8.25), (8.26) e (8.44).

As capacitâncias de seqüência positiva e seqüência nula poderão ser calculadas a partir das Eqs. (8.58) e (8.55), respectivamente. Para tanto, é necessário determinar os valores médios dos coeficientes de potencial compostos da Eq. (8.69).

Teremos como ponto de partida a matriz $[A]$ da linha transposta, derivada de forma semelhante à matriz da Eq. (8.51):

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_a \\ \dot{U}_b \\ \dot{U}_c \\ \hline \dot{U}_r \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{ccc|c} \overline{a}_{aa} & \overline{a}_{ab} & \overline{a}_{ab} & \overline{a}_{ar} \\ \overline{a}_{ab} & \overline{a}_{aa} & \overline{a}_{ab} & \overline{a}_{ar} \\ \overline{a}_{ab} & \overline{a}_{ab} & \overline{a}_{aa} & \overline{a}_{ar} \\ \hline \overline{a}_{ar} & \overline{a}_{ar} & \overline{a}_{ar} & \overline{a}_{rr} \end{array}\right] \begin{bmatrix} \dot{Q}_a \\ \dot{Q}_b \\ \dot{Q}_c \\ \hline \dot{Q}_r \end{bmatrix} \text{ [V]}. \quad (8.70)$$

Nessa equação, os coeficientes de potencial $\overline{a}_{aa}$ e $\overline{a}_{ab}$ são os mesmos anteriormente definidos pelas expressões (8.47) ou (8.64) e (8.50). Teremos ainda:

$$\overline{a}_{ar} = 18 \cdot 10^6 \, Ln \frac{\sqrt[3]{D_{ar}\, D_{br}\, D_{cr}}}{\sqrt[3]{d_{ar}\, d_{br}\, d_{cr}}} \quad \text{[km/F]} \quad (8.71)$$

ou

$$\overline{a}_{ar} = 4{,}14468 \cdot 10^6 \, Ln \frac{D_{ir}}{D_{mr}} \quad \text{[km/F]}, \quad (8.72)$$

na qual

$$D_{ir} = \sqrt[3]{D_{ar}\, D_{br}\, D_{cr}} \quad (8.73)$$

é a distância média geométrica de cada um dos condutores à imagem do cabo pára-raio e

$$D_{m_r} = \sqrt[3]{d_{ar}\, d_{br}\, d_{cr}} \quad \text{(Eq. 7.149)}$$

é a distância média geométrica entre condutores e cabo pára-raios.

Nessas condições, os coeficientes de potencial compostos terão os seguintes valores médios:

$$\overline{A}_{aa} = \overline{a}_{aa} - \frac{\overline{a}_{ar}^2}{a_{rr}}\,; \quad (8.74a)$$

$$A_{ab} = \overline{a}_{ab} - \frac{\overline{a}_{ar}^2}{a_{rr}}\,, \quad (8.74b)$$

ou seja, os fatores de correção são iguais, seja para os termos da diagonal, seja para os termos fora da diagonal. Teremos então:

a — capacitância de seqüência nula — em virtude da Eq. (8.55):

$$\bar{C}_o = \frac{1}{\bar{A}_{aa} + 2\bar{A}_{ab}} = \frac{1}{\bar{a}_{aa} + 2\bar{a}_{ab} - 3\,\dfrac{a_{ar}^2}{a_{rr}}} \quad \text{[F/km]}; \qquad (8.75a)$$

b — capacitância de seqüência positiva — da Eq. (8.58) obteremos:

$$C_s = \frac{1}{\bar{A}_{aa} - \bar{A}_{ab}} = \frac{1}{\bar{a}_{aa} - \bar{a}_{ab}} \quad \text{[F/km]}. \qquad (8.75b)$$

A equação acima nada mais é do que a Eq. (8.58) encontrada para a linha sem cabos pára-raios. Portanto: *os cabos pára-raios nenhuma influência exercem sobre o valor das capacitâncias de seqüência positiva.*

8.3.2.3 — Linha Trifásica a Circuito Simples com Dois ou Mais Cabos Pára-Raios

A matriz dos coeficientes de potencial será da ordem $(3+n)\times(3+n)$, se n for o número de cabos pára-raios. Essa matriz, através da técnica delineada no Item 7.5.2, pode ser reduzida a uma matriz 3×3 de uma linha trifásica, sem cabos pára-raios, equivalente, em cujos coeficientes de potencial, agora compostos, se inclui o efeito desses cabos. A matriz resultante será da forma da matriz da Eq. (8.69), porém os coeficientes de correção, um tanto mais complexos. Sua influência se fará sentir nas capacitâncias parciais, aparentes e de seqüência nula. Não terão, porém, efeito sobre os valores das capacitâncias de seqüência positiva.

Com um pouco de trabalho, pode-se mostrar que nas linhas transpostas, com dois cabos pára-raios, o fator de correção da matriz dos coeficientes de potencial é:

$$\Delta\bar{a} \cong \frac{2\,\bar{a}_{ar}^2}{a_{rr} + a_{rs}}\,. \qquad (8.76)$$

Nessas condições, a capacitância de seqüência nula será, se aplicarmos a Eq. (8.55):

$$C_o = \frac{1}{\bar{A}_{aa} + 2\bar{A}_{ab}} = \frac{1}{\bar{a}_{aa} - \left(\dfrac{2\bar{a}_{ar}^2}{a_{rr} + a_{rs}}\right) + 2\left[\bar{a}_{ab} - \left(\dfrac{2\bar{a}_{ar}^2}{a_{rr} + a_{rs}}\right)\right]}$$

ou

$$C_o = \frac{1}{\bar{a}_{aa} + 2\bar{a}_{ab} - \dfrac{6\bar{a}_{ar}^2}{a_{rr} + a_{rs}}} \quad \text{[F/km]}, \qquad (8.77)$$

sendo:

$$\bar{a}_{ar} = k\,Ln\,\frac{\sqrt[6]{D_{ar}D_{br}D_{cr}D_{as}D_{bs}D_{cs}}}{\sqrt[6]{d_{ar}d_{br}d_{cr}d_{as}d_{bs}d_{cs}}} \quad \text{[km/F]}; \qquad (8.78)$$

$\bar{a}_{aa}$ e $\bar{a}_{ab}$ foram definidos, respectivamente, pelas Eqs. (8.47*a*) e (8.50) e a_{rr} e a_{rs}, pela Eq. (8.15).

8.3.2.4 — Linhas Trifásicas a Circuito Duplo

Consideremos uma linha trifásica a circuito duplo, como a da Fig. 7.16, ou das linhas idênticas a circuito simples, em paralelo, como na Fig. 7.17. O nosso desenvolvimento será aplicável a ambos os casos, como o foi no Cap. 7. A matriz de coeficientes de potencial, nesse caso, será da ordem $(6 + n) \times (6 + n)$, sendo n o número de cabos pára-raios. Dado o efeito de sobreposição existente, é possível analisar cada circuito separadamente, o que nos facilitará bastante o desenvolvimento.

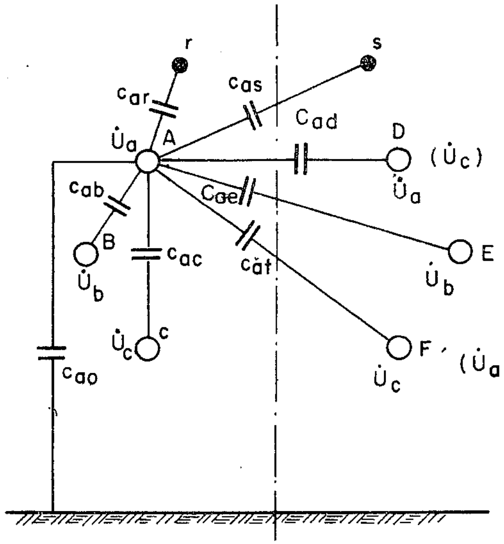


Fig. 8.20 — *Acoplamento capacitivo de um condutor de uma linha trifásica a circuito duplo e dois cabos pára-raios.*

A equação dos coeficientes de potencial será:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_a \\ \dot{U}_b \\ \dot{U}_c \\ \hline \dot{U}_r \\ \dot{U}_s \\ \hline \dot{U}_d \\ \dot{U}_e \\ \dot{U}_f \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{ccc|cc|ccc} a_{aa} & a_{ab} & a_{ac} & a_{ar} & a_{as} & a_{ad} & a_{ae} & a_{af} \\ a_{ab} & a_{bb} & a_{bc} & a_{br} & a_{bs} & a_{bd} & a_{be} & a_{bf} \\ a_{ac} & a_{bc} & a_{cc} & a_{cr} & a_{cs} & a_{cd} & a_{ce} & a_{cf} \\ \hline a_{ra} & a_{rb} & a_{rc} & a_{rr} & a_{rs} & a_{rd} & a_{re} & a_{rf} \\ a_{sa} & a_{sb} & a_{sc} & a_{sr} & a_{ss} & a_{sd} & a_{se} & a_{sf} \\ \hline a_{da} & a_{db} & a_{dc} & a_{dr} & a_{ds} & a_{dd} & a_{de} & a_{df} \\ a_{ea} & a_{eb} & a_{ec} & a_{er} & a_{es} & a_{de} & a_{ee} & a_{ef} \\ a_{fa} & a_{fb} & a_{fc} & a_{fr} & a_{fs} & a_{df} & a_{ef} & a_{ff} \end{array}\right] \begin{bmatrix} \dot{Q}_a \\ \dot{Q}_b \\ \dot{Q}_c \\ \hline \dot{Q}_r \\ \dot{Q}_s \\ \hline \dot{Q}_d \\ \dot{Q}_e \\ \dot{Q}_f \end{bmatrix} \qquad (8.79a)$$

ou, simbolicamente:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{\mathrm{I}} \\ \hline \dot{U}_{PR} \\ \hline \dot{U}_{\mathrm{II}} \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{c|c|c} A_{\mathrm{I}} & A_{FFR_{\mathrm{I}}} & A_{\mathrm{I\,II}} \\ \hline A_{PRF_{\mathrm{I}}} & A_{PR} & A_{PRF_{\mathrm{II}}} \\ \hline A_{\mathrm{II}\cdot\mathrm{I}} & A_{FPR_{\mathrm{II}}} & A_{\mathrm{II}} \end{array}\right] \cdot \begin{bmatrix} \dot{Q}_{\mathrm{I}} \\ \hline \dot{Q}_{PR} \\ \hline \dot{Q}_{\mathrm{II}} \end{bmatrix}. \qquad (8.79b)$$

Analisando as equações acima, vemos que delas podemos obter duas outras: uma referente ao circuito I e outra para o circuito II, que têm em comum os elementos referentes dos pará-raios:

a — circuito I:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{\mathrm{I}} \\ \hline \dot{U}_{PR} \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{c|c|c} A_{\mathrm{I}} & A_{FPR_{\mathrm{I}}} & A_{\mathrm{I\,II}} \\ \hline A_{PRF_{\mathrm{I}}} & A_{PR} & A_{PRF_{\mathrm{II}}} \end{array}\right] \begin{bmatrix} \dot{Q}_{\mathrm{I}} \\ \hline \dot{Q}_{PR} \\ \hline \dot{Q}_{\mathrm{II}} \end{bmatrix}; \qquad (8.80a)$$

b — circuito II:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{PR} \\ \hline \dot{U}_{\mathrm{II}} \end{bmatrix} \left[\begin{array}{c|c|c} A_{PRF_{\mathrm{I}}} & A_{PR} & A_{PRF_{\mathrm{II}}} \\ \hline A_{\mathrm{II}\cdot\mathrm{I}} & A_{FPP_{\mathrm{II}}} & A_{\mathrm{II}} \end{array}\right] \begin{bmatrix} \dot{Q}_{\mathrm{I}} \\ \hline \dot{Q}_{PR} \\ \hline \dot{Q}_{\mathrm{II}} \end{bmatrix}. \qquad (8.80b)$$

No caso de linhas idênticas, portanto simétricas, $[\dot{U}_{\mathrm{I}}] = [\dot{U}_{\mathrm{II}}] = [\dot{U}]$ e $[\dot{Q}_1] = [\dot{Q}_2] = [\dot{Q}]$, as matrizes dos coeficientes são iguais:

$\left[\begin{array}{c|c} A_{\mathrm{I}} & A_{FPR_{\mathrm{I}}} \\ \hline A_{PRF_{\mathrm{I}}} & A_{PR} \end{array}\right]$ — é a matriz do circuito I, considerando os cabos pára-raios; é idêntica à matriz de uma linha a circuito simples, com cabos pára-raios;

$\begin{bmatrix} A_{\mathrm{I\,II}} \\ \hline A_{PRF_{\mathrm{II}}} \end{bmatrix}$ — representa a influência do circuito II sobre o circuito I e vice-versa, dada a reciprocidade das influências.

Portanto, para o circuito I teremos:

$$[\dot{U}] = [A_{\mathrm{I}}]\,[\dot{Q}] + [A_{FPR_{\mathrm{I}}}]\,[\dot{Q}_{PR}] + [A_{\mathrm{I}\cdot\mathrm{II}}]\,[\dot{Q}]$$

$$[\dot{U}_{PR}] = [A_{PRF_{\mathrm{I}}}]\,[\dot{Q}] + [A_{PR}]\,[\dot{Q}_{PR}] + [A_{PRF_{\mathrm{II}}}]\,[\dot{Q}]$$

ou

$$[\dot{U}] = [A_1 + A_{\mathrm{I\,II}}]\,[\dot{Q}] + [A_{FPR_{\mathrm{I}}}]\,[\dot{Q}_{PR}]$$

$$[U_{PR}] = [A_{PRF_{\mathrm{I}}} + A_{PRF_{\mathrm{II}}}]\,[Q] + [A_{PR}]\,[Q_{PR}$$

ou

$$\begin{bmatrix} \dot{U} \\ \hline \dot{U}_{PR} \end{bmatrix} \left[\begin{array}{c|c} (A_1 + A_{\mathrm{I}\cdot\mathrm{II}}) & A_{FPR_{\mathrm{I}}} \\ \hline (A_{PRF_{\mathrm{I}}} + A_{PRF_{\mathrm{II}}}) & A_{PR} \end{array}\right] \begin{bmatrix} \dot{Q} \\ \hline \dot{Q}_{PR} \end{bmatrix} \qquad (8.81)$$

que, escrita por extenso, se torna:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_a \\ \dot{U}_b \\ \dot{U}_c \\ \hline \dot{U}_r \\ \dot{U}_s \end{bmatrix} = \begin{array}{c} \begin{array}{cc} \qquad\qquad A_1 \qquad\qquad & \qquad A_2 \end{array} \\ \left[\begin{array}{c|c} (a_{aa} + a_{ad})(a_{ab} + a_{ae})(a_{ac} + a_{af}) & a_{ar}\ a_{as} \\ (a_{ab} + a_{bd})(a_{bb} + a_{bc})(a_{bc} + a_{bf}) & a_{br}\ a_{bs} \\ (a_{ac} + a_{cd})(a_{bc} + a_{ce})(a_{cc} + a_{cf}) & a_{cr}\ a_{cs} \\ \hline (a_{ar} + a_{dr})(a_{br} + a_{er})(a_{cr} + a_{fr}) & a_{rr}\ a_{rs} \\ (a_{as} + a_{ds})(a_{bs} + a_{es})(a_{cs} + a_{fs}) & a_{rs}\ a_{ss} \end{array}\right] \\ \begin{array}{cc} \qquad\qquad A_3 \qquad\qquad & \qquad A_4 \end{array} \end{array} \begin{bmatrix} \dot{Q}_a \\ \dot{Q}_b \\ \dot{Q}_c \\ \hline \dot{Q}_r \\ \dot{Q}_s \end{bmatrix}. \qquad (8.82)$$

Da mesma forma, podemos estabelecer a equação do circuito II, cuja matriz terá elementos de mesmos valores que os da equação do circuito I.

A fim de efetuarmos a redução da matriz da Eq. (8.83) a matriz da linha trifásica simples equivalente, sem cabos pára-raios, devemos seguir o método delineado no Cap. 7 para a linha com cabos pára-raios aterrados:

$$[A_{eq}] = [A_1] - [A_2]\,[A_4]^{-1}\,[A_3].$$

Se efetuarmos a partição da matriz da Eq. (8.82), veremos que a matriz parcial principal nada mais é do que a matriz de uma linha trifásica a circuito simples, equivalente a uma linha trifásica a circuito duplo, sem cabos pára-raios. Seus coeficientes de potencial são compostos para incluir a influência do circuito II sobre o circuito I. As demais matrizes parciais mostram a influência dos cabos pára-raios sobre o circuito I. Sua solução pode, portanto, ser feita da forma indicada para o caso das linhas a circuitos simples, com dois cabos pára-raios.

Se, no entanto, desejarmos individualizar todas as capacitâncias parciais, será necessário solucionar a matriz completa e efetuar sua inversão. As capacitâncias parciais serão, então, calculadas pelas Eqs. (8.25) e (8.26), empregando-se os elementos da matriz $[A]^{-1}$.

A matriz da Eq. (8.82) pode ser reduzida a uma matriz 3 × 3 da forma vista no Item 7.5.2. Seus coeficientes de potencial, além de refletirem a existência de dois circuitos, deverão também incluir os fatores de correção Δa devidos aos cabos pára-raios. Serão do tipo:

$$\dot{A}_{ii} = (a_{ii} + a_{ii'}) - \Delta a_{ii}; \qquad (8.83a)$$

$$\dot{A}_{ij} = (a_{ij} + a_{ij'}) - \Delta a_{ij}, \qquad (8.83b)$$

nas quais:

$$a_{ii'} = k\ Ln\ \frac{D_{ii'}}{d_{ii'}}; \qquad (8.84a)$$

$$a_{ij'} = k\ Ln\ \frac{D_{ij'}}{d_{ij'}}, \qquad (8.84b)$$

sendo i' e j' condutores genéricos do circuito II.

Exceto pelo valor dos coeficientes de potencial, a matriz resultante será da forma da matriz da Eq. (8.69) e será resolvida da mesma maneira para a obtenção das capacitâncias aparentes.

O cálculo das capacitâncias de seqüência nula e de seqüência positiva será efetuado com a matriz assim obtida, da forma feita no Item 8.3.2.1, empregando-se as Eqs. (8.55) e (8.58), respectivamente. Devemos, no entanto, definir os coeficientes de potencial médios $\overline{A}$ da linha transposta. Teremos:

$$\overline{a}_{aa} = k\ Ln\ \frac{2h_m}{r}\quad [\text{km/F}]; \qquad (\text{Eq. } 8.47b)$$

$$\overline{a}_{ab} = k\ Ln\ \frac{\sqrt[3]{D_{ab}D_{ac}D_{bc}}}{\sqrt[3]{d_{ab}d_{ac}d_{bc}}} = k\ Ln\ \frac{D_{m_i}}{D_m}; \qquad (\text{Eq. } 8.50b)$$

$$\overline{a}_{ad} = k\ Ln\ \frac{\sqrt[3]{D_{ad}D_{be}D_{cf}}}{\sqrt[3]{d_{ad}d_{be}d_{cf}}}; \qquad (8.85a)$$

$$\overline{a}_{ac} = k\ Ln\ \frac{\sqrt[6]{D_{ae}D_{af}D_{bd}D_{bf}D_{cd}D_{ce}}}{\sqrt[3]{d_{ae}d_{af}d_{ab}d_{bf}d_{cd}d_{ce}}}. \qquad (8.85b)$$

Os termos de correção devidos aos cabos pára-raios serão indicados, por ora, apenas de forma genérica $\Delta\overline{a}$, definida pela Eq. (8.77). Teremos, então:

$$\overline{A}_{aa} = (\overline{a}_{aa} + \overline{a}_{ab}) - \Delta\overline{a} = k\left(Ln\ \frac{2h_m}{r} + Ln\ \frac{\sqrt[3]{D_{ad}D_{be}D_{cf}}}{\sqrt[3]{d_{ad}d_{be}d_{cf}}}\right) - \Delta\overline{a}; \qquad (8.86)$$

$$\overline{A}_{ab} = (\overline{a}_{ab} + \overline{a}_{ae}) - \Delta\overline{a} =$$

$$= k\left(Ln\ \frac{\sqrt[3]{D_{ab}D_{ac}D_{bc}}}{\sqrt[3]{d_{ab}d_{ac}d_{bc}}} + Ln\ \frac{\sqrt[6]{D_{ce}D_{af}D_{bd}D_{bf}D_{cd}D_{cf}}}{\sqrt[6]{d_{ae}d_{af}d_{bd}d_{bf}d_{cd}d_{cf}}}\right) - \Delta\overline{a}. \qquad (8.87)$$

A capacitância de seqüência positiva será, usando a Eq. (8.58):

$$C_s = \frac{1}{\overline{A}_{aa} - \overline{A}_{ab}} = \frac{1}{k\ Ln\ \dfrac{\sqrt[3]{d_{ab}d_{ac}d_{bc}}}{r}\ \dfrac{\sqrt[6]{d_{ac}d_{af}d_{bd}d_{bf}d_{cd}d_{ce}}}{\sqrt[3]{d_{ad}d_{be}d_{cf}}} +} \cdots$$

$$\cdots \frac{1}{+\ k\ Ln\ \dfrac{2h_m}{\sqrt[3]{D_{ad}D_{be}D_{cf}}\cdot\sqrt[6]{D_{ae}D_{af}D_{bd}D_{bf}D_{cd}D_{cf}}}}. \qquad (8.88)$$

Na Eq. (8.88), que acabamos de derivar, o segundo termo do denominador pode, normalmente, ser desprezado, face ao valor do primeiro termo, de forma que:

$$C_s = \frac{1}{k\ Ln\ \dfrac{\sqrt[3]{d_{ab}d_{ac}d_{bc}}}{r}\cdot\dfrac{\sqrt[6]{d_{ae}d_{af}d_{bd}d_{bf}d_{cd}d_{ce}}}{\sqrt[3]{d_{ab}d_{be}d_{cf}}}}$$

ou

$$C_s = \frac{0{,}02412 \cdot 10^{-6}}{\log \dfrac{D_m}{r} \cdot \dfrac{D_{II}}{D_I}} \quad \text{[F/km]}, \tag{8.89}$$

na qual D_{II} e D_I foram definidos no Item 7.5.3.1, respectivamente, pelas Eqs. (7.95) e (7.94). D_m é a distância média geométrica entre condutores e r, seu raio externo ou o raio R_e do condutor múltiplo.

Os valores das capacitâncias de seqüência nula são calculáveis a partir da Eq. (8.55), com os coeficientes de potencial composto definidos como:

$$\overline{A}_{aa} = \overline{a}_{aa} + \overline{a}_{ad} - \frac{2\overline{a}_{ar}}{a_{rr} + a_{rs}} \quad \text{[km/F]}; \tag{8.90a}$$

$$\overline{A}_{ab} = \overline{a}_{ab} + \overline{a}_{ae} - \frac{2\overline{a}_{ar}}{a_{rr} + a_{rs}} \quad \text{[km/F]}. \tag{8.90b}$$

Os coeficientes de potencial médios são definidos pelas Eqs. (8.47*b*), (8.50), (8.49), (8.85*a*), (8,85*b*) e (8.15).

A capacitância de seqüência nula será, então:

$$C_o = \frac{1}{(\overline{a}_{aa} + \overline{a}_{ad}) + 2(\overline{a}_{ab} + \overline{a}_{ae}) - \dfrac{6\overline{a}^2_{ar}}{a_{rr}a_{rs}}} \quad \text{[F/km]}. \tag{8.91}$$

Observações: Nas linhas com número de pára-raios diferente de dois é necessário fazer a alteração nos termos de correção das Eqs. (8.90). Assim:

a — linha sem cabo pára-raios ou com cabo pára-raios isolado — o termo de correção $\Delta\overline{a}$ na Eq. (8.81) e, por conseguinte, nas Eqs. (8.90), será nulo;

b — na linha com um único cabo pára-raios, o termo de correção será $\dfrac{\overline{a}^2_{ar}}{a_{rr}}$, como definido na Eq. (8.74).

A Eq. (8.89) pode ser escrita da seguinte maneira:

$$C_s = \frac{0{,}02412 \cdot 10^{-6}}{\log \dfrac{D_m}{r} + \log \dfrac{D_{II}}{D_I}} \quad \text{[F/km]}. \qquad \text{(Eq. 8.89}a\text{)}$$

O termo $\log \dfrac{D_m}{r}$ refere-se à interação das cargas dos condutores do próprio circuito considerado, enquanto que o termo $\log D_{II}/D_I$ exprime a influência das cargas existentes nos condutores do circuito II sobre os condutores do circuito I.

Aqui também cabem as mesmas considerações feitas no capítulo anterior com relação às indutâncias e à aplicabilidade das expressões encontradas aos diversos casos de paralelismo:

A — as linhas ou circuitos paralelos são idênticos e simétricos com relação a um eixo de simetria, porém no circuito II houve a inversão inicial das fases *d* e *f*, ou seja, a fase *d* = fase *a* é ligada ao condutor de posição *F* e a fase *f* = fase *c* é ligada ao condutor da posição *D* (na Fig. 8.19, tensões indicadas entre parênteses);

B — as linhas ou circuitos são diferentes, porém operam em paralelismo elétrico e físico (linhas de mesma tensão).

As capacidades parciais e aparentes deverão ser determinadas para cada um dos circuitos pela solução das equações gerais. As capacidades de serviço serão determinadas pelas expressões:

a — do circuito I:

$$C_{sI} = \frac{0{,}02412 \cdot 10^{-6}}{\log \dfrac{D_{mI}}{r_I} \cdot \dfrac{D_{II}}{D_I}} \quad \text{[F/km]}; \tag{8.92a}$$

b — do circuito II:

$$C_{sII} = \frac{0{,}02412 \cdot 10^{-6}}{\log \dfrac{D_{mII}}{r_{II}} \cdot \dfrac{D_{II}}{D_I}} \quad \text{[F/km]}; \tag{8.92b}$$

C — linhas em simples paralelismo físico — normalmente se despreza o efeito de interação dos circuitos. Quando for necessário considerar essa interação, será preciso conhecer também os defasamentos das fases do circuito II com relação ao circuito I.

As linhas paralelas ou a circuito duplo são, às vezes, substituídas, nos cálculos elétricos, por uma linha equivalente a circuito simples. O processo de determinação das capacidades de serviços, através do pro-

a — duas linhas idênticas ou linha a circuito duplo:

$$C_{seq} = 2C_s = \frac{0{,}04824 \cdot 10^{-6}}{\log \dfrac{D_m}{r} \cdot \dfrac{D_{II}}{D_I}} \quad [\text{F/km/fase}] \tag{8.93a}$$

b — duas linhas ou circuitos diferentes:

$$C_{seq} = C_{sI} + C_{sII} \quad [\text{F/km/fase}]. \tag{8.93b}$$

8.4 — REATÂNCIAS CAPACITIVAS

8.4.1 — Definição

A reatância capacitiva, em derivação, de uma linha de transmissão é definida por:

$$X_c = \frac{1}{2\pi f} \cdot \frac{1}{C^*} \quad [\text{ohm} \cdot \text{km}] \tag{8.94}$$

ou, considerando-se o comprimento total da linha l [km], podemos admitir a linha composta de l capacitores de valor C^* em paralelo (ver Fig. 8.21). Logo, a capacidade total será $C^* \cdot l$ e a reatância capacitiva total:

$$X_c = \frac{X_c}{l} = \frac{1}{2\pi f} \cdot \frac{1}{C^* l} \quad [\text{ohm}],$$

sendo:

f — freqüência do sistema em [Hz];

C^* [F/km] — capacitância unitária por condutor da linha (ou condutor múltiplo). Poderá ser qualquer das capacitâncias que foram definidas.

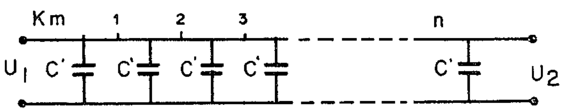


Fig. 8.21 — *Circuito capacitivo equivalente de uma linha de l [km] de comprimento.*

Nota: A designação empregada correntemente para definir a reatância capacitiva — [ohm/km] — não resiste a uma análise dimensional. Temos:

$$C\left[\frac{\text{A} \cdot \text{s}}{\text{V} \cdot \text{km}}\right] \quad \text{e} \quad f\left[\frac{1}{\text{s}}\right];$$

logo, pela Eq. (8.94):

$$x_c = \frac{1}{\left[\dfrac{1}{\text{s}}\right]} \; \frac{1}{\left[\dfrac{\text{A} \cdot \text{s}}{\text{V} \cdot \text{km}}\right]} = [\text{V} \cdot \text{km/A}],$$

donde concluímos que a unidade deve ser:

$$[\text{ohm} \cdot \text{km}].$$

A designação corrente "*ohm por quilômetro*" ou "*ohm por milha*" consagrou a abreviação:

$$[\text{ohm/km}] \quad \text{ou} \quad [\text{ohm/mi}],$$

conforme se pode verificar na literatura [6, 11]; ela não deve ser confundida com a sua unidade.

8.4.2 — Tabelas de Reatâncias Capacitivas

As reatâncias de serviço ou de seqüência positiva das linhas de transmissão definidas por:

$$x_{c_x} = \frac{1}{2\pi f} \cdot \frac{1}{C_s} \quad [\text{ohm} \cdot \text{km}] \qquad (\text{Eq. } 8.94)$$

poderão ser determinados com facilidade através do emprego das tabelas pré-calculadas se na Eq. (8.94) substituirmos C_s pela sua expressão (8.93). Teremos:

$$x_{c_x} = 6{,}596 \cdot 10^6 \cdot \frac{1}{f} \log \frac{D_m}{R_c} \cdot \frac{D_{II}}{D_I} \quad [\text{ohm} \cdot \text{km}], \tag{8.95}$$

que pode ser desdobrada da seguinte forma:

$$x_{c_x} = 6{,}596 \cdot 10^6 \cdot \frac{1}{f} \log \frac{1}{R_c} +$$

$$+ 6{,}596 \cdot 10^6 \cdot \frac{1}{f} \log D_m + 6{,}596 \cdot 10^6 \cdot \frac{1}{f} \log \frac{D_{II}}{D_I}. \tag{8.95b}$$

Designemos:

$x_c' = 6{,}596 \cdot 10^6 \cdot \dfrac{1}{f} \log \dfrac{1}{R_c}$ [ohm · km] — reatância capacitiva unitária para o espaçamento de um metro; (8.96a)

$$x''_c = 6{,}596 \cdot 10^6 \cdot \frac{1}{f} \log D_m \quad [\text{ohm} \cdot \text{km}]$$ — fator de espaçamento capacitivo; (8.96b)

$$x'''_c = 6{,}596 \cdot 10^6 \cdot \frac{1}{f} \log \frac{D_{\text{II}}}{D_{\text{I}}} \quad [\text{ohm} \cdot \text{km}]$$ — reatância capacitiva unitária entre dois circuitos.

A Eq. (8.95) se transforma então em:

$$x_{c_s} = x'_c + x''_c + x'''_c \quad [\text{ohm} \cdot \text{km}]. \tag{8.97}$$

Cada um dos termos de (8.97), além de uma variável comum que é a freqüência, possui também uma variável particular. Sendo o número de freqüências padronizadas empregadas nos sistemas elétricos comerciais bastante limitado (hoje quase que exclusivamente restrito a 50 e 60 [Hz]), podem-se organizar tabelas para a determinação rápida dos valores de x'_c, x''_c e x'''_c, em função das variáveis contidas nas expressões (8.96). No Ap. III foram incluídas essas tabelas:

x'_c — pode ser encontrado nas Tabs. III.1, III.2, III.3 e III.3.b em função dos raios condutores padronizados para 50 e 60 [Hz]. A Tab. III.3.b refere-se aos condutores múltiplos;

x''_c — pode ser encontrado nas Tabs. III.9 e III.10, respectivamente para 50 e 60 [Hz] em função das *DMG*, D_m [m];

x'''_c — é encontrado nas Tabs. III.13 e III.14 para 50 e 60 [Hz], em função da relação entre as *DMG* D_{II} e D_{I}.

No caso das linhas a circuitos simples, teremos:

$$x_{c_s} = x'_c + x''_c \quad [\text{ohm} \cdot \text{km}], \tag{8.98}$$

pois

$$x'''_c = 0.$$

8.4.3 — Reatâncias Capacitivas de *n* Circuitos em Paralelo

Havendo mais de dois circuitos em paralelo,

$$C_{s_a} = \frac{0{,}02412 \cdot 10^{-6}}{\log \dfrac{D_{m_a}}{r_a} \cdot \dfrac{D_{\text{II}(a-b)}}{D_{\text{I}(a-b)}} \cdot \dfrac{D_{\text{II}(a-c)}}{D_{\text{I}(a-c)}} \cdots \dfrac{D_{\text{II}(a-n)}}{D_{\text{I}(a-n)}}}; \tag{8.89a}$$

$$C_{s_b} = \frac{1}{\log \dfrac{D_{m_b}}{r_b} \cdot \dfrac{D_{\text{II}(b-a)}}{D_{\text{I}(b-a)}} \cdot \dfrac{D_{\text{II}(b-c)}}{D_{\text{I}(b-c)}} \cdots \dfrac{D_{\text{II}(b-n)}}{D_{\text{I}(b-n)}}}; \tag{8.89b}$$

$$C_{s_c} = \frac{1}{\log \dfrac{D_{m_c}}{r_c} \cdot \dfrac{D_{\text{II}(c-a)}}{D_{\text{I}(c-a)}} \cdot \dfrac{D_{\text{II}(c-b)}}{D_{\text{I}(c-b)}} \cdots \dfrac{D_{\text{II}(c-n)}}{D_{\text{I}(c-n)}}}. \tag{8.99c}$$

As reatâncias capacitivas correspondentes serão:

$$x_{c_a} = x'_{c_a} + x''_{c_a} + (x'''_{c(a-b)} + x'''_{c(a-c)} + \ldots + x'''_{c(a-n)}) \quad [\text{ohm} \cdot \text{km}]; \tag{8.100a}$$

$$x_{c_b} = x'_{c_b} + x''_{c_b} + (x'''_{c(b-a)} + x'''_{c(b-c)} + \ldots + x'''_{c(a-n)}) \quad [\text{ohm} \cdot \text{km}]; \tag{8.100b}$$

$$x_{c_c} = x'_{c_c} + x''_{c_c} + (x'''_{c(c-a)} + x'''_{c(c-b)} + \ldots + x'''_{c(c-n)}) \quad [\text{ohm} \cdot \text{km}], \tag{8.100c}$$

nas quais:

$D_{\text{II}(i-j)}$ — *DMG* entre condutores de fases diferentes do circuito considerado *i* e o circuito *j*;

$D_{\text{I}(i-j)}$ — *DMG* entre condutores de fases iguais do circuito considerado *i* e o circuito *j*;

$x'''_{c(i-j)}$ — reatância mútua unitária capacitiva entre o circuito *i* e o circuito *j*. Obtida das Tabs. II.13 e III.14.

8.5 — SUSCEPTÂNCIA CAPACITIVA

Nos cálculos elétricos das linhas de transmissão em que estas são apresentadas por seus circuitos elétricos unipolares, as capacitâncias de serviço são representadas como admitâncias, ou seja, na forma de susceptância de serviço. Por definição, é o inverso da reatância capacitiva. Logo,

$$b_c = \frac{1}{x_c} = 2\pi f C^*_s \quad [\text{siemens/km}]; \tag{8.101}$$

para a linha inteira, de comprimento l [km], será:

$$B_c = \frac{1}{x_c} = \frac{1}{\dfrac{1}{2\pi f C^* l}} = 2\pi f C^* l \quad [\text{siemens}]. \tag{8.102}$$

8.6 — REATÂNCIAS E SUSCEPTÂNCIAS CAPACITIVAS DE SEQÜÊNCIAS POSITIVA E NULA POR MÉTODO DIRETO

8.6.1 — Reatâncias Capacitivas

Tomando como ponto de partida as matrizes dos coeficientes de campo $[A]$, podemos, por transformação linear, determinar diretamente as matrizes das reatâncias capacitivas seqüenciais das quais obtemos as reatâncias capacitivas de seqüências positiva e nula.

Seja a equação:

$$[\dot{U}] = [A]\,[\dot{Q}]. \qquad \text{(Eq. 8.17)}$$

Vimos que os elementos da matriz $[A]$ são os coeficientes de potencial, definidos pelas Eqs. (8.14), cuja dimensão é:

$$\left[\frac{\mathrm{V \cdot km}}{\mathrm{A \cdot s}}\right] = \left[\frac{\mathrm{km}}{\mathrm{F}}\right].$$

Se multiplicarmos os elementos da matriz $[A]$ por $\dfrac{1}{2\pi f}$ [s], obteremos uma matriz $[x_c]$, cujos elementos têm a dimensão [V·km/A], ou seja, de uma impedância. Nessas condições, a transformação linear aplicável será:

$$[x_{c\mathrm{seq}}] = [a]^{-1}\,[x_c]\,[a] \qquad (8.103)$$

ou

$$[x_{c\mathrm{seq}}] = \frac{1}{2\pi f}\;[a]^{-1}\;[A]\;[a] \quad [\mathrm{ohm \cdot km}]. \qquad (8.104)$$

De fato, vimos no Item 8.3.2.2 que:

$$C_o = \frac{1}{\overline{A}_{aa} + 2\overline{A}_{ab}}\,; \qquad \text{(Eq. 8.75}a\text{)}$$

$$C_1 = \frac{1}{\overline{A}_{aa} - \overline{A}_{ab}}\,. \qquad \text{(Eq. 8.75}b\text{)}$$

As reatâncias capacitivas, como vimos, são definidas por:

$$x_c = \frac{1}{2\pi f C^*}\,; \qquad \text{(Eq. 8.94)}$$

portanto,

$$x_{c00} = \frac{1}{2\pi f \dfrac{1}{\overline{A}_{aa} + 2\overline{A}_{ab}}} = \frac{1}{2\pi f}\,(\overline{A}_{aa} - 2\overline{A}_{ab}) \qquad (8.105)$$

e

$$x_{c11} = \frac{1}{2\pi f \dfrac{1}{\overline{A}_{aa} - \overline{A}_{ab}}} = \frac{1}{2\pi f}\,(\overline{A}_{aa} - \overline{A}_{ab}), \qquad (8.106)$$

$\overline{A}_{aa}$ e $\overline{A}_{ab}$ foram definidos como os coeficientes de potencial médios da linha trifásica simples, sem cabos pára-raios, equivalente à linha real considerada. Nessas condições, se a matriz $[A]$ da Eq. (8.16) for reduzida à matriz 3 × 3 da linha equivalente, a transformação será direta:

$$\begin{bmatrix} x_{c00} & x_{c01} & x_{c02} \\ x_{c10} & x_{c11} & x_{c12} \\ x_{c20} & x_{c21} & x_{c22} \end{bmatrix} = \frac{1}{2\pi f}\cdot\frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}\begin{bmatrix} A_{aa} & A_{ab} & A_{ac} \\ A_{ab} & A_{bb} & A_{bc} \\ A_{ac} & A_{bc} & A_{cc} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \qquad (8.107)$$

Efetuando as operações indicadas, obtemos a matriz:

$$[x_{c\mathrm{seq}}] = \frac{1}{2\pi f}\begin{bmatrix} (\overline{A}_{aa} + 2\overline{A}_{ab}) & A_{01} & A_{02} \\ A_{10} & (\overline{A}_{aa} - \overline{A}_{ab}) & A_{12} \\ A_{20} & A_{12} & (\overline{A}_{aa} - \overline{A}_{ab}) \end{bmatrix} [\mathrm{ohm \cdot km}]. \qquad (8.108)$$

Os termos fora da diagonal da matriz das reatâncias seqüenciais representam os acoplamentos mútuos entre os circuitos seqüenciais, e só têm significado nas linhas não transpostas. Nas linhas transpostas são nulos [7]. Determinando os valores de x_{c_0} e x_{c11} por meio da Eq. (8.108), obteremos exatamente os mesmos valores obtidos através das Eqs. (8.105) e (8.106), respectivamente.

O método direto de cálculo acima exposto é geral, aplicável a qualquer configuração das linhas de transmissão, independentemente da existência de cabos pára-raios, sejam elas a circuito simples ou duplo. Essas diferenças estão definidas implicitamente nos coeficientes de campo compostos A_{ii} e A_{ij} da linha trifásica simples equivalente, como vimos. É, portanto, o método ideal para cálculo por meio de computadores digitais, sendo bastante simples sua programação.

8.6.2 — Susceptâncias Capacitivas

A susceptância capacitiva foi definida no Item 8.5 como:

$$b = \omega C \quad [\text{siemens/km}],$$

o que nos permite escrever:

$$[B] = \omega\,[C] \quad [\text{siemens/km}] \tag{8.109}$$

e, lembrando a Eq. (8.20), teremos:

$$[B] = \omega\,[A]^{-1} \quad [\text{siemens/km}]. \tag{8.110}$$

Temos igualmente:

$$[I] = [B]\,[U] \quad [A] \tag{8.111}$$

$$[I] = [a]\,[I_{\text{seq}}]$$

$$[U] = [a]\,[U_{\text{seq}}];$$

logo,

$$[a]\,[I_{\text{seq}}] = [B]\,[a]\,[U_{\text{seq}}]$$

$$[I_{\text{seq}}] = \{[a]^{-1}\,[B]\,[a]\}\,[U_{\text{seq}}].$$

Portanto,

$$[B_{\text{seq}}] = [a]^{-1}\,[B]\,[a] \quad [\text{siemens/km}], \tag{8.112}$$

que define a transformação linear para a obtenção da matriz das susceptâncias capacitivas seqüenciais, em cuja diagonal encontraremos b_{00}, b_{11} e b_{22}; a Eq. (8.112) pode ser transformada na seguinte equação, se substituirmos $[B]$ pelo seu valor dado na Eq. (8.110):

$$[B_{\text{seq}}] = \omega\,\{[a]^{-1}\,[A]^{-1}\,[a]\} \quad [\text{siemens/km}]. \tag{8.113}$$

A matriz $[A]^{-1}$ é a inversa da matriz 3×3 de coeficientes de potencial da linha trifásica simples sem cabos pára-raios, equivalente à linha real considerada.

O cálculo das susceptâncias capacitivas por esse processo envolve a inversão da matriz, sendo, portanto, mais demorado do que o seu cálculo através das reatâncias capacitivas seqüenciais, das quais as susceptâncias são simplesmente as recíprocas, no caso das linhas transpostas.

8.7 — CONSIDERAÇÕES FINAIS

O cálculo das capacidades das linhas se apresenta bastante trabalhoso e com um grau de precisão discutível. Para linhas de 345 [kV], 500 [kV] e 750 [kV], com geometria padronizada, com um e dois circuitos, foi publicado um processo simplificado de cálculo, de mesmo grau de precisão dos processos mais exatos. Escolheram-se estruturas com dimensões básicas para cada uma das classes de tensão acima e calcularam-se as capacitâncias para essas estruturas-base. Em seguida, suas dimensões foram variadas até $+20\%$ e curvas de correção, levantadas. Nessas condições, podem-se determinar as capacitâncias com relativa simplicidade, desde que as dimensões das estruturas estejam dentro do campo de variação admitido. É o processo *Base Case Method*, divulgado no livro *EHV Transmission Line Reference Book* [8].

Quando se desejarem apenas valores aproximados das capacidades aparentes, será razoável empregar a expressão (4.10), utilizando como valores de celeridade 290 000 a 295 000 [km/s].

Alguns programas digitais para a determinação das reatâncias capacitivas a partir das dimensões físicas das linhas foram divulgados [10].

8.8 — EXERCÍCIOS

1. Calcular as capacidades parciais e de exercício de uma linha monofásica, construída com fio de cobre n.º 6 AWG, dispostos sobre cruzeta plana horizontal, com 2,24 [m] de espaçamento. O ponto de suspensão dos condutores está a 7,20 [m] do solo e a flecha média nos vãos médios é de 0,60 [m]. O comprimento da linha é de 22 km.

Solução

Podemos aplicar diretamente as Eqs. (8.35) e (8.36):

$$C_{ao} = C_{bo} = \frac{1}{a_{aa} + a_{ab}} \quad [\text{F/km}]; \tag{Eq. 8.35a}$$

$$C_{ab} = \frac{a_{ab}}{a_{aa}^2 - a_{ab}^2} \quad [\text{F/km}]; \tag{Eq. 8.35b}$$

$$C_s = \frac{1}{2(a_{aa} - a_{ab})} \quad [\text{F/km}]. \tag{Eq. 8.36}$$

Os coeficientes de campo serão:

$$a_{aa} = 4{,}14468 \cdot 10^7 \log \frac{2h_a}{r_a} = 15{,}8282 \cdot 10^7 \tag{Eq. 8.16c}$$

$$a_{ab} = 4{,}14468 \cdot 10^7 \log \frac{D_{ab}}{d_{ab}} = 3{,}2654 \cdot 10^7 \tag{Eq. 8.16d}$$

para:

$$h_a = H_a - 0{,}7f = 7{,}20 - 0{,}7 \cdot 0{,}6 = 6{,}78\ [\text{m}]$$

$$d_{ab} = 2{,}24 \text{ [m]}$$

$$D_{ab} = \sqrt{4h_a h_b + d_{ab}^2} = 13{,}744 \quad \text{[m]} \qquad \text{(Eq. 8.15)}$$

$r_a = 0{,}0020575$ [m] — das tabelas de condutores de cobre (II-1)

$$C_{ao} = 0{,}52374 \cdot 10^{-8} \quad \text{[F/km]}$$

$$C_{ab} = 0{,}13613 \cdot 10^{-8} \quad \text{[F/km]}$$

$$C_s = 0{,}398 \cdot 10^{-8} \quad \text{[F/km]}.$$

A capacitância de serviço poderia também ter sido calculada pela Eq. (8.38):

$$C_s = \frac{0{,}0120616 \cdot 10^{-6}}{\log \dfrac{d}{r}} = \frac{0{,}0120616 \cdot 10^{-6}}{\log \dfrac{2{,}24}{0{,}0020575}} = 0{,}3972 \cdot 10^{-8} \text{ [F/km]}.$$

As capacitâncias totais serão:

$$C_{ao} = 22 \cdot 0{,}52374 \cdot 10^{-8} = 11{,}5223 \cdot 10^{-8} \quad \text{[F]};$$

$$C_{ab} = 22 \cdot 0{,}13613 \cdot 10^{-8} = 2{,}9949 \cdot 10^{-8} \quad \text{[F]};$$

$$C_s = 22 \cdot 0{,}398 \cdot 10^{-8} = 8{,}756 \cdot 10^{-8} \quad \text{[F]}.$$

2. Calcular as reatâncias capacitivas parciais e de serviço de uma linha monofásica, de 10 [km] de comprimento, construída com cabos CAA — código ASTER — com os condutores dispostos verticalmente. Distância entre condutores, 0,8 [m]. Altura do ponto de suspensão do condutor inferior, 7,2 [m]. Flecha média em vãos médios, 0,8 [m].

3. Conferir o valor da reatância capacitiva de serviço acima calculado com as tabelas de reatâncias capacitivas.

4. Deduzir a expressão para a capacidade de serviço da linha monofásica que emprega dois condutores iguais em paralelo, como mostra a Fig. 8.22.

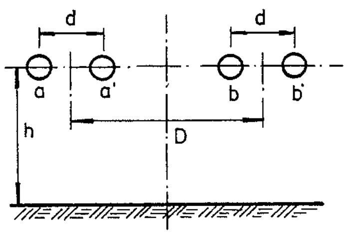


Fig. 8.22 — *Linha do Exerc. 4.*

5. Calcular as capacitâncias parciais e aparentes e reatâncias de seqüência positiva da linha de transmissão de 69 [kV] da Fig. 7.27 construída com cabos CA — código OXLIP — e usando como pára-raios um cabo de aço de 5/16″ aterrado em todas as estruturas. Flecha média dos condutores, 1,5 [m]. Flecha média de cabo pára-raios, 1,20 [m]. Freqüência, 60 [Hz].

Solução

No Exerc. 8 do Cap. 7 foram calculados:

$h_a = 9{,}25$ [m]; $h_b = 8{,}35$ [m]; $h_c = 7{,}45$ [m]; $h_p = 12{,}16$ [m];

$d_{ab} = d_{bc} = 2{,}94$ [m]; $d_{ac} = 1{,}8$ [m];

$d_{ap} = 3{,}05$ [m]; $d_{bp} = 3{,}91$ [m]; $d_{cp} = 4{,}8$ [m];

$D_{ab} = 17{,}82$ [m]; $D_{ac} = 16{,}70$ [m]; $D_{bc} = 16{,}05$ [m];

$D_{ap} = 21{,}43$ [m]; $D_{bp} = 20{,}53$ [m]; $D_{cp} = 19{,}63$ [m].

Das tabelas dos condutores no Ap. III obtemos:

$$r_c = 0{,}006629 \quad \text{[m]};$$

$$r_p = 0{,}003175 \quad \text{[m]}.$$

Podemos, pois, calcular os coeficientes de potencial para a matriz [A] pelas Eqs. (8.16):

$$a_{aa} = 4{,}14468 \cdot 10^7 \log \frac{2 \cdot 9{,}25}{0{,}006629} = 14{,}2814 \cdot 10^7;$$

$$a_{bb} = 4{,}14468 \cdot 10^7 \log \frac{2 \cdot 8{,}35}{0{,}006629} = 14{,}0972 \cdot 10^7;$$

$$a_{cc} = 4{,}14468 \cdot 10^7 \log \frac{2 \cdot 7{,}45}{0{,}006629} = 13{,}8919 \cdot 10^7;$$

$$a_{pp} = 4{,}14468 \cdot 10^7 \log \frac{2 \cdot 12{,}16}{0{,}003175} = 16{,}0988 \cdot 10^7;$$

$$a_{ab} = 4{,}14468 \cdot 10^7 \log \frac{17{,}82}{2{,}94} = 3{,}2435 \cdot 10^7;$$

$$a_{ac} = 4{,}14468 \cdot 10^7 \log \frac{16{,}70}{1{,}8} = 4{,}0097 \cdot 10^7;$$

$$a_{bc} = 4{,}14468 \cdot 10^7 \log \frac{16{,}05}{2{,}94} = 3{,}0552 \cdot 10^7;$$

$$a_{ap} = 4{,}14468 \cdot 10^7 \log \frac{21{,}43}{3{,}05} = 3{,}5094 \cdot 10^7;$$

$$a_{bp} = 4{,}14468 \cdot 10^7 \log \frac{20{,}53}{3{,}91} = 2{,}9850 \cdot 10^7;$$

$$a_{cp} = 4{,}14468 \cdot 10^7 \log \frac{19{,}63}{4{,}80} = 2{,}5352 \,.\, 10^7.$$

A matriz $[A]$ dos coeficientes de potencial será:

$$[A] = \left[\begin{array}{ccc|c} 14{,}2814 & 3{,}2425 & 4{,}0097 & 3{,}5094 \\ 3{,}2425 & 14{,}0972 & 3{,}0552 & 2{,}9850 \\ 4{,}097 & 3{,}0552 & 13{,}8919 & 2{,}5352 \\ \hline 3{,}5094 & 2{,}9850 & 2{,}5352 & 16{,}0988 \end{array}\right] 10^7.$$

Se efetuarmos a inversão da matriz acima, obteremos uma matriz de capacitâncias parciais de mesma ordem. A informação nela contida será excessiva para as nossas finalidades. Vamos, pois, efetuar sua redução à matriz 3×3 correspondente a uma linha sem cabos pára-raios, equivalente à linha real. Os elementos da nova matriz serão determinados de acordo com a Eq. (8.64):

$$A_{aa} = a_{aa} - \frac{a_{ap}^2}{a_{pp}} = (14{,}2814 - 0{,}765019)10^7 = 13{,}51638 \cdot 10^7;$$

$$A_{bb} = a_{bb} - \frac{a_{bp}^2}{a_{pp}} = (14{,}0972 - 0{,}55347)10^7 = 13{,}54373 \cdot 10^7;$$

$$A_{cc} = a_{cc} - \frac{a_{cp}^2}{a_{pp}} = (13{,}8919 - 0{,}39924)10^7 = 13{,}49266 \cdot 10^7;$$

$$A_{ab} = a_{ab} - \frac{a_{ap}a_{bp}}{a_{pp}} = (3{,}2425 - 0{,}65070)10^7 = 2{,}59180 \cdot 10^7;$$

$$A_{ac} = a_{ac} - \frac{a_{ap}a_{cp}}{a_{pp}} = (4{,}0097 - 0.55265)10^7 = 3{,}45705 \cdot 10^7;$$

$$A_{bc} = a_{bc} - \frac{a_{bp}a_{cp}}{a_{pp}} = (3{,}0552 - 0{,}47007)10^7 = 2{,}58513 \cdot 10^7.$$

Encontramos, pois:

$$[A_{eq}] = \begin{bmatrix} 13{,}51638 & 2{,}59180 & 3{,}45705 \\ 2{,}59180 & 13{,}54373 & 2{,}58513 \\ 3{,}45705 & 2{,}58513 & 13{,}49266 \end{bmatrix} \cdot 10^7 \quad [\text{km/F}].$$

Sua inversa será:

$$[A_{eq}]^{-1} = 10^{-7} \begin{bmatrix} 0{,}08101 & -0{,}01198 & -0{,}01846 \\ -0{,}01198 & 0{,}07841 & -0{,}01196 \\ -0.01846 & -0{,}01196 & 0{,}08114 \end{bmatrix} \quad [\text{F/km}].$$

Possuímos agora os elementos necessários dos cálculos das capacitâncias parciais. De acordo com as Eqs. (8.25 e 8.26):

$$C_{ao} = \frac{G_{aa}}{D} + \frac{G_{ab}}{D} + \frac{G_{ac}}{D} = (0{,}08101 - 0{,}011980 - 0{,}01846)\, 10^{-7}$$

$$C_{ao} = 0{,}05057 \cdot 10^{-7} \quad [\text{F/km}];$$

$$C_{bo} = \frac{G_{bb}}{D} + \frac{G_{ab}}{D} + \frac{G_{bc}}{D} = (0{,}07841 - 0{,}01198 - 0{,}01196)\, 10^{-7}$$

$$C_{bo} = 0{,}05447 \cdot 10^{-7} \quad [\text{F/km}];$$

$$C_{co} = \frac{G_{cc}}{D} + \frac{G_{ac}}{D} + \frac{G_{bc}}{D} = (0{,}08114 - 0{,}01846 - 0{,}01196)\, 10^{-7}$$

$$C_{co} = 0{,}05072 \cdot 10^{-7} \quad [\text{F/km}];$$

$$C_{ab} = -\frac{G_{ab}}{D} = 0{,}01198 \cdot 10^{-7} \quad [\text{F/km}];$$

$$C_{ac} = -\frac{G_{ac}}{D} = 0{,}01846 \cdot 10^{-7} \quad [\text{F/km}];$$

$$C_{bc} = -\frac{G_{bc}}{D} = 0{,}01196 \cdot 10^{-7} \quad [\text{F/km}].$$

As capacitâncias aparentes serão:

$$C_a = C_{ao} + \frac{3}{2}(C_{ab} + C_{ac}) = \left[0{,}05057 + \frac{3}{2}(0{,}01198 + 0{,}01846)\right] \quad 10^{-7}$$

$$C_a = 0{,}09623 \cdot 10^{-7} \quad [\text{F/km}];$$

$$C_b = C_{bo} + \frac{3}{2}(C_{ab} + C_{bc}) = \left[0{,}05447 + \frac{3}{2}(0{,}01198 + 0{,}01196)\right] \quad 10^{-7}$$

$$C_b = 0{,}09038 \quad 10^{-7} \quad [\text{F/km}];$$

$$C_c = C_{co} + \frac{3}{2}(C_{ac} + C_{bc}) = \left[0{,}05072 + \frac{3}{2}(0{,}01846 + 0{,}01196)\right] \quad 10^{-7}$$

$$C_c = 0{,}09635 \cdot 10^{-7} \quad [\text{F/km}].$$

A capacitância de seqüência positiva poderá ser calculada:

a — pela média das capacitâncias aparentes:

$$C_s = C_{11} = \frac{C_a + C_b + C_c}{3} = 0{,}09432 \cdot 10^{-7} \quad [\text{F/km}];$$

b — através da Eq. (8.72):

$$C_s = C_{11} = \frac{1}{\overline{A}_{aa} - \overline{A}_{ab}};$$

os valores médios de $\overline{A}_{aa}$ e $\overline{A}_{ab}$ são obtidos da matriz $[A_{eq}]$:

$$\overline{A}_{aa} = \frac{1}{3}(A_{aa} + A_{bb} + A_{cc}) = 13{,}51759 \cdot 10^{7} \quad [\text{km/F}];$$

$$\overline{A}_{ab} = \frac{1}{3}(A_{ab} + A_{ac} + A_{bc}) = 2{,}87799 \cdot 10^{7} \quad [\text{km/F}];$$

logo,

$$C_s = C_{11} = \frac{10^{-7}}{(13{,}51759 - 2{,}87799)} = 0{,}09399 \cdot 10^{-7} \quad [\text{F/km}];$$

c — através da Eq. (8.58): os coeficientes médios $\overline{a}_{aa}$ e $\overline{a}_{ab}$ são obtidos na matriz $[A]$:

$$\overline{a}_{aa} = \frac{a_{aa} + a_{bb} + a_{cc}}{3} = 14{,}09017 \cdot 10^{7};$$

$$a_{ab} = \frac{a_{ab} + a_{ac} + a_{bc}}{3} = 3{,}43580 \cdot 10^{-7};$$

logo,

$$C_{11} = C_s = \frac{10^{-7}}{(14{,}09017 - 3{,}43580)} = 0{,}09386 \cdot 10^{-7} \quad [\text{F/km}];$$

d — através da Eq. (8.59):

$$C_{11} = C_s = \frac{0{,}02412 \cdot 10^{-6}}{\log \dfrac{2{,}4965}{0{,}006629}\left[\dfrac{1}{\sqrt{1 + \left(\dfrac{2{,}4965}{19{,}58623}\right)^2}}\right]}$$

$$C_{11} = C_s = 0{,}09376 \cdot 10^{-7} \quad [\text{F/km}];$$

e — através da Eq. (8.60):

$$C_{11} = C_s = \frac{0{,}02412 \cdot 10^{-6}}{\log \dfrac{2{,}4965}{0{,}00629}}$$

$$C_{11} = C_s = 0{,}09364 \cdot 10^{-7} \quad [\text{F/km}].$$

A reatância capacitiva de seqüência positiva será:

$$X_{C11} = \frac{1}{2\pi f\, C_{11}} = \frac{10^{7}}{2\pi f \cdot 0{,}09364} =$$

$$X_{C11} = 0{,}2833 \cdot 10^{6} \quad [\text{ohm} \cdot \text{km}]$$

ou:

$$X_{C11} = 0{,}2833 \quad [\text{Mohm} \cdot \text{km}].$$

Comentário

As capacitâncias de seqüência positiva para a linha em questão foram calculadas por 5 equações diferentes. Os processos a e b são praticamente equivalentes, pois consideram tanto o efeito da presença dos pára-raios (que mostramos não influir no valor de C_{11}) como também a altura dos condutores sobre o solo. As diferenças em seus valores são desprezíveis e podem ser atribuídas às aproximações sucessivas requeridas no método a.

O método c, como o método d, considera o efeito das alturas dos condutores, sendo equivalentes. Também aqui as diferenças nos valores são mínimas, como é mínima a diferença desses métodos com os resultados obtidos no método e, que não considera essas mesmas alturas.

Portanto, para fins práticos, qualquer dos métodos é válido. Neste caso, a Eq. (8.60) é aconselhável por ser a mais direta e menos trabalhosa.

6. Determinar a reatância capacitiva de seqüência positiva para a linha do Exerc. 5, empregando as tabelas de reatâncias capacitivas.

Solução

a — condutor CA — código OXLIP:

da Tab. III.2 — $x' = 0{,}23949$ [Mohm·km];

b — para $D_m = \sqrt[3]{(2{,}94)^2 \cdot 1{,}8} = 2{,}4965 \simeq 2{,}50$ [m]:

da Tab. III.9 — $x'' = 0{,}04375$ [Mohm·km];

logo,

$$XC_{11} = x_c'' + x_c'' = 0{,}28324 \quad \text{[Mohm·km]}.$$

Comentário

Processo de cálculo válido, dada sua precisão satisfatória. Muito rápido.

7. Qual o valor da reatância capacitiva de seqüência nula da linha descrita no Exerc. 5?

Solução

a — Empregamos a Eq. (8.71) com $\bar{A}_{aa}$ e $\bar{A}_{ab}$ já determinados na solução do Exerc. 5.

Temos:

$$C_{oo} = \frac{1}{\bar{A}_{aa} + 2\bar{A}_{ab}} = \frac{10^{-7}}{13{,}51759 + 2\cdot 2{,}87799)}$$

$$C_{oo} = 0{,}05188 \cdot 10^{-7} \quad \text{[F/km]}.$$

b — Usando os coeficientes de potencial da matriz $[A]$ não reduzida, o cálculo poderá ser feito pela Eq. (8.71):

$$C_{oo} = \frac{1}{\bar{a}_{aa} + 2\bar{a}_{ab} - 3\dfrac{\bar{a}^2_{ap}}{\bar{a}_{pp}}} \quad \text{[F/km]};$$

da matriz $[A]$ do Exerc. 5 obtemos:

$$\bar{a}_{aa} = 14{,}09017 \cdot 10^7; \qquad \bar{a}_{ap} = 2{,}94987 \cdot 10^7;$$

$$\bar{a}_{ab} = 3{,}43580 \cdot 10^7; \qquad \bar{a}_{pp} = 16{,}0988 \cdot 10^7;$$

logo,

$$C_o = \frac{10^{-7}}{19{,}34021} = 0{,}05171 \cdot 10^{-7} \quad \text{[F/km]}.$$

8. Uma linha de transmissão da classe de 330 [kV] é construída com estruturas de aço. Os condutores são geminados $2 \times$ *Grosbeak* por fase, com espaçamento de 0,40 m entre os subcondutores; os dois cabos pára-raios são de aço galvanizado de 7 fios, diâmetro nominal de 1/2"HSS

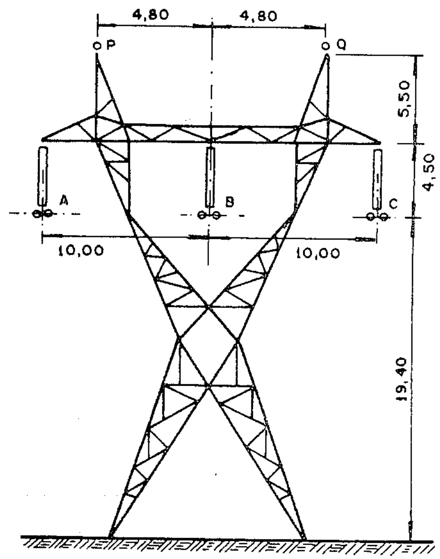


Fig. 8.23 — *Linha da classe de 345 kV — Exercs. 8 (do Cap. 8) e 12 (do Cap. 7).*

(Fig. 8.23), aterrados em todas as estruturas. Determinar, sem efetuar a redução da matriz original $[A]$:

a — capacidades parciais;

b — capacidades aparentes, considerando os cabos pára-raios aterrados.

Solução

Determinação dos coeficientes de potencial (Eq. 8.15)

Da Tab. II.5, temos para o cabo Grosbeak $d = 0{,}025146$ [m]; logo:

$$R_c = \sqrt{(0{,}025146) \cdot 0{,}5 \cdot 0{,}40)}$$

$$R_c = 0{,}0708 \text{ [m]}.$$

Admitindo uma flecha de 9,7 [m] para os cabos condutores e 9,0 [m] para os cabos pára-raios, teremos:

$$h_A = h_B = h_C = H_a - 0{,}7f = 19{,}5 - 0{,}7 \cdot 9{,}7 = 12{,}70 \quad \text{[m]};$$

$$h_r = h_s = H_r - 0{,}7f_R = 29{,}50 - 0{,}7 \cdot 9{,}00 = 23{,}20 \quad \text{[m]};$$

logo,

$$a_{aa} = a_{bb} = a_{cc} = 10{,}457 \cdot 10^7;$$

$$a_{rr} = a_{ss} = 16{,}014 \cdot 10^7;$$

$$a_{ao} = a_{bc} = 1{,}809 \cdot 10^7;$$

$$a_{ac} = 1{,}740 \cdot 10^7;$$

$$a_{ar} = a_{cs} = 2{,}197 \cdot 10^7;$$

$$a_{as} = a_{cr} = 1{,}411 \cdot 10^7;$$

$$a_{br} = a_{bs} = 2{,}059 \cdot 10^7;$$

$$a_{rs} = 2{,}283 \cdot 10^7.$$

O sistema de equações será:

$$\begin{bmatrix} \dot U_a \\ \dot U_b \\ \dot U_c \\ \hdashline \dot U_R \\ \dot U_S \end{bmatrix} = 10^7 \begin{array}{c} \begin{array}{cc} \qquad\qquad A_1 \qquad\qquad & \qquad B_1 \end{array} \\ \left[\begin{array}{ccc:cc} 10{,}457 & 1{,}809 & 1{,}740 & 2{,}197 & 1{,}141 \\ 1{,}809 & 10{,}457 & 1{,}809 & 2{,}059 & 2{,}059 \\ 1{,}740 & 1{,}809 & 10{,}457 & 1{,}414 & 2{,}197 \\ \hdashline 2{,}197 & 2{,}059 & 1{,}141 & 16{,}014 & 2{,}283 \\ 1{,}141 & 2{,}059 & 2{,}197 & 2{,}283 & 16{,}014 \end{array}\right] \\ \begin{array}{cc} \qquad\qquad D_1 \qquad\qquad & \qquad C_1 \end{array} \end{array} \begin{bmatrix} \dot Q_a \\ \dot Q_b \\ \dot Q_c \\ \hdashline \dot Q_r \\ \dot Q_s \end{bmatrix}$$

cuja solução é:

$$[A]^{-1} = 10^{-7} \begin{array}{c} \begin{array}{ccccc} \qquad\qquad & C_{ab} & C_{ac} & C_{ar} & C_{as} \end{array} \\ \left[\begin{array}{ccc:cc} 0{,}10260 & -0{,}01280 & -0{,}01320 & -0{,}01120 & -0{,}00250 \\ -0{,}01280 & 0{,}10370 & -0{,}01280 & -0{,}00930 & -0{,}00930 \\ -0{,}01320 & -0{,}01280 & 0{,}10260 & -0{,}00230 & -0{,}01120 \\ \hdashline -0{,}01120 & -0{,}00930 & -0{,}00230 & 0{,}06640 & -0{,}00720 \\ -0{,}00230 & -0{,}00930 & -0{,}01130 & -0{,}00720 & 0{,}06640 \end{array}\right] \end{array}$$

As capacidades parciais serão, portanto:

$$C_{ao} = C_{co} = 0{,}0631 \cdot 10^7 \quad \text{[F/km]};$$

$$C_{ab} = C_{bc} = 0{,}01280 \cdot 10^{-7} \quad \text{[F/km]};$$

$$C_{bo} = 0{,}0595 \cdot 10^{-7} \quad \text{[F/km]};$$

$$C_{ac} = 0{,}01320 \cdot 10^{-7} \quad \text{[F/km]};$$

$$C_{ro} = C_{so} = 0{,}03640 \cdot 10^{-7} \quad \text{[F/km]};$$

$$C_{ar} = C_{cs} = 0{,}01120 \cdot 10^{-7} \quad \text{[F/km]};$$

$$C_{as} = C_{cr} = 0{,}00250 \cdot 10^{-7} \quad \text{[F/km]};$$

$$C_{br} = C_{bs} = 0{,}00930 \cdot 10^{-7} \quad \text{[F/km]};$$

$$C_{rs} = 0{,}00720 \cdot 10^{-7} \quad \text{[F/km]}.$$

As capacidades aparentes serão, então:

$$C_a = C_{ao} + C_{ar} + C_{as} + \frac{3}{2}(C_{ab} + C_{ac}) = 0{,}1156 \cdot 10^{-7} \quad [\text{F/km}];$$

$$C_b = C_{bo} + C_{br} + C_{bs} + \frac{3}{2}(C_{ab} + C_{bc}) = 0{,}1165 \cdot 10^{-7} \quad [\text{F/km}];$$

$$C_c = C_{co} + C_{cr} + C_{cs} + \frac{3}{2}(C_{ac} + C_{bc}) = 0{,}1156 \cdot 10^{-7} \quad [\text{F/km}].$$

9. Repetir o Exerc. 8 efetuando a redução da matriz $[A]$ para a matriz $[A_{eq}]$.

Solução

O efeito dos cabos pára-raios para a linha não transposta poderá ser determinado pela solução das duas últimas equações do sistema de cinco condutores, nas quais, para cabos aterrados, fazemos $\dot{U}_r = \dot{U}_s = 0$; a matriz de correção será:

$$[\Delta A_{corr}] = 10^{+7}\begin{bmatrix} 0{,}26388 & 0{,}37563 & 0{,}34509 \\ 0{,}37563 & 0{,}46340 & 0{,}37563 \\ 0{,}34509 & 0{,}37563 & 0{,}26388 \end{bmatrix}$$

Esses valores deverão ser subtraídos aos elementos da matriz parcial 3×3 $[A_1]$:

$$[A_{eq}] = 10^7 \begin{bmatrix} 10{,}193 & 1{,}433 & 1{,}395 \\ 1{,}433 & 9{,}994 & 1{,}433 \\ 1{,}395 & 1{,}433 & 10{,}193 \end{bmatrix} \quad [\text{km/F}],$$

que tem como inversa:

$$[A_{eq}]^{-1} = 10^{-7} \begin{bmatrix} 0{,}10153 & -0{,}01282 & -0{,}01209 \\ -0{,}01282 & 0{,}10370 & -0{,}01282 \\ -0{,}01209 & -0{,}01282 & 0{,}10153 \end{bmatrix} \quad [\text{F/km}].$$

Da matriz acima obtemos as capacitâncias parciais:

$$C_{ao} = 0{,}07662 \cdot 10^{-7} \ [\text{F/km}];$$
$$C_{bo} = 0{,}07806 \cdot 10^{-7} \ [\text{F/km}];$$
$$C_{co} = 0{,}07662 \cdot 10^{-7} \ [\text{F/km}];$$
$$C_{ab} = 0{,}01282 \cdot 10^{-7} \ [\text{F/km}];$$
$$C_{ac} = 0{,}01209 \cdot 10^{-7} \ [\text{F/km}];$$
$$C_{bc} = 0{,}01282 \cdot 10^{-7} \ [\text{F/km}];$$

e as capacitâncias aparentes:

$$C_a = 0{,}11399 \cdot 10^{-7} \ [\text{F/km}];$$
$$C_b = 0{,}11652 \cdot 10^{-7} \ [\text{F/km}];$$
$$C_c = 0{,}11399 \cdot 10^{-7} \ [\text{F/km}].$$

10. Determinar as capacitâncias de seqüência positiva da linha descrita no Exerc. 8:

A — a partir das capacitâncias aparentes obtidas nos Exercs. 8 e 9;

B — pela Eq. (8.57) com elementos da matriz não reduzida e da matriz reduzida;

C — pela Eq. (8.59);

D — pela Eq. (8.60).

Solução

A — Capacitâncias aparentes:

a — do Exerc. 8:

$$C_{11} = C_s = \frac{C_a + C_b + C_c}{3} = \frac{[(0{,}1156)2 + 0{,}1165]\,10^{-7}}{3}$$

$$C_{11} = C_s = 0{,}1159 \cdot 10^{-7} \ [\text{F/km}];$$

b — do Exerc. 9:

$$C_{11} = C_s = \frac{C_a + C_b + C_c}{3} = \frac{[(0{,}11399)2 + 0{,}11652]\,10^{-7}}{3}$$

$$C_{11} = C_s = 0{,}11483 \cdot 10^{-7} \text{ [F/km]}.$$

B — Eq. (8.58) com elementos da matriz:

a — não reduzida:

$$C_{11} = C_s = \frac{1}{\bar{a}_{aa} - \bar{a}_{ab}} = \frac{10^{-7}}{(10{,}457 - 1{,}786)}$$

$$C_{11} = C_s = 0{,}11533 \cdot 10^{-7} \text{ [F/km]};$$

b — reduzida:

$$C_{11} = C_s = \frac{1}{\bar{A}_{aa} - \bar{A}_{ab}} = \frac{10^{-7}}{10{,}12667 - 1{,}42033}$$

$$C_{11} = C_s = 0{,}11481 \cdot 10^{-7} \text{ [F/km]}.$$

C — Pela Eq. (8.59):

$$C_{11} = C_s = \frac{0{,}24127 \cdot 10^{-6}}{\log \dfrac{D_m}{R_c}\left[\dfrac{1}{\sqrt{1 + \left(\dfrac{D_m}{2h_m}\right)^2}}\right]}$$

$$C_{11} = C_s = \frac{0{,}24127 \cdot 10^{-6}}{\log \dfrac{12{,}59921}{0{,}0708}\left[\dfrac{1}{\sqrt{1 + \left(\dfrac{12{,}59921}{2 \cdot 12{,}70}\right)^2}}\right]}$$

$$C_{11} = C_s = 0{,}10954 \cdot 10^{-7} \text{ [F/km]}.$$

D — Pela Eq. (8.60):

$$C_{11} = C_s = \frac{0{,}24127 \cdot 10^{-7}}{\log \dfrac{D_m}{R_e}}$$

$$C_{11} = C_s = \frac{0{,}24127 \cdot 10^{-6}}{\log \dfrac{12{,}59921}{0{,}0708}}$$

$$C_{11} = C_s = 0{,}10722 \cdot 10^{-7} \text{ [F/km]}.$$

Comentário

As diferenças nos valores que observamos são perfeitamente toleráveis e podem ser aceitas para fins práticos. Também nessa classe de linhas os métodos analisados são válidos.

11. Determinar a reatância de seqüência positiva da linha descrita no Exerc. 8 através das tabelas de reatâncias capacitivas.

Solução

a — Da Tab. III.9 do Ap. III, para uma *DMG* $D_m = 12{,}6$ [m], obtemos:

$$x''_c = 0{,}12097 \text{ [Mohm·km]};$$

b — o espaçamento entre subcondutores $s = 40$ [cm] não corresponde aos espaçamentos padronizados constantes da Tab. III.3.*b* para a determinação da reatância capacitiva com o espaçamento de 1 [m]. Logo, x'_c deverá ser calculado diretamente:

$$x'_c = 6{,}596 \cdot 10^{-6} \frac{1}{f} \log \frac{1}{R_c}$$

$$x'_c = 0{,}10993 \cdot 10^6 \log \frac{1}{0{,}0708}$$

$$x'_c = 0{,}12642 \cdot 10 \quad \text{[Mohm·km]}.$$

Nota: Com o espaçamento-padrão de 15″ da Tab. III.3.*b* para o cabo CAA *Grosbeak*, encontramos $x'_c = 0{,}1275$ [Mohm·km], aceitável em primeira aproximação. Logo:

$$x_{C11} = x_{Cs} = x' + x'' = 0{,}24739 \quad \text{[Mohm·km]}.$$

12. Qual o valor da capacitância de seqüência nula da linha descrita no Exerc. 8?

Solução

Podemos usar a Eq. (8.71) com valores de $\bar{A}_{aa}$ e $\bar{A}_{ab}$ calculados no Exerc. 9:

$$C_{oo} = \frac{1}{\bar{A}_{aa} + 2\bar{A}_{ab}} = \frac{10^{-7}}{10{,}12667 + 2(1{,}42033)}$$

$$C_{oo} = 0{,}07712 \cdot 10^{-7} \quad \text{[F/km]}.$$

13. Determinar os elementos da matriz $[A_{eq}]$ da linha do Exerc. 8, considerando para efeito de correção da influência dos cabos pára-raios a Eq. (8.73).

Solução

Neste caso, a correção será feita por um valor médio, definido pela Eq. (8.73):

$$\Delta\bar{a} = \frac{2\,\bar{a}_{ar}^2}{a_{rr} + a_{rs}}\,;$$

dos elementos da matriz 5 × 5 do Exerc. 8:

$$\bar{a}_{ar} = 1{,}890 \cdot 10^7 \quad [\text{km/F}];$$

$$a_{rr} = 16{,}014 \cdot 10^7 \quad [\text{km/F}];$$

$$a_{rs} = 2{,}283 \cdot 10^7 \quad [\text{km/F}];$$

$$\Delta a = 0{,}39046 \cdot 10^7 \quad [\text{km/F}].$$

Esse fator de correção é aplicado igualmente a todos os elementos da submatriz $[A_1]$ da matriz $[A]$. Teremos a matriz corrigida:

$$[A_{eq}] = \begin{bmatrix} 10{,}067 & 1{,}419 & 1{,}350 \\ 1{,}419 & 10{,}067 & 1{,}419 \\ 1{,}350 & 1{,}419 & 10{,}067 \end{bmatrix} \quad [\text{km/F}].$$

Comentário

O efeito da correção realizada dessa maneira não afeta o valor da capacitância de seqüência positiva. O efeito sobre o valor da capacitância de seqüência nula será:

$$C_{oo} = \frac{1}{\bar{A}_{aa} + 2\bar{A}_{ab}} = \frac{10^{-7}}{10{,}067 + 2(1{,}396)}$$

$$C_{oo} = 0{,}07777 \cdot 10^{-7} \quad [\text{F/km}].$$

Comparando esse resultado com o obtido pela compensação individual, obtemos uma diferença de $0{,}00065 \cdot 10^{-7}$ [F/km], ou seja, de 0,084%, que é insignificante; a Eq. (8.73) é perfeitamente válida para a compensação dos efeitos de cabos pára-raios.

14. A linha de transmissão de 138 [kV] entre a U.H.E. de Itutinga e a S. E. de Lavras, da CEMIG foi construída com estruturas de concreto duplo *Tee* (Cavan), sendo a geometria aproximada das estruturas aquela indicada na Fig. 7.29. Os cabos são 2. CAA 4/0 AWG-6/1 e os pára-raios de aço galvanizado de 5/16″ de diâmetro nominal. Espaçamento entre subcondutores, 0,40. Admitindo uma flecha média de 6,5 [m] para os cabos condutores. e 6,0 [m] para os cabos pára-raios, determinar:

a — capacidades parciais da linha;

b — capacidades aparentes por fase;

c — capacitâncias de seqüência positiva e seqüência nula.

15. Determinar, para a linha do exercício anterior, as susceptâncias capacitivas e reatâncias capacitivas de seqüências positiva e nula.

16. Para a linha de 500 kV descrita no Exerc. 23 do Cap. 7, determinar, considerando os cabos pára-raios multiaterrados:

a — capacitâncias parciais;

b — capacitâncias aparentes;

c — reatância capacitiva de seqüência positiva;

d — reatância capacitiva de seqüência nula.

17. Repetir o Exerc. 15, considerando os cabos pára-raios isolados.

18. A Fig. 7.32 mostra uma estrutura da LT de 138 [kV] entre a U. H. E. Armando Sales de Oliveira (Limoeiro) e a S. E. de São João da Boa Vista, de propriedade da CESP. Sendo os cabos condutores CAA — código PARTRIDGE, o cabo pára-raios de aço galvanizado de fios, de diâmetro nominal de 1/2″, determinar, considerando inicialmente os dois circuitos com as mesmas seqüências de fase:

a — capacidades parciais;

b — capacidades aparentes

e admitindo um valor das flechas de 6,50 [m] para os condutores e 6,00 [m] para os pára-raios.

Solução

a — Com os elementos calculados a partir da geometria da linha, a matriz $[A]$ do circuito ABC será:

$$[A]_{ABC} = 10^7 \left[\begin{array}{ccc|c} 14{,}9294 & 3{,}7005 & 2{,}2818 & 3{,}4722 \\ 3{,}7005 & 14{,}5633 & 3{,}2960 & 2{,}5993 \\ 2{,}2818 & 3{,}2960 & 14{,}1031 & 1{,}8992 \\ \hline 3{,}4722 & 2{,}5993 & 1{,}8992 & 15{,}8174 \end{array}\right]$$

b — A matriz da atuação do circuito *DEF* sobre o circuito *ABC*, ou seja, a matriz dos coeficientes de campo mútuos entre circuitos será:

$$[A]_M = 10^7 \begin{bmatrix} 3{,}0766 & 2{,}7083 & 2{,}1014 \\ 2{,}7083 & 2{,}7252 & 2{,}2497 \\ 2{,}1014 & 2{,}2497 & 2{,}2937 \end{bmatrix}$$

Nesta estamos deixando de considerar o efeito simultâneo do circuito *DEF* sobre o cabo pára-raios, por simplicidade, caso contrário a matriz seria 3 × 4.

c — A matriz $[A]$ de um circuito da linha *ABC* a circuito duplo será:

$$[A] = [A]_{ABC} + [A]_M$$

que, pela adição dos elementos indicada, se transforma em (ver Eq. 8.77):

$$[A] = 10^7 \left[\begin{array}{ccc|c} 18{,}0060 & 6{,}4088 & 4{,}3832 & 3{,}4722 \\ 6{,}4088 & 17{,}2885 & 5{,}5457 & 2{,}5993 \\ 4{,}3832 & 6{,}0212 & 16{,}3968 & 1{,}8992 \\ \hline 3{,}4722 & 2{,}5993 & 1{,}8992 & 15{,}8174 \end{array}\right]$$

d — Efetuando a redução da matriz para a $[A_{eq}]$, usando a Eq. (8.64), a matriz de correção será:

$$[A_{corr}] = 10^7 \begin{bmatrix} 0{,}76221 & 0{,}51059 & 0{,}41691 \\ 0{,}51059 & 0{,}42715 & 0{,}31210 \\ 0{,}41691 & 0{,}31210 & 0{,}27804 \end{bmatrix};$$

como

$$[A_{eq}] = [A] - [A_{corr}],$$

teremos:

$$[A_{eq}] = 10^7 \begin{bmatrix} 17{,}2438 & 5{,}8382 & 3{,}9663 \\ 5{,}8382 & 16{,}8613 & 5{,}2336 \\ 3{,}9663 & 5{,}2336 & 16{,}1688 \end{bmatrix} \quad [\text{km/F}].$$

e — Para o cálculo das capacitâncias parciais, a matriz acima deverá ser invertida. Logo:

$$[A]^{-1} = 10^{-7} \begin{bmatrix} 0{,}06710 & -0{,}02015 & -0{,}00994 \\ -0{,}02015 & 0{,}07198 & -0{,}01836 \\ -0{,}00994 & -0{,}01836 & 0{,}07023 \end{bmatrix} \quad [\text{F/km}].$$

f — As capacitâncias parciais, conforme as Eqs. (8.25) e (8.26), serão:

$$C_{ao} = 0{,}03091 \cdot 10^{-7} \ [\text{F/km}];$$

$$C_{bo} = 0{,}03347 \cdot 10^{-7} \ [\text{F/km}];$$

$$C_{co} = 0{,}04193 \cdot 10^{-7} \ [\text{F/km}];$$

$$C_{ab} = 0{,}02015 \cdot 10^{-7} \ [\text{F/km}];$$

$$C_{bc} = 0{,}01836 \cdot 10^{-7} \ [\text{F/km}];$$

$$C_{ac} = 0{,}00998 \cdot 10^{-7} \ [\text{F/km}].$$

g — As capacitâncias aparentes, de acordo com a Eq. (8.44), serão, para cada condutor de fase:

$$C_a = 0{,}07611 \cdot 10^{-7} \ [\text{F/km}];$$

$$C_b = 0{,}09124 \cdot 10^{-7} \ [\text{F/km}];$$

$$C_c = 0{,}08444 \cdot 10^{-7} \ [\text{F/km}].$$

19. Determinar as capacitâncias de seqüência positiva e de seqüência nula da linha do exercício anterior.

Solução

A — Capacitância de seqüência positiva:

$$C_{11} = C_s = \frac{C_a + C_b + C_c}{3} = 0{,}08393 \cdot 10^{-7} \quad [\text{F/km}];$$

$$C_{11} = C_s = \frac{1}{\bar{A}_{aa} + \bar{A}_{ab}} = \frac{10^{-7}}{16{,}75797 - 5{,}01270} = 0{,}08514 \cdot 10^{-7} \quad [\text{F/km}].$$

B — Capacitância de seqüência nula:

$$C_{oo} = \frac{1}{\bar{A}_{aa} + 2\bar{A}_{ab}} = \frac{10^{-7}}{16{,}75797 + 2(5{,}01270)} =$$

$$C_{oo} = 0{,}03734 \cdot 10^{-7} \quad [\text{F/km}].$$

20. Repetir o Exerc. 17 invertendo a seqüência de fases no circuito *DEF*. Comparar os resultados obtidos com os do exercício anterior.

21. Calcular as reatâncias capacitivas de serviço da linha do Exerc. 17, também para os dois casos de seqüência de fases.

Solução

Pela Eq. (8.95), temos:

$$D_m = \sqrt[3]{d_{ab}d_{bc}d_{ac}} = \sqrt[3]{3{,}80 \cdot 3{,}80 \cdot 7{,}60} = 4{,}80 \quad [\text{m}];$$

$$r = \frac{d}{2} = \frac{16{,}306}{2} = 0{,}153 \text{ mm} = 0{,}00817 \quad [\text{m}].$$

D_{II} e D_I deverão ser calculados para as duas disposições de fase: Teremos:

1 — Disposição simétrica

$$D_{II} = \sqrt[6]{d_{ab}'d_{ac}'d_{ba}'d_{bc}'d_{ca}'d_{cb}'} =$$

$$= \sqrt[6]{(7{,}1)^4 \cdot (9{,}70)^2} = 7{,}86 \quad [\text{m}];$$

$$D_I = \sqrt[3]{d_{aa}'d_{bb}'d_{cc}'} = \sqrt[3]{(6{,}00)^3} = 6{,}00 \quad [\text{m}]$$

$$x_{c_s} = 6{,}596 \cdot 10^6 \cdot \frac{1}{60} \log \frac{4{,}80}{0{,}008153} \cdot \frac{7{,}86}{6{,}00}$$

$$x_{c_s} = 0{,}315 \quad [\text{Mohm} \cdot \text{km}].$$

2 — Disposição assimétrica:

$$D_{II} = \sqrt[6]{d_{aa}'d_{ab}'d_{ba}'d_{ca}'d_{ca}'d_{cc}'} =$$

$$= \sqrt[6]{(6{,}00)^2 \cdot (7{,}1)^2 \cdot (9{,}7)^2} = 7{,}44 \quad [\text{m}];$$

$$D_I = \sqrt[3]{(9{,}2)^2 \cdot 6{,}00} = 8{,}28 \quad [\text{m}];$$

logo,

$$x_{c_s} = 6{,}506 \cdot 10^6 \cdot \frac{1}{60} \log \frac{4{,}80}{0{,}008153} \cdot \frac{7{,}44}{8{,}28}$$

$$x_{c_s} = 0{,}299 \quad [\text{Mohm} \cdot \text{km}].$$

O problema também seria facilmente resolvido com o emprego das tabelas:

Caso I — Cabo — ACSR PARTRIDGE:

$x'_{c_s} = 0{,}22961$ [Mohm·km] — Tab. II.6;

$D_m = 4{,}8$ m $\quad x''_c = 0{,}07489$ [Mohm·km] — Tab. II.10;

$$\frac{D_{II}}{D_I} = \frac{7{,}86}{6{,}00} = 1{,}31$$

$x''_{c_s}{}' = 0{,}012891$ [Mohm·km] — Tab. II.14;

logo,

$$x_{c_s} = x'_{c_s} + x''_{c_s} + x'''_{c_s} = 0{,}31539 \quad [\text{Mohm} \cdot \text{km}].$$

Caso II — Como acima:

$x'_{c_s} = 0{,}022961$ [Mohm·km] — Tab. II.6;

$x''_{c_s} = 0{,}07489$ [Mohm·km] — Tab. II.10;

$$\frac{D_{II}}{D_I} = \frac{7{,}44}{8{,}28} = 0{,}90 \text{ — Tab. II.14;}$$

$x'''_{c_s} = -0{,}00503$ [Mohm·km];

logo,

$$x_{c_s} = 0{,}29953 \quad [\text{Mohm} \cdot \text{km}].$$

22. Determinar as reatâncias capacitivas de seqüências positiva e nula da linha do Exerc. 17 empregando o método direto.

Solução

O método direto é definido pela transformação $[a]^{-1}[A][a]$, como mostra a Eq. (8.107). Teremos:

$$[x_{cseq}] = \frac{10^{-7}}{6\pi f}\begin{bmatrix}1 & 1 & 1\\ 1 & a & a^2\\ 1 & a^2 & a\end{bmatrix}\begin{bmatrix}A_{aa} & A_{ab} & A_{ac}\\ A_{ab} & A_{bb} & A_{bc}\\ A_{ac} & A_{bc} & A_{cc}\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}1 & 1 & 1\\ 1 & a^2 & a\\ 1 & a & a^2\end{bmatrix}$$

ou:

$$[x_{cseq}] = 8841{,}73\begin{bmatrix}1 & 1 & 1\\ 1 & a & a^2\\ 1 & a^2 & a\end{bmatrix}\begin{bmatrix}17{,}2438 & 5{,}8382 & 3{,}9663\\ 5{,}8382 & 16{,}8613 & 5{,}2336\\ 3{,}9663 & 5{,}2336 & 16{,}1688\end{bmatrix}\begin{bmatrix}1 & 1 & 1\\ 1 & a^2 & a\\ 1 & a & a^2\end{bmatrix}$$

$$[x_{cseq}] = 10^6\begin{bmatrix}\underline{0{,}71043} & 0{,}01995 & 0{,}01995\\ 0{,}01995 & \underline{0{,}31154} & 0{,}02640\\ 0{,}01995 & 0{,}02640 & \underline{0{,}31154}\end{bmatrix}\ [\text{ohm}\cdot\text{km}].$$

As reatâncias capacitivas serão, portanto, considerando a linha transposta:

$$x_{C_{00}} = 0{,}71043\quad [\text{Mohm}\cdot\text{km}];$$
$$x_{C_{11}} = 0{,}31154\quad [\text{Mohm}\cdot\text{km}];$$
$$x_{C_{22}} = 0{,}31154\quad [\text{Mohm}\cdot\text{km}].$$

23. A linha de transmissão da CESP de Jupiá e Cabreúva está ilustrada e descrita no Exerc. 20 do Cap. 7. Admitindo uma flecha de 13,4 [m] para os cabos condutores e uma de 12,5 [m] para o cabo pára-raios, determinar:

a — capacitâncias parciais;

b — capacitâncias aparentes;

c — capacitâncias de seqüência positiva;

d — capacitâncias de seqüência nula.

24. Determinar as reatâncias de seqüências positiva e nula da linha do Exerc. 22 pelo processo direto e comparar os resultados com aquelas calculáveis a partir das capacitâncias calculadas no exercício anterior.

25. Conferir o valor da reatância capacitiva de seqüência positiva, determinado no Exerc. 23, pelas tabelas do Ap. III.

26. Pelo método de sua escolha, determinar os valores da susceptância capacitiva de seqüências positiva e nula da linha descrita no Exerc. 22 do Cap. 7.

27. Calcular a tensão induzida nos cabos pára-raios da linha descrita no Exerc. 8, admitindo que os mesmos sejam isolados do solo e que a tensão entre fases na linha seja de 345 [kV].

Solução

A equação do campo elétrico da linha pode ser escrita de forma simbólica como segue, considerando-se a matriz particionada:

$$\begin{bmatrix}\dot{U}_\phi\\ \hline \dot{U}_R\end{bmatrix} = \left[\begin{array}{c|c}A_1 & A_2\\ \hline A_3 & A_4\end{array}\right]\begin{bmatrix}\dot{Q}_\phi\\ \hline \dot{Q}_R\end{bmatrix}.$$

Os cabos pára-raios isolados possuem cargas líquidas nulas, logo:

$$[\dot{Q}_R] = 0.$$

Assim:

$$[\dot{U}_\phi] = [A_1][\dot{Q}_R]$$
$$[\dot{U}_R] = [A_3][\dot{Q}_R].$$

Resolvendo simultaneamente, teremos:

$$[\dot{U}_R] = [A_3][A_1]^{-1}[U_\phi]$$

ou

$$\begin{bmatrix}\dot{U}_R\\ \dot{U}_S\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}A_{ar} & A_{br} & A_{cr}\\ A_{as} & A_{bs} & A_{cs}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\frac{G_{aa}}{D} & \frac{G_{ab}}{D} & \frac{G_{ac}}{D}\\ \frac{G_{ab}}{D} & \frac{G_{bb}}{D} & \frac{G_{bc}}{D}\\ \frac{G_{ac}}{D} & \frac{G_{bc}}{D} & \frac{G_{cc}}{D}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{U}_a\\ \dot{U}_b\\ \dot{U}_c\end{bmatrix}.$$

Nessas condições, introduzindo os valores numéricos e lembrando que $\dot{U}_a + \dot{U}_b + \dot{U}_c = 0$, ou $\dot{U}_b = a^2\dot{U}_a$ e $\dot{U}_c = a\dot{U}_a$, podemos determinar o valor de U_R e U_S. Deixamos como exercício para o leitor a obtenção dos valores numéricos.

28. Determinar as tensões induzidas nos cabos pára-raios da linha descrita no Exerc. 22.

29. Escrever um programa para computador digital em Fortran IV para o cálculo das capacitâncias, reatâncias capacitivas e susceptâncias capacitivas, de seqüências positiva, negativa e nula, e testá-lo com as linhas descritas neste capítulo.

30. Qual o potencial induzido nos cabos pára-raios da LT de 500 kV do Exerc. 25, se considerarmos os mesmos isolados?

31. Calcular o potencial induzido nos cabos pára-raios da linha descrita no Exerc. 22.

8.9 — BIBLIOGRAFIA

1 — Bornemann, H. — *Bau und Berrechnung von Leitungen und Leitungsnetzen.* Technischer Verlag Herbert Cran, Berlim W., 1956. Vol. 2.

2 — Biermanns, J. — *Hochspannung und Hochleistung.* Carl Hanser Verlag, Munchen, 1949.

3 — Guile, A. E. e Paterson, W. — *Electric Power Systems.* Oliver Boyd, Edinburg, 1969. Vol. 1.

4 — Lewis, W. A. — *The Transmission of Electric Power.* Illinois Institute of Technology, 1964.

5 — Clarke, E. — *Circuit Analysis of AC Power Systems.* John Wiley & Sons, Inc., Nova Iorque, 1943.

6 — Central Station Engineers — *Electrical Transmission and Distribution Reference Book.* Westinghouse, East Pittsburgh, 1950. 4.ª edição.

7 — Gross, E. T. B. Wing Chin — *Electrostatic Unbalance of Untransposed Single Circuit Lines.* Transactions IEEE Nova Iorque, Vol. PAS 87, 1968. Págs. 24-34.

8 — Projeto EHV — *EHV Transmission Line Reference Book.* Edison Electric Institute Nova Iorque, 1968.

9 — Dalla Verde, A — *Projecto de la Linea de 380 [kV] de San Nicolas a Buenos Aires.* Vol. 1 — Informe. Editado pela Techint — Cia. Técnica Internacional, Buenos Aires, 1954.

10 — Coleman, D. e outros — *Digital Calculations of Overhead Transmission Line Constant.* AIEE Transactions, Nova Iorque, 1959. Vol. PAS 78. Parte III. *B.*Págs. 1266-1270.

11 — Stevenson, W. D. — *Elements of Power System Analysis.* McGraw-Hill Book Co., Nova Iorque, 1962. 2.ª ed.

9

Resistência das Linhas de Transmissão

9.1 — INTRODUÇÃO

É conhecido o fato de que os condutores apresentam resistências diferentes à passagem das correntes contínuas e à passagem das correntes alternadas. Essa diferença será tanto maior quanto maior for a freqüência das correntes. Em decorrência, poderíamos definir a resistência de um condutor à corrente alternada, freqüência f [Hz], como sendo:

$$r = \frac{\text{perda de potência [W/km]}}{(\text{corrente})^2\ [\text{A}^2]}\ [\text{ohm/km}]. \tag{9.1}$$

Essa é uma resistência efetiva que será obtida se for medida à mesma freqüência f [Hz] com que as perdas foram determinadas.

A resistência total r poderá ser decomposta em três parcelas:

$$r = r_{cc} + r_a + r_{ad}, \tag{9.2}$$

em que:

r_{cc} [ohm/km] — resistência que o condutor apresenta à passagem da corrente contínua;

r_a [ohm/km] — resistência aparente que é provocada pela existência de fluxos magnéticos no interior dos condutores;

r_{ad} [ohm/km] — resistência aparente adicional.

Para o engenheiro de transmissão de energia elétrica, é importante o conhecimento da resistência total dos condutores a diversas temperaturas, pois com ele deverá determinar as perdas na transmissão. Trabalhando com condutores padronizados, obtêm-se dos fabricantes de condutores tabelas de resistências efetivas dos condutores, seja à corrente contínua, seja à corrente alternada, em diversas freqüências industriais. Essas resistências representam, em geral, valores médios obtidos em medição direta sobre um número grande de amostras de condutores, de lotes diversos de fabricação; tomam em devida conta as tolerâncias permitidas pelas normas no que diz respeito à variação das secções transversais ou diâmetros dos condutores ou dos filamentos que os compõem, como também às variações do grau de pureza dos materiais empregados, afetando sua resistividade (ver tabelas de características elétricas dos condutores no Ap. III).

9.2 — RESISTÊNCIA À CORRENTE CONTÍNUA

Depende essencialmente dos seguintes fatores:

A — natureza do material do condutor — caracterizada pela sua resistividade:

$$\rho \left[\frac{\text{ohm} \cdot \text{m}^2}{\text{m}}\right];$$

B — suas dimensões — é diretamente proporcional ao seu comprimento e inversamente proporcional à área de sua secção transversal. Dessa forma, teremos:

$$r_{cc} = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad [\text{ohm}] \tag{9.3}$$

para:

l [m] — comprimento do condutor;

S [m²] — área da secção transversal do condutor.

Sua resistividade é afetada pelos seguintes fatores:

a — têmpera do material — assim, por exemplo, um condutor de cobre recozido tem uma resistência cerca de 3% inferior à de um condutor de cobre de têmpera dura de mesmas dimensões;

b — pureza do material — em geral, a presença de impurezas no material do condutor aumenta consideravelmente a sua resistência;

c — temperatura — a resistividade dos condutores metálicos, conseqüentemente sua resistência, cresce com o aumento da temperatura, podendo ser praticamente nula a temperaturas baixas. Essa variação é linear dentro dos campos de variação que interessam à técnica das linhas. O gráfico da Fig. 9.1 mostra claramente essa lei de variação. Sejam R_1 e R_2 as resistências medidas às temperaturas t_1 e t_2 [°C], respectivamente. Se pelos pontos a_1 e a_2 passarmos uma reta, esta irá cortar o eixo negativo das temperaturas na ordenada T. Da geometria da figura obteremos:

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{T + t_2}{T + t_1} \tag{9.4}$$

Essa expressão é útil para se determinar a resistência R_2 de um condutor metálico para o qual se conhecem R_1 à temperatura t_1 e a constante T, à temperatura t_2. O valor de T varia com a natureza e a têmpera do material. Assim:

T = 234,5 — cobre recozido;

T = 241 — cobre, têmpera dura;

T = 228 — alumínio, têmpera dura.

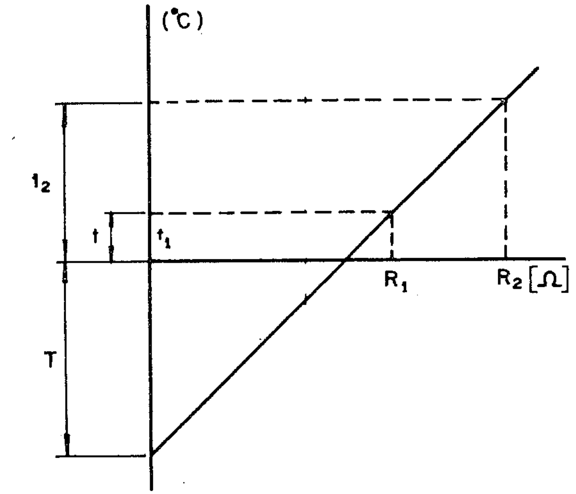


Fig. 9.1 — *Variação da resistência de condutor metálico com a temperatura.*

Esses valores referem-se a condutores maciços e homogêneos, cujo material possui as resistividades especificadas em normas para o fim a que se destinam. Para a expressão acima existe também a equivalência:

$$R_2 = R_1 \, [1 + \alpha_t \, (t_2 - t_1)] \quad [\text{ohm}], \tag{9.5}$$

sendo:

t_1 — temperatura para a qual se conhece R_1;

α_t — coeficiente de aumento de resistência com a temperatura T e t_1, sendo fácil de se demonstrar que:

$$\alpha t_1 = \frac{1}{T + t_1} \quad [1/°\text{C}]. \tag{9.6}$$

Assim, para condutores de cobre duro, tomando como *standard* a temperatura de 20°C, será:

$$\alpha_{20°} = \frac{1}{241 + 20} = 0{,}00385 \quad [1/°C],$$

que é o valor usualmente empregado para esse material. Para os cabos CA e CAA podemos empregar $\alpha_{20} = 0{,}00403$ [1/°C];

d — encordoamento — o encordoamento de filamentos para a obtenção de cabos condutores afeta a sua resistência à corrente contínua independentemente do fato dos cabos serem ou não homogêneos. O enrolamento dos filamentos em forma de espiral em torno de um fio central para a obtenção de um cabo faz com que o comprimento real de um filamento assim enrolado seja, na realidade, maior do que o comprimento do cabo todo. Os fios metálicos empregados na fabricação dos cabos condutores, durante o esfriamento após a trafilação, desenvolvem em sua superfície um filme de óxido, em geral de resistência elevada. Como a diferença de potencial entre dois fios contíguos é pequena, tudo indica que não há correntes de escape de um para outro fio e que a corrente total é conduzida igualmente por todos os fios ao longo de todo o seu comprimento, sendo, portanto, maior sua resistência. Esse acréscimo poderia ser calculado da forma indicada na referência [2]. Na realidade, como medidas o verificaram, há uma certa quantidade de corrente de escape e seu valor depende de uma série de fatores, tais como as condições nas superfícies dos filamentos, a tração no cabo etc., o que torna difícil uma previsão rigorosa. O efeito do espiralamento pode, dessa forma, ser considerado, grosso modo, da ordem de 1,5 a 2% do valor calculado para condutor cilíndrico de mesma secção. No caso dos cabos não homogêneos, como os cabos CAA, os filamentos de maior resistividade conduzem parcelas menores de corrente.

9.3 — RESISTÊNCIA À CORRENTE ALTERNADA

Quando um condutor cilíndrico é percorrido longitudinalmente por uma corrente alternada, a densidade de corrente no seu interior é menor junto ao seu eixo longitudinal e máxima junto à sua superfície.

Esse fenômeno pode ser mais facilmente entendido imaginando-se o condutor composto de um número infinito de fibras longitudinais, paralelas entre si e ao eixo longitudinal, cada qual representando um condutor infinitesimal. Se admitirmos duas secções transversais, a uma certa distância entre si, a queda de tensão em qualquer das fibras deve ser a mesma, ou seja, as duas secções transversais devem ser superfícies eqüipotenciais, como também o será qualquer outra secção normal ao condutor. Em corrente alternada, em cada fio há não somente uma queda de tensão ôhmica, como também uma tensão ou f.e.m. induzida pelo fluxo magnético alternado. A f.e.m. induzida em uma fibra junto à superfície do condutor será menor do que aquela induzida em uma fibra mais próxima ao eixo do condutor, pois a fibra externa é enlaçada por um fluxo magnético

menor do que aquele que enlaça as fibras mais internas. Conseqüentemente, para que as quedas de tensão sejam iguais nas fibras de menor reatância indutiva que naquelas de maior reatância indutiva, é necessário que as correntes nas primeiras sejam maiores do que nas segundas, logo, a densidade de corrente será maior na periferia dos condutores. Esse fenômeno recebe o nome de *efeito pelicular* ou, como é mais conhecido, *skin effect*. Como conseqüência, temos um aumento na resistência do condutor e uma diminuição em sua reatância interna.

O emprego de cabos, à primeira vista, pode parecer indicar uma atuação favorável para reduzir o seu efeito, pois o grau de desigualdade na distribuição das correntes depende essencialmente da freqüência e da permeabilidade magnética do material e cresce de forma exponencial, do interior para a superfície. Assim, se designarmos:

$$\delta = \sqrt{\rho/\pi f \mu} \quad [\text{m}] \tag{9.7}$$

como sendo a *profundidade nominal de penetração*, ou seja, a distância δ [m] medida desde a superfície do condutor na qual a densidade de corrente decresce de $1/e$ ($e = 2{,}718\ldots$) de seu valor máximo, a corrente total em um condutor sólido disporá de uma área aparentemente menor do que em um condutor subdividido, cujos fios transportam apenas parte da corrente, e δ poderá mesmo ser maior do que seu raio. No entanto, experiências mostraram que isso não ocorre, comportando-se a corrente como em um condutor tubular de mesmo diâmetro externo e mesma resistência ôhmica que o cabo. Nos cabos CAA, as experiências mostraram que estes se comportam como condutores tubulares uniformes, tendo um diâmetro interno igual ao diâmetro de um círculo que tangencia os filamentos de alumínio em sua parte interna e um diâmetro externo que pode ser circunscrito aos filamentos externos dos cabos. Parte desse fato se deve, também, ao aço de que é feito seu núcleo, porque possui resistividade maior.

O cálculo rigoroso do problema do *efeito pelicular* envolve equações com funções de Bessel, e é bastante trabalhoso, conforme se pode verificar na bibliografia anexa. Na referência [5] encontra-se a curva da Fig. 9.2, que permite calcular o fator R_{CA}/R_{CC} em função da espessura e do diâmetro do anel tubular que inscreve os filamentos de alumínio dos cabos CAA.

Para determinadas bitolas e composições de cabos CAA, o efeito pelicular é desprezível para efeitos práticos, podendo sua resistência à corrente alternada ser tomada como sendo igual à sua resistência à corrente contínua, como as próprias tabelas publicadas com base em trabalho experimental o demonstram.

Além do aumento aparente da resistência provocado pelo efeito pelicular nos cabos CAA, deve ser considerado outro fenômeno que também provoca perdas adicionais.

Os filamentos dos cabos enrolados em espiral, quando percorridos por correntes, produzem um fluxo longitudinal, que é coaxial com o cabo. Comportam-se, pois, como um solenóide.

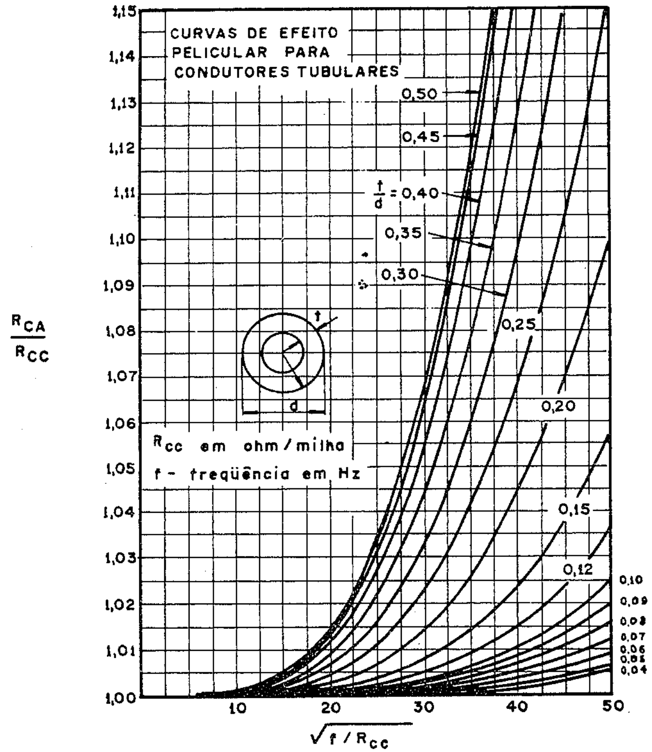


Fig. 9.2 — *Influência do efeito pelicular sobre a resistência dos condutores* [5].

Os cabos são, em geral, compostos por diversas camadas de filamentos, sendo o sentido de enrolamento de uma camada oposto ao da anterior, de forma que o fluxo produzido em uma das camadas possui sentido oposto ao das suas vizinhas. Qualquer fluxo resultante no centro provocará quedas de tensões diferentes nas diferentes camadas. Com duas capas, é mais do que razoável que se despreze inteiramente o fluxo longitudinal. Com três camadas, duas em uma direção e outra na direção contrária, é de se esperar que predomine o fluxo em um sentido. Qualquer correção, se necessária, é pequena, podendo-se fazê-la empiricamente.

Quando existe apenas uma capa de filamentos espiralados, porém o fenômeno é mais sério. O fluxo longitudinal pode ser considerável e a reatância por ele produzida aumentará a reatância total do condutor de um valor que é muito difícil de se determinar analiticamente, devido a um certo número de fatores imprevisíveis que também intervêm.

Nos cabos CAA, que possuem núcleos magnéticos, o fenômeno é bastante intenso no caso dos cabos de uma camada, produzindo, além do aumento na reatância do cabo, também perdas por correntes parasitas (Foucault) e perdas por histerese, que aumentam adicionalmente a resistência dos condutores, através de um aumento em suas resistências aparentes. Essas perdas dependem também da tração aplicada ao condutor.

Pelo exposto, pode-se concluir que a fixação da resistência exata total de um condutor é um proplema dos mais complexos da Engenharia, em virtude dos múltiplos fatores envolvidos, mesmo experimentalmente, pois dificilmente as condições em laboratório seriam as mesmas que na linha real. No entanto, para fins práticos, é usual o emprego dos valores que se encontram tabelados em manuais e catálogos de produtos, com os quais se pode obter razoável precisão.

O projetista de cabos, antes da fabricação, poderá determinar as características, com boa aproximação, pelo processo contido na referência [5].

Para cálculos de desempenho em linhas de transmissão, a resistência dos condutores é, em geral, considerada à temperatura de 75°C para compensar o efeito do aumento de temperatura provocado pelo Sol e pelo efeito Joule das correntes.

9.4 — RESISTÊNCIA DOS CIRCUITOS COM RETORNO PELO SOLO

No Cap. 7 vimos que os trabalhos de Carson resultaram na fixação do valor de impedâncias de circuitos com retorno pelo solo (Item 7.10.2), como sendo compostas de impedância do circuito metálico, mais um fator de correção para o retorno pelo solo, ou seja:

$$[\dot{Z}] = [R_c] + [\Delta R_{rs}] + j\omega\{[L] + [\Delta L_{rs}]\} \text{ [ohm/km]}, \qquad (9.8)$$

na qual valem:

$[\dot{Z}]$ — matriz das impedâncias corrigidas;

$[R_c]$ — matriz das resistências dos condutores — é uma matriz diagonal;

$[\Delta R_{rs}]$ — matriz dos fatores de correção para incluir os efeitos da resistência do solo.

Esta última é uma matriz cheia de ordem $n \times n$, sendo n o número de condutores do circuito. Seus termos são calculados através da Eq. (7.127) da forma exposta no Item 7.10.2. A Eq. (7.129) representa a Eq. (9.8) escrita de forma completa.

Definimos desta maneira uma matriz $[R]$ de mesma ordem n para os n condutores do sistema, simétrica:

$$[R] = \begin{bmatrix} r_{aa} & r_{ab} & r_{ac} & \cdots & r_{an} \\ r_{ab} & r_{bb} & r_{bc} & \cdots & r_{bn} \\ \vdots & & & & \vdots \\ r_{an} & r_{bn} & r_{cn} & \cdots & r_{nn} \end{bmatrix} \text{ [ohm/km]}. \qquad (9.9)$$

Para uma linha trifásica, esta matriz representará as resistências corrigidas dos condutores e dos cabos pára-raios. Poderá ser reduzida a uma matriz $[R_{eq}]$ de ordem 3 × 3 da forma vista, passando a representar as resistências de uma linha trifásica sem cabos pára-raios, equivalente à linha real.

Observamos na mesma resistências próprias dos condutores e resistências mútuas entre condutores. Ela nos permite definir resistências parciais, aparentes e de seqüências positiva, negativa e nula, da mesma forma como o fizemos com as reatâncias indutivas e capacitivas. Teremos:

$$[R_{seq}] = [a]^{-1}\,[R_{eq}]\,[a]. \qquad (9.10)$$

Efetuando as operações indicadas, encontraremos para linhas transpostas:

a — resistências de seqüências positiva e negativa:

$$r_{11} = r_{12} = \overline{R}_{aa} - \overline{R}_{ab} \quad [\text{ohm/km}]; \qquad (9.11)$$

b — resistências de seqüência nula:

$$r_{oo} = \overline{R}_{aa} + 2\overline{R}_{ab} \quad [\text{ohm/km}]. \qquad (9.12)$$

Nessas duas equações valem:

$\overline{R}_{aa}$ [ohm/km] — resistências médias dos condutores da matriz da linha equivalente;

$\overline{R}_{ab}$ [ohm/km] — resistências médias mútuas entre condutores da linha equivalente.

Para as linhas com condutores múltiplos devemos lembrar que a matriz $[R_c]$ deve refletir essa condição. Sendo m o número de subcondutores de um feixe, os elementos da diagonal dessa matriz serão calculados dividindo-se a resistência de um subcondutor por m.

A correção para a resistência do solo pode ser também determinada por um processo aproximado [8], sem incorrer em erro significativo.

Neste caso, considera-se sua resistência como uma função exclusiva da freqüência e todos os termos da matriz $[\Delta R_{rs}]$ são iguais entre si e a:

$$\Delta r = 0{,}9869 \cdot 10^{-3} f \quad [\text{ohm/km}]. \qquad (9.13)$$

9.5 — RESISTÊNCIA APARENTE ADICIONAL

Já vimos no Cap. 7 que os cabos pára-raios aterrados das linhas de transmissão constituem fontes adicionais de perdas de energia que, como se verifica, apresentam o mesmo valor, ou mesmo superior, daquelas devidas ao efeito Corona com tempo bom (ver Exerc. 9). Poderão ser incluídas nos cálculos de desempenho.

9.6 — EXERCÍCIOS

1. Um cabo de cobre de 250 MCM, composto de 19 filamentos, possui uma resistência à corrente alternada de 60 [Hz] igual a 0,1460 [ohm/ /km], a 25°C. Qual a sua resistência a 30°C?

Solução

$$R_2 = \frac{R_1\,(T + t_2)}{(T + t_1)} = \frac{0{,}1460\,(241 + 90)}{241 + 25}$$

$$R_2 = 0{,}1817\ [\text{ohm/km}].$$

2. Qual o coeficiente de aumento de temperatura do material do condutor do Exerc. 1?

Solução

$$\alpha_{t_{25^\circ}} = \frac{1}{T + t_1} \quad \frac{1}{241 + 25^\circ} = 0{,}00377 \quad [1/^\circ\text{C}].$$

3. Um cabo de alumínio CA (Código OXLIP), bitola n.° 4/0 AWG e 7 filamentos, possui uma resistência de 25°C (60 [Hz]) igual a 0,2703 [ohm/km]. Quantas vezes sua resistência é maior do que a de um cabo de cobre de mesma bitola?

Solução

Da Tab. II.2 obtemos para o cabo de cobre 4/0 AWG:

$$r_2 = 0{,}1227 \quad [\text{ohm/km}];$$

logo,

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{0{,}2703}{0{,}1227} = 2{,}2 \text{ vezes.}$$

4. Qual o valor da temperatura T para um cabo CAA 336 400 CM, 26/7 (Oriole), admitindo-se variação linear?

5. Determinar as resistências de seqüências positiva, negativa e nula da linha de transmissão descrita no Exerc. 8 do Cap. 8, empregando o processo exato e comparando-o ao processo aproximado. A resistividade do solo tem valor de cerca de 100 [ohm/m³].

Solução

Para formar a matriz R_c recorremos às tabelas de características dos condutores no Ap. III. Teremos:

a — cabo *Grosbeak* — r = 0,1005 [ohm/km] para dois condutores por feixe:

$$r_c = 0{,}5 \cdot 0{,}1005 = 0{,}05025 \quad [\text{ohm/km}];$$

essa é a resistência dos condutores a 50°C. A 75°C, sua resistência será:

$$r_c = 0{,}05025\ [1 + \alpha_t\,(t_2 - t_1)] \qquad \text{(Eq. 9.5)}$$

$$r_c = 0{,}05025\ [1 + 0{,}00403\ (75 - 50)]$$

$$r_c = 0{,}055315 \quad [\text{ohm/km}].$$

Cabo de aço EHS — r = 3,045 [ohm/km]. Essa resistência refere-se a um valor médio de corrente no cabo pára-raios de 30A.

A matriz das resistências será:

$$[R_c] = \begin{bmatrix} 0{,}055315 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0{,}055315 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0{,}055315 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3{,}045 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 3{,}045 \end{bmatrix}$$

b — matriz corrigida — método exato: de acordo com a Eq. (7.123) temos:

$$\Delta R_{rs} = 0{,}002513\ f\ P \quad [\text{ohm/km}]. \qquad \text{(Eq. 7.123)}$$

O valor de P pode ser calculado por:

$$P = \frac{\Pi}{8} - \frac{p}{3\sqrt{2}} \cos\theta + \frac{p^2}{16} \cos 2\theta \left(06728 + Ln\,\frac{2}{p}\right) +$$

$$+ \frac{p^2}{16}\,\theta \text{ sen } 2\theta. \qquad \text{(Eq. 7.127)}$$

Os valores de θ e p são calculados pelas Eqs. (7.124), (7.125) e (7.126). Substituindo os valores obtidos da linha, obtemos a matriz procurada:

$$[\Delta R_{rs}] = \begin{bmatrix} 0{,}05950 & 0{,}05732 & 0{,}05728 & 0{,}05667 & 0{,}05693 \\ & 0{,}05950 & 0{,}05732 & 0{,}05669 & 0{,}05669 \\ & & 0{,}05950 & 0{,}05663 & 0{,}05667 \\ & & & 0{,}05950 & 0{,}05662 \\ & & & & 0{,}05950 \end{bmatrix}$$

A matriz das resistências corrigidas será, portanto:

$$\begin{array}{cc} & \begin{array}{ccccc} & [R_1] & & & [R_2] \end{array} \\ [R] = & \begin{bmatrix} 0{,}114815 & 0{,}05732 & 0{,}05728 & 0{,}05662 & 0{,}05662 \\ 0{,}05732 & 0{,}114815 & 0{,}05732 & 0{,}05669 & 0{,}05669 \\ 0{,}05728 & 0{,}05732 & 0{,}114815 & 0{,}05662 & 0{,}05662 \\ 0.05662 & 0{,}05669 & 0{,}05662 & 3{,}10450 & 0{,}05950 \\ 0{,}05662 & 0{,}05669 & 0{,}05662 & 0{,}05950 & 3{,}10450 \end{bmatrix} \\ & \begin{array}{ccccc} & [R_3] & & & [R_4] \end{array} \end{array}$$

Essa matriz será reduzida à matriz 3 × 3 da linha trifásica equivalente através da expressão abaixo, derivada da Eq. (7.80):

$$[R_{eq}] = [R_1] - [R_2]\,[R_4]^{-1}\,[R_3].$$

Efetuando as operações indicadas no segundo termo do segundo membro da equação, com as matrizes parciais acima, indicadas, obteremos:

$$[R_{eq}] = [R_1] - \begin{bmatrix} 0{,}00207 & 0{,}00207 & 0{,}00207 \\ 0{,}00203 & 0{,}00203 & 0{,}00203 \\ 0{,}00207 & 0{,}00207 & 0{,}00207 \end{bmatrix}$$

ou

$$[R_{eq}] = \begin{bmatrix} 0{,}11275 & 0{,}05525 & 0{,}05521 \\ 0{,}05529 & 0{,}11279 & 0{,}05529 \\ 0{,}05521 & 0{,}05525 & 0{,}11275 \end{bmatrix}$$

A resistência de sequência positiva para a linha transposta será:

$$R_{11} = \bar{A}_{aa} - \bar{A}_{ab} \quad [\text{ohm/km}]$$

$$\bar{A}_{aa} = 0{,}11276 \quad [\text{ohm/km}]$$

$$\bar{A}_{ab} = 0{,}05525 \quad [\text{ohm/km}];$$

logo,

$$R_{11} = 0{,}05751 \quad [\text{ohm/km}].$$

A resistência de seqüência nula para a linha transposta será:

$$R_{oo} = \bar{A}_{aa} + 2\bar{A}_{ab} \quad [\text{ohm/km}]$$

$$R_{oo} = 0{,}22326 \quad [\text{ohm/km}].$$

Comentário

A resistividade do solo influencia levemente o valor das resistências de seqüências positiva e negativa. No presente caso, o aumento foi da ordem, de 4%, que, no entanto, geralmente é desprezado;

c — matriz corrigida pelo método aproximado — de acordo com a Eq. (9.13), todos os termos da matriz $|R_c|$ serão acrescidos de um fator constante:

$$\Delta\bar{r}_a = 0{,}9869 \cdot 10^{-3} f \quad [\text{ohm/km}]; \qquad \text{(Eq. 9.13)}$$

logo,

$$\Delta\bar{r}_a = 0{,}05921 \quad [\text{ohm/km}].$$

Comentário

A média dos valores dos fatores de correção calculadas pelo método exato é de $\Delta\bar{r}_a = 0{,}05773$, ou seja, cerca de 2,5% menor do que o valor médio aproximado acima.

Se obtivermos os valores médios dos termos da matriz $|R_c|$ e dos mesmos $\Delta\bar{r}_a$, encontraremos:

$$\bar{R}_{aa} = 0{,}055315 + 0{,}05921 = 0{,}11453$$

$$\bar{R}_{ab} = 0{,}05921.$$

Teremos:

$$\bar{R}_{11} = \bar{R}_{aa} - \bar{R}_{ab} = 0{,}05531 \quad [\text{ohm/km}]$$

$$\bar{R}_{oo} = \bar{R}_{aa} + 2\bar{R}_{ab} = 0{,}23295 \quad [\text{ohm/km}].$$

O erro obtido foi da ordem de 4,3% no valor da resistência de seqüência nula, que é perfeitamente aceitável, face às incertezas que acompanham os dados de entrada. A economia em tempo de computação é considerável, justificando seu emprego

6. Determinar as resistências de seqüências positiva e nula da linha descrita no Exerc. 5 do Cap. 8.

7. Determinar as resistências de seqüências positiva e nula da linha descrita no Exerc. 22 do Cap. 8, considerando:

a — cabos pára-raios aterrados;

b — cabos pára-raios isolados.

8. Escrever um programa em Fortran IV para calcular as resistências de seqüências positiva, negativa e nula das linhas de transmissão e testá-lo com as linhas mencionadas neste capítulo.

9.7 — BIBLIOGRAFIA

1 — Central Station Engineers — *Electrical Transmission and Distribution Reference Book*. Westinghouse, East Pittsburgh, 1950. 4.ª edição.

2 — Zaborsky, J. e Rittenhouse, J. H. — *Electric Power Transmission*. The Rensselaer Bookstores, Troy, Nova Iorque, 1969.

3 — Johnson, W. C. — *Transmission Lines and Networks*. McGraw-Hill Book Co., Nova Iorque, 1959.

4 — Stevenson, W. D. — *Elements of Power System Analysis*. McGraw-Hill Book Co., Nova Iorque, 1962.

5 — Lewis, W. A. e Tuttle, P. D. — *The Resistance and Reactance of Aluminum Conductors, Steel Reinforced*. AIEE Transactions, Nova Iorque, 1958. Vol. 77. Parte III. Págs. 1189 - 1215.

6 — Dubbel, H. T. — *Taschenbuch für den Maschinenbau*. Julius Springer-Verlag, Berlim, 1941. 8.ª edição.

7 — Knowlton, A. E. — *Standard Handbook for Electrical Engineers*. McGraw-Hill Book Co., Nova Iorque 1949. 8.ª edição.

8 — Wagner e Evans — *Symmetrical Components*. McGraw-Hill Book Co., Nova Iorque, 1933.

10

Condutância de Dispersão e Efeito Corona

10.1 — INTRODUÇÃO E CONCEITUAÇÃO

Além dos três parâmetros já examinados nos capítulos anteriores, ao analisarmos o funcionamento da linha, no Cap. 3, especificamos um quarto parâmetro, com características de admitância, representável nos modelos das linhas como elementos em derivação entre fase e neutro: a condutância g de dispersão, que deve representar aquelas perdas que são proporcionais à tensão das linhas.

Por definição:

$$g = \frac{\Delta p}{U^2} \cdot 10^{-3} \quad [\text{siemens/km}], \tag{10.1}$$

em que:

Δp — soma das perdas de energia, por dispersão, em uma fase da linha, em [kW/km];

U — tensão de serviço, entre fase e neutro, em [kV].

As perdas por dispersão englobam as perdas devidas ao efeito *Corona* e as perdas nos isoladores. As primeiras são uniformemente distribuídas ao longo das linhas. As perdas nos isoladores se concentram nos mesmos, porém, como a distância entre estruturas-suporte é pequena em comparação com o comprimento das linhas, também estas são consideradas uniformemente distribuídas.

10.2 — PERDAS NOS ISOLADORES

Através do material com que são fabricados os isoladores (porcelana ou vidro), como também ao longo de sua superfície, verifica-se o escape

de corrente em freqüência normal. Essas correntes provocam perdas de energia, e seu valor é função de uma série de fatores, merecendo destaque:

— qualidade do material do isolador;
— condições superficiais do isolador;
— geometria do isolador;
— freqüência da tensão aplicada;
— potencial a que são submetidos;
— condições meteorológicas etc.

Experiências realizadas na Inglaterra, onde foi construída uma linha experimental em 275 [kV], mostraram que essas perdas variam enormemente, indicando por unidade de isolador pendente:

com tempo bom	—	0,25 a 1,5 W/isolador;
sob chuvas fracas	—	2,5 W/isolador;
sob chuvas fortes	—	25 W/isolador.

No projeto EHV mediram-se perdas nos isoladores com tempo bom e sob chuva, encontrando-se, no primeiro caso, perdas inferiores a 1 W/isolador, e no segundo, em torno de 2 W/isolador [1]. Nessas condições, a previsão de perdas nos isoladores não é tão simples como pode parecer à primeira vista, dependendo, como no caso das perdas por *Corona*, do conhecimento das condições meteorológicas estatísticas da região percorrida, podendo mesmo variar ao longo de linhas mais ou menos curtas. Felizmente, são suficientemente pequenas para poderem ser desprezadas, na maioria dos casos.

10.3 — O EFEITO *CORONA*

A seleção dos condutores é uma das decisões mais importantes a serem tomadas pelo projetista das linhas de transmissão.

Nas linhas em médias e altas tensões, a escolha das secções dos condutores geralmente se baseia em um equacionamento econômico entre perdas por efeito Joule e os investimentos necessários, como o preconizava Lord Kelvin. Nas linhas em tensões extra-elevadas e nas futuras linhas em tensões ultra-elevadas, o controle das manifestações do efeito *Corona* pode ser o elemento dominante para orientar essa escolha.

As múltiplas manifestações do efeito *Corona* têm implicações diretas com a economia das empresas concessionárias e com o meio ambiente no qual as linhas de transmissão se encontram. Todas são importantes, e por isso mesmo devem merecer dos projetistas a devida atenção.

O efeito *Corona* aparece na superfície dos condutores de uma linha aérea de transmissão quando o valor do gradiente de potencial aí existente excede o valor do gradiente crítico disruptivo do ar. Mesmo em um campo elétrico uniforme, entre dois eletrodos planos paralelos no ar, uma série de condições controlam essa tensão disruptiva, tais como a pressão do ar, a presença do vapor d'água, o tipo de tensão aplicada e a fotoionização incidente. No campo não uniforme em torno de um condutor, a divergência do campo exerce influência adicional, e qualquer partícula contaminadora, como poeira, por exemplo, transforma-se em fonte punctual de descargas.

Descargas elétricas em gases são geralmente iniciadas por um campo elétrico que acelera elétrons livres aí existentes. Quando esses elétrons adquirem energia suficiente do campo elétrico, podem produzir novos elétrons por choque com outros átomos. É o processo de ionização por impacto. Durante a sua aceleração no campo elétrico, cada elétron livre colide com átomos de oxigênio, nitrogênio e outros gases presentes, perdendo, nessa colisão, parte de sua energia cinética. Ocasionalmente um elétron pode atingir um átomo com força suficiente, de forma a excitá-lo. Nessas condições, o átomo atingido passa a um estado de energia mais elevado. O estado orbital de um ou mais elétrons muda e o elétron que colidiu com o átomo perde parte de sua energia, para criar esse estado. Posteriormente, o átomo atingido pode reverter ao seu estado inicial, liberando o excesso de energia em forma de calor, luz, energia acústica e radiações eletromagnéticas. Um elétron pode igualmente colidir com um íon positivo, convertendo-o em átomo neutro. Esse processo, denominado recombinação, também libera excesso de energia.

Toda a energia liberada ou irradiada deve provir do campo elétrico da linha, portanto, do sistema alimentador, para o qual representa perda de energia, por conseguinte, prejuízo. Essas perdas e suas conseqüências econômicas têm sido objeto de pesquisas e estudos há mais de meio século; não obstante, só recentemente se alcançaram meios que permitem determinar, com razoável segurança, qual o desempenho que se poderá esperar para as diversas soluções possíveis para uma linha de transmissão, no que diz respeito a essas perdas. De um modo geral, elas se relacionam com a geometria dos condutores, tensões de operação, gradientes de potencial nas superfícies dos condutores e, principalmente, com as condições meteorológicas locais. Constatou-se, por exemplo, que as perdas por *Corona* em linhas em tensões extra-elevadas podem variar de alguns quilowatts por quilômetro até algumas centenas de quilowatts por quilômetro, sob condições adversas de chuva ou garoa. As perdas médias, como se verificou, podem constituir apenas pequena parte das perdas por efeito Joule, porém as perdas máximas podem ter influência significante nas demandas dos sistemas, pois a capacidade geradora para atender a essa demanda adicional deverá ser prevista ou a diferença de energia importada.

São significativos os valores obtidos em medições realizadas na Rússia [2] em linhas de 500 [kV]. Mediram-se perdas médias anuais da ordem de 12 [kW/km] de linha trifásica, com tempo bom, perdas máximas da ordem de 313 [kW/km] sob chuva e 374 [kW/km] sob garoa.

Tanto as perdas com tempo bom como aquelas sob chuva dependem dos gradientes de potencial na superfície dos condutores. As perdas sob chuva dependem não só do índice de precipitações, como também do número de gotículas d'água que conseguem aderir à superfície dos condutores. Esse número é maior nos condutores novos do que nos usados, nos quais

as gotas d'água aderem mais facilmente à geratriz inferior dos condutores, como foi verificado pelas equipes EHV e da E. de F. [1, 31, 33 e 34].

As linhas aéreas de transmissão de energia elétrica há muito têm sido consideradas como causadoras de impacto visual sobre o meio ambiente em que são construídas. Uma espécie de poluição visual que os conservadores, urbanistas e estetas há muito vêm combatendo. O advento da transmissão em tensões extra-elevadas e as perspectivas de transmissão em tensões ultra-elevadas enfatizaram dois outros tipos de perturbação do meio, provocados pelo efeito *Corona*, sendo-lhes atribuído também caráter de poluição: a radiointerferência (RI) e o ruído acústico (RA).

Descargas individuais de *Corona* provocam pulsos de tensão e corrente de curta duração que se propagam ao longo das linhas, resultando em campos eletromagnéticos em suas imediações. Essas descargas ocorrem durante ambos os semiciclos da tensão aplicada, porém aquelas que ocorrem durante os semiciclos positivos é que irradiam ruídos capazes de interferir na radiorrecepção nas faixas de freqüência das transmissões em amplitude modulada (AM), em particular nas faixas das ondas médias. Eflúvios de *Corona* também ocorrem em outros componentes das linhas, tais como ferragens e isoladores, porém a intensidade dos ruídos gerados é bastante inferior à dos gerados pelos condutores. Ferragens defeituosas, pinos e contrapinos mal-ajustados ou soltos podem igualmente gerar pulsos eletromagnéticos. Estes, no entanto, ocorrem nas faixas das freqüências de FM e TV, provocando interferência ou ruídos nas recepções de FM e TV (TVI) [4, 5].

A geração desses ruídos interfere com os direitos individuais dos moradores das vizinhanças das linhas de transmissão, uma vez que os ruídos se podem propagar além das faixas de servidão das linhas. Ainda não é possível projetar-se economicamente uma linha de transmissão aérea em tensões acima de 100 [kV] e que não produza radiointerferência [1]. Não obstante, critérios corretos e atenção aos aspectos relevantes do projeto podem produzir um sistema que resulte pelo menos em níveis aceitáveis de perturbação. O estudo do comportamento das linhas no que se refere à RI é bastante complicado em virtude dos inúmeros fatores que afetam seu comportamento, muitos dos quais ainda são indefinidos e nem mesmo completamente entendidos, de forma que os efeitos cumulativos são considerados em bases estatísticas.

Nos projetos de pesquisa sobre *Corona* em tensões extra e ultra-elevadas verificou-se, outrossim, que uma outra manifestação sua não mais poderia ser descurada nas linhas de 500 [kV] ou tensões mais elevadas, dado o caráter de poluição ambiental que apresenta. É a poluição acústica causada pelo ruído característico provocado pelos eflúvios do *Corona*. Esse aspecto também vem merecendo crescente atenção no dimensionamento das linhas, a fim de que o grau de perturbação seja mantido em níveis aceitáveis. Tais estudos mostraram que o ruído auditivo é função dos máximos gradientes de potencial na superfície dos condutores [5, 6 e 7].

Em vista do exposto, pode-se concluir que, para as linhas de transmissão em tensões extra e ultra-elevadas, o dimensionamento econômico das linhas está diretamente relacionado com a escolha do gradiente de potencial máximo admissível na superfície dos condutores das linhas de transmissão. Como veremos, gradientes para uma mesma classe de tensão somente são reduzidos mediante o emprego de condutores de diâmetros maiores, ou maior espaçamento entre fases, ou pelo emprego de condutores múltiplos, com número crescente de subcondutores, ou pela forma com que são distribuídos sobre o círculo tendo como centro o eixo do feixe.

Alternativamente, vêm sendo pesquisados outros métodos para a redução da radiointerferência e ruídos audíveis, como a colocação de espinas ao longo dos condutores ou o seu envolvimento em capas de Neoprene. A disposição dos subcondutores em forma de polígono irregular também vem sendo investigada como meio de reduzir os gradientes de potencial [9], e parece ser a forma mais promissora: é possível encontrar uma posição para cada subcondutor na periferia de um círculo, de forma que o gradiente em todos os subcondutores seja mínimo. O emprego dos condutores múltiplos assimétricos tem apresentado problemas de estabilidade mecânica sob ação do vento, e a melhor solução sob esse aspecto poderá conflitar com a melhor solução sob o aspecto de distribuição de gradientes de potencial.

10.3.1 — Formação dos Eflúvios de Corona

F. W. Peek [18] foi, sem dúvida, quem maior contribuição deu à Engenharia Elétrica no campo do *Corona* das linhas de transmissão. Trabalhando em laboratórios nas décadas de 1910 e 1930, com os poucos recursos da época, conseguiu estabelecer as bases para o correto dimensionamento dos condutores das linhas de transmissão, face ao fenômeno do *Corona*. Os resultados de seus trabalhos e suas conclusões continuam válidos, tendo sido confirmados mais recentemente, como se verifica pela literatura especializada.

Sabemos que o gradiente crítico disruptivo do ar atmosférico E_o é da ordem de 30,5 [kV/cm], em atmosfera-padrão de 20°C e pressão barométrica de 760 [mm] de Hg. Para a corrente alternada, o valor eficaz do gradiente disruptivo é igual a $E_o = 21{,}6$ [kV/cm].

Peek verificou experimentalmente que o fenômeno das descargas de *Corona* somente se inicia com valores de gradientes mais elevados nas superfícies dos condutores, quando também se iniciam as manifestações luminosas. A esse valor de gradiente denominou *gradiente crítico visual*. Um condutor atinge o gradiente crítico visual quando o gradiente crítico disruptivo é atingido a uma determinada distância da superfície do condutor, o que é necessário para que o campo acumule energia suficiente para desencadear o processo. Essa distância, que Peek denominou *distância de energia*, é igual a $0{,}301/\sqrt{r}$ [cm] em atmosfera-padrão.

De acordo com Peek, o gradiente crítico visual pode ser calculado por:

$$E_{CRV\text{máx}} = 30{,}5\left(1 + \frac{0{,}301}{\sqrt{r}}\right) \text{[kV/cm]} \tag{10.2}$$

ou em valores eficazes:

$$E_{CRV} = 21{,}6\left(1 + \frac{0{,}301}{\sqrt{r}}\right) \text{[kV/cm]}. \tag{10.2a}$$

Em sua pesquisa, Peek trabalhou com condutores de pequenos diâmetros, principalmente com superfícies lisas. Outros pesquisadores, entre os quais se destacaram W. O. Schumann e C. J. Miller Jr. [10,11], ampliaram o seu campo de observação, verificando que o valor de E_{CRV} depende muito mais das dimensões dos condutores do que a expressão (10.2) parece indicar. Essa variação pode ser verificada pelas expressões indicadas na tabela que se segue:

Tabela 10.1 — Valores Experimentais de E_{CRV} [10]

Diâmetros em polegadas	*Equação*	*Autor*
3,98 a 11,8	$48{,}42\left(1 + \frac{0{,}467}{\sqrt{r}}\right)$ kV/pol.	Schumann
0,788 a 3,93	$49{,}65\left(1 + \frac{0{,}406}{\sqrt{r}}\right)$ kV/pol.	Schumann
0,236 a 6,788	$52{,}95\left(1 + \frac{0{,}324}{\sqrt{d}}\right)$ kV/pol.	Schumann
0,0788 a 0,236	$56{,}30\left(1 + \frac{0{,}276}{\sqrt{d}}\right)$ kV/pol.	Schumann
0,25 a 1,24	$46{,}00\left(1 + \frac{0{,}48}{\sqrt{d}}\right)$ kV/pol.	Miller Jr.
1,48 a 2,23	$35{,}00\left(1 + \frac{0{,}97}{\sqrt{d}}\right)$ kV/pol.	Miller Jr.

As expressões devidas a Miller, para condutores de mesmos diâmetros, fornecem valores levemente menores para E_{CRV}. Havendo uma diferença de cerca de 35 anos entre as pesquisas (Schumann publicou seus resultados em 1923 e Miller em 1956/57), é de se supor que as expressões devidas a este último sejam mais reàis, uma vez que contou com recursos tecnológicos mais avançados para sua verificação. As expressões de Peek são, no entanto, ainda muito utilizadas, conforme se verifica pela literatura [31, 33, 34], também para condutores múltiplos, empregando-se um raio de um condutor cilíndrico equivalente em lugar do raio r.

Os diâmetros de condutores normalmente empregados em linhas de transmissão caem dentro da faixa de aplicação da primeira expressão de Miller (exceto condutores expandidos), que passada para o sistema métrico, se torna:

$$E_{CRV} = 18{,}11 \left(1+\frac{0{,}54187}{\sqrt{r}}\right) \text{ [kV/cm]}, \qquad (10.3)$$

a qual, para um mesmo diâmetro de condutor r [cm], fornece valores muito próximos daqueles encontrados pela expressão (10.2a) devida a Peek. Esta, para um condutor com $d = 2{,}54$ [cm], fornece um valor de E_{CRV} de 2,11% maior do que aquela.

Em seus trabalhos, Miller demonstrou que a expressão (10.3) é válida também para condutores múltiplos, desde que se faça a necessária correção. Esta consiste em se determinar o diâmetro de um condutor cilíndrico, que, colocado na posição do eixo do condutor múltiplo, possua em sua superfície o mesmo gradiente de potencial que os subcondutores daquele. Logo, poderemos generalizar:

$$E_{CRV} = 18{,}11 \left(1+\frac{0{,}54187}{\sqrt{r_{eq}}}\right) \text{ [kV/cm]}. \qquad (10.4)$$

A determinação de r_{eq} [cm] será feita no Item 10.5.2.1. r_{eq} é consideravelmente maior do que o diâmetro dos condutores singelos normalmente usados, reduzindo o valor de E_{CRV} para esse tipo de condutores. No entanto, o seu gradiente de potencial, para uma mesma tensão aplicada, como veremos, é muito menor, melhorando o desempenho das linhas. Peek verificou, e as experiências posteriores o comprovaram, que o valor E_{CRV} depende também da densidade do ar, sendo necessário introduzir um elemento de correção na expressão acima, que passará a ser escrita:

$$E_{CRV} = 18{,}1 \cdot \delta \left(1.\frac{0{,}54187}{\sqrt{r_{eq}\cdot\delta}}\right) \text{ [kV/cm]}, \qquad (10.5)$$

sendo δ a pressão atmosférica relativa:

$$\delta = \frac{0{,}386\, b}{273 + t},$$

na qual temos:

t — temperatura em [°C] — em geral, toma-se o valor da temperatura média anual;

$b = 760 - 0{,}086\ h$ [mm Hg], sendo h [m], sobre o nível do mar, a altitude média local;

logo,

$$\delta = \frac{0{,}386\,(760 - 0{,}086\, h)}{273 + t}. \qquad (10.6)$$

As expressões até agora apresentadas se aplicam a condutores cilíndricos de superfícies polidas e secas, em condições ideais. Tanto Miller como o próprio Peek estenderam um pouco mais a sua investigação, focalizando não só condutores reais em condições normais simuladas, como também verificando a influência das condições atmosféricas no valor do gradiente crítico visual, concluindo unanimemente pela validade das expressões conhecidas, desde que um outro fator corretivo, que denominaram *fator de superfície*, fosse incluído, ficando a expressão:

$$E_{CRV} = 18{,}1 \cdot m \cdot \delta \left[1+\frac{0{,}54187}{\sqrt{r_{eq}\cdot\delta}}\right] \text{ [kV/cm]}. \qquad \text{(Eq. 10.5}a\text{)}$$

Os valores do *fator de superfície* foram determinados tanto por Peek quanto por Miller. Dos trabalhos deste último obtivemos a seguinte tabela:

Tabela 10.2 — Fatores de Superfície, Segundo Miller [10, 11]

	Condições superficiais dos condutores	*Fatores de superfície* [m]
1	Condutores cilíndricos, polidos e secos	1,00
2	Cabos novos, secos, limpos e sem abrasão	0,92
3	Cabos de cobre expostos ao tempo em atmosfera limpa	0,82
4	Cabos de cobre expostos ao tempo em atmosfera agressiva	0,72
5	Cabos de alumínio novos, limpos e secos, com condições de superfícies decorrentes do grau de cuidado com que foram estendidos nas linhas (médias 0,60)	0,53 a 0,73
6	Cabos molhados, novos ou usados	0,16 a 0,25

Verifica-se, pelos valores contidos na tabela, que o E_{CRV} diminui muito com a presença de água sobre os cabos, cujas gotas representam pontos de concentração de potencial. Os valores mais baixos de m atribuídos aos cabos novos e secos decorrem do fato de que estes, em geral, além de apresentarem pequenas irregularidades superficiais (arranhões, farpas etc.), que a oxidação provocada pelo próprio *Corona* se encarrega de eliminar, com o tempo, possuem também óleo ou graxas em sua superfície, à qual aderem mais facilmente partículas de poeira orgânica e inorgânica, que representam fontes de eflúvios punctiformes.

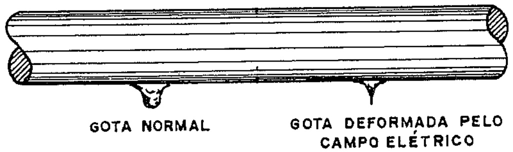


Fig. 10.1 — *Deformação de gotas d'água sob a ação do campo elétrico de um condutor* [1].

Nos cabos novos sujeitos à chuva, a água adere a toda a sua superfície em forma de gotículas, enquanto que, nos cabos usados, a tendência é se formarem gotas maiores ao longo de sua geratriz inferior, porém em menor número. As gotículas, em geral, são deformadas sob a ação do campo elétrico, formando pontas nas quais o gradiente se torna suficientemente elevado para produzir eflúvios punctiformes, causando todos os inconvenientes mencionados. O gradiente crítico visual decresce consideravelmente (Fig. 10.1).

10.4 — PREVISÃO DO DESEMPENHO DAS LINHAS QUANTO À FORMAÇÃO DE *CORONA*

Para que uma linha apresente um desempenho satisfatório face ao fenômeno do *Corona*, é necessário que o gradiente de potencial, na superfície dos condutores ou subcondutores, seja inferior ao valor do gradiente crítico visual dessa linha. Em outras palavras:

$$E < E_{CRV}. \tag{10.7}$$

Observações realizadas em linhas em operação mostraram que se pode esperar um desempenho razoável com valores de gradientes de potencial da ordem de 15 [kV/cm] [12, 13]. Publicações mais recentes [2], [35] indicam que se pode esperar desempenho satisfatório, seja no que diz respeito a perdas, seja quanto ao nível de intensidade de ruídos de radiointerferência com:

$$E < 17 \quad [\text{kV/cm}]. \tag{10.8}$$

Esse valor tem sido empregado em dimensionamentos preliminares para a escolha técnico-econômica de condutores de linhas (Cap. 11).

10.5 — GRADIENTES DE POTENCIAL NA SUPERFÍCIE DOS CONDUTORES

Consideremos inicialmente um condutor cilíndrico reto, de raio r [m], de grande comprimento, de forma que se possa examinar um pedaço de comprimento unitário sem que ele seja afetado por quaisquer efeitos das extremidades. Consideremo-lo igualmente longe de quaisquer outros condutores ou planos condutores. Esse condutor possui uma carga Q [coulomb/km] uniformemente distribuída sobre a sua superfície.

O seu campo elétrico pode ser visualizado, como mostra a Fig. 10.2, através das linhas de força que emanam normalmente de sua superfície e cujo número é proporcional a Q. Se considerarmos um cilindro concêntrico com o condutor, de espessura infinitesimal e a uma distância R [m] de seu centro, o mesmo número de linhas de força que emanam da superfície do condutor de raio r também atravessará o cilindro, distribuindo-se sobre sua superfície uniformemente.

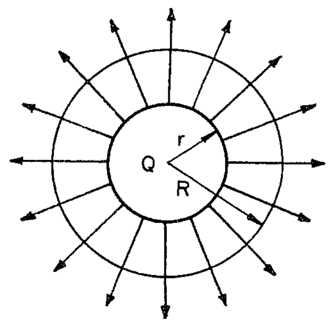


Fig. 10.2 — *Campo elétrico de um condutor cilíndrico no espaço.*

A densidade de fluxo na superfície do cilindro, se considerarmos um comprimento unitário deste, de acordo com a Eq. (8.1) será:

$$D_R = \frac{Q}{2\pi R} \quad [\text{C/m}^2]; \tag{10.9}$$

na superfície do próprio condutor:

$$D_r = \frac{Q}{2\pi r} \quad [\text{C/m}^2]. \tag{10.10}$$

Se lembrarmos que o gradiente de potencial se relaciona com a densidade de fluxo através da expressão:

$$E = \frac{D}{\epsilon} \quad [\mathrm{V/m}], \tag{10.11}$$

teremos os gradientes de potencial na superfície do condutor e do cilindro:

$$E_R = \frac{Q}{2\pi R \cdot \epsilon} \quad [\mathrm{V/m}] \tag{10.12}$$

e

$$E_r = \frac{Q}{2\pi r \cdot \epsilon} \quad [\mathrm{V/m}], \tag{10.13}$$

onde

ϵ — permissividade do meio, definida no Cap. 8 (Item 8.2).

Considerando-se a carga Q colocada sobre um filamento de raio desprezível, situado no eixo do condutor, a situação em nada se altera. O mesmo número de linhas de força atravessa as superfícies indicadas. O potencial em cada ponto de cada superfície é o mesmo, pois se trata de superfícies eqüipotenciais. Os gradientes de potencial são igualmente uniformes. A superfície de um condutor cilíndrico que possui cargas uniformemente distribuídas pode ser considerada como uma superfície eqüipotencial de uma carga linear de mesmo valor, colocada ao longo de seu eixo.

O valor do gradiente de potencial na superfície do condutor, se introduzirmos o valor de E na Eq. (10.13), será então:

$$E = 18 \cdot 10^6 \frac{Q}{r} \quad [\mathrm{V/m}]. \tag{10.14}$$

No cálculo dos gradientes de potencial em linhas, é usual exprimir E em [kV/cm] e Q em [coulomb/km], de forma que a expressão (10.14) é alterada para:

$$E = 18 \cdot 10^3 \frac{Q}{r} \quad [\mathrm{kV/cm}]. \tag{10.15a}$$

A presença de outros condutores ou superfícies nas proximidades do condutor considerado altera substancialmente a configuração do campo elétrico do condutor considerado, independentemente de possuírem cargas ou não. A Fig. 10.3 mostra o campo resultante entre dois condutores com cargas iguais e sinal oposto, com e sem a influência do solo.

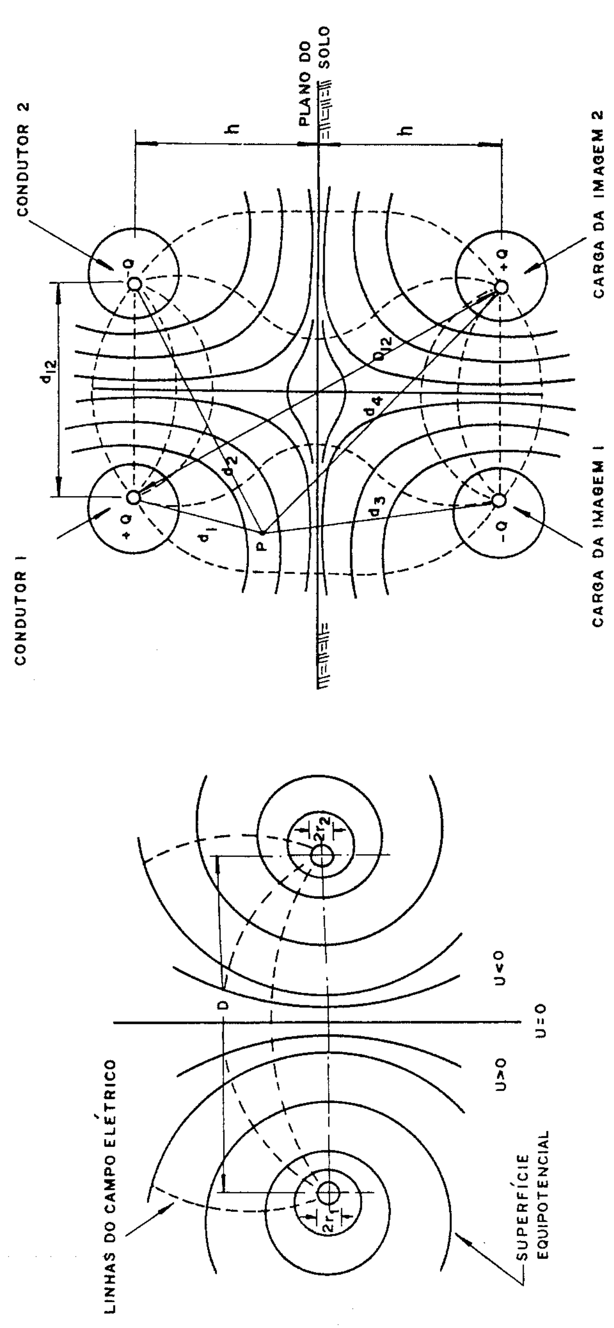


Fig. 10.3 — Campo elétrico de condutores paralelos com cargas de sinal oposto [11, 14].

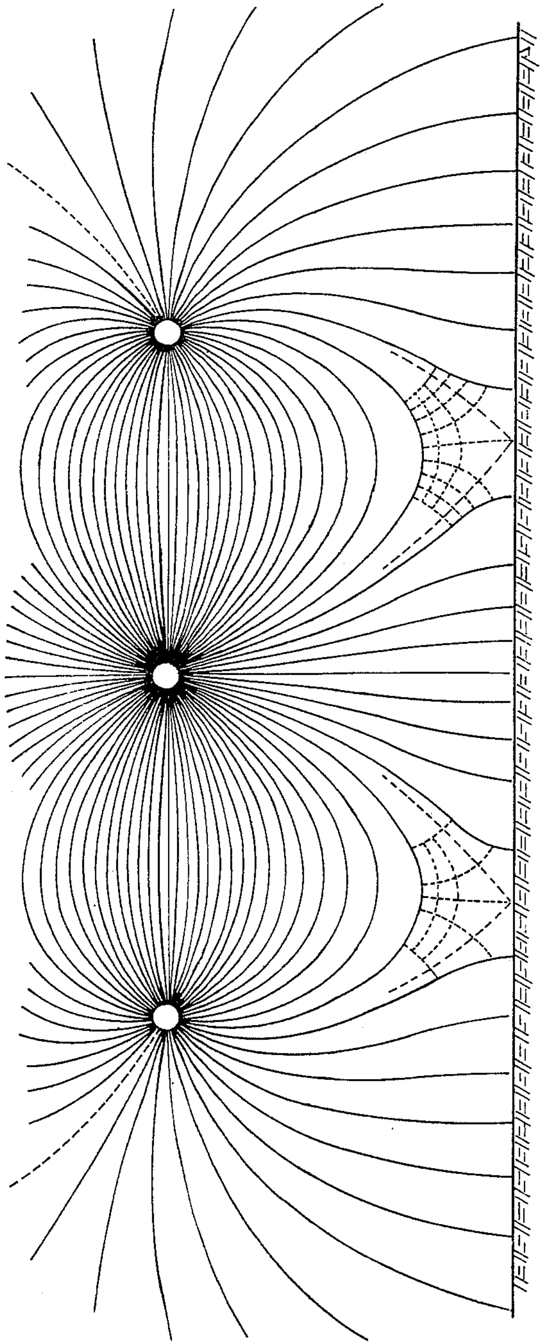


Fig. 10.4 — *Campo elétrico de uma linha trifásica [16].*

A Fig. 10.4 mostra o campo elétrico de uma linha trifásica com relação ao solo, quando a carga do condutor do meio é igual a Q e as cargas dos condutores laterais iguais a $-1/2\ Q$.

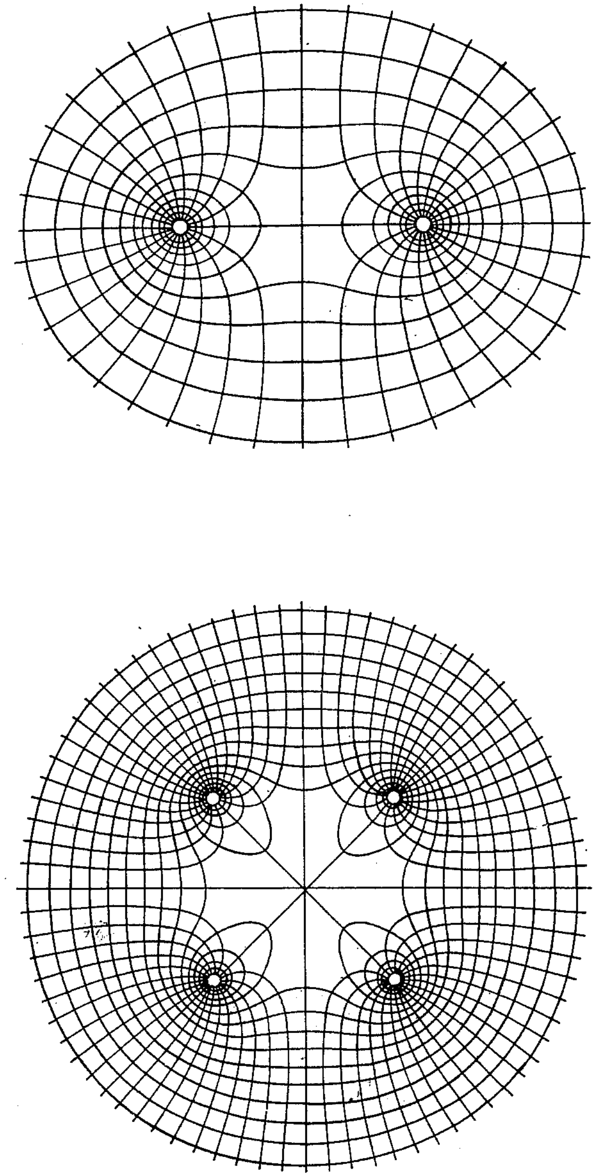
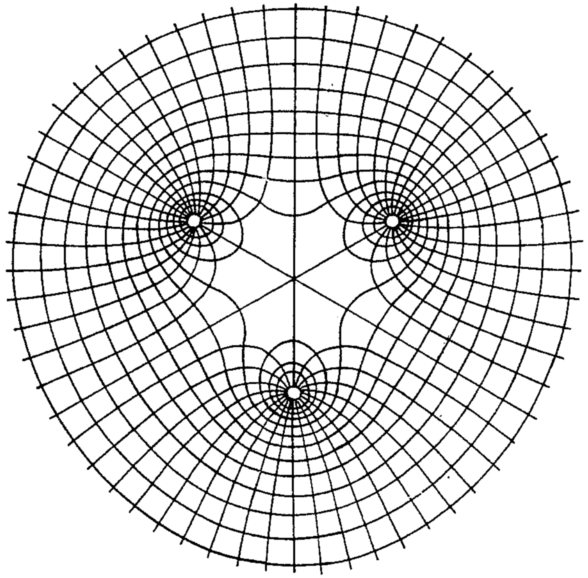


Fig. 10.5 — Continua



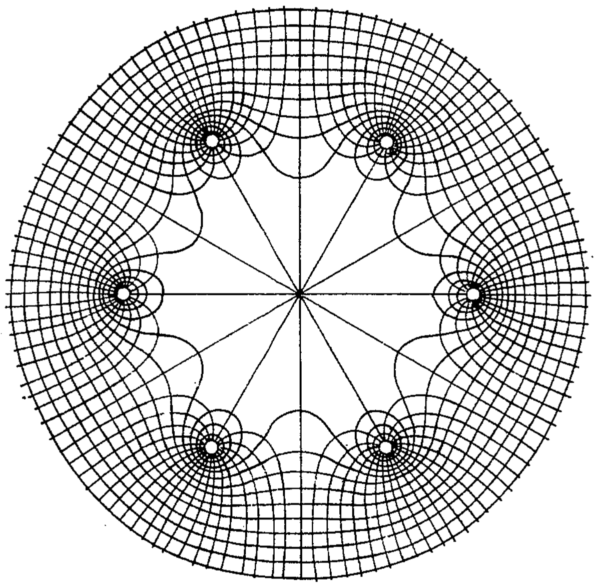


Fig. 10.5 — *Campos elétricos em torno de condutores múltiplos isolados* [15].

A Fig. 10.5 mostra os campos elétricos dos condutores múltiplos de 2, 3, 4 e 6 subcondutores, considerados isolados no espaço, de forma que as cargas em cada subcondutor possam ser consideradas iguais. Nesta última figura visualizam-se facilmente as regiões em cada subcondutor em que há maior gradiente. Imaginemos agora que, em lugar dos condutores cilíndricos da Fig. 10.4, aí colocássemos condutores múltiplos; os campos destes, sob a influência das cargas nas fases vizinhas e no solo, seriam inteiramente alterados, tanto em intensidade como também quanto à sua variação sobre a periferia de cada um dos subcondutores.

Para fins de cálculo, seja das perdas por *Corona*, seja do nível de radiointerferência ou do nível de ruído, devemos ter condições para calcular não só o chamado gradiente médio, que é obtido por equações do tipo da Eq. (10.15*a*), como também a sua variação em torno da periferia dos condutores e, principalmente, o seu valor *maximo-maximorum* com o qual alguns autores relacionam o efeito *Corona* e suas manifestações.

10.5.1 — Raio Equivalente de um Condutor Múltiplo

O raio equivalente de um condutor múltiplo pode ser definido como o raio de um condutor cilíndrico fictício que, se colocado com seu eixo longitudinal coincidindo com o do condutor múltiplo, apresentará o mesmo gradiente médio que aquele existente na superfície dos subcondutores.

Se Q é a carga total por quilômetro de um condutor múltiplo de n subcondutores de raio r [cm], cada subcondutor terá uma carga média igual a Q/n [coulomb/km]. Portanto, de acordo com a Eq. (10.15*a*), o valor do gradiente médio por subcondutor será:

$$E = \frac{Q}{2\pi\epsilon \cdot nr} \quad \text{[kV/cm]}. \qquad (10.15b)$$

Se r_{eq} é o raio de um condutor cilíndrico com a carga Q [coulomb/km], teremos:

$$E = \frac{Q}{2\pi\epsilon \cdot r_{eq}} \quad \text{[kV/cm]}. \qquad (10.15c)$$

Lembramos que $Q = CU$. Em linhas trifásicas transpostas, com condutores múltiplos:

$$C = \frac{2\pi\epsilon}{Ln \dfrac{D_m}{R_c}},$$

sendo:

D_m [m] — distância média geométrica entre fases;

R_c [m] — raio médio geométrico capacitivo do condutor múltiplo.

Para o condutor equivalente, valerá então:

$$C = \frac{1}{Ln \dfrac{D_m}{r_{eq}}}.$$

Introduzindo $Q = CU$ nas expressões correspondentes aos gradientes de potencial, obtém-se:

$$E = \frac{U}{nr\, Ln \dfrac{D_m}{R_c}} \tag{10.16}$$

e

$$E = \frac{U}{r_{eq}\, Ln \dfrac{D_m}{r_{eq}}}. \tag{10.17}$$

Como ambas devem representar o mesmo condutor múltiplo, podemos igualá-las para obter:

$$\frac{D_m}{r_{eq}} = \left(\frac{D_m}{R_c}\right)^{\dfrac{n \cdot r}{r_{eq}}} \tag{10.18}$$

que é uma equação transcendental que pode ser resolvida por tentativas.

O raio r_{eq} é usado nas equações de Miller para a determinação do gradiente crítico visual.

10.5.2 — Determinação dos Gradientes de Potencial nos Condutores das Linhas de Transmissão

Com o decorrer do tempo, surgiu um número razoável de métodos para o cálculo dos gradientes de potencial nas linhas de transmissão. Partindo de considerações teóricas mais ou menos exatas, todos buscam, no entanto, resolver um problema de Engenharia Aplicada, no qual a conveniência do uso de teorias e métodos mais exatos deve ser cuidadosamente avaliada com relação à exatidão dos elementos de projeto disponíveis. Em nada ajudarão métodos de cálculo altamente sofisticados, exigindo elaborações complicadíssimas e demoradas, se os imponderáveis de pro-

jeto forem de ordem tal a neutralizar qualquer esforço adicional. Nas linhas aéreas de transmissão, esse fato é particularmente verdadeiro. No caso específico do cálculo dos gradientes de potencial, diz Timascheff [16], com toda razão:

> "A precisão absoluta, em realidade, nunca pode ser obtida, pois os dados básicos e constantes nunca são conhecidos exatamente. O mais evidente a esse respeito é o conhecimento incerto da altura média da linha sobre o solo. O nível do lençol freático, na maioria dos casos desconhecido, e em geral variando de profundidade ao longo da linha, é que deveria ser tomado como a superfície eqüipotencial de potencial nulo. No entanto, aceita-se a superfície do solo como sendo uma superfície eqüipotencial de potencial nulo, o que não é verdadeiro."

A impossibilidade de determinar, com segurança razoável, o efeito do encordoamento dos cabos condutores sobre o valor dos gradientes de potencial compromete o grau de precisão. Prefere-se, em geral, considerar as superfícies dos condutores como sendo cilíndricas e lisas, a adotar quaisquer fatores corretivos e de efeito duvidoso, dado o grande campo de variação que podemos atribuir aos mesmos (ver discussão de Lewis na Referência 17).

Não havendo possibilidade de medir precisamente os gradientes de potencial nas superfícies dos condutores, os diferentes processos de cálculo somente poderão ser avaliados indiretamente. Dentro das limitações impostas pelos imponderáveis de projeto, é sempre possível determinar os valores dos gradientes de potencial nos condutores de uma linha com o emprego do método de cálculo tido como o mais exato dentre os existentes. Este, evidentemente, além de se basear nas considerações teóricas mais corretas, deve possibilitar a consideração do maior número possível de fatores que exercem influência, em maior ou menor grau, sobre os resultados.

Os valores dos gradientes de potencial assim obtidos poderão ser considerados *padrão* para a aferição dos demais métodos de cálculo. Tal método será, forçosamente, mais trabalhoso, demandando, portanto, maior tempo para preparação de dados e computação, podendo o custo de sua aplicação ser considerável. A introdução de simplificações, quer no que diz respeito às hipóteses teóricas, quer quanto ao número de elementos a considerar, poderá reduzir substancialmente esse custo, sem perda de sua finalidade, desde que as tolerâncias admitidas sejam observadas.

No estabelecimento dos valores das tolerâncias máximas admissíveis é que reside um dos problemas básicos de decisão em Engenharia. O presente caso não foge à regra. É necessário estabelecer um valor relativo para a divergência máxima admissível e, com esse critério, aceitar ou não os valores calculados por métodos menos exatos. A equipe do Projeto EHV, ao apresentar seu processo gráfico [1], houve por bem estabelecer uma divergência máxima da ordem de 0,6% com relação aos valores calculados por computador digital, por um processo considerado pela mesma como exato. Acreditamos que poderemos estender essa divergência ao valor de ± 1%, tomando como base os valores calculados pelo processo de *Sarma* e *Janischewskyj* [18], considerado *padrão* em virtude de ser aquele que se baseia nas considerações teóricas mais corretas e completas.

Um estudo comparativo dos métodos de cálculo da distribuição dos gradientes de potencial nas superfícies dos condutores múltiplos [20], no qual os valores calculados por Janischewskyj para uma linha de 735 [kV] foram tomados como padrão para aferição dos demais métodos, mostrou que, para as linhas nas tensões máximas atualmente em serviço, o método de cálculo simplificado que exporemos é perfeitamente aceitável, pois sua divergência com relação ao padrão é inferior ao limite de 1% estabelecido.

A Tab. 10.3 mostra os resultados obtidos; os métodos de cálculo constam na bibliografia apresentada no final do presente capítulo.

Tabela 10.3 — Valores dos Gradientes de Potencial Calculados por Diversos Métodos para uma Linha de 735 [kV] (Manicougan da Hidro-Quebec — Canadá) [20].

Método	*Gradientes máximos por condutor*	*Divergência*	*Referência bibliográfica*
	$kV_{máx}$/cm	%	
Sarma e Janischewskyj	24,35959	Padrão	16, 17, 18
Thanassoulis e Comsa			
a — Cargas iguais	24,49531	+ 0,558	21
b — Cargas desiguais	24,32851	− 0,1275	
King	24,47899	+ 0,4901	22
Mangoldt	24,19189	− 0,6884	2
Quilico	24,406	+ 0,190	13
Timasheff			
a — Analítico	24,28181	− 0,3193	1
b — Gráfico	24,33378	− 0,1095	
Projeto EHV (gráfico)	24,39261	+ 0,1356	1
Método Clássico	24,40530	+ 0,1876	1, 12, 13, 20

10.5.2.1 — Gradientes Médios em Linhas com Condutores Simples

Sejam *a*, *b* e *c* os condutores de uma linha trifásica simples, de raios r [cm], e r e s, de raios r_p [cm], seus cabos pára-raios. De acordo com a Eq. (10.13) podemos escrever:

$$[\dot{E}_i] = \frac{1}{2\pi\epsilon}\left[\frac{1}{r_i}\right][\dot{Q}_i] \quad [\text{V/cm}]. \tag{10.19}$$

No Cap. 8, vimos que:

$$[\dot{Q}_i] = [A]^{-1}[\dot{U}_i]. \tag{Eq. 8.20}$$

Portanto,

$$[\dot{E}_i] = \frac{1}{2\pi\epsilon}\left[\frac{1}{r_i}\right][A]^{-1}[\dot{U}_i] \quad [\text{kV/cm}], \tag{10.20}$$

em que:

$[\dot{E}_i]$ — vetor dos gradientes de potencial;

$\left[\frac{1}{r_i}\right]$ — matriz das recíprocas dos raios dos condutores , r_i [cm];

$[A]^{-1}$ — inversa da matriz dos coeficientes de potencial, como foi definida no Cap. 8;

$[\dot{U}_i]$ — vetor das diferenças de potencial entre condutores e solo em [kV].

A Eq. (10.19) pode ser escrita da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} \dot{E}_F \\ \hline \dot{E}_{PR} \end{bmatrix} = \frac{1}{2\pi\epsilon}\left[\begin{array}{c|c} \dfrac{A_F^*}{r_f} & \dfrac{A_{F\cdot PR}^*}{r_f} \\ \hline \dfrac{A_{PRF}^*}{r_{PR}} & \dfrac{A_{PR}^*}{r_{PR}} \end{array}\right]\begin{bmatrix} \dot{U}_F \\ \hline \dot{U}_{PR} \end{bmatrix} \tag{10.21}$$

Temos que considerar dois casos:

a — cabos pára-raios multiaterrados — neste caso, $[\dot{U}_{PR}] = 0$, pois estão no mesmo potencial que o solo, possuindo, no entanto, cargas $\dot{Q}_r$ e $\dot{Q}_s$ que aí chegam por condução. Em sua superfície haverá, por conseguinte, gradientes de potencial, que raramente chegam a preocupar [1]. Teremos, então:

$$[\dot{E}_F] = \frac{1}{2\pi\epsilon r_F} [A_F^*] \quad [\dot{U}_F] \quad [\text{kV/cm}] \tag{10.22a}$$

$$[\dot{E}_{PR}] = \frac{1}{2\pi\epsilon r_{PR}} [A_{PR \cdot F}^*] \quad [\dot{U}_F] \quad [\text{kV/cm}]. \tag{10.22b}$$

As matrizes $[A_F^*]$ e $[A_{PR}{}^*_F]$ são obtidas da partição da matriz $[A]^{-1}$, estando implícita nas mesmas a influência mútua entre condutores e pára-raios;

b — cabos pára-raios isolados — os gradientes nos cabos pára-raios serão nulos, pois não possuem cargas. Funcionam como divisores de potencial, ficando submetidos a diferenças de potencial $[\dot{U}_{PR}] \neq 0$ com relação ao solo. As condições de contorno para a Eq. (10.20*a*) são $[\dot{E}_{PR}]=0$, logo:

$$[E_F] = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left[\frac{1}{r_F}\right] \{[A_F^*] \quad [\dot{U}_F] + [A_F{}^*_{PR}] \quad [\dot{U}_{PR}]\}$$

$$[0] = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left[\frac{1}{r_{PR}}\right] \{[A_{PR}{}^*_F] \quad [\dot{U}_F] + [A_{PR}^*] \quad [\dot{U}_{PR}]\},$$

cuja solução simultânea nos dá:

$$[\dot{E}_F] = \frac{1}{2\pi\epsilon r_F} \{[A_F^*] - [A_F{}^*_{PR}] \quad [A_{PR}^*]^{-1} \, [A_{PR}{}^*_F]\} \cdot \cdot [\dot{U}_F] \quad [\text{kV/cm}]. \tag{10.23}$$

Nas matrizes $[A]$ e $[A]^{-1}$ os elementos próprios (da diagonal) são de ordem de grandeza bem superior a dos elementos mútuos (fora da diagonal), o que nos leva a concluir que, para efeito de cálculo dos gradientes, as cargas nos próprios condutores são predominantes. No instante em que estas são máximas, as dos condutores vizinhos são iguais à metade e de sinal oposto. Essa condição deve ficar evidente nos cálculos, o que fazemos definindo um vetor $U \cdot [\lambda_i]$, em substituição ao vetor $[\dot{U}_F]$ nas Eqs. (10.22) e (10.23):

a — gradientes quando $\dot{U}_a = \dot{U}_{\text{máx}}$:

$$[\lambda_a] = U \cdot \begin{bmatrix} +1 \\ -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} \end{bmatrix}; \tag{10.24a}$$

b — gradientes quando $\dot{U}_b = \dot{U}_{\text{máx}}$:

$$[\lambda_b] = U \cdot \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} \\ +1 \\ -\frac{1}{2} \end{bmatrix}; \tag{10.24b}$$

c — gradientes quando $\dot{U}_c = \dot{U}_{\text{máx}}$:

$$[\lambda_c] = U \cdot \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} \\ +1 \end{bmatrix}. \tag{10.24c}$$

Os gradientes assim determinados representam os gradientes produzidos por cargas consideradas concentradas em filamentos coincidentes com os eixos dos respectivos condutores. Representam, pois, valores médios por condutor. Pelas conhecidas técnicas das imagens [24], é possível obter em cada condutor o gradiente *maximo-maximorum* e sua direção, como aparece na Fig. 10.4. A divergência do campo, contudo, devido às grandes distâncias entre condutores e destes ao solo, se comparadas com os diâmetros dos condutores, é suficientemente pequena para poder ser desprezada.

Os valores calculados por intermédio da Eq. (10.23) são perfeitamente válidos e aceitáveis para as linhas com condutores simples.

10.5.2.2 — Gradientes Médios em Linhas com Condutores Múltiplos

As Eqs. (10.21), (10.22) e (10.23) poderão ser escritas para linhas com condutores múltiplos, permitindo a determinação dos gradientes médios individuais dos subcondutores. Este é, aliás, o ponto de partida para o processo de Sarma e Janischewskyj [18]. Por meio da técnica das imagens sucessivas, esses Autores determinam a posição da carga-imagem no interior de cada condutor, sob a influência das cargas de todos os demais e das cargas em todos os condutores-imagens. A matriz $[A]$, para a determinação das cargas médias em cada subcondutor de uma linha trifásica, com condutores com n subcondutores e p cabos pára-raios, é então da ordem $(3n + p)$. Assim, para a linha com quatro subcondutores, a matriz será de ordem 14×14, e, se for a circuito duplo, de 26×26, cujas inversões são demoradas, até mesmo em computadores digitais.

Resultados igualmente satisfatórios, pelo menos sob o ponto de vista da Engenharia Aplicada, serão obtidos se empregarmos nesses cálculos um condutor cilíndrico eletrostaticamente equivalente. Para tanto, utilizaremos nos termos da diagonal da matriz $[A]$ o raio médio geométrico eletrostático, como foi definido no Cap. 8, na Eq. (8.63). A ordem da matriz fica então reduzida, passando a ser igual ao número de condutores múltiplos, acrescido do número de cabos pára-raios. Os gradientes médios nos subcondutores poderão, então, ser determinados pelas equações:

a — pára-raios multiaterrados:

$$[E_F] = \frac{U}{2\pi\epsilon n r_F} \; [A_F^*] \; [\lambda_i] \; [\mathrm{kV/cm}] \qquad (10.25a)$$

$$[E_{PR}] = \frac{U}{2\pi\epsilon r_{PR}} \; [A_{PR \cdot F}^*] \; [\lambda_i] \; [\mathrm{kV/cm}]; \qquad (10.25b)$$

b — pára-raios isolados:

$$[E_F] = \frac{U}{2\pi\epsilon n r_F} \{[A_F^*] - [A_F{}^*_{PR}]\,[A_{PR}^*]^{-1}\,[A_{PR \cdot F}^*]\} \; [\lambda_i] \; [\mathrm{kV/cm}]. \qquad (10.26)$$

Dada a relativa proximidade das cargas em um mesmo condutor múltiplo, a divergência do campo nas suas proximidades é relativamente grande, conforme verificamos pela Fig. 10.5. Não obstante, é possível determinar um "coeficiente de irregularidade" [1, 13] que, se aplicado aos valores calculados pelas Eqs. (10.25), fornece valores válidos para a maioria das aplicações práticas. Um dos melhores métodos atuais para a determinação das perdas por *Corona* sob chuva baseia-se nos valores de gradientes médios [30, 31, 34] calculados da forma exposta.

10.5.2.3 — Determinação do Coeficiente de Irregularidade

Consideremos um condutor múltiplo de n subcondutores, distribuídos uniformemente sobre um círculo de raio R, sendo as distâncias entre subcondutores vizinhos iguais a s. Cada subcondutor possui uma carga $Q = Q/n$ (coulomb/km), sendo Q a carga total do condutor múltiplo. Q pode ser calculada, como vimos, pelos métodos expostos em 10.5.2.2. A Fig. 10.6*a* mostra o condutor múltiplo e sua configuração.

Consideremos, agora, o n-ésimo subcondutor isoladamente, como mostra a Fig. 10.6*b*, na própria posição que ocupa no feixe. O seu gradiente de potencial, uniformemente distribuído, será:

$$E'_n = 18 \cdot 10^3 \; \frac{2Q}{nd} \; [\mathrm{kV/cm}]. \qquad (10.27a)$$

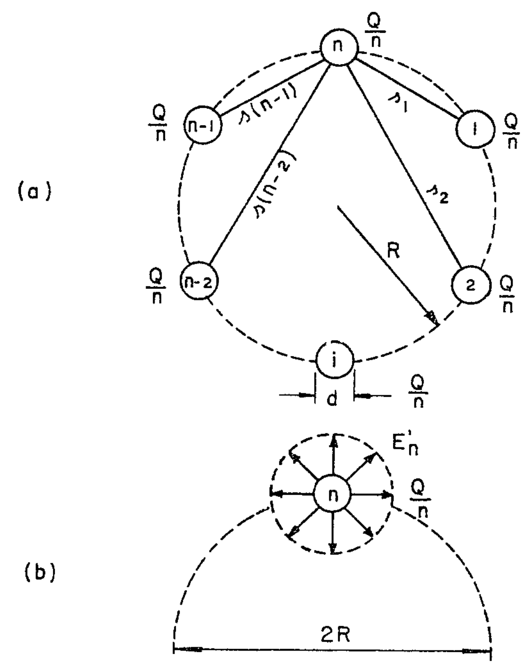


Fig. 10.6 — *Condutor múltiplo de n subcondutores.*

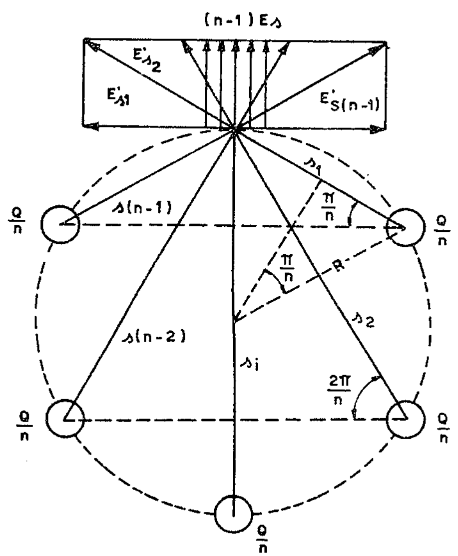


Fig. 10.7 — *Gradiente em 0 devido às cargas dos n — 1 subcondutores.*

Este gradiente tem, naturalmente, o mesmo módulo em todos os pontos da superfície do subcondutor, considerada cilíndrica e lisa.

Consideremos agora, como mostra a Fig. 10.7, o condutor múltiplo sem o subcondutor n, e calculemos o gradiente de potencial no ponto 0, por onde passava o eixo do subcondutor n.

Nessas condições, o subcondutor 1 produz em 0 um gradiente de potencial cujo valor é:

$$E'_{s1} = 18 \cdot 10^3 \frac{Q}{ns_1} \quad [\text{kV/cm}]. \qquad (10.27b)$$

Da mesma forma, o subcondutor genérico i produz em 0 o gradiente:

$$E'_{si} = 18 \cdot 10^3 \frac{Q}{ns_i} \quad [\text{kV/cm}] \qquad (10.27c)$$

e o último subcondutor:

$$E'_{s(n-1)} = 18 \cdot 10^3 \frac{Q}{ns_{(n-1)}} \quad [\text{kV/cm}]. \qquad [10.27(n-1)]$$

Cada um dos vetores pode ser decomposto em dois, um tangente ao círculo de raio r em 0 e outro normal à tangente. Por razões de simetria, as componentes tangenciais se anulam duas a duas, de modo que a resultante dos gradientes em 0 é igual à soma aritmética das componentes radiais. É também fácil de se concluir que as componentes radiais são todas iguais entre si, ou seja, teremos $(n-1)$ gradientes iguais a:

$$E_{si} = E'_{si} \operatorname{sen} \frac{\pi}{n} = 18 \cdot 10^3 \frac{Q}{ns_i} \operatorname{sen} \frac{\pi}{n} \quad [\text{kV/cm}]. \qquad (10.28)$$

A seguinte relação geométrica pode ser estabelecida (Fig. 10.7):

$$\frac{s_1}{\operatorname{sen} \frac{\pi}{n}} = \frac{s_2}{\operatorname{sen} \frac{2\pi}{n}} = \ldots = \frac{s_i}{\operatorname{sen} \frac{i\pi}{n}}. \qquad (10.29)$$

Da figura ainda obtemos:

$$\frac{s_1}{2} = R \operatorname{sen} \frac{\pi}{n},$$

donde

$$s_1 = 2R \operatorname{sen} \frac{\pi}{n}$$

ou

$$\frac{s_1}{\operatorname{sen} \frac{\pi}{n}} = 2R. \qquad (10.30)$$

Se designarmos como $s = s_i$ a distância entre dois subcondutores genéricos, teremos:

$$\frac{s_1}{\operatorname{sen} \frac{\pi}{n}} = \frac{s_i}{\operatorname{sen} \frac{i\pi}{n}} = \ldots = \frac{s}{\operatorname{sen} \frac{\pi}{n}} = 2R.$$

A Eq. (10.28) pode, então, ser escrita da seguinte forma:

$$E_{si} = 18 \cdot 10^3 \frac{Q}{n} \cdot \frac{\operatorname{sen} \frac{\pi}{n}}{s} \quad [\text{kV/cm}] \qquad (10.31)$$

ou

$$E_{si} = 18 \cdot 10^3 \frac{Q}{2nR} \quad [\text{kV/cm}], \qquad (10.32)$$

que é o valor da contribuição de cada subcondutor ao gradiente em 0. Portanto, o gradiente total será:

$$E_{so} = (n-1)\, E_{si} = 18 \cdot 10^3 \frac{n-1}{n} \frac{Q}{2R} \quad [\text{kV/cm}]. \qquad (10.33)$$

Consideremos agora o efeito que a introdução do subcondutor n no feixe terá sobre o gradiente em 0. Para tanto, consideremo-lo inicialmente descarregado. Sua simples presença muda a configuração do campo

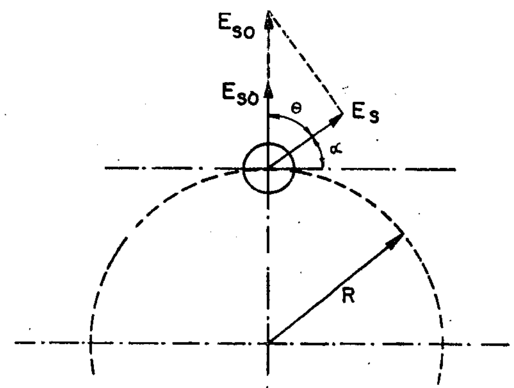


Fig. 10.8 — *Condutor sem carga em campo homogêneo.*

elétrico que aí existia antes de sua introdução. A teoria dos campos nos ensina que quando, em um campo homogêneo, é colocado um condutor cilíndrico retilíneo, desprovido de carga, em sua superfície aparece um gradiente E_s (como se verifica pela Fig. 10.8):

$$E_s = 2E_{so}\,\mathrm{sen}\alpha \tag{10.34a}$$

ou

$$E_s = 2E_{so}\cos\theta. \tag{10.34b}$$

Nessas condições, se na Eq. (10.34) substituirmos E_{so} pela Eq. (10.33), resultará:

$$E_s = 18 \cdot 10^3\,\frac{n-1}{n}\,\frac{Q}{R}\,\mathrm{sen}\alpha. \tag{10.35}$$

O valor médio dessa função, evidentemente, é nulo. O valor máximo do gradiente ocorre para $\mathrm{sen}\alpha = 1$, logo:

$$E_{s\text{máx}} = 2E_{so} = 18 \cdot 10^3\,\frac{(n-1)Q}{nR} \quad [\text{kV/cm}]. \tag{10.36}$$

Suponhamos, agora, que a carga Q/n seja colocada sobre o condutor n. O efeito da carga se sobrepõe ao efeito do campo (Eq. 10.26), de forma que podemos escrever:

$$E_n = E'_s + E_s = 18 \cdot 10^3\left[\frac{2Q}{nd} + \frac{(n-1)Q}{nR}\,\mathrm{sen}\alpha\right]$$

ou

$$E_n = 18 \cdot 10^3\,\frac{2Q}{nd}\left[1 + \frac{d(n-1)}{2R}\,\mathrm{sen}\alpha\right] \quad [\text{kV/cm}]. \tag{10.37}$$

Essa expressão permite calcular o gradiente de potencial em cada ponto na periferia do subcondutor n, em função do ângulo α.

O valor máximo do gradiente de potencial ocorre para $\mathrm{sen}\alpha = 1$, logo:

$$E_{n_{\text{máx}}} = 18 \cdot 10\,\frac{2Q}{nd}\left[1 + \frac{d(n-1)}{2R}\right] \quad [\text{kV/cm}]. \tag{10.38}$$

Essa equação é idêntica à atribuída na Referência [1] a Temoshok [17]. É também equivalente à equação apresentada por Timasheff em seu artigo (Referência 15).

Se compararmos esta última equação com a Eq. (10.26), verificaremos que elas diferem apenas pelo termo:

$$\left[1 + \frac{d(n-1)}{2R}\right]. \tag{10.39}$$

A expressão:

$$\frac{d(n-1)}{2R} = \delta \tag{10.40}$$

Dalla Verde [13] dá o nome de *coeficiente de irregularidade.*

A Eq. (10.38) também pode ser escrita:

$$E_{\text{máx}} = E_{\text{médio}}\,(1 + \delta). \tag{10.41}$$

As expressões para o cálculo dos gradientes máximos serão:

a — pára-raios multiaterrados:

$$[E_{F_{\text{máx}}}] = \frac{U(1+\delta)}{2\pi\epsilon n r_F}\,[A_F^*]\quad[\lambda_i]\quad[\text{kV/cm}]; \tag{10.42a}$$

b — pára-raios isolados:

$$[E_{F_{\text{máx}}}] = \frac{U(1+\delta)}{2\pi\epsilon n r_F}\,\{[A_F^*]-[A_{F\cdot PR}^*]\,[A_{PR}^*]^{-1}\,[A_{PR\cdot F}^*]\}\;[\lambda_i]\;[\text{kV/cm}]. \tag{10.42b}$$

10.5.3 — Métodos Gráficos para o Cálculo dos Gradientes de Potencial

São métodos para cálculos manuais de grande rapidez e eficiência, com grau de precisão compatível com as necessidades correntes. São úteis principalmente para estudos técnico-econômicos, visando à escolha mais adequada de condutores para uma linha. Dois desses métodos se destacam, pelo que passaremos a comentá-los rapidamente.

a — *Método do Caso-Base* [1] — Desenvolvido pela equipe do Projeto EHV, permite a determinação dos gradientes de potencial dos condutores das linhas em tensões extra-elevadas com grande rapidez e simplicidade. Baseia-se no fato de que nas linhas de mesmas classes de tensão existe uma certa semelhança geométrica e variação relativamente pequena de dimensões de uma para a outra. Nessas condições, foram escolhidos conjuntos de dimensões de linhas em tensões extra-elevadas com respeito a diâmetros dos condutores, espaçamento entre condutores e alturas dos condutores para determinadas classes de tensões (345, 500 ou 735 kV) e um número fixo de subcondutores por fase. O valor médio dos gradientes de potencial por condutor múltiplo foi determinado para, cada linha típica, por computação digital. Prepararam-se, em seguida, curvas para a obtenção de coeficientes de correção para compensar diferenças de diâmetro, espaçamento e alturas dos condutores com relação aos casos-base. Os gradientes de potencial são obtidos multiplicando-se os gradientes dos casos-base por esses coeficientes. Fatores para compensar, pela existência dos cabos pára-raios, foram igualmente determinados.

Os cálculos assim realizados apresentam erros máximos da ordem de 0,6%, para linhas cujas dimensões se afastam de cerca de 20% daquelas dos casos-base. O cálculo dos gradientes é, assim, transformado em uma simples operação de multiplicações. Suas principais limitações residem no fato de que existe um vínculo geométrico das linhas para as quais desejamos usar o método com formas e dimensões das linhas dos casos-base.

b — *Método de Timasheff* [16] — Apresenta curvas para o cálculo dos gradientes das linhas trifásicas com disposição horizontal dos condutores, simples e múltiplos, estes podendo possuir até 12 subcondutores. Muito simples de usar, é também rápido, com elevado grau de precisão (ver Tab. 10.2). Sua desvantagem principal reside no fato de ser aplicável a um tipo único de geometria de linha.

10.6 — ANÁLISE QUANTITATIVA DAS MANIFESTAÇÕES DO EFEITO CORONA

Conforme foi mencionado anteriormente, três das manifestações do efeito *Corona* apresentam maiores preocupações nos projetos das linhas de transmissão, as quais examinaremos a seguir:

a — radiointerferência;
b — ruídos auditivos;
c — perdas de energia.

As duas primeiras apresentam nítido caráter de poluição ambiental, atingindo, portanto, direitos líquidos e certos da população em geral. As perdas por *Corona* representam problemas econômicos. Em geral ocorrem simultaneamente, e se relacionam diretamente com o gradiente de potencial dos condutores.

10.6.1 — Radiointerferência

Descargas ou eflúvios punctuais nas superfícies dos condutores, causados por irregularidades ou partículas sólidas aderentes, provocam a formação de pulsos de correntes que se propagam ao longo das linhas, estabelecendo campos eletromagnéticos que se estendem lateralmente, e cuja presença é detectada por receptores de rádio de amplitude modulada, principalmente nas faixas de 500 a 1 600 kHz, ou seja, exatamente nas faixas reservadas às transmissões em ondas médias. Esses pulsos são gerados ao longo das linhas, ao acaso, e em um receptor se manifestam como um ruído do tipo conhecido por estática, podendo perturbar uma radiorrecepção que, sem a presença da linha, seria normal. Nos países em que a opinião pública é bem esclarecida sobre seus direitos, a radiointerferência provocada por linhas de transmissão tem dado origem a demandas judiciais de perdas e danos, sendo concessionárias condenadas a consideráveis indenizações aos prejudicados. Daí a grande preocupação de não só procurar entender melhor o fenômeno, como também encontrar meios de minimizar os seus efeitos, através de criterioso dimensionamento dos diâmetros dos condutores ou subcondutores, mantendo baixos os gradientes de potencial. O construtor, ao estender e tensionar os cabos, deverá, por outro lado, cuidar de que suas superfícies não sejam arranhadas para que não se criem pontos que favoreçam as descargas punctuais.

As pesquisas mostraram que os fatores que afetam a radiointerferência e que constituem as variáveis na maioria dos métodos divulgados são:

a — configuração ou distribuição espacial relativa aos condutores das linhas;

b — fator de superfície;
c — freqüência da energia irradiada;
d — resistividade do solo;
e — umidade relativa;
f — densidade relativa do ar;
g — velocidade do vento;
h — índice de precipitação (chuvas).

Há certa divergência quanto à importância de cada um dos fatores acima enumerados, porém unanimidade quanto à importância das condições nas superfícies dos condutores.

10.6.1.1 — Índices de Radiointerferência

A qualidade de uma recepção de rádio depende tanto da intensidade do sinal da emissora quanto da intensidade do ruído nas freqüências auditivas nas saídas dos receptores. Um radiorreceptor detecta e amplifica tanto o sinal quanto a interferência, e uma transmissão cujo sinal é forte com relação ao ruído pode ser apreciada confortavelmente, enquanto que uma transmissão fraca, relativamente à intensidade do ruído, pode ser extremamente desagradável. A maioria dos receptores de rádio possuem o controle automático de volume (CAV), que ajusta o volume de saída no receptor a um nível agradável, para cada ajuste manual de volume. Assim, quando se sintoniza uma transmissora de sinal forte, o ruído será menos evidente porque o CAV reduz a saída, e assim também o nível de ruído que o ouvinte percebe.

Assim, para um determinado nível de ruído, a interferência poderá ser ou não evidente, dependendo do efeito combinado da relação sinal/ruído e do CAV do receptor. A intensidade dos sinais é dependente da cobertura da trasmissora.

Devem ser distinguidos dois tipos de ruídos:

— *ruído ambiental* — existe independentemente da existência de linhas de transmissão. Pode ser natural, como aquele produzido por atividade atmosférica e radiações solares, e pode também ser artificial, produzido pelo homem, como, por exemplo, aquele devido à ignição de automóveis ou luminosos a gás néon etc.;

— *ruído devido às linhas de transmissão* — só será detectado após a construção e energização de uma linha em determinada região. Seu espectro predomina, como foi dito, na faixa de 500 a 1 600 kHz, diminuindo rapidamente nas outras freqüências.

Em estudos da radiointerferência, a unidade de medida de sinais ou de interferências é o decibel (dB), definido como:

$$\text{dB} = 20 \log \frac{V_1}{V_2}, \tag{10.43}$$

em que:

V_1 [μV/m] — intensidade de campo do sinal (ou da interferência);

V_2 [μV/m] — unidade de referência, em geral igual a 1 [μV/m].

Lê-se, portanto, "dB acima de 1 [μV/m]". Medidores de intensidade de campo, ou de radiointerferência, vêm calibrados para fornecer valores ou em [μV/m] ou diretamente em dB. Empregam-se atualmente dois padrões de medidas de sinais de ruído: o padrão ANSI (*American National Standards Institute*) e o padrão CISPR (*Comité International Spécial des Perturbations Radiophoniques*). Nos dois casos usa-se equipamento com especificações diferentes (ver Referência 4).

Existe a seguinte relação entre níveis medidos pelos dois métodos:

$$\text{n.}^\circ \text{ dB (ANSI)} = \text{n.}^\circ \text{ dB (CISPR)} - 3\text{dB}. \tag{10.44}$$

Assim, admitamos que, em um determinado ponto ao longo de uma linha, tenhamos medido o sinal de uma emissora e encontrado V_s[μV/m]. Admitamos também, que, no mesmo ponto, o nível de ruído tenha sido V_R[μV/m]. Teremos:

$$S(\text{dB}) = 20 \log \frac{V_s}{1};$$

$$R(\text{dB}) = 20 \log \frac{V_R}{1};$$

a relação sinal/ruído:

$$S/R(\text{dB}) = 20 \log \left(\frac{V_s/V_R}{1}\right) = 20 \log \frac{V_s}{1} - 20 \log \frac{V_R}{1}$$

ou

$$S/R(\text{dB}) = S(\text{dB}) - R(\text{dB}). \tag{10.45}$$

A Tab. (10.4) fornece alguns esclarecimentos a respeito da qualidade de recepção em função da relação sinal/ruído, geralmente aceitos.

Conhecido, portanto, em um ponto ao longo da linha, o nível de um sinal de um transmissor antes da entrada em serviço da linha, pode-se determinar a relação sinal/ruído que a linha irá provocar. O nível do sinal poderá ser medido ou determinado através dos diagramas radiantes das emissoras, devendo-se ter sempre em mente a natureza estatística

desses valores, pois os sinais estão sujeitos a variações sazonais de intensidade, como também sofrem influência das condições atmosféricas.

Tabela 10.4 — Qualidade de Recepção em Função da Relação Sinal/Ruído

Relação sinal/ruído (dB)	*Qualidade de recepção*	*Classe de recepção*
32	Inteiramente satisfatória	*A*
27 a 32	Muito boa, fundo não obstrutivo	*B*
22 a 27	Razoavelmente boa, fundo bem evidente	*C*
16 a 22	Fundo muito evidente ,voz humana facilmente inteligível	*D*
6 a 16	Voz humana inteligível, somente com intensa concentração	*E*
7	Voz humana inintelígível	*F*

10.6.1.2 — Predeterminação do Nível de Ruídos Causados por Linhas de Transmissão

Estudos empreendidos em um número relativamente grande de instalações de pesquisas sobre transmissão em tensões extra e ultra-elevadas conduziram ao estabelecimento de métodos de cálculo e fórmulas para a predeterminação de níveis de ruído de radiointerferência provocados por linhas de transmissão. Essas fórmulas relacionam o nível de ruídos de radiointerferência com os parâmetros das linhas, com os gradientes de potencial nas superfícies dos condutores, seus raios e o número de condutores por condutor múltiplo, isto é, em geral em termos das dimensões das linhas. Essas fórmulas, no entanto, não explicam inteiramente as diferenças entre valores de ruídos medidos em diferentes linhas, nem as substanciais flutuações de nível de ruído obtidas em uma linha no decorrer do tempo. Verificou-se, de fato, que o nível de ruídos de uma linha é basicamente instável e extremamente sensível ao estado da superfície dos condutores. Mesmo com tempo bom, observaram-se flutuações da ordem de 12 [dB]. Isso significa que a intensidade de campo (μV/m) pode variar de um fator de 4, sem que seja possível, pelo menos até o momento, controlar as causas desse fenômeno. Assim sendo, o campo de ruídos de uma linha pode ser definido apenas em termos estatísticos, como, por exemplo, através de seu valor mais provável, por seu desvio-padrão ou através da curva de freqüências acumuladas [4].

Reconhecendo esse fato e visando ao estabelecimento de leis estatísticas válidas, achou-se conveniente fazer uma análise dos níveis de ruídos de um número elevado de linhas, em âmbito mundial. Foi, assim, possível obter dados relativos a 75 linhas importantes, dos mais diversos tipos e com tensões acima de 220 [kV], situadas em regiões de climas diferentes.

Esse trabalho, empreendido em conjunto pelo IEEE e CIGRÉ, foi iniciado em 1968 e suas conclusões foram publicadas em junho de 1972 [4]. Os resultados obtidos nas medições foram corrigidos e normalizados a fim de permitir sua interpretação e análise estatística.

Uma segunda etapa consistia em comparar os resultados obtidos por medição com aqueles obtidos através dos vários processos de cálculo para sua predeterminação [5]. Nesse trabalho compararam-se os resultados calculados através de 10 processos de cálculo desenvolvidos por outros tantos grupos de pesquisas de diversos países. Esses métodos, de um modo geral, são empíricos ou semi-empíricos e permitem o cálculo de desempenho das diversas linhas de transmissão no que diz respeito a RI a partir de seus parâmetros de projeto e das tensões de operação. Em todos esses métodos, o nível de ruídos (NR) gerado nas linhas, que é uma função do gradiente superficial e dos raios dos condutores, é determinado experimentalmente. A partir desse ponto é que os métodos podem ser diferenciados em dois grandes grupos, que o *Comitê IEEE-CIGRÉ* convencionou designar analíticos e comparativos.

Nos métodos analíticos, uma grandeza característica da geração de NR é determinada em gaiolas de ensaios denominada *função de excitação*. Ela é medida em instalações monofásicas para diferentes arranjos de condutores, com condições de superfície conhecidas. Empregando-se então os valores assim medidos, pode-se calcular a totalidade das correntes de ruídos na linha e os campos resultantes em sua vizinhança.

Os métodos comparativos empregam como valor de referência um valor bem definido da intensidade de campo do NR, medido em linhas experimentais. A fim de se predeterminar o desempenho de linhas de projetos diversos, vários fatores de correção para a geração de *Corona*, freqüências de medição e de distâncias laterais são feitos de acordo com cuidadosos estudos de todas as variáveis envolvidas.

Independentemente do método utilizado, deve-se conhecer a distribuição estatística do NR do tipo obtido de uma estação registradora de NR durante um ano, a fim de se poder descrever, completamente, o desempenho de uma futura linha.

a — Métodos Analíticos — Foram analisados dois métodos chamados analíticos, um desenvolvido pelo grupo do Projeto EHV [1] e outro desenvolvido pelo grupo da EdeF (*Electricité de France*). Ambos se baseiam em ensaios relativamente simples e desenvolvimentos analíticos bastante complexos.

Os dois métodos empregam a *função de excitação* determinada em ensaios em gaiolas de teste. Verificou-se que, sob chuvas pesadas, o NR gerado por um condutor ou um feixe de condutores, sob um determinado gradiente de potencial, é constante e reprodutível (o que não ocorre com tempo bom, quando predominam as condições superficiais dos condutores). Sob essas condições, as funções de excitação para um grande número de condutores múltiplos, das mais variadas configurações, puderam ser determinadas em função de seus gradientes superficiais e publicadas em forma

de curvas. Essas curvas permitem, pois, determinar a função de excitação das linhas em termos dos raios, números de subcondutores e de gradientes de potencial na faixa de interesse.

Determinada a função de excitação e empregando a matriz das capacitâncias da linha, podem-se determinar as correntes de ruído injetadas na linha, por unidade de comprimento de linha. Empregando-se a Teoria de Análise Modal [19] para linhas polifásicas, determinam-se as correntes modais através de uma secção transversal da linha, considerando-se nos cálculos a atenuação e os acoplamentos mútuos entre fases. Com essas correntes, as correntes e tensões de ruído são determinadas, para essa mesma secção genérica, por integração ao longo de toda a linha. Conhecidas as tensões e correntes geradoras de ruídos nas várias fases, possível determinar os campos correspondentes nas imediações das linhas, sob chuva intensa.

Com tempo bom, ou seja, na ausência de água acumulada nos condutores, verificou-se que os níveis de ruídos medidos nas mesmas instalações de ensaio não são reprodutíveis, como no caso anterior, apresentando dispersões da ordem de 6 [dB]. Isso se deve ao fato de que as condições atmosféricas, especialmente as condições nas superfícies dos condutores, exercem muito maior influência do que a chuva Em face da grande dispersão dos valores medidos, emprega-se um fator de correção constante para determinar o nível de ruído gerado em tempo bom. A equipe do Projeto EHV propõe uma redução de 20 [dB] do valor calculado sob chuva, e a da EdeF 17 [dB], que pode sofrer correções adicionais quanto à estação do ano, poluição etc.

A vantagem desses métodos é que são gerais e qualquer configuração de condutores múltiplos ou de linhas pode ser analisado. Seu uso, no entanto, requer a determinação da função de excitação em gaiolas e o emprego de programas bastante complexos em computadores digitais.

Para trabalhos correntes de análise de desempenho de linhas, o levantamento realizado pelo grupo IEEE-CIGRÉ mostra que o grau de precisão com relação aos valores medidos não é muito maior que os métodos comparativos, mais simples de serem aplicados.

b — Métodos Comparativos — De um modo geral, outros grupos de pesquisa desenvolveram métodos empíricos relativamente simples ao invés de técnicas altamente teóricas, pelo simples fato de que o nível de ruídos gerado pelas linhas depende grandemente das condições superficiais dos condutores, que não podem ser calculadas. O grupo de trabalho IEEE-CIGRÉ examinou 8 desses métodos e concluiu que eles apresentam aproximadamente os mesmos desvios com relação aos valores medidos e os resultados obtidos também diferem muito pouco daqueles fornecidos pelos métodos analíticos.

Os métodos comparativos são, portanto, perfeitamente válidos para estudos de radiointerferência em linhas novas, podendo o projetista optar por aquele que melhor se adapta ao seu caso.

A equação característica básica para todos os métodos comparativos pode ser expressa como [5]:

$$E = E_o + E_q + E_d + E_n + E_D + E_f + E_{FW}, \qquad (10.46)$$

na qual:

- E — em dB/1 μV/m — nível de ruído de RI calculado (normas ANSI);
- E_o — valor de ruído bem definido;
- E_q — fator de correção pela variação de gradiente;
- E_d — fator de correção por diâmetro de condutor;
- E_n — fator de correção pela variação do número de subcondutores;
- E_D — fator de correção pela variação da distância do condutor ao ponto de observação;
- E_f — fator de correção para efeito de variação da freqüência do ruído;
- E_{FW} — fator de correção para condições atmosféricas adversas.

No presente capítulo transcreveremos apenas um dos métodos comparativos e comentaremos um segundo, sugerindo ao leitor os artigos referidos na Bibliografia [4, 5] para outras informações.

a — Método 400 kV FG — Alemanha — É baseado em uma equação desenvolvida nas pesquisas realizadas na Alemanha, em instalações de 400 [kV], complementadas por considerações de natureza teórica. Sua aplicabilidade foi verificada para linhas das tensões nominais de 230, 275, 330, 400, 500 e 750 [kV].

Baseia-se no emprego de um valor de referência, com tempo bom, obtido por meio de medições estatísticas bem definidas em linhas de ensaio e em linhas em operação (valores de 50% de probabilidade) e pela aplicação de fatores de correção de acordo com a variação de parâmetros e da tensão da operação.

A equação completa, em termos ANSI, é a seguinte:

$$E = 53{,}7 \pm 5 + K(g_m - 16{,}95) + 40 \log \frac{d}{3{,}93} + E_n +$$

$$+ 20\, K_D \log \frac{20}{D} + E_f + E_{FW} \ [\text{dB}/1\mu\text{V/m}], \qquad (10.47)$$

sendo:

- K = 3 para linhas da classe de 750 [kV];
- K = 3,5 para outras linhas, com limites de gradientes entre 15 e 19 $[\text{kV/cm}]_{ef}$;
- E_n = −4dB para condutor simples;
- $E_n = 10 \log \frac{n}{4}$, para $n > 1$;

- K_D = 1,6 ± 0,1 para a faixa de freqüência de 0,5 a 1,6 [MHz];
- E_{FW} = 0 = para tempo bom;
- E_{FW} = 17 ± 3, para chuva;
- g_m = gradiente máximo em $[\text{kV}_{ef}/\text{cm}]$;
- d = diâmetro dos subcondutores em [cm];
- D = distância radial do condutor à antena de medição em [m];
- n = número de subcondutores por feixe.

O valor de $E_o = 53{,}7 \pm 5$ foi determinado para uma linha a uma distância $D_o = 20$ [m], com $n_o = 4$ subcondutores de diâmetro $d_o = 3{,}93$ [cm], com um gradiente máximo de $g_o = 16{,}95$ $[\text{kV}_{ef}/\text{cm}]$.

Trata-se de um método monofásico que calcula a intensidade de campo de ruído devido à fase que maior contribuição dá. Nessas condições, $E_{\text{linha}} = E_{\text{máx}}$, se $E_{\text{máx}}$ for pelo menos 3 [dB] mais elevado em um ponto do que o campo devido à outra fase de nível igualmente elevado no mesmo ponto. Se a diferença entre os dois valores mais elevados for menor do que 3 [dB], o nível de ruído no ponto considerado será:

$$E_{\text{linha}} = \frac{E_1 + E_2}{2} + 1{,}5. \qquad (10.48)$$

A fim de se levantar o perfil transversal dos níveis de ruídos de uma linha, basta variar, na Eq. (10.47), o valor de D e obter os diversos valores de E_i em cada um dos pontos correspondentes aos valores das distâncias radiais D_i [m] do condutor com $E_{\text{máx}}$.

b — Método "Caso-Base" da equipe Projeto EHV — É minuciosamente descrito no Cap. 5 da referência [1]. Os casos-base são constituídos, como no caso do cálculo dos gradientes de potencial, por linhas típicas de 330, 500 e 735 [kV], inclusive linha de 345 [kV] a circuito duplo, com número diverso de subcondutores por fase. Os valores médios de nível de ruídos são dados para cada um dos casos-base em condições de tempo bom. Apresentam-se fatores de correção, em forma de curvas, para os parâmetros que influenciam os resultados. Há limites para variações desses parâmetros. Os níveis de ruído para os casos-base foram calculados pelo método analítico da mesma equipe. Aplicam-se fatores de correção para cada um dos seguintes elementos: tensão, diâmetros dos condutores, espaçamentos entre fases, freqüências de medição, condutividade do solo, unidade relativa, altura dos condutores, distância lateral, fator de superfície, densidade relativa do ar, velocidade do vento e índice de chuvas.

O nível de ruídos assim determinado, por si, não dá indicações quanto à intensidade da radiointerferência a ser esperada, pois esta depende da relação sinal/ruído. É igualmente difícil estabelecer o valor máximo do nível de ruídos aceitável, pois um valor em regiões de sinal forte pode ser tolerado, enquanto que esse mesmo nível em outras regiões, como, por exemplo, na zona rural, distante de emissoras, será intolerável.

Têm sido aceitos níveis de ruídos da ordem de 50 a 60 [dB], calculados nos limites das faixas de servidão das respectivas linhas.

10.6.2 — Ruídos Acústicos

Um elevado número de pesquisas foi e continua sendo realizado com relação às influências patológicas que os ruídos da sociedade moderna exercem sobre a humanidade. Dada sua influência nociva sobre o bem-estar e mesmo sobre o seu comportamento, qualquer nova forma de ruídos deve ser combatida.

Até o advento das linhas de transmissão em 500 [kV], as maiores fontes de ruídos nos sistemas elétricos eram constituídas pelos transformadores e subestações. As linhas pouco ou nada contribuíam. No entanto, tudo indica que os níveis de ruído gerados em linhas de 500 e 750 [kV] e nas futuras linhas em tensões ultra-elevadas podem tornar-se parâmetros limitantes em seus projetos.

Lembremos da Física alguns conceitos básicos sobre ruídos acústicos. O ouvido humano é sensível aos deslocamentos do ar produzidos pelas ondas acústicas que se manifestam sobre o tímpano em forma de pressão. Sua sensibilidade vai de valores mínimos de pressão — cerca de 0,0002 bar (1 bar = $1{,}01972 \cdot 10^{-3}$ kg/cm²) na faixa de freqüências da ordem de 4 000 [Hz] — até cerca de 1 000 bar, nas freqüências abaixo de 30 [Hz] e acima de 15 000 [Hz], quando são provocadas sensações dolorosas [32].

Na prática, os ruídos são medidos através dos chamados *níveis de intensidade sonora*, sendo esta "a potência média transportada por uma onda sonora por unidade de área" [33]. Uma onda de 0,0002 [bar] possui uma intensidade sonora de 10^{-16} [watt/cm²] e uma onda de 1 000 [bar], $5 \cdot 10^{-6}$ [watt/cm²]. Dada essa variação muito ampla, uma escala logarítmica foi considerada conveniente para a medida dos níveis de intensidade sonora, que são definidos por:

$$\text{NIS} = 10 \log \frac{I}{I_o} \text{ [decibel]}, \tag{10.49}$$

em que I [W/cm²] é a intensidade do ruído medido e I_o [W/cm²] um valor arbitrário, geralmente considerado igual ao limiar inferior de sensibilidade, ou seja, 10^{-16} [W/s]. Daí ser comum definir o NIS como "decibel acima de 0,0002 [bar]".

A Tab. 10.5 fornece alguns valores representativos de NIS de vários tipos de ruídos.

Os níveis de intensidade sonora são medidos por microfones especiais orientados para as fontes de ruídos, acoplados a medidores de pressão sonora, ou diretamente por aparelhos já calibrados em "dB acima de 0,0002 [bar]".

Tabela 10.5 — Níveis Representativos de Intensidade Sonora

Fonte de Ruído ou Descrição do Ruído	*NIS em* dB
1 — Limiar da sensação dolorosa	120
2 — Marteletes ou rebitadores pneumáticos	95
3 — Passagem de trem elétrico	90
4 — Interior de carros-esporte	84
5 — Ruas de tráfego intenso	70
6 — Conversação normal	65
7 — Escritórios normais	50 a 60
8 — Sala quieta	25 a 30
9 — Murmúrio comum	20
10 — Farfalhar de folhagens	10

Nos Estados Unidos, empresas esperam reclamações bastante freqüentes quando o NIS a 30 [m] do eixo das linhas é maior do que 58 [db], sendo menos freqüentes entre 52 e 58 [db], e quase inexistentes abaixo de 52 [db]; isso depende, evidentemente, do nível de ruídos de fundo existente no local. Um determinado nível de ruído é mais facilmente aceitável sob chuvas intensas do que sob garoa, ou mesmo neblina.

O ruído auditivo nas linhas ocorre ao longo dos cabos condutores, com componentes em freqüências subarmônicas da freqüência da linha, de natureza contínua. Essas componentes podem ser atribuídas a um movimento oscilatório da capa de ar ionizado que envolve os condutores. Há, outrossim, uma componente de natureza aleatória e provocada pelos eflúvios de *Corona* nas superfícies dos condutores durante os semiciclos positivos da tensão da linha, com um espectro mais amplo de freqüências, contendo sons de freqüência fundamental, subarmônicos e harmônicos de ordem superior. Essas fontes punctuais devidas aos eflúvios podem ser consideradas uniformemente distribuídas ao longo da linha, emitindo ondas sonoras esféricas.

A geração dos ruídos audíveis é influenciada pelos seguintes fatores:

a — tensões de operação — são significantes para linhas de 500 [kV] e maiores;

b — condições atmosféricas — as gotas d'água acumuladas na geratriz inferior dos condutores fazem com que as intensidades das componentes aleatórias aumentem mais do que as contínuas. Sob chuvas pesadas, o ruído que estas provocam é normalmente maior do que o ruído gerado pelas linhas, não apresentando problemas mais sérios. As piores condições ocorrem com chuvas fracas, neblina e água acumulada nos condutores. Em neblina, especialmente, a transmissão do som é facilitada, aumentando o grau de perturbação. Em tempo bom, o nível de ruído pode ser de 5 a 20 [db], menor do que com condutores molhados, ou sob neblina, dependendo do gradiente de potencial e do grau de irregularidades nas superfícies dos cabos;

c — diâmetros dos condutores, número de subcondutores por feixe e configuração dos feixes afetam as condições de ruídos;

d — condições superficiais dos condutores — condutores envelhecidos pelo tempo possuem superfícies mais lisas, desempenhando melhor;

e — distância das linhas e posições relativas de objetos refletores;

f — grau de atenuação pelo ar, direções e intensidades de vento etc.

Verificou-se experimentalmente [8] que a pressão sonora gerada por condutores múltiplos sob chuva pesada, para um valor constante de gradiente de potencial, pode ser expressa por:

$$P = k\, n\, d^{2,2}, \tag{10.50}$$

em que:

n — número de subcondutores;
d — diâmetros dos subcondutores;
k — um fator de proporcionalidade.

A Tab. 10.6 dá idéia dos níveis de ruídos medidos em diversas linhas.

Tabela 10.6 — NIS Medidos em Algumas Linhas Experimentais [25]

Tensão	*Composição dos Condutores*		*Gradientes Superf. as Fases Externas*	*NIS a 25 m*	
				Chuva	*Neblina*
kV	n · ∅ [mm]	mm²	kV/cm	dB	dB
420	2 · 31	1 140	15,5	46	40
765	4 · 38	3 400	15,9	54	48
1 050	6 · 31	3 420	18,22	60	
1 300	6 · 38	5 100	15,80	57	51
1 300	8 · 31	4 560	17,80	61	
	8 · 38	6 800	15,40	58	52

Há pesquisas em andamento, em número razoavelmente grande de instalações experimentais, cuja finalidade é entender e equacionar melhor o problema, assim como buscar meios de reduzir o seu efeito [6, 7], entre os quais:

a — uso de grande número de subcondutores por fase;

b — emprego de feixes de condutores assimétricos, reduzindo seu número na parte inferior;

c — aumento dos diâmetros físicos dos condutores, envolvendo-os por tubos de neoprene de diâmetros bem maiores que o seu diâmetro, afastando as gotas d'água da geratriz inferior;

d — aumento do diâmetro elétrico dos cabos por meio de espiras de arames finos, provocando *supercorona;*

e — aplicação de um "bias" de corrente contínua a fim de reduzir os picos de tensão dos semiciclos positivos.

10.6.3 — Perdas de Energia por *Corona*

Mesmo em linhas com condutores bem dimensionados, quando as perdas por *Corona,* com tempo bom, são suficientemente pequenas para serem desprezadas para fins de determinação de parâmetros das linhas, o mesmo não acontece, como mostraram medições efetuadas em diversos países, em condições de tempo mau, conforme comentamos no início deste capítulo.

Para a determinação analítica das perdas por efeito *Corona,* encontra-se na literatura um número grande de expressões, a maioria delas empíricas e baseadas em pesquisas e observações realizadas por seus autores e cujos resultados nem sempre convergem. Algumas, como a de Peterson, proposta em 1933, ainda são consideradas *boas* para tempo bom. Somente nos últimos 15 anos, com os estudos promovidos nos Estados Unidos (Projeto EHV), Alemanha (Rheinau), Canadá (Coldwater), França (EdeF) etc., é que se conseguiram melhores resultados, porém nem sempre convergentes para a determinação de perdas sob chuva.

10.6.3.1 — Perdas de Potência com Tempo Bom

As perdas de potência com tempo bom podem ser calculadas pela fórmula de Peterson [1] para um condutor ou subcondutor:

$$P_{TB} = \frac{0{,}00002094\, f\, U^2\, \phi}{\left(\log\left[\frac{D_m}{r}\right]\right)^2} \ [\text{kW/km}], \tag{10.51}$$

sendo:

f [Hz] — freqüência do sistema;
U [kV] — tensão eficaz entre fase e neutro;
r [cm] — raio externo do condutor ou subcondutor;
D_m [cm] — distância média geométrica entre subcondutores;
ϕ — fator experimental que depende da relação

$$\frac{U}{U_o} = \frac{E}{E_{CRV}}, \tag{10.52}$$

sendo:

E [kV/cm] — gradiente de potencial do condutor ou subcondutor;
E_{CRV} [k/Vcm] — gradiente crítico visual do condutor ou subcondutor.

A curva da Fig. 10.9 fornece valores de φ para relações de E/E_{CRV} entre 0,5 e 1,8. Verifica-se nela que, mesmo para valores de $E/E_{CRV} < 1$, há perdas, embora ocorram antes da manifestação visual do efeito *Corona*.

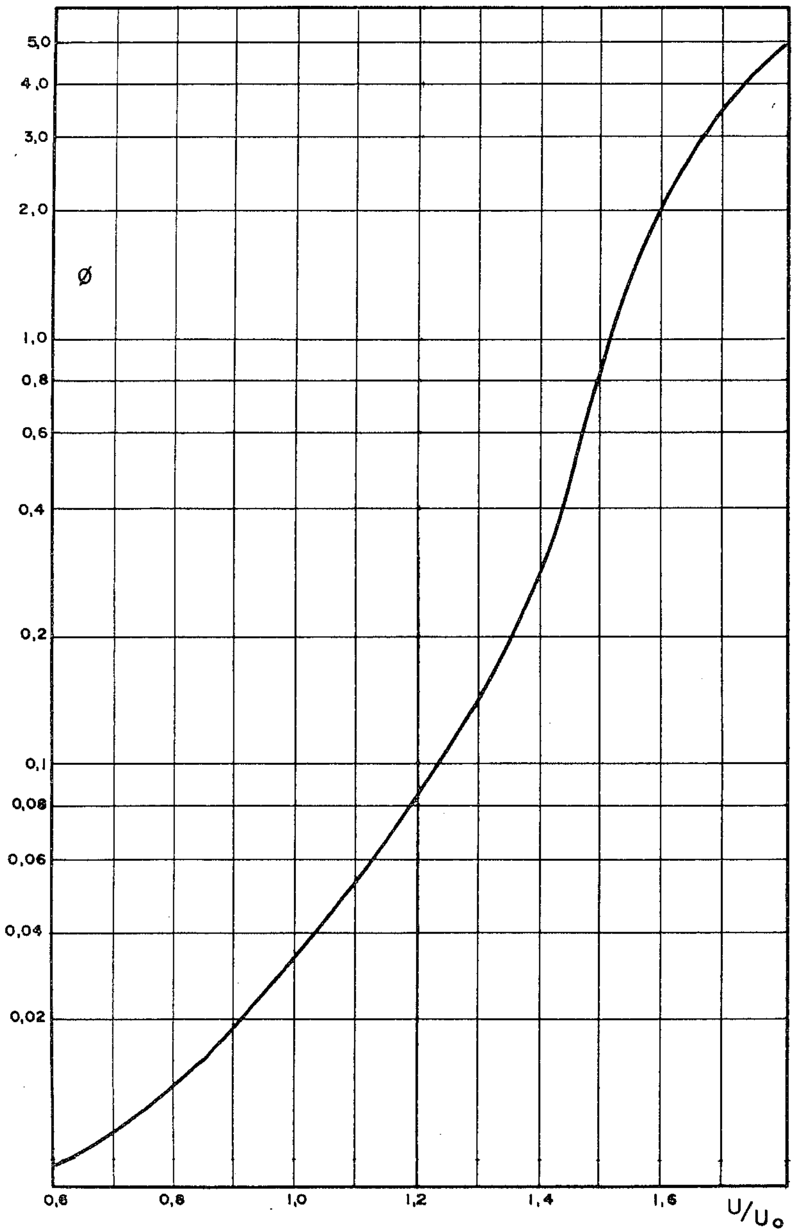


Fig. 10.9 — *Coeficiente de perdas por* Corona *de Peterson.*

10.6.3.2 — Perdas de Potência sob Chuva

Encontra-se na literatura um número razoável de métodos de cálculo de perdas de potência por *Corona* sob chuva [1]. Não há, porém, convergência nos resultados obtidos pelas várias equipes de pesquisa. Um dos métodos vem-se destacando, conforme se verifica pelas discussões públicas por ocasião de sua publicação. Trata-se do método desenvolvido na estação de pesquisas da *Electricité de France* por Cladé e Gary [30, 31 e 34]. É um processo analítico cuidadosamente verificado experimentalmente e apresentado para aplicação direta, de forma bastante simples, por meio de curvas reproduzidas na Fig. 10.10.

As perdas de potência podem ser determinadas através da expressão:

$$P = K\, P_n \ [\mathrm{W/m}], \tag{10.53}$$

sendo:

K — coeficiente de perdas definido mais abaixo (Eq. 10.54);

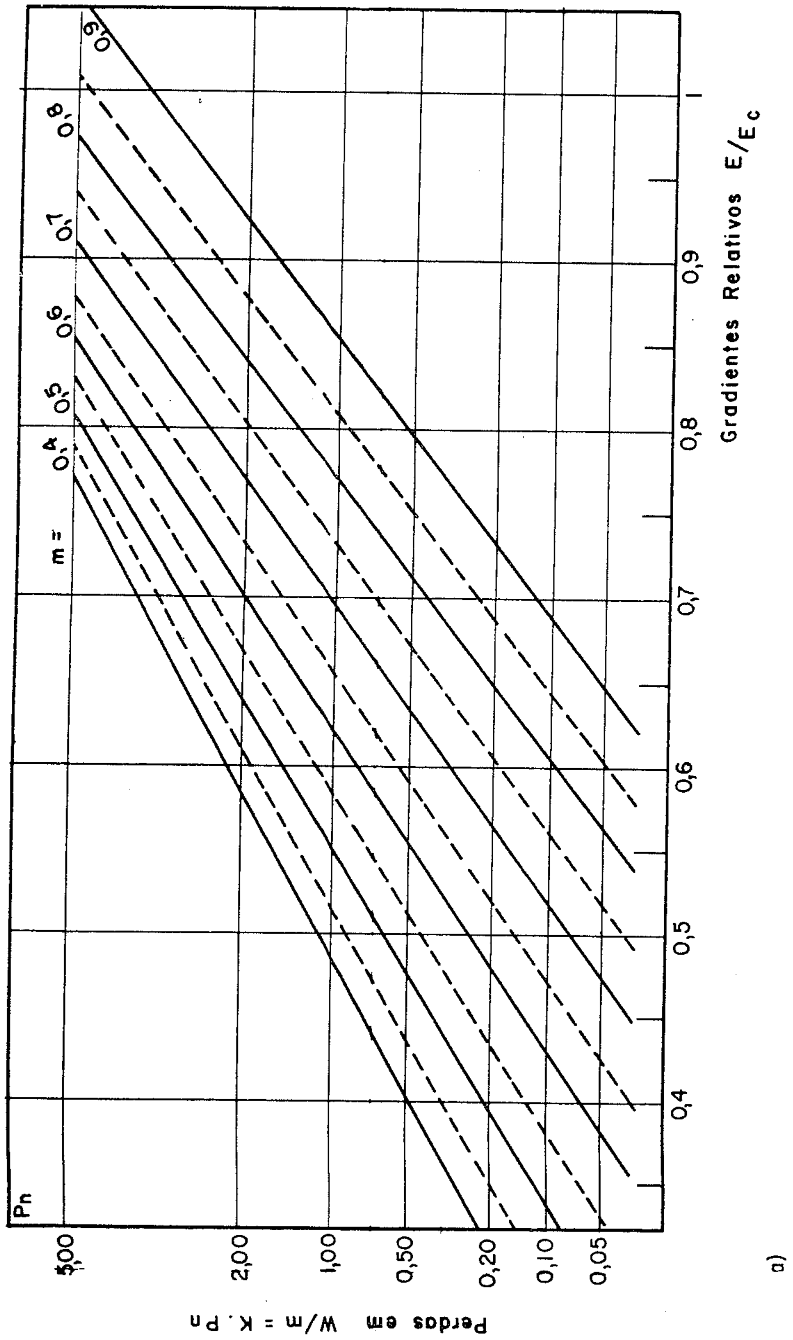
P_n — perdas reduzidas, obtidas da Fig. 10.10*a* em função de um coeficiente de estado da superfície m e do gradiente de potencial relativo E/E_c.

O valor do coeficiente de estado da superfície dos condutores m é obtido das curvas da fig. 10.10*b* em função do índice de precipitação em [mm/h]. Experiências mostraram que é sensível à variação do valor de m entre condutores novos e condutores envelhecidos pelo tempo. Os autores explicam essa diferença da seguinte maneira: quando os condutores são novos, suas superfícies não se encharcam facilmente e a água da chuva tende a formar uma quantidade razoável de gotículas relativamente separadas umas das outras, constituindo outras tantas fontes punctuais de eflúvios de *Corona*. Por outro lado, em condutores envelhecidos, a capa escura que os envolve é mais ou menos porosa, faz com que a água se distribua como uma película mais uniforme. As gotas d'água formam-se apenas na geratriz inferior dos cabos, onde produzem os eflúvios antes de cair [31].

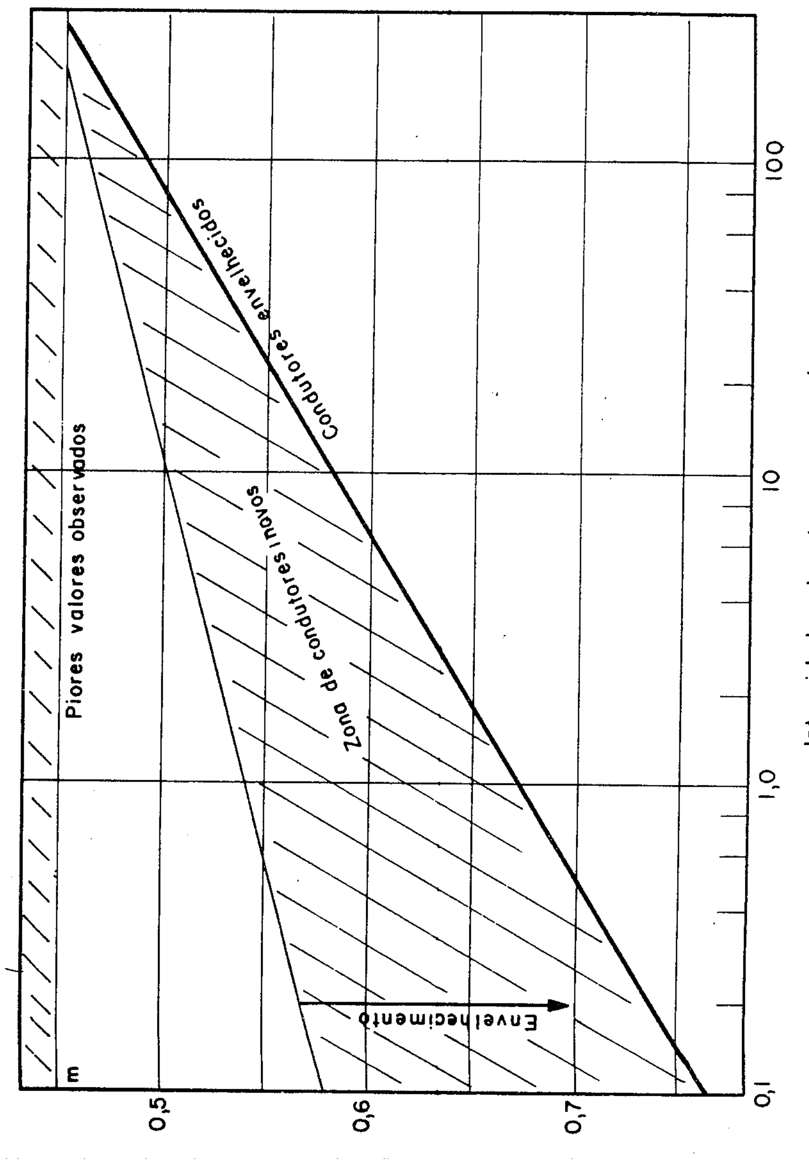
Para o cálculo do gradiente de potencial relativo E/E_c, procede-se da forma já exposta, lembrando que:

E [kV/cm] — gradiente de potencial médio dos condutores (no caso dos condutores múltiplos, aquele do condutor cilíndrico de raio R_c equivalente);

E_c [kV/cm] — gradiente crítico visual calculado pela equação de Peek (Eq. (10.2*a*)), corrigida apenas para considerar o efeito da variação da densidade relativa do ar, como na Eq. (10.5), e considerando apenas o raio dos subcondutores.



a)



b)

Fig. 10.10 — *Gráficos para o cálculo de perdas sob chuva* [34].

O coeficiente de perdas K é calculado pela seguinte equação:

$$K = \frac{f}{50}(n\,r\,\beta)^2 \frac{\log R/R_c \cdot \log \rho/R_c}{\log \dfrac{R}{\rho}} \tag{10.54}$$

na qual:

f [Hz] — freqüência do sistema;

r [cm] — raio dos subcondutores;

$$\beta = 1 + 0{,}3/\sqrt{r};$$

R_c [cm] — raio do condutor equivalente ao condutor múltiplo, conforme Eq. (8.63);

ρ [cm] — $\rho = 18\sqrt{r}$ para condutores simples;

$\rho = 18\sqrt{nr + 4}$ para condutores múltiplos;

R [cm] — raio de um cilindro coaxial com o condutor, de potencial nulo. Este pode ser determinado a partir da capacitância de serviço C_s (seqüência positiva) da linha trifásica, pela expressão:

$$R = R_c \text{ antilog } \frac{0{,}02412 \cdot 10^{-6}}{C_s} \text{ [cm]}, \tag{10.55}$$

na qual R_c deverá ser em [cm].

O Exerc. 19, no final deste capítulo, esclarece o emprego do presente método.

A equipe do Projeto EHV [1] apresenta igualmente um processo para cálculo das perdas sob chuva, segundo o qual essas perdas são proporcionais à quinta potência dos gradientes na geratriz inferior dos condutores ou subcondutores. Um método tipo caso-base foi igualmente desenvolvido para sua determinação.

10.6.3.3 — Perdas Mínimas, Médias e Máximas

Do que vimos até agora, é fácil concluir que as perdas de energia devidas ao efeito *Corona* nas linhas de transmissão e, conseqüentemente, também sua condutibilidade de dispersão somente podem ser definidas em termos estatísticos, em função das condições meteorológicas a que as linhas são submetidas. Estas, em geral, variam ao longo de uma mesma linha, principalmente se esta for suficientemente longa para atravessar regiões climatológicas diversas. Qualquer estudo mais sério visando a

determinar valores máximos ou médios anuais somente poderá dar resultados dignos de confiança se estribado em dados meteorológicos igualmente merecedores de crédito. Para tanto, é necessário dispor de índices pluviométricos registrados hora por hora, durante um grande número de anos, abragendo no mínimo um ciclo, de preferência, vários ciclos pluviológicos de cada região climática ao longo da linha. A ordenação dos dados obtidos permite a obtenção de curvas de duração dos índices de precipitações em mm/hora por ano. De posse desses dados, é possível calcular, pelos processos expostos, a curva de duração de perdas anuais de potência por *Corona*, em kW, que, integrada, permite determinar o valor das perdas médias anuais (Fig. 10.11).

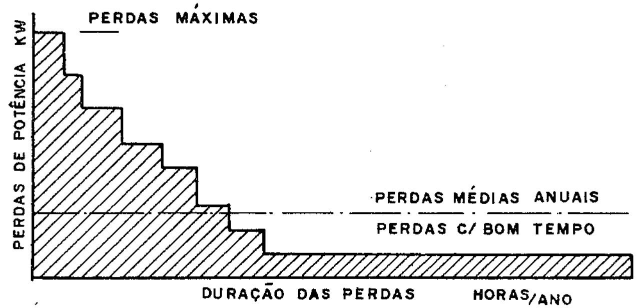


Fig. 10.11 — *Curva de duração de perdas por* Corona.

Esse trabalho se assemelha àquele realizado pelos hidrólogos ao estudarem as potencialidades hidrológicas de uma bacia. O grau de confiabilidade será tanto maior quanto maior for o número de anos de observação e coleta dos índices horários de precipitações. Isso requer, evidentemente, uma infra-estrutura de meteorologia moderna e eficiente, não só de postos de coleta de dados como também de registo e ordenação.

10.7 — EXERCÍCIOS

1. Determinar o gradiente crítico visual dos condutores da linha descrita no Exer. 5 do Cap. 8, considerando a linha com tempo bom e sob chuva, com cabos lançados com os cuidados usuais em linhas nessa classe de tensão. Altitude média da linha, 800 m.s.n.m. e temperatura média anual de 20°C.

Solução

1 — Empregando a equação de Miller para condutores simples, fazendo-se $r_{eq} = r$:

$$E_{CRV} = 18{,}1\, m\, \delta \left(1 + \frac{0{,}54187}{\sqrt{r \cdot \delta}}\right) \text{ [kV/cm]}, \quad \text{(Eq. 10.5}a\text{)}$$

Sendo:

$$\delta = \frac{0{,}386\,(760 - 0{,}086 \cdot 800)}{273 + 20} = 0{,}9106.$$

Da Tab. II. 2 (Ap. II) temos $r = 6{,}629$ [mm] para o cabo OXLIP (CA). Portanto:

$$E_{CRV} = 18{,}1 \cdot 0{,}9106 \cdot m \left(1 + \frac{0{,}54187}{\sqrt{0{,}6629 \cdot 0{,}9106}}\right)$$

$$E_{CRV} = 20{,}1169 \cdot m \text{ [kV/cm]}.$$

Admitindo cabos novos, adotamos da Tab. 10.2:

a — com tempo bom: $m = 0{,}60$;

b — sob chuva: $m = 0{,}20$;

logo,

a — com tempo bom: $E_{CRV} = 12{,}0702$ [kV/cm];

b — sob chuva: $E_{CRV} = 4{,}0234$ [kV/cm].

2 — Empregando a Eq. (10.2*a*) devida a Peek, teremos, introduzindo o fator de superfície m:

$$E_{CRV} = 21{,}6 \cdot \delta \cdot m \left(1 + \frac{0{,}301}{\sqrt{\delta \cdot r}}\right); \qquad \text{(Eq. 10.2}a\text{)}$$

logo,

$$E_{CRV} = 21{,}6 \cdot 0{,}9106 \cdot m \left(1 + \frac{0{,}301}{\sqrt{0{,}9106 \cdot 0{,}6629}}\right)$$

$$E_{CRV} = 22{,}0785 \cdot m \quad \text{[kV/cm]}.$$

Adotando os mesmos valores para m, encontraremos:

a — com tempo bom: $E_{CRV} = 13{,}2472$ [kV/cm];

b — sob chuva: $E_{CRV} = 4{,}4157$ [kV/cm].

Nota — Comparando os resultados obtidos através das duas fórmulas, concluímos que os valores obtidos pela equação de Peek são mais otimistas do que os de Miller.

2. Verificar a influência da variação da altitude e da temperatura sobre o E_{CRV} dos condutores da LT de 345 [kV] descrita no Exerc. 8 do Cap. 8.

Dados: Condutores CAA-2 × 636 MCM (*Grosbeak*), espaçamento de 0,40 [m];

logo,

$$r = 1{,}2573 \text{ [cm]}; \quad R_c = \sqrt[2]{1{,}2573 \cdot 40} = 7{,}0917 \text{ [cm]};$$

$$D_m = \sqrt[3]{(10)^2 \cdot 20} = 12{,}6 \text{ [m]}.$$

Solução

Empregaremos a Eq. (10.5*a*) de Miller:

$$E_{CRV} = 18{,}1 \cdot \delta \cdot \text{m}\left(1 + \frac{0{,}54187}{\sqrt{\delta \cdot r_{eq}}}\right). \qquad \text{(Eq. 10.5}a\text{)}$$

O fator de correção δ será calculado pela equação:

$$\delta = \frac{0{,}386\,(760 - 0{,}086\,h)}{273 + t}, \qquad \text{(Eq. 10.6)}$$

cujos resultados estão na tabela que se segue.

Sendo linha com condutores múltiplos, o r_{eq} foi calculado pela Eq. (10.17), empregando-se os valores dados

$$\frac{12{,}6}{r_{eq}} = \left(\frac{12{,}6}{0{,}0792}\right)^{\frac{2 \cdot 0{,}012573}{r_{eq}}}$$

tendo-se obtido por tentativas:

$$r_{eq} = 0{,}0202 \text{ [m]} = 2{,}02 \text{ [cm]}.$$

Os resultados dos cálculos efetuados com a Eq. (10.5*a*), para diversos valores de h e t, estão indicados na tabela que segue, para $m = 1$.

h[m] \ t	0°C		25°C		50°C	
	δ	E_{CRV}	δ	E_{CRV}	δ	E_{CRV}
0	1,0746	26,638	0,9844	24,6644	0,9082	23,015
500	1,0138	25,298	0,9287	23,460	0,8568	21,896
1 000	0,95298	23,986	0,8730	22,249	0,8055	20,773

Comentário

Analisando os resultados acima, verificamos que:

1 — a altitude reduz o valor de E_{CRV};

2 — temperaturas mais altas reduzem o valor de E_{CRV};

logo, sob o ponto de vista de *Corona*, as linhas operam melhor ao nível do mar e com temperaturas baixas.

3. Qual o gradiente crítico visual da linha de 500 [kV] descrita no Exerc. 23 do Cap. 7, admitindo que tenha trechos a altitudes de 900 metros sobre o nível do mar e trechos com 400 metros sobre o nível do mar, com temperaturas médias de 25°C?

4. Calcular o gradiente crítico visual da LT de 735 [kV] descrita no Exerc. 10 do Cap. 7, admitindo altitudes médias de 50 m.s.n.m e temperaturas médias de 15°C.

5. Qual o gradiente médio de potencial nos subcondutores da linha de transmissão de 330/345 [kV] do Exerc. 8 do Cap. 8, quando ela opera com uma tensão de 335 [kV]? Sua matriz de coeficientes de potencial é a seguinte:

$$[A] = 10^7 \begin{bmatrix} 10,457 & 1,809 & 1,740 & 2,197 & 1,141 \\ 1,809 & 10,457 & 1,809 & 2,059 & 2,059 \\ 1,740 & 1,809 & 10,457 & 1,141 & 2,197 \\ 2,197 & 2,059 & 1,141 & 16,014 & 2,283 \\ 1,141 & 2,059 & 2,197 & 2,283 & 16,014 \end{bmatrix}$$

Considerar os cabos pára-raios aterrados.

Solução

Empregaremos as Eqs. (10.25). Para tanto, será necessário inverter a matriz acima:

$$\begin{array}{c} \qquad\qquad [A_F^*] \qquad\qquad\qquad\qquad [A_{F\cdot PR}^*] \\ [A]^{-1} = 10^{-7} \left[\begin{array}{ccc:cc} 0,10260 & -0,01280 & -0,01320 & -0,01120 & -0,00250 \\ -0,01280 & 0,10370 & -0,01280 & -0,00930 & -0,00930 \\ -0,01320 & -0,01280 & 0,10260 & -0,00230 & -0,01120 \\ \hdashline -0,01120 & -0,00930 & -0,00250 & 0,06640 & -0,00720 \\ -0,00250 & -0,00930 & -0,01120 & -0,00720 & 0,06640 \end{array}\right] \\ \qquad\qquad [A_{PR\cdot F}^*] \qquad\qquad\qquad\qquad [A_{PR}^*] \end{array}$$

A — Gradientes de potencial nos cabos condutores — De acordo com a Eq. (10.25*a*), teremos:

$$\begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} = \frac{10^{-7} \cdot U}{2\pi \epsilon n r_F} \begin{bmatrix} 0,10260 & -0,01280 & -0,01320 \\ -0,01280 & 0,10370 & -0,01280 \\ -0,01320 & -0,01280 & 0,10260 \end{bmatrix} [\lambda_i].$$

1 — Sendo $r_F = 1,257$ [cm], teremos, quando o valor da tensão for máximo na fase *a*:

$$\begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} = 0,71599\ U \begin{bmatrix} 0,10260 & -0,01280 & -0,01320 \\ -0,01280 & 0,13070 & -0,01280 \\ -0,01320 & -0,01280 & -0,10260 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ -1/2 \\ -1/2 \end{bmatrix};$$

logo,

$$E_a = 0,08277 \cdot \frac{335}{\sqrt{3}} = 16,008 \quad [\mathrm{kV/cm}];$$

$$E_b = 0,05140 \cdot \frac{335}{\sqrt{3}} = 9,941 \quad [\mathrm{kV/cm}];$$

$$E_c = 0,03190 \cdot \frac{335}{\sqrt{3}} = 6,162 \quad [\mathrm{kV/cm}].$$

2 — Para $U_{máx} = U_b$, a matriz acima será multiplicada por:

$$\begin{bmatrix} -1/2 \\ 1 \\ -1/2 \end{bmatrix};$$

Obteremos:

$$E_a = E_c = 0,0412 \cdot \frac{335}{\sqrt{3}} = 7,963 \quad [\mathrm{kV/cm}];$$

$$E_b = 0,1027 \cdot \frac{335}{\sqrt{3}} = 19,872 \quad [\mathrm{kV/cm}].$$

B — Nos cabos pára-raios, os gradientes de potencial serão, pela Eq. (10.25*b*):

$$\begin{bmatrix} E_r \\ E_f \end{bmatrix} = \frac{+10^{-7}\ U}{2\pi \epsilon r_{PR}} \begin{bmatrix} -0,01120 & -0,00930 & -0,00250 \\ -0,00250 & -0,00930 & -0,01130 \end{bmatrix} [\lambda_i].$$

a — Sendo $r_{PR} = 0{,}635$ [cm], teremos para $U_a = U_{máx}$:

$$\begin{bmatrix} E_r \\ E_s \end{bmatrix} = 2{,}835\, U \begin{bmatrix} -0{,}01120 & -0{,}00930 & -0{,}00250 \\ -0{,}00250 & -0{,}00930 & -0{,}01120 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ -1/2 \\ -1/2 \end{bmatrix};$$

logo,

$$E_r = 0{,}00530 \cdot \frac{335}{\sqrt{3}} = 1{,}025 \quad \text{[kV/cm]};$$

$$E_s = 0{,}0078 \cdot \frac{335}{\sqrt{3}} = 1{,}059 \quad \text{[kV/cm]};$$

b — Quando $E_b = E_{máx}$:

$$E_r = 0{,}0025 \cdot \frac{335}{\sqrt{3}} = 0{,}4739 \quad \text{[kV/cm]};$$

$$E_s = 0{,}0025 \cdot \frac{335}{\sqrt{3}} = 0{,}4739 \quad \text{[kV/cm]}.$$

6. Determinar o gradiente máximo-maximorum nos subcondutores da linha do exercício anterior.

Solução

De acordo com a Eq. (10.41), o máximo gradiente superficial será:

$$E_{máx} = E_{médio} [1 + \delta], \qquad \text{(Eq. 10.41)}$$

sendo

$$\delta = 1 + \frac{d(n-1)}{2R}. \qquad \text{(Eq. 10.39)}$$

No presente caso, $E_{médio} = 19{,}872$ [kV/cm], que ocorre na fase *B*, quando $U_b = U_{máx}$:

$d = 2{,}514$ [cm] — cabo *Grosbeak* (Tab. II.3 do Ap. II);

$$R = \frac{s_{12}}{2} = 20 \text{ cm};$$

logo,

$$E_{máx} = 19{,}872 \left(1 + \frac{2{,}514(2-1)}{2 \cdot 20}\right)$$

$$E_{máx} = 21{,}1210 \quad \text{[kV/cm]}.$$

7. Determinar os valores dos gradientes médios dos subcondutores da linha do Exerc. 5, considerando os cabos pára-raios isolados.

8. Calcular o gradiente de potencial máximo-maximorum dos subcondutores da linha do Exerc. 5.

9. Calcular o gradiente de potencial máximo-maximorum da linha de 500 [kV] descrita no Exerc. 23 do Cap. 7.

10. Se a linha do Exerc. 5 estiver situada em uma região de altitude média de 500 [m], haverá manifestação de *Corona* visual com tempo bom? Com condutores novos? Ou com condutores já envelhecidos?

Solução

De acordo com a Tab. 10.2, o coeficiente de superfície para condutores de alumínio novos secos vale em torno de $m = 0{,}60$ e $m = 0{,}70$ para cabos envelhecidos. Empregando os valores calculados no Exerc. 3, teremos os seguintes E_{CRV}:

	0°C	25°C	50°C	*OBS*
Cabos novos	16,335	15,155	14,152	Nível do mar
Cabos usados	19,058	17,681	16,510	

Comentário

Os valores dos E_{CRV} do nível do mar acima calculados mostram que $E > E_{CRV}$ sob quaisquer condições de operação. Isso significa que, mesmo com tempo bom, a linha operará permanentemente sob *Corona* visual, e, como veremos, produzindo perdas e radiointerferência. Não é, pois, um bom projeto. Os condutores devem ser redimensionados, seja quanto à bitola dos subcondutores, seja quanto à sua separação.

11. Verificar se a linha do Exerc. 9 opera satisfatoriamente quanto ao *Corona* com tempo bom.

12. Verificar a relação E/E_{CRV} da linha de 735 [kV] do Exerc. 4.

13. A linha do Exerc. 5 ocupa uma faixa de 50 [m] de largura. Qual o nível de ruído de RI em um ponto situado nos limites de sua faixa e em um ponto situado 15 [m] além?

Solução

Empregaremos a Eq. (10.47):

$$E = 53{,}7 \pm 5 + K(g_m - 16{,}95) + 40 \log \frac{d}{3{,}93} + E_n + 20K_D \log \frac{20}{D} + E_f + E_{FW} \ \text{[dB/1}\mu\text{V/m]}. \qquad \text{(Eq. 10.47)}$$

Para o caso particular, teremos:

$$K = 3{,}5;$$

$$E_n = 10 \log \frac{2}{4} = -3{,}0103;$$

$$K_D = 1{,}6 \pm 0{,}1;$$
$$E_f = 0;$$
$$E_{FW} = 0 \quad \text{(tempo bom)};$$
$$E_{FW} = 17 \pm 3 \quad \text{(chuva)};$$
$$g_m = 19{,}872 \quad [\text{kV/cm}] \quad \text{(fase do meio)};$$
$$D_1 = 25 \text{ [m]};$$
$$D_2 = 40 \text{ [m]};$$
$$n = 2.$$

Substituindo os valores, teremos:

1 — com tempo bom: $D_1 = 25$ [m]

$$E = 53{,}7 \pm 5 + 3{,}5\,(19{,}872 - 16{,}95) + 40 \log \frac{2{,}514}{3{,}93} - 3{,}0103 +$$

$$+ 20 \cdot 1{,}6 \log \frac{20}{25} + 0 + 0$$

$$E = 53{,}7 \pm 5 - 3{,}6455 \quad \therefore \quad E' = 55{,}0545 \ [\text{dB}/1\mu\text{V/m}]$$

$$E'' = 45{,}0545 \ [\text{dB}/1\mu\text{V/m}];$$

2 — com tempo bom: $D_2 = 40$ [m]

$$E = 53{,}7 \pm 5 - 10{,}1774 \quad \therefore \quad E' = 48{,}523 \ [\text{dB}/1\mu\text{V/m}]$$

$$E'' = 38{,}123 \ [\text{dB}/1\mu\text{V/m}];$$

3 — sob chuva: deve ser acrescido um fator de 17 ± 3 [dB] dos valores acima calculados.

Comentário

A avaliação do nível de ruído de radiointerferência mencionado servirá de base para se estimar a "qualidade de recepção" que pode ser esperada ao longo da linha. Para tanto, é necessário determinar o nível de recepção (sinal) existente nos pontos de interesse. Por exemplo, para uma recepção classe A, em tempo bom, a uma distância de 40 [m] do eixo da linha, a intensidade do sinal, de acordo com a Eq. (10.45), deverá ser da ordem de 80 [dB/1μV/m], ou seja, da ordem de 10 620 [μV/m].

14. Fazer o levantamento do perfil de níveis de ruídos de RJ da linha de 500 [kV] descrita no Exerc. 9 até uma distância de 30 [m] de seu eixo.

15. Repetir o exercício acima para a linha de 735 [kV] do Exerc. 4.

16. Qual o valor das perdas de energia por quilômetro da linha de 345 [kV] do Exerc. 5, com tempo bom, considerando $t = 25°\text{C}$ e $h = 500$[m]?

Solução

Pela equação de Peterson, teremos:

$$P_{TB} = \frac{0{,}000020945\, f\, U^2\, \varphi}{\left(\log\left[\frac{D_m}{r}\right]\right)^2} \ [\text{kV/km}]/\text{subcond.} \qquad \text{(Eq. 10.49)}$$

Para o presente caso, temos:

$$f = 60 \text{ Hz}, \ U = \frac{335}{\sqrt{3}}, \ E_{CRV} = 0{,}70 \cdot 24{,}038 \ [\text{kV/cm}]$$

$$\psi = \left(\frac{E}{E_{CRV}}\right) = f\left(\frac{19{,}872}{16{,}827}\right) = f(1{,}181);$$

logo, pela Fig. 10.9, $\varphi = 0{,}08$:

$$D_m = \sqrt[3]{(10)^2 \cdot 20} = 12{,}6 \text{ m} = 1\,260 \ [\text{cm}]$$

$$r = 1{,}257 \ [\text{cm}];$$

portanto,

$$P_{TB} = 0{,}417 \ [\text{kW/km}]/\text{subcond.}$$

As perdas totais com tempo bom, por quilômetro de linha, serão:

$$P_T = 6 \cdot 0{,}417 = 2{,}503 \ [\text{kV/km}].$$

17. Determinar as perdas com tempo bom da linha de 500 [kV] do Exerc. 9.

18. Determinar as perdas com tempo bom da linha de 735 [kV] do Exerc. 4.

19. Determinar as perdas sob chuva da linha de 330/345 [kV] do Exerc. 5, quando os índices de precipitação variam de 1 [mm/h] a 10 [mm/h], considerando que a mesma se encontre a uma altitude média de 500 m.s.n.m, sob temperaturas médias de 25°C. Condutores usados: $m = 0{,}70$.

Solução

São dados:

$$n = 2;$$

$$r = 1{,}2573 \quad [\text{cm}];$$

$$f = 60 \quad [\text{Hz}];$$

$$E_a = E_c = 16{,}008 \; [\text{kV/cm}];$$

$$R_c = 7{,}0917 \; [\text{cm}].$$

Temos, aplicando a Eq. (10.2):

$$E_c = 21{,}6\left(1 + \frac{0{,}301}{\sqrt{1{,}257}}\right) = 25{,}4 \; [\text{kV/cm}]$$

$$\beta = 1 + \frac{0{,}3}{\sqrt{1{,}257}} = 1{,}1675;$$

$$\rho = 18\sqrt{2 \cdot 1{,}2573 + 4} = 45{,}943;$$

$$R = R_c \text{ antilog } \frac{0{,}02412 \cdot 10^{-6}}{0{,}1072 \cdot 10^{-7}}$$

$$R = 177{,}83 \; [\text{cm}];$$

logo,

$$K = \frac{60}{50}(2 \cdot 1{,}2573 \cdot 1{,}2675)^2 \frac{\log \dfrac{177{,}83}{7{,}0917} \cdot \log \dfrac{45{,}943}{7{,}0917}}{\log \dfrac{177{,}83}{45{,}943}}$$

$$K = 23{,}549\,.$$

Temos, igualmente, nas:

fases a e c: $$\frac{E}{E_{CRV}} = \frac{16{,}008}{25{,}40} = 0{,}63;$$

fase b: $$\frac{E}{E_{CRV}} = \frac{19{,}872}{25{,}40} \cong 0{,}80\,.$$

Com esses valores da curva da Fig. 10.10*b*, obtemos os coeficientes de superfície m e, com estes, nas curvas da Fig. 10.10*a*, as perdas P_n.

Índice de precipitação [mm/h]	[m]	*Coeficiente de perdas Fases*			*Perdas* [kW/km] *Fases*		
		a	*b*	*c*	*a*	*b*	*c*
1	0,67	0,600	3,00	0,600	14,129	70,647	14,129
10	0,58	1,30	4,20	1,30	30,614	98,906	30,614

Perdas totais: com i = 1 [mm/h] — 98,91 [kW/km];

com i = 10 [mm/h] — 160,134 [kW/km].

10.8 — BIBLIOGRAFIA

1 — PROJETO EHV — *EHV Transmission Line Reference Book*. Edison Electric Institute, Nova Iorque, 1968.

2 — KRAVCHENKO, V. D. e outros — *Measuring of Corona Losses on Operating* 400--500 *kV Lines*. Cigré, Paris, 1962, n.º 407.

3 — ANDERSON, J. G. e outros — *Corona Loss Characteristics of EHV Transmission Lines Based on Project EHV — Research*. Transactions IEEE, Nova Iorque, Vol. PAS 85, n.º 12, dez. 1966. Págs. 1 196-1209.

4 — GRUPO CIGRÉ/IEEE — *CIGRE-IEEE Survey on Extra High Voltage Transmission Line Radio Noise*. Transactions, IEEE, Nova Iorque, Vol. PAS 92, n.º 3, maio/junho 1973. Págs. 1 019-1 028.

5 — IEEE RADIO NOISE SUBCOMMITTEE REPORT — *Comparison of Radio Noise Prediction Methods with CIGRÉ/IEEE Survey Results*. Idem ibidem. Págs. 1 029-1 042.

6 — PIROTTE, P. — *Audible Noise Produced By Corona Effect on AC and DC Overhead Lines*. Cigré, Paris, 1972. Vol. 2, n.º 36-02, 24.ª Seção.

7 — COQUARD, A. e GARY, C. — *Audible Noise By Electrical Power Transmission Lines at Very High Voltage*. Cigré, Paris, 1972. Vol. 2, n.º 36-03, 2.ª Seção.

8 — BALDERSON, JR. e outros — *UHV AC Transmission Line Design Based on Project UHV Test Results*. Cigré, Paris, 1972. Vol. 2, n.º 31, 24.ª Seção.

9 — CIGRÉ — *Special Report for Group* 36 (*Interference*). Cigré, Paris, 1972. n.º 36-00, 24.ª Seção.

10 — MILLER, JR., C. J. — *Mathematical Prediction of Radio and Corona Characteristics of Smooth, Bundled Conductors*. AIEE Transactions, Nova Iorque, 1956. Vol. 75. Parte III. Págs. 1 029-1 037.

11 — ————.— *The Calculation of Radio and Corona Characteristics of Transmission Line Conductors*. AIEE Transactions, Nova Iorque, 1957. Vol. 76. Parte III. Págs. 461-475.

12 — BIERMANS, J. — *Energie Ubertragung auf Grosse Entfernungen*. Verlag G. Braun, Karlsruhe, Alemanha Ocidental, 1949.

13 — DALLA VERDE, A. — *Proyecto de la Linea de 380 [kV] de San Nicolas a Buenos Aires*. Vol. 1 — Informe. Editado pela Techint — Cia. Técnica Internacional, Buenos Aires, 1954.

14 — ELGERD, O. I. — *Electric Energy Systems Theory — an Introduction*. McGraw-Hill Book Co., Nova Iorque, 1971

15 — TIMASHEFF, A. S. — *Field Patterns of Bundle Conductors and Their Electrostatic Properties*. AIEE Transactions, Nova Iorque, 1961. Vol. 80. Parte III. Págs. 590-597.

16 — ———— — *Fast Calculation of Gradients for the Center Phase of a Three Phase Bundle Conductor Line with any number of Subconductors*. Transactions IEEE, Nova Iorque, Vol. PAS 90, n.º 1, 1971. Págs. 157-164.

17 — TEMOSHOK, M. — *Relative Surface Gradients of Grouped Conductors*. AIEE Transactions, Nova Iorque, 1948. Vol. 67. Parte III. Págs. 1 583-1 591.

18 — SARMA, M. P. e JANISCHEWSKYJ, W. — *Electrostatic Field of a System of Parallel Cylindrical Conductors*. Transactions IEEE, Nova Iorque, Vol. PAS 88, n.º 7, julho 1969. Págs. 1 069-1 079.

19 — PEEK, F. W. — *Dielectric Phenomena in High Voltage Engineering*. McGraw-Hill Book Co., Nova Iorque, 1929. 3.ª edição.

20 — FUCHS, R. D. — *Estudo Comparativo dos Métodos de Cálculo da Distribuição dos Gradientes de Potencial nas Superfícies dos Condutores Múltiplos*. Ed. EFEI, Itajubá, 1974.

21 — THANASSOULIS, P. e COMSA, R. P. — *Calculation of Maximum Voltage Gradients*. Transactions IEEE, Nova Iorque, Vol. PAS 90, 1971. Págs. 145-150.

22 — KING, S. Y. — *The Electric Field Near Bundle Conductor*. Proc. IEE Monograph n.º 3 385. Junho 1959. Págs. 200-206.

23 — MANGOLDT, W. — *Bundelleitungen für Grosskraftübertagungen — VDE — Fachberichte*. Verein Deutscher Engineure, Berlim, 1948.

24 — WEBER, E. — *Electromagnetic Fields — Theory and Applications*. John Wiley & Sons, Nova Iorque, 1950.

25 — PARIS, L. e outros — *A Study of the Design Parameters of Tra smission Lines Above 1 000 kV*. Cigré, Paris, 1972. Vol. 2, n.º 31-15, 24.ª Seção.

26 — BARTHOLD, L. O. — *Fronteiras na Tecnologia das Linhas de Transmissão*. Apresentado no II Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Belo Horizonte, 1973.

27 — ANDERSON, J. G. e BARTHOLD, L. O. — *Design Challenges of Transmission Lines Above 765 kV*. IEEE-EHV — Transmission Conference, Montreal, Canadá, 1968.

28 — ADAMS, G. E. — *Voltage Gradients on High Voltage Lines*. AIEE Transactions, Nova Iorque, 1955. Vol. 74. Parte III. Págs. 5-11.

29 — HEDMAN, D. — *Propagation on Overhead Transmission Lines — I — Theory of Modal Analysis*. Transactions IEEE, Nova Iorque, Vol. PAS 84, março 1965. Págs. 200-205.

30 — CLADÉ, J. J. e outros — *Calculation of Corona Losses Beyond the Critical Gradient in Alternating Voltage*. Transactions IEEE, Nova Iorque, Vol. PAS 88, maio 1969. Págs. 695-703.

31 — ———— e GARY, C. H. — *Predetermination of Corona Losses Under Rain — Experimental Interpreting and Checking of a Method to Calculate Corona Losses*. Transactions IEEE, Nova Iorque, Vol. PAS 89, maio/junho 1970. Págs. 853--860.

32 — HUTTE — *Des Ingenieurs Tashenbuch-I*. Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlim, 1949. 27.ª edição.

33 — SEARS, F. W. — *Física*. Ed. Gertum Carneiro, Rio de Janeiro, 1947. 1.º volume.

34 — CLADÉ, J. J. e GARY, C. H. — *Predetermination of Corona Losses Under Rain Influence of Rain Intensity and Utilization of a Universal Chart*. Transactions IEEE, Nova Iorque, Vol. PAS 89, julho/agosto 1970. Págs. 1 179-1 184.

35 — ALEXANDROV, G. N. — *Reseaux de Transport en Courant Alternatif à 750 kV en URSS*. Cigré, Paris, 1968. Vol. 2, 22.ª Seção.

11

Equacionamento Técnico-Econômico da Transmissão de Energia

11.1 — CONSIDERAÇÕES GERAIS

Uma empresa concessionária de energia elétrica, quer seja pública, privada ou mista, deve ser regida pelos princípios básicos da administração empresarial; o preço de venda de seu produto deve cobrir todos os custos totais de produção e comercialização, remunerando adequadamente os investimentos realizados. Deve também ser o mais baixo possível, pois neste caso, mais do que em outros, o mercado se comporta como o de uma sociedade de consumo: quanto menor o seu preço, maior será o consumo e os benefícios daí decorrentes.

Nessas condições, todos os elementos que entram na formação do custo de energia elétrica devem merecer o máximo de atenção. As soluções adotadas, condizentes na medida exata com as necessidades de serviço, nunca devem ser marcadas pelo excesso. Ao planejador dos sistemas elétricos cabe não esquecer que, a partir de um certo grau de segurança de funcionamento, qualquer melhoria deste, em geral, leva investimentos excessivamente grandes para serem economicamente justificados. Ele deverá pôr numa mesma balança, em termos de dinheiro, o risco calculado para manter certas condições mínimas de funcionamento e o custo adicional para diminuí-lo.

Os investimentos são parte integrante dos custos de produção e, requerendo os sistemas de transmissão parcela considerável do investimento total, a influência do custo de transporte da energia influi decisivamente em seu preço. Isso nos leva a uma conclusão importante: o custo do transporte de um kWh através de uma linha de transmissão deve ser mínimo. Defrontemo-nos com um problema de otimização, que em geral não permite soluções imediatas e diretas. O número de variáveis que intervêm é bastante elevado e seus valores nem sempre são facilmente obtidos. Neste caso, a experiência pessoal do engenheiro, aliada à experiência operativa da empresa, são ferramentas importantes de trabalho.

O seu equacionamento não é, porém, tão simples como pode parecer. Na literatura encontramos um número razoável de publicações indicando a maneira de realizar esses cálculos, contendo, algumas, programas para sua realização através dos computadores digitais.

11.2 — FATORES QUE DETERMINAM O CUSTO DO TRANSPORTE DE ENERGIA ELÉTRICA

O problema do transporte da energia elétrica se apresenta, em geral, de uma forma bastante simples: o dimensionamento da linha deve ser tal que o custo do transporte de uma potência P [kW] a uma distância l [km] deve ser o mínimo possível, dentro de padrões técnicos aceitáveis e com um grau de confiabilidade preestabelecido.

Sob o ponto de vista da qualidade técnica da transmissão com graus de confiabilidade aceitáveis, geralmente é possível encontrar um número razoável de soluções válidas. Dificilmente, no entanto, encontraremos mais de uma solução capaz de assegurar *o menor* custo da transmissão. É na procura desta que nos devemos empenhar, procurando-a através de um equacionamento técnico-econômico otimizado.

O equacionamento técnico-econômico consiste em estabelecer uma relação ideal, ou quase, entre dois fatores aparentemente antagônicos:

— custo da energia perdida no transporte;

— custo das instalações necessárias ao transporte da energia.

As perdas de energia, como vimos, se devem ao efeito Joule e ao efeito *Corona*. As primeiras são proporcionais às correntes na linha e as segundas, proporcionais à tensão. Enquanto que as primeiras diminuem com o aumento da tensão, as segundas aumentam, mantendo-se inalteradas as demais condições. Ambas, porém, diminuem com o aumento da bitola dos condutores. Logo, a redução nas perdas envolve um aumento no custo das instalações. Se, portanto, objetivamos reduzir as perdas a fim de reduzir o custo do transporte da energia, teremos que despender mais nas instalações de transporte, o que se reflete negativamente sobre o custo do mesmo transporte. Por outro lado, um aumento no grau de confiabilidade quanto à continuidade de serviço reflete-se igualmente no custo das instalações. Não obstante, dificilmente poderemos avaliar em termos de *cruzeiros* o custo que uma interrupção de serviço poderá provocar e, em contrapartida, o aumento de custo que um aumento de confiabilidade irá acarretar.

As perdas na transmissão são representadas por energia produzida (ou adquirida) que deixará de ser vendida pela empresa: são, portanto, um prejuízo. O investimento realizado, por outro lado, deve produzir o retorno do capital investido no prazo estabelecido como vida útil da instalação. Deve, além disso, ser remunerado convenientemente. São os en-

cargos financeiros que oneram o transporte da energia. O custo mínimo do transporte de energia depende de que a soma do custo da energia perdida e dos encargos financeiros seja mínima.

Há diversas maneiras de se efetuar essa análise. Uma vez que a vida útil das instalações de transmissão é muito longa — entre 15 e 20 anos nas linhas com estruturas de madeira e até 50 anos nas linhas de estruturas metálicas ou de concreto — é usual efetuarem-se os cálculos em termos de *custo anual*. O mesmo ocorre com relação às perdas, estabelecendo-se o custo da energia perdida anualmente.

Consideremos inicialmente o problema do transporte de P [kW] a uma distância l [km].

Prefixando um valor para a tensão, é possível estabelecer as perdas por efeito Joule para cada bitola de condutor, em termos de custo anual, como veremos. Levando esses valores a um gráfico, obteremos uma curva do tipo da curva A da Fig. 11.1.

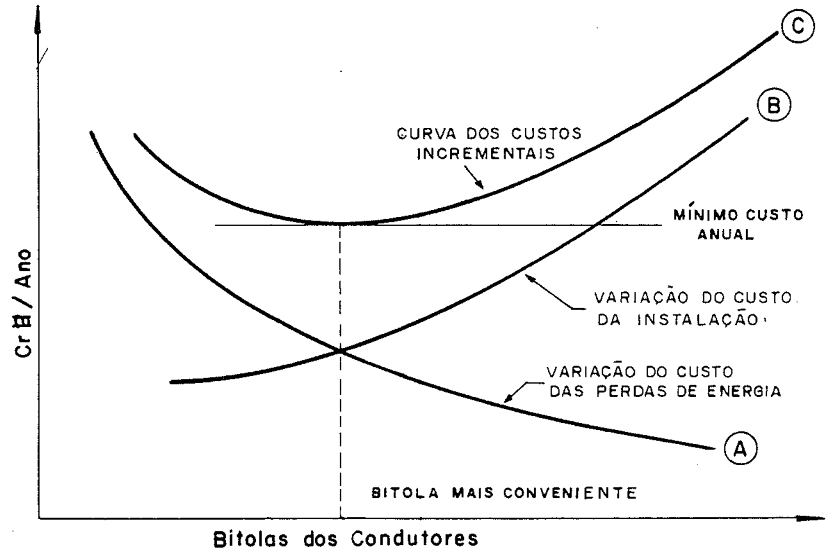


Fig. 11.1 — *Variação do custo anual das perdas e dos investimentos no transporte de energia.*

Admitamos que, para cada uma das bitolas dos cabos, calculemos o custo anual de aquisição dos condutores e sua instalação. Encontraremos uma curva do tipo da curva B na Fig. 11.1. O custo anual total para cada uma das bitolas dos condutores será representado pelas ordenadas da curva C, obtida da soma das ordenadas das curvas A e B. A bitola de condutores correspondente ao ponto de menor ordenada na cruva C é aquela que permitirá o transporte da energia pelo menor custo. A curva C é conhecida como "curva dos custos incrementais".

Se examinarmos outro nível de tensão para a linha, para a mesma potência transmissível, obteremos uma nova curva, do tipo da curva A, paralela à mesma, porém deslocada no sentido vertical. Será para cima se a nova tensão for menor, e para baixo se a tensão for maior. A curva C será modificada e uma nova bitola de menor custo será encontrada.

Se bem que os condutores constituam os elementos de custo mais sensíveis à variação das bitolas dos condutores, há outros elementos da linha que também são influenciados. Devem, pois, ser considerados. Estes alteram a forma e a posição da curva B. Elementos menos sensíveis ou mesmos insensíveis a essa variação provocam o deslocamento da curva B no sentido vertical, influenciando igualmente o custo anual mínimo.

Portanto, uma análise técnico-econômica de uma linha deverá incluir, de um lado, todos os fatores que influenciam os custos das perdas, e, do outro lado, todos os elementos que compõem o seu custo de instalação.

11.2.1 — Escolha da Tensão de Transmissão

Para a escolha da tensão de transmissão pode-se empregar um processo análogo ao descrito, ou seja, determina-se uma tensão que apresente o menor custo anual, equacionando-se o custo anual dos investimentos em função dessa tensão e o custo anual das perdas, também em função da tensão de transmissão.

Na prática, no entanto, somente no caso de se desejar introduzir novos níveis de tensão no sistema é que o estudo econômico será rigoroso; assim mesmo, em geral, a gama de tensões entre as quais se pode escolher é relativamente restrita.

Há diversos critérios para uma escolha preliminar, mencionando-se:

a — *fórmula de Still* — os resultados obtidos mediante sua aplicação são considerados satisfatórios para linhas com comprimentos maiores do que 30 [km]:

$$U \simeq 5{,}5 \sqrt{0{,}62\, L + \frac{P}{100}} \quad \text{[kV]}, \tag{11.1}$$

sendo:

U [kV] — tensão entre fases;

L [km] — comprimentos da linha;

P [kW] — potência média a transmitir.

A tensão a ser adotada é a tensão padronizada mais próxima.

b — *Critério de potência natural* — é o critério geralmente usado nas *linhas grandes*; foi justificado no Cap. 3. De acordo com esse critério, para cada tensão existe um valor *ótimo* de potência a ser transmitida e vice-versa, que pode não ser aquela em que as perdas são as menores,

porém é a mais vantajosa, sob o aspecto global da transmissão. Sendo P [MW] a potência a ser transmitida, a tensão indicada será:

$$U = \sqrt{P \cdot Z_o} \quad \text{[kV]}. \tag{11.2}$$

Essas potências naturais variam com a chamada impedância natural da linha. Esta independe do comprimento da linha, dependendo grandemente da configuração dos condutores.

Tabela 11.1 — Potenciais Naturais e Tensões Nominais Correspondentes

Configuração de fase	*Potências naturais em* MW							
	33 kV	66 kV	88 kV	138 kV	220 kV	345 kV	500 kV	750 kV
⊘	2,7	10,80	19,40	47,60	120	300	—	—
⊘ ⊘	—	—	24,20	59,50	150	370	780	—
⊘ ⊘ ⊘	—	—	—	—	170	425	89	1 750
⊘ ⊘ ⊘ ⊘	—	—	—	—	200	500	1 040	2 000

Na escolha de uma tensão de transmissão, principalmente de nível maior, é importante considerar as tensões já adotadas nos sistemas vizinhos, tendo sempre em vista os problemas acarretados pelas interligações em tensões diferentes. Dentro de um mesmo sistema, o número de tensões diferentes deve ser o mínimo possível. Como já mencionamos, novos níveis de tensões são recomendados somente quando se justificar, no mínimo, sua duplicação.

11.3 — CÁLCULO DO CUSTO ANUAL DAS PERDAS DE TRANSMISSÃO

As perdas de energia das linhas de transmissão, como já dissemos, são de dois tipos: perdas por dispersão e perdas por efeito Joule. Tanto umas como as outras devem ser consideradas.

11.3.1 — Perdas por Dispersão

Vimos no Cap. 10 que estas são constituídas principalmente pelas perdas devidas ao efeito *Corona*. São perdas difíceis de serem computadas e seu valor depende primordialmente da diferença de potencial dos condutores com relação ao solo, ou melhor, dos gradientes de potencial nas superfícies dos condutores e das condições meteorológicas ao longo das linhas. Podendo ser nulas com tempo bom, alcançam valores bem elevados sob chuvas intensas. Sua avaliação requer, pois, conhecimento das condições meteorológicas da região com dados horários de muitos anos, a fim de que, por processos estatísticos, se possa efetuar uma avaliação anual das perdas.

Na fase inicial dos trabalhos, é comum o seguinte procedimento:

A — adota-se bitola padronizada para os condutores, assegurando perdas nulas com tempo bom. Para condutores singulares pode-se adotar um condutor cujo diâmetro externo seja no mínimo igual a:

$$d_{\text{mín}} = 0{,}1\ U_m^{\Delta}\ [\text{mm}], \tag{11.3}$$

sendo:

U_m^{Δ} [kV] — tensão máxima de operação para a classe de tensão adotada.

Para condutores múltiplos poderemos usar, orientativamente:

a — geminados:

$$d_{\text{mín}} = 0{,}076\ U_m^{\Delta}\ [\text{mm}];$$

b — trigeminados:

$$d_{\text{mín}} = 0{,}050\ U_m^{\Delta}\ [\text{mm}];$$

c — quadrigeminados:

$$d_{\text{mín}} = 0{,}042\ U_m^{\Delta}\ [\text{mm}].$$

Condutores com diâmetros inferiores a esses mínimos não deveriam ser considerados nos cálculos econômicos;

B — adota-se um valor médio de perdas por *Corona* medidas em linhas de mesma classe de tensão e que se situem em regiões de condições climáticas semelhantes. Infelizmente, no Brasil, pelo menos que seja do nosso conhecimento, não foram realizadas medidas sistemáticas desse tipo de perdas nas diversas linhas de tensões extra-elevadas, e, se o foram, não receberam a devida divulgação, o que nos obriga a efetuar transposição de valores de outros países, de climas diversos e, portanto, de valor duvidoso. Linhas bem dimensionadas não deveriam apresentar perdas por dispersão médias maiores do que 2 a 8 [kW] por quilômetro, correspondendo os valores mais baixos a linhas da classe de 220/230 [kV] e os maiores a linhas de 500/525 [kV]. Esses valores são indicativos, podendo, no entanto, ser aplicados em cálculos econômicos. Para tensões menores, desprezam-se essas perdas. Um bom indicador é o gradiente de potencial: solução com gradientes acima de 17 [kV/cm] não é considerada nos cálculos.

11.3.2 — Perdas por Efeito Joule

Normalmente, ao se projetar uma linha de transmissão, deve-se ter em mente que, em se tratando de uma obra de grande duração, seu dimensionamento deve atender não só às necessidades do momento do sistema, como também às necessidades futuras, fazendo-se previsões com projeções mínimas de 10 anos. Quando se trata de uma linha que deva transportar a energia desde uma central elétrica até um centro de consumo, o problema é relativamente simples, pois esse estudo já existe com relação à central, cuja construção é sempre precedida de um estudo técnico-econômico acurado. Para construir uma nova central, existe um plano inicial para a instalação progressiva de suas máquinas, baseado, geralmente, nas previsões de crescimento das demandas do sistema. A energia a ser produzida e transmitida crescerá, então, também de acordo com esse plano.

No caso de linhas de subtransmissão, ao projetá-las para servir a uma determinada região, deve-se elaborar um estudo da evolução das demandas, que normalmente crescem continuadamente, como se poderá verificar pela curva da Fig. 11.2.

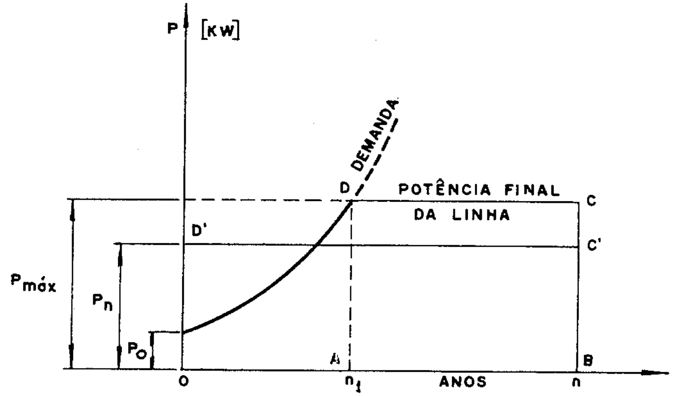


Fig. 11.2 — *Evolução das potências a serem transmitidas.*

Para linhas de interligação de sistemas, devemos também conhecer a evolução das quantias de energia trocadas, que poderão ou não crescer no tempo, dependendo das previsões para os sistemas interligados.

Dessa forma, já que normalmente há um aumento anual nas demandas de energia, acompanhadas, evidentemente, de um aumento na quantidade de energia a ser transmitida, essa variação deverá ser considerada nos cálculos econômicos, pois estes não devem ser realizados nem para a potência inicial, nem para a potência final máxima, e sim para um valor médio. Esse valor médio pode ser obtido, como mostra a Fig. 11.2, a partir da curva $P = f(n)$ de crescimento de demandas. A área *OABCD* representa a energia total transmitida em n anos — E [kWh] — à qual corresponde a área retangular $OBC'D'$, cuja ordenada é P_m [kW]. Então, é como se a linha operasse durante os n anos com uma potência constante P_m [kW] transmitindo, nesse mesmo período, a mesma quantidade de energia E [kWh].

Teremos:

$$E = P_m \cdot n = P_o + \int_o^{n_1} p(n)dn + \int_{n_1}^{n} P_{\text{máx}}\, dn. \qquad (11.4)$$

Se admitirmos uma taxa de crescimento anual de demanda igual a t, em n_1 anos ela será igual a:

$$P_{\text{máx}} = P_o(1+t)^{n_1} = p(n), \qquad (11.5)$$

onde:

$P_{\text{máx}}$ — valor máximo da potência transmissível ao final de n_1 anos;

P_o — potência a ser transmitida inicialmente na entrada de serviço da linha;

t — taxa de crescimento da demanda.

Da Eq. (11.5) podemos obter o valor de n_1, limite superior das integrais da Eq. (11.4):

$$\frac{P_{\text{máx}}}{P_o} = (1+t)^{n_1}$$

ou

$$n_1 = \frac{Ln \dfrac{P_{\text{máx}}}{P_o}}{Ln\,(1+t)}. \qquad (11.6)$$

Se P_m [kW] é a potência média transmitida nos n anos, a potência perdida será:

$$\Delta P_m = 3 I_m^2 R = 3\left[\frac{P_m}{\sqrt{3}\, U \cos\phi}\right]^2 \cdot R; \qquad (11.7)$$

considerando o ano 8 760 horas, a energia perdida será, em n anos:

$$E_n = 3 \cdot 8\,760\, n\, R \left[\frac{P_m}{\sqrt{3}\, U \cos\phi}\right]^2 \cdot R \text{ [kWh]} \qquad (11.8)$$

ou, em média por ano:

$$E'_m = 3 \cdot 8\,760\, R \left[\frac{P_m}{\sqrt{3}\, U \cos\phi}\right]^2 \text{ [kWh/ano]}. \qquad (11.9)$$

O $\cos\phi$, nessas expressões, é o fator de potência no receptor da linha. A resistência R [ohm] é a resistência à corrente alternada na freqüência do sistema, à temperatura de 75°C.

Nas Tabs. III (Ap. III) encontram-se os seus valores unitários em [ohm/km], para corrente contínua e corrente alternada para condutores padronizados. A correção para efeito de temperatura é feita conforme está indicado no Cap. 9.

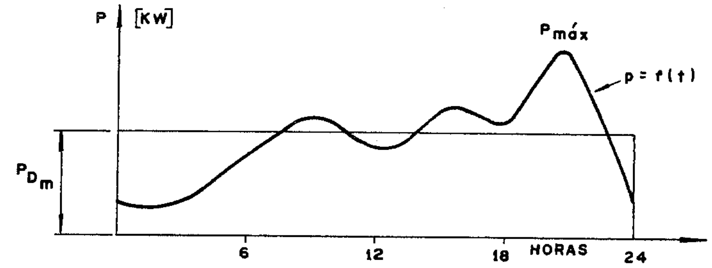


Fig. 11.3 — *Diagrama diário de carga típico.*

A esta altura devemos lembrar que, em um sistema elétrico, as demandas variam de instante a instante, de acordo com as necessidades dos consumidores. Se registrarmos em um dia típico essa variação, obteremos um diagrama do tipo indicado na Fig. 11.3. Esse diagrama varia de dia para dia, de mês para mês. Seja, por exemplo P_{D_m} [kW] o valor da ordenada média do diagrama diário de carga e $P_{D_{\text{máx}}}$ o valor da ordenada máxima; definimos como *fator de carga diário* a relação:

$$FC = \frac{P_{D_m}}{P_{D_{\text{máx}}}} \qquad (11.10)$$

para:

$$P_{D_m} = \frac{1}{n}\int_o^t P(t)dt. \qquad (11.11)$$

Se traçarmos diagramas para as demandas semanais, mensais ou anuais, poderemos determinar fatores de carga semanais, mensais ou anuais.

O fator de carga é uma característica de cada sistema, pois reflete o comportamento dos consumidores quanto ao consumo de energia elétrica, como também a capacidade do sistema para atendê-los. É uma grandeza que pode variar no tempo, variação essa difícil de ser prevista a longo prazo. De um modo geral. é baixo em regiões de pouca atividade industrial — menor do que 0,5 — e mais elevado em regiões altamente industrializadas. Quanto maior o número de indústrias de ciclo contínuo, mais elevado será. Os fatores de carga diários, semanais e mesmo mensais sofrem também variações sazonais.

Para os cálculos econômicos adota-se normalmente o fator de carga anual, geralmente menor do que o de um dia útil normal, porém mais uniforme do que os demais, pelo que pode ser considerado fixo durante o período em exame.

A expressão para o cálculo da energia anual perdida será:

$$E = 3 \cdot 8\,760 \cdot R \cdot FC \left(\frac{P_m}{\sqrt{3}\,U\cos\phi}\right)^2 \cdot 10^{-3} \text{ [kWh/ano]}. \qquad (11.12)$$

11.3.3 — Determinação do Preço da Energia Perdida

É talvez a parte mais crítica do estudo econômico: quanto maior for o valor atribuído ao preço da energia perdida, tanto maiores serão as bitolas dos condutores e, portanto, maior será também o montante dos investimentos necessários. Estes são influenciados de forma direta pelo próprio custo dos condutores e estruturas, como também pelo custo dos investimentos indispensáveis ao suprimento da energia reativa, se necessária (compensação) para a manutenção das tensões.

Utilizam-se vários critérios para a fixação desse preço, que podem conduzir a resultados diferentes:

1 — a energia perdida é considerada como lucro que a empresa deixa de auferir. Neste caso, determina-se o lucro global industrial da empresa, por ano, dividindo-se esse montante pelo número de kWh vendidos no mesmo período, obtendo-se, então, um índice unitário do lucro que a empresa deixa de alcançar em virtude das perdas;

2 — o preço da energia perdida é fixada em função de seu custo real no ponto de entrega (transmissor da linha).

Considera-se o preço do kWh como sendo composto de duas partes:

a — uma parte variável, denominada *custo de produção*, que é proporcional ao número de kWh produzidos. Essa parte é fundamental nos sistemas de energia térmica e mistos, pois inclui o custo do combustível. Nos sistemas hidroelétricos será secundária, porém, no caso de armazenamento d'água por recalque, poderá também ter importância decisiva, pois o custo d'água assim armazenada influencia decisivamente o custo de produção do kWh;

b — uma segunda parte proporcional à potência máxima perdida. Esta, nos sistemas hidroelétricos, é fundamental. A necessidade da empresa de manter uma *capacidade* de geração suficiente para suprir essas perdas reduz a sua potência disponível junto aos centros de consumo. Assim, considera-se a parcela de investimento necessário para suprir as perdas e calcula-se sobre o mesmo uma quota anual, que será rateada pelo número de kWh perdidos por ano. Essa parcela do investimento deverá ser calculada sobre o custo de todas instalações de produção e obras correlatas, até o ponto de entrega da energia. A parcela anual correspondente, em geral, é tomada como uma taxa fixa I, que inclui, além da amortização do investimento, a remuneração do capital e as despesas de operação, que comumente independem do montante de kWh produzidos.

Para o primeiro caso, se Cr\$ l_p for lucro por [kWh] que a empresa deixa de realizar teremos:

$$CE = \text{Cr\$}\,8\,760 \cdot 3 \cdot R \cdot FC \cdot l_p \cdot 10^{-3} \left(\frac{P_m}{\sqrt{3}\,U^{\Delta}\cos\phi}\right) \text{ por ano.} \qquad (11.13)$$

Para o segundo caso, teremos:

$$CE = \text{Cr\$}\,8\,760 \cdot 3 \cdot R \cdot FC \cdot C_p \cdot 10^{-3} \left(\frac{P_m}{\sqrt{3}\,U^{\Delta}\cos\phi}\right)^2 +$$

$$+ 3 \cdot R \cdot I \cdot C_s \cdot 10^{-3} \left(\frac{P_M}{\sqrt{3}\,U^{\Delta}\cos\phi}\right)^2 \text{ por ano,} \qquad (11.14)$$

em que:

C_p — custo de produção de 1 [kWh];

I — taxa anual fixa;

C_s [Cr\$] — custo da instalação até o ponto de entrega por kW instalado;

P_M [kW] — potência máxima transmitida;

P_m [kW] — potência média transmitida;

U^{Δ} [kW] — tensão nominal da linha.

No caso de uma linha de interligação de sistemas, somente a primeira parte da Eq. (11.14) será usada, sendo C_p considerado o preço que a empresa adquirente de energia terá que pagar à fornecedora, no seu ponto de entrega.

Em virtude do contínuo aumento no custo de produção da energia devido ao aumento nos custos dos combustíveis, salários etc., pode-se introduzir um *fator de penalidade*, empregando-se nas Eqs. (11.13) e (11.14), ao invés de C_p:

$$C_p (1 + t_e)^n, \tag{11.15}$$

sendo:

t_e — taxa anual de aumento dos custos de produção da energia elétrica.

Também o equipamento de geração e transformação tem sofrido aumentos constantes em seus preços, sendo, pois, lícito efetuar-se uma correção no custo da instalação através de novo *fator de penalidade*, empregando-se:

$$C_s (1 + t_i)^n \tag{11.16}$$

em lugar de C_s, simplesmente.

11.4 — CÁLCULO DE CUSTO DA INSTALAÇÃO

O custo anual da instalação é composto dos seguintes elementos:

— custo da obra, em quotas anuais;

— encargos financeiros anuais;

— custo anual de manutenção e operação.

Para cada transmissão há sempre diversas soluções aceitáveis sob o ponto de vista técnico. Assim, pode-se escolher entre diversos tipos de estruturas metálicas, entre estruturas metálicas e concreto ou madeira, podendo-se inclusive, para cada combinação de tipo de estruturas e condutores, determinar os vãos médios mais adequados. Há também margem para escolha entre tipos de condutores e, nas linhas até 500 [kV], entre duas linhas a circuito simples ou uma linha a circuito duplo. O projetista não deverá desconsiderar qualquer solução tecnicamente viável; dado o vulto dos investimentos, economias porcentualmente pequenas podem representar importâncias consideráveis em dinheiro.

Quanto às estruturas metálicas, soluções com estruturas padronizadas da própria empresa devem ser preferidas, principalmente para linhas em que o número de estruturas necessárias é pequeno. Mesmo admitindo-se que seria possível realizar economia com o emprego de outro tipo, o custo de um projeto detalhado de fabricação pode absorver as vantagens daí decorrentes, exceto, naturalmente, se houver previsão para ser adotado, no futuro, o novo tipo de estrutura como padrão. Nesse caso, esse fato será considerado nos estudos.

Às vezes prefere-se calcular apenas o montante dos investimentos previstos, multiplicando-o pela mesma taxa anual fixa I usada para a determinação do preço do kWh perdido (Item 11.3.3), a fim de obter a parcela anual de investimento. Essa taxa fixa poderá ser diferente da primeira se englobar a amortização, remuneração do capital e encargos financeiros. Despesas de conservação e operação às vezes são incluídas. Fatores de penalidade, se incluídos nos cálculos das perdas, também aqui deverão ser incluídos.

11.4.1 — Custo Anual das Linhas de Transmissão — C_o

Deverão ser realizados diversos estudos, um para cada solução viável, contendo, além de uma estimativa da vida útil da instalação, um orçamento bastante real da obra, devendo abranger os seguintes itens:

a — estudos e projetos;

b — administração e fiscalização da obra;

c — desapropriações;

d — custo dos materiais, inclusive seguros e transportes:

— estruturas;

— cabos condutores e pára-raios;

— ferragens e isoladores;

— fundações;

— aterramento das estruturas;

— vias de acesso e de serviço;

— equipamento de compensação;

e — mão-de-obra, inclusive encargos sociais e trabalhistas. Se for serviço a ser empreitado, considerar também os sobrepreços para empreiteiros:

— reconhecimento e levantamento topográfico;

— locação no campo;

— desmatamento e limpeza de faixas;

— execução de fundações;

— execução de aterramentos e medida de resistência de terra;

— montagem de estruturas;

— lançamento, esticamento e nivelamento dos cabos;

— armamento dos cabos;

— revisão final.

A maioria das empresas organizadas, como também escritórios técnicos de projetos e firmas empreiteiras, possuem cadernos de encargos atualizados, o que reduz enormemente o trabalho necessário aos orçamentos. Quanto maior a experiência do projetista e sua equipe, tanto mais seguros os resultados [10].

11.4.2 — Encargos Financeiros — C_b

Devemos incluir neste item todas as despesas de natureza financeira que venham a incidir sobre a obra, destacando-se:

a — despesas para a obtenção de financiamentos, taxas, emolumentos etc., incidentes sobre os mesmos;

b — juros passivos totais até o final da amortização dos empréstimos.

11.4.3 — Manutenção e Operação — C_m

É usual incluir também, no custo global, as despesas previstas para a manutenção e operação das linhas, estimadas para o mesmo prazo admitido para a amortização do investimento.

Em um estudo comparativo em que se pesa o emprego de estruturas de madeira, concreto ou aço, é usual escolher uma mesma vida útil para todas e igual à mais longa, incluindo-se neste item o custo da substituição sucessiva de estruturas de madeira, à medida que isso se fizer necessário.

A limpeza periódica das faixas de serviço, cuja largura pode variar nas diversas soluções, também deverá ser considerado. Nas empresas que operam razoável quilometragem de linhas existe uma seção de operação e manutenção de linhas, cujo custo operacional por ano será rateado entre as linhas existentes e a linha em estudo, para ser incluído nos estudos econômicos.

11.4.4 — Custo Anual da Linha de Transmissão

Sendo n o número de anos fixados como vida útil da linha, o custo anual da linha será:

$$C_a = \text{Cr\$}\ \frac{1}{(1+i)^n}\ [(C_o + C_m)\,(1 + t_i)^n + C_f] \text{ por ano,} \tag{11.17}$$

onde:

C_o — custo inicial da instalação de transmissão;

C_m — custo de manutenção e operação;

t_i — taxa anual de aumento de custos;

C_f — despesas financeiras;

i — taxa de recuperação do capital.

No caso em que estudarmos comparativamente soluções com tensões diferentes, em C_o, deveremos incluir os custos das subestações elevadoras e abaixadoras.

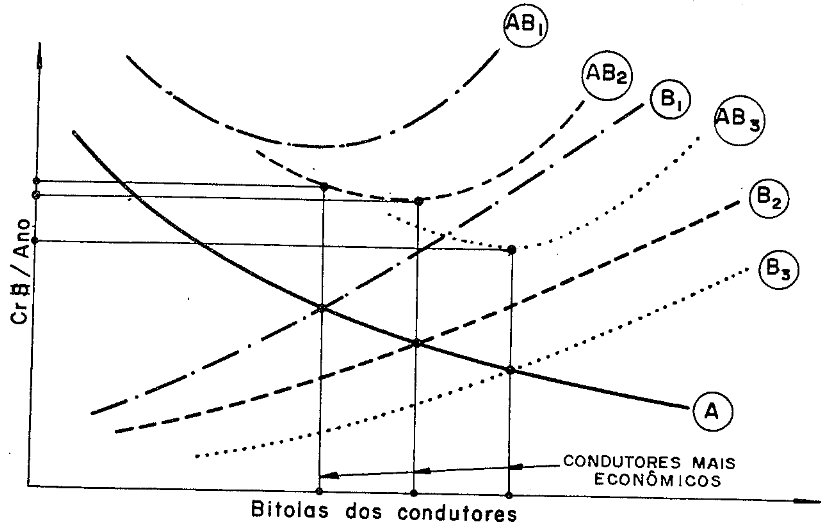


Fig. 11.4 — *Curvas custo de perdas × custo das instalações para várias soluções.*

Para cada bitola de condutores e para cada solução examinada encontraremos um valor de C_a. Se, para cada uma das soluções, traçarmos uma curva $C_a = f$ (bitola), teremos um gráfico do tipo indicado na Fig. 11.4 (curvas B_1, B_2 e B_3), podendo-se então determinar os mínimos para cada par, obtendo as curvas de custos incrementais AB_1, AB_2, AB_3.

11.5 — LINHAS COM COMPENSAÇÃO

Em linhas de transmissão para as quais se prevê a compensação por reatores indutivos ou por bancos de capacitores, série ou paralelo, ou mesmo condensadores síncronos, o custo desse equipamento deverá ser incluído no cálculo do custo anual da linha. Sua presença atua sobre a corrente na linha, conseqüentemente sobre o montante das perdas, devendo ser considerado no cálculo de seu valor anual. As capacidades desses compensadores são funções dos parâmetros elétricos das linhas. Portanto, para cada tipo de configuração dos condutores haverá custos de equipamentos diferentes, diferença essa que não pode ser desprezada.

11.6 — CONDUTORES ALUMÍNIO-AÇO

Estes cabos são fabricados com diferentes proporções de alumínio-aço para uma mesma secção de alumínio, podendo ter resistências diferentes e custos unitários também diferentes. Nesses casos, as curvas de custos incrementais deverão ser feitas para cada uma das composições consideradas, pois haverá curvas A e B diferentes para cada uma. As curvas incrementais de cada caso serão, então, comparadas para a obtenção da solução mais econômica.

11.7 — DADOS ORIENTADORES PARA ESTUDOS ECONÔMICOS

Um exame das características das linhas de tensões extra-elevadas em operação em diversos países nos permite obter uma série de dados bastante interessantes, apropriados para estudos econômicos orientadores.

11.7.1 — Densidade Econômica de Correntes

Um levantamento realizado na Europa, com relação à densidade de corrente de linhas de tensões extra-elevadas, indicou uma faixa de 0,6 a 0,8 [A/mm^2] como mais econômica para linhas operando com sua potência natural. Servem como orientação, para cabos CAA [2]:

Para

380/420 [kV] secção de + 1 200 [mm^2];

500/520 [kV] secção de + 1 600 [mm^2];

700/765 [kV] secção de + 2 200 [mm^2].

11.7.2 — Custo das Estruturas das Linhas de Transmissão

O custo total das estruturas de linhas de transmissão de uma mesma classe de tensão pode variar enormemente, pois depende de uma série de fatores, dentre os quais se destaca o da escolha dos materiais. Até na classe de 330/345 [kV] são empregadas estruturas de madeira, concreto armado, treliças de aço e tubulares de aço, enquanto que, para as classes de tensões mais elevadas, se usam exclusivamente estruturas dos dois últimos tipos. No caso de uma análise econômica em que os três tipos de materiais são considerados, é de toda a conveniência efetuar a otimização individualmente, e em seguida optar, entre as soluções otimizadas, por aquelas que forem consideradas as mais convenientes.

Uma vez que é nos níveis mais altos de tensões que o problema da otimização se torna mais crítico, dado o vulto dos investimentos envolvidos e a quantidade de energia a ser transportada, convém analisar com mais detalhe o problema que envolve o uso das estruturas metálicas. Estas são usualmente comparadas em termos de peso por quilômetro de linha, ou por uma centena de quilômetros de linha. Esse peso depende fundamentalmente dos seguintes fatores (ver Cap. 2):

a — número de circuitos — linhas a circuito simples ou duplo;

b — forma de resistir — estruturas autoportantes rígidas, semi-rígidas e elásticas e estruturas estaiadas;

c — dimensões, pesos e resistências mecânicas dos cabos condutores e pára-raios;

d — material estrutural empregado — alumínio e suas ligas, aço-carbono normal ou aço-liga de alta resistência;

e — nível básico de isolamento — as distâncias entre condutores e peças estruturais e posição dos cabos pára-raios são definidas em função do desempenho desejado em face das tensões de exercício e sobretensões. Definem, pois, as dimensões globais das estruturas;

f — normas técnicas adotadas para os cálculos mecânicos — os fatores de segurança variam bastante de país para país.

Para cada tipo de estrutura considerada deve-se, além do mais, determinar o vão médio mais econômico. Dele dependerá, em última análise, o peso total da linha.

Dos fatores acima enumerados, os quatro primeiros são preponderantes. O quinto fator concorreu, nos últimos 15 anos, pelo melhor conhecimento que se adquiriu sobre o comportamento dos isolamentos das linhas face às diversas sobretensões a que estão sujeitas, para uma substancial redução nas dimensões e pesos das estruturas. Para isso também concorreram um melhor entendimento das forças em jogo e os processos de otimização de cálculo de estruturas empregando computadores digitais.

Uma idéia da evolução os pesos das estruturas do tipo autoportante rígido é fornecida pelos seguintes elementos:

1930-1932 — classe 69 [kV] — 14 [t/km] — circuito simples;

1956-1957 — classe 138 [kV] — 10,5 [t/km] — circuito duplo;

1960 — classe 345 [kV] — 14 [t/km] — circuito simples;

1962 — classe 345 [kV] — 12,5 [t/km] — circuito simples.

As diversas tentativas realizadas para equacionar os inúmeros fatores que influem no peso das estruturas, a fim de permitir uma determinação preliminar da tonelagem de estruturas por quilômetro de linhas [12], não são inteiramente satisfatórias, em virtude do número excessivo de parâmetros intervenientes e do número de estruturas em uso.

Um projeto de otimização técnico-econômica de uma linha, no que se refere às estruturas, deveria ser baseado em estruturas bem dimensionadas para cada tipo de estruturas e classe de tensão. Seria uma espécie de *caso-base*, definido para uma determinada configuração e bitola dos cabos condutores, dos cabos pára-raios e dos parâmetros básicos de projeto, como vãos gravantes, altura dos condutores sobre o solo, nível básico de isolamento, grau de cobertura pelos pára-raios, solicitações pelos condutores etc. Para esse mesmo tipo de estrutura seriam feitos dimensionamentos alternativos, variando-se os diversos parâmetros isoladamente e novos pesos determinados. Seria então possível obter um *fator de correção* de peso a ser aplicado ao peso do *caso-base*, para obter os pesos das estruturas para cada solução a ser examinada. Teríamos, assim, fatores de correção para:

a — variação de altura;

b — variação do vão gravante;

c — variação dos pesos dos condutores e pára-raios;

d — variação dos diâmetros dos condutores e pára-raios;

e — variação do número de subcondutores;

f — variação das distâncias entre fases;

g — variação dos ângulos de cobertura dos cabos pára-raios;

h — etc.

O custo mínimo anual da transmissão não é afetado igualmente por todos os fatores de correção possíveis. Os acima enumerados são aqueles que maior influência exercem.

11.8 — CONSIDERAÇÕES FINAIS

O problema do dimensionamento econômico dos condutores das linhas não é novo. Já Lord Kelvin se preocupou com o mesmo ao estabelecer sua famosa lei: *a transmissão mais econômica ocorre quando as perdas anuais de energia são iguais em valor aos encargos financeiros anuais decorrentes da aquisição dos condutores.* Para sua época, era evidentemente correta e simples de ser aplicada.

A complexidade das modernas linhas tornou essa otimização igualmente complexa, e só o emprego dos processos automáticos de cálculo é que torna viável um estudo desse tipo com o rigor que merece. Existem no mercado de *know-how* programas bastante elaborados para a otimização das linhas aéreas de transmissão, que podem ser adquiridos ou usados em casa pelos interessados. Um preparo de programa desse tipo não

oferece, no entanto, dificuldades maiores, exceto o investimento em tempo de pessoal especializado. O trabalho realizado nesse sentido pelos engenheiros da CEMIG (Referência 14) é excelente e, por isso mesmo, poderá ser usado como modelo para programas desse tipo, dispensando-se novas importações de *know-how* e consultorias estrangeiras, nem sempre mais eficientes do que a prata de casa.

11.9 — BIBLIOGRAFIA

1 — Central Station Engineers — Electrical Transmission and Distribution Reference Book. Westinghouse, East Pittsburgh, 1950 4.ª edição.

2 — Rudolf Rahnt — *Technische und Wirstschaftliche Gesichtspunkte für die Energieübertragung mit Höchstspannungen.* Revista Siemens, Berlim, set. 1966.

3 — Biermans, J. — *Energieübertragung auf Grosse Enfternungen.* Verlag G. Braun, Karlsruhe, 949.

4 — Paris, L. e Comellini, E. — *Cost Reduction of Extra High Voltage Lines.* Cigré, Paris, 1966, n.º 422, Vol. 3, 21.ª Reunião.

5 — Crary, S. B. e Johnson, I. B. — *Economics of Long Distance A. C. Power Transmission.* AIEE Transactions, Nova Iorque, 1947 Vol. 66. Págs. 1 092-1 099.

6 — Stclair, H. P. e Peterson, E. L. — *System Economics of Extra High Voltage Transmission.* AIEE Transactions, Nova Iorque, 1951. Vol. 70. Parte I. Págs. 841-851.

7 — Henderson, J. M. e Wood, A. J. — *An Economic Study of High Voltage Transmission.* AIEE Transactions, Nova Iorque, 1956. Vol. 75. Parte III. Págs. 695-704.

8 — ———— *Conductor Economics on High Voltage Transmission Systems.* AIEE Transactions, Nova Iorque, 1957. Vol. 76. Parte III. Págs. 502-508.

9 — Abetti, P. A. e outros — *Economics of Single and Bundle Conductors for Extra High Voltage Transmission.* AIEE Transactions, Nova Iorque, nov. 1960. Vol. Pas 79. Parte III. Págs. 53-60.

10 — CAEEB — *Diretrizes para Estimativa de Custos de Investimento em Sistemas de Transmissão.* Eletrobrás, Rio de Janeiro, Trabalho Especial n.º 13, out. 1972.

11 — Projeto EHV — *EHV Transmission Reference Book.* Edison Electric Institute, Nova Iorque, 1968.

12 — Peterson. W. S. — *Une Formule pour Estimation du Poids des Pylones et son Application a l'Étude des Conditions Economiques d'Établissement d'une Ligne de Transport d'Energie.* Relatório n.º 218, 13.ª Reunião, Paris, 1950. Vol. II.

13 — Campos, G. L. Ivanoff, De Jardini, J. A. — *Computadores Digitais em Sistemas de Transmissão.* Mundo Elétrico, São Paulo, maio 1970, n.º 71.

14 — Nolasco, J. F. e Veranada Silva Neto, J. — *Estudo de Otimização das Linhas de Transmissão de 500 [kV] da CEMIG.* III Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Curitiba, 1975.

Apêndice I

UNIDADES RELATIVAS — SISTEMA POR UNIDADE

O valor *por unidade* de qualquer grandeza é definido como a relação dessa grandeza e uma outra de mesma dimensão, escolhida arbitrariamente, denominada *valor-base*. Assim sendo, um valor *por unidade* é adimensional. Normalmente se indicam os valores-base pelo índice b e os valores em *por unidade* pelo prefixo *pu*.

Assim, se uma tensão $\dot{U}$ [V] alimentar uma corrente $\dot{I}$ [A] a uma carga monofásica representada por uma impedância $\dot{Z}$ [ohm], e se uma tensão-base U_b [V] for escolhida, a tensão em *por unidade* será:

$$\text{pu } \dot{U} = \frac{\dot{U}}{U_b}. \tag{I.1}$$

Igualmente, para a corrente poderá ser escolhida uma base I_b [A], de forma a se ter:

$$\text{pu } \dot{I} = \frac{\dot{I}}{I_b} \tag{I.2}$$

Também existe, evidentemente, uma base para a impedância, $Z_b = U_b/I_b$ [ohm]. Aplicando no sistema *por unidade*, será:

$$\text{pu } \dot{Z} = \frac{\dot{Z}}{Z_b} = \frac{\dot{U}/\dot{I}}{U_b/I_b} = \frac{\dot{U}/U_b}{\dot{I}/I_b} = \text{pu } \frac{\dot{U}}{\dot{I}}. \tag{I.3}$$

Portanto, o sistema *por unidade* obedece à lei de ohm e, conseqüentemente, também às outras leis dos circuitos elétricos.

Um valor de 1,0 pu de qualquer grandeza é igual ao valor-base da mesma, donde se conclui que os valores por unidade são relativos à unidade. Se multiplicarmos os valores por unidade por 100, obteremos valores porcentuais (%) que são relativos a 100. É fácil verificar que a lei de ohm não pode ser aplicada com valores porcentuais, daí a conveniência da conversão desses valores para o sistema por unidade, sempre que venham especificados em *por cento*.

A escolha dos valores-base é arbitrária, não devendo, porém, influenciar os resultados finais. Uma vez que:

$$Z_b = \frac{U_b}{I_b},$$

somente duas quaisquer dessas grandezas é que podem ser escolhidas arbitrariamente como valores-base. A terceira será por elas definida.

Não podemos, por outro lado, descuidar do fato de que as grandezas empregadas têm um caráter complexo, representadas por fasores e cuja natureza não pode ser alterada. Logo, as grandezas-base devem ser números reais (módulos) a fim de que as grandezas em *por unidade* possam representar fasores.

Na solução de problemas relacionados com sistemas de energia elétrica, é usual a escolha como base das seguintes grandezas:

a — uma tensão entre fases, U_b^Δ, em [kV];

b — uma potência aparente trifásica, N_b, em [MVA].

Tem-se então:

$$N_b = \sqrt{3}\, U_b^{\Delta[\text{kV}]} \cdot I_b^{[\text{A}]} \cdot 10^{-3} \text{ [MVA]};$$

logo,

$$I_b = \frac{N_b^{[\text{MVA}]} \cdot 10^3}{\sqrt{3}\, U_b^{\Delta\,[\text{kV}]}} \text{ [A]}. \tag{I.4}$$

Como os cálculos com o emprego dos circuitos equivalentes devem ser realizados com valores de fase das tensões correntes e impedâncias, teremos:

$$\text{pu } \dot{U} = \frac{\dfrac{U^\Delta}{\sqrt{3}}}{\dfrac{U_b^\Delta}{\sqrt{3}}} = \frac{U^\Delta}{\dot{U}_b^\Delta};$$

$$\text{pu } I = \frac{I}{I_b} = \frac{I}{\dfrac{N_b^{[\text{MVA}]} \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot U_b^{\Delta[\text{kV}]}}} = \frac{\sqrt{3}\, U_b^{\Delta[\text{kV}]} \cdot I^{[\text{A}]}}{10^3 N_b^{[\text{MVA}]}}. \tag{I.5}$$

Como também:

$$Z_b = \frac{U_b^{\Delta\,[\text{kV}]}}{\sqrt{3}\, I_b^{[\text{A}]}} \cdot 10^3 \text{ [ohm]},$$

teremos:

$$\text{pu } Z = \frac{Z}{\dfrac{U_x^{\Delta\,[\text{kV}]} \cdot 10^3}{\sqrt{3}\, I_b^{[\text{A}]}}} = Z \frac{\sqrt{3}\, I_b^{[\text{A}]}}{U_b^{\Delta[\text{kV}]}} \cdot 10^{-3}. \tag{I.6}$$

Quando as potências são especificadas de forma complexa, temos, de acordo com a definição IEEE, para o caso de carga indutiva:

$$\dot{N} = P + jQ = 3\, \frac{U^{[\text{kV}]}}{\sqrt{3}} \cdot \overset{*}{I}^{[\text{A}]} \cdot 10^{-3} = \sqrt{3}\, U^{[\text{kV}]}\, \overset{*}{I}^{[\text{A}]} \cdot 10^{-3} \quad \text{[MVA]};$$

teremos:

$$\text{pu}\,\dot{N} = \frac{\dot{N}^{[\text{MVA}]}}{N_b^{[\text{MVA}]}} = \frac{\sqrt{3}\,U^{[\text{kV}]}\,I^{[\text{A}]}\cdot 10^{-3}}{\sqrt{3}\,U_b^{[\text{kV}]}I_b^{[\text{A}]}\cdot 10^{-3}} = \text{pu}\,\dot{U}\cdot\text{pu}\,\dot{I}; \qquad (\text{I}.7)$$

e também:

$$\text{pu}\,\dot{N} = \frac{P^{[\text{MW}]}+jQ^{[\text{MVAr}]}}{N_b^{[\text{MVA}]}} = \frac{P^{[\text{MW}]}}{N_b^{[\text{MVA}]}} + j\,\frac{Q^{[\text{MVAr}]}}{N^{[\text{MVA}]}};$$

logo,

$$\text{pu}\,N = \text{pu}\,P + j\,\text{pu}\,Q. \qquad (\text{I}.8)$$

Exemplo

Um alternador trifásico com potência nominal de 50 [MVA] opera com tensão nominal de 11 [kV], possuindo uma reatância síncrona de 20%. Uma linha de transmissão aérea, cuja impedância é de 0,14 + j0,32 [ohm/km] e comprimento de 10 [km], é por ele alimentada. Traçar o diagrama unipolar equivalente, usando como bases 50 [MVA] e 11 [kV].

Temos os seguintes valores em pu:

A — tensão do gerador:

$$\text{pu}\,U = \frac{U}{U_b} = \frac{11}{11} = 1;$$

B — reatância síncrona do gerador: pu $X_a = j2{,}0$, pois está especificada em (%) com base na potência e tensões nominais dos geradores;

C — impedância da linha:

a — pela expressão:

$$\text{pu}\,Z_L = \frac{Z}{Z_b},$$

sendo:

$$Z_b = \frac{U_b^{[\text{kV}]}\cdot 10^3}{\sqrt{3}\,I_b}$$

$$I_b = \frac{N_b^{[\text{MVA}]}\cdot 10^3}{\sqrt{3}\cdot 11} = \frac{50\cdot 10^3}{\sqrt{3}\cdot 11} = 2\,627\ [\text{A}];$$

$$Z_b = \frac{11\cdot 10}{\sqrt{3}\,I_b} = \frac{11\,000}{2\,627\,\sqrt{3}} = 2{,}42\ [\text{ohm}];$$

$$\text{pu}\,Z_L = \frac{0{,}14 + j0{,}32}{2{,}42} = 0{,}0578 + j0{,}132\ [\text{p/km}]$$

para 10 [km] de linha:

$$\text{pu}\,Z_L = 10(0{,}0578 + j0{,}132) = 0{,}578 + j1{,}32;$$

b — pela expressão (I.6):

$$\text{pu}\,Z = Z\,\frac{\sqrt{3}\,I_b^{[\text{A}]}}{U_b^{\Delta[\text{kV}]}}\cdot 10^{-3} = (0{,}14 + j0{,}32)\,\frac{2\,627\sqrt{3}}{11}\cdot 10^{-3}$$

$$\text{pu}\,Z = 0{,}0578 + j0{,}132\ [\text{p/km}].$$

I.1 — MUDANÇAS DE BASES

As impedâncias e reatâncias das máquinas e aparelhos elétricos são sempre especificadas em *por cento* ou *por unidade*, tendo como valores-base suas características nominais; estas, no caso de máquinas ou aparelhos monofásicos, serão suas potências monofásicas e tensões nas fases e, no caso de máquinas e aparelhos trifásicos, serão as potências trifásicas e as tensões entre fases.

Para a solução de problemas em sistemas, é necessário que todas as grandezas sejam expressas em pu, porém em bases comuns, únicas para todo o sistema. Daí a necessidade da mudança de bases.

Seja pu Z_1 uma impedância *por unidade* expressa em *função das grandezas* nominais de uma máquina U_b e N_b, e sejam U_B e N_B a base geral do sistema. Temos:

$$\text{pu}\,Z_2 = Z\,\frac{N_B^{[\text{MVA}]}}{[U_B^{[\text{kV}]}]^2};$$

como, porém:

$$\text{pu}\,Z_1 = \frac{Z}{Z_b},$$

temos:

$$Z = \text{pu}\,Z_1\cdot Z_b;$$

logo,

$$\text{pu}\,Z_2 = \text{pu}\,Z_1\cdot Z_b\,\frac{N_B^{[\text{MVA}]}}{U_B^{[\text{kV}]}}\cdot 10^3;$$

como, porém:

$$Z_b = \frac{10^3\, U_B^{[\mathrm{kV}]}}{\sqrt{3}\, I_b^{[\mathrm{A}]}} = \frac{10^3\, U_b^{[\mathrm{kV}]}}{\dfrac{\sqrt{3} N_b^{[\mathrm{MVA}]} \cdot 10^3}{\sqrt{3}\, U_b^{[\mathrm{kV}]}}} = \frac{(U_b^{[\mathrm{kV}]})^2}{N_b^{[\mathrm{MVA}]}} ;$$

logo,

$$\text{pu } Z_2 = \text{pu } Z_1 \cdot \frac{N_B^{[\mathrm{MVA}]}}{N_b^{[\mathrm{MVA}]}} \cdot \frac{(U_b^{[\mathrm{kV}]})^2}{(U_B^{[\mathrm{kV}]})^2} , \qquad (\mathrm{I}.9)$$

em que:

pu Z_1 — impedância como especificada nas bases:

$$U_b^{[\mathrm{kV}]} \quad \text{e} \quad N_B^{[\mathrm{MVA}]};$$

pu Z_2 — impedância alterada para as novas bases:

$$U_B^{[\mathrm{kV}]} \quad \text{e} \quad N_B^{[\mathrm{MVA}]}.$$

Assim:

1 — quando houver a mudança na base de tensão de U_b para U_B, a impedância expressa em função da primeira deve ser multiplicada pela relação entre os quadrados da tensão-base original e da nova tensão-base:

$$\text{pu } Z_2 = \text{pu } Z_1 \frac{(\text{tensão-base dada})^2}{(\text{tensão-base nova})^2} ; \qquad (\mathrm{I}.10)$$

2 — quando houver a mudança na base da potência de N_b para N_B, a impedância expressa em função da primeira deve ser multiplicada pela relação entre a potência-base nova e a potência-base dada:

$$\text{pu } Z_2 = \text{pu } Z_1 \frac{(\text{potência-base nova})}{(\text{potência-base dada})} ; \qquad (\mathrm{I}.11)$$

3 — quando a mudança de base foi simultaneamente de tensão e de potência, a impedância original será multiplicada por ambas as relações:

$$\text{pu } Z_2 = \text{pu } Z_1 \frac{\text{potência-base nova}}{\text{potência-base dada}} \cdot \frac{(\text{tensão-base dada})^2}{(\text{tensão-base nova})^2} .$$

Exemplo

Se, no exemplo anterior, a reatância síncrona tivesse sido expressa 2,0 pu na base de $N_N = 12{,}8$ [kV] e as bases gerais escolhidas fossem 100 [MVA] e 11 [km], teríamos:

para o gerador: pu $X_G = 2{,}0 \cdot \dfrac{100}{50} \cdot \dfrac{(12{,}8)}{(11)} = 2{,}0 \cdot 2 \cdot 1{,}35 = 5{,}4$ pu;

para a linha: o processo de cálculo é o mesmo, alterando-se as bases.

Apêndice II

CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DOS CABOS CONDUTORES

Tabela II.1 — Características Mecânicas — Cabos de Cobre nus — Têmpera Dura — 97,3% de Condutibilidade

Bitola MCM × 10^3	*Bitola* AWG		*Diâmetro do tento* (mm)	*Diâmetro do cabo* (mm)	*Secção do cabo* (mm²)	*Peso do cabo* (kg/km)	*Carga de ruptura mínima* (kg)
1 000		37	4,17576	29,235	506	4,595	19,881
900		37	3,9624	27,7368	456	4,135	17,921
800		37	3,7338	26,1366	405	3 676	15,930
750		37	3,6169	25,3238	380	3,447	15,150
700		37	3,4925	24,4602	354	3,216	14,138
600		37	3,2334	22,6314	304	2,757	12,256
500		37	2,9514	20,6756	253	2,297	10,210
500		19	4,1198	20,5994	253	2,297	9,793
450		19	3,9090	19,558	228	2,068	8,958
400		19	3,6855	18,4404	202	1,838	7,965
350		19	3,4467	17,2466	177	1,608	7,071
350		12	4,3383	18,034	177	1,608	6,867
300		19	3,1927	15,9766	152	1,378	6,128
300		12	4,0157	16,6878	152	1,378	5,973
250		19	2,9133	14,5796	126	1,149	5,152
250		12	3,6652	15,24	126	1,149	5,048
211,6	4/0	19	2,6797	13,4112	107	972,5	4,362
211,6	4/0	12	3,3731	14,0208	107	972,5	4,301
211,6	4/0	7	4,4170	13,2588	107	972,5	4,152
167,8	3/0	12	3,0048	12,496	85,02	771	3,427
167,8	3/0	7	3,9319	11,7856	85,02	771	3,341
133,1	2/0	7	3,5026	10,5156	67,44	611	2,688
105,5	1/0	7	3,1191	9,3472	53,45	484	2,155
83,69	1	7	2,7762	8,3312	42,41	384	1,725
83,69	1	3	4,2418	9,1440	42,41	380,8	1,642
66,37	2	7	2,4739	7,4168	33,63	305	1,381
66,37	2	3	3,7769	8,128	33,63	301,9	1,321
66,37	2	1		6,5532	33,63	299,1	1,362
52,63	3	7	2,2021	6,604	26,67	241,8	1,103
52,63	3	3	3,3655	7,239	26,67	239,6	1,070
52,63	3	1		5,8166	26,67	237	1,106
41,74	4	3	2,9972	66,4516	21,15	190	8,523
41,74	4	1		5,1816	21,15	188	893,5
33,1	5	3	2,6670	5,7404	16,77	150,5	682,6
33,1	5	1		4,6202	16,77	149,1	721,6
26,25	6	3	2,3749	5,1054	13,30	119,5	546,5
26,25	6	1		4,1148	13,30	118,4	580,6
20,82	7	1		3,665	10,55	93,8	467,2
16,51	8	1		3,2639	8,36	74,4	374,6

Tabela II.2 — Características Mecânicas — Cabos de Alumínio (CA)

Código	*Bitola* MCM × 10^3	*Bitola* AWG	*N.º de tentos*	*Diâmetro do tento* (mm)	*Diâmetro do cabo* (mm)	*Secção do cabo* (mm²)	*Peso do cabo* (kg/km)	*Carga de ruptura mínima* (kg)
Bluebonnet	3 500		127	4,2164	54,813	1 773,49	4,986	26,943
Trillium	3 000		127	3,9039	50,698	1 520,14	4,222	23,042
Bitterroot	2 750		91	4,4145	48,564	1 393,46	3,880	21,137
Lupine	2 500		91	4,2087	46,304	1 266,78	3,524	19,232
Sagebrush	2 250		91	3,9928	43,916	1 140,10	3,174	17,282
Cowslip	2 000		91	3,7642	41,402	1 013,42	2,792	15,694
Jessamine	1 750		61	4,3027	38,735	886,74	2,445	13,471
Dog Wood	1 590		91	3,3578	36,931	805,67	2,222	12,7461
Coreopsis	1 590		61	4,1021	36,931	805,67	2,222	12,247
Gladiolus	1 510,5		61	3,9979	35,991	765,39	2,110	11,612
Carnation	1 431		61	3,8912	35,026	725,10	1,999	11,022
Columbine	1 351,5		61	3,7820	34,036	684,82	1,888	10,614
Narcissus	1 272		61	3,6677	33,020	644,54	1,775	9,979
Hawthorn	1 192,5		61	3,5509	31,953	604,25	1,665	9,525
Marigold	1 113		61	3,4315	30,886	563,97	1,555	8,917
Lark Spur	1 033,5		61	3,3070	29,768	523,68	1,443	8,282
Blue Bell	1 033,5		37	4,2468	29,718	523,68	1,443	8,951
Camelia	1 000		61	3,2512	29,260	506,71	1,397	8,015
Hawkweed	1 000		37	4,1757	29,235	506,71	1,397	7,693
Goldrod	954		61	3,1775	28,600	483,40	1,332	7,647
Magnolia	954		37	4,0792	28,549	483,40	1,322	7,339
Snapdragon	900		61	3,0861	27,787	456,04	1,257	7,212
Cockscomb	900		37	3,9624	27,736	456,04	1,257	6,926
Crocus	874,5		61	3,0429	27,381	443,12	1,221	7,148
Anemone	874,5		37	3,9065	27,355	443,12	1,221	6,726
Lilac	795		61	2,9006	26,111	402,83	1,110	6,500
Arbutus	795		37	3,7236	26,060	402,83	1,110	6,246
Cattail	750		61	2,8168	25,349	380,03	1,047	6,121
Petunia	750		37	3,6169	25,323	380,03	1,047	5,892
Nasturtium	715,5		61	2,7508	24,765	362,55	999,6	5,964
Violet	715,5		37	3,5331	24,739	362,55	999,6	5,733
Flag	700		61	2,7203	24,485	354,69	977,2	5,833
Verbena	700		37	3,4925	24,460	354,69	977,9	5,611
Heachera	650		37	3,3655	23,571	329,36	908,3	5,211
Orchid	639		37	3,3299	23,317	322,27	888,5	5,098
Meadowsweet	600		37	3,2334	22,631	304,02	834,02	4,808
Dahlia	556,5		37	3,11401	21,793	281,98	777,5	4,458
	556,5		19	4,3459	21,742	281,98	777,5	4,281
Hyacinth	500		37	2,9514	20,650	253,35	698,5	4,086
Zinnia	500		19	4,1198	20,599	253,35	698,5	3,846
Syringe	477		37	2,8829	20,193	241,70	666,4	3,900
Cosmos	477		19	4,0233	20,142	241,70	666,4	3,669
Goldentuft	450		19	3,9090	19,558	228,02	628,6	3,460
Canna	397,5		19	3,6753	18,389	201,41	554,5	3,120
Daffodil	350		19	3,4467	17,246	177,34	489,1	2,803
Tulip	336,4		19	3,3807	16,916	170,45	469,9	2,694
Peony	300		19	3,1927	15,976	152,01	419,2	2,404
Laurel	266,8		19	3,0099	15,062	135,19	372,6	2,177
Daisy	266,8		7	4,9606	14,884	135,19	372,6	2,165
Vaerian	250		19	2,9133	14,579	126,67	349,2	2,045
Sneezewort	250		7	4,8006	14,401	126,67	349,2	2,032
Oxlip		0000	7	4,4170	13,258	107	295,7	1,719
Phlox		000	7	3,9319	11,785	85	234,5	1,363
Aster		00	7	3,5026	10,515	67	187,5	1,124
Poppy		0	7	3,1191	9,347	53	147,4	893,5
Pansy		1	7	2,7762	8,331	42,4	116,7	737,1
Iris		2	7	2,4739	7,416	33,6	92,7	605,5
Lilly		4	7	1,9608	5,892	21,1	58,3	396,9
Rose		6	7	1,5544	4,673	13,3	36,6	251,7

Tabela II-3 — Características Mecânicas — Cabos Alumínio-Aço (CAA)

Código	Bitola		Secção de cobre equivalente (mm²) ou AWG	Encordoamento					Diâmetro do condutor (mm)	Carga de ruptura (kg)	Peso do condutor (kg/km)
				Alumínio			Aço				
	MCM ou AWG	Secção (mm²)		N.º de fios	N.º de capas	Diâmetr. dos fios (mm)	N.º de capas	Diâmetro dos fios (mm)			
Falcon	1 590	805	506	54	3	4,3586	19	2,6162	39,243	25,401	3,038
Parrot	1 510,5	765	481	54	3	4,2494	19	2,5501	38,252	24,131	2,885
Plover	1 431	725	456	54	3	4,1351	19	2,4815	37,211	22,861	2,734
Martin	1 351,5	684	430	54	3	4,0182	19	2,4104	36,169	21,591	2,582
Pheasant	1 272	644	405	54	3	3,8989	19	2,3393	35,102	20,321	2,430
Grackle	1 192,5	604	380	54	3	3,7744	19	2,2656	33,985	19,550	2,278
Finch	1 113	563	354	54	3	3,6474	19	2,1894	32,842	18,234	2,126
Curlew	1 033,5	523	329	54	3	3,5153	7	3,5153	31,648	16,828	1,978
Cardinal	954	483	304	54	3	3 3756	7	3,3756	30,378	15,513	1,826
Canary	900	456	286	54	3	3,2791	7	3,2791	29,514	14,651	1,723
Crane	874,5	443	278	54	3	3,2334	7	3,2334	29,108	14,243	1,674
Condor	795	402	253	54	3	3,0835	7	3,0835	27,762	12,927	1,522
Drake	795	402	253	26	2	4,4442	7	3,4544	28,143	14,152	1,626
Mallard	795	402	253	30	2	4,1351	19	2,4815	28,956	17,418	1,837
Crow	715,5	362	228	54	3	2,9235	7	2,9235	26,314	11,929	1,369
Starling	715,5	362	228	26	2	4,2138	7	3,2766	26,695	12,746	1,463
Redwing	715,5	362	228	30	2	3.9217	19	2,3520	27,457	15,694	1,653
Gull	666,6	337	212	54	3	2,8219	7	2,8219	25,400	11,113	1,276
Goose	636	322	202	54	3	2,7559	7	2,7559	24,815	10,704	1,217
Grosbeak	636	322	202	26	2	3,9725	7	3,0886	25,146	11,340	1,301
Egret	636	322	202	30	2	3,6982	19	2,2199	25,882	14,288	1,469
Duck	605	306	192	54	3	2,6898	7	2,6898	24,206	10,206	1,158

Tabela II-3 — Continuação

Código	Bitola		Secção de cobre equivalente (mm²) ou AWG	Encordoamento					Diâmetro do condutor (mm)	Carga de ruptura (kg)	Peso do condutor (kg/km)
				Alumínio			Aço				
	MCM ou AWG	Secção (mm²)		N.º de fios	N.º de capas	Diâmetro dos fios (mm)	N.º de fios	Diâmetro dos fios (mm)			
Squab	605,0	306	192	26	2	3,8735	7	3,0124	24,536	10,913	1,237
Dove	556,5	281	177	26	2	3,7160	7	2,8905	23,545	10,160	1,138
Eagle	556,5	281	177	30	2	3,4594	7	3,4594	24,206	12,337	1,293
Heron	500	253	159	30	2	3,2791	7	3,2791	22,961	11,067	1,162
Hawk	477	241	152	26	2	3,4417	7	2,6771	21,793	8,813	0,9759
Hen	477	241	152	30	2	3,2029	7	3,2029	22,428	10,568	1,108
Ibis	397,5	201	126	26	2	3,1394	7	2,4409	19,888	7,343	813,3
Lark	397,5	201	126	30	2	2,9235	7	2,9235	20,472	9,062	923,8
Linnet	336,4	170	107	26	2	2,8905	7	2,2479	18.313	6,373	688,4
Oriole	336,4	170	107	30	2	2,6898	7	2,6898	18,821	7,729	782,0
Ostrich	300	152	95	26	2	2,7279	7	2,1209	17,272	5,738	613,9
Piper	300	152	95	30	2	2,5400	7	2,5400	17,780	6,999	697,1
Partridge	266,8	135	85	26	2	2,5730	7	2,0015	16,306	5,103	545,7
Owl	266,8	135	3/0	6	1	5,3568	7	1,7856	16,078	4,374	508,0
Penguin	4/0	107	2/0	6	1	4,7701	1	4,7701	14,300	4,819	434,7
Pigeon	3/0	85	1/0	6	1	4,2468	1	4,2468	12,750	3,027	444,7
Quail	2/0	67	1	6	1	3,7846	1	3,7846	11,553	2,424	273,4
Raven	1/0	53	2	6	1	3,3705	1	3,3705	10,109	1,941	116,7
Robin	1	42,4	3	6	1	3,0022	1	3,0022	9,017	1,578	171,9
Aparros	2	33,6	4	6	1	2,6720	1	2,6720	8,026	1,265	136,4
—	2	33,6	4	7	1	2,4739	1	3,2994	8,255	1,598	159,5
Swallow	3	26,7	5	6	1	2,3799	1	2,3799	3,137	1,020	108,2
Swan	4	21,1	6	6	1	2,1183	1	2,1183	6,350	830	85,7
—	4	21,1	6	7	1	1,9608	1	2,6136	6,527	1,037	100,3
Thrush	5	16,7	7	6	1	1,8872	1	1,8872	5,664	662	67,9
Turkey	6	13,3	8	6	1	1,6789	1	1,6789	5,029	530	53,8

Tabela II.4 — Características Mecânicas — Cabos de Aço Galvanizados a 7 Fios

Diâmetro		*Secção* (mm²)	*Peso* (kg/km)	*Carga de ruptura mínima* (kg)		
Nominal	*Efetivo* (*m*).			*Comum*	*HS*	*EHS*
1/2″	0,01257	96,58	770	3 350	8 520	12 185
3/8″	0,00914	51,08	410	1 925	4 890	6 980
5/16″	0,00931	42,14	335	1 450	3 620	5 080
9/32″	0,00709	30,68	245	1 160	2 890	4 050
1/4″	0,06096	22,70	180	860	2 150	3 010
3/16″	0,04720	13,63	110	520	1 290	1 770

Nomenclatura ASTM — Espec. *A*. 122.41 e *A*. 218.41.
Dados compilados a partir de *Standard Handbook for Eletrical Engineers A*. E. Knowlton.

Apêndice III

CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DOS CABOS CONDUTORES E TABELAS DE REATÂNCIAS

Tabela III.1 — Características Elétricas — Cabos de Cobre Nus — Têmpera Dura — 97,3% de Condutibilidade

Bitolas MCM	Bitolas AWG	N.º de fios	Raio médio geométrico a 60 (Hz) (m)	Resistência a 25°C CC (ohm/cond./km)	Resistência a 25°C 50 Hz (ohm/cond./km)	Resistência a 25°C 60 Hz (ohm/cond./km)	Resistência a 50°C CC (ohm/cond./km)	Resistência a 50°C 50 Hz (ohm/cond./km)	Resistência a 50°C 60 Hz (ohm/cond./km)	Reatância indutiva x'_L a 1 (m) 50 Hz (ohm/cond./km)	Reatância indutiva x'_L a 1 (m) 60 Hz (ohm/cond./km)	Reatância capacitiva x'_e a 1 (m) 50 Hz (megohm·Cond./km)	Reatância capacitiva x'_e a 1 (m) 60 Hz (megohm·Cond./km)	Corrente máxima admissível a 60 Hz (A)
1 000		37	0,01122	0,03635	0,03850	0,0394	0,0397	0,0417	0,0425	0,282165	0,338599	0,24208	0,20174	300
900		37	0,01064	0,04039	0,0423	0,0431	0,0441	0,0459	0,0467	0,285501	0,342601	0,24510	0,20423	220
800		37	0,01003	0,04543	0,0472	0,0479	0,0497	0,0513	0,0520	0,289212	0,347054	0,24850	0,20709	130
750		37	0,009723	0,04847	0,0501	0,0508	0,0530	0,0545	0,0551	0,291164	0,34397	0,25032	0,20859	90
700		37	0,009388	0,05195	0,0535	0,0541	0,0568	0,0582	0,0588	0,293368	0,352041	0,25230	0,21025	040
600		37	0,008687	0,07059	0,0619	0,0625	0,0662	0,0674	0,0680	0,298245	0,357894	0,25675	0,21396	940
500		37	0,007925	0,0727	0,0738	0,0743	0,0795	0,0805	0,0809	0,304014	0,364817	0,26193	0,21826	840
500		19	0,007803	0,0727	0,0738	0,0743	0,0795	0,0805	0,0809	0,304989	0,365987	0,26214	0,21845	840
450		19	0,007406	0,0807	0,0817	0,0822	0,0883	0,0893	0,0896	0,308270	0,369925	0,26511	0,22093	780
400		19	0,006980	0,0908	0 0917	0,0922	0,0994	0,1002	0,1006	0,311993	0,374392	0,26849	0,22374	730
350		19	0,006523	0,1038	0,1043	0,1050	0,1136	0,1143	0,1146	0,316249	0,379499	0,27232	0,22693	670
350		12	0,006858	0,1038	0,1048	0,1050	0,1136	0,1143	0,1146	0,313102	0,375722	0,26976	0,22480	670
300		19	0,006056	0,1211	0,1218	0,1221	0,1323	0,1330	0,1336	0,320917	0,385101	0,27670	0,23059	610
300		12	0,006340	0,1211	0,1218	0,1221	0,1323	0,1330	0,1336	0,318037	0,381644	0,27421	0,22851	610
250		19	0,005526	0,1454	0,1460	0,1460	0,1591	0,1597	0,1597	0,326672	0,392007	0,28195	0,23495	540
250		12	0,005797	0,1454	0,1460	0,1460	0,1591	0,1597	0,1597	0,323664	0,388397	0,27941	0,23284	540
211,6	4/0	19	0,005084	0,1715	0,1721	0,1727	0,1876	0,1883	0,1883	0,331911	0,398294	0,28673	0,23894	480
211,6	4/0	12	0,005334	0,1715	0,1721	0,1727	0,1876	0,1883	0,1883	0,328895	0,394674	0,284194	0,23682	490
211,6	4/0	7	0,004813	0,1715	0,1721	0,1727	0,1876	0,1883	0,1883	0,335354	0,402425	0,28739	0,23949	480
167,8	3/0	12	0,004752	0,2169	0,2169	0,2175	0,2367	0,2374	0,2374	0,336155	0,403386	0,29078	0,24232	420
167,8	3/0	7	0,004279	0,2169	0,2169	0,2175	0,2367	0,2374	0,2374	0,342744	0,411293	0,29414	0,24511	420
133,1	2/0	7	0,003816	0,2734	0,2734	0,2734	0,2989	0,2989	0,2989	0,349941	0,419929	0,30067	0,25056	360
105,5	1/0	7	0,003392	0,3449	0,3449	0,3449	0,3766	0,3772	0,3772	0,357342	0,428811	0,30742	0,25618	310
83,69	1	7	0,003023	0,4344	0,4344	0,4344	0,4654			0,364580	0,437496	0,31401	0,26167	270
83,69	1	3	0,003097	0,4300	0,4300	0,4300	0,4704			0,363060	0,435672	0,30867	0,25723	270
66,37	2	7	0,002691	0,5475	0,5481	0,5481	0,59915			0,371891	0,446269	0,32067	0,26723	230
66,37	2	3	0,002752	0,5425			0,5935			0,370482	0,444579	0,31542	0,26235	240
66,37	2	1	0,002548	0,5369			0,5873			0,375322	0,450387	0,32776	0,27313	220
52,63	3	7	0,002398	0,6911			0,7557			0,379135	0,454962	0,32732	0,27276	200
52,63	3	3	0,002453	0,6842			0,7482			0,377710	0,453252	0,32206	0,26838	200
52,63	3	1	0,002270	0,6774			0,7408			0,382582	0,459099	0,33460	0,27883	190
41,74	4	3	0,002185	0,8626			0,9434			0,384981	0,461977	0,32866	0,27388	180
41,74	4	1	0,002020	0,8539			0,9341			0,389915	0,467898	0,34122	0,28435	170
33,1	5	3	0,001944	1,0876			1,1895			0,392325	0,470790	0,33535	0,27946	150
33,1	5	1	0,001798	1,0770			1,1777			0,397231	0,476678	0,34779	0,28882	140
26,25	6	3	0,001731	1,3735			0,1497			0,399618	0,479542	0,34207	0,28505	130
26,25	6	1	0,001603	1,3548			0,1485			0,404446	0,485335	0,35443	0,29536	120
20,82	7	1	0,001426	1,7091			0,1870			0,411798	0,494158	0,36105	0,30088	110
16,51	8	1	0,001271	2,1566			0,2361			0,419030	0,502836	0,36771	0,30642	90

Tabela III.2 — Características Elétricas — Cabos de Alumínio (CA)

Código	Bitola MCM	Bitola AWG	Raio médio geométrico (m)	CC 25°C (Ohm/Cond./km)	Resistência 60 Hz 25°C (Ohm/Cond./km)	Resistência 60 Hz 25°C (Ohm/Cond./km)	Reatância indutiva x'_L a 1 (m) 50 Hz (Ohm/Cond·/km)	Reatância indutiva x'_L a 1 (m) 60 Hz (Ohm/Cond·/km)	Reatância capacitiva x'_c a 1 (m) 50 Hz (MegOhm·Cond./km)	Reatância capacitiva x'_c a 1 (m) 60 Hz (MegOhm·Cond./km)	Corrente máxima admissível 60 Hz (A)
Bluebonnet	3 500		0,021267	0,0166	0,0220	0,0233	0,24198	0,29037	0,20607	0,17173	2 290
Trillium	3 000		0,019670	0,0192	0,0241	0,0257	0,24688	0,29626	0,21054	0,17545	2 120
Bitterroot	2 750		0,018794	0,0210	0,0256	0,0274	0,24974	0,29969	0,21301	0,17750	2 020
Lupine	2 500		0,017919	0,0230	0,0274	0,0294	0,25274	0,30329	0,21574	0,17978	1 920
Sagebrush	2 250		0,016995	0,02566	0,0297	0,0319	0,25607	0,30728	0,21877	0,18231	1 810
Cowslip	2 000		0,016022	0,0285	0,0329	0,0348	0,25977	0,31173	0,22215	0,18512	1 700
Jessamine	1 750		0,014951	0,0326	0,0359	0,0390	0,26412	0,31695	0,22596	0,18830	1 570
Dog Wood	1 590		0,014292	0,0359	0,0390	0,0423	0,26695	0,32034	0,22870	0,19058	1 490
Coreopsis	1 590		0,014255	0,0359	0,0390	0,0423	0,26712	0,32054	0,22870	0,19058	1 490
Gladiolus	1 510,5		0,013892	0,0378	0,0407	0,0443	0,26874	0,32248	0,23017	0,19181	1 440
Carnation	1 431		0,013520	0,0399	0,0427	0,0464	0,27044	0,32453	0,23173	0,19311	1 390
Columbine	1 351,5		0,013137	0,0422	0,0449	0,0489	0,27225	0,32670	0,23337	0,19448	1 350
Narcissus	1 272		0,012745	0,0449	0,0474	0,0517	0,27415	0,32898	0,23511	0,19592	1 300
Hawthorn	1 192,5		0,012333	0,0479	0,0502	0,0548	0,27622	0,33146	0,23699	0,19749	1 250
Marigold	1 113		0,011921	0,0513	0,0535	0,0585	0,27835	0,33402	0,23894	0,19911	1 190
Lark Spur	1 033,5		0,011490	0,0553	0,0573	0,0627	0,28067	0,33680	0,24105	0,20087	1 140
Blue Bell	1 033,5		0,011411	0,0553	0,0573	0,0627	0,28110	0,33732	0,24115	0,20095	1 140
Camellia	1 000		0,011294	0,0571	0,0591	0,0646	0,28165	0,33810	0,24204	0,20169	1 120
Hawkweed	1 000		0,011226	0,0571	0,0591	0,0646	0,28213	0,33855	0,24208	0,20174	1 120
Goldrod	954		0,011039	0,0599	0,0617	0,0676	0,28318	0,33982	0,24334	0,20278	1 080
Magnolia	954		0,010962	0,0599	0,0617	0,0676	0,28362	0,34035	0,24344	0,20287	1 080
Snapdragon	900		0,010725	0,0634	0,0652	0,0715	0,28500	0,34200	0,24500	0,20316	1 040
Cookscomb	900		0,010650	0,0334	0,0652	0,0715	0,28544	0,34253	0,24510	0,20425	1 040
Crocus	874,5		0,010569	0,0353	0,0671	0,0735	0,28592	0,34310	0,24584	0,20486	1 020
Anemone	874,5		0,010504	0,0653	0,0671	0,0735	0,28630	0,34357	0,24589	0,20491	1 020
Lilac	795		0,010078	0,0718	0,0734	0,0805	0,28891	0,34669	0,24856	0,20713	965
Arbutus	795		0,010007	0,0718	0,0734	0,0805	0,28935	0,34722	0,24867	0,20722	965
Cattail	750		0,009784	0,0761	0,0776	0,0852	0,29077	0,34892	0,25026	0,20855	930
Petunia	750		0,009724	0,0761	0,0776	0,0852	0,29115	0,34939	0,25031	0,20859	930

Tabela III-2 — Continuação

Código	Bitola		Raio médio geométrico (m)	CC	Resistência 60 Hz		Reatância indutiva x'_L a 1 (m)		Reatância capacitiva x'_c a 1 (m)		Corrente máxima admissível 60 Hz (A)
	MCM	AWG		25°C	25°C	25°C	50 Hz	60 Hz	50 Hz	60 Hz	
				Ohm/Cond./km			Ohm/Cond./km		MegOhm · Cond./km		
Nasturtium	715,5		0,009559	0,0798	0,0812	0,0891	0,29223	0,35068	0,25159	0,20966	905
Violet	715,5		0,009499	0,0798	0,0812	0,0891	0,29262	0,35115	0,25165	0,20971	905
Flag	700		0,009451	0,0816	0,0830	0,0911	0,29294	0,35153	0,25224	0,21020	890
Verbena	700		0,009392	0,0816	0,0830	0,0911	0,29334	0,35200	0,25230	0,21025	890
Heachera	650		0,009051	0,0878	0,0892	0,0979	0,29566	0,35479	0,25442	0,21202	850
Orchid	636		0,008953	0,0898	0,0911	0,1000	0,29634	0,35561	0,25504	0,21253	840
Meadowsweet	600		0,008690	0,0952	0,0964	0,1059	0,29822	0,35786	0,25675	0,21396	805
Dahlia	556,5		0,008368	0,1026	0,1037	0,1140	0,30059	0,36071	0,25892	0,21576	770
	556,5		0,008240	0,1026	0,1037	0,1140	0,30156	0,36187	0,25905	0,21587	770
Hyacinth	500		0,007929	0,1142	0,1152	0,1267	0,30397	0,36477	0,26200	0,21833	715
Zinnia	500		0,007807	0,1142	0,1152	0,1267	0,30495	0,36594	0,26214	0,21845	715
Syringe	477		0,007754	0,1197	0,1207	0,1330	0,30538	0,36645	0,26328	0,21940	695
Cosmos	477		0,007633	0,1197	0,1207	0,1330	0,30637	0,36764	0,26343	0,21952	695
Goldentuft	450		0,007412	0,1267	0,1280	0,1404	0,30821	0,36986	0,26511	0,22093	670
Canna	397,5		0,006536	0,1634	0,1640	0,1802	0,31612	0,37934	0,27332	0,22693	570
Daffodil	350		0,006536	0,1634	0,1640	0,1802	0,31612	0,37934	0,27232	0,22693	570
Tulip	336,4		0,006411	0,1696	0,1702	0,1876	0,31733	0,38080	0,27343	0,22786	555
Peony	300		0,006054	0,1901	0,1914	0,2100	0,32093	0,38512	0,27670	0,23058	515
Laurel	266,8		0,005708	0,2144	0,2144	0,2361	0,32463	0,38956	0,28008	0,23340	480
Daisy	266,8		0,005402	0,2144	0,2144	0,2361	0,32809	0,39371	0,28076	0,23397	475
Vaerian	250		0,005525	0,2287	0,2293	0,2517	0,32668	0,39201	0,28195	0,23495	460
Sneezewort —	250		0,005227	0,2287	0,2293	0,2517	0,33016	0,39620	0,28265	0,23554	455
Oxlip		0000	0,004812	0,2697	0,2703	0,2977	0,33536	0,40243	0,28739	0,23949	410
Phlox		000	0,004277	0,3405	0,3405	0,3747	0,34277	0,41132	0,29413	0,24511	355
Aster		00	0,003816	0,4294	0,4294	0,4729	0,34994	0,41992	0,30067	0,25056	305
Poppy		0	0,003392	0 5413	0,5413	0,5954	0,35724	0,42881	0,30742	0,25618	265
Pansy		1	0,003024	0,6830	0,6830	0,7513	0,36455	0,43747	0,31401	0,26167	225
Iris		2	0,002692	0,8607	0,8614	0,9477	0,37186	0,44624	0,32067	0,26723	195
Lilly		4	0,002138	1,3673	1,3673	1,5040	0,38634	0,46361	0,33385	0,27821	145
Rose		6	0,001696	2,1752	2,1752	2,3990	0,40090	0,48108	0,34713	0,28928	110

Tabela III.3 — Características Elétricas — Cabos de Alumínio-Aço (CAA)

Código	Bitola		Raio médio geométrico a 60 (Hz) (m)	Resistência a 25°C			Resistência a 50°C			Reatância indutiva x'_L a 1 (m)		Reatância capacitiva x'_c a 1 (m)		corrente máxima admissível a 60 Hz (A)
	MCM	AWG		Cor. pequenas ×			Cor. apr. 75% Cor. máx. adm.							
				CC	50 Hz	60 Hz	CC	50 Hz	60 Hz	50 Hz	60 Hz	50 Hz	60 Hz	
				Ohm/Cond/km						Ohm/Cond./km		MegOhm · Cond./km		
Falcon	1 590		0,01584	0,03648	0,0366	0,0367	0,04014	0,04195	0,0425	0,260495	0,312594	0,22522	0,18768	1,380
Parrot	1 510,5		0,01545	0,03840	0,0385	0,0386	0,04226	0,04412	0,0447	0,262062	0,314474	0,22668	0,18890	1,340
Plover	1 431		0,01502	0,04052	0,0407	0,0407	0,04462	0,04655	0,0472	0,263835	0,316602	0,22826	0,19022	1,300
Martin	1 321,5		0,01459	0,04294	0,0431	0,0431	0,04729	0,04922	0,0499	0,265618	0,318741	0,22989	0,19157	1,250
Pheasant	1 272,0		0,01417	0,04561	0,0458	0,0458	0,05021	0,0522	0,0528	0,267363	0,320836	0,23161	0,19300	1,200
Grackle	1 192,5		0,01371	0,04866	0,0488	0,0489	0,05357	0,0555	0,0563	0,269570	0,323484	0,23346	0,19455	1,160
Finch	1 113		0,01325	0,05214	0,0523	0,0524	0,05742	0,0594	0,0602	0,271715	0,326058	0,23542	0,19618	1,110
Curlew	1 033,5		0,01280	0,05612	0,0563	0,0564	0,06177	0,0637	0,0643	0,273886	0,328664	0,23754	0,19795	1,060
Cardinal	954		0,01228	0,06084	0,0609	0,0610	0,06699	0,0694	0,0701	0,276390	0,331668	0,23989	0,19990	1,010
Canary	900		0,01191	0,06463	0,0646	0,0646	0,07116	0,0730	0,0736	0,278468	0,334162	0,24154	0,20128	970
Crane	874,5		0,01176	0,06650	0,0665	0,0671	0,07321	0,0756	0,0763	0,279533	0,335440	0,24233	0,20194	950
Condor	795,0		0,01121	0,07271	0,0733	0,0739	0,08004	0,0843	0,0856	0,282278	0,338733	0,24505	0,20420	900
Drake	795,0		0,01143	0,07271	0,0727	0,0727	0,08004	0,0800	0,0800	0,281165	0,337398	0,24427	0,20355	900
Mallard	795,0		0,01197	0,07271	0,0727	0,0727	0,08004	0,0800	0,0800	0,277942	0,333530	0,24263	0,20219	910
Crow	715,5		0,01063	0,08141	0,0814	0,0820	0,08962	0,0914	0,0921	0,285738	0,342885	0,24812	0,20676	830
Starling	715,5		0,01082	0,08141	0,0814	0,0814	0,08962	0,0896	0,0896	0,284563	0,341476	0,24729	0,20608	840
Redwing	715,5		0,01133	0,08141	0,0814	0,0814	0,08962	0,0896	0,0896	0,281719	0,338063	0,24568	0,20473	840
Gull	666,6		0,01027	0,08701	0,0876	0,0876	0,09577	0,0988	0,0995	0,287542	0,340500	0,25014	0,20845	800
Goose	636		0,01002	0,09136	0,0919	0,0919	0,10055	0,1042	0,1049	0,289400	0,347280	0,25148	0,20956	770
Grosbeak	636		0,01021	0,09136	0,0913	0,0913	0,10055	0,1005	0,1005	0,288155	0,345785	0,25072	0,20893	780
Egret	636		0,01069	0,09136	0,0913	0,0913	0,10055	0,1005	0,1005	0,285148	0,342177	0,24906	0,20755	780
Duck	605		0,00978	0,09571	0,0963	0,0963	0,10534	0,1090	0,1103	0,290797	0,348957	0,25290	0,21075	750
Squab	605		0,00996	0,09571	0,0957	0,0957	0,10565	0,1068	0,1068	0,289588	0,347505	0,25212	0,21010	760
Dove	556,5		0,00954	0,10411	0,1044	0,1044	0,11491	0,1155	0,1155	0,292358	0,350830	0,25449	0,21207	730

Tabela III.3 — Continuação

Código	*Bitola*		*Raio médio geométrico a 60 (Hz) (m)*	*Resistência a 25°C*			*Resistência a 50° C*			*Reatância indutiva*		*Reatância capacitiva*		*Corrente máxima admissível a 60 Hz (A)*
				Cor. pequenas (**)			*Cor. Apr. 75% Cor. Máx. Adm.*			*x'L a 1 (m)*		*x'c a 1 (m)*		
	MCM	*AWG*		*CC*	50 Hz	60 Hz	*CC*	50 Hz	60 Hz	50 Hz	60 Hz	50 Hz	60 Hz	
				Ohm/*Cond.*/km						Ohm/*Cond*/km		Meg/Ohm./km		
Eagle	556,5		0,00999	0,10441	0,1044	0,1044	0,11491	0,1155	0,1155	0,289462	0,347355	0,25290	0,21075	730
Heron	500,0		0,00947	0,11622	0,1162	0,1162	0,12802			0,292755	0,351306	0,25592	0,21327	690
Hawk	477,0		0,00883	0,12181	0,1218	0,1218	0,13424			0,297148	0,356577	0,25892	0,21576	670
Hen	477		0,00926	0,12181	0,1218	0,1218	0,13424			0,294231	0,353077	0,25727	0,21439	670
Ibis	397,5		0,00807	0,14605			0,16096			0,302797	0,353356	0,26416	0,22013	590
Lark	397,5		0,00847	0,14605			0,16096			0,299834	0,359801	0,26250	0,21875	600
Linnet	336,5		0,00743	0,17277			0,19017			0,307983	0,369579	0,26888	0,22407	530
Oriole	336,4		0,00777	0,17277			0,19017			0,305256	0,366307	0,26732	0,22276	530
Ostrich	300,0		0,00701	0,19328			0,21255			0,311724	0,374069	0,27224	0 22686	490
Piper	300,0		0,00734	0,19328			0,21255			0,308833	0,370600	0,27058	0,22548	500
Partridge	266,8		0,00661	0,21752			0,23927			0,315416	0,378499	0,27553	0,22961	460
Owl	266,8		0,00208	0,21814	0,2181	0,2187	0,23989	0,3169	0,3430	0,388076	0,465691	0,27634	0,23028	460
Penguin		4/0	0,00248	0,27408	0,2759	0,2765	0,30142	0,3523	0,3679	0,377022	0,452427	0,28305	0,23588	340
Pigeon		3/0	0,00182	0,34555	0,3474	0,3480	0,38035	0,4331	0,4493	0,396123	0,475347	0,28963	0,24135	300
Quail		2/0	0,00155	0,43629	0,4375	0,4387	0,48041	0,5382	0,5562	0,406558	0,487870	0,29628	0,24690	270
Raven		1/0	0,00135	0,55002	0,5512	0,5518	0,60534	0,6712	0,6960	0,414776	0,497732	0,30293	0,25245	230
Robin		1	0,00127	0,69608	0,6960	0,6960	0,76444	0,8328	0,8576	0,419079	0,502895	0,30948	0,25789	200
Sparrow		2	0,00127	0,87631	0,8763	0,8763	0,96332	1,0316	1,0503	0,419079	0,502895	0,31615	0,26345	180
—		2	0,00153	0,87631	0,8763	0,8763	0,96332	1,0068	1,0254	0,407375	0,488850	0,31453	0,26211	180
Swallow		3	0,00131	1,10627	1,1062	1,1062	1,21192	1,2678	1,2865	0,417130	0,500556	0,32287	0,26906	160
Swan		4	0,00133	1,39216	1,3921	1,3921	1,53510	1,5786	1,5972	0,416178	0,499414	0,32956	0,27463	140
—		4	0,00137	1,39216	1,3921	1,3921	1,53510	1,5723	1,5848	0,414316	0,497179	0,32799	0,27332	140
Thrush		5	0,00126	1,75263	1,7526	1,7526	1,92675	1,9639	1,9763	0,419576	0,503491	0,33611	0,28009	120
Turkey		6	0,00120	2,21245	2,2125	2,2125	2,43628	2,4673	2,4735	0,422642	0,507170	0,34293	0,28577	100

Tabela III.3.a — Reatâncias Indutivas de Condutores Múltiplos (CAA) em 60 (Hz)

código	*área* CM	*compos.* *Al.-aço*	*dia* (mm)	*RMG* (m)	*Reatância Indutiva a 60 (HZ) em ohm/km/Cond. para Espaçamento de 1 (m)*										
					1 *condutor singelo*	2 *espaçamento entre subcondutores (pol.)*					3 *espaçamento entre subcondutores (pol.)*				
						6	9	12	15	18	6	9	12	15	18
Expanded	3108000	62/8 19	63,500	0,0274	0,2711	0,2065	0,1912	0,1804	0,1719	0,1651	0,1849	0,1646	0,1501	0,1389	0,1297
Expanded	2294000	66/6 19	58,928	0,0262	0,2747	0,2083	0,1930	0,1822	0,1737	0,1669	0,1861	0,1658	0,1513	0,1401	0,1309
Expanded	1414000	58/4 19	44,450	0,0195	0,2968	0,2193	0,2041	0,1932	0,1848	0,1779	0,1935	0,1731	0,1587	0,1475	0,1383
Expanded	1275000	50/4 19	40,640	0,0176	0,3045	0,2232	0,2079	0,1971	0,1886	0,1818	0,1961	0,1757	0,1612	0,1500	0,1408
Kiwi	2167000	72 7	44,120	0,0174	0,3054	0,2236	0,2084	0,1975	0,1891	0,1822	0,1964	0,1760	0,1615	0,1503	0,1412
Bluebird	2156000	84 19	44,755	0,0179	0,3032	0,2225	0,2072	0,1964	0,1880	0,1811	0,1956	0,1753	0,1608	0,1496	0,1404
Chukar	1780000	84 19	40,691	0,0163	0,3102	0,2260	0,2107	0,1999	0,1915	0,1846	0,1980	0,1776	0,1631	0,1519	0,1427
Falcon	1590000	54 19	39,243	0,0159	0,3121	0,2270	0,2117	0,2008	0,1924	0,1855	0,1986	0,1782	0,1637	0,1525	0,1434
Lapwing	1590000	45 7	38,151	0,0152	0,3158	0,2288	0,2135	0.2027	0,1943	0,1874	0,1998	0,1794	0,1650	0,1538	0,1446
Parrot	1510500	54 19	38,252	0,0154	0,3146	0,2282	0,2129	0,2021	0,1937	0,1868	0,1994	0,1790	0,1646	0,1534	0,1442
Nuthatch	1510500	45 7	37,236	0,0148	0,3176	0.2297	0,2144	0.2036	0,1952	0,1883	0,2004	0,1800	0,1656	0,1544	0,1452
Plover	1431000	54 19	37,211	0,0151	0,3164	0,2291	0,2138	0,2030	0,1946	0,1877	0,2000	0,1796	0,1652	0,1540	0,1448
Bobolink	1431000	45 7	36,246	0,0143	0,3201	0,2310	0,2157	0,2048	0,1964	0,1896	0,2013	0,1809	0,1664	0,1552	0,1460
Martin	1351500	54 19	36,170	0,0147	0,3182	0,2300	0,2147	0,2039	0,1955	0,1886	0,2006	0,1803	0,1658	0,1546	0,1454
Dipper	1351500	45 7	35,179	0,0140	0,3219	0,2319	0,2166	0,2057	0,1973	0,1905	0,2019	0,1815	0,1670	0,1558	0,1466
Pheasant	1272000	54 19	35,103	0,0142	0,3208	0,2313	0,2160	0,2052	0,1968	0,1899	0,2015	0,1811	0,1666	0,1554	0,1463
Bittern	1272000	45 7	34,163	0,0135	0,3244	0,2331	0,2178	0,2070	0,1986	0,1917	0,2027	0,1823	0,1679	0,1566	0,1475
Grackle	1192500	54 19	33,858	0,0137	0,3232	0,2325	0,2172	0,2064	0,1980	0,1911	0,2023	0,1819	0,1675	0,1562	0,1471
Bunting	1192500	45 7	33,071	0,0131	0,3270	0,2344	0,2191	0,2083	0,1999	0,1930	0,2036	0,1832	0,1687	0,1575	0,1483
Finch	1113000	54 19	32,842	0,0133	0,3258	0,2338	0,2185	0,2077	0,1993	0,1924	0,2032	0,1828	0,1683	0,1571	0,1479
Bluejay	1113000	45 7	31,979	0,0126	0,3295	0,2357	0,2204	0,2095	0.2011	0,1943	0,2044	0,1840	0,1696	0,1583	0,1492
Curlew	1033500	54 7	31,648	0,0128	0,3286	0,2352	0,2199	0,2091	0,2007	0,1938	0,2041	0,1837	0,1693	0,1580	0,1489
Ortolan	1033500	45 7	30,810	0,0123	0,3319	0,2369	0,2216	0,2107	0,2023	0,1955	0,2052	0,1848	0,1704	0,1591	0,1500
Tanager	1033500	36 1	30,124	0,0117	0,3354	0,2386	0,2233	0,2125	0,2041	0,1972	0,2063	0,1860	0,1715	0,1603	0,1510
Cardinal	954000	54 7	30,378	0,0123	0,3319	0,2369	0,2216	0,2107	0,2023	0,1955	0,2052	0,1848	0,1704	0,1591	0,1500
Rail	954000	45 7	29,591	0,0118	0,3350	0,2384	0.2231	0,2123	0,2039	0,1970	0,2062	0,1858	0,1714	0,1602	0,1511
Catbird	954000	36 1	28,956	0,0113	0,3382	0,2400	0,2247	0,2139	0,2055	0,1986	0,2073	0,1869	0,1724	0,1612	0,1521
Canary	900000	54 7	29,515	0,0119	0,3338	0,2378	0,2225	0,2117	0,2033	0,1964	0,2058	0,1854	0,1710	0,1598	0,1506
Ruddy	900000	45 7	28,727	0,0114	0,3373	0,2396	0,2243	0,2135	0,2050	0,1982	0,2070	0,1866	0,1722	0,1610	0,1518
Mallard	795000	30 19	28,956	0,0119	0,3338	0,2378	0,2225	0,2117	0,2033	0,1964	0,2058	0,1854	0,1710	0,1598	0,1506
Drake	795000	26 7	28,143	0,0114	0,3375	0,2397	0,2244	0,2136	0,2052	0.1983	0,2071	0,1867	0,1722	0,1610	0,1519
Condor	795000	54 7	27,762	0,0113	0,3382	0,2400	0,2247	0,2139	0,2055	0,1986	0,2073	0,1859	0,1724	0,1612	0,1521
Cuckoo	795000	24 7	27,737	0,0112	0,3390	0,2404	0,2251	0,2143	0,2059	0,1990	0,2076	0,1872	0,1727	0.1615	0,1523

Tabela III.3.a — Continuação

código	área CM	compos. Al.-aço		dia (mm)	RMG (m)	Reatância Indutiva a 60 (HZ) em ohm/km/Cond. para Espaçamento de 1 (m)										
						(1) condutor singelo	(2) espaçamento entre subcondutores (pol.)					(3) espaçamento entre subcondutores (pol.)				
							6	9	12	15	18	6	9	12	15	18
Tern	795000	45	7	27,000	0,0107	0,3419	0,2419	0,2266	0,2157	0,207	0,2005	0,2085	0,1882	0,1737	0,1625	0,1533
Coot	795000	36	1	26,416	0,0115	0,3367	0,2393	0,2240	0,2132	0,2047	0,1979	0,2068	0,1864	0,1720	0,1608	0,1516
Redwing	715500	30	19	27,457	0,0114	0,3375	0,2397	0,2244	0,2136	0,2052	0,1983	0,2071	0,1867	0,1722	0,1610	0,1519
Starling	715500	26	7	26,695	0,0108	0,3413	0,2416	0,2263	0,2154	0,2070	0,2001	0,2083	0,1879	0,1735	0,1623	0,1531
Stilt	715500	24	7	26,314	0,0106	0,3430	0,2424	0,2271	0,2163	0,2079	0,2010	0,2089	0,1885	0,1741	0,1628	0,1537
Gannet	666600	26	7	25,756	0,0105	0,3439	0,2429	0,2276	0,2167	0,2083	0,2014	0,2092	0,1888	0,1743	0,1631	0,1540
Flamingo	666600	24	7	25,400	0,0108	0,3413	0,2416	0,2263	0,2154	0,2070	0,2001	0,2083	0,1879	0,1735	0,1623	0,1531
	653900	18	3	24,206	0,0094	0,3520	0,2469	0,2316	0,2208	0,2124	0,2055	0.2119	0,1915	0,1770	0,1658	0,1567
Egret	636000	30	19	25,883	0,0107	0,3419	0,2419	0,2266	0,2157	0,2073	0,2005	0,2085	0,1882	0,1737	0,1625	0,1533
Grosbeak	636000	26	7	25.146	0,0102	0,3456	0,2437	0,2285	0,2176	0,2092	0,2023	0,2098	0,1894	0,1749	0,1637	0,1546
Rook	636000	24	7	24,816	0,0100	0,3475	0,2447	0,2294	0,2185	0,2101	0,2032	0,2104	0,1900	0,1755	0,1643	0,1552
Kingbird	636000	18	1	23,876	0,0093	0,3530	0,2474	0,2321	0,2213	0,2129	0,2060	0,2122	0,1918	0,1774	0,1662	0,1570
Swift	636000	36	1	23,622	0,0092	0,3537	0,2478	0,2325	0,2216	0,2132	0,2064	0,2125	0,1921	0,1776	0,1664	0,1572
Teal	605000	30	19	25,248	0,0104	0,3443	0,2431	0,2278	0,2169	0,2085	0,2017	0.2093	0,1890	0,1745	0,1633	0,1541
Squab	605000	26	7	24,536	0,0100	0,3475	0,2447	0,2294	0,2185	0,2101	0,2032	0,2104	0,1900	0,1755	0,1643	0,1552
Peacock	605000	24	7	24,206	0,0097	0,3493	0,2456	0,2303	0,2195	0,2110	0,2042	0,2110	0,1906	0,1762	0,1649	0,1558
Eagle	556500	30	7	24,206	0,0100	0,3475	0,2447	0,2294	0,2185	0,2101	0,2032	0,2104	0,1900	0,1755	0,1643	0,1552
Dove	556500	26	7	23,546	0,0096	0,3505	0,2462	0,2309	0,2201	0,2116	0,2048	0,2114	0,1910	0,1766	0,1653	0,1562
Parakeet	556500	24	7	23,216	0,0093	0,3525	0,2472	0,2319	0,2210	0,2126	0,2057	0,2121	0.1917	0,1772	0,1660	0,1568
Osprey	556500	18	1	22,327	0,0087	0,3581	0,2500	0,2347	0,2238	0,2154	0,2086	0,2139	0,1935	0,1791	0,1679	0,1587
Hen	477000	30	7	22.428	0,0093	0,3530	0,2474	0,2321	0,2213	0,2129	0,2060	0,2122	0,1918	0,1774	0,1662	0,1570
Hawk	477000	26	7	21,793	0,0088	0,3568	0,2493	0,2340	0,2232	0,2148	0,2079	0,2135	0,1931	0,1786	0,1674	0,1583
Flicker	477000	24	7	21,488	0,0087	0,3581	0,2500	0,2347	0,2238	0,2154	0,2086	0,2139	0,1935	0,1791	0,1679	0,1587
Pelican	477000	18	1	20,676	0,0080	0,3636	0,2527	0,2374	0,2266	0,2182	0,2113	0,2158	0,1954	0,1809	0,1697	0,1605
Lark	397500	30	7	20,472	0,0084	0,3600	0,2509	0.2356	0,2248	0,2164	0,2095	0,2146	0.1942	0,1797	0,1685	0,1593
Ibis	397500	26	7	19,888	0,0080	0,3636	0,2527	0,2374	0,2266	0,2182	0,2113	0,2158	0,1954	0,1809	0,1697	0,1605
Brant	397500	24	7	19,609	0,0079	0,3653	0,2536	0,2383	0,2275	0,2190	0,2122	0,2163	0,1960	0,1815	0,1703	0,1611
Chickadee	397500	18	1	18,872	0,0073	0,3705	0,2562	0,2409	0,2300	0,2216	0,2147	0,2181	0,1977	0,1832	0,1720	0,1628
Oriole	336400	30	7	18,821	0,0078	0,3662	0,2540	0,2387	0,2279	0,2195	0,2126	0,2166	0,1963	0,1818	0,1706	0,1614
Linnet	336400	26	7	18,313	0,0074	0,3699	0,2558	0,2406	0,2297	0,2213	0,2144	0,2178	0,1975	0,1830	0,1718	0,1626
Merlin	336400	18	1	17,374	0,0068	0,3767	0,2593	0,2440	0,2331	0,2247	0,2178	0,2201	0,1997	0,1853	0,1741	0,1649
Ostrich	300000	26	7	17,272	0,0070	0,3743	0,2581	0.2428	0,2320	0,2235	0,2167	0,2193	0,1990	0,1845	0,1733	0,1641

Tabela III.3.a — Reatâncias Indutivas de Condutores Múltiplos (CAA) em 60 (Hz)

código	área CM	compos. Al.-aço		dia (mm)	RMG (m)	Reatância Indutiva a 60 (HZ) em ohm/km/Cond. para Espaçamento de 1 (m)										
						(1) condutor singelo	(4) espaçamento entre subcondutores (pol.)					(6) espaçamento entre subcondutores (pol.)				
							6	9	12	15	18	6	9	12	15	18
Expanded	3108000	62/8	19	63,500	0,0274	0,2711	0,1676	0,1447	0,1284	0,1158	0,1055	0,1409	0,1154	0,0973	0,0833	0,0718
Expanded	2294000	66/6	19	58,928	0,0262	0,2747	0,1685	0,1456	0,1293	0,1167	0,1064	0,1415	0,1160	0,0979	0,0839	0,0724
Expanded	1414000	58/4	19	44,450	0,0195	0,2968	0,1741	0,1511	0,1349	0,1222	0,1119	0,1452	0,1197	0,1016	0,0876	0,0761
Expanded	1275000	50/4	19	40,640	0,0176	0,3045	0,1760	0,1531	0,1368	0,1242	0,1139	0,1464	0,1210	0,1029	0,0889	0,0774
Kiwi	2167000	72	7	44,120	0,0174	0,3054	0,1762	0,1533	0,1370	0,1244	0,1141	0,1466	0,1211	0,1030	0,0890	0,0776
Bluebird	2156000	84	19	44,755	0,0179	0,3032	0,1757	0,1527	0,1365	0,1238	0,1135	0,1462	0,1207	0,1027	0,0887	0,0772
Chukar	1780000	84	19	40,691	0,0163	0,3102	0,1774	0,1545	0,1382	0,1256	0,1153	0,1474	0,1219	0,1038	0,0898	0,0784
Falcon	1590000	54	19	39,243	0,0159	0.3121	0,1779	0,1549	0,1387	0,1260	0,1157	0,1477	0,1222	0,1041	0,0901	0,0787
Lapwing	1590000	45	7	38,151	0,0152	0.3158	0,1788	0,1559	0,1396	0,1270	0,1167	0,1483	0,1228	0,1048	0,0907	0,0793
Parrot	1510500	54	19	38,252	0,0154	0,3146	0,1785	0,1556	0,1393	0,1267	0,1164	0,1481	0,1226	0,1046	0,0905	0,0791
Nuthatch	1510500	45	7	37,236	0,0148	0,3176	0,1792	0,1563	0,1401	0,1274	0,1171	0,1486	0,1231	0,1051	0,0910	0,0796
Plover	1431000	54	19	37,211	0,0151	0,3164	0,1789	0,1560	0,1397	0,1271	0,1168	0,1484	0,1229	0,1049	0,0908	0,0794
Bobolink	1431000	45	7	36,246	0,0143	0,3201	0,1799	0,1569	0,1407	0,1281	0,1178	0,1490	0,1236	0,1055	0,0915	0,0800
Martin	1351500	54	19	36,170	0,0147	0,3182	0,1794	0,1565	0,1402	0,1276	0,1173	0,1487	0,1232	0,1052	0,0911	0,0797
Dipper	1351500	45	7	35,179	0,0140	0,3219	0,1803	0,1574	0,1411	0,1285	0,1182	0,1493	0,1239	0,1058	0,0918	0,0803
Pheasant	1272000	54	19	35,103	0,0142	0,3208	0,1800	0,1571	0,1408	0,1282	0,1179	0,1491	0,1237	0,1056	0,0916	0,0801
Bittern	1272000	45	7	34,163	0,0135	0,3244	0,1810	0,1580	0,1418	0,1291	0,1188	0,1498	0,1243	0,1062	0,0922	0,0807
Grackle	1192500	54	19	33,858	0,0137	0,3232	0,1807	0,1577	0,1415	0,1288	0,1185	0,1496	0,1241	0,1060	0,0920	0,0805
Bunting	1192500	45	7	33,071	0,0131	0,3270	0,1816	0,1587	0,1424	0,1298	0,1195	0,1502	0,1247	0,1066	0,0926	0,0812
Finch	1113000	54	19	32,842	0,0133	0,3258	0,1813	0,1584	0,1421	0,1295	0,1192	0,1500	0,1245	0,1064	0,0924	0,0810
Bluejay	1113000	45	7	31,979	0,0126	0,3295	0,1822	0,1593	0,1430	0,1304	0,1201	0,1506	0,1251	0,1071	0,0930	0,0816
Curlew	1033500	54	7	31,648	0,0128	0,3286	0,1820	0,1591	0,1428	0,1302	0,1199	0,1505	0,1250	0,1069	0,0929	0,0814
Ortolan	1033500	45	7	30,810	0,0123	0,3319	0,1828	0,1599	0,1436	0,1310	0,1207	0,1510	0,1255	0,1075	0,0934	0,0820
Tanager	1033500	36	1	30,124	0,0117	0,3354	0,1837	0,1608	0,1445	0,1319	0,1216	0,1516	0,1261	0,1080	0,0940	0,0826
Cardinal	954000	54	7	30,378	0,0123	0,3319	0,1828	0,1599	0,1436	0,1310	0,1207	0,1510	0,1255	0,1075	0,0934	0,0820
Rail	954000	45	7	29,591	0,0118	0,3350	0,1836	0,1607	0,1444	0,1318	0,1215	0,1515	0,1260	0,1080	0,0939	0,0825
Catbird	954000	36	1	28,956	0,0113	0,3382	0,1844	0,1615	0,1452	0,1326	0,1223	0,1520	0,1266	0,1085	0,0945	0,0830
Canary	900000	54	7	29.515	0,0119	0.3338	0,1833	0,1604	0,1441	0,1315	0,1212	0,1513	0,1258	0,1078	0,0937	0,0823
Ruddy	900000	45	7	28,727	0,0114	0,3373	0,1842	0,1613	0,1450	0,1324	0,1221	0,1519	0,1264	0,1084	0,0943	0,0829
Mallard	795000	30	19	28,956	0,0119	0,3338	0,1833	0,1604	0,1441	0,1315	0,1212	0,1513	0,1258	0,1078	0,0937	0,0823
Drake	795000	26	7	28,143	0,0114	0,3375	0,1842	0,1613	0,1450	0,1324	0,1221	0,1519	0,1265	0,1084	0,0944	0,0829
Condor	795000	54	7	27,762	0,0113	0,3382	0,1844	0,1615	0,1452	0,1326	0,1223	0,1520	0,1266	0,1085	0,0945	0,0830

Tabela III.3.a — Continuação

					Reatância Indutiva a 60 (HZ) em ohm/km/Cond. para Espaçamento de 1 (m)										
					(1)	(4) espaçamento entre subcondutores (pol.)					(6) espaçamento entre subcondutores (pol.)				
código	área CM	campos. Al.-aço	dia (mm)	RMG (m)	condutor singelo	6	9	12	15	18	6	9	12	15	18
Cuckoo	795000	24 7	27,737	0,0112	0,3390	0,1846	0,1617	0,1454	0,1328	0,1225	0,1522	0,1267	0,1086	0,0946	0,0832
Tern	795000	45 7	27,000	0,0107	0,3419	0,1853	0,1624	0,1461	0,1335	0,1232	0,1527	0,1272	0,1091	0,0951	0,0836
Coot	795000	36 1	26,416	0,0115	0,3367	0,1840	0,1611	0,1448	0,1322	0,1219	0,1518	0,1263	0,1083	0,0942	0,0828
Redwing	715500	30 19	27,457	0,0114	0,3375	0,1842	0,1613	0,1450	0,1324	0,1221	0,1519	0,1265	0,1084	0,0944	0,0829
Starling	715500	26 7	26,695	0,0108	0,3413	0,1852	0,1622	0,1460	0,1334	0,1230	0,1526	0,1271	0,1090	0,0950	0,0835
Stilt	715500	24 7	26,314	0,0106	0,3430	0,1856	0,1627	0,1464	0,1338	0,1235	0,1529	0,1274	0,1093	0,0953	0,0838
Gannet	666600	26 7	25,756	0,0105	0,3439	0,1858	0,1629	0,1466	0,1340	0,1237	0,1530	0,1275	0,1094	0,0954	0,0840
Flamingo	666600	24 7	25,400	0,0108	0,3413	0,1852	0,1622	0,1460	0,1334	0,1230	0,1526	0,1271	0,1090	0,0950	0,0835
———	653900	18 3	24,206	0,0094	0,3520	0,1878	0,1649	0,1486	0,1360	0,1257	0,1543	0,1289	0,1108	0,0968	0,0853
Egret	636000	30 19	25,883	0,0107	0,3419	0,1853	0,1624	0,1461	0,1335	0,1232	0,1527	0,1272	0,1091	0,0951	0,0836
Grosbeak	636000	26 7	25,146	0,0102	0,3456	0,1863	0,1633	0,1471	0,1344	0,1241	0,1533	0,1278	0,1097	0,0957	0,0843
Rook	636000	24 7	24,816	0,0100	0,3475	0,1867	0,1638	0,1475	0,1349	0,1246	0,1536	0,1281	0,1100	0,0960	0,0846
Kingbird	636000	18 1	23,876	0,0093	0,3530	0,1881	0,1652	0,1489	0,1363	0,1260	0,1545	0,1290	0,1110	0,0969	0,0855
Swift	636000	36 1	23,622	0,0092	0,3537	0,1883	0,1653	0,1491	0,1365	0,1262	0,1546	0,1292	0,1111	0,0971	0,0856
Teal	605000	30 19	25,248	0,0104	0,3443	0,1859	0,1630	0,1467	0,1341	0,1238	0,1531	0,1276	0,1095	0,0955	0,0840
Squab	605000	26 7	24,536	0,0100	0,3475	0,1867	0,1638	0,1475	0,1349	0,1246	0,1536	0,1281	0,1100	0,0960	0,0846
Peacock	605000	24 7	24,206	0,0097	0,3493	0,1872	0,1643	0,1480	0,1354	0,1251	0,1539	0,1284	0,1104	0,0963	0,0849
Eagle	556500	30 7	24,206	0,0100	0,3475	0,1867	0,1638	0,1475	0,1349	0,1246	0,1536	0,1281	0,1100	0,0960	0,0846
Dove	556500	26 7	23,546	0,0096	0,3505	0,1875	0,1646	0,1483	0,1357	0,1254	0,1541	0,1286	0,1106	0,0965	0,0851
Parakeet	556500	24 7	23,216	0,0093	0,3525	0,1880	0,1650	0,1488	0,1362	0,1258	0,1544	0,1290	0,1109	0,0969	0,0854
Osprey	556500	18 1	22,327	0,0087	0,3581	0,1894	0,1664	0,1502	0,1376	0,1272	0,1554	0,1299	0,1118	0,0978	0,0863
Hen	477000	30 7	22,428	0,0093	0,3530	0,1881	0,1652	0,1489	0,1363	0,1260	0,1545	0,1290	0,1110	0,0969	0,0855
Hawk	477000	26 7	21,793	0,0088	0,3568	0,1890	0,1661	0,1498	0,1372	0,1269	0,1551	0,1297	0,1116	0,0976	0,0861
Flicker	477000	24 7	21,488	0,0087	0,3581	0,1894	0,1664	0,1502	0,1376	0,1272	0,1554	0,1299	0,1118	0,0978	0,0863
Pelican	477000	18 1	20,676	0,0080	0,3636	0,1908	0,1678	0,1516	0,1389	0,1286	0,1563	0,1308	0,1127	0,0987	0,0873
Lark	397500	30 7	20,472	0,0084	0,3600	0,1898	0,1669	0,1506	0,1380	0,1277	0,1557	0,1302	0,1121	0,0981	0,0867
Ibis	397500	26 7	19,888	0,0080	0,3636	0,1908	0,1678	0,1516	0,1389	0,1286	0,1563	0,1308	0,1127	0,0987	0,0873
Brant	397500	24 7	19,609	0,0079	0,3653	0,1912	0,1683	0,1520	0,1394	0,1291	0,1566	0,1311	0,1130	0,0990	0,0875
Chickadee	397500	18 1	18,872	0,0073	0,3705	0,1925	0,1695	0,1533	0,1407	0,1303	0,1574	0,1320	0,1139	0,0999	0,0884
Oriole	336400	30 7	18,821	0,0078	0,3662	0,1914	0,1685	0,1522	0,1396	0,1293	0,1567	0,1312	0,1132	0,0992	0,0877
Linnet	336400	26 7	18,313	0,0074	0,3699	0,1923	0,1694	0,1531	0,1405	0,1302	0,1573	0,1319	0,1138	0,0998	0,0883
Merlin	336400	18 1	17,374	0,0068	0,3767	0,1940	0,1711	0,1548	0,1422	0,1319	0,1585	0,1330	0,1149	0,1009	0,0894
Ostrich	300000	26 7	17,272	0,0070	0,3743	0,1934	0,1705	0,1542	0,1416	0,1313	0,1581	0,1326	0,1145	0,1005	0,0890

Tabela III.3.b — Reatâncias Capacitivas de Condutores Múltiplos (CAA) em 60 (Hz)

				Reatância Capacitiva a 60 (HZ) em mohm·km./Cond. para Espaçamento de 1 (m)										
				(1)	(2) espaçamento entre subcondutores (pol.)					(3) espaçamento entre subcondutores (pol.)				
código	área cm	campos. Al.-aço	dia (mm)	condutor singelo	6	9	12	15	16	6	9	12	15	18
Expanded	3108000	62/8 19	63,500	0,1647	0,1273	0,1176	0,1107	0,1054	0,1010	0,1148	0,1019	0,0927	0,0856	0,0798
Expanded	2294000	66/6 19	58,928	0,1688	0,1290	0,1194	0,1125	0,1072	0,1028	0,1160	0,1031	0,0939	0,0858	0,0810
Expanded	1414000	58/4 19	44,450	0,1817	0,1358	0,1261	0,1192	0,1139	0,1096	0,1205	0,1076	0,0984	0,0913	0,0855
Expanded	1275000	50/4 19	40,640	0,1860	0,1379	0,1282	0,1214	0,1160	0,1117	0,1219	0,1090	0,0998	0,0927	0,0869
Kiwi	2167000	72 7	44,120	0,1821	0,1360	0,1263	0,1194	0,1141	0,1097	0,1206	0,1077	0,0985	0,0914	0,0856
Bluebird	2156000	84 19	44,755	0,1814	0,1356	0,1259	0,1191	0,1137	0,1094	0,1203	0,1074	0,0983	0,0912	0,0854
Chukar	1780000	84 19	40,691	0,1860	0,1379	0,1282	0,1213	0,1160	0,1117	0,1219	0,1090	0,0998	0,0927	0,0869
Falcon	1590000	54 19	39,243	0,1877	0,1388	0,1291	0,1222	0,1169	0,1125	0,1224	0,1095	0,1004	0,0933	0,0875
Lapwing	1590000	45 7	38,151	0,1890	0,1394	0,1297	0,1229	0,1176	0,1132	0,1229	0,1100	0,1008	0,0937	0,0879
Parrot	1510500	54 19	38,252	0,1889	0,1394	0,1297	0,1228	0,1175	0,1131	0,1228	0,1099	0,1008	0,0937	0,0879
Nuthatch	1510500	45 7	37,236	0,1902	0,1400	0,1303	0,1235	0,1181	0,1138	0,1233	0,1104	0,1012	0,0941	0,0883
Plover	1431000	54 19	37,211	0,1902	0,1400	0,1303	0,1235	0,1181	0,1138	0,1233	0,1104	0,1012	0,0941	0,0883
Bobolink	1431000	45 7	36,246	0,1915	0,1406	0,1310	0,1241	0,1188	0,1144	0,1237	0,1108	0,1016	0,0945	0,0887
Martin	1351500	54 19	36,170	0,1916	0,1407	0,1310	0,1242	0,1188	0,1145	0,1237	0,1108	0,1017	0,0946	0,0888
Dipper	1351500	45 7	35,179	0,1929	0,1414	0,1317	0,1248	0,1195	0,1151	0,1242	0,1113	0,1021	0,0950	0,0892
Pheasant	1272000	54 19	35,103	0,1930	0,1414	0,1317	0,1249	0,1195	0,1152	0,1242	0,1113	0,1022	0,0950	0,0892
Bittern	1272000	45 7	34,163	0,1943	0,1421	0,1324	0,1255	0,1202	0,1158	0,1246	0,1117	0,1026	0,0955	0,0897
Grackle	1192500	54 19	33,858	0,1947	0,1423	0,1326	0,1257	0,1204	0,1160	0,1248	0,1119	0,1027	0,0956	0,0898
Runting	1192500	45 7	33,071	0,1959	0,1428	0,1332	0,1263	0,1210	0,1166	0,1252	0,1123	0,1031	0,0960	0,0902
Finch	1113000	54 19	32.842	0,1962	0,1430	0,1333	0.1265	0,1211	0,1168	0,1253	0,1124	0,1032	0.0961	0,0903
Bluejay	1113000	45 7	31.979	0,1975	0,1436	0,1340	0,1271	0,1218	0,1174	0,1257	0,1128	0,1036	0,0965	0,0907
Curlew	1033500	54 7	31,648	0,1980	0,1439	0,1342	0,1273	0,1220	0,1177	0,1259	0,1130	0,1038	0,0967	0,0909
Ortolan	1033500	45 7	30,810	0,1992	0,1445	0,1348	0,1280	0,1227	0,1183	0,1263	0,1134	0,1042	0,0971	0,0913
Tanager	1033500	36 1	30,124	0,2003	0,1451	0,1354	0,1285	0,1232	0,1188	0,1266	0,1137	0,1046	0,0975	0,0917
Cardinal	954000	54 7	30,378	0,1999	0,1449	0,1352	0,1283	0,1230	0,1186	0,1265	0,1136	0,1045	0,0974	0,0915
Rail	954000	45 7	29,591	0,2012	0,1455	0,1358	0,1289	0,1236	0,1193	0,1269	0,1140	0,1049	0,0978	0,0920
Catbird	954000	36 1	28,956	0,2022	0,1460	0,1363	0,1295	0,1241	0,1198	0,1273	0,1144	0,1052	0,0981	0,0923
Canary	900000	54 7	29.515	0,2013	0.1456	0,1359	0,1290	0,1237	0,1193	0,1270	0,1141	0,1049	0.0978	0,0920
Ruddy	900000	45 7	28,727	0,2026	0,1462	0,1365	0,1297	0,1243	0,1200	0,1274	0,1145	0,1053	0,0982	0,0924
Mallard	795000	30 19	28 956	0,2022	0,1440	0,1363	0,1295	0,1241	0,1198	0,1273	0,1144	0,1052	0.0981	0,0923
Drake	795000	26 7	28,143	0,2036	0,1467	0,1370	0,1301	0,1248	0,1205	0,1277	0,1148	0,1057	0,0986	0,0928
Condor	795000	54 7	27,762	0,2042	0,1470	0,1373	0,1305	0,1251	0,1208	0,1279	0,1150	0,1059	0,0988	0,0930

Tabela III.3.b. — Continuação

				Reatância Capacitiva a 60 (HZ) em mohm·km./Cond. para Espaçamento de 1 (m)										
				(1) condutor singelo	(2) espaçamento entre subcondutores (pol.)					(3) espaçamento entre subcondutores (pol.)				
código	área cm	campos. Al.-aço	dia (mm)		6	9	12	15	16	6	9	12	15	18
Cuckoo	795000	24 7	27,737	0,2043	0,1470	0,1374	0,1305	0,1252	0,1208	0,1280	0,1151	0,1059	0,0988	0,0930
Tern	795000	45 7	27,000	0,2055	0,1477	0,1380	0,1311	0,1258	0,1215	0,1284	0,1155	0,1063	0,0992	0,0934
Coot	795000	36 1	26,416	0,2066	0,1482	0,1385	0,1317	0,1263	0,1220	0,1287	0,1158	0,1067	0,0996	0,0938
Redwing	715500	30 19	27,457	0,2047	0,1473	0,1376	0,1307	0,1254	0,1211	0,1281	0,1152	0,1061	0,0990	0,0932
Starling	715500	26 7	26,695	0,2061	0,1479	0,1383	0,1314	0,1261	0,1217	0,1286	0,1157	0,1065	0,0994	0,0936
Stilt	715500	24 7	26,314	0,2068	0,1483	0,1386	0,1317	0,1264	0,1221	0,1288	0,1159	0,1067	0,0996	0,0938
Gannet	666600	26 7	25,756	0,2078	0,1488	0,1391	0,1323	0,1269	0,1226	0,1291	0,1162	0,1071	0,1000	0,0942
Flamingo	666600	24 7	25,400	0,2085	0,1491	0,1395	0,1326	0,1273	0,1229	0,1294	0,1165	0,1073	0,1002	0,0944
------	653900	18 3	24,206	0,2108	0,1503	0,1406	0,1337	0,1284	0,1241	0,1301	0,1172	0,1081	0,1010	0,0952
Egret	636000	30 19	25,883	0,2076	0,1487	0,1390	0,1321	0,1268	0,1225	0,1291	0,1162	0,1070	0,0999	0,0941
Grosbeak	636000	26 7	25,146	0,2089	0,1494	0,1397	0,1328	0,1275	0,1232	0,1295	0,1166	0,1075	0,1004	0,0945
Rook	636000	24 7	24,816	0,2096	0,1497	0,1400	0,1331	0,1278	0,1235	0,1297	0,1168	0,1077	0,1006	0,0948
Kingbird	636000	18 1	23,876	0,2114	0,1506	0,1409	0,1341	0,1287	0,1244	0,1303	0,1174	0,1083	0,1012	0,0954
Swift	636000	36 1	23,622	0,2119	0,1509	0,1412	0,1343	0,1290	0,1246	0,1305	0,1176	0,1085	0,1014	0,0956
Teal	605000	30 19	25,248	0,2087	0,1493	0,1396	0,1327	0,1274	0,1231	0,1295	0,1166	0,1074	0,1003	0,0945
Squab	605000	26 7	24,536	0,2101	0,1500	0,1403	0,1334	0,1281	0,1237	0,1299	0,1170	0,1079	0,1007	0,0949
Peacock	605000	24 7	24,206	0,2108	0,1503	0,1406	0,1337	0,1284	0,1241	0,1301	0,1172	0,1081	0,1010	0,0952
Eagle	556500	30 7	24,206	0,2108	0,1503	0,1406	0,1337	0,1284	0,1241	0,1301	0,1172	0,1081	0,1010	0,0952
Dove	556500	26 7	23,546	0,2121	0,1509	0,1413	0,1344	0,1291	0,1247	0,1306	0,1177	0,1085	0,1014	0,0956
Parakeet	556500	24 7	23,216	0,2127	0,1513	0,1416	0,1347	0,1294	0,1251	0,1308	0,1179	0,1087	0,1016	0,0958
Osprey	556500	18 1	22,327	0,2146	0,1522	0,1425	0,1357	0,1303	0,1260	0,1314	0,1185	0,1094	0,1023	0,0964
Hen	477000	30 7	22,428	0,2144	0,1521	0,1424	0,1356	0,1302	0,1259	0,1313	0,1184	0,1093	0,1022	0,0964
Hawk	477000	26 7	21,793	0,2158	0,1528	0,1431	0,1362	0,1309	0,1266	0,1318	0,1189	0,1097	0,1026	0,0968
Flicker	477000	24 7	21,488	0,2164	0,1531	0,1434	0,1366	0,1313	0,1269	0,1320	0,1191	0,1100	0,1029	0,0971
Pelican	477000	18 1	20,676	0,2183	0,1540	0,1444	0,1375	0,1322	0,1278	0,1326	0,1197	0,1106	0,1035	0,0977
Lark	397500	30 7	20,472	0,2188	0,1543	0,1446	0,1377	0,1324	0,1281	0,1328	0,1199	0,1107	0,1036	0,0978
Ibis	397500	26 7	19,888	0,2201	0,1550	0,1453	0,1384	0,1331	0,1287	0,1333	0,1204	0,1112	0,1041	0,0983
Brant	397500	24 7	19,609	0,2208	0,1553	0,1456	0,1388	0,1334	0,1291	0,1335	0,1206	0,1114	0,1043	0,0985
Chickadee	397500	18 1	18,872	0,2226	0,1562	0,1465	0,1397	0,1344	0,1300	0,1341	0,1212	0,1120	0,1049	0,0991
Oriole	336400	30 7	18,821	0,2228	0,1563	0,1466	0,1397	0,1344	0,1301	0,1341	0,1212	0,1121	0,1050	0,0992
Linnet	336400	26 7	18,313	0,2241	0,1569	0,1473	0,1404	0,1351	0,1307	0,1346	0,1217	0,1125	0,1054	0,0996
Merlin	336400	18 1	17,374	0,2266	0,1582	0,1485	0,1417	0,1363	0,1320	0,1354	0,1225	0,1133	0,1062	0,1004
Ostrich	300000	26 7	17,272	0,2269	0,1583	0,1487	0,1418	0,1365	0,1321	0,1355	0,1226	0,1134	0,1063	0,1005

Tabela III.3.b — Reatâncias Capacitivas de Condutores Múltiplos (CAA) em 60 (Hz) (Cont.)

				Reatância Capacitiva a 60 (HZ) em mohm·km./Cond. para Espaçamento de 1 (m)										
				(1) condutor singelo	(4) espaçamento entre subcondutores (pol.)					(6) espaçamento entre subcondutores (pol.)				
código	área cm	compos. Al.-aço	dia (mm)		6	9	12	15	16	6	9	12	15	18
Expanded	3108000	62/8 19	63,500	0,1647	0,1044	0,0899	0,0796	0,0716	0,0651	0,0880	0,0719	0,0605	0,0516	0,0443
Expanded	2294000	66/6 19	58,928	0,1683	0,1053	0,0908	0,0805	0,0725	0,0660	0,0886	0,0725	0,0611	0,0522	0,0449
Expanded	1414000	58/4 19	44,450	0,1817	0,1087	0,0941	0,0838	0,0759	0,0693	0,0909	0,0747	0,0633	0,0544	0,0472
Expanded	1275000	50/4 19	40,640	0,1860	0,1097	0,0952	0,0849	0,0769	0,0704	0,0916	0,0755	0,0640	0,0551	0,0479
Kiwi	2167000	72 7	44,120	0,1821	0,1087	0,0942	0,0839	0,0759	0,0694	0,0909	0,0748	0,0634	0,0545	0,0472
Bluebird	2156000	84 19	44,755	0,1814	0,1086	0,0941	0,0838	0,0758	0,0692	0,0908	0,0747	0,0632	0,0544	0,0471
Chukar	1780000	84 19	40,691	0,1860	0,1097	0,0952	0,0849	0,0769	0,0704	0,0916	0,0755	0,0640	0,0551	0,0479
Falcon	1590000	54 19	39,243	0,1877	0,1101	0,0956	0,0853	0,0773	0,0708	0,0919	0,0757	0,0643	0,0554	0,0482
Lapwing	1590000	45 7	38,151	0,1890	0,1105	0,0960	0,0857	0,0777	0,0711	0,0921	0,0760	0,0645	0,0556	0,0484
Parrot	1510500	54 19	38,252	0,1889	0,1105	0,0959	0,0856	0,0776	0,0711	0,0921	0,0759	0,0645	0,0556	0,0484
Nuthatch	1510500	45 7	37,236	0,1902	0,1108	0,0963	0,0860	0,0780	0,0714	0,0923	0,0762	0,0647	0,0558	0,0486
Plover	1431000	54 19	37,211	0,1902	0,1108	0,0963	0,0860	0,0780	0,0714	0,0923	0,0762	0,0647	0,0558	0,0486
Bobolink	1431000	45 7	36,246	0,1915	0,1111	0,0966	0,0863	0,0783	0,0718	0,0925	0,0764	0,0649	0,0560	0,0488
Martin	1351500	54 19	36,170	0,1916	0,1111	0,0966	0,0863	0,0783	0,0718	0,0925	0,0764	0,0649	0,0561	0,0488
Dipper	1351500	45 7	35,179	0,1929	0,1115	0,0969	0,0866	0,0786	0,0721	0,0927	0,0766	0,0652	0,0563	0,0490
Pheasant	1272000	54 19	35,103	0,1930	0,1115	0,0970	0,0867	0,0787	0,0721	0,0928	0,0766	0,0652	0,0563	0,0490
Bittern	1272000	45 7	34,163	0,1943	0,1118	0,0973	0,0870	0,0790	0,0725	0,0930	0,0768	0,0654	0,0565	0,0493
Grackle	1192500	54 19	33,858	0,1947	0,1119	0,0974	0,0871	0,0791	0,0726	0,0930	0,0769	0,0655	0,0566	0,0493
Bunting	1192500	45 7	33,071	0,1959	0,1122	0,0977	0,0874	0,0794	0,0729	0,0932	0,0771	0,0657	0,0568	0,0495
Finch	1113000	54 19	32,842	0,1962	0,1123	0,0978	0,0875	0,0795	0,0729	0,0933	0,0772	0,0657	0,0568	0,0496
Bluejay	1113000	45 7	31,979	0,1975	0,1126	0,0981	0,0878	0,0798	0,0733	0,0935	0,0774	0,0659	0,0570	0,0498
Curlew	1033500	54 7	31,648	0,1980	0,1127	0,0982	0,0879	0,0799	0,0734	0,0936	0,0775	0,0660	0,0571	0,0499
Ortolan	1033500	45 7	30,810	0,1992	0,1130	0,0985	0,0882	0,0802	0,0737	0,0938	0,0777	0,0662	0,0573	0,0501
Tanager	1033500	36 1	30,124	0,2003	0,1133	0,0988	0,0885	0,0805	0,0740	0,0940	0,0778	0,0664	0,0575	0,0503
Cardinal	954000	54 7	30,378	0,1999	0,1132	0,0987	0,0884	0,0804	0,0739	0,0939	0,0778	0,0663	0,0575	0,0502
Rail	954000	45 7	29,591	0,2012	0,1135	0,0990	0,0887	0,0807	0,0742	0,0941	0,0780	0,0665	0,0577	0,0504
Catbird	954000	36 1	28,956	0,2022	0,1138	0,0993	0,0890	0,0810	0,0744	0,0943	0,0782	0,0667	0,0578	0,0506
Canary	900000	54 7	29,515	0,2013	0,1135	0,0990	0,0887	0,0807	0,0742	0,0941	0,0780	0,0666	0,0577	0,0504
Ruddy	900000	45 7	28,727	0,2026	0,1139	0,0994	0,0891	0,0811	0,0745	0,0944	0,0782	0,0668	0,0579	0,0506
Mallard	795000	30 19	28,956	0,2022	0,1138	0,0993	0,0890	0,0810	0,0744	0,0943	0,0782	0,0667	0,0578	0,0506
Drake	795000	26 7	28,143	0,2036	0,1141	0,0996	0,0893	0,0813	0,0748	0,0945	0,0784	0,0669	0,0581	0,0508
Condor	795000	54 7	27,762	0,2042	0,1143	0,0998	0,0895	0,0815	0,0749	0,0946	0,0785	0,0670	0,0582	0,0509

Tabela III.3.b. — Continuação

código	área cm	compos. Al.-aço		dia (mm)	Reatância Capacitiva a 60 (HZ) em mohm·km./Cond. para Espaçamento de 1 (m)										
					(1) condutor singelo	(4) espaçamento entre subcondutores (pol.)					(6) espaçamento entre subcondutores (pol.)				
						6	9	12	15	16	6	9	12	15	18
Cuckoo	795000	24	7	27,737	0,2043	0,1143	0,0998	0,0895	0,0815	0,0750	0,0946	0,0785	0,0671	0,0582	0,0509
Tern	795000	45	7	27,000	0,2055	0,1146	0,1001	0,0898	0,0818	0,0753	0,0948	0,0787	0,0673	0,0584	0,0511
Coot	795000	36	1	26,416	0,2066	0,1149	0,1004	0,0901	0,0821	0,0755	0,0950	0,0789	0,0674	0,0586	0,0513
Redwing	715500	30	19	27,457	0,2047	0,1144	0,0999	0,0896	0,0816	0,0751	0,0947	0,0786	0,0671	0,0583	0,0510
Starling	715500	26	7	26,695	0,2061	0,1147	0,1002	0,0899	0,0819	0,0754	0,0949	0,0788	0,0674	0,0585	0,0512
Stilt	715500	24	7	26,314	0,2068	0,1149	0,1004	0,0901	0,0821	0,0756	0,0951	0,0789	0,0675	0,0586	0,5113
Gannet	666600	26	7	25,756	0,2078	0,1152	0,1007	0,0904	0,0824	0,0758	0,0952	0,0791	0,0676	0,0588	0,0515
Flamingo	666600	24	7	25,400	0,2085	0,1153	0,1008	0,0905	0,0825	0,0760	0,0953	0,0792	0,0678	0,0589	0,0516
———	653900	18	3	24,206	0,2108	0,1159	0,1014	0,0911	0,0831	0,0766	0,0957	0,0796	0,0681	0,0593	0,0520
Egret	636000	30	19	25,883	0,2076	0,1151	0,1006	0,0903	0,0823	0,0758	0,0952	0,0791	0,0676	0,0587	0,0515
Grosbeak	636000	26	7	25,146	0,2089	0,1155	0,1009	0,0906	0,0826	0,0761	0,0954	0,0793	0,0678	0,0590	0,0517
Rook	636000	24	7	24,816	0,2096	0,1156	0,1011	0,0908	0,0828	0,0763	0,0955	0,0794	0,0679	0,0591	0,0518
Kingbird	636000	18	1	23,876	0,2114	0,1161	0,1016	0,0913	0,0833	0,0767	0,0958	0,0797	0,0682	0,0594	0,0521
Swift	636000	36	1	23,622	0,2119	0,1162	0,1017	0,0914	0,0834	0,0769	0,0959	0,0798	0,0683	0,0595	0,0522
Teal	605000	30	19	25,248	0,2087	0,1154	0,1009	0,0906	0,0826	0,0761	0,0954	0,0792	0,0678	0,0589	0,0517
Squab	605000	26	7	24,536	0,2101	0,1158	0,1012	0,0909	0,0829	0,0764	0,0956	0,0795	0,0680	0,0592	0,0519
Peacock	605000	24	7	24,206	0,2108	0,1159	0,1014	0,0911	0,0831	0,0766	0,0957	0,0796	0,0681	0,0593	0,0520
Eagle	556500	30	7	24,206	0,2108	0,1159	0,1014	0,0911	0,0831	0,0766	0,0957	0,0796	0,0681	0,0593	0,0520
Dove	556500	26	7	23,546	0,2121	0,1162	0,1017	0,0914	0,0834	0,0769	0,0959	0,0798	0,0684	0,0595	0,0522
Parakeet	556500	24	7	23,216	0,2127	0,1164	0,1019	0,0916	0,0836	0,0771	0,0960	0,0799	0,0685	0,0596	0,0523
Osprey	556500	18	1	22,327	0,2146	0,1169	0,1024	0,0921	0,0841	0,0775	0,0964	0,0802	0,0688	0,0599	0,0526
Hen	477000	30	7	22,428	0,2144	0,1168	0,1023	0,0920	0,0840	0,0775	0,0963	0,0802	0,0687	0,0599	0,0526
Hawk	477000	26	7	21,793	0,2158	0,1172	0,1026	0,0923	0,0844	0,0778	0,0966	0,0804	0,0690	0,0601	0,0528
Flicker	477000	24	7	21,488	0,2164	0,1173	0,1028	0,0925	0,0845	0,0780	0,0967	0,0805	0,0691	0,0602	0,0530
Pelican	477000	18	1	20,676	0,2183	0,1178	0,1033	0,0930	0,0850	0,0785	0,0970	0,0808	0,0694	0,0605	0,0533
Lark	397500	30	7	20,472	0,2188	0,1179	0,1034	0,0931	0,0851	0,0786	0,0970	0,0809	0,0695	0,0606	0,0533
Ibis	397500	26	7	19,888	0,2201	0,1183	0,1037	0,0934	0,0854	0,0789	0,0973	0,0811	0,0697	0,0608	0,0536
Brant	397500	24	7	19,609	0,2208	0,1184	0,1039	0,0936	0,0856	0,0791	0,0974	0,0813	0,0698	0,0609	0,0537
Chickadee	397500	18	1	18,872	0,2226	0,1189	0,1044	0,0941	0,0861	0,0795	0,0977	0,0816	0,0701	0,0612	0,0540
Oriole	336400	30	7	18,821	0,2228	0,1189	0,1044	0,0941	0,0861	0,0796	0,0977	0,0816	0,0701	0,0613	0,0540
Linnet	336400	26	7	18,313	0,2241	0,1192	0,1047	0,0944	0,0864	0,0799	0,0979	0,0818	0,0704	0,0615	0,0542
Merlin	336400	18	1	17,374	0,2266	0,1199	0,1054	0,0951	0,0871	0,0805	0,0984	0,0822	0,0708	0,0619	0,0546
Ostrich	300000	26	7	17,272	0,2269	0,1199	0,1054	0,0951	0,0871	0,0806	0,0984	0,0823	0,0708	0,0619	0,0547

Tabela III.4 — Fator de Espaçamento Indutivo — 50 (Hz) — x''_L [ohm/km]

	0,00	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90
0,00		−0,14470	−0,10114	0,07566	−0,05758	−0,04356	−0,03210	−0,02241	−0,01402	−0,00662
1,00	0,00000	0,0599	0,01146	0,01649	0,02114	0,02548	0,02954	0,03334	0,03694	0,04033
2,00	0,04355	0,04662	0,04955	0,05234	0,05502	0,05758	0,06005	0,06242	0,06470	0,06691
3,00	0,06904	0,07110	0,07309	0,07503	0,07690	0,07873	0,08050	0,08222	0,08389	0,08553
4,00	0,08712	0,08867	0,09018	0,09166	0,09311	0,09452	0,09590	0,09725	0,09857	0,09987
5,00	0,10114	0,10238	0,10360	0,10480	0,10598	0,10713	0,10826	0,10937	0,11047	0,11154
6,00	0,11259	0,11364	0,11466	0,11566	0,11665	0,11763	0,11859	0,11953	0,12046	0,12138
7,00	0,12288	0,12318	0,12406	0,12492	0,12578	0,12662	0,12745	0,12827	0,12909	0,12989
8,00	0,13068	0,13146	0,13223	0,13299	0,13374	0,13449	0,13522	0,13595	0,13667	0,13738
9,00	0,13808	0,13877	0,13946	0,14014	0,14081	0,14148	0,14213	0,14278	0,14343	0,14407
10,00	0,14470	0,14532	0,14594	0,14656	0,14716	0,14777	0,14836	0,14895	0,14954	0,15011
11,00	0,15069	0,15126	0,15182	0,15238	0,15348	0,15348	0,15457	0,15457	0,15510	0,15563
12,00	0,15616	0,15668	0,15719	0,15771	0,15822	0,15872	0,15992	0,15972	0,16021	0,16070
13,00	0,16119	0 16167	0,16215	0,16262	0,16309	0,16356	0,16402	0,16448	0,16494	0,16539
14,00	0,16584	0,16629	0,16674	0,16718	0,16761	0,16805	0,16848	0,16891	0,16934	0,16976
15,00	0,17018	0,17060	0,17101	0,17142	0,17183	0,17224	0,17264	0,17305	0,17344	0,17384
16,00	0,17423	0,17463	0,17502	0,17540	0,17579	0,17617	0,17655	0,17693	0,17730	0,17767
17,00	0,17804	0,17841	0,17878	0,17914	0,17951	0,17987	0,18022	0,18058	0,18093	0,18129
18,00	0,18164	0,18199	0,18233	0,18267	0,18302	0,18336	0,18370	0,18403	0,18437	0,18470
19,00	0,18503	0,18536	0,18569	0,18602	0,18634	0,18667	0,18699	0,18731	0,18763	0,18794
20,00	0,18826	0,18857	0,18888	0,18919	0,18950	0,18981	0,19012	0,19042	0,19072	0,19102

Tabela III.5 — Fator de Espaçamento Indutivo — 60 (Hz) — x''_L [ohm/km]

	0,00	0,10	0,20	0 30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90
0,00		−0,17364	−0,12137	−0,09079	−0,06909	−0,05227	−0,03852	−0,02689	−0,01683	−0,00794
1,00	0,00000	0,00719	0,01375	0,01978	0,02537	0,03058	0,03544	0,04001	0,04432	0,04840
2,00	0,05227	0,05595	0,05946	0,06281	0,06602	0,06909	0,07005	0,07490	0,07764	0,08029
3,00	0,08285	0,08532	0,08771	0,09003	0,09228	0,09447	0,09659	0,09866	0,10067	0,10263
4,00	0,10454	0,10640	0,10822	0,10999	0,11173	0,11342	0,11508	0,11670	0,11829	0,11984
5,00	0,12137	0,12286	0,12432	0,12676	0,12717	0,12855	0,12991	0,13125	0,13256	0,13385
6,00	0,13512	0,13636	0,13759	0,13879	0,13998	0,14115	0,14230	0,14344	0,14455	0,14565
7,00	0,14674	0,14781	0,14886	0,14990	0,15093	0,15194	0,15294	0,15393	0,15490	0,15586
8,00	0,15681	0,15775	0,15867	0,15959	0,16049	0,16138	0,16227	0,16314	0,16400	0,16485
9,00	0,16569	0,16653	0,16735	0,16817	0,16897	0,16977	0,17056	0,17134	0,17212	0,17288
10,00	0,17364	0,17439	0,17513	0,17587	0,17670	0,17732	0,17803	0,17874	0,17944	0,18014
11,00	0,18083	0,18151	0,18219	0,18286	0,18352	0,18418	0,18483	0,18548	0,18612	0,18676
12,00	0,18739	0,18801	0,18863	0,18925	0,18936	0,19047	0,19107	0,19166	0,19225	0,19284
13,00	0,19342	0,19400	0,19458	0,19514	0,19571	0,19627	0,19683	0,19738	0,19793	0,19847
14,00	0,19901	0,19955	0,20008	0,20061	0,20114	0,20166	0,20218	0,20269	0,20320	0,20371
15,00	0,20422	0,20472	0,20521	0,20571	0,20620	0,20669	0,20717	0,20765	0,20813	0,20861
16,00	0,20908	0,20955	0,21002	0,21048	0,21094	0,21140	0,21186	0,21231	0,21276	0,21321
17,00	0,21365	0,21409	0,21454	0,21497	0,21541	0,21584	0,21627	0,21669	0,21712	0,21754
18,00	0,21796	0,21838	0,21879	0,21921	0,21962	0,22003	0,22044	0,22084	0,22124	0,22164
19,00	0,22204	0,22244	0,22283	0,22322	0,22361	0,22400	0,22439	0,22477	0,22515	0,22553
20,00	0,22591	0,22628	0,22666	0,22703	0,22740	0,22777	0,22814	0,22850	0,22887	0,22923

Tabela III.6 — Reatância Indutiva Mútua Entre Dois Circuitos — x''_L (ohm/km) — 50 (Hz)

D_{II}/D_I	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,5	−0,043551	−0,042307	−0,041087	−0,039890	−0,038715	−0,037562	−0,036430	−0,035318	−0,034226	−0,033151
0,6	−0,032095	−0,031057	−0,030035	−0,029030	−0,028040	−0,027066	−0,026107	−0,025162	−0,024231	−0,023314
0,7	−0,022410	−0,021519	−0,020640	−0,019773	−0,018918	−0,018075	−0,017243	−0,016421	−0,015611	−0,014810
0,8	−0,014020	−0,013239	−0,012468	−0,011707	−0,010954	−0,010211	−0,009476	−0,008749	−0,008031	−0,007321
0,9	−0,006619	−0,005925	−0,005238	−0,004559	−0,003886	−0,003222	−0,002564	−0,001913	−0,001269	−0,000631
1,0	0	0,000325	0,001244	0,001857	−0,002464	0,003065	0,003661	0,004250	0,004835	0,005414
1,1	0,005988	0,006556	0,007120	0,007679	0,008232	0,008781	0,009325	0,009864	0,010399	0,010929
1,2	0,011455	0,011976	0,012493	0,013007	0,013515	0,024020	0,024521	0,015017	0,015510	0,015999
1,3	0,016484	0,016966	0,017443	0,017918	0,018388	0,018855	0,019319	0,019779	0,020236	0,020690
1,4	0,021141	0,021584	0,022032	0,022473	0,022911	0,023445	0,023777	0,024206	0,024632	0,025055
1,5	0,025475	0,025893	0,026308	0,026720	0,027129	0,027536	0,028940	0,028341	0,028740	0,029137

Tabela III.7 — Reatância Indutiva Mútua Entre Dois Circuitos — x''_L (ohm/km) — 60 (Hz).

D_{II}/D_I	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,5	−0,052261	−0,050768	−0,049304	−0,047868	−0,046459	−0,045075	−0,043716	−0,042382	−0,041071	−0,039782
0,6	−0,038515	−0,037268	−0,036042	−0,034836	−0,033649	−0,032480	−0,031328	−0,030195	−0,029078	−0,027977
0,7	−0,026892	−0,025822	−0,024768	−0,023728	−0,022702	−0,021690	−0,020691	−0,019706	−0,018733	−0,017772
0,8	−0,016824	−0,015887	−0,014962	−0,014048	−0,013145	−0,012253	−0,011371	−0,010499	−0,009638	−0,008786
0,9	−0,007943	−0,007110	−0,006286	−0,005471	−0,004665	−0,003867	−0,003077	−0,002296	−0,001523	−0,000757
1,0	0	0,000750	0,001493	0,002228	0,002957	0,003678	0,004393	0,005101	0,005802	0,006497
1,1	0,007186	0,007868	0,008544	0,009214	0,009878	0,010537	0,011190	0,011837	0,012479	0,013115
1,2	0,013746	0,014372	0,014992	0,015608	0,016218	0,016824	0,017425	0,018021	0,018612	0,019199
1,3	0,019781	0,020359	0,020962	0,021501	0,022066	0,022627	0,023183	0,023735	0,024284	0,024828
1,4	0,025369	0,025905	0,026438	0,026967	0,027493	0,028015	0,028533	0,029047	0,029559	0,030066
1,5	0,030571	0,031072	0,031569	0,032064	0,032555	0,033043	0,033528	0,034010	0,034488	0,034964

Tabela III.8 — Fator de Espaçamento Capacitivo — x''_C (Megohm·km) — 50 (Hz)

(m)	0,00	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90
0,00		−0,13192	−0,09221	−0,06898	−0,05249	−0,03971	−0,02927	−0,02043	−0,01278	−0,00604
1,00	0,00000	0,00546	0,01044	0,01503	0,01928	0,02323	0,02693	0,03040	0,03367	0,03677
2,00	0,03971	0,04251	0,04517	0,04772	0,05016	0,05249	0,05474	0,05690	0,05899	0,06100
3,00	0,00294	0,06482	0,06664	0,06840	0,07011	0,07177	0,07339	0,07496	0,07648	0,07797
4,00	0,07942	0,08084	0,08222	0,08357	0,08488	0,08617	0,08743	0,08866	0,08987	0,09105
5,00	0,09221	0,09334	0,09445	0,09555	0,09662	0,09767	0,09870	0,09971	0,10071	0,10169
6,00	0,00265	0,10360	0,10463	0,10545	0,10635	0,10724	0,00811	0,10897	0,10982	0,11066
7,00	0,11148	0,11230	0,11310	0,11389	0,11467	0,11544	0,11620	0,11694	0,11768	0,11841
8,00	0,11913	0,11985	0,12055	0,12124	0,12193	0,12261	0,12328	0,12394	0,12460	0,12524
9,00	0,12588	0,12652	0,12714	0,12776	0,12837	0,12898	0,12958	0,13017	0,13076	0,13134
10,00	0,13192	0,13249	0,13305	0,13361	0,13417	0,13471	0,13526	0,13579	0,13633	0,13686
11,00	0,13738	0,13790	0,13841	0,13892	0,13943	0,13993	0,14042	0,14091	0,14140	0,14189
12,00	0,14236	0,14284	0,14331	0,14378	0,14424	0,14470	0,14516	0,14561	0,14606	0,14651
13,00	0,14695	0,14739	0,14783	0,14826	0,14869	0,14911	0,14954	0,14995	0,15037	0,15078
14,00	0,15120	0,15160	0,15201	0,15241	0,15281	0,15321	0,15360	0,15399	0,15438	0,15477
15,00	0,15515	0,15553	0,15591	0,15628	0,15666	0,15703	0,15740	0,15776	0,15813	0,15849
16,00	0,15885	0,15920	0,15956	0,15991	0,16026	0,16061	0,16096	0,16130	0,16164	0,16198
17,00	0,16232	0,16266	0,16300	0,16332	0,16335	0,16398	0,16431	0,16463	0,16495	0,16427
18,00	0,16560	0,16591	0,16623	0,16654	0,16685	0,16716	0,16737	0,16778	0,16809	0,16839
19,00	0,16870	0,16899	0,16929	0,16959	0,16989	0,17018	0,17047	0,17076	0,17105	0,17134
20,00	0,17163	0,17192	0,17220	0,17248	0,17277	0,17305	0,17332	0,17360	0,17388	0,17415

Tabela III.9 — Fator de Espaçamento Capacitivo — x''_C (Megohm·km) — 60 (Hz)

	0,00	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90
0,00		−0,10993	−0,07684	−0,05748	−0,04375	−0,03309	−0,02439	−0,01703	−0,01065	−0,00503
1,00	0,00000	0,00455	0,00870	0,01252	0,01606	0,01935	0,02244	0,02533	0,02806	0,03064
2,00	0,03309	0,03542	0,03764	0,03976	0,04179	0,04375	0,04561	0,04742	0,04916	0,05083
3,00	0,05245	0,05401	0,05553	0,05700	0,05842	0,05981	0,06115	0,06246	0,06374	0,06498
4,00	0,06618	0,06736	0,06851	0,06964	0,07073	0,07181	0,07286	0,07388	0,07489	0,07587
5,00	0,07684	0,07778	0,07871	0,07962	0,08051	0,08139	0,08225	0,08309	0,08392	0,08474
6,00	0,08554	0,08863	0,87111	0,08787	0,08862	0,08936	0,09009	0,09081	0,09152	0,09222
7,00	0,09290	0,09358	0,09425	0,09491	0,09556	0,09620	0,09683	0,09745	0,09897	0,09868
8,00	0,09928	0,09987	0,10046	0,10104	0,10161	0,10317	0,10273	0,10328	0,10383	0,10437
9,00	0,10490	0,10543	0,10595	0,10647	0,10698	0,10748	0,10798	0,10848	0,10897	0,10945
10,00	0,10993	0,11041	0,11088	0,11134	0,11180	0,11226	0,11271	0,11316	0,11361	0,11405
11,00	0,11448	0,11491	0,11534	0,11577	0,11619	0,11660	0,11702	0,11743	0,11783	0,11824
12,00	0,11864	0,11903	0,11943	0,11982	0,12020	0,12059	0,12097	0,12134	0,12172	0,12209
13,00	0,12246	0,12282	0,12319	0,12355	0,12391	0,12426	0,12561	0,12496	0,12531	0,12565
14,00	0,12600	0,12634	0,12667	0,12701	0,12734	0,21767	0,12800	0,12833	0,12865	0.12897
15,00	0,12929	0,12961	0,12992	0,13024	0,13055	0,13086	0,13116	0,13147	0,13177	0,13207
16,00	0,13237	0,13267	0,13296	0,13326	0,13355	0,13384	0,13413	0,13442	0,13470	0,13498
17,00	0,13526	0,13555	0,13582	0,13610	0,13638	0,13665	0,13692	0,13719	0,13746	0,13773
18,00	0,13799	0,13826	0,13852	0,13878	0,13904	0,13930	0,13965	0,13982	0,14007	0,14032
19,00	0,14058	0,14083	0,14108	0,14132	0,14157	0,14182	0,14206	0,14230	0,14255	0,14279
20,00	0,14303	0,14326	0,14350	0,14374	0,14397	0,14420	0,14444	0,14467	0,14490	0,14513

Tabela III.10 — Reatância Capacitiva Mútua Entre Dois Circuitos — x_C''' (Megohm·km) — 50 (Hz)

D_{II}/D_I	x'''									
	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,5	−0,039711	−0,038577	−0,037465	−0,036372	−0,035303	−0,034251	−0,033218	−0,032205	−0,031208	−0,030229
0,6	−0,029266	−0,028319	−0,027387	−0,026471	−0,025568	−0,024680	−0,023806	−0,022944	−0,022095	−0,021258
0,7	−0,020434	−0,019621	−0,018821	−0,018030	−0,017251	−0,016482	−0,015723	−0,014974	−0,014235	−0,013504
0,8	−0,012784	−0,012071	−0,011370	−0,010674	−0,009988	−0,009310	−0,008640	−0,007978	−0,007024	−0,006676
0,9	−0,006036	−0,005403	−0,004776	−0,004158	−0,003544	−0,002939	−0,002338	−0,001745	−0,001156	−0,000575
1,0	0,000000	0,000569	0,001134	0,001693	0,002246	0,002795	0,003388	0,003875	0,004408	0,004937
1,1	0,005460	0,005978	0,006493	0,007002	0,007503	0,008007	0,008503	0,008995	0,009482	0,009966
1,2	0,010445	0,010921	0,011392	0,011860	0,001232	0,012784	0,013240	0,013693	0,014143	0,014589
1,3	0,015030	0,015470	0,015905	0,016338	0,016767	0,017193	0,017616	0,018036	0,018452	0,018865
1,4	0,019277	0,019685	0,020090	0,020492	0,020890	0,021287	0,021681	0,022072	0,022460	0,022847
1,5	0,023229	0,023611	0,023988	0,024364	0,024737	0,025108	0,025476	0,025843	0,026207	0,026568

Tabela III.11 — Reatância Capacitiva Mútua Entre Dois Circuitos — x''_C (Megohm·km) — 60 (Hz)

D_{II}/D_I	x''_C 0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,5	−0,033092	−0,032147	−0,031220	−0,030310	−0,029419	−0,028543	−0,027682	−0,026837	−0,026006	−0,026191
0,6	−0,024388	−0,023599	−0,022823	−0,022059	−0,021307	−0,020567	−0,019838	−0,019120	−0,018412	−0,017715
0,7	−0,017028	−0,016351	−0,015684	−0,015025	−0,014375	−0,013735	−0,013102	−0,012478	−0,011862	−0,011253
0,8	−0,010653	−0,010059	−0,009475	−0,008895	−0,008324	−0,007759	−0,007200	−0,006648	−0,006103	−0,005563
0,9	−0,005030	−0,004502	−0,003980	−0,003465	−0,002953	−0,002449	−0,001949	−0,001454	−0,000964	−0,000479
1,0	0,000000	0,000747	0,000945	0,001411	0,001872	0,002329	0,002782	0,003229	0,003673	0,004114
1,1	0,004550	0,004982	0,005410	0,005835	0,006255	0,006672	0,007086	0,007496	0,007901	0,008305
1,2	0,008704	0,009101	0,009493	0,009884	0,010269	0,010653	0,011033	0,011411	0,011785	0,012157
1,3	0,012525	0,012891	0,013254	0,013615	0,013972	0,014327	0,014680	0,015030	0,015377	0,015721
1,4	0,016064	0,016404	0,016741	0,017076	0,017408	0,017739	0,018067	0,018393	0,018717	0,019039
1,5	0,019358	0,019675	0,019990	0,020303	0,020614	0,020923	0,021230	0,021535	0,021839	0,022140

Tabela III.12.a — Cabos de Aço Galvanizados para Pára-Raios — Características Elétricas (Valores Convertidos do EHV — Transmission Reference Book)

Tipo (7 fios)	Diâmetros nominais		Resistência a 60(Hz) [ohm/km]			Reatâncias indutivas com espaçamento de 1 [m]						Reatância capacitiva espaçamento de 1 [m]
						I = 0 [A]		d = 30 [A]		I = 60 [A]		
	(in.)	[cm]	I = 0 [A]	I = 30 [A]	I = 60 [A]	x'_L [ohm/km]	RMG 10^{-6} [m]	x'_L [ohm/km]	RMG 10^{-12} [m]	x'_L [ohm/km]	RMG 10^{-12} [m]	[Mohm · km] x'_c
Comum	1/4	0,6350	5,903	7,084	7,022	0,958	3,033	2,416	0,012	2,226	0,151	0,2746
	9/32	0,7144	4,412	5,717	5,592	0,837	15,096	2,000	3,019	1,752	305,84	0,2689
	5/16	0,7937	3,355	4,660	4,847	0,611	302,425	1,652	305,084	1,358	15 061,6	0,2639
	3/8	0,9525	2,672	4,039	4,101	0,611	302,425	1,479	3 026,255	1,313	27 357,2	0,2552
	1/2	1,2700	1,429	2,672	3,107	0,528	909,286	1,140	271 367,6	0,975	2 420 828	0,2414
HS	1/4	0,6350	4,971	7,456	6,276	0,837	15,096	2,868	$0{,}030 \cdot 10^{-3}$	2,051	1,535	0,2746
	9/32	0,7144	3,728	6,214	5,406	0,792	27,419	2,438	0,009	1,721	122,173	0,2689
	5/16	0,7937	3,045	4,971	4,305	0,702	90,459	1,917	0,078	1,652	305,084	0,2639
	3/8	0,9525	2,299	4,350	3,915	0,611	302,425	1,705	151,056	1,600	608,052	0,2552
	1/2	1,2700	1,305	3,045	3,107	0,528	909,286	1,253	6 062,81	1,184	151 396,7	0,2414
EHS	1/4	0,6350	4,350	7,954	6,773	1,132	0,302	3,284	$0{,}121 \cdot 10^{-6}$	2,543	0,002	0,2746
	9/32	0,7144	3,355	6,773	5,406	0,972	27,419	2,876	$0{,}027 \cdot 10^{-3}$	2,438	0,009	0,2689
	5/16	0,7937	2,485	5,592	4,225	0,702	90,459	2,347	0,030	2,000	3,019	0,2639
	3/8	0,9525	2,175	4,909	3,728	0,611	302,425	2,027	2,111	1,826	30,351	0,2552
	1/2	1,2700	1,243	3,542	2,920	0,528	909,286	1,548	1 211,89	1,479	3 026,255	0,2414

Tabela III.12.b — Características Elétricas de Condutores para Cabos Pára-Raios — Cabos Alumoweld

Composição (AWG)	*Resistência em* (ohm/km)				*Reatância indutiva a* 1(m) 60(Hz)		*Raio médio geométrico a* 60 (Hz) (m)
	Corrente peq. 25°C		*Corrente* 75% *cap.* 75°C		x'_L *Indutiva* [ohm/km]	x'_C *Capacitiva* [Megohm km]	
	CC	60(Hz)	*CC*	60(Hz)			
7 × N.° 5	0,756	0,770	0,890	1,037	0,593	2,477	0,009705
7 × N.° 6	0,937	0,955	1,109	1, 249	0,605	2,554	0,008639
7 × N.° 7	1,181	1,204	1,392	1,535	0,616	2,630	0,007694
7 × N.° 8	1,492	1,516	1,753	1,902	0,628	2,707	0,006841
7 × N.° 9	1,877	1,914	2,213	2,362	0,640	2,782	0,001076
7 × N.° 10	2,368	2,411	2,784	2,940	0,652	2,857	0,005440
3 × N.° 5	1,728	1,728	2,032	2,126	0,593	2,696	0,009646
3 × N.° 6	2,181	2,181	2,567	2,741	0,605	2,771	0,008590
3 × N.° 7	2,747	2,747	3,238	3,400	0,616	2,846	0,007654
3 × N.° 8	3,468	3,468	4,083	4,239	0,628	2,923	0,006818
3 × N.° 9	4,375	4,375	5,146	5,295	0,640	2,998	0,006080
3 × N.° 10	5,513	5,513	6,488	6,631	0,652	3,073	0,005414

Dados Compilados a partir de EHV — *Transmission Reference Book.*

Tabela III.12.c — Cabos de Alumínio-Aço para Pára-Raios — Características Elétricas (Valores Convertidos do EHV-Transmission Reference Book)

	Raio externo 10^{-3}[m]	*Resistência Elétrica a* 60(Hz) *e* 75°C			*Reatâncias para afastamento de* 1 [m] — 60[Hz]						
					I = 0 [A]		I = 100 [A]		I = 200 [A]		x_C' [Mohm·km]
		[ohm/km]	[ohm/km]	[ohm/km]	x_L' [ohm/km]	*RMG* 10^{-3}[m]	x_L' [ohm/km]	*RMG* 10^{-3}[m]	x_L' [ohm/km]	*RMG* 10^{-3}[m]	
Brahma	0,01814	0,2921	0,3170	0,3511	0,4006	4,930	0,4130	4,179	0,4286	3,398	0,2245
Cochin	0,01684	0,2983	0,3232	0,3667	0,4037	4,728	0,4099	4,355	0,4317	3,261	0,2280
Dorking	0,01603	0,3325	0,3574	0,4040	0,4099	4,355	0,4193	3,8444	0,4410	2,883	0,2303
Dotterel	0,01542	0,3511	0,3853	0,4382	0,4099	4,355	0,4193	3,844	0,4472	2,655	0,2322
Guinea	0,01463	0,3915	0,4275	0,4848	0,4130	4,179	0,4286	3,398	0,4565	2,347	0,2343
Leghorn	0,01346	0,4723	0,5034	0,5180	0,4193	3,844	0,4317	3,261	0,4659	2,072	0,2387
Minorca	0,01222	0,5687	0,6091	0,7023	0,4255	3,541	0,4441	2,767	0,4876	1,554	0,2433
Petrel	0,01171	0,6215	0,6619	0,7582	0,4317	3,261	0,4503	2,548	0,4969	1,374	0,2453
Grouse	0,00932	0,8048	0,8825	0,9447	0,4441	2,767	0,4876	1,554	0,5094	1,164	0,2562

Tabela III.13 — Fatores Indutivos de Circuitos com Retorno pelo Solo — $x_e = 28{,}935 \times 10^{-4}\, f \log 660 \sqrt{\rho/f}$ [ohm/km]; $f = 60$ [Hz]

ρ	*Resistência do solo em* ohm/m³								
	× 1	× 2	× 3	× 4	× 5	× 6	× 7	× 8	× 9
1	0,33509	0,36125	0,37655	0,38733	0,39578	0,40266	0,40847	0,41351	0,41794
10	0,42191	0,44804	0,46334	0,47418	0,48260	0,48947	0,49528	0,50031	0,50975
100	0,50869	0,53485	0,55015	0,56093	0,56938	0,57621	0,57800	0,58711	0,59154
1 000	0,59551	0,62164	0,63694	0,64778	0,65620	0,66307	0,66888	0,67391	0,67835
10 000	0,68229	0,70845	0,72375	0,73453	0,74298	0,74986	0,75567	0,76071	0,76514

Na falta de informações mais precisas sobre a resistividade do solo, usar: $x_2 = 0{,}50869$ [ohm/km]; $\rho = 100$.

Apêndice IV

TABELAS ÚTEIS

Tabela IV.1.a — Funções Exponenciais ϵ^{x} e ϵ^{-x}

0,00 — 1,99

x	*Função*	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,0	ϵ^{x}	1,0000	1,0101	1,0202	1,0305	1,0408	1,0513	1,0618	1,0725	1,0833	1,0942
	ϵ^{-x}	1,0000	0,9900	0,9802	0,9704	0,9608	0,9512	0,9418	0,9324	0,9231	0,9139
0,1	ϵ^{x}	1,1052	1,1163	1,1275	1,1388	1,1503	1,1618	1,1735	1,1853	1,1972	1,2093
	ϵ^{-x}	0,9048	0,8958	0,8869	0,8781	0,8694	0,8607	0,8521	0,8437	0,8353	0,8270
0,2	ϵ^{x}	1,2214	1,2337	1,2461	1,2586	1,2712	1,2840	1,2969	1,3100	1,3231	1,3364
	ϵ^{-x}	0,8187	0,8106	0,8025	0,7945	0,7866	0,7788	0,7711	0,7634	0,7558	0,7483
0,3	ϵ^{x}	1,3499	1,3634	1,3771	1,3910	1,4049	1,4191	1,4333	1,4477	1,4623	1,4770
	ϵ^{-x}	0,7408	0,7334	0,7261	0,7189	0,7118	0,7047	0,6977	0,6907	0,6839	0,6771
0,4	ϵ^{x}	1,4918	1,5068	1,5220	1,5373	1,5527	1,5683	1,5841	1,6000	1,6161	1,6323
	ϵ^{-x}	0,6703	0,6637	0,6570	0,6505	0,6440	0,6376	0,6313	0,6250	0,6188	0,6126
0,5	ϵ^{x}	1,6487	1,6653	1,6820	1,6989	1,7160	1,7333	1,7507	1,7683	1,7860	1,8040
	ϵ^{-x}	0,6065	0,6005	0,5945	0,5886	0,5827	0,5769	0,5712	0,5655	0,5599	0,5543
0,6	ϵ^{x}	1,8221	1,8404	1,8589	1,8776	1,8965	1,9155	1,9348	1,9542	1,9739	1,9939
	ϵ^{-x}	0,5488	0,5434	0,5379	0,5326	0,5273	0,5220	0,5169	0,5117	0,5066	0,5017
0,7	ϵ^{x}	2,0138	2,0340	2,0544	2,0751	2,0959	2,1170	2,1383	2,1598	2,1815	2,2034
	ϵ^{-x}	0,4966	0,4916	0,4868	0,4819	0,4771	0,4724	0,4677	0,4630	0,4584	0,4538
0,8	ϵ^{x}	2,2255	2,2479	2,2705	2,2933	2,3164	2,3396	2,3632	2,3869	2,4109	2,4351
	ϵ^{-x}	0,4493	0,4449	0,4404	0,4360	0,4317	0,4274	0,4232	0,4190	0,4148	0,4107
0,9	ϵ^{x}	2,4596	2,4843	2,5093	2,5345	2,5600	2,5857	2,6117	2,6379	2,6645	2,6912
	ϵ^{-x}	0,4066	0,4025	0,3985	0,3946	0,3906	0,3867	0,3829	0,3791	0,3753	0,3716
1,0	ϵ^{x}	2,7183	2,7456	2,7732	2,8011	2,8292	2,8577	2,8864	2,9154	2,9447	2,9743
	ϵ^{-x}	0,3679	0,3642	0,3606	0,3570	0,3535	0,3499	0,3465	0,3430	0,3396	0,3362
1,1	ϵ^{x}	3,0042	3,0344	3,0649	3,0957	3,1268	3,1582	3,1899	3,2220	3,2544	3,2871
	ϵ^{-x}	0,3329	0,3296	0,3263	0,3230	0,3198	0,3166	0,3135	0,3104	0,3073	0,3042
1,2	ϵ^{x}	3,3201	3,3535	3,3872	3,4212	3,4556	3,4903	3,5254	3,5609	3,5966	3,6328
	ϵ^{-x}	0,3012	0,2932	0,2952	0,2923	0,2894	0,2865	0,2837	0,2808	0,2780	0,2753
1,3	ϵ^{x}	3,6693	3,7062	3,7434	3,7810	3,8190	3,8574	3,8962	3,9354	3,9749	4,0149
	ϵ^{-x}	0,2725	0,2698	0,2671	0,2645	0,2618	0,2592	0,2567	0,2541	0,2516	0,2491
1,4	ϵ^{x}	4,0552	4,0960	4,1371	4,1787	4,2207	4,2631	4,3060	4,3492	4,3929	4,4371
	ϵ^{-x}	0,2466	0,2441	0,2417	0,2393	0,2369	0,2346	0,2322	0,2299	0,2276	0,2254
1,5	ϵ^{x}	4,4817	4,5267	4,5722	4,6182	4,6646	4,7115	4,7588	4,8066	4,8550	4,9037
	ϵ^{-x}	0,2231	0,2209	0,2187	0,2165	0,2144	0,2122	0,2101	0,2080	0,2060	0,2039
1,6	ϵ^{x}	4,9530	5,0028	5,0531	5,1039	5,1552	5,2070	5,2593	5,3122	5,3656	5,4195
	ϵ^{-x}	0,2019	0,1999	0,1979	0,1959	0,1940	0,1920	0,1901	0,1882	0,1864	0,1845
1,7	ϵ^{x}	5,4739	5,5290	5,5845	5,6407	5,6973	5,7546	5,8124	5,8709	5,9299	5,9895
	ϵ^{-x}	0,1827	0,1809	0,1791	0,1773	0,1755	0,1738	0,1720	0,1703	0,1686	0,1670
1,8	ϵ^{x}	6,0496	6,1104	6,1719	6,2339	6,2965	6,3598	6,4237	6,4883	6,5535	6,6194
	ϵ^{-x}	0,1653	0,1637	0,1620	0,1604	0,1588	0,1572	0,1557	0,1541	0,1526	0,1511
1,9	ϵ^{x}	6,6859	4,7531	6,8310	6,8895	6,9588	7,0287	7,0993	7,1707	7,2427	7,3155
	ϵ^{-x}	0,1496	0,1481	0,1466	0,1451	0,1437	0,1423	0,1409	0,1395	0,1381	0,1367

Tabela IV.1 b — Funções Hiperbólicas

0,00 — 1,49

Argumento	*Função*	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	sen h	0,0000	0,0100	0,0200	0,0300	0,0400	0,0500	0,0600	0,0701	0,0801	0,0901
0,0	cos h	1,0000	1,0001	1,0002	1,0005	1,0008	1,0013	1,0018	1,0025	1,0032	1,0041
	tg h	0,0000	0,0100	0,0200	0,0300	0,0400	0,0500	0,0599	0,0699	0,0798	0,0898
	sen h	0,1002	0,1102	0,1203	0,1304	0,1405	0,1506	0,1607	0,1708	0,1810	0,1911
0,1	cos h	1,0050	1,0061	1,0072	1,0085	1,0098	1,0113	1,0128	0,0145	1,0162	1,0181
	tg h	0,0997	0,1096	0,1194	0,1293	0,1391	0,1489	0,1587	0,1684	0,1781	0,1878
	sen h	0,2013	0,2115	0,2218	0,2320	0,2423	0,2526	0,2629	0,2733	0,2837	0,2941
0,2	cos h	1,0201	1,0221	1,0243	1,0266	1,0289	1,0314	1,0340	1,0367	1,0395	1,0423
	tg h	0,1974	0,2070	0,2165	0,2260	0,2355	0,2449	0,2543	0,2636	0,2729	0,2821
	sen h	0,3045	0,3150	0,3255	0,3360	0,3466	0,3572	0,3678	0,3785	0,3892	0,4000
0,3	cos h	1,0453	1,0484	1,0516	1,0549	1,0584	1,0619	1,0655	1,0692	1,0731	1,0770
	tg h	0,2913	0,3004	0,3095	0,3185	0,3275	0,3364	0,3452	0,3540	0,3627	0,3714
	sen h	0,4108	0,4216	0,4325	0,4434	0,4543	0,4653	0,4764	0,4875	0,4986	0,5098
0,4	cos h	1,0811	1,0852	1,0895	1,0939	1,0984	1,1030	1,1077	1,1125	1,1174	1,1225
	tg h	0,3800	0,3885	0,3969	0,4053	0,4136	0,4219	0,4301	0,4382	0,4462	0,4542
	sen h	0,5211	0,5324	0,5438	0,5552	0,5666	0,5782	0,5897	0,6014	0,6131	0,6248
0,5	cos h	1,1276	1,1329	1,1383	1,1438	1,1494	1,1551	1,1609	1,1669	1,1730	1,1792
	tg h	0,4621	0,4700	0,4777	0,4854	0,4930	0,5005	0,5080	0,5154	0,5227	0,5299
	sen h	0,6367	0,6485	0,6605	0,6725	0,6846	0,6967	0,7090	0,7213	0,7336	0,7461
0,6	cos h	1,1855	1,1919	1,1984	1,2051	1,2119	1,2188	1,2258	1,2330	1,2402	1,2476
	tg h	0,5370	0,5441	0,5511	0,5581	0,5649	0,5717	0,5784	0,5850	0,5915	0,5980
	sen h	0,7586	0,7712	0,7838	0,7966	0,8094	0,8223	0,8353	0,8484	0,8615	0,8748
0,7	cos h	1,2552	1,2628	1,2706	1,2785	1,2865	1,2947	1,3030	1,3114	1,3199	1,3286
	tg h	0,6044	0,6107	0,6169	0,6231	0,6292	0,6352	0,6411	0,6469	0,6527	0,6584
	sen h	0,8881	0,9015	0,9150	0,9286	0,9423	0,9561	0,9700	0,9840	0,9981	1,0122
0,8	cos h	1,3374	1,3464	1,3555	1,3647	1,3740	1,3835	1,3932	1,4029	1,4128	1,4229
	tg h	0,6640	0,6696	0,6751	0,6805	0,6858	0,6911	0,6963	0,7014	0,7064	0,7114
	sen h	1,0265	1,0409	1,0554	1,0700	1,0847	1,0995	1,1144	1,1294	1,1446	1,1598
0,9	cos h	1,4331	1,4434	1,4539	1,4645	1,4753	1,4862	1,4973	1,5085	1,5199	1,5314
	tg h	0,7163	0,7211	0,7259	0,7306	0,7352	0,7398	0,7443	0,7487	0,7531	0,7574
	sen h	1,1752	1,1907	1,2063	1,2220	1,2379	1,2539	1,2700	1,2862	1,3025	1,3190
1,0	cos h	1,5431	1,5549	1,5669	1,5790	1,5913	1,6038	1,6164	1,6292	1,6421	1,6552
	tg h	0,7616	0,7658	0,7699	0,7739	0,7779	0,7818	0,7857	0,7895	0,7932	0,7969
	sen h	1,3356	1,3524	1,3693	1,3863	1,4035	1,4208	1,4382	1,4558	1,4735	1,4914
1,1	cos h	1,6685	1,6820	1,6956	1,7093	1,7233	1,7374	1,7517	1,7662	1,7808	1,7956
	tg h	0,8005	0,8041	0,8076	0,8110	0,8144	0,8178	0,8210	0,8243	0,8275	0,8306
	sen h	1,5095	1,5276	1,5460	1,5645	1,5831	1,6019	1,6209	1,6400	1,6593	1,6788
1,2	cos h	1,8107	1,8258	1,8412	1,8568	1,8725	1,8884	1,9045	1,9208	1,9373	1,9540
	tg h	0,8337	0,8367	0,8397	0,8426	0,8455	0,8483	0,8511	0,8538	0,8565	0,8591
	sen h	1,6984	1,7182	1,7381	1,7583	1,7786	1,7991	1,8198	1,8406	1,8617	1,8829
1,3	cos h	1,9709	1,9880	2,0053	2,0228	2,0404	2,0583	2,0764	2,0947	2,1132	2,1320
	tg h	0,8617	0,8643	0,8668	0,8693	0,8717	0,8741	0,8764	0,8787	0,8810	0,8832
	sen h	1,9043	1,9259	1,9477	1,9697	1,9919	2,0143	2,0369	2,0597	2,0827	2,1059
1,4	cos h	2,1509	2,1700	2,1894	2,2090	2,2288	2,2488	2,2691	2,2896	2,3103	2,3312
	tg h	0,8854	0,8875	0,8896	0,8917	0,8937	0,8957	0,8977	0,8996	0,9015	0,9033

Tabela IV.1.c — Funções Hiperbólicas

1,50-2,99

Argumento	*Função*	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	sen h	2,1293	2,1529	2,1768	2,2008	2,2251	2,2496	2,2743	2,2993	2,3245	2,3499
1,5	cos h	2,3524	2,3738	2,3955	2,4174	2,4395	2,4619	2,4845	2,50 4	2,5305	2,5538
	tg h	0,9052	0,9069	0,9087	0,9104	0,9121	0,9138	0,9154	0,9170	0,9186	0,9202
	sen h	2,3756	2,4015	2,4276	2,4540	2,4806	2,5075	2,5346	2,5620	2,5896	2,6175
1,6	cos h	2,5775	2,6013	2,6255	2,6499	2,6746	2,6995	2,7247	2,7502	2,7760	2,8020
	tg h	0,9217	0,9232	0,9246	0,9261	0,9275	0,9289	0,9302	0,9316	0,9329	0,9342
	sen h	2,6456	2,6740	2,7027	2,7317	2,7609	2,7904	2,8202	2,8503	2,8806	2,9112
1,7	cos h	2,8283	2,8549	2,8818	2,9090	2,9364	2,9642	2,9922	3,0206	3,0493	3,0782
	tg h	0,9354	0,9367	0,9379	0,9391	0,9402	0,9414	0,9425	0,9436	0,9447	0,9458
	sen h	2,9422	2,9734	3,0049	3,0367	3,0689	3,1013	3,1340	3,1671	3,2005	3,2341
1,8	cos h	3,1075	3,1371	3,1669	3,1972	3,2277	3,2585	3,2897	3,3212	3,3530	3,3852
	tg h	0,9468	0,9478	0,9488	0,9498	0,9508	0,9518	0,9527	0,9536	0,9545	0,9554
	sen h	3,2682	3,3025	3,3372	3,3722	3,4075	3,4432	3,4792	3,5156	3,5523	3,5894
1,9	cos h	3,4177	3,4506	3,4838	3,5173	3,5512	3,5855	3,6201	3,6551	3,6904	3,7261
	tg h	0,9562	0,9571	0,9579	0,9587	0,9505	0,9603	0,9611	0,9619	0,9626	0,9633
	sen h	3,6269	3,6647	3,7028	3,7414	3,7803	3,8196	3,8593	3,8993	3,9398	3,9806
2,0	cos h	3,7622	3,7987	3,8355	3,8727	3,9103	3,9483	3,9867	4,0255	4,0647	4,1043
	tg h	0,9640	0,9647	0,9654	0,9661	0,9668	0,9674	0,9680	0,9686	0,9693	0,9699
	sen h	4,0219	4,0635	4,1056	4,1480	4,1909	4,2342	4,2779	4,3221	4,3666	4,4117
2,1	cos h	4,1443	4,1847	4,2256	4,2668	4,3085	4,3507	4,3932	4,4362	4,4797	4,5236
	tg h	0,9705	0,9710	0,9716	0,9722	0,9727	0,9732	0,9738	0,9743	0,9748	0,9752
	sen h	4,4571	4,5030	4,5494	4,5962	4,6434	4,6912	4,7394	4,7880	4,8372	4,8868
2,2	cos h	4,5679	4,6127	4,6580	4,7037	4,7499	4,7966	4,8437	4,8914	4,9395	4,9881
	tg h	0,9757	0,9762	0,9767	0,9771	0,9776	0,9780	0,9785	0,9789	0,9793	0,9797
	sen h	4,9370	4,9876	5,0387	5,0903	5,1425	5,1951	5,2483	5,3020	5,3562	5,4109
2,3	cos h	5,0372	5,0868	5,1370	5,1876	5,2388	5,2905	5,3427	5,3954	5,4487	5,5026
	tg h	0,9801	0,9805	0,9809	0,9812	0,9816	0,9820	0,9823	0,9827	0,9830	0,9834
	sen h	5,4662	5,5221	5,5785	5,6354	5,6929	5,7510	5,8097	5,8689	5,9288	5,9892
2,4	cos h	5,5569	5,6119	5,6674	5,7235	5,7801	5,8373	5,8951	5,9535	6,0125	6,0721
	tg h	0,9837	0,9840	0,9843	0,9846	0,9849	0,9852	0,9855	0,9858	0,9861	0,9864
	sen h	6,0502	6,1118	6,1741	6,2369	6,3004	6,3645	6,4293	6,4946	6,5607	6,6274
2,5	cos h	6,1323	6,1931	6,2545	6,3166	6,3793	6,4426	6,5066	6,5712	6,6365	6,7024
	tg h	0,9866	0,9869	0,9871	0,9874	0,9876	0,9879	0,9881	0,9884	0,9886	0,9888
	sen h	6,6947	6,7628	6,8315	6,9009	6,9709	7,0417	7,1132	7,1854	7,2583	7,3319
2,6	cos h	6,7690	6,8363	6,9043	6,9729	7,0423	7,1123	7,1831	7,2546	7,3268	7,3998
	tg h	0,9890	0,9892	0,9895	0,9897	0,9899	0,9901	0,9903	0,9905	0,9906	0,9908
	sen h	7,4083	7,4814	7,5572	7,6338	7,7112	7,7894	7,8683	7,9480	8,0285	8,1098
2,7	cos h	7,4735	7,5479	7,6231	7,6991	7,7758	7,8533	7,9316	8,0106	8,0905	8,1712
	tg h	0,9910	0,9912	0,9914	0,9915	0,9917	0,9919	0,9920	0,9922	0,9923	0,9925
	sen h	8,1919	8,2749	8,3586	8,4432	8,5287	8,6150	8,7021	8,7902	8,8791	9,9689
2,8	cos h	8,2527	8,3351	8,4182	8,5022	8,5871	8,6728	8,7594	8,8469	8,9352	9,0244
	tg h	0,9926	0,9928	0,9929	0,9931	0,9932	0,9933	0,9935	0,9936	0,9937	0,9938
	sen h	9,0596	9,1512	9,2437	9,3371	9,4315	9,5268	9,6231	9,7203	9,8185	9,9177
2,9	cos h	9,1146	9,2056	9,2976	9,3905	9,4844	9,5792	9,6749	9,7716	9,8693	9,9680
	tg h	0,9940	0,9941	0,9942	0,9943	0,8914	0,9945	0,9946	0,9948	0,9949	0,9950

Tabela IV.2.a — Logaritmos Decimais

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	*D*
10	0000	0043	0086	0128	0170	0212	0253	0294	0334	0374	40
11	0414	0453	0492	0531	0569	0607	0645	0682	0719	0755	37
12	0792	0828	0864	0899	0934	0969	1004	1038	1072	1106	33
13	1139	1173	1206	1239	1271	1303	1335	1367	1399	1430	31
14	1461	1492	1523	1553	1584	1614	1644	1673	1703	1732	29
15	1761	1790	1818	1847	1875	1903	1931	1959	1987	2014	27
16	2041	2068	2095	2122	2148	2175	2201	2227	2253	2279	25
17	2304	2330	2355	2380	2405	2430	2455	2480	2504	2529	24
18	2553	2577	2601	2625	2648	2672	2695	2718	2742	2765	23
19	2788	2810	2833	2856	2878	2900	2923	2945	2967	2989	21
20	3010	3032	3054	3075	3096	3118	3139	3160	3181	3201	21
21	3222	3243	3263	3284	3304	3324	3345	3365	3385	3404	20
22	3424	3444	3464	3483	3502	3522	3541	3560	3579	3598	19
23	3617	3636	3655	3674	3692	3711	3729	3747	3766	3784	18
24	3802	3820	3838	3856	3874	3892	3909	3927	3945	3962	17
25	3979	3997	4014	4031	4048	4065	4082	4099	4116	4133	17
26	4150	4166	4183	4200	4216	4232	4249	4265	4281	4298	16
27	4314	4330	4346	4362	4378	4393	4409	4425	4440	4456	16
28	4472	4487	4502	4518	4533	4548	4564	4579	4594	4609	15
29	4624	4639	4654	4669	4683	4698	4713	4728	4742	4757	14
30	4771	4786	4800	4814	4829	4843	4857	4871	4886	4900	14
31	4914	4928	4942	4955	4969	4983	4997	5011	5024	5038	13
32	5051	5065	5079	5092	5105	5119	5132	5145	5159	5172	13
33	5185	5198	5211	5224	5237	5250	5263	5276	5289	5302	13
34	5315	5328	5340	5353	5366	5378	5391	5403	5416	5428	13
35	5441	5453	5465	5478	5490	5502	5514	5527	5539	5551	12
36	5563	5575	5587	5599	5611	5623	5635	5647	5658	5670	12
37	5682	5694	5705	5717	5729	5740	5752	5763	5775	5786	12
38	5798	5809	5821	5832	5843	5855	5866	5877	5888	5899	12
39	5911	5922	5933	5944	5955	5966	5977	5988	5999	6010	11
40	6021	6031	6042	6053	6064	6075	6085	6096	6107	6117	11
41	6128	6138	6149	6160	6170	6180	6191	6201	6212	6222	10
42	6232	6243	6253	6263	6274	6284	6294	6304	6314	6325	10
43	6335	6345	6355	6365	6375	6385	6395	6405	6415	6425	10
44	6435	6444	6454	6464	6474	6484	6493	6503	6513	6522	10
45	6532	6542	6551	6561	6571	6580	6590	6599	6609	6618	10
46	6628	6637	6646	6656	6665	6675	6684	6693	6702	6712	9
47	6721	6730	6739	6749	6758	6767	6776	6785	6794	6803	9
48	6812	6821	6830	6839	6848	6857	6866	6875	6884	6893	9
49	6902	6911	6920	6928	6937	6946	6955	6964	6972	6981	9
50	6990	6998	7007	7016	7024	7033	7042	7050	7059	7067	9
51	7076	7084	7093	7101	7110	7118	7126	7135	7143	7152	8
52	7160	7168	7177	7185	7193	7202	7210	7218	7226	7235	8
53	7243	7251	7259	7267	7275	7284	7292	7300	7308	7316	8
54	7324	7332	7340	7348	7356	7364	7372	7380	7388	7396	8

Tabela IV.2.b — Logaritmos Decimais

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	*D*
55	7404	7412	7419	7427	7435	7443	7451	7459	7466	7474	8
56	7482	7490	7497	7505	7513	7520	7528	7536	7543	7551	8
57	7559	7566	7574	7582	7589	7597	7604	7612	7619	7627	7
58	7634	7642	7649	7657	7664	7672	7679	7686	7694	7701	8
59	7709	7716	7723	7731	7738	7745	7752	7760	7767	7774	8
60	7782	7789	7796	7803	7810	7818	7825	7832	7839	7846	7
61	7853	7860	7868	7875	8782	7889	7896	7903	7910	7917	7
62	7924	7931	7938	7945	7952	7959	7966	7973	7980	7987	6
63	7993	8000	8007	8014	8021	8028	8035	8041	8048	8055	7
64	8062	8069	8075	8082	8089	8096	8102	8109	8116	8122	7
65	8129	8136	8142	8149	8156	8162	8169	8176	8182	8189	6
66	8195	8202	8209	8215	8222	8228	8235	8241	8248	8254	7
67	8261	8267	8274	8280	8287	8293	8299	8306	8312	8319	6
68	8325	8331	8338	8344	8351	8357	8363	8370	8376	8382	6
69	8388	8395	8401	8407	8414	8420	8426	8432	8439	8445	6
70	8451	8457	8463	8470	8476	8482	8488	8494	8500	8506	7
71	8513	8519	8525	8531	8537	8543	8549	8555	8561	8567	6
72	8573	8579	8585	8591	8597	8603	8609	8615	8621	8627	6
73	8633	8639	8645	8651	8657	8663	8669	8675	8681	8686	6
74	8692	8698	8704	8710	8716	8722	8727	8733	8739	8745	6
75	8751	8756	8762	8768	8774	8779	8785	8791	8797	8802	6
76	8808	8814	8820	8825	8831	8837	8842	8848	8854	8859	6
77	8865	8871	8876	8882	8887	8893	8899	8904	8910	8915	6
78	8921	8927	8932	8938	8943	8949	8954	8960	8965	8971	5
79	8976	8982	8987	8993	8998	9004	9009	9015	9020	9025	6
80	9031	9036	9042	9047	9053	9058	9063	9069	9074	9079	6
81	9085	9090	9096	9101	9196	9112	9117	9122	9128	9133	5
82	9138	9143	9149	9154	9159	9165	9170	9175	9180	9186	5
83	9191	9196	9201	9206	9212	9217	9222	9227	9232	9238	5
84	9243	9248	9253	9258	9263	9269	9274	9279	9284	9289	5
85	9294	9299	9304	9309	9315	9320	9325	9330	9335	9340	5
86	9345	9350	9355	9360	9365	9370	9375	9380	9385	9390	5
87	9395	9400	9405	9410	9415	9420	9425	9430	9435	9440	5
88	9445	9450	9455	9460	9465	9468	9474	9479	9484	9489	5
89	9494	9499	9504	9509	9513	9518	9523	9528	9533	9538	4
90	9542	9547	9552	9557	9562	9566	9571	9576	9581	9586	4
91	9590	9595	9600	9605	9609	9614	9619	9624	9628	9633	5
92	9638	9643	9647	9652	9657	9661	9666	9671	9675	9680	5
93	9685	9689	9694	9699	9703	9708	9713	9717	9722	9717	4
94	9731	9736	9741	9745	9750	9754	9759	9763	9768	9773	4
95	9777	9782	9786	9791	9795	9800	9805	9809	9814	9818	5
96	9823	9827	9832	9836	9841	9845	9850	9854	9859	9863	5
97	9868	9872	9877	9881	9886	9890	9894	9899	9903	9908	4
98	9912	9917	9921	9926	9930	9934	9939	9943	9948	9952	4
99	9956	9961	9965	9969	9974	9978	9983	9987	9991	9996	4

Tabela IV.3.a — Funções Trigonométricas Circulares

Sen 0° *a* 45°

Mín.	0	6	12	18	24	30	36	42	48	54	60	
Grad.	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	
0	0,0000	0017	0035	0052	0070	0087	0105	0122	0140	0157	0175	89
1	0175	0192	0209	0227	0244	0262	0279	0297	0314	0332	0349	88
2	0349	0366	0384	0401	0419	0436	0454	0471	0488	0506	0523	87
3	0523	0541	0558	0576	0593	0610	0628	0645	0663	0680	0698	86
4	0698	0715	0732	0750	0767	0785	0802	0819	0837	0854	0872	85
5	0,0872	0889	0906	0924	0941	0958	0976	0993	1011	1028	1045	84
6	1045	1063	1080	1097	1115	1132	1149	1167	1184	1201	1219	83
7	1219	1236	1253	1271	1288	1305	1323	1340	1357	1374	1392	82
8	1392	1409	1426	1444	1461	1478	1495	1513	1530	1547	1564	81
9	1564	1582	1599	1616	1633	1650	1668	1685	1702	1719	1736	**80**
10	0,1736	1754	1771	1788	1805	1822	1840	1857	1874	1891	1908	79
11	1908	1925	1942	1959	1977	1994	2011	2028	2045	2062	2079	78
12	2079	2096	2113	2130	1247	2164	2181	2198	2215	2233	2250	77
13	2250	2267	2284	2300	2317	2334	2351	2368	2385	2402	2419	76
14	2419	2436	2453	2470	2487	2504	2521	2538	2554	2571	2588	75
15	0,2588	2605	2622	2639	2656	2672	2689	2706	2723	2740	2756	74
16	2756	2773	2790	2807	2823	2840	2857	2874	2890	2907	2924	73
17	2924	2940	2957	2974	2990	3007	3024	3040	3057	3074	3090	72
18	3090	3107	3123	3140	3156	3173	3190	3206	3223	3239	3256	71
19	3256	3272	3289	3305	3322	3338	3355	3371	3387	3404	3420	**70**
20	0,3420	3437	3453	3469	3486	3502	3518	3535	3551	3567	3584	69
21	3584	3600	3616	3633	3649	3665	3681	3697	3714	3730	3746	68
22	3746	3762	3778	3795	3811	3827	3843	3859	3875	3891	3907	67
23	3907	3923	3939	3955	3971	3987	4003	4019	4035	4051	4067	66
24	4067	4083	4099	4115	4131	4147	4163	4179	4195	4210	4226	65
25	0,4226	4242	4258	4274	4289	4305	4321	4337	4352	4368	4384	64
26	4384	4399	4415	4431	4446	4462	4478	4493	4509	4524	4540	63
27	4540	4555	4571	4586	4602	4617	4633	4648	4664	4679	4695	62
28	4695	4710	4726	4741	4756	4772	4787	4802	4818	4833	4848	61
29	4848	4863	4879	4894	4909	4924	4939	4955	4970	4985	5000	**60**
30	0,5000	5015	5030	5045	5060	5075	5090	5105	5120	5135	5150	59
31	5150	5165	5180	5195	5210	5225	5240	5255	5270	5284	5299	58
32	5299	5314	5329	5344	5358	5373	5388	5402	5417	5432	5446	57
33	5446	5461	5476	5490	5505	5519	5534	5548	5563	5577	5592	56
34	5592	5606	5621	5635	5650	5664	5678	5693	5707	5721	5736	55
35	0,5736	5750	5764	5779	5793	5807	5821	5835	5850	5864	5878	54
36	5878	5892	5906	5920	5934	5948	5962	5976	5990	6004	6018	53
37	6018	6032	6046	6060	6074	6088	6101	6115	6129	6143	6157	52
38	6157	6170	6184	6198	6211	6225	6239	6252	6266	6280	6293	51
39	6293	6307	6320	6334	6347	6361	6374	6388	6401	6414	6428	**50**
40	0,6428	6441	6455	6468	6481	6494	6508	6521	6534	6547	6561	49
41	6561	6574	6587	6600	6613	6626	6639	6652	6665	6678	6691	48
42	6691	6704	6717	6730	6743	6756	6769	6782	6794	6807	6820	47
43	6820	6833	6845	6858	6871	6884	6896	6909	6921	6934	6947	46
44	0,6947	6959	6972	6984	6997	7009	7022	7034	7046	7059	7071	45
	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0,0	*Grad.*
	60	54	48	42	36	30	24	18	12	6	0	*Mín.*

Cos 45° *a* 90°

Tabela IV.3.b — Funções Trigonométricas Circulares

Sen 45° a 90°

Min.	0	6	12	18	24	30	36	42	48	54	60	
Grad.	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	
45	0,7071	7083	7096	7108	7120	7133	7145	7157	7169	7181	7193	44
46	7193	7206	7218	7230	7242	7254	7266	7278	7290	7302	7314	43
47	7317	7325	7337	7349	7361	7373	7385	7396	7408	7420	7431	42
48	7431	7443	7455	7466	7478	7940	7501	7513	7524	7536	7547	41
49	7547	7559	7570	7531	7593	7604	7615	7627	7638	7649	7660	**40**
50	0,7660	7672	7683	7694	7705	7716	7727	7738	7749	7760	7771	39
51	7771	7782	7793	7804	7815	7826	7837	7848	7859	7869	7880	38
52	7880	7891	7902	7912	7923	7934	7944	7955	7965	7976	7986	37
53	7986	7997	8007	8018	8028	8039	8049	8059	8070	8080	8090	36
54	8090	8100	8111	8121	8131	8141	8151	8161	8171	8181	8192	35
55	0,8192	8202	8211	8221	8231	8241	8251	8261	8271	8281	8290	34
56	8290	8300	8310	8320	8329	8339	8348	8358	8368	8377	8387	33
57	8387	8396	8406	8415	8425	8434	8443	8453	8462	8471	8480	32
58	8480	8490	8499	8508	8517	8526	8536	8545	8554	8563	8572	31
59	8572	8581	8590	8599	8607	8616	8625	8634	8643	8652	8660	**30**
60	0,8660	8669	8678	8686	8695	8704	8712	8721	8729	8738	8746	29
61	8746	8755	8763	8771	8780	8788	8796	8805	8813	8821	8829	28
62	8829	8838	8846	8854	8862	8870	8878	8886	8894	8902	8910	27
63	8910	8918	8926	8934	8942	8949	8957	8965	8973	8980	8988	26
64	8988	8996	9003	9011	9018	9026	9033	9041	9048	9056	9063	25
65	0,9063	9070	9078	9085	9092	9100	9107	9114	9121	9128	9135	24
66	9135	9143	9150	9157	9164	9171	9178	9184	9191	9198	9205	23
67	9205	9212	9219	9225	9232	9239	9245	9252	9259	9265	9272	22
68	9272	9278	9285	9291	9298	9304	9311	9317	9323	9330	9336	21
69	9336	9342	9348	9354	9361	9367	9373	9379	9385	9391	9397	**20**
70	0,9397	9403	9409	9415	9421	9426	9432	9438	9444	9449	9455	19
71	9455	9461	9466	9472	9478	9483	9489	9494	9500	9505	9511	18
72	9511	9516	9521	9527	9532	9537	9542	9548	9553	9558	9563	17
73	9563	9568	9573	9578	9583	9588	9593	9598	9603	9608	9613	16
74	9613	9617	9622	9627	9632	9636	9641	9646	9650	9655	9659	15
75	0,9659	9664	9668	0,9673	9677	9681	9686	9690	9694	9699	9703	14
76	9703	9707	9711	9715	9720	9724	9728	9732	9736	9740	9744	13
77	9744	9748	9751	9755	9759	9763	9767	9770	9774	9778	9781	12
78	9781	9785	9789	9792	9796	9799	9803	9806	9810	9813	9816	11
79	9816	9820	9823	9826	9829	9833	9836	9839	9842	9845	9848	**10**
80	0,9848	9851	9854	9857	9860	9863	9866	9869	9871	9874	9877	9
81	9877	9880	9882	9885	9888	9890	9893	9895	9898	9900	9903	8
82	9903	9905	9907	9910	9912	9914	9917	9919	9921	9923	9925	7
83	9925	9928	9930	9932	9934	9936	9938	9940	9942	9943	9945	6
84	9945	9947	9949	9951	9952	9954	9956	9957	9959	9960	9962	5
85	0,9962	9963	9965	9966	9968	9969	9971	9972	9973	9974	9976	4
86	9976	9977	9978	9979	9980	9981	9982	9983	9984	9985	9986	3
87	9986	9987	9988	9989	9990	9990	9991	9992	9993	9993	9994	2
88	9994	9995	9995	9996	9996	9997	9997	9997	9998	9998	9998	1
89	0,9998	9999	9999	9999	9999	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	**0**
	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0,0	Grad.
	60	54	48	42	36	30	24	18	12	6	0	Min.

Cos 0° a 45

Tabela IV.3.c — Funções Trigonométricas Circulares

Tg 0° a 45°

Min.	0	6	12	18	24	30	36	42	48	54	60	
Grad.	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	
0	0,0000	0017	0035	0052	0070	0087	0105	0122	0140	0157	0175	89
1	0175	0192	0209	0227	0244	0262	0279	0297	0314	0332	0349	88
2	0349	0367	0384	0402	0419	0437	0454	0472	0489	0507	0524	87
3	0524	0542	0559	0577	0594	0612	0629	0647	0664	0682	0699	86
4	0699	0717	0734	0752	0769	0787	0805	0822	0840	0857	0875	85
5	0,0875	0892	0910	0928	0945	0963	0981	0998	1016	1033	1051	84
6	1051	1069	1086	1104	1122	1139	1157	1175	1192	1210	1228	83
7	1228	1246	1263	1281	1299	1317	1334	1352	1370	1388	1405	82
8	1405	1423	1441	1459	1477	1495	1512	1530	1548	1566	1584	81
9	1584	1602	1620	1638	1655	1673	1691	1709	1727	1745	1763	**80**
10	0,1763	1781	1799	1817	1835	1853	1871	1890	1908	1926	1944	79
11	1944	1962	1980	1998	2016	2035	2053	2071	2089	2107	2126	78
12	2126	2144	2162	2180	2199	2217	2235	2254	2272	2290	2309	77
13	2309	2327	2345	2364	2382	2401	2419	2438	2456	2475	2493	76
14	2493	2512	2530	2549	2568	2586	2605	2623	2642	2661	2679	75
15	0,2679	2698	2717	2736	2754	2773	2792	2811	2830	2849	2867	74
16	2867	2886	2905	2924	2943	2962	2981	3000	3019	3038	3057	73
17	3057	3076	3096	3115	3134	3153	3172	3191	3211	3230	3249	72
18	3249	3269	3288	3307	3327	3346	3365	3385	3404	3424	3443	71
19	3443	3463	3482	3502	3522	3541	3561	3581	3600	3620	3640	**70**
20	0,3640	3659	3679	3699	3719	3739	3759	3779	3790	3819	3839	69
21	3839	3859	3879	3899	3919	3939	3959	3979	4000	4020	4040	68
22	4040	4061	4081	4101	4122	4142	4163	4183	4204	4224	4245	67
23	4245	4265	4286	4307	4327	4348	4369	4390	4411	4431	4452	66
24	4452	4473	4494	4515	4536	4557	4578	4599	4621	4642	4663	65
25	0,4663	4684	4706	4727	4748	4770	4791	4813	4834	4856	4877	64
26	4877	4899	4921	4942	4964	4986	5008	5029	5051	5073	5095	63
27	5095	5117	5139	5161	5184	5206	5228	5250	5272	5295	5317	62
28	5317	5340	5362	5384	5407	5430	5452	5475	5498	5520	5543	61
29	5543	5566	5589	5612	5635	5658	5681	5704	5727	5750	5774	**60**
30	0,5774	5797	5820	5844	5867	5890	5914	5938	5961	5985	6009	59
31	6009	6032	6056	6080	6104	6128	6152	6176	6200	6224	6249	58
32	6249	6273	6297	6322	6346	6371	6395	6420	6445	6469	6494	57
33	6494	6519	6544	6569	6594	6619	6644	6669	6694	6720	6745	56
34	6745	6771	6795	6822	6847	6873	6899	6924	6950	6976	7002	55
35	0,7002	7028	7054	7080	7107	7133	7159	7186	7212	7239	7265	54
36	7265	7292	7319	7346	7373	7400	7427	7454	7481	7508	7536	53
37	7536	7563	7590	7618	7646	7673	7701	7729	7757	7785	7813	52
38	7813	7841	7869	7898	7926	7954	7983	8012	8040	8069	8098	51
39	8098	8127	8156	8185	8214	8243	8273	8302	8332	8361	8391	**50**
40	0,8391.	8421	8451	8481	8511	8541	8571	8601	8632	8662	8693	49
41	8693	8724	8754	8785	8816	8847	8878	8910	8941	8972	9004	48
42	9004	9036	9067	9099	9131	9163	9195	9228	9260	9293	9325	47
43	9325	9358	9391	9424	9457	9490	9523	9556	9590	9623	9657	46
44	0,9657	9691	9725	9759	9793	9827	9861	9896	9930	9965	1,0000	45
	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0,0	Grad.
	60	54	48	42	36	30	24	18	12	6	0	Min.

Cotg 0° a 45°

Tabela IV.3.d — Funções Trigonométricas Circulares

Tg 45° a 90°

Min.	0	6	12	18	24	30	36	42	48	54	60	
Grad.	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	
45	1,000	1,003	1,007	1,011	1,014	1,018	1,021	1,025	1,028	1,023	1,036	**44**
46	1,036	1,039	1,043	1,046	1,050	1,054	1,057	1,061	1,065	1,069	1,072	**43**
47	1,072	1,076	1,080	1,084	1,087	1,091	1,095	1,099	1,103	1,107	1,111	**42**
48	1,111	1,115	1,118	1,122	1,126	1,130	1,134	1,138	1,142	1,146	1,150	**41**
49	1,150	1,154	1,159	1,163	1,167	1,171	1,175	1,179	1,183	1,188	1,192	**40**
50	1,192	1,196	1,200	1,205	1,209	1,213	1,217	1,222	1,226	1,230	1,235	39
51	1,235	1,239	1,244	1,248	1,253	1,257	1,262	1,266	1,271	1,275	1,280	38
52	1,280	1,285	1,289	1,294	1,299	1,303	1,308	1,313	1,317	1,322	1,327	37
53	1,327	1,332	1,337	1,342	1,347	1,351	1,356	1,361	1,366	1,371	1,376	36
54	1,376	1,381	1,387	1,392	1,397	1 402	1,407	1,412	1,418	1,423	1,428	35
55	1,428	1,433	1,439	1,444	1,450	1,455	1,460	1,466	1,471	1,477	1,483	43
56	1,483	1,488	1,494	1,499	1,505	1,511	1,517	1,522	1,528	1,534	1,540	33
57	1,540	1,546	1,552	1,558	1,564	1,570	1,576	1,582	1,588	1,594	1,600	32
53	1,600	1,607	1,613	1,619	1,625	1,632	1,638	1,645	1,651	1,658	1,664	31
59	1,664	1,671	1,678	1,684	1,691	1,698	1,704	1,711	1,718	1,725	1,732	**30**
60	1,732	1,739	1,746	1,753	1,760	1,767	1,775	1,782	1,789	1,797	1,804	29
61	1,804	1,811	1,819	1,827	1,834	1,842	1,849	1,857	1,865	1,873	1,881	28
62	1,881	1,889	1,897	1,905	1,913	1,921	1,929	1,937	1,946	1,954	1,963	27
63	1,963	1,971	1,980	1,988	1,997	2,006	2,014	2,023	2,032	2,041	2,050	26
64	2,050	2,059	2,069	2,078	2,087	2,097	2,106	2,116	2,125	2,135	2,145	25
65	2,145	2,154	2,164	2,174	2,184	2,194	2,204	2,215	2,225	2,236	2,246	24
66	2,246	2,257	2,267	2,278	2,289	2,300	2,311	2,322	2,333	2,344	2,356	23
67	2,356	2,367	2,379	2,391	2,402	2,414	2,426	2,438	2,450	2,463	2,475	22
68	2,475	2,488	2,500	2,513	2,526	2,539	2,552	2,565	2,578	2,592	2,605	21
69	2,605	2,619	2,633	2,646	2,660	2,675	2,689	2,703	2,718	2,733	2,747	**20**
70	2,747	2,762	2,778	2,793	2,808	2,824	2,840	2,856	2,872	2,888	2,904	19
71	2,904	2,921	2,937	2,954	2,971	2,989	3,006	3,024	3,012	3,060	3,078	18
72	3,078	3,096	3,115	3,133	3,152	3,172	3,191	3,211	3,230	3,251	3,271	17
73	3,271	3,291	3,312	3,333	3,354	3,376	3,398	3,420	3,442	3,465	3,487	16
74	3,487	3,511	3,534	3,558	3,582	3,606	3,630	3,655	3,681	3,706	3,732	15
75	3,732	3,758	3,785	3,812	3,839	3,867	3,895	3,923	3,952	3,981	4,011	14
76	4,011	4,041	4,071	4,102	4,134	4,165	4,198	4,250	4,264	4,297	4,331	13
77	4,331	4,366	4,402	4,437	4,474	4,511	4,548	4,586	4,625	4,665	4,705	12
78	4,705	4,745	4,787	4,829	4,872	4,915	4,959	5,005	5,050	5,097	5,145	11
79	5,145	5,193	5,242	5,292	5,343	5,396	5,449	5,503	5,558	5,614	5,671	**10**
80	5,671	5,730	5,789	5,850	5,912	5,976	6,041	6,107	6,174	6,243	6 314	9
81	6,314	6,386	6,460	6,535	6,612	6,691	6,772	6.855	6,940	7,026	7,115	8
82	7,115	7,207	7,300	7,396	7,495	7,596	7,700	7,806	7,916	8,028	8,144	7
83	8,144	8,264	8,386	8,513	8,643	8,777	8,915	9,058	9,205	9,357	9,514	6
84	9,514	9,677	9,845	10,02	10,20	10,39	10,58	10,78	10,99	11,20	11,43	5
85	11,43	11,66	11,91	12,16	12,43	12,71	13,00	13,30	13,62	13,95	14,30	4
86	14,30	14,67	15,06	15,46	15,89	16,35	16,83	17,34	17,89	18,46	19,08	3
87	19,08	19.74	20,45	21,20	22,02	22,90	23,86	24,90	26,03	27,27	28,64	2
88	28,64	30,14	31,82	33,69	35,80	38,19	40,92	44,07	47,74	52,08	57,29	1
89	57,29	63,66	71,62	81,85	95,49	114,6	143,2	191,0	286,5	573,0		**0**
	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0,0	*Grad*
	60	54	48	42	36	30	24	18	12	6	0	*Min*

Cotg 45° a 90°