



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

**IMPLANTAÇÃO, ESTUDOS E AVALIAÇÃO
PARAMÉTRICA DE LINHAS DE
TRANSMISSÃO**

Marco Antônio Fernandes

Ilha Solteira - SP

UNESP
UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**IMPLANTAÇÃO, ESTUDOS E AVALIAÇÃO
PARAMÉTRICA DE LINHAS DE TRANSMISSÃO**

MESTRADO

MARCO ANTÔNIO FERNANDES

ILHA SOLTEIRA - SP



UNESP

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

IMPLANTAÇÃO, ESTUDOS E AVALIAÇÃO PARAMÉTRICA DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

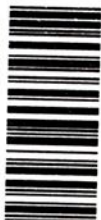
Proc. 063/04-NPD 155/04

UNESP - FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA	
SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO	
DATA DE CHEGADA	DATA DE TOMBO
14.09.04	30.09.04
RECEBIDA POR	TOMBO
Oliza	Te. 1523
AQUIÇÃO	CLASSIFICAÇÃO
Wloca Anta R\$10.00	F363i

Dissertação submetida à Faculdade de Engenharia Elétrica de Ilha Solteira – UNESP – como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de mestre (ME).

Aluno: Marco Antônio Fernandes
Orientador: Prof. Dr. Luiz Fernando Bovolato

1210001523



Ilha Solteira – Agosto de 2004

Co. Sys 226507
sys 56563
30404029

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação/Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação da UNESP-Ilha Solteira

Fernandes, Marco Antônio

F363i Implantação, estudos e avaliação paramétrica de linhas de transmissão / Marco Antônio Fernandes. -- Ilha Solteira : [s.n.], 2004
248 p. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2004

Orientador: Luiz Fernando Bovolato

Bibliografia: p. 186-188

1. Parâmetros elétricos. 2. Energia elétrica - Transmissão. 3. Linhas elétricas aéreas.

Implantação, Estudos e Avaliação Paramétrica de Linhas de Transmissão

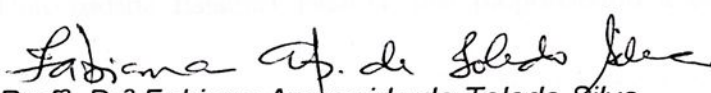
Marco Antônio Fernandes

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À FACULDADE DE ENGENHARIA - CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA – UNESP – COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA

A. Carvalho.
Prof. Dr. Aparecido Augusto de Carvalho
Coordenador do Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica

COMISSÃO EXAMINADORA:


Prof. Dr. Luiz Fernando Bovolato - orientador


Prof.ª Dr.ª Fabiana Aparecida de Toledo Silva


Prof. Dr. Sérgio Kurokawa

Ilha Solteira-SP, agosto de 2004.

A Deus, pelo dom da vida e pela força para vencer os obstáculos;

A meu pai (in memorian), a minha mãe e minha irmã, pelo apoio durante toda a minha vida;

A minha esposa e meus filhos, pela família que temos;

Ao professor Luiz Fernando Bovolato pela orientação, confiança e paciência depositada em mim. Pela amizade que conquistamos neste tempo que trabalhamos juntos;

Aos professores do Departamento pela atenção e dedicação;

Aos funcionários da Pós-Graduação e do Departamento de Engenharia Elétrica da FEIS/UNESP, pelo auxílio que foi prestado;

Aos amigos, pelo tempo que passamos juntos, pelo companheirismo durante esse período;

Aos profissionais da Companhia Paranaense de energia, COPEL, e da Companhia Paulista de Força e Luz, CPFL, pela colaboração e atenção na elaboração dos estudos: Amaury Polizelo – Engenheiro Eletricista-CPFL, Antônio Carlos Alaite – Engenheiro Civil-CPFL, Hermismar Mokdese - Técnico de Projetos-COPEL, João Nelson Hoffmann - Engenheiro Eletricista-COPEL, Nelson Prosdócimo - Engenheiro Eletricista-COPEL.

À UNESP, Universidade Estadual Paulista, que proporcionou a realização deste trabalho.



RESUMO

O presente estudo pretende avaliar, de forma comparativa, a metodologia de cálculo tradicionalmente utilizada pelas diversas concessionárias de energia no Brasil. O método de cálculo, denominado de “aproximado” [13], baseado em condições ideais, incluindo a transposição de fases, adota aproximações consideradas sobre o método proposto J.R. Carson. Esse método “aproximado” será comparado ao próprio método de Carson, no qual serão empregados os quatro primeiros termos da série que determina a variação dos termos resistivos e reativos de uma linha de transmissão. Para o método de Carson será utilizada a denominação de “exato”, neste trabalho, sendo consideradas as condições reais da linha, isto é, o que é implantado no campo: linhas sem a presença de transposição, incluindo, em alguns casos, a situação de não se adotar a posição de mínima indutância. Pretende-se ainda, mostrar o grau de influência e as consequências que as condições reais impõem ao sistema; avaliar se o método “aproximado” é adequado ou não para a representação dos parâmetros de linha, especialmente em função da nova realidade dos traçados e dos novos tipos de estruturas que estão sendo impostos pelas dificuldades na obtenção, aprovação de novas faixas de passagem, bem como pela necessidade de trajetos urbanos para linhas de transmissão.



ABSTRACT

This work aims to evaluate through a comparative way a calculation methodology traditionally used by different electric power system utilities in Brazil. The calculation method called "approximated"[13], based in ideal conditions including phases transposition adopts approximation considered according to the method proposed by J.R.Carson. This method will be compared to the Carson's method itself and it will use the four former terms from the series which determines the variation in the resistive and reactive terms in a transmission line. For this method the denomination "exact" will be used and the real conditions of the line will be considered, that is to say that what is implanted in the field: lines without the presence of the transposition, including, in some cases, the situation of not adopting the minimal inductance position. Moreover we aim to show the influence degree and the consequences these real conditions impose to the systems, evaluate whether the approximated method the new reality of the line parameters representation, specially the new reality of the new traces and types of structures imposed nowadays by the difficulties in obtaining and approving of the new transmission line right-of-way, as well for urban way for transmission lines.



I INTRODUÇÃO	1
II OBJETIVO	2
III PROJETO ELETROMECHANICO	4
III.1 Características dos cabos	4
III.2 Ampacidade dos condutores	4
III.3 Traçado de uma linha de transmissão	5
III.3.1 Traçados preliminares e diretrizes	6
III.3.2 Levantamento das instalações existentes	6
III.3.3 Definição dos traçados preliminares	7
III.3.4 Traçado definitivo	7
III.4 Estudos elétricos	7
III.4.1 Aterramento	9
III.4.1.1 Tensão de toque	11
III.4.1.2 Tensão de passo	11
III.4.1.3 Equacionamento para correntes de passo e toque	12
III.4.1.4 Análise da resistência de aterramento, tensões de toque e passo para as linhas de transmissão	14
III.4.1.5 Comparação de V_t e V_p com os valores admissíveis para 69 e 138 kV	17
III.4.2 Alturas e distâncias de segurança	19
III.4.2.1 Ângulo de balanço da cadeia de isoladores	20
III.4.2.2 Distâncias mínimas no suporte	21
III.4.2.3 Distância mínima (D) do condutor ao solo ou a obstáculos em condições normais de operação - método convencional	22
III.4.2.4 Distância mínima (D) do condutor ao solo ou a obstáculos em condições normais de operação - método alternativo	24
III.4.2.5 Distância mínima (D) do condutor ao solo ou a obstáculos em condições de emergência	25
III.4.2.6 Distâncias mínimas entre condutores em suportes diferentes	25
III.4.2.7 Faixa de segurança	25
III.4.3 Cálculo dos parâmetros elétricos para o projeto da linha de transmissão	27
III.4.3.1 Correção da altura dos condutores	27
III.4.3.2 Cálculo das resistências ôhmicas dos condutores por fase	29
III.5 Memorial técnico do projeto eletromecânico	29
IV PROJETO BÁSICO	30
IV.1 Levantamento topográfico	30
IV.2 Definição e cálculo das condições regentes	31
IV.2.1 Parâmetros meteorológicos e correções	31



IV.2.1.1	Temperaturas	31
IV.2.1.2	Velocidades de vento	32
IV.3	Lançamento das estruturas no desenho do perfil topográfico	34
IV.4	Engastamento e fundações	35
IV.5	Esforços nas estruturas	35
IV.5.1	Cargas de vento	36
IV.5.2	Cargas permanentes	37
IV.5.3	Cargas especiais	37
IV.6	Carregamento dos cabos	38
IV.6.1	Cálculos dos esforços mecânicos	38
IV.6.1.1	Trações no cabo auxiliar para linhas compactas urbanas	43
IV.6.1.2	Trações no cabo pára-raios	43
IV.7	Conclusão do projeto básico	43
V	PROJETO EXECUTIVO	44
V.1	Lançamento definitivo das estruturas no desenho do perfil topográfico	44
V.2	Carregamento e ensaio das estruturas	44
V.3	Conclusão do projeto executivo	45
VI	PROCEDIMENTOS CONSTRUTIVOS	46
VI.1	Previsões de projeto	46
VI.2	Locação topográfica	46
VI.3	Execução da construção	47
VI.3.1	Limpeza da faixa	47
VI.3.2	Estradas de acesso	48
VI.3.3	Sondagem do terreno	48
VI.3.4	Escavação	48
VI.3.5	Nivelamento das estruturas	48
VI.3.6	Fundações	48
VI.3.7	Montagem das estruturas	48
VI.3.8	Execução do aterramento das estruturas	49
VI.3.9	Içamento de cadeias em roldanas	49
VI.3.10	Lançamento de cabos	50
VI.3.11	Emenda de condutores	50
VI.3.12	Regulação dos cabos	50
VI.3.13	Grampeamento dos cabos	51
VI.3.14	Lançamento próximo a linhas energizadas (paralelismo)	51
VI.3.15	Instalação de amortecedores	51
VI.3.16	Instalação de espaçadores	51
VI.3.17	Revisão final da construção	52
VII	COMENTÁRIOS SOBRE O PROJETO ELETROMECAÂNICO	53



VIII INDUTÂNCIA DE LINHAS DE TRANSMISSÃO	56
VIII.1 Linha trifásica de circuito simples sem cabo pára-raios	56
VIII.2 Linha trifásica de circuito simples com um cabo pára-raios	59
VIII.3 Linha trifásica de circuito simples com dois cabos pára-raios	62
VIII.4 Linha trifásica de circuito duplo com um cabo pára-raios	66
VIII.5 Linha trifásica de circuito duplo com dois cabos pára-raios	71
VIII.6 Cálculo da indutância equivalente de uma linha de transmissão	78
IX IMPEDÂNCIA DE LINHAS DE TRANSMISSÃO	79
IX.1 Linha trifásica de circuito simples sem cabo pára-raios	84
IX.2 Linha trifásica de circuito simples com um cabo pára-raios	86
IX.3 Linha trifásica de circuito simples com dois cabos pára-raios	89
IX.4 Linha trifásica de circuito duplo com um cabo pára-raios	92
IX.5 Linha trifásica de circuito duplo com dois cabos pára-raios	96
IX.6 Cálculo da impedância equivalente de uma linha de transmissão	101
X CÁLCULO DOS PARÂMETROS PARALELOS - ADMITÂNCIA	102
X.1 Cálculo da matriz de capacitâncias, circuito simples, sem cabo pára-raios	109
X.2 Cálculo da matriz de capacitâncias, circuito simples, com um cabo pára-raios	111
X.3 Cálculo da matriz de capacitâncias, circuito simples, com dois cabos pára-raios	113
X.4 Cálculo da matriz de capacitâncias, circuito duplo, com um cabo pára-raios	116
X.5 Cálculo da matriz de capacitâncias, circuito duplo, com dois cabos pára-raios	118
X.6 Cálculo da capacitância equivalente de uma linha de transmissão	121
XI GRADIENTE DE POTENCIAL	122
XI.1 Gradiente de potencial na superfície dos condutores	122
XI.1.1 O gradiente médio para linhas de transmissão	122
XI.1.1.1 Gradiente de potencial em linha de circuito simples sem cabo pára-raios	124
XI.1.1.2 Gradiente de potencial em linha de circuito simples com um cabo pára-raios	125
XI.1.1.3 Gradiente de potencial em linha de circuito simples com dois cabos pára-raios	125
XI.1.1.4 Gradiente de potencial em linha de circuito duplo com um cabo pára-raios	126
XI.1.1.5 Gradiente de potencial em linha de circuito duplo com dois cabos pára-raios	127



XI.2	Gradiente de campo elétrico no limite da faixa de servidão	129
XI.3	A importância da análise do gradiente de potencial	130
XII	PERDAS POR DISPERSÃO E INTERFERÊNCIAS	131
XII.1	O efeito corona	131
XII.1.1	Gradiente máximo admissível e corona visual	132
XII.1.2	Rádio interferência	134
XII.1.3	Métodos de cálculo de rádio interferência	136
XII.1.3.1	Método italiano - ENEL	136
XII.1.3.2	Método canadense - Ontario Hydro	137
XII.1.4	Ruído audível	137
XII.1.5	Perdas de energia pelo fenômeno corona	139
XII.1.5.1	Perda de potência sob tempo bom	139
XII.1.5.2	Perda de potência sob tempo chuvoso	143
XIII	RESULTADOS OBTIDOS	144
XIII.1	O desenvolvimento dos estudos e o programa computacional	144
XIII.2	Aspectos gerais da análise dos parâmetros eletricos	145
XIII.2.1	Apresentação das tabelas dos parâmetros equivalentes de seqüência	146
XIII.2.2	Apresentação das tabelas dos parâmetros equivalentes entre seqüências	150
XIII.3	Parâmetros de seqüência positiva	157
XIII.4	Parâmetros de seqüência nula	163
XIII.5	Susceptâncias de seqüência	169
XIII.6	Gradiente de potencial	175
XIII.6.1	Potencial elétrico no limite da faixa de servidão	179
XIII.7	Análise da estrutura de referência - CDPM2P	179
XIII.8	Análise da estrutura CDVP29 em relação à referência	180
XIII.9	Análise das estruturas CDPP00 e CDPP15 em relação à referência	181
XIII.10	Análise das estruturas compactas em relação à referência	181
XIII.11	A matriz real de impedâncias	182
XIII.12	Avaliação geral dos resultados	183
XIV	CONCLUSÕES	185
XV	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	186
	Glossário	189
	Apêndice A - figuras e gráficos	191
	Apêndice B - planilhas e tabelas	202
	Apêndice C - silhuetas de estruturas	210



I. INTRODUÇÃO

As linhas de transmissão são componentes fundamentais para a transmissão e distribuição de energia elétrica. Nos grandes sistemas de transmissão o custo das linhas pode representar valores muito significativos em relação aos custos totais dos sistemas de transmissão de energia.

As linhas constituem um dos componentes do sistema com maior impacto ambiental, dado o espaço físico que ocupam, a poluição visual e até mesmo os discutíveis efeitos biológicos provenientes dos seus campos elétricos e magnéticos.

A representação de uma linha de transmissão pelos seus parâmetros de circuito equivalente é prática comum na engenharia das concessionárias de energia. Em função de facilidade dos cálculos, adotam-se simplificações que nem sempre condizem com a realidade das linhas. O uso de método aproximado para os cálculos, a adoção da hipótese da transposição de fases, a desconsideração da influência do solo e dos cabos pára-raios, são condições comuns para grande parte das análises. Novas variantes surgidas nos últimos anos, devido às dificuldades de traçados e exigências ambientais para a concessão de novas faixas de servidão, estão impondo a adoção de novos tipos de configurações para a construção dessas novas linhas.

A implantação de uma linha de transmissão deve atender requisitos que direcionem a uma maior eficiência com menor impacto ambiental possível.

Procura-se definir novas linhas obedecendo a critérios como:

- Maior capacidade de transporte de energia, isto é, maior “MW/m de terreno”, por meio da adoção de maior número de circuitos por torre, compactação de fases, etc;
- Menor impacto visual através de estruturas mais leves e compactas;
- Menor custo por meio da elaboração de estudos de otimização e projetos detalhados que permitam ajustar as linhas nas condições reais de utilização e também do desenvolvimento e adoção de novos materiais.

As principais fases envolvidas na implantação de uma linha de transmissão são as seguintes:

- Estudos de planejamento, definindo as características principais das mesmas, como: traçado, o nível de tensão, comprimento, carregamento, temperatura de projeto, etc;
- Estudos elétricos envolvendo seleção de condutores e pára-raios, definição do tipo de estrutura e definição da geometria da cabeça de torre;



- Projeto básico;
- Projeto executivo;
- Construção.

Nas linhas de transmissão a dependência entre as etapas é significativa. Pequenas alterações, em qualquer uma das fases ou item de projeto ou construção, podem implicar em ajuste em todo o processo.



II. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é apresentar um estudo das condições práticas envolvidas na execução de uma linha de transmissão, desde a etapa de planejamento, a escolha de traçado, o projeto básico, o projeto executivo até a construção propriamente dita. Pretende-se proporcionar uma visão geral sobre todas as atividades envolvidas em um projeto e na construção de uma linha de transmissão, apresentando-o na ordem em que as atividades se desenvolvem. Desta forma, espera-se proporcionar aos interessados um ponto de partida razoável para o entendimento dessa atividade e, especialmente, inserir os estudos e avaliação dos parâmetros elétricos dentro da realidade prática de um projeto e da execução de uma linha de transmissão.

Em relação ao segmento do projeto denominado “eletromecânico” das linhas de transmissão, a metodologia considerada será a da Norma Brasileira *NBR 5422* [5]. Não é objetivo deste estudo abordar o questionamento dessa metodologia, o que poderá ser feito em trabalhos paralelos ou posteriores, mesmo assim serão apresentadas algumas considerações. A formulação apresentada está baseada na utilização final, não estando em discussão os conceitos físicos e matemáticos que deram origem a ela.

Em relação às características elétricas de uma linha de transmissão, pretende-se expor e analisar as diversas condições encontradas em projetos existentes, além de proporcionar um importante instrumento para avaliação de projetos futuros. Essa análise será feita por meio de programa computacional em linguagem Fortran, elaborado especificamente para este trabalho e baseado no desenvolvimento das equações aqui apresentado. Serão abordadas diversas configurações de linhas de transmissão surgidas devido às imposições de condições ambientais, limitação de faixa de servidão, com ênfase sobre as aplicações urbanas dessas linhas. Pretende-se avaliar as condições decorrentes dessas novas configurações de silhuetas das estruturas e seus efeitos nos parâmetros elétricos representativos, os quais servirão de base para a operação dessas linhas pelas concessionárias de energia. Busca-se, ainda, comparar o método de cálculo chamado de “aproximado” [13], utilizado pelas concessionárias de energia, o qual emprega uma formulação simplificada do método proposto por J.R. Carson, baseada na transposição de linhas, com o próprio método de série de Carson [10], [13], [15], denominado de “exato” neste trabalho, empregando os quatro primeiros termos desta série.

A análise das classes de tensão de 69 e 138 kV constitui outro ponto importante, por algumas razões: são as classes de tensão com o maior número de linhas dentro do sistema elétrico brasileiro, são tradicionalmente vistas como “esgotadas” em termos de estudos e avaliação e têm grande aplicação em traçados urbanos de linhas de transmissão. Tal conceito de “esgotamento” está baseado apenas em senso comum, o que pode levar a erros significativos.



III. PROJETO ELETROMECAÂNICO

O projeto eletromecânico de uma linha de transmissão compreende as etapas de planejamento da linha dentro do sistema elétrico da concessionária de energia elétrica, os estudos elétricos do padrão de estruturas a ser empregado, a análise das condições de segurança e a locação das estruturas sob o ponto de vista elétrico e mecânico, em função das condições ambientais, especialmente ventos e temperaturas.

III.1. Características dos cabos

Eles são definidos pelas áreas de planejamento do sistema das concessionárias, considerando-se vários aspectos:

- A bitola mínima para um condutor, face aos níveis de rádio e TV interferência (*RI e TVI*) nas linhas urbanas;
- Nas subestações, que por confiabilidade são atendidas por duas linhas, cada uma das linhas deve ter capacidade para atender à potência máxima na temperatura máxima prevista;
- A padronização de condutores em função das características de manutenção de cada concessionária, além das características do padrão de estruturas, dependendo da classe de tensão utilizada;
- A bitola e o tipo de arranjo dos condutores, em função da capacidade de cada cabo, sempre que possível, oferecendo a maior capacidade de transporte de energia em cada classe de tensão;
- A temperatura de projeto, em função das condições de temperatura máxima da região (*figura A1 – apêndice A*) e do gráfico de sobre-elevação de temperatura fornecido pelo fabricante (*figura A2 – apêndice A*).

III.2. Ampacidade dos condutores

Para se determinar a ampacidade devem ser avaliados os seguintes fatores:

- Temperatura de projeto e temperatura limite de operação;
- Distâncias mínimas, condutor-solo e condutor-obstáculo;
- Condições de operação normal e de emergência de curta, média e longa duração;
- Parâmetros meteorológicos da região atravessada pela linha.



O cálculo do Risco Térmico (RT) é importante para a determinação da ampacidade e deve ser feito considerando os dados ambientais, através dos quais calculam-se os parâmetros meteorológicos da região atravessada pela linha [6]. Devem ser consideradas a temperatura ambiente, a velocidade e a direção do vento e a radiação solar com periodicidade horária, ou menor, se disponível. Na falta de dados ambientais próprios, a determinação do risco térmico (RT) poderá ser feita, indiretamente, através da seguinte formulação [6]:

$$RT = Prob(T \geq T_{REF}) \int_{T_{REF}}^{\infty} f(t_s) dt_s \quad (\text{III.1})$$

Onde:

$$f(t_s) = [1/(\beta\sqrt{2\pi})]x^{-1}e^{[-\ln(x)-\alpha]^2/(2\beta^2)} \quad (\text{III.2})$$

com $x=T$, variando de T_{min} até T_{limop}

sendo:

$$\beta = \sqrt{\ln[(T_{des}/T_{med})^2 + 1]} \quad (\text{III.3})$$

$$\alpha = \ln(T_{med}) - (\beta^2/2) \quad (\text{III.4})$$

T_{med} : temperatura média em °C.

T_{des} : desvio padrão da temperatura em °C.

T_{min} : temperatura mínima em °C.

$T_{max} = T_{limop}$: temperatura máxima = temperatura limite de operação em °C.

Os índices de risco térmico e de temperatura limite de operação devem ser definidos pela norma técnica seguida e a perda de suportabilidade mecânica dos condutores deve ser avaliada, no caso da utilização de altas temperaturas de operação.

III.3. Traçado de uma linha de transmissão

A escolha de um traçado adequado caracteriza-se como sendo a etapa mais importante do projeto de uma linha, pois muitos são os fatores a serem observados, o que torna essa tarefa extremamente difícil, exigindo, em geral, boa experiência para sua realização [25].

A idéia inicial da definição de traçado de uma linha de transmissão reflete uma busca pelo mínimo comprimento. Entretanto, implicações de ordem prática e econômica, muitas vezes, demonstram não ser esse o caminho mais adequado. A definição do traçado implica na viabilidade técnico-econômica, levando em consideração os obstáculos naturais e os criados pelo homem, o custo do solo e as vias de acesso. O traçado final vai resultar de um compromisso



entre o aumento de comprimento da linha, o número de ângulos de deflexão e o custo de construção, desapropriações e operação da linha, decorrentes dos obstáculos e dos acessos.

A maior incidência de ângulos de deflexão no traçado de uma linha de transmissão poderá implicar no aumento de estruturas de ancoragens, que são mais caras e mais pesadas em relação às estruturas de suspensão, utilizadas normalmente nos trechos em linha reta (tangentes).

Aspectos relativos ao impacto sobre o meio ambiente, quanto ao ponto de vista de preservação de florestas e mananciais, de impacto visual ou de interferências e riscos aos seres humanos, têm sido significativos na definição dos traçados de linhas de transmissão [3].

III.3.1. Traçados preliminares e diretrizes

A definição de traçados preliminares constitui a primeira fase do trabalho, abrangendo as atividades descritas a seguir:

Através de fotografias e plantas atualizadas, levantam-se todos os encaminhamentos possíveis para o traçado. Em seguida, através de observações de campo, faz-se uma triagem eliminando-se aquelas que são claramente inviáveis, considerando-se, principalmente, os aspectos de segurança e meio ambiente (ruas excessivamente movimentadas; existência de obstáculos como: sacadas, ou similares; presença de grande quantidade de árvores e/ou áreas de preservação; obstáculos naturais; travessias de outras linhas, ferrovias e rodovias).

III.3.2. Levantamento das instalações existentes

Para as alternativas consideradas viáveis, faz-se um levantamento minucioso junto a órgãos públicos, às demais concessionárias e, se necessário, através de novas observações nos locais a respeito de:

- Projetos de arruamentos e ajardinamentos;
- Redes de água, esgotos e galerias de águas pluviais;
- Redes telefônicas aéreas e subterrâneas;
- Redes de distribuição de energia elétrica, aéreas e subterrâneas;
- Árvores de grande porte;
- Expansões previstas pela área de urbanização através do plano diretor;
- Condições das travessias de linhas, rodovias e ferrovias;
- Aproximações em relação a qualquer tipo de obstáculo que possa interferir com a linha.



III.3.3. Definição dos traçados preliminares

De posse das informações citadas anteriormente, faz-se uma nova triagem eliminando-se as alternativas que se mostrarem inviáveis. Cabe esclarecer que nem sempre a presença de alguns obstáculos, tais como redes de água e esgoto, redes de energia elétrica ou telefone, levam a inviabilizar uma determinada alternativa, pois elas podem, muitas vezes, ser remanejadas, caso não exista outra solução melhor. Sendo assim, as alternativas de traçado que restarem são efetivamente viáveis e possíveis, principalmente quanto aos aspectos de meio ambiente, segurança, economia, construção e manutenção.

III.3.4. Traçado definitivo

A partir dos traçados preliminares, que em algumas situações se resumem a uma única alternativa, a decisão quanto ao traçado definitivo deverá ser oficializada, preferencialmente, após uma análise minuciosa no local, em conjunto com áreas de planejamento, urbanização e obras das respectivas prefeituras. Nesta ocasião deverão ser considerados os seguintes aspectos:

- Qual das alternativas melhor atenderá aos interesses atuais e futuros das partes envolvidas nos projetos;
- Qual das alternativas apresenta maior segurança;
- Qual das alternativas terá melhor aceitação;
- Qual das alternativas apresentará o menor índice de impacto ambiental;
- Qual das alternativas apresentará o menor custo quanto ao comprimento, fundações, número de vértices e estruturas.

Definido o traçado, este deverá ser materializado (demarcação dos vértices - embandeiramento) com a orientação da equipe do projeto envolvida, pois somente estes saberão indicar os pontos ideais, dadas as particularidades da linha.

III.4. Estudos elétricos

A definição da geometria de cabeça de torre a ser utilizada no projeto envolve:

- Estudos de coordenação de isolamento;
- Estudos relativos aos campos elétricos e magnéticos (campo máximo ao nível do solo e correntes de toque);
- Estudos relativos ao efeito corona (gradiente superficial, rádio interferência, ruído audível, etc.);



- Para a definição dessa geometria, considera-se que estejam definidos pelos critérios de planejamento, custos e confiabilidade, fatores como: cabos condutores e cabos pára-raios, avaliação de vão básico, flechas, topografia e cálculos mecânicos;
- Os estudos de coordenação de isolamento são feitos à frequência industrial de 60 Hz, considerando as sobretensões de manobra e sobretensões atmosféricas.

A *figura III.1.* mostra vários elementos da geometria de cabeça de torre que são definidos em função de vários tipos de estudos elétricos.

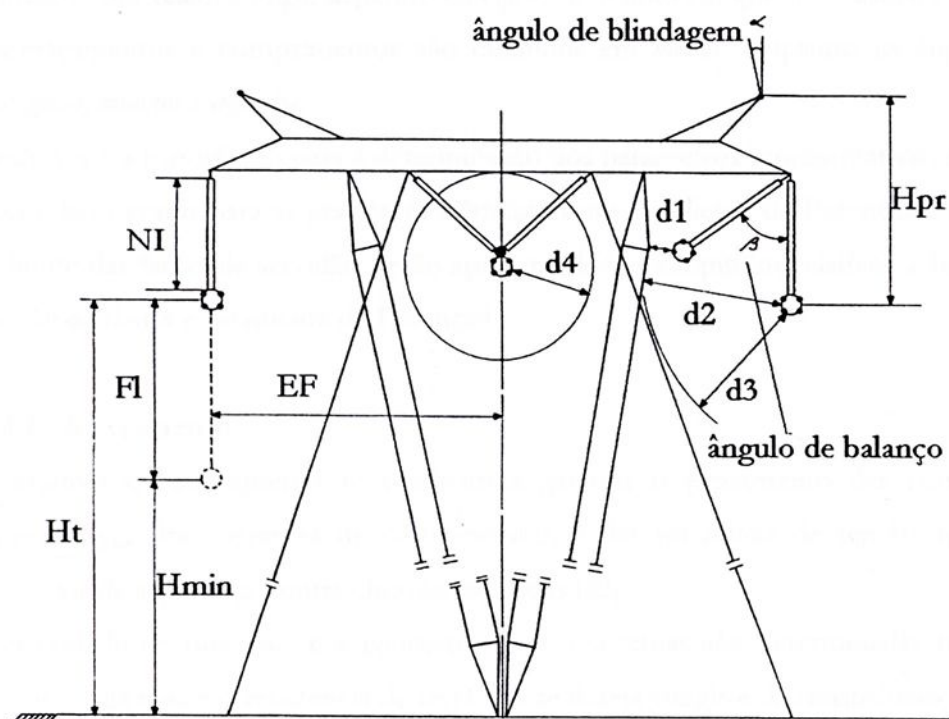


figura III.1. Silhueta para o estudo da geometria de cabeça de estrutura de linha de transmissão – ref. [7].

Na coordenação de isolamento define-se:

- Para frequência industrial os valores, NI, β, d_1 ;
- Para as sobretensões de manobra, d_2, d_3, d_4, EF ;
- Para sobretensões atmosféricas, $\alpha, H_{PR}, R_{at}, NI$.

onde R_{at} = resistência de aterramento em *ohms*.

Também são definidos:

- Pelo estudo do campo elétrico, H_{min} , *faixa de servidão*;
- Para o efeito corona visual, *bitola dos condutores*, EF ;
- Em rádio interferência, *faixa de servidão*, EF ;



- Para ruído audível, *faixa de servidão*, EF ;
- Para os estudos de perdas por efeito corona, *bitola dos condutores*, EF ;
- Para a manutenção em linha viva, d_2, d_4 ;
- Em estudos relativos a interesses de terceiros, $H_{\min}$, *faixa de servidão*.

Na execução prática dos projetos eletromecânicos, as distâncias definidas para manutenção em linha viva acabam se tornando predominantes, deixando alguns dos demais valores calculados com relativa folga, dependendo da classe de tensão em que se trabalha. Os valores relativos a espaçamentos e comprimentos são definidos em *metros*, enquanto os ângulos são definidos em *graus, minutos e segundos*.

Os estudos e a formulação para a determinação dos parâmetros representativos das linhas de transmissão, bem como para as grandezas elétricas como Gradiente de Potencial e Potencial Elétrico no limite das faixas de servidão, serão apresentados nos capítulos relativos a Indutância, Impedância, Capacitância e Gradiente de Potencial.

III.4.1. Aterramento

Os sistemas de aterramento se destinam a garantir o escoamento das correntes de descarga atmosférica, das correntes de curto-circuito, a dar referência de tensão ao sistema elétrico e de servir de segurança contra choques elétricos [23].

A quantidade de materiais e a geometria destes sistemas são determinadas na fase de projeto em função da máxima resistência de terra que se deseja atingir e da resistividade do solo. Uma corrente elétrica, ao ser injetada por meio de um sistema de aterramento, se dispersará no solo, transformando-se em uma densidade de corrente que percorre um material condutor volumétrico (terra) de certo valor de resistividade, a qual provocará uma distribuição de potencial na superfície do solo.

Os suportes das linhas devem ser aterrados visando obter uma resistência de aterramento compatível com o desempenho desejado das linhas e a segurança de terceiros. Ele deve se restringir à faixa de segurança, não interferir com outras instalações e com outras atividades que possam ser desenvolvidas dentro das faixas.

O valor de resistência de pé de torre, como é conhecido pelas concessionárias, varia de acordo com a classe de tensão e com os critérios de cada empresa, sempre obedecendo aos limites de corrente suportáveis definidos por estudos técnicos dos condutores.

Os materiais empregados nos sistemas de aterramento devem ser resistentes à corrosão e sua durabilidade compatível com a vida útil da linha.



Recomenda-se que seja feita medida de resistência de aterramento de cada suporte após sua montagem e antes do lançamento dos cabos pára-raios. Essa precaução propicia o levantamento exato do valor de cada suporte, sem influência do restante da linha, possibilitando as correções, quando necessárias.

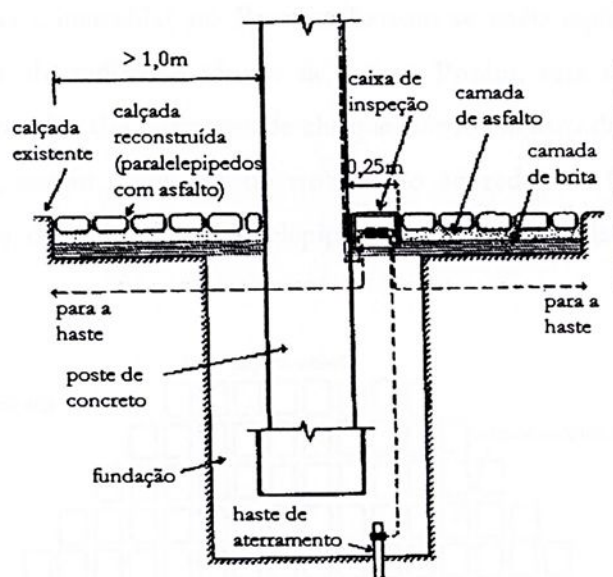


figura III.2. Instalação de hastes de aterramento e proteção isolante em linhas de transmissão urbanas – ref. [17].

Em linhas urbanas deve-se adotar métodos especiais para proteção de tensões de toque e passos, devido às características específicas nos traçados dessas linhas. As instalações de aterramento para linhas urbanas podem ser visualizados nas figuras III.2, III.3. e III.4..

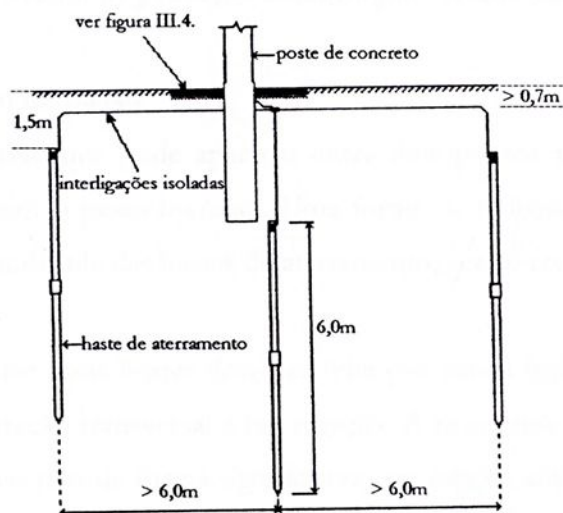


figura III.3. Esquema para instalação do sistema de hastes de aterramento para linhas urbanas – ref. [17].



III.4.1.1. Tensão de toque

É o valor de tensão que aparece entre uma estrutura aterrada no eletrodo e um ponto situado a um metro dela, no solo, representando uma pessoa que toca essa estrutura no mesmo instante em que o sistema de aterramento escoar uma corrente elétrica. No aterramento das primeiras linhas urbanas construídas no Brasil utilizavam-se anéis equipotenciais em torno do poste com a finalidade de reduzir a tensão de toque. Porém, esta solução não se mostrou suficiente para manter o valor das correntes de choque elétrico dentro dos valores toleráveis.

Posteriormente, surgiu a solução do isolamento ao redor da base das estruturas com material isolante, como o asfalto, ou paralelepípedos, ou lajotas isoladas entre si, conforme mostra a *figura III.4*.

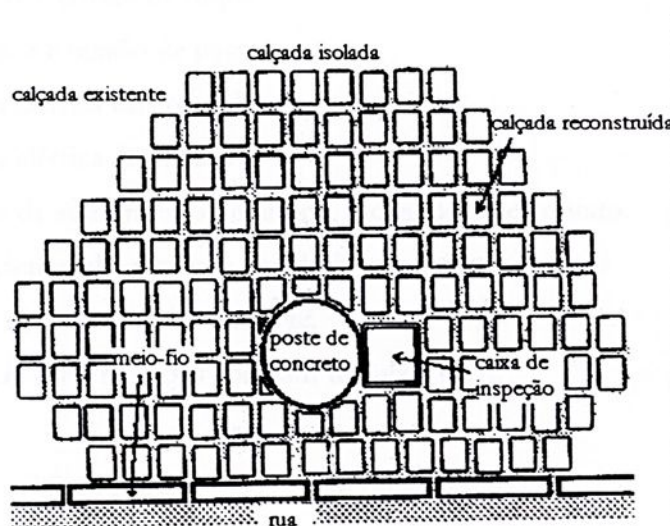


figura III.4. Sistema de proteção isolante para linhas urbanas – ref.[17].

III.4.1.2. Tensão de passo

É o valor de tensão que pode aparecer entre dois pontos no solo, afastados por um metro, representando assim o passo humano. Uma forma de redução dos valores de tensão de passo é aumentar a profundidade das hastes de aterramento, sendo recomendável à profundidade de 1,5m.

A interligação entre essas hastes deve ser feita por cabos isolados que têm a função de reduzir essa tensão na direção transversal à interligação. A resistência de aterramento aumentará um pouco neste caso, mas não de forma significativa, em relação aos benefícios conseguidos na redução da tensão de passo. Como alternativa, pode ser utilizado um cabo nu instalado internamente ao tubo flexível isolado, ou enterrado a uma profundidade de 1,5m. Pode-se aumentar a profundidade e/ou o comprimento do conjunto cabo-hastes com o propósito de diminuir a resistência de aterramento. Deve-se manter os padrões estabelecidos, ou seja, manter a



separação mínima de 6 metros entre as hastes e o topo a 1,5m do nível do solo e interligações isoladas [08].

III.4.1.3. Equacionamento para as correntes de passo e toque

Pelo circuito equivalente visto na figura III.5. pode-se estabelecer o seguinte equacionamento para as correntes de passo e toque [08], [16]:

$$I_t = V_t / \{R_1 + K_t[(R_2^* + R_3^*)(R_2^{**} + R_3^{**}) / (R_2^* + R_3^* + R_2^{**} + R_3^{**})]\} \quad (\text{III.5})$$

$$I_p = V_p / \{R_1 + K_p(R_2^* + R_3^* + R_2^{**} + R_3^{**})\} \quad (\text{III.6})$$

Onde:

I_t e V_t : corrente e tensão de toque

I_p e V_p : corrente e tensão de passo

R_1 : resistência elétrica do corpo humano

R_2 : resistência elétrica do sapato

R_3 : resistência de aterramento de um pé, incluindo a de contato.

K_t e K_p : coeficientes de correção devido à proximidade dos pés

Os índices (*) e (**) referem-se a cada pé.

Os valores de K_t e K_p medidos constam na tabela III.1..

Considera-se:

$1,0 \leq K_t \leq 1,5$ e $0,9 \leq K_p \leq 1,0$ - para superfícies úmidas.

Em cálculos simplificados, pode-se utilizar $K_t = 1,0$, pois se estará a favor da segurança.

Ao utilizar-se $K_p = 1,0$, estará se compensando o fato de que o passo de uma pessoa nunca terá 200 cm² de contato em ambos os pés ao mesmo tempo (ou seja, aumenta-se K_p ao invés de aumentar-se R_3^* ou R_3^{**}).

A resistência dos calçados, incluída no circuito equivalente como R_2 , segundo estudos da Eletricité de France, citados em [11], é estimada nos seguintes valores: 50 a 200 megaohms para sapatos secos, novos, com sola de couro; até 800 ohms, quando umedecidos, e inferiores a 500 ohms, quando velhos e umedecidos. As piores condições deverão ser consideradas para uma pessoa descalça. Sendo assim, o valor de R_2 será igual a zero.



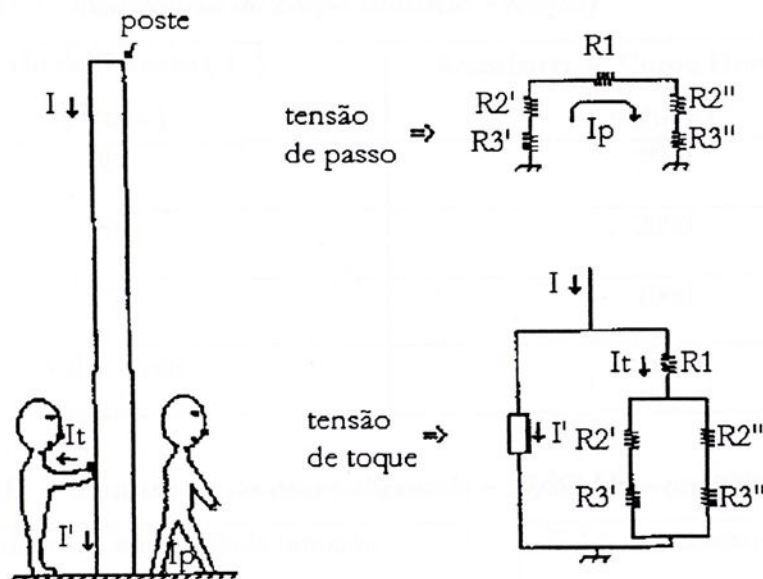


figura III.5. Circuito equivalente para a determinação da tensão de passo e de toque – ref. [08], [16].

Tabela III.1. Valores de K_t e K_p em função da separação entre os pés – ref. [08].

Valores de K_t e K_p	Superfície Seca			Superfície úmida		
	K_t		K_p	K_t		K_p
Separação dos pés	0,25m	0,50m	1,00m	0,25m	0,50m	1,00m
Asfalto	1,70	1,70	0,95	1,40	1,20	0,95
Paralelepípedos concretados sem asfalto	1,70	1,70	0,85	1,40	1,20	1,00
Terra natural	1,10	1,05	0,95	1,15	1,10	0,95
Areia	1,00	1,00	1,00	1,15	1,10	0,95
Saibro	1,00	1,00	1,00	1,15	1,05	1,00
Brita	1,60	1,50	0,75	1,00	1,00	0,95
Lajes concretadas com areia	1,30	1,20	0,90	1,10	1,05	0,95
Paralelepípedos unidos com areia	1,40	1,35	0,85	1,05	1,00	1,00
Lajes concretadas com asfalto	1,50	1,50	0,85	1,30	1,10	0,95
Paralelepípedos unidos com asfalto	1,50	1,50	0,75	1,50	1,15	1,00



Tabela III.2. Resistência do corpo humano – ref.[08].

Tensão de Contato (V) (Volts)	Resistência do Corpo Humano (Ω) (ohms)
25	2500
50	2000
250	1000
Valor limite	650

Tabela III.3. Limites de corrente alternada – 50/60 Hz – ref.[08].

Condição de sensibilidade humana	Valor da corrente elétrica em mA
Limiar da percepção da corrente elétrica	0,5
Limiar da percepção para 50% da população	1,1
Perda do controle muscular em 0,5% das mulheres	6
Perda do controle muscular em 0,5% dos homens	9
Perda do controle muscular em 50% das mulheres	10,5
Perda do controle muscular em 50% dos homens	16
Possibilidade de asfixia	20 – 30
Fibrilação do coração ($0,083 < t < 5s$), em 05% da população com 50 kgf de peso.	$116 / (t)^{1/2}$

III.4.1.4. Análise da resistência de aterramento, tensões de toque e passo para as linhas urbanas de transmissão.

As tensões de toque e passo resultantes da utilização do sistema de aterramento proposto podem ser consideradas como funções do fator de reflexão (k), da profundidade da primeira camada (h) e da sobretensão no sistema de aterramento (V_f).

Em vista da dificuldade de medição de resistividade do solo em regiões urbanas, os parâmetros ρ_1 , ρ_2 e h do solo não são normalmente conhecidos. Na maioria dos casos, procura-se omitir a necessidade dessa medição. Porém, em caso onde se disponha de uma estimativa para a resistividade do solo, pode-se prever o valor da resistência de aterramento (R) do sistema proposto através do gráfico da *Figura III.6*.



Têm-se:

para $k < 0$, $R = r\rho_1 / \rho_2$

para $k > 0$, $R = r\rho_2 / \rho_1$

onde:

ρ_1 = resistividade da primeira camada do solo, em Ωm

ρ_2 = resistividade da segunda camada do solo, em Ωm

h = espessura, em metros, da camada do solo de resistividade ρ_1

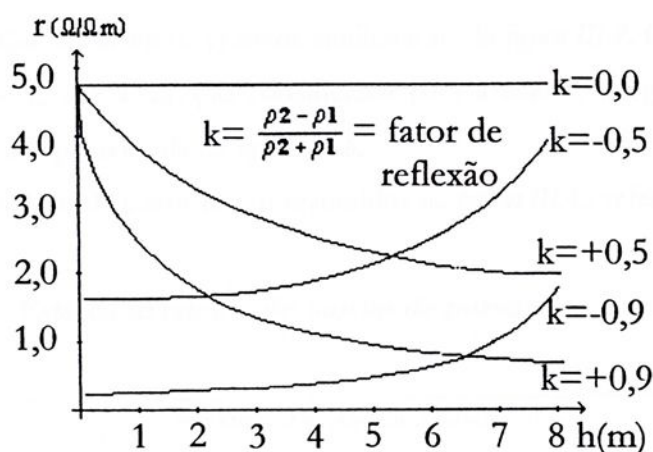


figura III.6. Gráfico para análise de resistência de aterramento calculada – ref. [16], [17].

O gráfico da figura III.7. fornece, no eixo das abscissas, a tensão de toque em termos percentuais (V_t^*) do produto $R I$ (sendo I a corrente injetada no solo pelo poste durante o curto-circuito e R a resistência de aterramento do poste), calculada sobre o ponto situado a 1m do eixo do poste e em direção ortogonal ao alinhamento das hastes.

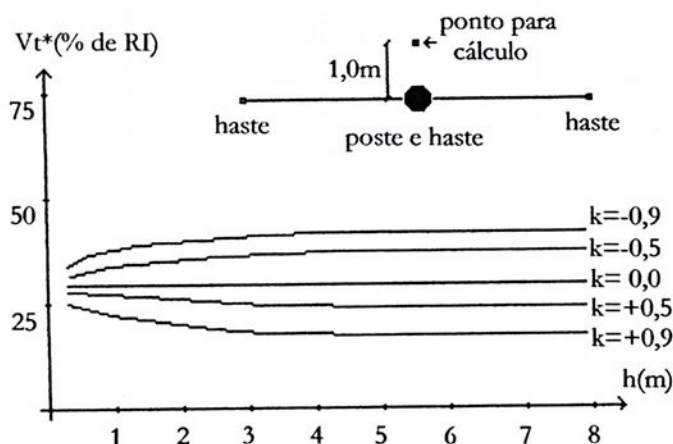


figura III.7. Gráfico para análise de tensão de toque calculada – sistema de 138 kV urbano – ref. [16], [17].

A tensão de toque será $V_t = (V_s \cdot /100)RI$. Porém, o produto RI equivale à sobretensão no sistema de aterramento, cujo valor máximo admitido é de 5 kV .

Da *figura III.7.* conclui-se que a tensão de toque no ponto calculado será inferior a cerca de 50% da sobretensão no sistema de aterramento.

A tensão de toque máxima a ser tomada como referência será:

50 % de 5 kV , ou $V_t = 2,5 \text{ kV}$

A análise da tensão máxima de passo (V_p) também pode ser traduzida em termos percentuais da sobretensão do sistema de aterramento (V_s).

A partir da análise de diversos gráficos similares ao da *figura III.7.* foram admitidos como variáveis os valores de k , b e a direção considerada para a análise do gradiente de potencial, conforme representação apresentada na *figura III.8.*

Os valores da tensão de passo foram resumidos na *tabela III.4.*, referidos à *figura III.8.*

Tabela III.4. Valores máximos de tensão de passo para linhas urbanas – ref.[16], [17].

Máxima Tensão de Passo		
Região – Direção	V_p Máximo (% de V_s)	Valor de V_p para $V_s=5 \text{ kV}$
A	20 %	1.000 V
B	15 %	750 V
C-1	08 %	400 V
C-2	10 %	500 V
D-1	04 %	200 V
D-2	07 %	350 V
E	05 %	250 V



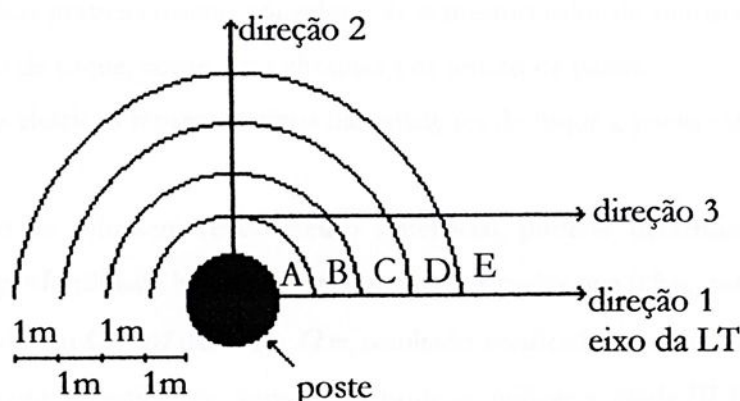


figura III.8. Modelo de medições dos dados para a tensão de passo – ref.[16],[17].

Observações:

1 - A direção 3, direção da calçada, é a mais provável de circulação de pessoas, onde temos os seguintes valores:

$V_p < 10\% V_s$, em A e B ($V_p < 500 V$)

$V_p < 5\% V_s$, em C, D e E ($V_p < 250 V$)

2 - Todas as hipóteses acima consideram um passo de 1,0m. Para um passo de 0,5m, esses valores reduzem-se aproximadamente à metade.

III.4.1.5. Comparação de V_t e V_p com os valores admissíveis nos sistemas de 69 e 138 kV

A duração máxima provável de um curto-circuito fase-terra em 69 ou 138 kV pode ser considerada como 0,4s, com base em dados de desligamentos fornecidos pelos setores de operação do sistema elétrico de algumas concessionárias de energia elétrica no Brasil. As referências [18] e [29] indicam que a máxima corrente admissível pelo ser humano para o caso de choque elétrico por tensão de toque, durante 0,4s, é cerca de 200 mA, valor este que pode levar o coração à fibrilação ventricular.

No caso de choque elétrico por tensão de passo, o percurso da corrente elétrica no corpo humano não envolve diretamente o coração e, portanto, o valor máximo suportável será certamente maior do que 200 mA. A literatura sobre o assunto não indica valores precisos, sendo apenas mencionado em [04] que a suportabilidade pode chegar a ser cerca de 25 vezes maior (relação 25:1). Ainda em [04] é sugerido adotar uma relação 10:1, que pode ser utilizada em certas situações como, por exemplo, quando não há religamento automático. No entanto, apesar do fato da corrente elétrica resultante da tensão de passo percorrer um caminho totalmente diferente daquele resultante da tensão de toque, e devido à inexistência de pesquisas precisas neste sentido,



tem-se adotado como prática comum considerar-se o mesmo valor de suportabilidade tanto para choques por tensão de toque, como para choques por tensão de passo.

Os circuitos elétricos representativos das situações de toque e passo estão indicados na *figura III.5*.

Para o caso de solo sem revestimento superficial, pode-se determinar R_3 conforme a *figura III.9*. Caso a profundidade h da primeira camada for maior que $0,5m$, pode-se adotar $R_3 = 2\rho_1$, sendo R_3 dado em Ω e ρ_1 dado em Ωm , resultado verificado experimentalmente em [08].

Em solos com revestimento superficial, pode-se utilizar a *tabela III.5* a seguir, obtida a partir de medições de campo considerando o pé com 200 cm^2 de contato com o solo, cujos detalhes encontram-se também em [08].

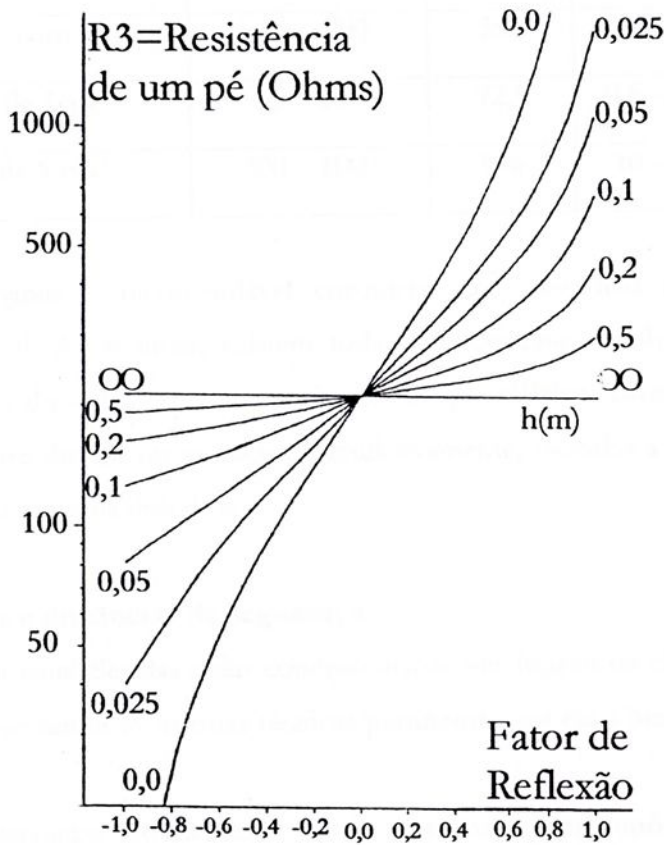


figura III.9. Valores de R_3 para solos sem revestimento superficial – ref [11].



Tabela III.5. resistência de contato de um pé – valores em $k\Omega$ - ref.[8].

Resistência de contato de um pé ($k\Omega$)				
Superfície	Superfície Seca		Superfície úmida	
	faixa	média	faixa	média
Asfalto sem recobrimento	1300 – 1500	1364	25 - 85	59,7
Paralelepípedos concretados sobre asfalto	700 – 750	720	2,0 – 8,0	3,84
Paralelepípedos com asfalto	400 – 1500	698	80 – 250	151
Lajotas de concreto com asfalto	300 – 1100	677	10 – 60	25,4
Paralelepípedos com areia	750 – 1000	858	10 – 40	19,3
Lajotas de concreto com areia	400 – 700	553	0,7 – 1,6	1,08
Areia – camada de 1cm	35 – 110	72,1	0,5 – 1,3	0,93
Brita – camada de 5 cm	800 – 1000	936	10 – 25	15,5

Para linhas urbanas é recomendável considerar que elas não sejam providas de religamento convencional. Além disso, existem todas as incertezas envolvidas: resistência do corpo humano, duração do curto-circuito, tensão de choque elétrico, comprimento do passo, etc... Usualmente, sempre devem ser tomadas, cumulativamente, medidas a favor da segurança, mesmo considerando os arranjos descritos.

III.4.2. Alturas e distâncias de segurança

Estas devem ser estabelecidas pelas concessionárias em função da classe de tensão a ser utilizada para a LT, observando as normas técnicas pertinentes, no caso brasileiro, a NBR 5422-[05].

As alturas e distâncias são definidas como afastamentos mínimos recomendados do condutor e seus acessórios energizados a qualquer parte, energizada ou não, da própria linha, do terreno ou dos obstáculos atravessados.

São determinados, separadamente, requisitos para a condição normal de operação da linha e para alguns espaçamentos verticais em condições de emergência.

A flecha dos cabos, quando em repouso, deve ser considerada na condição mais desfavorável. Quando aplicável, o deslocamento da cadeia de isoladores deverá ser verificado.



As travessias de linhas áreas sobre outras linhas elétricas ou de telecomunicações, vias de transporte, edificações, florestas e demais formas de vegetação considerada de preservação permanente, deverão ter licença previamente solicitada ao órgão responsável e suas distâncias de segurança, estarem de acordo com a NBR 5422-[05], além das diretrizes definidas por cada instituição envolvida

III.4.2.1. Ângulo de balanço da cadeia de isoladores

A norma brasileira recomenda para o cálculo do ângulo de balanço da cadeia de isoladores a adoção do período de retorno igual a dez anos, com um período de integração de trinta segundos. Considera-se o período de retorno como o intervalo médio entre ocorrências sucessivas de um mesmo evento durante um período de tempo indefinidamente longo. Corresponde ao inverso da probabilidade de ocorrência do evento no período de um ano.

A fórmula de cálculo desse balanço, devido à ação do vento é a seguinte:

$$\beta = \text{tg}^{-1}[K(\text{tg}(\beta_r))] \quad (\text{III.7})$$

Onde:

β_r : Ângulo de balanço teórico dado pela expressão:

$$\begin{aligned} \beta_r &= (q_0 d) / (p(V_G / V_M)) \\ \beta_r &= (q_0 d V_M) / (p V_G) \end{aligned} \quad (\text{III.8})$$

d : Diâmetro do condutor, em metros

p : Peso do condutor em kgf/m

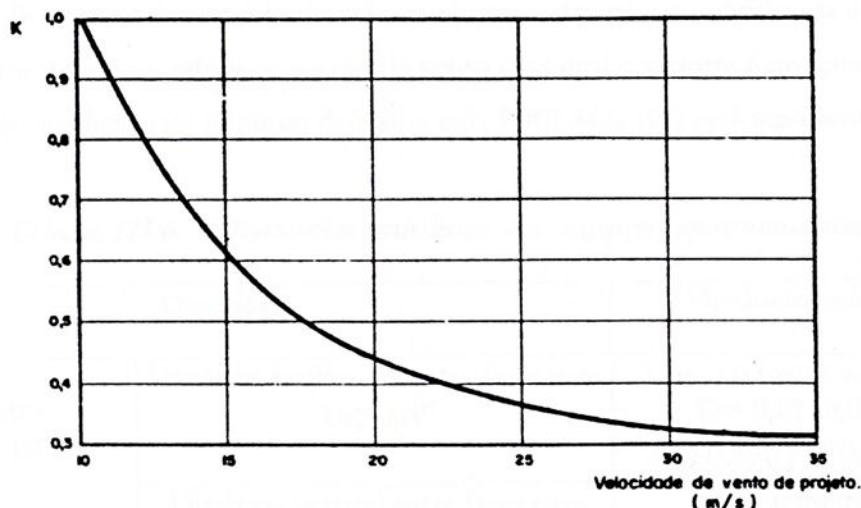
q_0 : Pressão dinâmica de referência, em N/m

V_M : Vão médio na estrutura considerada, em metros

V_G : Vão de peso, ou vão gravante, em metros

K : Coeficiente dado pelo gráfico representado na figura III.10





Parâmetro "K" - Cálculo do ângulo de balanço em cadeias de isoladores

figura III.10. Coeficiente de ajuste para o cálculo do ângulo de balanço dos condutores – NBR 5422 – Ref.[05]

Em relação a essa formulação empregada pela NBR 5422-[05], adota-se usualmente nos projetos de linhas de transmissão um fator de efetividade “a” igual a um e o ângulo de incidência do vento sobre os condutores do vão, igual a noventa graus. Neste caso, pode-se adotar a expressão da seguinte forma:

$$\beta_R = f_{Transversal} / f_{Vertical} \quad (III.9)$$

onde:

$f_{Transversal}$:Esforço mecânico transversal por condutor, em kgf/m

$f_{Vertical}$:Esforço mecânico vertical por condutor, em kgf/m

obs: a representação do ângulo de balanço está indicada na *figura III.1.*

III.4.2.2. Distâncias mínimas no suporte

As distâncias mínimas no suporte, ilustradas na *figura III.1.*, devem ser obrigatoriamente definidas em função de estudos que levem em consideração as várias solicitações elétricas a que a linha de transmissão será submetida, devidamente coordenada com as condições de vento que ocorrem simultaneamente a cada uma das solicitações.

Nas linhas onde esteja prevista a manutenção em linha viva, os espaçamentos deverão obedecer à distância de segurança para o trabalho de eletricitas.

Quando o condutor for suportado por uma cadeia com liberdade de movimento num plano transversal à linha, as distâncias calculadas devem ser mantidas para uma posição de cadeia correspondente à condição de deslocamento. Quando for o caso de distâncias entre fases, a outra cadeia deverá ser considerada na posição de repouso.



Para as distâncias relativas a flechas de condutores, deverá ser considerada a condição de trabalho de maior duração e referir-se ao vão de vento para qual o suporte é projetado.

O quadro de distâncias mínimas definidas pela NBR 5422-[05] está representado na *tabela III.6.*

Tabela III.6. Distâncias mínimas no suporte recomendadas pela NBR 5422-Ref.[05]

Descrição		Distâncias mínimas
MESMO CIRCUITO	Distância horizontal entre fases para $U \leq 50 \text{ kV}$	Tomar o maior valor entre: $D = 0,22 + 0,01 \cdot Du$ $D = 0,37\sqrt{f} + 0,0076 \cdot Du$
	Distância vertical entre fases para $U \leq 50 \text{ kV}$	1,0 metro
	Para $U > 50 \text{ kV}$	Não especificado
CIRCUITOS DIFERENTES	Distância horizontal entre fases	Tomar o maior valor entre: $D = 0,22 + 0,01 \cdot Du$ $D = 0,37\sqrt{f} + 0,0076 \cdot Du$
	Distância Vertical entre fases	$D = 0,50 + 0,001 \cdot Du$ (mínimo de 1,0 metro)
Distância entre fase e cabo pára-raios		$D = 0,22 + 0,01 \cdot Du$
Distância entre partes vivas e aterradas	Elementos do suporte	$D = 0,03 + 0,005 \cdot Du$
	Estais	$D = 0,09 + 0,006 \cdot Du$

Sendo:

- Para tensões superiores a 50 kV e altitudes superiores a 1000 metros em relação ao nível do mar, o valor da segunda parcela da expressão D deverá ser acrescida de 3% para cada 300 metros de altitude acima de 1000 metros .
- A distância mínima D , nos casos de circuitos diferentes para fases diferentes, deverá ser calculada tomando-se Du como 105% da diferença fasorial das tensões dos dois circuitos ou como a tensão fase-terra do circuito de maior tensão, sendo adotado o maior valor resultante de D .

III.4.2.3. Distâncias mínimas (D) do condutor ao solo ou aos obstáculos em condições normais de operação – método convencional

Essas distâncias devem ser verificadas para as condições mais desfavoráveis de aproximação dos condutores aos obstáculos considerados.

O cálculo pelo método convencional é feito de acordo com as expressões:

$$D = a + 0,01((D_U / \sqrt{3}) - 50) \text{ se } U > 87 \text{ kV.} \quad (\text{III.10})$$

$$D = a \text{ Se, } U \leq 87 \text{ kV} \quad (\text{III.11})$$

Sendo:



D_U : Valor em metros, numericamente igual à tensão máxima de operação em kV.

Os valores da distância básica “a” são apresentados na tabela III.7.

Tabela III.7. Distâncias básicas de espaçamentos definidas pela NBR 5422-Ref.[05]

Região ou obstáculo atravessado pela linha ou que dela se aproxime	Distância Básica (m)
Locais acessíveis apenas a pedestres	6,0
Locais onde circulam máquinas agrícolas	6,5
Rodovias, ruas e avenidas	8,0
Ferrovias não eletrificadas	9,0
Ferrovias eletrificadas ou com previsão de eletrificação	12,0
Suporte pertencente à ferrovia	4,0
Águas navegáveis	H+2,0
Águas não navegáveis	6,0
Linhas de energia elétrica	1,2
Linhas de telecomunicações	1,8
Telhados e terraços	4,0
Paredes	3,0
Instalações transportadoras	3,0
Veículos rodoviários e ferroviários	3,0

Aplicações no cálculo das distâncias de segurança:

- Em altitudes superiores a 1000 metros em relação ao nível do mar, o valor da segunda parcela de D deverá ser acrescido de 3% para cada 300 metros de altitude acima de 1000 metros.
- Em locais acessíveis somente ao pessoal autorizado poderão ser usados valores inferiores aos calculados pela formulação básica.
- Para o cálculo das distâncias dos condutores à superfície de águas navegáveis, o valor de H corresponde à altura, em metros, do maior mastro e deve ser fixado pelas autoridades responsáveis pela navegação na via considerada, levando-se em conta o nível máximo de cheia ocorrida nos últimos dez anos.
- No cálculo de distâncias verticais de partes de uma linha às de outra linha de transmissão, o valor D_U , na fórmula básica, corresponderá à tensão mais elevada entre as linhas consideradas. Quando as duas linhas tiverem tensão superior a 87 kV, deverá ser calculada a parcela $\{0,01 \cdot ((D_U / \sqrt{3}) - 50)\}$ para ambas e fazer a soma das duas com o valor básico “a”.
- A verificação das distâncias verticais deverá ser feita para condutores e pára-raios, se for o caso, nas temperaturas que conduzam aos menores espaçamentos, considerando-se a mesma temperatura ambiente.
- As distâncias para telhados e terraços são válidas para os casos onde não sejam acessíveis a pedestres. Neste caso, devem ser passadas para seis metros. As distâncias devem ser aumentadas para os casos onde possa haver a existência de andaimes, guindastes, piscinas, jardins, ou da execução de trabalhos de conservação, combate a incêndio, etc.



III.4.2.4. Distâncias mínimas (D) do condutor ao solo ou aos obstáculos em condições normais de operação – método alternativo

Para as linhas de transmissão com níveis de tensão alternada fase-fase, superiores a 169 kV e que tenham fatores de surto de manobra conhecidos, as distâncias de segurança poderão ser calculadas pelo método alternativo considerado na NBR 5422-[05], e não poderão ser menores que as obtidas pelo método convencional.

$$D = a_1 + \{ [(\sqrt{2D_U}) / \sqrt{3}P_U + V_L] a_2 \} / 500k \}^{1,667} bc \quad (\text{III.12})$$

Onde:

- a_1 : distância básica, conforme *tabela III.8*.
- D_U : Valor em *metros*, numericamente igual à tensão máxima de operação em kV . Nos casos de travessias de linhas, D_U refere-se à tensão mais elevada das linhas consideradas;
- V_L : Valor em *metros*, numericamente igual à tensão máxima de crista para a terra, em kV , da linha de tensão menos elevada, só aplicável para distâncias entre linhas de energia elétrica.
- P_U : Valor da sobre-tensão de manobra, expresso em “valor por unidade” do valor de crista da tensão máxima de operação entre fases e terra, definido para o nível correspondente a uma probabilidade de 98% de não ser excedido;
- $a_2 = 1,15$ – fator corresponde a três desvios padrões;
- $b = 1,03$ – fator de correção para condições atmosféricas diferentes das condições normais;
- c : coeficiente de segurança dado pela *tabela III.8*.
- k : fator de forma, dado pela *tabela III.8*.

Tabela III.8. Espaçamentos definidos pela NBR 5422 pelo método alternativo.-

Ref. [05]

Região ou obstáculo atravessado pela linha ou que dela se aproxime	Distância básica “a1” em metros	Coeficiente de segurança “c”	Fator de forma “k”
Locais acessíveis apenas a pedestres	2,8	1,2	1,15
Circulação de máquinas agrícolas	4,3	1,2	1,15
Rodovias, ruas e avenidas.	4,3	1,2	1,15
Ferrovias não eletrificadas	6,7	1,2	1,15
Águas navegáveis	H+0,8	1,2	1,15
Águas não navegáveis	4,3	1,2	1,15
Telhados e terraços	2,8	1,2	1,15
Paredes	1,5	1,0	1,15
Linhas de energia elétrica	0,0	1,2	1,40
Linhas de telecomunicações	0,60	1,2	1,40



III.4.2.5. Distâncias mínimas (D) do condutor ao solo ou aos obstáculos em condições de emergência

Para períodos de emergência, com duração até quatro dias e desde que a soma desses períodos não ultrapasse 5% do tempo anual de operação da linha, admite-se distâncias de segurança inferiores às estabelecidas pelo método convencional, sendo que esta aplicação só é válida para tensões inferiores a 242 kV.

Essas distâncias são dadas pela equação:

$$D = a_1 + L_{CAD} + 0,7 \quad (\text{III.13})$$

onde:

L_{CAD} : o comprimento da cadeia de isoladores.

a_1 : valores indicados na *tabela III.9*.

Tabela III.9. Espaçamentos definidos pela NBR 5422 para cálculo das condições de emergência.-Ref.[05]

Região ou obstáculo atravessado pela linha ou que dela se aproxime	Distância básica “ a_1 ”
Locais acessíveis apenas a pedestres	2,8
Circulação de máquinas agrícolas	3,9
Rodovias, ruas e avenidas.	4,3
Ferrovias não eletrificadas	5,5

III.4.2.6. Distância mínima entre condutores em suportes diferentes

As distâncias a serem obedecidas para condutores em suportes diferentes devem ser calculadas pelo método convencional para a distância vertical (D_v) e pela equação $D_H = 0,22 + 0,01D_U$ (valor mínimo = 1,5m)

Para a condição de maior aproximação, deve-se considerar o condutor de uma linha em deslocamento e o da outra, na posição de repouso.

III.4.2.7. Faixa de segurança

A largura da faixa de segurança de uma linha aérea de transmissão de energia elétrica deverá ser determinada em função do balanço dos condutores devido à ação do vento, aos efeitos elétricos e ao posicionamento das fundações de suporte e estais.

A velocidade de vento a ser utilizada no cálculo do deslocamento angular deverá ter um período de retorno igual ou superior a 10 anos, com um período de integração de 30 segundos, devendo ser corrigida para a altura média dos cabos.



A temperatura associada a esse cálculo deverá ser a de vento coincidente.

Para as linhas com tensão nominal superior a 230 kV, a faixa de segurança deve ser verificada quanto aos aspectos de ignição de combustível, níveis de rádio interferência e ruído audível, além da interferência na recepção de televisão.

O campo elétrico, ao nível do solo e no limite da faixa de servidão, não deverá ultrapassar 5 kV/m [05].

É recomendável que as fundações dos estais fiquem situadas dentro da faixa de servidão, assim como o sistema de aterramento elétrico.

Para o cálculo da largura da faixa de servidão tem-se duas situações:

Largura mínima para uma linha isolada

$$L = 2.(b + d + D) \quad (\text{III.14})$$

Onde:

b : Distância horizontal do eixo do suporte ao ponto de fixação do condutor mais afastado desse eixo, em metros

d : Soma das projeções horizontais da flecha do condutor, do comprimento da cadeia de isoladores, em metros, após seu deslocamento angular β , devido à ação do vento

$D = Du/150$, em metros, com valor mínimo de 0,5 metros,

β : ângulo de balanço da cadeia de isoladores e do condutor, considerados os mesmos

Largura mínima para “ n ” linhas com caminhamento paralelo

$$L = \sum ds_j + d_1 + b_1 + D_1 + d_n + b_n + D_n \quad (\text{III.15})$$

Onde:

$\sum ds_j$: distância conforme figura III.11

d_1, D_1, d_n, D_n : distâncias indicadas na figura e calculadas como linhas isoladas

b_1, b_n : distâncias horizontais dos eixos dos suportes mais externos aos seus pontos de fixação do condutor mais afastado, conforme figura III.11.



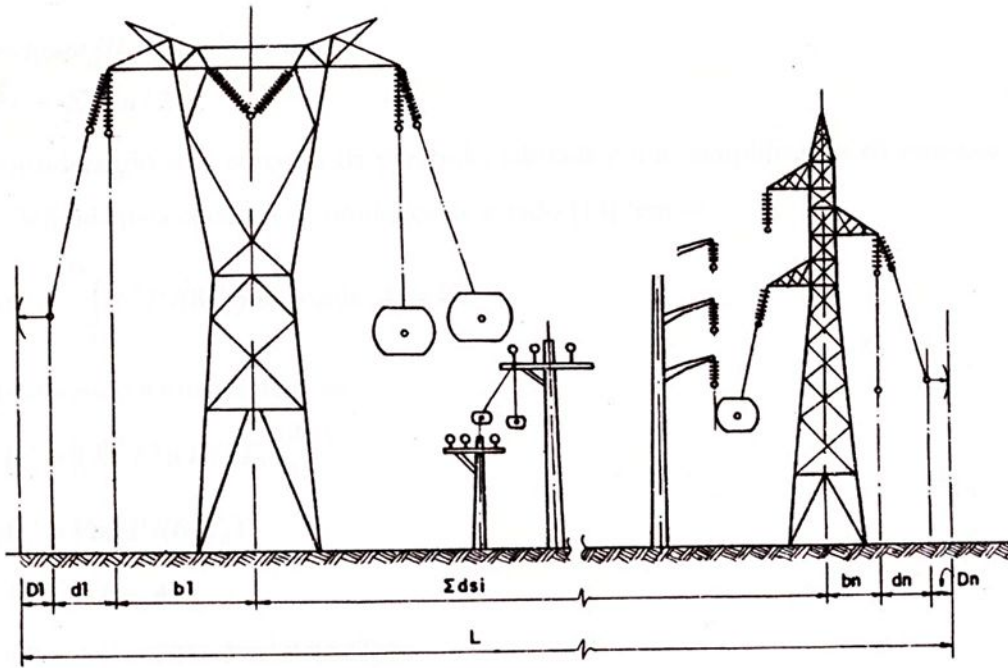


figura III.11. Esquema genérico para determinação da faixa de servidão das linhas de transmissão – NBR 5422 - Ref [05]

III.4.3. Cálculo dos parâmetros elétricos para o projeto da linha de transmissão.

Para os cálculos dos parâmetros elétricos de uma linha de transmissão devem ser considerados: o módulo de elasticidade e o coeficiente de dilatação linear dos condutores indicados na *tabela B1*; as características mecânicas indicadas na *tabela B2*; as propriedades físicas e elétricas mostradas na *tabela B3* e as características elétricas dos cabos, indicadas na *tabela B4*, pertencentes ao *apêndice B*.

III.4.3.1 Correção das alturas dos condutores

A correção de altura para os condutores de uma linha de transmissão pode ser obtida iniciando-se pelo cálculo da flecha média em um vão, utilizando-se, para isso, o método representado na *figura III.12*.

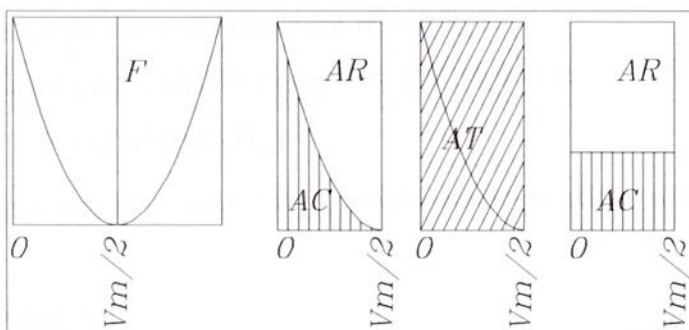


figura III.12. Flecha média do condutor pelo método da equivalência de áreas

Da *figura III.12.* pode-se tirar:

$$AT = F(Vm/2) \quad (III.16)$$

Considerando-se a equação da parábola, adotada como simplificação da equação real da catenária, definida pela equação de mudança de estado [14] tem-se:

$$AC = \int_0^{Vm/2} X^2 P/(8T_0) dx \quad \text{onde } X = Vm \quad (III.17)$$

Resolvendo a integral tem-se:

$$AC = \left| (X^3/3)(P/8T_0) \right|_0^{Vm/2}$$

$$AC = Vm^3 P/(64T_0) \quad (III.18)$$

$$AR = AT - AC \quad (III.19)$$

$$AR = F(Vm/2) - Vm^3 P/(64T_0)$$

$$AR = (Vm/2)X$$

$$(Vm/2)X = F(Vm/2) - Vm^3 P/(64T_0)$$

$$X = F - (Vm^2)P/(32T_0) \quad (III.20)$$

Onde:

Vm = vão médio em *metros*

T_0 = tensão na condição de maior ocorrência, na temperatura de referência, em *kgf*

P = Peso do condutor sem a ação do vento em *kgf/m*

F = flecha do condutor para o vão médio considerado em *metros*

As distâncias de segurança em relação ao solo e demais obstáculos atravessados pela linha serão designadas por Dcs . Desta forma pode-se escrever a equação para o condutor inferior

$$Hm = Dcs + X \quad (III.21)$$

Sendo:

Dcs = distância do cabo ao solo adotada em projeto em *metros*

Hm = altura média dos condutores em *metros*.

Substituindo a equação (III.20) na equação (III.21) tem-se:

$$Hm = Dcs + F - (Vm^2 P)/(32T_0) \quad (III.22)$$

A flecha para um vão médio " Vm ", considerando-se que a aproximação da parábola é dada por:

$$F = Vm^2 P/(8T_0)$$

Pode-se substituir na equação (III.22)

$$Hm = Dcs + (Vm^2 P)[(1/8)T_0 - (1/32)T_0] = Dcs + (Vm^2 P)[(3/32)T_0]$$



$$Hm = Dcs + 3Vm^2 P / (32T_0)$$

$$Hm = Dcs + (3/4)F$$

$$Hm = Dcs + 0,75F \quad (III.23)$$

III.4.3.2. Cálculo das resistências ôhmicas dos condutores por fase

A resistência dos condutores por fase é apresentada na *tabela B4* do *apêndice B*: “Características Elétricas dos Cabos”. Para o feixe com “*n*” condutores o valor tabelado deverá ser dividido por “*n*”. Os valores são apresentados em *Ohms/metro*.

O cálculo de resistência elétrica dos cabos condutores pode ser obtido pela seguinte expressão:

$$r_{xi} = r_i [1 + \alpha(tx - ti)] \ (\Omega) \quad (III.24)$$

Onde:

r_i: resistência elétrica na temperatura tabelada. em Ω

tx: temperatura de projeto da linha em $^{\circ}C$

ti: temperatura da resistência inicial em $^{\circ}C$

α : coeficiente de variação da resistência em função da temperatura.

Os valores para resistência dos condutores e do coeficiente de variação da resistência em função da temperatura podem ser extraídos da *tabela B3* e *tabela B4*, do *apêndice B*.

III.5. Memorial técnico do projeto eletromecânico

As diretrizes e padrões definidos em termos de traçado para a linha, os condutores, as temperaturas, as estruturas, as condições de vento, os sistemas de aterramento e demais condições técnicas fazem parte do Memorial técnico do projeto eletromecânico. Essas condições pré-estabelecidas são o ponto de partida do projeto básico, etapa que marca o início da implantação física do empreendimento.



IV. PROJETO BÁSICO

O projeto básico de uma linha de transmissão compreende desde o levantamento topográfico do traçado até os estudos de locação preliminar das estruturas, com a conseqüente análise das condições elétricas e mecânicas dos condutores e estruturas a serem utilizados no empreendimento.

IV.1. Levantamento topográfico

Os levantamentos topográficos devem reunir o maior número de informações possíveis, a fim de permitir ao projetista o pleno conhecimento de todos os detalhes existentes ao longo do traçado. Sendo assim, deverão fazer parte dos levantamentos topográficos os seguintes dados:

- Perfil detalhado do terreno;
- Ramais de residências, redes de distribuição, ramais telefônicos e outros obstáculos que cruzam o alinhamento urbano, com as respectivas alturas;
- Redes de distribuição e outras instalações coincidentes com o traçado da linha, que não puderam ser evitadas e, portanto, terão que ser remanejadas;
- Árvores existentes ao longo do traçado da linha, com localização, altura e espécie, se possível;
- Árvores sujeitas a corte, com suas respectivas características;
- Alinhamentos prediais;
- Divisas de lotes;
- Larguras dos passeios e respectivas distâncias do eixo da linha aos seus limites;
- Portões de acesso a pedestres e veículos;
- Identificação de arruamento e das áreas nas quais não poderão ser locadas estruturas, tais como estacionamentos, acessos de áreas comerciais, etc;
- Outras informações, tais como: valas, desnível entre o passeio e o leito da rua, quando existir, barrancos próximos, cercas e grades metálicas existentes no mesmo lado da linha, edificações com marquises ou sacadas, etc;
- Perfil lateral ao eixo da linha a ser projetada;
- Divisas de propriedades e de municípios;
- Linhas de transmissão paralelas ou em cruzamento;
- Detalhes das travessias, incluindo ângulo de cruzamento, cercas e alturas.



Todas essas informações devem, tanto quanto possível, constar no desenho do perfil e planta.

IV.2. Definição e cálculo das condições regentes

A definição dos parâmetros que determinam as condições de projeto para uma linha de transmissão é tomada em função das normas técnicas a serem obedecidas.

No caso de linhas no Brasil, a norma orientativa é a *NBR 5422: Projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica - procedimento – março 1985* -[05].

Esta norma já deveria ter sido revisada, mas até o momento a *ABNT* não oficializou essa revisão, estando os estudos ainda em andamento.

Nada impede ao projetista utilizar outras normas ou estudos, desde que se respeite as normas de outras entidades envolvidas (como no caso das travessias) e que se tenha metodologia comprobatória das situações consideradas.

IV.2.1. Parâmetros meteorológicos e correções

IV.2.1.1. Temperaturas

Os dados de temperatura para a região atravessada pela linha podem ser estabelecidos pela proprietária da mesma quando tiverem sido executadas medições específicas para cada região em questão, desde que a rede de medições forneça dados confiáveis, com um bom sistema, razoável período de registros e adequada densidade de estações. A norma brasileira *NBR 5422*-[05] apresenta recomendações para as medições e para a interpretação dos resultados.

Temperatura média - valor médio da distribuição das temperaturas com taxa de amostragem horária, mostrada na *figura A3* do *apêndice A*.

Temperatura máxima média - valor médio da distribuição das temperaturas máximas diárias, indicado na *figura A4* do *apêndice A*.

Temperatura mínima - valor mínimo com probabilidade de 2% de vir a ocorrer temperatura menor anualmente, obtido da distribuição de temperaturas mínimas anuais, representada no mapa da *figura A5* do *apêndice A*.

Temperatura coincidente - valor considerado como a média das temperaturas mínimas diárias e, suposto coincidente com a ocorrência da velocidade de vento de projeto, de acordo com o mapa da *figura A6* do *apêndice A*.



IV.2.1.2. Velocidades de vento

Velocidade básica de vento (V_b) – trata-se da velocidade de vento referida a um período de retorno de 50 anos, a 10 metros de altura do solo, com período de integração de 10 minutos e medida em um terreno com grau de rugosidade B . No caso de não haver dados específicos disponíveis de velocidade de vento para o local de implantação da linha de transmissão, a velocidade básica de vento deve ser determinada em função da metodologia proposta pela NBR 5422-[05], a qual fornece mapa de velocidade para o território brasileiro, ilustrado na *figura A7 do apêndice A*.

Velocidade de vento de projeto (V_p) – é um valor determinado a partir da velocidade básica de vento, corrigida de modo a levar em conta o grau de rugosidade da região de implantação da linha, o intervalo de tempo necessário para que o obstáculo responda à ação do vento, a altura do obstáculo e o período de retorno adotado.

Correção de rugosidade - São definidas quatro categorias de rugosidade de terreno para os projetos de linhas de transmissão, sendo que cada um deles possui seu coeficiente de rugosidade (K_r). Os valores de K_r correspondem a uma velocidade de vento média para o período de integração de 10 minutos, medida a 10 metros de altura. Esses valores encontram-se tabelados na NBR 5422-[05], podendo ocorrer interpolação para terrenos com rugosidades intermediárias. Esses valores são tabelados e podem ser lidos na *tabela IV.1*

Tabela IV.1. Coeficiente de rugosidade em função do tipo do terreno – NBR 5422.- Ref.[05]

Categoria do terreno	Característica do terreno	Coeficiente de rugosidade “ K_r ”
A	Vasta área de água; áreas planas costeiras; desertos planos	1,08
B	Terreno aberto com poucos obstáculos	1,00
C	Terrenos com obstáculos numerosos e pequenos	0,85
D	Áreas urbanizadas; terrenos com muitas árvores altas	0,67

Correção do período de retorno – os valores de V_b obtidos em medições ou em gráficos referem-se a um período de retorno de 50 anos. Para calcular a velocidade de vento referida a qualquer período T , pode-se usar a seguinte equação:



$$Vb_T = \beta - \{\ln[-\ln(1 - 1/T)]/\alpha\} \quad (IV.1)$$

Onde:

α : estimador do fator de escala da distribuição de Gumbel

β : estimador do fator de posição da distribuição de Gumbel

T : período de retorno para determinada velocidade de vento em anos

Vb_T : velocidade básica de vento em m/s, referida ao período de retorno T

A determinação da velocidade de vento para qualquer período de retorno pode ser feita com metodologia de cálculo específica, fornecida pela NBR 5422-[05], sendo os valores dos parâmetros α e β obtidos nas figuras 8 e 9 do apêndice A, respectivamente.

A velocidade básica de vento referida a um período de retorno de 50 anos, obtida através da figura A7 do apêndice A é uma alternativa oferecida pela NBR 5422-[05] para os casos onde não se dispõem de medições específicas para as condições de vento dos locais de implantação das linhas de transmissão.

Correção do período de integração – a figura IV.1 mostra a relação de K_d entre os valores médios de vento a 10 metros de altura do solo, para diferentes períodos de integração e rugosidade do terreno. No gráfico, pode-se observar os valores do coeficiente de correção em função do período de integração.

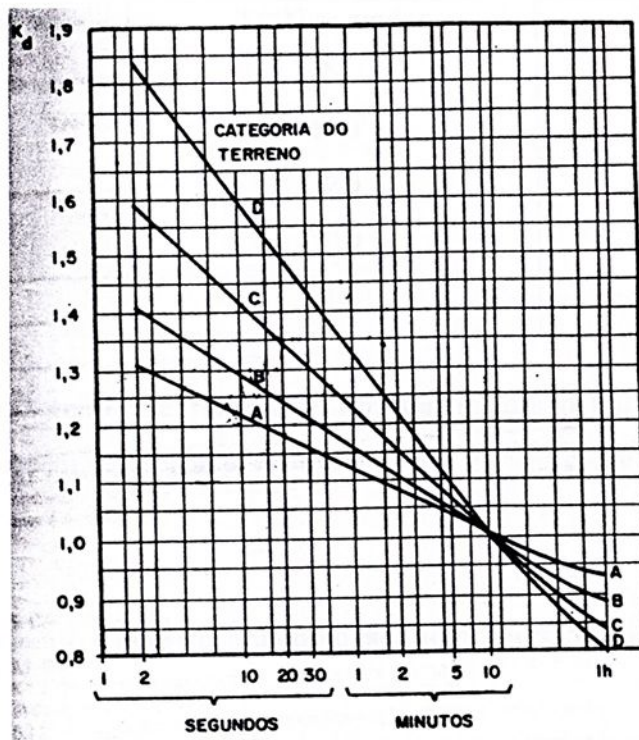


figura IV.1. Coeficiente de correção em função do período de integração, da categoria do terreno e da relação entre velocidades médias a 10 metros de altura – NBR 5422 – Ref.[05]

Correção de altura – a velocidade de vento para a altura de referência de dez metros é dada pela fórmula:

$$V_{10} = K_d V_{b_T} \quad (\text{IV.2})$$

onde:

V_{10} : velocidade de vento a 10 metros de altura em m/s

A correção da velocidade de vento para alturas diferentes de 10 metros é expressa pela equação:

$$V_H = V_{10} \cdot (H/10)^{1/n} \quad (\text{IV.3})$$

H : altura média dos condutores da linha de transmissão, em metros

V_H : Velocidade de vento a uma altura H , em m/s

n : Coeficiente que depende da rugosidade do terreno e do período de integração, conforme ilustra a *tabela IV.2*.

Tabela IV.2. Coeficiente de cálculo para correção de altura na velocidade de vento em função do período de integração e da categoria do terreno – NBR 5422.- Ref.[05]

Categoria do terreno	T=02 segundos	T=30 segundos
	N	n
A	13,0	12,0
B	12,0	11,0
C	10,0	9,5
D	8,5	8,0

Velocidade de vento de projeto – Em função das definições anteriores sobre a velocidade de vento, obtém-se a seguinte expressão para a velocidade de vento de projeto:

$$V_p = K_r V_H \quad (\text{IV.4})$$

IV.3. Lançamento das estruturas no desenho do perfil topográfico

O lançamento das estruturas é feito observando-se os seguintes critérios:

- Verificação do balanço dos cabos em função de obstáculos paralelos ao longo da faixa;



- Evitar estruturas em situações perigosas;
- Evitar pontos sujeitos a escavações, erosão e semelhantes;
- Considerar, quando houver, as diferenças de nível entre a situação atual e futura, a fim de evitar o afloramento da fundação;
- Evitar, na medida do possível, as estruturas de maior altura, nos projetos urbanos;
- Em linhas que passam por áreas urbanas, utilizar os mesmos critérios de alimentadores de distribuição.

IV.4. Engastamento e fundações

Os engastamentos a serem previstos devem levar em conta a padronização dos postes nas concessionárias, sendo definidos através de estudos de esforços típicos das estruturas.

Quanto às fundações, as soluções utilizadas em função das características do terreno e solicitações nas estruturas são:

- Reaterro com saibro;
- Reaterro com saibro-cimento, teores de 7%, 10% e 14%;
- Tubulão de concreto armado parcialmente engastado;
- Placas de concreto simples;
- Tubulão de concreto armado com encamisamento;
- Fundação em estacas ou micro-estacas.

IV.5. Esforços nas estruturas

Nas linhas urbanas em postes de concreto dado às restrições de diâmetro máximo previsto para as estruturas, bem como as limitações quanto às fundações, tendo em vista o local de implantação, a carga nominal máxima deve manter-se na ordem de 3000 *kgf* [25], caso contrário poderá se verificar muitas inconveniências, como por exemplo: aumento nas dificuldades de construção; ocupação exagerada de passeio público devido à dimensão das estruturas e problemas estéticos referentes à implantação desse tipo de linha em cidades.

Para os projetos em estruturas metálicas, tem-se a padronização das estruturas. Esta padronização pode ser da concessionária, ou específica para um projeto em andamento. Nesses casos, adotam-se vãos típicos e desenvolve-se o projeto em função deles.



Os esforços nas estruturas são divididos em três categorias: cargas de vento, cargas permanentes e cargas especiais.

IV.5.1. Cargas de vento

São aquelas atuantes sobre o suporte das estruturas, cadeias de isoladores e cabos devido à ação do vento, sua composição é equacionada pela seguinte formulação:

$$q_0 = (1/2)\rho V_p^2 \quad (IV.5)$$

Onde:

q_0 : pressão dinâmica de referência em N/m^2 .

ρ : massa específica do ar em kg/m^3 .

$$\rho = (1,293 / (1 + 0,00367t))(16000 + 64t - ALT) / (16000 + 64t + ALT) \quad (IV.6)$$

t : temperatura coincidente em C^0

ALT : altitude média em metros na região de implantação da linha em metros

$$A_c = q_0 C_{xc} a d V_m \sin^2(\theta) \quad (IV.7)$$

Onde:

A_c : ação de vento nos cabos em *Newtons*

C_{xc} : coeficiente de arrasto para condutores igual a 1,0

d : diâmetro do cabo em metros

V_m : vão médio em metros.

θ : ângulo de incidência do vento, em relação à direção do vão. ($\leq 90^0$)

a : fator de efetividade adimensional, para t menor ou igual a 30 segundos, conforme ilustra a figura IV.2

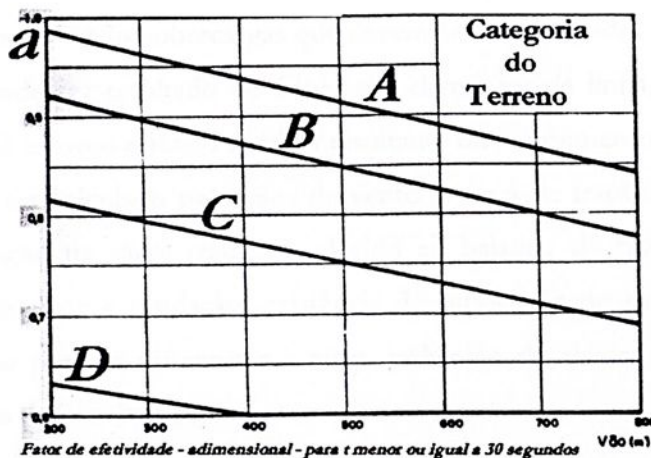


figura IV.2. Gráfico do fator adimensional para período de integração menor ou igual a 30 segundos – NBR 5422 – Ref.[05]

O período de integração a ser adotado segundo recomendação da NBR 5422-[05] deve ser de dois segundos, para a ação do vento nos suportes e nas cadeias de isoladores e de trinta segundos para a ação de vento nos cabos.

Quanto ao período de retorno, o valor mínimo deverá ser de 50 anos para as cargas de vento utilizadas no dimensionamento mecânico dos suportes.

IV.5.2. Cargas permanentes

Representam as cargas permanentes em uma linha de transmissão os esforços de peso dos cabos, que são chamados esforços verticais, calculados em função do vão de peso do suporte, mais o peso próprio do suporte, das ferragens de cabos e das cadeias de isoladores e também os esforços transversais originados da tração mecânica dos cabos.

Nos projetos de linhas de transmissão, após a definição dessas cargas, deve-se aplicar, sobre os valores obtidos, os coeficientes de segurança indicados na NBR 5422-[05] ou em outra norma técnica que venha a ser adotada.

IV.5.3. Cargas especiais

Cargas de Montagem – São cargas impostas por operações de içamento na montagem das estruturas. Os pontos de içamento devem ser dimensionados para resistir mecanicamente a, pelo menos, duas vezes os esforços estáticos produzidos.

Cargas de manutenção – Quando se realizam manutenções, a descida de um condutor do suporte aumenta a carga vertical. Desta forma, todo ponto de suspensão de cabos deverá apresentar uma capacidade vertical não inferior a duas vezes os esforços normais da posição de repouso.

Cargas de contenção – São sobrecargas que devem ser consideradas para que se evite o fenômeno cascata, que pode ser resultado de falhas em elementos da linha, devido à ação de ventos ou evento casual. O esforço estático residual resultante do rompimento de uma fase ou de um cabo pára-raios deve ser calculado para vãos de vento e carga de tração de maior duração, sendo permitida a atenuação da carga resultante devido ao balanço de cadeias de isoladores, deflexão ou rotação do suporte e fundação, existência de suportes articulados, interação com outras fases ou cabos que possam influenciar a carga, utilização de elementos especiais como grampos deslizantes, bases deformáveis, etc.



IV.6. Carregamento dos cabos

O carregamento dos cabos decorre do seu peso próprio, da pressão de vento horizontal, uniformemente distribuída ao longo do vão, e da componente horizontal da tração axial.

IV.6.1. Cálculos dos esforços mecânicos

As trações dos condutores e cabos pára-raios em uma linha de transmissão determinam uma catenária, expressão originária do latim “*catena*”, que significa corrente, por ter um comportamento semelhante a uma corrente de elos iguais esticada entre dois apoios devidamente afastados. Essas trações são calculadas pela equação de estado, descrita abaixo [14]:

$$To_2^3 + To_2^2 [((ESp^2 A^2)/(24To_1^2)) + ES\alpha.(\theta_2 - \theta_1) - T_1] = ESp^2 A^2 \quad (IV.8)$$

Os parâmetros envolvidos nessa equação representam as características dos condutores e das condições regentes para o projeto da linha de transmissão. São eles:

E : módulo de elasticidade em kgf/mm^2

S : área da seção transversal em mm^2

α : coeficiente de dilatação linear em C^{-1}

To_2 : tensão horizontal de esticamento nas condições finais em kgf

To_1 : tensão horizontal de esticamento nas condições iniciais em kgf

θ_2 : temperatura final em C°

θ_1 : temperatura inicial em C°

p : peso do cabo em kgf/m

A : vão de cálculo em metros ou vão básico “ V_b ”

O módulo de elasticidade “ E ” não é constante ao longo da vida da linha de transmissão. Ele apresenta variações em função do material empregado na fabricação dos condutores e do fenômeno da fluência metalúrgica, ou simplesmente fluência, atingindo seu valor final após determinado tempo, em função do tensionamento a que for submetido.

Determinadas providências são tomadas nos projetos e construção de linhas de transmissão no sentido de prever esse alongamento dos condutores com o decorrer do tempo e, com isso, evitar o aparecimento do problema de diminuição dos espaçamentos exigidos pelas normas técnicas. Pode-se destacar as seguintes soluções:

Deslocamento de temperatura na confecção das tabelas de esticamento de condutores, adotando-se um intervalo entre a temperatura calculada e a temperatura informada nas tabelas.



Aplicação da chamada “tensão de prova” antes da fixação definitiva dos condutores. Esta prática refere-se à aplicação de uma tensão maior que a de trabalho, por um determinado período de tempo.

Locação das estruturas através do emprego de um valor de temperatura de projeto acima do valor estipulado pelo estudo de planejamento do sistema. Esse “aumento” na temperatura de projeto é baseado em condições pré-estabelecidas.

Composição do peso de condutor sob a ação dos ventos:

$$p_2 = \sqrt{p_1^2 + fv^2} \quad (\text{IV.9})$$

Onde:

p_1 : peso do cabo na condição sem a ação do vento em kgf/m

p_2 : peso do cabo na condição de ação do vento sobre os condutores em kgf/m

O vão básico de uma seção de tracionamento pode ser equiparado a um vão fictício, isolado, equivalente à sucessão de vãos contínuos, contidos em uma mesma seção de tensionamento. As tensões calculadas de acordo com esse vão, chamado de regulador, são constantes em cada um dos vãos componentes das seções. Esse vão equivalente pode ser obtido através da expressão:

$$V_b = \sqrt{(\sum_1^n A_n^3) / \sum_1^n A_n} \quad (\text{IV.10})$$

As estruturas em ângulos, em uma linha de transmissão, devem absorver os esforços que lhes são transmitidos pelos cabos. A tração dos condutores varia com a temperatura e com a intensidade da pressão de vento sobre os cabos. No dimensionamento estático dessas estruturas deve-se empregar o valor máximo da tração. Os condutores, nos vãos adjacentes a uma estrutura em ângulo, transmitem a ela essas forças devido à ação dos ventos. O vento pode ser calculado como atuando diretamente sobre a bissetriz do ângulo, sem que se incorra em grandes erros. A expressão matemática que representa esse esforço é descrita da seguinte forma:

$$F_t = Vmfv + 2T_o \text{sen}(\lambda / 2) + Fvc \quad (\text{IV.11})$$

Onde:

F_t : força transversal em kgf

Vm : vão médio na estrutura em metros

λ : ângulo da linha no ponto em graus

fv : força de vento nos condutores em kgf/m

Fvc : força de vento na cadeia de isoladores em kgf

Vb : Vão básico de cálculo em metros



O cálculo da flecha dos condutores poderá ser feito de maneira aproximada, utilizando-se a fórmula da parábola:

$$f = V\tilde{a}o^2 p / 8T \quad (m) \quad (IV.12)$$

Os esforços de tração axial não poderão ser superiores a 50% da carga nominal de ruptura dos cabos na condição de vento máximo, e de 33%, para o caso de temperatura mínima.

A recomendação da norma brasileira para as condições de trabalho de maior duração é dada pela *tabela IV.3*, nos casos onde não se adotem medidas de proteção contra os efeitos das vibrações.

Tabela IV.3. Porcentagens para o esticamento de condutores, recomendadas pela NBR 5422.-Ref.[05]

Tipo de cabo	% de Carga de Ruptura
<i>Aço AR</i>	<i>16</i>
<i>Aço EAR</i>	<i>14</i>
<i>Aço-Cobre</i>	<i>14</i>
<i>Aço-Alumínio</i>	<i>14</i>
<i>CA</i>	<i>21</i>
<i>CAA</i>	<i>20</i>
<i>CAL</i>	<i>18</i>
<i>CALA</i>	<i>16</i>
<i>CAA-EF</i>	<i>16</i>

Por meio da equação de mudança de estado, podem ser calculadas as várias trações existentes em uma linha de transmissão, ocasionadas pela mudança de temperatura. Parte-se de uma temperatura de referência e consegue-se obter a curva característica para cada vão regulador. Analisando o gráfico, a seguir: “*Tensão Mecânica x Temperatura*”, podem ser feitas as seguintes verificações:



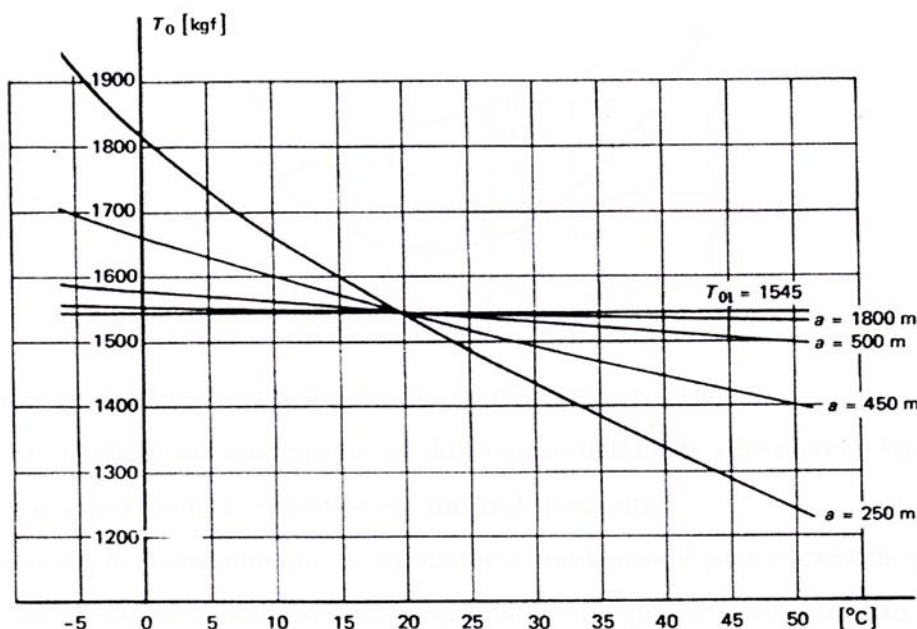


figura IV.3. Gráfico Tensão Mecânica x Temperatura para um determinado esticamento de condutores em temperatura de referência – Ref.[14]

A variação da tração nos cabos será tanto maior quanto menores forem os vãos para um mesmo cabo;

No caso da diminuição da temperatura, o aumento na tração dos cabos dos vãos menores será muito maior do que nos vãos maiores;

Para a elevação de temperatura, a redução de tração nos condutores de vãos menores será maior do que nos vãos maiores.

O comprimento dos condutores em relação aos vãos de projeto pode ser expresso da seguinte forma [14]:

$$L = 2C_1 \sinh(A/2C_1) \quad (\text{IV.13})$$

Onde: $C_1 = T_0 / p$

Considerando as aproximações da série de seno hiperbólico para os dois primeiros termos, tem-se, como expressão aproximada para o cálculo do comprimento dos cabos em um vão nivelado, a equação da parábola desenvolvida em função da flecha, que é dada por:

$$L \approx A + (8f^2 / 3A) \quad (\text{IV.14})$$

Para o caso de vãos desnivelados, conforme *figura IV.1*, tem-se:

$$L = \sqrt{B^2 + A^2(1 + A^2/12.C_1^2)} \quad (\text{IV.15})$$

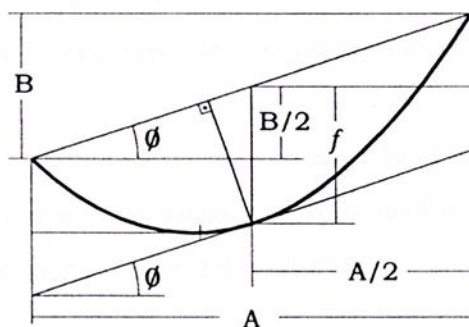


figura IV.4. Representação de vão em desnível – ref.[14]

Nesta equação também são empregados os dois termos iniciais da série de seno hiperbólico. Ela representa o comprimento do condutor em forma de parábola.

O cálculo do comprimento do condutor é fundamental para o caso de grandes vãos. Esses resultados são utilizados no dimensionamento das praças de lançamento dos cabos e divisão das bobinas.

Para os projetos desenvolvidos em áreas rurais, busca-se a maior otimização da locação em função dos custos de estruturas envolvidos. O objetivo principal é conseguir o menor número de estruturas possível, desde que se obedeça aos critérios de segurança e confiabilidade das estruturas, cabos e espaçamentos. O nível de esticamento utilizado no projeto irá determinar as condições de espaçamento cabo-solo, aproximações laterais, esforços no suporte, fluência, amortecimento e tamanho de vão básico típico.

No caso de linhas urbanas, conforme as referências [25], [26], a experiência mostra que o carregamento dos cabos deve ser tal que permita manter a carga nominal das estruturas de ancoragem na ordem de 3000 kgf. Sendo assim, as trações a serem utilizadas nos diversos tramos devem ser ajustadas adequadamente, visando otimizar o projeto da melhor forma. Alguns valores típicos de trações a serem impostos ao cabo condutor, na condição de temperatura mínima sem vento e que permitem obter os resultados desejados, são:

- 500 a 600 kgf para os tramos adjacentes às estruturas de ancoragem, nas quais se verificam ângulos acima de 60 graus;
- 700 a 800 kgf para os tramos que permitam, em estruturas de fim de linha ou adjacentes às estruturas de ancoragem, nas quais se verificam ângulos entre 45° e 60°;
- 900 kgf para tramos adjacentes às estruturas de ancoragem, nas quais se verificam ângulos entre 30° e 45°;
- 1100 a 1300 kgf para tramos longos, nos quais é economicamente viável a utilização desta tração, terminando em estruturas de final de linha com contra-



poste ou reduções sucessivas de tração. Este valor também pode ser utilizado nos tramos adjacentes às estruturas de ancoragem, nas quais se verificam ângulos de até 30 graus.

Definidos e otimizados os valores de tração a serem utilizados no cabo condutor em cada tramo da linha, efetua-se a determinação da tração nos cabos auxiliar e pára-raios, a partir da qual serão calculadas as demais trações que se fizerem necessárias.

IV.6.1.1. Trações no cabo auxiliar para linhas compactas e urbanas

A tração no cabo auxiliar é determinada a partir do condutor, impondo-se inicialmente a igualdade de flecha entre ambos, na condição de *EDS*. A partir desta condição, verifica-se a distância entre eles na situação de maior aproximação, ou seja, cabo condutor na máxima temperatura e cabo auxiliar na temperatura mínima ambiente, e caso sejam preservadas as distâncias mínimas disruptivas estabelecidas, definem-se as trações nas demais condições, incluindo a confecção dos gabaritos do cabo auxiliar, com os quais será efetuada a locação das estruturas. Caso a distância mínima não seja satisfeita, o que, em geral, ocorre para os tramos com trações mais elevadas e maiores vãos reguladores, impõe-se a distância mínima (D_{MIN}) disruptiva e calcula-se a flecha ($F_{AUX.TEMP.MIN}$) e respectivas trações no cabo auxiliar.

$$F_{AUX.TEMP.MIN} = (F_{COND.TEMP.MAX} + D_{MIN}) - d \quad (IV.16)$$

Sendo d = distância vertical na estrutura entre a fase inferior e o cabo auxiliar, em metros

A partir do valor obtido para $F_{AUX.TEMP.MIN}$, calcula-se as trações nas demais condições e a confecção dos gabaritos do cabo auxiliar.

IV.6.1.2. Trações no cabo pára-raios

A tração no cabo pára-raios é determinada a partir do condutor, impondo-se a condição de igualdade de flecha na condição de *EDS*, obtendo-se, então, a partir desta, os demais valores de tração que se façam necessários para o projeto.

IV.7. Conclusão do projeto básico

Tendo sido observadas todas as etapas listadas, o projeto básico estará apto a ser encaminhado ao campo para a verificação e confirmação das condições físicas, além de possibilitar o início da fabricação e posteriores testes das estruturas, etapas que fazem parte do projeto executivo do empreendimento.



V. PROJETO EXECUTIVO

O projeto executivo de uma linha de transmissão é a etapa do empreendimento onde se efetivam os estudos elaborados na fase do projeto básico. Ele é composto pela locação final das estruturas em perfil topográfico, pelos relatórios técnicos de projeto, pelos esquemas de faseamento do sistema, sinalização aérea e por placas, padrões de acessórios e ferragens, projetos de fundações, desenhos do sistema de aterramento, travessias e desenhos especiais que se façam necessários para a realização da obra.

V.1. Lançamento definitivo das estruturas no perfil topográfico

Efetuada o lançamento definitivo no desenho do perfil topográfico, faz-se necessária uma análise no local escolhido para a locação das estruturas, estipulado pelo projeto básico, verificando-se a existência de possíveis interferências à instalação das estruturas. Esta etapa consiste na confirmação física para a locação das estruturas da linha de transmissão.

V.2. Carregamento e ensaio das estruturas

Para o dimensionamento das estruturas, são previstas três hipóteses de carregamento, uma normal e duas excepcionais.

Hipótese normal - Esta hipótese constitui o estado limite de utilização permanente, devendo estar dentro do limite nominal e, segundo ela, considera-se todos os cabos intactos com o vento reduzido (período de retorno de cinco anos).

Hipótese excepcional I - Esta hipótese constitui um estado limite de utilização no regime elástico, devendo estar, portanto, dentro do limite de elasticidade. Essa hipótese considera todos os cabos intactos com vento máximo para um período de retorno de 50 anos.

Hipótese excepcional II - Esta hipótese constitui um segundo estado limite de utilização no regime elástico, devendo também estar dentro do limite de elasticidade. Considera, segundo ela, o cabo condutor superior rompido com os demais cabos intactos e com o vento reduzido para um período de retorno de cinco anos.

Para as estruturas de suspensão, tendo em vista as pequenas diferenças nas cargas atuantes, adota-se um carregamento típico tomando-se por base a estrutura mais solicitada. Para as estruturas de ancoragem, os carregamentos são fornecidos individualmente, sendo que as cargas atuantes consideradas em cada hipótese, nos respectivos pontos de aplicação, são:

- Esforços de vento sobre a estrutura;



- Cargas verticais por cabo, devido ao peso dos mesmos, e respectivos acessórios;
- Carga transversal resultante em cada cabo, devido aos esforços de vento e ângulos;
- Carga longitudinal devido a rompimento.

Para todas as cargas, são aplicados os coeficientes de segurança, em caso de estruturas de concreto. Já para as estruturas metálicas esses coeficientes estão incluídos nas suas árvores de carregamento por suporte.

No caso de linhas em postes de concreto recomenda-se também que, durante a elaboração dos ensaios de elasticidade, sejam obtidos gráficos de *tração vs. deformação no topo*, os quais permitirão uma melhor avaliação na definição das “contra-flechas” a serem aplicadas nas estruturas durante a construção.

V.3. Conclusão do projeto executivo

Estando concluídas as fases de locação física, fabricação e testes das estruturas, o projeto é considerado em condições de ser executado. Desta forma, poderão ser iniciados os procedimentos construtivos da linha de transmissão.



VI. PROCEDIMENTOS CONSTRUTIVOS

Os procedimentos construtivos representam a etapa onde se materializa no campo o projeto executivo. Esta fase se inicia a partir do conhecimento detalhado e preparação do local da obra e se estende até a entrega do empreendimento para a energização.

VI.1. Previsões de projeto

Tendo em vista que em uma linha urbana o “canteiro de obras” se constitui das diversas ruas em que ocorrerá a sua implantação, é de suma importância que algumas medidas sejam tomadas para o bom andamento da obra. Entre elas, recomenda-se:

- Pleno conhecimento prévio do projeto e do local da obra pelos responsáveis pela fiscalização e construção;
- Planejar previamente e, minuciosamente, todas as medidas de segurança, fazendo cumpri-las rigorosamente;
- Instruir o pessoal de campo quanto ao relacionamento com os proprietários e população em geral;
- Evitar o depósito de materiais e equipamentos ao longo das ruas, principalmente em locais que possam representar perigo ou causar transtornos;
- Programar criteriosamente os serviços para que não causem transtornos, dentro da medida do possível, evitando-se a permanência de cavas e valas abertas por longo tempo;
- Efetuar as podas e cortes somente na época de lançamento dos cabos e de forma criteriosa;
- Contatar previamente os órgãos públicos envolvidos, para que se tenha um pronto atendimento no caso de imprevistos.

VI.2. Locação Topográfica

Com base no levantamento planialtimétrico e na distribuição teórica das estruturas ao longo do traçado, os trabalhos de locação topográfica incluem:

- **Locação das estruturas** – corresponde à identificação física do eixo central da estrutura em relação ao marco ou piquete mais próximo.
- **Verificação do perfil** – todas as distâncias e desníveis entre estruturas, bem como os pontos críticos (distâncias mínimas do condutor ao solo, travessias, etc), são verificados novamente.



- **Seções diagonais** – a partir de cada ponto central das estruturas são levantadas seções diagonais do perfil com o objetivo de se levantar a cota do ponto onde se apoiará cada perna (no caso de estruturas auto-portantes) ou cada estai (no caso de estruturas estaiadas), o que permitirá a definição das diversas alturas de pés (pés desnivelados) ou do comprimento dos estais.

VI.3. Execução da construção

A execução do traçado final, definido em projeto executivo como função do “compromisso entre o aumento da linha e número de ângulos de deflexão, com o custo da construção, desapropriações e operação futura da linha decorrentes de obstáculos e acessos”[03], abrangerá diversas fases, tendo cada uma delas o seu desenvolvimento otimizado nas situações onde o projeto básico e o projeto executivo foram cuidadosamente elaborados. Mesmo partindo desse princípio, é comum acontecer, nessa etapa, situações onde haja a necessidade de revisões ou acertos de projeto, em função dos chamados “imprevistos de construção”. Na prática, a etapa de projeto somente terminará com a energização da linha de transmissão, ou seja, junto com a própria construção, quando a linha passa a ser responsabilidade das áreas de operação das concessionárias de energia ou de empresas proprietárias.

VI.3.1. Limpeza da faixa

A limpeza da faixa de servidão e sua manutenção durante a vida útil da linha de transmissão devem considerar as condições ambientais e também as condições operacionais desta linha, sendo classificados os seguintes tipos de operações:

- **Desmatamento** – é o corte da vegetação existente na região da faixa, feita com ferramentas manuais ou mecânicas no caso de árvores de maior porte;
- **Destocamento** – é o arrancamento dos tocos e raízes, para evitar o rebrote de vegetais;
- **Raspagem da terra vegetal** – é executada com tratores de lâmina numa profundidade de 20 a 30 cm;
- **Erradicação da vegetação** – a erradicação é aplicada em certos tipos de vegetação que, por seu crescimento rápido ou perigo de queima, possam colocar em risco a linha, e é feita através de destocamento ou da aplicação de herbicidas.



VI.3.2. Estradas de acesso

As estradas de acesso ao local de construção são de grande importância para a implantação das linhas. As características dos locais e das obras acabam determinando variações significativas de custo e, em alguns casos, implicações em relação aos órgãos de meio ambiente.

VI.3.3. Sondagem do terreno

A sondagem é feita no eixo central da torre para se determinar as características do solo e selecionar o tipo de fundação a ser construída. Em terrenos especiais, deve-se avaliar a quantidade e a localização das sondagens e suas especificações.

VI.3.4. Escavação

A escavação das fundações pode ser manual ou mecanizada. A forma escolhida deve levar em conta o tipo do terreno, o tipo da fundação prevista, as condições de segurança para a sua execução e o custo envolvido.

VI.3.5. Nivelamento das estruturas

O nivelamento dos pés das estruturas é fator determinante para a montagem das torres metálicas. O processo é feito através de gabaritos e o desnivelamento entre as pernas e o ponto central deve ser obtido através de aparelho teodolito.

VI.3.6. Fundações

As fundações das estruturas são constituídas de grelhas metálicas ou blocos de concreto, e as bases do concreto divididas em: concreto simples e armado. Projetos especiais de fundações podem ser elaborados incluindo estacas helicoidais de aço, estacas de concreto armado vibrado ou centrifugado, lajes de concreto armado, tubulões, etc.

O sistema a ser utilizado depende de uma solução de compromisso entre a segurança e o custo.

VI.3.7. Montagem das estruturas

A montagem das estruturas poderá ser efetuada por diversos métodos:

- **Montagem por peças** – é o processo usado na montagem de partes da torre de muito peso ou em lugares de difícil acesso;
- **Montagem por seções** – o sistema de montagem por seções é mais difundido, porque é aplicável a quase todos os tipos de terrenos e não exige equipamentos pesados e de difícil



transporte. Partes superiores de menor peso poderão ser erguidas inteiramente montadas e, em seguida, parafusadas aos troncos;

- **Montagem por rotação** – é o processo em que a estrutura é inteiramente montada no chão e, então, girada em torno de sua base para a posição vertical. É o método mais utilizado para montagem de torres estaiadas;
- **Uso de guindastes** – o uso de guindaste na montagem de estruturas é utilizado quando há acessos adequados e espaço para operação e um custo compatível com a obra.

As seguintes observações podem ser feitas sobre a montagem de estruturas:

- **Tolerâncias pré-estabelecidas** - após a montagem das estruturas devem ser verificados: o nivelamento das bases, a verticalidade da estrutura, e o correto alinhamento transversal do eixo central do topo;
- **Parafusos** – após o término da montagem, durante a qual os parafusos se mantinham afrouxados, deve ser dado o torque de projeto aos mesmos. Este torque visa apenas manter o aperto das porcas e, na maioria dos casos, não tem função estrutural;
- **Estais** – no caso de torres estaiadas, após a instalação da estrutura e dos estais, eles devem ter sua tração regulada conforme a tabela de esticamento preparada com base na pré-tensão estabelecida em projeto.

VI.3.8. Execução do aterramento das estruturas

O aterramento das estruturas deve ser feito seguindo-se estritamente a previsão do projeto, devendo-se tomar cuidados especiais na reconstituição do solo ao redor da estrutura. Os trabalhos geralmente são feitos de forma manual, podendo, em certos casos, utilizar-se máquinas para fechamento de cavas.

VI.3.9. Içamento de cadeias em roldanas

O lançamento de condutores, em sua primeira fase, corresponde ao içamento das cadeias de isoladores.

As cadeias, compostas de isoladores e ferragens, são montadas ao pé da estrutura. Elas devem estar limpas e desprovidas de graxa protetora, aplicada em certos casos. Antes da montagem, os isoladores devem ser examinados visualmente. Após esses cuidados e procedimentos, serão erguidas para seu local de instalação.



VI.3.10. Lançamento de Cabos

O lançamento de condutores exige de uma série de procedimentos e estudos específicos:

- Planilhas de lançamento onde são determinadas as flechas e tensões de lançamento, a verificação das cargas nas roldanas, levantamento dos cabos-piloto e condutores; seleção das bobinas para permitir o posicionamento correto das emendas e determinação das cargas no guincho de tração e freio;
- Tabela de esticamento com determinação de tensões e flechas em roldanas e após o grampeamento, determinação das distâncias de deslocamento de instalação da cadeia e grampeamento;
- Cálculo de número e posicionamento dos amortecedores e espaçadores.
- Preparação das praças de lançamento;
- Erguimento de estruturas auxiliares nas travessias de linhas de energia elétrica, linhas telefônicas e estradas que cruzam a linha de lançamento;
- Organização das bobinas na ordem prevista pelo plano de lançamento;
- Fixação das roldanas nas cadeias;
- Situar os equipamentos de tração e freio em ângulos mínimos em relação ao alinhamento da linha;
- Ancorar rigidamente o equipamento de tração e freio;
- Aterramento deslizante à saída do cabo do freio e entrada do guincho de tração para prevenir acidentes devido a descargas estáticas ou indutivas, com utilização de dispositivos especiais.

O lançamento deve ser efetuado com velocidade adequada, recomendando-se reduzi-la na passagem pelas roldanas. Deve ocorrer um acompanhamento contínuo da emenda entre o cabo piloto e os condutores e, também, de todas as roldanas, verificando-se sempre a rotação das mesmas.

VI.3.11. Emenda de condutores

Praticamente, todas as emendas dos condutores são feitas com juntas do tipo compressão e executadas com prensas hidráulicas, podendo ser utilizadas prensas manuais ou motorizadas para linhas com cabos singelos ou com pequenas quantidades de emendas.

VI.3.12. Regulação dos cabos

A regulação final dos condutores é executada conforme as tabelas que definem, para cada tramo de regulação, as flechas e tensões iniciais previstas, bem como as flechas em roldana e após



o grampeamento. A medida da temperatura do cabo é lida no termômetro após, aproximadamente, cinco minutos necessários para absorção e estabilização das temperaturas do termômetro e do cabo.

VI.3.13. Grampeamento dos cabos

O grampeamento exige um estudo detalhado relativo ao posicionamento do grampo de suspensão em relação à roldana, para ser mantida a verticalidade das cadeias após o grampeamento. Os trabalhos são iniciados pelas cadeias de uma extremidade que deve ser fixa.

O posicionamento para o grampeamento é definido pelo estudo de verticalidade, denominado na área como “*off-set*”.

VI.3.14. Lançamento próximo a linhas energizadas (paralelismo)

Cuidados especiais devem ser tomados quando o lançamento é efetuado em linhas próximas a outras energizadas, devido ao efeito de indução sobre os cabos.

Os equipamentos terminais, guincho de tração e freio, devem sempre estar solidamente aterrados, o que elimina o problema na maioria dos casos. Porém, em se tratando de *EAT* e *UAT* somente esta medida pode não ser suficiente, sendo necessário então o aterramento das roldanas ao longo do tramo de lançamento por meio de dispositivos especiais.

Todas as ancoragens provisórias de cabos ao solo devem também ser aterradas por precaução.

VI.3.15. Instalação de amortecedores

Eles são posicionados na distância determinada pelo projeto, devem ser centralizados, e o aperto dos parafusos é controlado por torquímetro. São instalados simultaneamente com a operação de grampeamento, por se localizarem próximos às estruturas.

VI.3.16. Instalação de espaçadores

Os espaçadores para condutores em feixe são montados com auxílio de bicicletas especiais colocadas diretamente sobre os cabos. Durante as operações de colocação dos grampos é indispensável aterrar solidamente os condutores, a fim de serem evitadas descargas elétricas sobre os montadores, resultantes de energia estática ou induzida.



VI.3.17. Revisão final da construção

Após a conclusão de todas as operações de montagem da linha é indispensável efetuar a revisão final, descrita nos seguintes trabalhos:

- Verificação da faixa e limpeza adicional nos lugares onde a vegetação cresce, especialmente eucaliptos, efetuando-se a derrubada de árvores fora da faixa que, na queda, poderiam atingir os condutores;
- Correção das estradas de acesso permanente, verificação de obras de arte, pontes e principalmente bueiros, que poderiam ser entupidos durante as obras, muros de arrimo etc;
- Aterramentos de estruturas e suas ligações ao suporte, e de cercas, porteiras, etc;
- Complemento de terra eventualmente faltante nas fundações, principalmente nas grelhas metálicas, limpeza e revisão das plataformas;
- Desmontagem de estruturas auxiliares utilizadas nas travessias e outros locais;
- Reaperto ou verificação de parafusos soltos nas estruturas;
- Verificação de peças estruturais faltantes ou de montagem deficiente;
- Fixação de placas de perigo e sinalização das estruturas;
- Verificação de flechas e alturas livres do solo, principalmente em lugares críticos;
- Remoção de detritos sobre os condutores presos nos cabos durante o lançamento;
- Exame visual, através de binóculo, de cadeias e principalmente de isoladores quebrados na montagem ou por vandalismo;
- Verificação do posicionamento dos amortecedores e espaçadores;
- Montagem de elementos de sinalização aeronáutica como: esferas de sinalização, lâmpadas de indicação, etc., além de eventual pintura das estruturas.

Concluída a etapa da revisão final, a linha estará liberada para entrega à empresa responsável pela futura operação.



VII. COMENTÁRIO SOBRE O PROJETO ELETROMECAÂNICO

Como comentário referente ao projeto eletromecânico é interessante analisar a metodologia de cálculo da NBR 5422-[05], comparando os critérios do cálculo das faixas e distâncias de segurança.

A *tabela VII.1*, apresentada a seguir, é comparativa para a utilização de parâmetros eletromecânicos nos projetos de linhas de transmissão e proporciona uma visão abrangente de alguns pontos que poderiam ser mais discutidos pelos projetistas e pelas concessionárias.

Tabela VII.1. Parâmetros eletromecânicos para projetos de linhas de transmissão – ref.[20]

Descrição	Faixa de Segurança	Distância de Segurança
Cálculo de Ação do vento	Metodologia proposta pela NBR 5422-[05] em processo de revisão	Metodologia proposta pela NBR 5422-[05] em processo de revisão
Escolha do Período de retorno do vento (T)	Mínimo de 10 anos	Mínimo de 50 anos
Ângulo de Balanço (β), da Cadeia de Isoladores	Balanços iguais para a cadeia e os condutores	Somente o balanço da cadeia de isoladores
Redutor de cargas de vento (K)	Aplicado	Aplicado
Fator de efetividade “ α ” aplicado no cálculo da ação de vento sobre cabos	Não é utilizado	Não é utilizado
Vão de cálculo	Induz-se que há um para toda a Linha	Cálculo para cada vão
Localização da linha – Natureza do obstáculo	Não há distinção ou há um predominante.	Distâncias diferenciadas para cada tipo.

Um fator que apresenta forte influência no valor dos esforços devido à ação do vento, responsável pelo balanço dos cabos condutores, é a escolha do período de retorno da velocidade de vento. Seu valor representa o inverso da probabilidade de ocorrência do evento no período de um ano, também expresso como risco de falha ($r_f \cong 1/T$), ou seja, o risco anual de ser ultrapassado o valor do balanço calculado. Neste ponto surge uma divergência importante com relação às orientações da NBR 5422-[05], no que se refere às distâncias e faixas de segurança, como mostrado pela *tabela VII.1*.



Para faixa de segurança, a recomendação da NBR 5422-[05] é um valor mínimo de 10 anos para o período de retorno, enquanto para a distância de segurança, o valor mínimo é de 50 anos.

A NBR 5422-[05] especifica para o cálculo da distância de segurança no item 10.3 que a verificação deve ser feita “nas condições mais desfavoráveis de aproximação do condutor ao obstáculo considerado”.

No item 10.1.4.3 da NBR 5422-[05] é abordado somente o cálculo do balanço da cadeia de isoladores, onde sobre o valor calculado há um redutor das cargas de vento nas cadeias de isoladores, o parâmetro “K”.

A aplicação desse parâmetro no cálculo do balanço da cadeia só é aceitável quando possui fins de verificação da aproximação de partes sob tensão à massa do suporte pela ótica do risco econômico, onde um desligamento apenas prejudica o desempenho da linha de transmissão, sem significar risco a terceiros.

A orientação da seção 12.2 da NBR 5422-[05] para o cálculo da faixa de segurança menciona que o cálculo do balanço da cadeia de isoladores e do condutor deve utilizar o mesmo valor de β .

Ao indicar o item 10.1.4.3 da mesma norma, para a base dos cálculos, está se admitindo a aplicação do parâmetro “K” sobre ambos. Nesse caso, ao ser empregado o termo “segurança”, entende-se um envolvimento de risco de vida e, portanto, não poderia ser considerada a aplicação de um fator de redução. Este é um ponto importante que poderia ser mais discutido por projetistas e concessionárias.

Também é necessária a definição do vão onde deve ser feita a verificação da distância de segurança. Pelo item 10.1.4. da NBR 5422-[05] induz-se que o seu cálculo deva ser realizado para cada vão da linha de transmissão e até para pontos específicos no vão.

No caso do cálculo da faixa de segurança, não há menção a qualquer forma de estabelecimento do vão de cálculo. Pelo contrário, há uma sugestão implícita de aplicação do cálculo em apenas um vão, que passa a ser estendido a toda a linha de transmissão, quando coloca, no singular, a expressão: “a largura da faixa”. Em regra, no Brasil, todas as concessionárias trabalham com largura única de faixa para cada linha de transmissão ou até para cada classe de tensão, em função do seu padrão de estruturas.

Algumas sugestões podem ser dadas para equalização dessas divergências:

Criar expressões distintas para o cálculo do balanço da cadeia de isoladores e para o cálculo do balanço do cabo condutor ou de ambos, em caso de serem considerados iguais. A solução, para este ponto seria a adoção de dois modelos de cálculo, sendo um para o balanço da



cadeia de isoladores e o outro para o balanço dos cabos ou de ambos, aos quais sejam referidas todas as seções da norma que necessitem desse cálculo.

A formulação proposta com o uso do parâmetro “ K ” não emprega o fator de efetividade “ α ”, nem considera coeficientes de arrasto diferentes para cadeia de isoladores e cabos condutores. O uso do fator “ K ”, na redução do balanço da cadeia de isoladores e do cabo, poderia ser reavaliado. O fator de efetividade “ α ”, empregado no cálculo da ação do vento nos cabos segundo a NBR 5422-[05], representado na *figura A16 do apêndice A*, é um redutor da ação do vento sobre os cabos em função do aumento dos vãos, com valores diferentes para cada categoria de rugosidade do terreno. Ao ser aplicado unicamente o fator “ K ”, o redutor “ α ” é desprezado e passa-se a tratar vãos de 200 m da mesma forma que vãos de 800 m, quanto à efetividade da ação do vento sobre eles. Se o uso do fator de efetividade “ α ” é adequado para o cálculo da ação do vento nos cabos (*seção 8.2.2 da NBR 5422-[05]*), quando se trata de cálculo de esforços mecânicos, não há explicação convincente para o abandono do seu uso, quando se passa a calcular o ângulo de balanço dos cabos.

A largura da faixa é calculada para apenas um vão da linha, a ser escolhido pelo projetista, enquanto a distância de segurança seria calculada para um vão, ou local específico.

Outro componente de um projeto de linhas de transmissão que deve ser observado pelos projetistas e concessionárias, é o envio da documentação sobre os parâmetros da linha à Aneel. Esse procedimento engloba o preenchimento de uma série de relatórios, sendo um deles a determinação do número de desligamentos por ano.

Este trabalho não aborda esse tópico de maneira específica, porém, deixa, como registro ilustrativo, o gráfico de curvas isocerânicas para o Estado de São Paulo, mostrado na *figura A10 do apêndice A*. Esse tipo de gráfico é utilizado no cálculo do número de desligamentos/ano, dado que faz parte da documentação enviada à Aneel, além de ser utilizado pelas áreas de operação de linhas de transmissão dessas concessionárias.

Concluída a avaliação e apresentação do “*Projeto Eletromecânico*”, pode-se partir para o desenvolvimento das formulações das grandezas elétricas e de seus parâmetros equivalentes, representativos das linhas de transmissão, conforme já mencionado no *capítulo III, item III.4, “Estudos Elétricos”*.



VIII. INDUTÂNCIA DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

As linhas de transmissão possuem quatro parâmetros que definem seu comportamento como parte de um sistema elétrico, sendo eles a resistência, a indutância, a capacitância e a condutância.

A indutância é uma das propriedades dos circuitos elétricos que relaciona a tensão induzida pela variação do fluxo elétrico com a taxa de variação da corrente elétrica. O fluxo concatenado será diretamente proporcional à corrente e, por consequência, a tensão induzida será proporcional à taxa de variação da corrente, considerando que o meio onde se estabelece o campo magnético tenha permeabilidade constante.

Para linhas de transmissão pode-se propor um conceito específico de indutância, como sendo: a medida da queda de tensão reativa, ao longo da linha, sendo definida como a queda de tensão pela taxa de variação da corrente elétrica [13], [15], [22] e [28].

Para a formação dos elementos da matriz de indutância de uma linha de transmissão, considerando o solo ideal, têm-se:

$$l_{ii} = 2.10^{-4} \ln(2h_i / \text{rmg}_i)(H / \text{km}) \quad (\text{VIII.1})$$

$$l_{ij} = 2.10^{-4} \ln(D_{ij} / \text{rmg}_i)(H / \text{km}) \quad (\text{VIII.2})$$

Onde:

h_i : altura do condutor com relação ao solo, em metros

d_{ij} : distância de condutor a condutor, em metros

D_{ij} : distância de condutor à imagens dos condutores vizinhos, em metros

rmg_i : raio médio geométrico do condutor "i", em metros

VIII.1. Linha trifásica de circuito simples sem cabo pára-raios

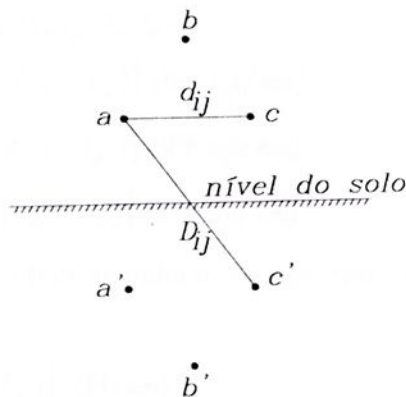


figura VIII.1. Disposição dos condutores e indicações das distâncias para circuito simples sem cabo pára-raios

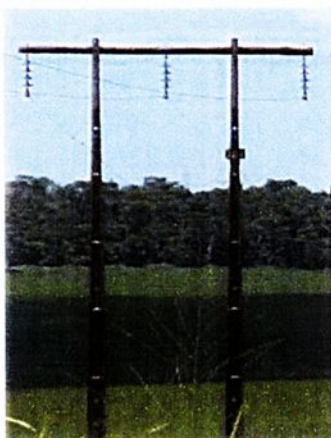


figura VIII.2. Estrutura de 69 kV, para circuito simples, com disposição horizontal dos condutores, sem cabos pára-raios

As geometrias para estruturas de linha de transmissão trifásicas, com disposição para circuito simples, sem cabos pára-raios, são apresentadas nas *figuras C-01 e C-02* do *apêndice C*.

A equação de fluxo magnético do sistema para uma linha de transmissão trifásica, sem a presença de cabos pára-raios será:

$$\begin{bmatrix} \phi_a \\ \phi_b \\ \phi_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_{aa} & l_{ab} & l_{ac} \\ l_{ba} & l_{bb} & l_{bc} \\ l_{ca} & l_{cb} & l_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (Wb \text{ esp}/km) \quad (\text{VIII.3})$$

A representação matricial para a queda de tensão em trecho considerado de comprimento unitário será:

$$\begin{bmatrix} \Delta U_a \\ \Delta U_b \\ \Delta U_c \end{bmatrix} = j\omega \begin{bmatrix} l_{aa} & l_{ab} & l_{ac} \\ l_{ba} & l_{bb} & l_{bc} \\ l_{ca} & l_{cb} & l_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (V/km) \quad (\text{VIII.4})$$

Adotando a hipótese de sistema equilibrado, tem-se:

$I_a + I_b + I_c = 0$ e para fluxo máximo em "a" tem-se $I_a = I_{max}$ e $I_b = I_c = -1/2 I_{max}$

Por simetria, tem-se: $l_{ab} = l_{ba}$, $l_{ac} = l_{ca}$, $l_{cb} = l_{bc}$

$$\phi_a = I_a \max[l_{aa} - (1/2)(l_{ab} + l_{ac})] \quad (Wb \text{ esp}/km) \quad (\text{VIII.5})$$

$$\phi_b = I_b \max[l_{bb} - (1/2)(l_{ab} + l_{bc})] \quad (Wb \text{ esp}/km) \quad (\text{VIII.6})$$

$$\phi_c = I_c \max[l_{cc} - (1/2)(l_{ac} + l_{bc})] \quad (Wb \text{ esp}/km) \quad (\text{VIII.7})$$

Desta forma pode-se definir as indutâncias aparentes das fases da linha de transmissão, como sendo:

$$L_a = [l_{aa} - (1/2)(l_{ab} + l_{ac})] \quad (H/km) \quad (\text{VIII.8})$$

$$L_b = [l_{bb} - (1/2)(l_{ab} + l_{bc})] \quad (H/km) \quad (\text{VIII.9})$$



$$L_c = [l_{cc} - (1/2)(l_{ac} + l_{bc})] \quad (H/km) \quad (\text{VIII.10})$$

A queda de tensão em trecho considerado de comprimento unitário é dada por:

$$\Delta U_a = jI_a \omega L_a \quad (V) \quad (\text{VIII.11})$$

$$\Delta U_b = jI_b \omega L_b \quad (V) \quad (\text{VIII.12})$$

$$\Delta U_c = jI_c \omega L_c \quad (V) \quad (\text{VIII.13})$$

Para que, $L_a = L_b = L_c$, deve-se ter:

$$l_{aa} = l_{bb} = l_{cc}$$

$$l_{ab} = l_{ac} = l_{bc}$$

logo:

$$L_a = L_b = L_c = l_{aa} - l_{ab} \quad (\text{VIII.14})$$

A indutância de seqüência positiva (L_s) é obtida por:

$$L_s = (L_a + L_b + L_c)/3 \quad (\text{VIII.15})$$

Em um sistema equilibrado, verifica-se que ocorre a igualdade: $L_s = L_u$.

Condições para a indutância própria dos cabos serem iguais:

- Raios médios geométricos (rmg) dos condutores iguais
- Alturas " h_i " iguais para as três fases
- Condição para as indutâncias mútuas dos condutores serem iguais:
- Igualdade entre os coeficientes D_{ij}
- Igualdade entre os coeficientes d_{ij}

As configurações de fases, aliadas à condição de solo real e não ideal mostram que sempre

haverá um certo grau de desequilíbrio nas linhas de transmissão.

Sendo:

$$hmg = \sqrt[3]{h_a h_b h_c} \quad (\text{VIII.16})$$

onde:

hmg : altura média geométrica dos condutores ao solo.

DMG : distância média geométrica condutor-imagens.

dmg : distância média geométrica condutor-condutor.

$$DMG = \sqrt[3]{D_{ab} D_{bc} D_{ac}} \quad (\text{VIII.17})$$

$$dmg = \sqrt[3]{d_{ab} d_{bc} d_{ac}} \quad (\text{VIII.18})$$

rmg : raio médio geométrico do condutor

$$\omega = 2\pi f \text{ sendo } f \text{ a frequência Industrial} \quad (\text{VIII.19})$$

resulta:



$$X_{LS} = \omega(l_{aa} - l_{ab}) \text{ ohms/km} \quad (\text{VIII.20})$$

$$X_{LS} = 2 \cdot 10^{-4} \omega [\ln(2hmg / rmg) - \ln(DMG / dm g)]$$

$$X_{LS} = 2 \cdot 10^{-4} \omega [\ln(dmg / rmg) + \ln(2hm / DMG)] \quad (\text{VIII.21})$$

Como $DMG \cong 2hm$, tem-se:

$$X_{LS} = 2 \cdot 10^{-4} \omega [\ln(dmg / rmg)] \quad (\Omega / km)$$

$$X_{LS} = 4\pi 10^{-4} f [\ln(dmg / rmg)] \quad (\Omega / km) \quad (\text{VIII.22})$$

VIII.2. Linha trifásica de circuito simples com um cabo pára-raios

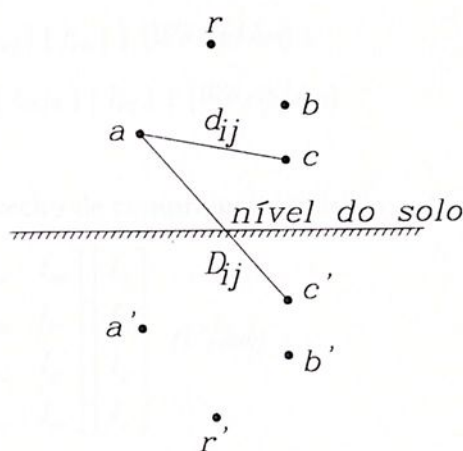


figura VIII.3. Disposição dos condutores e indicações das distâncias para circuito simples com um cabo pára-raios

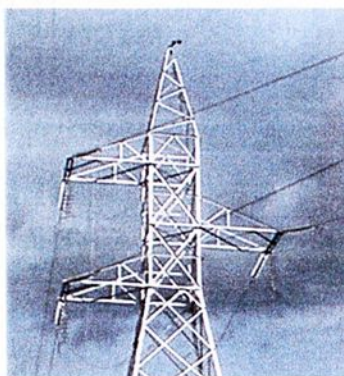


figura VIII.4. Estrutura de 138 kV, para circuito simples, com disposição triangular dos condutores e um cabo pára-raios

As geometrias para estruturas de linha de transmissão, trifásicas, com disposição para circuito simples, com um cabo pára-raios, são apresentadas nas figuras C-03 a C-18 do apêndice C.

De forma análoga às linhas trifásicas para circuito simples sem cabos pára-raios, vamos apresentar as equações para o sistema trifásico com um cabo pára-raios.

Nessas condições, o fluxo concatenado com cada condutor presente é dado por:

$$\begin{bmatrix} \phi_a \\ \phi_b \\ \phi_c \\ \phi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_{aa} & l_{ab} & l_{ac} & l_{ar} \\ l_{ba} & l_{bb} & l_{bc} & l_{br} \\ l_{ca} & l_{cb} & l_{cc} & l_{cr} \\ l_{ra} & l_{rb} & l_{rc} & l_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_r \end{bmatrix} \quad (Wb \text{ esp}/km) \quad (\text{VIII.23})$$

Os elementos da matriz da equação (VIII.23) são dados pelas expressões (VIII.1) e (VIII.2).

Adotando-se a notação compacta para a equação (VIII.23) tem-se, para a equação do fluxo magnético do circuito:

$$\begin{bmatrix} [\phi_I] \\ [\phi_{PR}] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [l_{I,I}] & [l_{PR,I}] \\ [l_{I,PR}] & [l_{PR,PR}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I_I] \\ [I_{PR}] \end{bmatrix} \quad (Wb \text{ esp}/km) \quad (\text{VIII.24})$$

$$[\phi_I] = \{ [l_{I,I}] [I_I] + [l_{PR,I}] [I_{PR}] \} \quad (Wb \text{ esp}/km) \quad (\text{VIII.25})$$

$$[\phi_{PR}] = \{ [l_{I,PR}] [I_I] + [l_{PR,PR}] [I_{PR}] \} \quad (Wb \text{ esp}/km) \quad (\text{VIII.26})$$

A queda de tensão em trecho de comprimento unitário, vale:

$$\begin{bmatrix} \Delta U_a \\ \Delta U_b \\ \Delta U_c \\ \Delta U_r \end{bmatrix} = j\omega \begin{bmatrix} l_{aa} & l_{ab} & l_{ac} & l_{ar} \\ l_{ba} & l_{bb} & l_{bc} & l_{br} \\ l_{ca} & l_{cb} & l_{cc} & l_{cr} \\ l_{ra} & l_{rb} & l_{rc} & l_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_r \end{bmatrix} \quad (V/km) \quad (\text{VIII.27})$$

A forma geral para a queda de tensão como matriz particionada para “x” fases e “y” cabos pára-raios será:

$$\begin{bmatrix} [\Delta U_x] \\ [\Delta U_y] \end{bmatrix} = j\omega \begin{bmatrix} [l_{xx}] & [l_{xy}] \\ [l_{yx}] & [l_{yy}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I_x] \\ [I_y] \end{bmatrix} \quad (V/km) \quad (\text{VIII.28})$$

Considerando o sistema multi-aterrado, tem-se:

$$\begin{bmatrix} [\Delta U_x] \\ [0] \end{bmatrix} = j\omega \begin{bmatrix} [l_{xx}] & [l_{xy}] \\ [l_{yx}] & [l_{yy}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I_x] \\ [I_y] \end{bmatrix} \quad (V/km) \quad (\text{VIII.29})$$

Resulta:

$$[\Delta U_x] = j2\pi f \{ [l_{xx}] [I_x] + [l_{xy}] [I_y] \} \quad (V/km) \quad (\text{VIII.30})$$

$$[0] = j2\pi f \{ [l_{yx}] [I_x] + [l_{yy}] [I_y] \} \quad (V/km) \quad (\text{VIII.31})$$

A corrente no cabo pára-raios será:

$$[I_y] = -[l_{yy}]^{-1} [l_{yx}] [I_x] \quad (A) \quad (\text{VIII.32})$$

Levando-se a expressão (VIII.32) na equação (VIII.30), tem-se a equação (VIII.33), representativa de uma linha sem cabos pára-raios.

$$[\Delta U_x] = j2\pi f \{ [l_{xx}] - [l_{xy}][l_{yy}]^{-1}[l_{yx}] \} [I_x] \quad (V/km) \quad (\text{VIII.33})$$

$$\text{Chamando } [\Delta X_L] = j\omega [l_{xy}][l_{yy}]^{-1}[l_{yx}]$$

$$\text{Como: } l_{ab}=l_{ba}, \quad l_{ac}=l_{ca}, \quad l_{cb}=l_{bc}, \quad l_{ar}=l_{ra}, \quad l_{br}=l_{rb}, \quad l_{cr}=l_{rc}$$

$$[\Delta X_L] = j\omega \begin{bmatrix} l_{ar} \\ l_{br} \\ l_{cr} \end{bmatrix} \left[1/l_{rr} \right] \begin{bmatrix} l_{ar} & l_{br} & l_{cr} \end{bmatrix} \quad (\Omega/km) \quad (\text{VIII.34})$$

Logo:

$$\begin{bmatrix} \Delta U_a \\ \Delta U_b \\ \Delta U_c \end{bmatrix} = j\omega \begin{bmatrix} l_{aa} - l_{ap}^2/l_{pp} & l_{ba} - l_{bp}l_{ap}/l_{pp} & l_{ca} - l_{cp}l_{ap}/l_{pp} \\ l_{ab} - l_{ap}l_{bp}/l_{pp} & l_{bb} - l_{bp}^2/l_{pp} & l_{cb} - l_{cp}l_{bp}/l_{pp} \\ l_{ac} - l_{ap}l_{cp}/l_{pp} & l_{bc} - l_{bp}l_{cp}/l_{pp} & l_{cc} - l_{cp}^2/l_{pp} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (V/km) \quad (\text{VIII.35})$$

$$[X_{LS}] = \omega [L'_{ij}] \text{ onde:}$$

$$[L'_{ij}] = \begin{bmatrix} l'_{aa} & l'_{ab} & l'_{ac} \\ l'_{ba} & l'_{bb} & l'_{bc} \\ l'_{ca} & l'_{cb} & l'_{cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_{aa} - l_{ar}^2/l_{rr} & l_{ba} - l_{br}l_{ar}/l_{rr} & l_{ca} - l_{cr}l_{ar}/l_{rr} \\ l_{ab} - l_{ar}l_{br}/l_{rr} & l_{bb} - l_{br}^2/l_{rr} & l_{cb} - l_{cr}l_{br}/l_{rr} \\ l_{ac} - l_{ar}l_{cr}/l_{rr} & l_{bc} - l_{br}l_{cr}/l_{rr} & l_{cc} - l_{cr}^2/l_{rr} \end{bmatrix}$$

Equação do fluxo magnético para uma linha equivalente, sem a presença de cabos pára-raios, resulta:

$$\begin{bmatrix} \phi_a \\ \phi_b \\ \phi_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l'_{aa} & l'_{ab} & l'_{ac} \\ l'_{ba} & l'_{bb} & l'_{bc} \\ l'_{ca} & l'_{cb} & l'_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (Wb \text{ esp}/km) \quad (\text{VIII.36})$$

Considerando $i_a + i_b + i_c = 0$, tem-se:

$$L'_a = l'_{aa} - (1/2)[l'_{ab} + l'_{ac}] \quad (H/km) \quad (\text{VIII.37})$$

$$L'_b = l'_{bb} - (1/2)[l'_{ab} + l'_{bc}] \quad (H/km) \quad (\text{VIII.38})$$

$$L'_c = l'_{cc} - (1/2)[l'_{ac} + l'_{bc}] \quad (H/km) \quad (\text{VIII.39})$$

Considerando a transposição de linha:

$$l_{ar} = l_{br} = l_{cr} \quad (H/km)$$

Tem-se para o sistema trifásico equilibrado: $I_a = I_{max}$ e $I_b = I_c = -1/2 I_{max}$

Assim, a reatância de sequência positiva é dada por (VIII.20):

$$X_{LS} = \omega[(l_{aa} - l_{ar}^2/l_{rr}) - (l_{ab} - l_{ar}^2/l_{rr})] \quad (\Omega/km)$$

$$X_{LS} = \omega[l_{aa} - l_{ab}] \quad (\Omega/km)$$

A expressão para X_{LS} (reatância indutiva de sequência positiva) mostra que o cabo pára-raios não afeta a reatância indutiva de sequência positiva.

O equacionamento obtido é semelhante ao caso da linha trifásica, sem cabo pára-raios.

Por analogia, pode-se concluir que a expressão da reatância indutiva pode ser representada pela equação (VIII.22):

$$X_{LS} = 2 \cdot 10^{-4} \omega [Ln(dmg/rmg)] \quad (\Omega/km)$$

$$X_{LS} = 4\pi 10^{-4} f [Ln(dmg/rmg)] \quad (\Omega/km)$$

VIII.3. Linha trifásica de circuito simples com dois cabos pára-raios

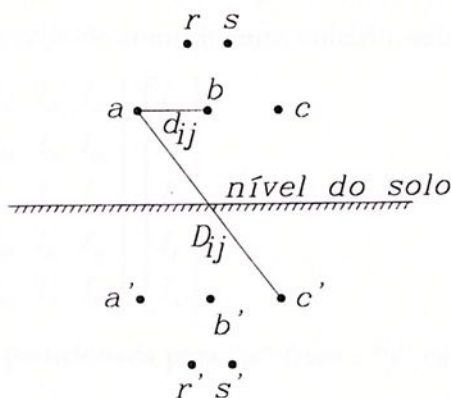


figura VIII.5. Disposição dos condutores e indicações das distâncias para circuito simples com dois cabos pára-raios

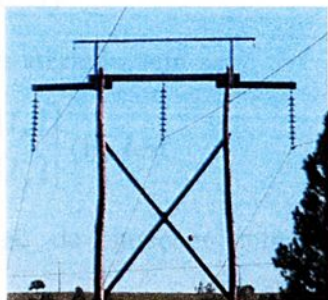


figura VIII.6. Estrutura de 138 kV, para circuito simples, com disposição horizontal dos condutores e dois cabos pára-raios

A geometria para estrutura de linhas de transmissão trifásicas, com disposição para circuito simples e com dois cabos pára-raios, é apresentada nas figuras C19 e C20 do apêndice C

Para esta situação pode-se escrever:

$$\begin{bmatrix} \phi_a \\ \phi_b \\ \phi_c \\ \phi_r \\ \phi_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_{aa} & l_{ab} & l_{ac} & l_{ar} & l_{as} \\ l_{ba} & l_{bb} & l_{bc} & l_{br} & l_{bs} \\ l_{ca} & l_{cb} & l_{cc} & l_{cr} & l_{cs} \\ l_{ra} & l_{rb} & l_{rc} & l_{rr} & l_{rs} \\ l_{sa} & l_{sb} & l_{sc} & l_{sr} & l_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_r \\ I_s \end{bmatrix} \quad (Wb \text{ esp}/km) \quad (VIII.40)$$

Os elementos da matriz da equação (VIII.40) são dados pelas expressões (VIII.1) e (VIII.2).

Adotando-se a notação compacta para a equação (VIII.40), tem-se, para a equação do fluxo magnético do circuito:

$$\begin{bmatrix} [\phi_I] \\ [\phi_{PR}] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [l_{I,I}] & [l_{PR,I}] \\ [l_{I,PR}] & [l_{PR,PR}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I_I] \\ [I_{PR}] \end{bmatrix} \quad (Wb \text{ esp}/km)$$

Desmembrando a equação acima, obtém-se semelhantes a (VIII.25) e (VIII.26):

$$[\phi_I] = \{ [l_{I,I}] [I_I] + [l_{PR,I}] [I_{PR}] \} \quad (Wb \text{ esp}/km)$$

$$[\phi_{PR}] = \{ [l_{I,PR}] [I_I] + [l_{PR,PR}] [I_{PR}] \} \quad (Wb \text{ esp}/km)$$

A queda de tensão em trecho de comprimento unitário, vale:

$$\begin{bmatrix} \Delta U_a \\ \Delta U_b \\ \Delta U_c \\ \Delta U_r \\ \Delta U_s \end{bmatrix} = j\omega \begin{bmatrix} l_{aa} & l_{ab} & l_{ac} & l_{ar} & l_{as} \\ l_{ba} & l_{bb} & l_{bc} & l_{br} & l_{bs} \\ l_{ca} & l_{cb} & l_{cc} & l_{cr} & l_{cs} \\ l_{ra} & l_{rb} & l_{rc} & l_{rr} & l_{rs} \\ l_{sa} & l_{sb} & l_{sc} & l_{sr} & l_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_r \\ I_s \end{bmatrix} \quad (V/km) \quad \text{(VIII.41)}$$

Considerando a matriz particionada para “x” fases e “y” cabos pára-raios, definida como segue:

$$\begin{bmatrix} [\Delta U_x] \\ [\Delta U_y] \end{bmatrix} = j\omega \begin{bmatrix} [l_{xx}] & [l_{xy}] \\ [l_{yx}] & [l_{yy}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I_x] \\ [I_y] \end{bmatrix} \quad (V/km)$$

Considerando o sistema multi-aterrado, tem-se:

$$\begin{bmatrix} [\Delta U_x] \\ [0] \end{bmatrix} = j\omega \begin{bmatrix} [l_{xx}] & [l_{xy}] \\ [l_{yx}] & [l_{yy}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I_x] \\ [I_y] \end{bmatrix} \quad (V/km)$$

Como procedimento análogo de situações anteriores, obtém-se a mesma equação representada em (VIII.33):

$$[\Delta U_x] = j2\pi f \{ [l_{xx}] - [l_{xy}][l_{yy}]^{-1}[l_{yx}] \} [I_x] \quad (V/km)$$

Para o desenvolvimento desta equação foi considerado:

$$[\Delta XL] = j\omega [l_{xy}][l_{yy}]^{-1}[l_{yx}]$$

Sendo a equação representada por:

$$[\Delta U_x] = j2\pi f / (l_{pp}l_{qq} - l_{pq}^2) \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (V/km) \quad \text{(VIII.42)}$$

onde:

$$[L_I] - 1/(l_{rr}l_{ss} - l_{rs}^2) \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} = [l_{xx}] - [l_{xy}][l_{yy}]^{-1}[l_{yx}] \quad \text{(VIII.43)}$$

Sendo:

$[L_l]$ = matriz de indutâncias do circuito I.

$[X_{LS}] = \omega [L'_{ij}]$ onde:

$$[L'_{ij}] = [l_{xx}] - [l_{xy}][l_{yy}]^{-1}[l_{yx}] \quad (\text{VIII.44})$$

e

$$[A] = [l_{xy}][l_{yy}]^{-1}[l_{yx}] \det[l_{yy}]^{-1}$$

Onde $[A]$ é uma matriz auxiliar para representação do desenvolvimento da equação, indicada por:

$$[A] = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}$$

Pode-se representar a matriz $[L'_{ij}]$ como sendo:

$$[L'_{ij}] = 1/(l_{rr}l_{ss} - l_{rs}^2) \begin{bmatrix} L_1C_1 & L_1C_2 & L_1C_3 \\ L_2C_1 & L_2C_2 & L_2C_3 \\ L_3C_1 & L_3C_2 & L_3C_3 \end{bmatrix} \quad (\text{VIII.45})$$

onde:

L_iC_j : representam os termos da linha "i" e coluna "j"

Considerações adotadas para este equacionamento em função da simetria das silhuetas de estruturas empregadas comercialmente, nas linhas de transmissão:

$$l_{ab} = l_{ba}, l_{ac} = l_{ca}, l_{bc} = l_{cb}, l_{rs} = l_{sr}, l_{ar} = l_{ra}, l_{br} = l_{rb}, l_{cr} = l_{rc}, l_{as} = l_{sa}, l_{bs} = l_{sb}, l_{cs} = l_{sc}$$

$$L_1C_1 = l_{aa}(l_{rr}l_{ss} - l_{rs}^2) - l_{ar}^2l_{ss} - l_{as}^2l_{rr} + 2l_{rs}l_{ar}l_{as} \quad (\text{VIII.46})$$

$$L_2C_1 = l_{ab}(l_{rr}l_{ss} - l_{rs}^2) - l_{ar}l_{br}l_{ss} - l_{as}l_{bs}l_{rr} + l_{rs}(l_{ar}l_{bs} + l_{as}l_{br}) \quad (\text{VIII.47})$$

$$L_3C_1 = l_{ac}(l_{rr}l_{ss} - l_{rs}^2) - l_{ar}l_{cr}l_{ss} - l_{as}l_{cs}l_{rr} + l_{rs}(l_{ar}l_{cs} + l_{as}l_{cr}) \quad (\text{VIII.48})$$

$$L_1C_2 = l_{ab}(l_{rr}l_{ss} - l_{rs}^2) - l_{br}l_{ar}l_{ss} - l_{bs}l_{as}l_{rr} + l_{rs}(l_{br}l_{as} + l_{bs}l_{ar}) \quad (\text{VIII.49})$$

$$L_2C_2 = l_{bb}(l_{rr}l_{ss} - l_{rs}^2) - l_{br}^2l_{ss} - l_{bs}^2l_{rr} + 2l_{rs}l_{br}l_{bs} \quad (\text{VIII.50})$$

$$L_3C_2 = l_{bc}(l_{rr}l_{ss} - l_{rs}^2) - l_{br}l_{cr}l_{ss} - l_{bs}l_{cs}l_{rr} + l_{rs}(l_{br}l_{cs} + l_{bs}l_{cr}) \quad (\text{VIII.51})$$

$$L_1C_3 = l_{ac}(l_{rr}l_{ss} - l_{rs}^2) - l_{cr}l_{ar}l_{ss} - l_{cs}l_{as}l_{rr} + l_{rs}(l_{cr}l_{as} + l_{cs}l_{ar}) \quad (\text{VIII.52})$$

$$L_2C_3 = l_{bc}(l_{rr}l_{ss} - l_{rs}^2) - l_{cr}l_{br}l_{ss} - l_{cs}l_{bs}l_{rr} + l_{rs}(l_{cr}l_{bs} + l_{cs}l_{br}) \quad (\text{VIII.53})$$

$$L_3C_3 = l_{cc}(l_{rr}l_{ss} - l_{rs}^2) - l_{cr}^2l_{ss} - l_{cs}^2l_{rr} + 2l_{rs}l_{cr}l_{cs} \quad (\text{VIII.54})$$

As equações (VIII.36) a (VIII.39) definem o fluxo magnético para uma linha equivalente de circuito único, sem a presença de cabos pára-raios, para determinação de indutância e reatância indutiva de sequência positiva.

$$\begin{bmatrix} \phi_a \\ \phi_b \\ \phi_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l'_{aa} & l'_{ab} & l'_{ac} \\ l'_{ba} & l'_{bb} & l'_{bc} \\ l'_{ca} & l'_{cb} & l'_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (Wb \text{ esp} / km)$$

Considerando $i_a + i_b + i_c = 0$, obtém-se as mesmas equações (VIII.37) a (VIII.39):

$$L'_a = l'_{aa} - (1/2)[l'_{ab} + l'_{ac}] \quad (H/km)$$

$$L'_b = l'_{bb} - (1/2)[l'_{ab} + l'_{bc}] \quad (H/km)$$

$$L'_c = l'_{cc} - (1/2)[l'_{ac} + l'_{bc}] \quad (H/km)$$

Considerando a transposição de linha:

$$l_{ar} = l_{br} = l_{cr} \quad (H/km)$$

Tem-se para o sistema trifásico equilibrado: $I_a = I_{max}$ e $I_b = I_c = -1/2 I_{max}$

Assim, a reatância de sequência positiva é dada por (VIII.20):

$$X_{LS} = \omega[(l_{aa} - l_{ap}^2 / l_{pp}) - (l_{ab} - l_{ap}^2 / l_{pp})] \quad (\Omega/km)$$

$$X_{LS} = \omega[l_{aa} - l_{ab}] \quad (\Omega/km)$$

A expressão para X_{LS} (reatância indutiva de sequência positiva) indica que em linhas transpostas o cabo pára-raios não exerce influência sobre este parâmetro.

O equacionamento obtido é semelhante ao caso da linha trifásica, sem cabo pára-raios.

Por analogia, pode-se concluir que a expressão da reatância indutiva pode ser representada pela equação (VIII.22):

$$X_{LS} = 2.10^{-4} \omega [Ln(dmg / rmg)] \quad (\Omega/km)$$

$$X_{LS} = 4\pi 10^{-4} f [Ln(dmg / rmg)] \quad (\Omega/km)$$



VIII.4. Linha trifásica de circuito duplo com um cabo pára-raios

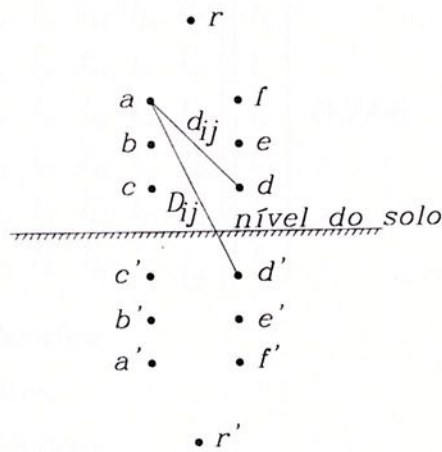


Figura VIII.7. Disposição dos condutores e indicações das distâncias para circuito duplo com um cabo pára-raios

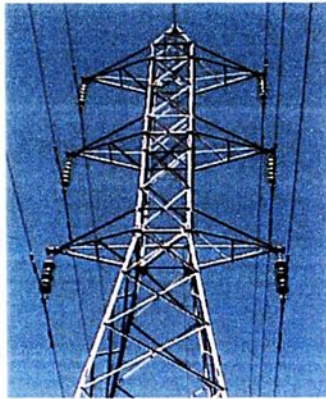


figura VIII.8. Estrutura de 138 kV, para circuito duplo paralelo, com disposição vertical dos condutores e um cabo pára-raios

As geometrias para estruturas de linha de transmissão, trifásicas, com disposição para circuito duplo, com um cabo pára-raios, são apresentadas nas figuras C-21 a C-30 do apêndice C.

Para esta condição, pode-se escrever:

$$\begin{bmatrix} \phi_a \\ \phi_b \\ \phi_c \\ \phi_r \\ \phi_d \\ \phi_e \\ \phi_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_{aa} & l_{ab} & l_{ac} & l_{ar} & l_{ad} & l_{ae} & l_{af} \\ l_{ba} & l_{bb} & l_{bc} & l_{br} & l_{bd} & l_{be} & l_{bf} \\ l_{ca} & l_{cb} & l_{cc} & l_{cr} & l_{cd} & l_{ce} & l_{cf} \\ l_{ra} & l_{rb} & l_{rc} & l_{rr} & l_{rd} & l_{re} & l_{rf} \\ l_{da} & l_{db} & l_{dc} & l_{dr} & l_{dd} & l_{de} & l_{df} \\ l_{ea} & l_{eb} & l_{ec} & l_{er} & l_{ed} & l_{ee} & l_{ef} \\ l_{fa} & l_{fb} & l_{fc} & l_{fr} & l_{fd} & l_{fe} & l_{ff} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_r \\ I_d \\ I_e \\ I_f \end{bmatrix} \quad (W/b \text{ esp}/km) \quad (VIII.55)$$

A queda de tensão em trecho considerado de comprimento unitário é representada por:

$$\begin{bmatrix} \Delta U_a \\ \Delta U_b \\ \Delta U_c \\ \Delta U_r \\ \Delta U_d \\ \Delta U_e \\ \Delta U_f \end{bmatrix} = j\omega \begin{bmatrix} l_{aa} & l_{ab} & l_{ac} & l_{ar} & l_{ad} & l_{ae} & l_{af} \\ l_{ba} & l_{bb} & l_{bc} & l_{br} & l_{bd} & l_{be} & l_{bf} \\ l_{ca} & l_{cb} & l_{cc} & l_{cr} & l_{cd} & l_{ce} & l_{cf} \\ l_{ra} & l_{rb} & l_{rc} & l_{rr} & l_{rd} & l_{re} & l_{rf} \\ l_{da} & l_{db} & l_{dc} & l_{dr} & l_{dd} & l_{de} & l_{df} \\ l_{ea} & l_{eb} & l_{ec} & l_{er} & l_{ed} & l_{ee} & l_{ef} \\ l_{fa} & l_{fb} & l_{fc} & l_{fr} & l_{fd} & l_{fe} & l_{ff} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_r \\ I_d \\ I_e \\ I_f \end{bmatrix} \quad (V/km) \quad (\text{VIII.56})$$

Com as seguintes considerações:

Circuitos paralelos idênticos.

Sem o emprego de transposição.

Transporte da potência total dividida igualmente entre os circuitos.

Cada condutor transportando metade da corrente de cada fase.

Correntes do circuito I : I_a, I_b, I_c .

Correntes do circuito II : I_d, I_e, I_f .

$I_a = I_d, I_b = I_e$ e $I_c = I_f$.

Corrente do cabo pára-raios : I_r .

Sendo adotada a simbologia: $[I_I] = [I_{II}] = [I]$, onde:

$$[I_I] = \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad [I_{II}] = \begin{bmatrix} I_d \\ I_e \\ I_f \end{bmatrix}$$

Os elementos da matriz da equação (VIII.56) são dados pelas expressões (VIII.1) e (VIII.2).

Adotando-se a notação compacta para a equação (VIII.56) tem-se, para a equação do fluxo magnético do circuito:

$$\begin{bmatrix} [\phi_I] \\ [\phi_{PR}] \\ [\phi_{II}] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [I_I] & [I_{PR,I}] & [I_{II,I}] \\ [I_{I,PR}] & [I_{PR}] & [I_{II,PR}] \\ [I_{I,II}] & [I_{PR,II}] & [I_{II}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I_I] \\ [I_{PR}] \\ [I_{II}] \end{bmatrix} \quad (Wb \text{ esp}/km) \quad (\text{VIII.57})$$

A forma particionada para a equação matricial do fluxo magnético para o circuito I será:

$$\begin{bmatrix} [\phi_I] \\ [\phi_{PR}] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [I_I] & [I_{PR,I}] & [I_{II,I}] \\ [I_{I,PR}] & [I_{PR}] & [I_{II,PR}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I_I] \\ [I_{PR}] \\ [I_{II}] \end{bmatrix} \quad (Wb \text{ esp}/km) \quad (\text{VIII.58})$$

Da mesma forma para o circuito II tem-se:



$$\begin{bmatrix} [\phi_{PR}] \\ [\phi_{II}] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [l_{I.PR}] & [l_{PR}] & [l_{II.PR}] \\ [l_{I.II}] & [l_{PR.II}] & [l_{II}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I_I] \\ [I_{PR}] \\ [I_{II}] \end{bmatrix} \quad (Wb \text{ esp}/km) \quad (\text{VIII.59})$$

Considerando:

$$I_a = I_d, I_b = I_e \text{ e } I_c = I_f$$

Logo, a equação (VIII.58) pode ser desmembrada e posta da seguinte forma:

$$[\phi_I] = \{ [l_I] [I] + [l_{PR.I}] [I_{PR}] + [l_{II.I}] [I] \} \quad (Wb \text{ esp}/km)$$

$$[\phi_{PR}] = \{ [l_{I.PR}] [I] + [l_{PR}] [I_{PR}] + [l_{II.PR}] [I] \} \quad (Wb \text{ esp}/km)$$

$$[\phi_I] = \{ [l_I + l_{II.I}] [I] + [l_{PR.I}] [I_{PR}] \} \quad (Wb \text{ esp}/km) \quad (\text{VIII.60})$$

$$[\phi_{PR}] = \{ [l_{I.PR} + l_{II.PR}] [I] + [l_{PR}] [I_{PR}] \} \quad (Wb \text{ esp}/km) \quad (\text{VIII.61})$$

Reordenando as equações, tem-se:

$$\begin{bmatrix} [\phi_I] \\ [\phi_{PR}] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [l_I + l_{II.I}] & [l_{PR.I}] \\ [l_{I.PR} + l_{II.PR}] & [l_{PR}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I] \\ [I_{PR}] \end{bmatrix} \quad (Wb \text{ esp}/km) \quad (\text{VIII.62})$$

Expandindo a expressão (VIII.62), resulta:

$$\begin{bmatrix} \phi_a \\ \phi_b \\ \phi_c \\ \phi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (l_{aa} + l_{ad}) & (l_{ab} + l_{ae}) & (l_{ac} + l_{af}) & (l_{ar}) \\ (l_{ba} + l_{bd}) & (l_{bb} + l_{be}) & (l_{bc} + l_{bf}) & (l_{br}) \\ (l_{ca} + l_{cd}) & (l_{cb} + l_{ce}) & (l_{cc} + l_{cf}) & (l_{cr}) \\ (l_{ra} + l_{rd}) & (l_{rb} + l_{re}) & (l_{rc} + l_{rf}) & (l_{rr}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_r \end{bmatrix} \quad (Wb \text{ esp}/km) \quad (\text{VIII.63})$$

A queda de tensão em trecho considerado de comprimento unitário será:

$$\begin{bmatrix} \Delta U_a \\ \Delta U_b \\ \Delta U_c \\ \Delta U_p \end{bmatrix} = j\omega \begin{bmatrix} (l_{aa} + l_{ad}) & (l_{ab} + l_{ae}) & (l_{ac} + l_{af}) & (l_{ar}) \\ (l_{ba} + l_{bd}) & (l_{bb} + l_{be}) & (l_{bc} + l_{bf}) & (l_{br}) \\ (l_{ca} + l_{cd}) & (l_{cb} + l_{ce}) & (l_{cc} + l_{cf}) & (l_{cr}) \\ (l_{ra} + l_{rd}) & (l_{rb} + l_{re}) & (l_{rc} + l_{rf}) & (l_{rr}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_r \end{bmatrix} \quad (V/km) \quad (\text{VIII.64})$$

Considerando a matriz particionada para “x” fases e “y” cabos pára-raios definida como segue:

$$\begin{bmatrix} [\Delta U_x] \\ [\Delta U_y] \end{bmatrix} = j\omega \begin{bmatrix} [l_{xx}] & [l_{xy}] \\ [l_{yx}] & [l_{yy}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I_x] \\ [I_y] \end{bmatrix} \quad (V/km)$$

Considerando o sistema multi-aterrado, tem-se:

$$\begin{bmatrix} [\Delta U_x] \\ [0] \end{bmatrix} = j\omega \begin{bmatrix} [l_{xx}] & [l_{xy}] \\ [l_{yx}] & [l_{yy}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I_x] \\ [I_y] \end{bmatrix} \quad (V/km)$$

Como procedimento análogo de situações anteriores, obtém-se a mesma equação representada em (VIII.33):

$$[\Delta U_x] = j2\pi f \{ [l_{xx}] - [l_{xy}][l_{yy}]^{-1}[l_{yx}] \} [I_x] \quad (V/km)$$

$$[\Delta U_x] = j2\pi f \{ [l_{xx}][I_x] + [l_{xy}][I_y] \} \quad (V/km)$$

$$[0] = j2\pi f \{ [l_{yx}][I_x] + [l_{yy}][I_y] \} \quad (V/km)$$

Desta forma, a corrente no cabo pára-raios será:

$$[I_y] = -[l_{yy}]^{-1}[l_{yx}][I_x] \quad (A)$$

Substituindo a equação de correntes na equação da queda de tensão, tem-se a seguinte equação equivalente para uma linha trifásica sem cabos pára-raios:

$$[\Delta U_x] = j2\pi f \{ [l_{xx}] - [l_{xy}][l_{yy}]^{-1}[l_{yx}] \} [I_x] \quad (V/km)$$

$$\text{Chamando } [\Delta X_L] = j\omega[l_{xy}][l_{yy}]^{-1}[l_{yx}]$$

Por simetria, tem-se:

$$l_{ab} = l_{ba}, l_{ac} = l_{ca}, l_{bc} = l_{cb}, l_{ar} = l_{ra}, l_{br} = l_{rb}, l_{cr} = l_{rc}$$

$$l_{dc} = l_{cd}, l_{df} = l_{fd}, l_{ef} = l_{fe}, l_{dr} = l_{rd}, l_{er} = l_{re}, l_{fr} = l_{rf}$$

$$[\Delta X_L] = j\omega \begin{bmatrix} l_{ar} \\ l_{br} \\ l_{cr} \end{bmatrix} [1/l_{rr}] [(l_{ar} + l_{rd})(l_{br} + l_{re})(l_{cr} + l_{rf})] \quad (\Omega/km) \quad (\text{VIII.65})$$

Logo, a queda de tensão, em (V/km) , em trecho de comprimento unitário será:

$$\begin{bmatrix} \Delta U_a \\ \Delta U_b \\ \Delta U_c \end{bmatrix} = j\omega \begin{bmatrix} (l_{ar}^2 + l_{rd}l_{ar})/l_{rr} & (l_{br}l_{ar} + l_{rd}l_{br})/l_{rr} & (l_{cr}l_{ar} + l_{rd}l_{cr})/l_{rr} \\ (l_{br}l_{ar} + l_{re}l_{ar})/l_{rr} & (l_{br}^2 + l_{re}l_{br})/l_{rr} & (l_{cr}l_{br} + l_{re}l_{cr})/l_{rr} \\ (l_{cr}l_{ar} + l_{rf}l_{ar})/l_{rr} & (l_{br}l_{cr} + l_{rf}l_{br})/l_{rr} & (l_{cr}^2 + l_{rf}l_{cr})/l_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (V/km) \quad (\text{VIII.66})$$

O equacionamento da queda de tensão para a linha será:

$$\begin{bmatrix} \Delta U_a \\ \Delta U_b \\ \Delta U_c \end{bmatrix} = j\omega \left\{ \begin{bmatrix} (l_{aa} + l_{ad}) & (l_{ab} + l_{ae}) & (l_{ac} + l_{af}) \\ (l_{ba} + l_{bd}) & (l_{bb} + l_{be}) & (l_{bc} + l_{bf}) \\ (l_{ca} + l_{cd}) & (l_{cb} + l_{ce}) & (l_{cc} + l_{cf}) \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} (l_{ar}^2 + l_{rd}l_{ar})/l_{rr} & (l_{br}l_{ar} + l_{rd}l_{br})/l_{rr} & (l_{cr}l_{ar} + l_{rd}l_{cr})/l_{rr} \\ (l_{br}l_{ar} + l_{re}l_{ar})/l_{rr} & (l_{br}^2 + l_{re}l_{br})/l_{rr} & (l_{cr}l_{br} + l_{re}l_{cr})/l_{rr} \\ (l_{cr}l_{ar} + l_{rf}l_{ar})/l_{rr} & (l_{br}l_{cr} + l_{rf}l_{br})/l_{rr} & (l_{cr}^2 + l_{rf}l_{cr})/l_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (V/km) \quad (\text{VIII.67})$$

Sendo:

$$[X_{LS}] = \omega[L'_{ij}][X_{LS}]$$

Onde:

$$[L'_{jj}] = \begin{bmatrix} (l_{aa} + l_{ad}) - (l_{ar}^2 + l_{rd}l_{ar})/l_{rr} & (l_{ab} + l_{ae}) - (l_{br}l_{ar} + l_{rd}l_{br})/l_{rr} \\ (l_{ba} + l_{bd}) - (l_{br}l_{ar} + l_{re}l_{ar})/l_{rr} & (l_{bb} + l_{be}) - (l_{br}^2 + l_{re}l_{br})/l_{rr} \\ (l_{ca} + l_{cd}) - (l_{cr}l_{ar} + l_{rf}l_{ar})/l_{rr} & (l_{cb} + l_{ce}) - (l_{br}l_{cr} + l_{rf}l_{br})/l_{rr} \end{bmatrix}$$

$$\left[\begin{array}{l} (l_{ac} + l_{af}) - (l_{cr}l_{ar} + l_{rd}l_{cr})/l_{rr} \\ (l_{bc} + l_{bf}) - (l_{cr}l_{br} + l_{re}l_{cr})/l_{rr} \\ (l_{cc} + l_{cf}) - (l_{cr}^2 + l_{rf}l_{cr})/l_{rr} \end{array} \right] (\Omega/km)$$

As equações (VIII.36) a (VIII.39) definem o fluxo magnético para uma linha equivalente de circuito único, sem a presença de cabos pára-raios, para determinação de indutância e reatância indutiva de sequência positiva.

$$\begin{bmatrix} \phi_a \\ \phi_b \\ \phi_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l'_{aa} & l'_{ab} & l'_{ac} \\ l'_{ba} & l'_{bb} & l'_{bc} \\ l'_{ca} & l'_{cb} & l'_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} (Wb \text{ esp}/km)$$

Considerando $i_a + i_b + i_c = 0$, obtém-se as mesmas equações (VIII.37) a (VIII.39):

$$L'_a = l'_{aa} - (1/2)[l'_{ab} + l'_{ac}] (H/km)$$

$$L'_b = l'_{bb} - (1/2)[l'_{ab} + l'_{bc}] (H/km)$$

$$L'_c = l'_{cc} - (1/2)[l'_{ac} + l'_{bc}] (H/km)$$

Considerando a transposição de linha:

$$l_{ar} = l_{br} = l_{cr} (H/km)$$

O fluxo da linha para um circuito em linha de circuito duplo, a determinação de indutância e reatância indutiva de sequência positiva, desprezando-se o efeito do solo e dos cabos pára-raios são obtidos a partir da seguinte equação matricial:

$$\begin{bmatrix} \phi_a \\ \phi_b \\ \phi_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (l_{aa} + l_{ad}) & (l_{ab} + l_{ae}) & (l_{ac} + l_{af}) \\ (l_{ba} + l_{bd}) & (l_{bb} + l_{be}) & (l_{bc} + l_{bf}) \\ (l_{ca} + l_{cd}) & (l_{cb} + l_{ce}) & (l_{cc} + l_{cf}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} (Wb \text{ esp}/km) \quad (\text{VIII.68})$$

Tem-se, para o sistema trifásico equilibrado: $I_a = I_{max}$ e $I_b = I_c = -1/2 I_{max}$

$$L_a = (l_{aa} + l_{ad}) - (1/2)[(l_{ab} + l_{ae}) + (l_{ac} + l_{af})] (H/km) \quad (\text{VIII.69})$$

$$L_b = (l_{bb} + l_{be}) - (1/2)[(l_{ab} + l_{bd}) + (l_{bc} + l_{bf})] (H/km) \quad (\text{VIII.70})$$

$$L_c = (l_{cc} + l_{cf}) - (1/2)[(l_{ac} + l_{cd}) + (l_{bc} + l_{ce})] (H/km) \quad (\text{VIII.71})$$

$$L_d = (l_{dd} + l_{ad}) - (1/2)[(l_{de} + l_{be}) + (l_{bd} + l_{bd})] (H/km) \quad (\text{VIII.72})$$

$$L_e = (l_{ee} + l_{be}) - (1/2)[(l_{de} + l_{ae}) + (l_{be} + l_{ae})] (H/km) \quad (\text{VIII.73})$$

$$L_f = (l_{ff} + l_{cf}) - (1/2)[(l_{df} + l_{bf}) + (l_{cf} + l_{bf})] (H/km) \quad (\text{VIII.74})$$



As indutâncias aparentes das fases não são iguais. Para torna-las iguais podem ser utilizados dois processos: o emprego da transposição ou a disposição hexagonal para os casos onde sejam desprezados os efeitos dos cabos pára-raios e do solo.

Considerando os circuitos idênticos, isto é:

$$L_a = L_d \quad L_b = L_e \quad L_c = L_f$$

A indutância de sequência positiva (L_s) é dada por:

$$L_s = (L_a + L_b + L_c) / 3 \quad (\text{VIII.75})$$

Logo:

$$\begin{aligned} L_s &= (1/3) [l_{aa} + l_{bb} + l_{cc} + l_{dd} + l_{ee} + l_{ff} - l_{ab} - l_{ac} - l_{bc}] - (1/6) [l_{ae} - l_{af} - l_{bd} - l_{bf} - l_{cd} - l_{ce}] \\ L_s &= (1/3) [l_{aa} + l_{bb} + l_{cc} + l_{dd} + l_{ee} + l_{ff}] - (1/3) [l_{ab} - l_{ac} - l_{bc}] - (1/6) [l_{ae} - l_{af} - l_{bd} - l_{bf} - l_{cd} - l_{ce}] \\ L_s &= 2 \cdot 10^{-4} \{ \ln(\sqrt[3]{d_{ab} d_{bc} d_{ac}} / rmg) + \ln(\sqrt[6]{d_{ae} d_{af} d_{bd} d_{bf} d_{cd} d_{ce}} / \sqrt[3]{d_{ad} d_{af} d_{ce}}) \} \quad (\text{VIII.76}) \end{aligned}$$

Fazendo D_I e D_{II} :

$$D_I = \sqrt[3]{d_{ad} d_{af} d_{ce}} \quad (\text{VIII.77})$$

$$D_{II} = \sqrt[6]{d_{ae} d_{af} d_{bd} d_{bf} d_{cd} d_{ce}} \quad (\text{VIII.78})$$

Sendo:

$$\begin{aligned} dm_g &= \sqrt[3]{d_{ab} d_{bc} d_{ac}} \\ L_s &= 2 \cdot 10^{-4} \{ \ln(dm_g / rmg) + \ln(D_{II} / D_I) \} \quad (H/km) \quad (\text{VIII.79}) \end{aligned}$$

$$X_{LS} = \omega L_s = \omega 2 \cdot 10^{-4} \ln((dm_g / rmg)(D_{II} / D_I)) \quad (\Omega/km)$$

$$X_{LS} = 4\pi f 10^{-4} \ln((dm_g / rmg)(D_{II} / D_I)) \quad (\text{VIII.80})$$

VIII.5. Linha trifásica de circuito duplo com dois cabos pára-raios

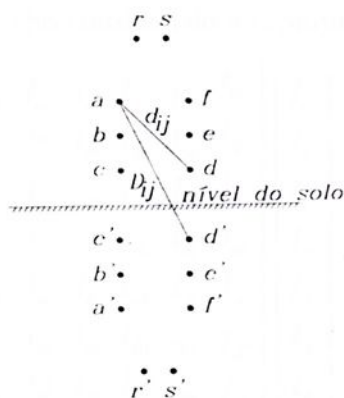


figura VIII.9. Disposição dos condutores e indicações das distâncias para circuito duplo com dois cabos pára-raios

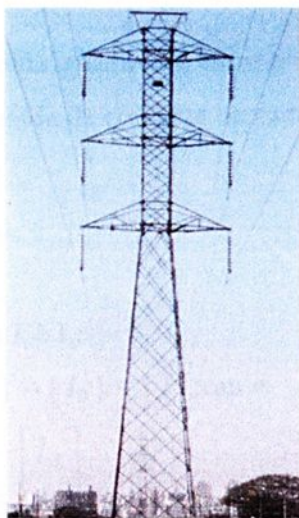


figura VIII.10. Estrutura de 138 kV, para circuito duplo paralelo, com disposição vertical dos condutores e dois cabos pára-raios

As geometrias para estruturas de linha de transmissão, trifásicas, com disposição para circuito duplo, com dois cabos pára-raios, são apresentadas nas figuras C-31 a C-38 do apêndice C.

Para essas geometrias pode-se escrever:

$$\begin{bmatrix} \phi_a \\ \phi_b \\ \phi_c \\ \phi_r \\ \phi_s \\ \phi_d \\ \phi_e \\ \phi_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_{aa} & l_{ab} & l_{ac} & l_{ar} & l_{as} & l_{ad} & l_{ae} & l_{af} \\ l_{ba} & l_{bb} & l_{bc} & l_{br} & l_{bs} & l_{bd} & l_{be} & l_{bf} \\ l_{ca} & l_{cb} & l_{cc} & l_{cr} & l_{cs} & l_{cd} & l_{ce} & l_{cf} \\ l_{ra} & l_{rb} & l_{rc} & l_{rr} & l_{rs} & l_{rd} & l_{re} & l_{rf} \\ l_{sa} & l_{sb} & l_{sc} & l_{sr} & l_{ss} & l_{sd} & l_{se} & l_{sf} \\ l_{da} & l_{db} & l_{dc} & l_{dr} & l_{ds} & l_{dd} & l_{de} & l_{df} \\ l_{ea} & l_{eb} & l_{ec} & l_{er} & l_{es} & l_{ed} & l_{ee} & l_{ef} \\ l_{fa} & l_{fb} & l_{fc} & l_{fr} & l_{fs} & l_{fd} & l_{fe} & l_{ff} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_r \\ I_s \\ I_d \\ I_e \\ I_f \end{bmatrix} \quad (Wb \text{ esp}/km) \quad (VIII.81)$$

A queda de tensão em trecho considerado de comprimento unitário será:

$$\begin{bmatrix} \Delta U_a \\ \Delta U_b \\ \Delta U_c \\ \Delta U_r \\ \Delta U_s \\ \Delta U_d \\ \Delta U_e \\ \Delta U_f \end{bmatrix} = j\omega \begin{bmatrix} l_{aa} & l_{ab} & l_{ac} & l_{ar} & l_{as} & l_{ad} & l_{ae} & l_{af} \\ l_{ba} & l_{bb} & l_{bc} & l_{br} & l_{bs} & l_{bd} & l_{be} & l_{bf} \\ l_{ca} & l_{cb} & l_{cc} & l_{cr} & l_{cs} & l_{cd} & l_{ce} & l_{cf} \\ l_{ra} & l_{rb} & l_{rc} & l_{rr} & l_{rs} & l_{rd} & l_{re} & l_{rf} \\ l_{sa} & l_{sb} & l_{sc} & l_{sr} & l_{ss} & l_{sd} & l_{se} & l_{sf} \\ l_{da} & l_{db} & l_{dc} & l_{dr} & l_{ds} & l_{dd} & l_{de} & l_{df} \\ l_{ea} & l_{eb} & l_{ec} & l_{er} & l_{es} & l_{ed} & l_{ee} & l_{ef} \\ l_{fa} & l_{fb} & l_{fc} & l_{fr} & l_{fs} & l_{fd} & l_{fe} & l_{ff} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_r \\ I_s \\ I_d \\ I_e \\ I_f \end{bmatrix} \quad (V/km) \quad (VIII.82)$$

Com as seguintes considerações:

Circuitos paralelos idênticos;

Sem o emprego de transposição;

Transporte da potência total dividida igualmente entre os circuitos;

Cada condutor transportando metade da corrente de cada fase;

Correntes do circuito I : I_a, I_b, I_c ;

Correntes do circuito II : I_d, I_e, I_f ;

$I_a = I_d, I_b = I_e$ e $I_c = I_f$;

Correntes dos cabos Pára-Raios : I_r e I_s .

Sendo adotada a simbologia: $[I_I] = [I_{II}] = [I]$, onde:

$$[I_I] = \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad [I_{II}] = \begin{bmatrix} I_d \\ I_e \\ I_f \end{bmatrix}$$

Os elementos da matriz da equação (VIII.81) são dados pelas expressões (VIII.1) e (VIII.2).

Adotando-se a notação compacta para a equação (VIII.81) pode ser reescrita:

$$\begin{bmatrix} [\phi_I] \\ [\phi_{PR}] \\ [\phi_{II}] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [I_I] & [I_{PR,I}] & [I_{II,I}] \\ [I_{I,PR}] & [I_{PR}] & [I_{II,PR}] \\ [I_{I,II}] & [I_{PR,II}] & [I_{II}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I_I] \\ [I_{PR}] \\ [I_{II}] \end{bmatrix} \quad (Wb \text{ esp}/km)$$

Considerando apenas o circuito I:

$$\begin{bmatrix} [\phi_I] \\ [\phi_{PR}] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [I_I] & [I_{PR,I}] & [I_{II,I}] \\ [I_{I,PR}] & [I_{PR}] & [I_{II,PR}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I_I] \\ [I_{PR}] \\ [I_{II}] \end{bmatrix} \quad (Wb \text{ esp}/km)$$

Da mesma forma para o circuito II tem-se:

$$\begin{bmatrix} [\phi_{PR}] \\ [\phi_{II}] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [I_{I,PR}] & [I_{PR}] & [I_{II,PR}] \\ [I_{I,II}] & [I_{PR,II}] & [I_{II}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I_I] \\ [I_{PR}] \\ [I_{II}] \end{bmatrix} \quad (Wb \text{ esp}/km)$$

Considerando:

$$I_a = I_d, I_b = I_e \text{ e } I_c = I_f$$

Resulta:

$$[\phi_I] = \{ [I_I] [I] + [I_{PR,I}] [I_{PR}] + [I_{II,I}] [I] \} \quad (Wb \text{ esp}/km)$$

$$[\phi_{PR}] = \{ [I_{I,PR}] [I] + [I_{PR}] [I_{PR}] + [I_{II,PR}] [I] \} \quad (Wb \text{ esp}/km)$$

$$[\phi_I] = \{ [I_I + I_{II}] [I] + [I_{PR,I}] [I_{PR}] \} \quad (Wb \text{ esp}/km)$$

$$[\phi_{PR}] = \{ [I_{I,PR} + I_{II,PR}] [I] + [I_{PR}] [I_{PR}] \} \quad (Wb \text{ esp}/km)$$

Reordenando as equações tem-se:



$$\begin{bmatrix} [\phi_I] \\ [\phi_{PR}] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [l_I + l_{II,I}] & [l_{PR,I}] \\ [l_{I,PR} + l_{II,PR}] & [l_{PR}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I] \\ [I_{PR}] \end{bmatrix} (Wb \text{ esp} / km)$$

Expandindo a expressão acima, resulta:

$$\begin{bmatrix} \phi_a \\ \phi_b \\ \phi_c \\ \phi_r \\ \phi_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (l_{aa} + l_{ad}) & (l_{ab} + l_{ae}) & (l_{ac} + l_{af}) & (l_{ar}) & (l_{as}) \\ (l_{ba} + l_{bd}) & (l_{bb} + l_{be}) & (l_{bc} + l_{bf}) & (l_{br}) & (l_{bs}) \\ (l_{ca} + l_{cd}) & (l_{cb} + l_{ce}) & (l_{cc} + l_{cf}) & (l_{cr}) & (l_{cs}) \\ (l_{ra} + l_{rd}) & (l_{rb} + l_{re}) & (l_{rc} + l_{rf}) & (l_{rr}) & (l_{rs}) \\ (l_{sa} + l_{sd}) & (l_{sb} + l_{se}) & (l_{sc} + l_{sf}) & (l_{sr}) & (l_{ss}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_r \\ I_s \end{bmatrix} (Wb \text{ esp} / km) \quad (\text{VIII.83})$$

A queda de tensão em trecho considerado de comprimento unitário será:

$$\begin{bmatrix} \Delta U_a \\ \Delta U_b \\ \Delta U_c \\ \Delta U_p \\ \Delta U_q \end{bmatrix} = j\omega \begin{bmatrix} (l_{aa} + l_{ad}) & (l_{ab} + l_{ae}) & (l_{ac} + l_{af}) & (l_{ap}) & (l_{aq}) \\ (l_{ba} + l_{bd}) & (l_{bb} + l_{be}) & (l_{bc} + l_{bf}) & (l_{bp}) & (l_{bq}) \\ (l_{ca} + l_{cd}) & (l_{cb} + l_{ce}) & (l_{cc} + l_{cf}) & (l_{cp}) & (l_{cq}) \\ (l_{pa} + l_{pd}) & (l_{pb} + l_{pe}) & (l_{pc} + l_{pf}) & (l_{pp}) & (l_{pq}) \\ (l_{qa} + l_{qd}) & (l_{qb} + l_{qe}) & (l_{qc} + l_{qf}) & (l_{qp}) & (l_{qq}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_p \\ I_q \end{bmatrix} (V / km) \quad (\text{VIII.84})$$

Considerando a matriz particionada para “x” fases e “y” cabos pára-raios, definida como segue:

$$\begin{bmatrix} [\Delta U_x] \\ [\Delta U_y] \end{bmatrix} = j\omega \begin{bmatrix} [l_{xx}] & [l_{xy}] \\ [l_{yx}] & [l_{yy}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I_x] \\ [I_y] \end{bmatrix} (V / km)$$

Considerando o sistema multi-aterrado, tem-se:

$$\begin{bmatrix} [\Delta U_x] \\ [0] \end{bmatrix} = j\omega \begin{bmatrix} [l_{xx}] & [l_{xy}] \\ [l_{yx}] & [l_{yy}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I_x] \\ [I_y] \end{bmatrix} (V / km)$$

Como procedimento análogo de situações anteriores, obtém-se a mesma equação representada em (VIII.33):

$$[\Delta U_x] = j2\pi f \{ [l_{xx}] - [l_{xy}][l_{yy}]^{-1}[l_{yx}] \} [I_x] (V / km)$$

$$[\Delta U_x] = j2\pi f \{ [l_{xx}][I_x] + [l_{xy}][I_y] \} (V / km)$$

$$[0] = j2\pi f \{ [l_{yx}][I_x] + [l_{yy}][I_y] \} (V / km)$$

Desta forma, a corrente no cabo pára-raios será:

$$[I_y] = -[l_{yy}]^{-1}[l_{yx}][I_x] (A)$$

Substituindo a equação de correntes na equação da queda de tensão, tem-se a seguinte equação equivalente para uma linha trifásica sem cabos pára-raios:

$$[\Delta U_x] = j2\pi f \{ [l_{xx}] - [l_{xy}][l_{yy}]^{-1}[l_{yx}] \} [I_x] (V / km)$$

Para o desenvolvimento desta equação foi considerado:

$$[\Delta X_L] = j\omega[l_{xy}][l_{yy}]^{-1}[l_{yx}]$$

$$[\Delta X_L] = j\omega \begin{bmatrix} l_{ar} & l_{as} \\ l_{br} & l_{bs} \\ l_{cr} & l_{cs} \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} l_{rr} & l_{rs} \\ l_{sr} & l_{ss} \end{bmatrix} \right\}^{-1} \begin{bmatrix} (l_{ra} + l_{rd}) & (l_{rb} + l_{re}) & (l_{rc} + l_{rf}) \\ (l_{sa} + l_{sd}) & (l_{se} + l_{se}) & (l_{sc} + l_{sf}) \end{bmatrix} (\Omega/km) \quad (\text{VIII.85})$$

Sendo a equação representada por:

$$[\Delta U_x] = j2\pi f / (l_{rr}l_{ss} - l_{rs}^2) \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} (V/km)$$

onde:

$$[L_{I,II}] - 1/(l_{rr}l_{ss} - l_{rs}^2) \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} = [l_{xx}] - [l_{xy}][l_{yy}]^{-1}[l_{yx}]$$

Sendo:

$[L_{I,II}]$ = matriz de indutâncias do circuito I, sob influência do circuito II

$[X_{LS}] = \omega [L'_{ij}]$ onde:

$$[L'_{ij}] = [l_{xx}] - [l_{xy}][l_{yy}]^{-1}[l_{yx}]$$

e

$$[A] = [l_{xy}][l_{yy}]^{-1}[l_{yx}]\det[l_{yy}]^{-1}$$

Onde $[A]$ é uma matriz auxiliar para representação do desenvolvimento da equação, indicada por:

$$[A] = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}$$

Pode-se representar a matriz $[L'_{ij}]$ como sendo:

$$[L'_{ij}] = 1/(l_{rr}l_{ss} - l_{rs}^2) \begin{bmatrix} L_1C_1 & L_1C_2 & L_1C_3 \\ L_2C_1 & L_2C_2 & L_2C_3 \\ L_3C_1 & L_3C_2 & L_3C_3 \end{bmatrix}$$

onde:

L_iC_j : representam os termos da linha "i" e coluna "j"

Considerações adotadas para este equacionamento em função da simetria das silhuetas de estruturas, empregadas comercialmente, nas linhas de transmissão:

$$l_{ab} = l_{ba}, \quad l_{ac} = l_{ca}, \quad l_{bc} = l_{cb}, \quad l_{ar} = l_{ra}, \quad l_{br} = l_{rb}, \quad l_{cr} = l_{rc}, \quad l_{as} = l_{sa}, \quad l_{bs} = l_{sb}, \quad l_{cs} = l_{sc}$$



$$\begin{aligned}
 l_{de} &= l_{ed}, \quad l_{df} = l_{fd}, \quad l_{gf} = l_{fg}, \quad l_{dr} = l_{rd}, \quad l_{er} = l_{re}, \quad l_{fr} = l_{rf}, \quad l_{ds} = l_{sd}, \quad l_{es} = l_{se}, \quad l_{fs} = l_{sf} \\
 L_1 C_1 &= (l_{aa} + l_{ad})(l_{rr} l_{ss} - l_{rs}^2) - l_{ar}^2 l_{ss} - l_{as}^2 l_{rr} - l_{ss} l_{ar} l_{dr} - l_{rr} l_{as} l_{ds} + l_{rs} l_{dr} l_{as} + l_{rs} l_{ds} l_{ar} + 2 l_{rs} l_{ar} l_{as} \\
 L_2 C_1 &= (l_{ab} + l_{bd})(l_{rr} l_{ss} - l_{rs}^2) - l_{ar} l_{br} l_{ss} - l_{as} l_{bs} l_{rr} - l_{ss} l_{br} l_{dr} - l_{rr} l_{bs} l_{ds} + l_{rs} l_{dr} l_{bs} + l_{rs} l_{ds} l_{br} + l_{rs} (l_{ar} l_{bs} + l_{as} l_{br}) \\
 L_3 C_1 &= (l_{ac} + l_{cd})(l_{rr} l_{ss} - l_{rs}^2) - l_{ar} l_{cr} l_{ss} - l_{as} l_{cs} l_{rr} - l_{ss} l_{cr} l_{dr} - l_{rr} l_{cs} l_{ds} + l_{rs} l_{dr} l_{cs} + l_{rs} l_{ds} l_{cr} + l_{rs} (l_{ar} l_{cs} + l_{as} l_{cr}) \\
 L_1 C_2 &= (l_{ab} + l_{ae})(l_{rr} l_{ss} - l_{rs}^2) - l_{br} l_{ar} l_{ss} - l_{bs} l_{as} l_{rr} - l_{ss} l_{ar} l_{er} - l_{rr} l_{bs} l_{es} + l_{rs} l_{as} l_{er} + l_{rs} l_{es} l_{ar} + l_{rs} (l_{br} l_{as} + l_{bs} l_{ar}) \\
 L_2 C_2 &= (l_{bb} + l_{be})(l_{rr} l_{ss} - l_{rs}^2) - l_{br}^2 l_{ss} - l_{bs}^2 l_{rr} - l_{ss} l_{br} l_{er} - l_{rr} l_{bs} l_{es} + l_{rs} l_{bs} l_{er} + l_{rs} l_{er} l_{bs} + 2 l_{rs} l_{br} l_{bs} \\
 L_3 C_2 &= (l_{bc} + l_{ce})(l_{rr} l_{ss} - l_{rs}^2) - l_{br} l_{cr} l_{ss} - l_{bs} l_{cs} l_{rr} - l_{ss} l_{cr} l_{er} - l_{rr} l_{cs} l_{es} + l_{rs} l_{cs} l_{er} + l_{rs} l_{er} l_{cs} + l_{rs} (l_{br} l_{cs} + l_{bs} l_{cr}) \\
 L_1 C_3 &= (l_{ac} + l_{af})(l_{rr} l_{ss} - l_{rs}^2) - l_{cr} l_{ar} l_{ss} - l_{cs} l_{as} l_{rr} - l_{ss} l_{ar} l_{fr} - l_{rr} l_{as} l_{fs} + l_{rs} l_{as} l_{fr} + l_{rs} l_{fr} l_{as} + l_{rs} (l_{cr} l_{as} + l_{cs} l_{ar}) \\
 L_2 C_3 &= (l_{bc} + l_{bf})(l_{rr} l_{ss} - l_{rs}^2) - l_{cr} l_{br} l_{ss} - l_{cs} l_{bs} l_{rr} - l_{ss} l_{br} l_{fr} - l_{rr} l_{bs} l_{fs} + l_{rs} l_{bs} l_{fr} + l_{rs} l_{fr} l_{bs} + l_{rs} (l_{cr} l_{bs} + l_{cs} l_{br}) \\
 L_3 C_3 &= (l_{cc} + l_{cf})(l_{rr} l_{ss} - l_{rs}^2) - l_{cr}^2 l_{ss} - l_{cs}^2 l_{rr} - l_{ss} l_{cr} l_{fr} - l_{rr} l_{cs} l_{fs} + l_{rs} l_{cs} l_{fr} + l_{rs} l_{fr} l_{cs} + 2 l_{rs} l_{cr} l_{cs} \\
 L_1 C_1 &= (l_{aa} + l_{ad})(l_{rr} l_{ss} - l_{rs}^2) - l_{ar}^2 l_{ss} - l_{as}^2 l_{rr} - l_{ss} l_{ar} l_{dr} - l_{rr} l_{as} l_{ds} + l_{rs} (l_{dr} l_{as} + l_{ds} l_{ar} + 2 l_{ar} l_{as}) \\
 L_2 C_1 &= (l_{ab} + l_{bd})(l_{rr} l_{ss} - l_{rs}^2) - l_{ar} l_{br} l_{ss} - l_{as} l_{bs} l_{rr} - l_{ss} l_{br} l_{dr} - l_{rr} l_{bs} l_{ds} + l_{rs} (l_{dr} l_{bs} + l_{ds} l_{br} + l_{ar} l_{bs} + l_{as} l_{br}) \\
 L_3 C_1 &= (l_{ac} + l_{cd})(l_{rr} l_{ss} - l_{rs}^2) - l_{ar} l_{cr} l_{ss} - l_{as} l_{cs} l_{rr} - l_{ss} l_{cr} l_{dr} - l_{rr} l_{cs} l_{ds} + l_{rs} (l_{dr} l_{cs} + l_{ds} l_{cr} + l_{ar} l_{cs} + l_{as} l_{cr}) \\
 L_1 C_2 &= (l_{ab} + l_{ae})(l_{rr} l_{ss} - l_{rs}^2) - l_{br} l_{ar} l_{ss} - l_{bs} l_{as} l_{rr} - l_{ss} l_{ar} l_{er} - l_{rr} l_{bs} l_{es} + l_{rs} (l_{as} l_{er} + l_{ar} l_{es} + l_{br} l_{as} + l_{bs} l_{ar}) \\
 L_2 C_2 &= (l_{bb} + l_{be})(l_{rr} l_{ss} - l_{rs}^2) - l_{br}^2 l_{ss} - l_{bs}^2 l_{rr} - l_{ss} l_{br} l_{er} - l_{rr} l_{bs} l_{es} + l_{rs} (l_{bs} l_{er} + l_{br} l_{es} + 2 l_{br} l_{bs}) \\
 L_3 C_2 &= (l_{bc} + l_{ce})(l_{rr} l_{ss} - l_{rs}^2) - l_{br} l_{cr} l_{ss} - l_{bs} l_{cs} l_{rr} - l_{ss} l_{cr} l_{er} - l_{rr} l_{cs} l_{es} + l_{rs} (l_{cs} l_{er} + l_{cr} l_{es} + l_{br} l_{cs} + l_{bs} l_{cr}) \\
 L_1 C_3 &= (l_{ac} + l_{af})(l_{rr} l_{ss} - l_{rs}^2) - l_{cr} l_{ar} l_{ss} - l_{cs} l_{as} l_{rr} - l_{ss} l_{ar} l_{fr} - l_{rr} l_{as} l_{fs} + l_{rs} (l_{as} l_{fr} + l_{ar} l_{fs} + l_{cr} l_{as} + l_{cs} l_{ar}) \\
 L_2 C_3 &= (l_{bc} + l_{bf})(l_{rr} l_{ss} - l_{rs}^2) - l_{cr} l_{br} l_{ss} - l_{cs} l_{bs} l_{rr} - l_{ss} l_{br} l_{fr} - l_{rr} l_{bs} l_{fs} + l_{rs} (l_{bs} l_{fr} + l_{br} l_{fs} + l_{cr} l_{bs} + l_{cs} l_{br}) \\
 L_3 C_3 &= (l_{cc} + l_{cf})(l_{rr} l_{ss} - l_{rs}^2) - l_{cr}^2 l_{ss} - l_{cs}^2 l_{rr} - l_{ss} l_{cr} l_{fr} - l_{rr} l_{cs} l_{fs} + l_{rs} (l_{cs} l_{fr} + l_{cr} l_{fs} + 2 l_{cr} l_{cs})
 \end{aligned}$$

(VIII.86)

(VIII.87)

(VIII.88)

(VIII.89)

(VIII.90)

(VIII.91)

(VIII.92)

(VIII.93)

(VIII.94)

Denominando:

$$[L'_{ij}] = \begin{bmatrix} l'_{11} & l'_{12} & l'_{13} \\ l'_{21} & l'_{22} & l'_{23} \\ l'_{31} & l'_{32} & l'_{33} \end{bmatrix} = 1/(l_{pp} l_{qq} - l_{pq}^2) \begin{bmatrix} L_1 C_1 & L_1 C_2 & L_1 C_3 \\ L_2 C_1 & L_2 C_2 & L_2 C_3 \\ L_3 C_1 & L_3 C_2 & L_3 C_3 \end{bmatrix} (\Omega/km) \quad (VIII.95)$$

Resulta:

$$\begin{bmatrix} X_{La} \\ X_{Lb} \\ X_{Lc} \end{bmatrix} = \omega/(l_{pp} l_{qq} - l_{pq}^2) \begin{bmatrix} L_1 C_1 & L_1 C_2 & L_1 C_3 \\ L_2 C_1 & L_2 C_2 & L_2 C_3 \\ L_3 C_1 & L_3 C_2 & L_3 C_3 \end{bmatrix} (\Omega/km) \quad (VIII.96)$$

$$\begin{bmatrix} X_{La} \\ X_{Lb} \\ X_{Lc} \end{bmatrix} = \omega \begin{bmatrix} l'_{11} & l'_{12} & l'_{13} \\ l'_{21} & l'_{22} & l'_{23} \\ l'_{31} & l'_{32} & l'_{33} \end{bmatrix} (\Omega/km)$$

O fluxo magnético para uma “linha equivalente” de um circuito, sem cabos pára-raios é dado por:



$$\begin{bmatrix} \phi_a \\ \phi_b \\ \phi_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l'_{aa} & l'_{ab} & l'_{ac} \\ l'_{ba} & l'_{bb} & l'_{bc} \\ l'_{ca} & l'_{cb} & l'_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (Wb \text{ esp}/km)$$

Considerando $i_a + i_b + i_c = 0$, obtém-se as mesmas equações (VIII.37) a (VIII.39):

$$L'_a = l'_{aa} - (1/2)[l'_{ab} + l'_{ac}] \quad (H/km)$$

$$L'_b = l'_{bb} - (1/2)[l'_{ab} + l'_{bc}] \quad (H/km)$$

$$L'_c = l'_{cc} - (1/2)[l'_{ac} + l'_{bc}] \quad (H/km)$$

Considerando a transposição de linha:

$$l_{ar} = l_{br} = l_{cr} = l_{ds} = l_{es} = l_{fs} \quad (H/km)$$

$$l_{as} = l_{bs} = l_{cs} = l_{dr} = l_{er} = l_{fr} \quad (H/km)$$

O fluxo da linha para um circuito em linha de circuito duplo, a determinação de indutância e reatância indutiva de sequência positiva, desprezando-se o efeito do solo e dos cabos pára-raios são obtidos a partir da seguinte equação matricial:

$$\begin{bmatrix} \phi_a \\ \phi_b \\ \phi_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (l_{aa} + l_{ad}) & (l_{ab} + l_{ae}) & (l_{ac} + l_{af}) \\ (l_{ba} + l_{bd}) & (l_{bb} + l_{be}) & (l_{bc} + l_{bf}) \\ (l_{ca} + l_{cd}) & (l_{cb} + l_{ce}) & (l_{cc} + l_{cf}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (Wb \text{ esp}/km)$$

Tem-se para o sistema trifásico equilibrado: $I_a = I_{max}$ e $I_b = I_c = -1/2.I_{max}$

$$L_a = (l_{aa} + l_{ad}) - (1/2)[(l_{ab} + l_{ae}) + (l_{ac} + l_{af})] \quad (H/km)$$

$$L_b = (l_{bb} + l_{be}) - (1/2)[(l_{ab} + l_{bd}) + (l_{bc} + l_{bf})] \quad (H/km)$$

$$L_c = (l_{cc} + l_{cf}) - (1/2)[(l_{ac} + l_{cd}) + (l_{bc} + l_{ce})] \quad (H/km)$$

$$L_d = (l_{dd} + l_{ad}) - (1/2)[(l_{de} + l_{be}) + (l_{bd} + l_{cd})] \quad (H/km)$$

$$L_e = (l_{ee} + l_{be}) - (1/2)[(l_{de} + l_{ae}) + (l_{be} + l_{ce})] \quad (H/km)$$

$$L_f = (l_{ff} + l_{cf}) - (1/2)[(l_{df} + l_{af}) + (l_{cf} + l_{bf})] \quad (H/km)$$

As indutâncias aparentes das fases não são iguais. Para torna-las iguais podem ser utilizados dois processos: o emprego da transposição ou a disposição hexagonal nos casos onde sejam desprezados os efeitos dos cabos pára-raios e do solo.

Considerando os circuitos idênticos, isto é:

$$L_a = L_d \quad L_b = L_e \quad L_c = L_f$$

A indutância de sequência positiva (L_s) é dada por:

$$L_s = (L_a + L_b + L_c) / 3$$

Logo:

$$L_s = (1/3)[l_{aa} + l_{bb} + l_{cc} + l_{ad} + l_{de} + l_{ef} - l_{ab} - l_{ac} - l_{bc}] - (1/6)[l_{ae} - l_{af} - l_{bd} - l_{bf} - l_{cd} - l_{ce}]$$

$$L_s = (1/3)[l_{aa} + l_{bb} + l_{cc} + l_{ad} + l_{be} + l_{cf}] - (1/3)[l_{ab} - l_{ac} - l_{bc}] - (1/6)[l_{ae} - l_{af} - l_{bd} - l_{bf} - l_{cd} - l_{ce}]$$



$$L_s = 2.10^{-4} \{ \ln(\sqrt[3]{d_{ab}d_{bc}d_{ac}} / rmg) + \ln(\sqrt[3]{d_{ae}d_{af}d_{bd}d_{bf}d_{ca}d_{ce}} / \sqrt[3]{d_{ad}d_{af}d_{ce}}) \}$$

Sendo D_I e D_{II} definidos pelas equações (VIII.77) e (VIII.78) e dmg definido como no caso anterior.

$$L_s = 2.10^{-4} \{ \ln(dmg / rmg) + \ln(D_{II} / D_I) \} (H/km)$$

$$X_{LS} = \omega L_s = \omega 2.10^{-4} \ln((dmg / rmg)(D_{II} / D_I)) (\Omega/km)$$

Chega-se à mesma expressão (VIII.80), obtida para o caso de circuito duplo com um cabo pára-raios, a qual definirá também a reatância de seqüência positiva para linhas de transmissão de circuito duplo com dois cabos pára-raios:

$$X_{LS} = 4\pi f 10^{-4} \ln((dmg / rmg)(D_{II} / D_I)) (\Omega/km)$$

VIII.6. Cálculo da indutância equivalente de uma linha de transmissão

A formulação obtida nos casos apresentados permite o cálculo da indutância equivalente de uma linha de transmissão, tanto pelo método “aproximado” quanto pelo método “exato”, de acordo com a denominação proposta no capítulo II deste trabalho. Esta formulação desenvolvida para as indutâncias deverá ser empregada na determinação das reatâncias indutivas e nas impedâncias de uma linha de transmissão, conforme será visto nos capítulos posteriores.



IX. IMPEDÂNCIA DE UMA LINHA DE TRANSMISSÃO

A matriz de impedâncias $[Z]$ é definida como a soma complexa da matriz de resistências à corrente alternada dos cabos condutores com a matriz de reatâncias indutivas, na frequência do sistema, com retorno pelo solo, tendo seus componentes determinados com a inclusão dos fatores de correção, segundo formulação definida por J.R. Carson, [10], [13] e [15].

Desta forma, tem-se:

a) - Impedância Própria - Z_{ii}

$$Z_{ii} = (R_x + 8\pi 10^{-4} f \Delta R) + j 2 \cdot 10^{-4} \omega \ln(2h_i / r_{mg}) + 8\pi 10^{-4} f \Delta X \quad (\text{IX.1})$$

b) - Impedância Mútua - Z_{ij}

$$Z_{ij} = 8\pi 10^{-4} f \Delta R + j 2 \cdot 10^{-4} \omega \ln(D_{ij} / r_{mg}) + 8\pi 10^{-4} f \Delta X \quad (\text{IX.2})$$

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

Sendo:

$$\Delta R = [(\pi / 8) - (p / (3\sqrt{2} \cos(\theta)) + (p^2 / 16) \cos(2\theta) (0,6728 + \ln(2 / p)) + (p^2 / 16) \theta \sin(2\theta))] \quad (\Omega / km) \quad (\text{para } p < 0,25) \quad (\text{IX.3})$$

ΔR : termo de correção da resistência

$$\Delta X = -0,0386 + (1/2) \ln(2 / p) + (1/3\sqrt{2}) p \cos(\theta) \quad (\Omega / km) \quad (\text{para } p < 0,25) \quad (\text{IX.4})$$

ΔX : termo de correção da reatância indutiva

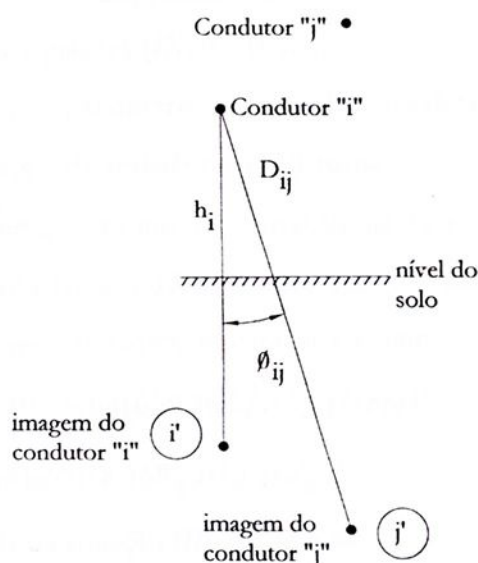


figura IX.1 - Esquemática do parâmetro θ_{ij} das fórmulas de Carson

Para impedâncias próprias, tem-se:

$$\theta_{ij} = \text{zero} \quad (\text{IX.5})$$

$$p_{ij} = 5,620 \cdot 10^{-3} h_i \sqrt{f / \rho} \quad (\text{IX.6})$$

Para impedâncias mútuas, tem-se:

$$\theta_{ij} = \lg^{-1}(x_{ij} / h_i + h_j) \quad (\text{IX.7})$$

$$p_{ij} = 28,1004 \cdot 10^{-4} D_{ij} \sqrt{f / \rho} \quad (\text{IX.8})$$

Onde:

R_X : resistência elétrica do condutor ou cabo pára-raios.

D_{ij} : distância entre condutores ou cabos pára-raios e a imagem de seus vizinhos.

d_{ij} : distância entre condutores ou cabo pára-raios.

h_i : altura do condutor ou do cabo pára-raios

x_{ij} : projeção da distância horizontal entre os condutores “i” e “j”.

rmg : raio médio geométrico do condutor ou do cabo pára-raios.

ρ : resistividade do solo em (Ω/m).

f : frequência da rede, em Hz.

Para o caso genérico, adota-se a matriz de correção de impedâncias, com “n” condutores e “m” cabos pára-raios.

Caso as características da linha de transmissão não se enquadrem dentro dos limites indicados nas equações (IX.3) e (IX.4), essas equações deverão ser utilizadas com um número maior de termos, definidos no trabalho de Carson.

Para a determinação da matriz de impedâncias pelo método aproximado será adotada a seguinte consideração em relação às equações (IX.3) e (IX.4).

Os termos que contenham o parâmetro θ serão desconsiderados. Essa simplificação implica em que o termo de correção da resistência (ΔR) torna-se constante e proporcional à frequência do sistema (f , em Hertz), o termo de correção da reatância indutiva (ΔX) será proporcional à resistividade do solo (ρ , em Ω/m) e inversamente proporcional à frequência, como se pode observar, nas equações resultantes, mostradas a seguir:

$$z_{ii} = rx_i + \pi^2 10^{-4} f + j\{2 \cdot 10^{-4} \omega \ln((658,368 \sqrt{\rho / f}) / rmg)\} \quad (\text{IX.9})$$

$$z_{ij} = \pi^2 10^{-4} f + j\{2 \cdot 10^{-4} \omega \ln((658,368 \sqrt{\rho / f}) / d_{ij})\} \quad (\text{IX.10})$$

Pela definição de rx , obtida na equação (III.24), tem-se:

$$r_{(t_2)} = r_{(t_1)} [1 + \alpha(t_2 - t_1)] \quad (\Omega)$$

As equações (IX.9) e (IX.10) podem ser simplificadas, considerando-se:

$$De = 658,368 \sqrt{\rho / f} \quad (\text{IX.11})$$



Resultando:

$$Z_{ij} = r_i + \pi^2 10^{-4} f + j[2 \cdot 10^{-4} \omega \ln(De / rmg)] \quad (\text{IX.12})$$

$$Z_{ij} = \pi^2 10^{-4} f + j[2 \cdot 10^{-4} \omega \ln(De / d_{ij})] \quad (\text{IX.13})$$

Para a determinação da matriz de impedâncias seqüenciais $[Z]$ devemos aplicar a seguinte transformação matricial [13]:

$$[Z] = [T]^{-1} \cdot [Z] \cdot [T] \quad (\text{IX.14})$$

onde:

$$[T'] = 1/3 \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \quad [Z'] = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \quad [T] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix}$$

$$[T'] [Z] [T] = 1/3 \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix}$$

$$[T'] [Z] = 1/3 \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix}$$

$$[T'] [Z] = 1/3 \begin{bmatrix} Z_{aa} + Z_{ab} + Z_{ac} & Z_{ab} + Z_{bb} + Z_{bc} & Z_{ac} + Z_{bc} + Z_{cc} \\ Z_{aa} + \alpha Z_{ab} + \alpha^2 Z_{ac} & Z_{ab} + \alpha Z_{bb} + \alpha^2 Z_{bc} & Z_{ac} + \alpha Z_{bc} + \alpha^2 Z_{cc} \\ Z_{aa} + \alpha^2 Z_{ab} + \alpha Z_{ac} & Z_{ab} + \alpha^2 Z_{bb} + \alpha Z_{bc} & Z_{ac} + \alpha^2 Z_{bc} + \alpha Z_{cc} \end{bmatrix}$$

$$[T'] [Z] [T] = 1/3 \begin{bmatrix} Z_{aa} + Z_{ab} + Z_{ac} & Z_{ab} + Z_{bb} + Z_{bc} & Z_{ac} + Z_{bc} + Z_{cc} \\ Z_{aa} + \alpha Z_{ab} + \alpha^2 Z_{ac} & Z_{ab} + \alpha Z_{bb} + \alpha^2 Z_{bc} & Z_{ac} + \alpha Z_{bc} + \alpha^2 Z_{cc} \\ Z_{aa} + \alpha^2 Z_{ab} + \alpha Z_{ac} & Z_{ab} + \alpha^2 Z_{bb} + \alpha Z_{bc} & Z_{ac} + \alpha^2 Z_{bc} + \alpha Z_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix}$$

Onde:

$$\alpha = -0,5 + j(\sqrt{3}/2) \quad \text{e} \quad \alpha^2 = -0,5 - j(\sqrt{3}/2)$$

Adotando-se a seguinte representação:

$$[T'] [Z] [T] = [Z] = \begin{bmatrix} Z_{00} & Z_{01} & Z_{02} \\ Z_{10} & Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{20} & Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix}$$

$$Z_{00} = 1/3((z_{aa} + z_{ab} + z_{ac})1 + (z_{ab} + z_{bb} + z_{bc})1 + (z_{ac} + z_{bc} + z_{cc})1)$$

$$Z_{01} = 1/3((z_{aa} + z_{ab} + z_{ac})1 + (z_{ab} + z_{bb} + z_{bc})\alpha^2 + (z_{ac} + z_{bc} + z_{cc})\alpha)$$

$$Z_{02} = 1/3((z_{aa} + z_{ab} + z_{ac})1 + (z_{ab} + z_{bb} + z_{bc})\alpha + (z_{ac} + z_{bc} + z_{cc})\alpha^2)$$

$$Z_{10} = 1/3((z_{aa} + \alpha z_{ab} + \alpha^2 z_{ac})1 + (z_{ab} + \alpha z_{bb} + \alpha^2 z_{bc})1 + (z_{ac} + \alpha z_{bc} + \alpha^2 z_{cc})1)$$

$$Z_{11}=1/3((z_{aa}+\alpha z_{ab}+\alpha^2 z_{ac})1+(z_{ab}+\alpha z_{bb}+\alpha^2 z_{bc})\alpha+(z_{ac}+\alpha z_{bc}+\alpha^2 z_{cc})\alpha)$$

$$Z_{12}=1/3((z_{aa}+\alpha z_{ab}+\alpha^2 z_{ac})1+(z_{ab}+\alpha z_{bb}+\alpha^2 z_{bc})\alpha+(z_{ac}+\alpha z_{bc}+\alpha^2 z_{cc})\alpha^2)$$

$$Z_{20}=1/3((z_{aa}+\alpha^2 z_{ab}+\alpha z_{ac})1+(z_{ab}+\alpha^2 z_{bb}+\alpha z_{bc})1+(z_{ac}+\alpha^2 z_{bc}+\alpha z_{cc})1)$$

$$Z_{21}=1/3((z_{aa}+\alpha^2 z_{ab}+\alpha z_{ac})1+(z_{ab}+\alpha^2 z_{bb}+\alpha z_{bc})\alpha^2+(z_{ac}+\alpha^2 z_{bc}+\alpha z_{cc})\alpha)$$

$$Z_{22}=1/3((z_{aa}+\alpha^2 z_{ab}+\alpha z_{ac})1+(z_{ab}+\alpha^2 z_{bb}+\alpha z_{bc})\alpha+(z_{ac}+\alpha^2 z_{bc}+\alpha z_{cc})\alpha^2)$$

$$Z_{00}=1/3((z_{aa}+z_{bb}+z_{cc})+(z_{ab}+z_{bc}+z_{ac})+(z_{ac}+z_{ab}+z_{cc}))$$

$$Z_{11}=1/3((z_{aa}+z_{bb}+z_{cc})+\alpha(z_{ab}+z_{bc}+z_{ac})+\alpha^2(z_{ac}+z_{ab}+z_{cc}))$$

$$Z_{22}=1/3((z_{aa}+z_{bb}+z_{cc})+\alpha^2(z_{ab}+z_{bc}+z_{ac})+\alpha(z_{ac}+z_{ab}+z_{cc}))$$

$$Z_{01}=1/3((z_{aa}+z_{ab}+z_{ac})+\alpha^2(z_{ab}+z_{bb}+z_{bc})+\alpha(z_{ac}+z_{bc}+z_{cc}))$$

$$Z_{10}=1/3((z_{aa}+z_{ab}+z_{ac})+\alpha(z_{ba}+z_{bc}+z_{bb})+\alpha^2(z_{ac}+z_{bc}+z_{cc}))$$

$$Z_{02}=1/3((z_{aa}+z_{ab}+z_{ac})+\alpha^2(z_{ac}+z_{bc}+z_{cc})+\alpha(z_{ab}+z_{bb}+z_{bc}))$$

$$Z_{20}=1/3((z_{aa}+z_{ab}+z_{ac})+\alpha(z_{ac}+z_{bc}+z_{cc})+\alpha^2(z_{ab}+z_{bb}+z_{bc}))$$

$$Z_{12}=1/3((z_{aa}+z_{bc}+z_{ac})+\alpha^2(z_{ac}+z_{bb}+z_{cc})+\alpha(z_{ab}+z_{ab}+z_{cc}))$$

$$Z_{21}=1/3((z_{aa}+z_{bc}+z_{ac})+\alpha(z_{ac}+z_{bb}+z_{cc})+\alpha^2(z_{ab}+z_{ab}+z_{cc}))$$

Desta forma podem ser definidas as impedâncias:

Seqüência nula:

$$Z_{00}=1/3((z_{aa}+z_{bb}+z_{cc})+2(z_{ab}+z_{bc}+z_{ac})) \quad (\text{IX.15})$$

Seqüência positiva:

$$Z_{11}=1/3((z_{aa}+z_{bb}+z_{cc})-(z_{ab}+z_{bc}+z_{ac})) \quad (\text{IX.16})$$

Seqüência negativa:

$$Z_{22}=1/3((z_{aa}+z_{bb}+z_{cc})-(z_{ab}+z_{bc}+z_{ac})) \quad (\text{IX.17})$$

Impedâncias mútuas entre as seqüências:

$$Z_{01}=1/3((z_{aa}+\alpha^2 z_{bb}+\alpha z_{cc})-z_{ab}\alpha-z_{ac}\alpha^2-z_{bc}) \quad (\text{IX.18})$$

$$Z_{10}=1/3((z_{aa}+\alpha z_{bb}+\alpha^2 z_{cc})-z_{ab}\alpha^2-z_{ac}\alpha-z_{bc}) \quad (\text{IX.19})$$

$$Z_{02}=1/3((z_{aa}+\alpha z_{bb}+\alpha^2 z_{cc})-z_{ab}\alpha^2-z_{ac}\alpha-z_{bc}) \quad (\text{IX.20})$$

$$Z_{20}=1/3((z_{aa}+\alpha^2 z_{bb}+\alpha z_{cc})-z_{ab}\alpha-z_{ac}\alpha^2-z_{bc}) \quad (\text{IX.21})$$

$$Z_{12}=1/3((z_{aa}+\alpha^2 z_{bb}+\alpha z_{cc})+2(z_{ab}\alpha+z_{ac}\alpha^2+z_{bc})) \quad (\text{IX.22})$$

$$Z_{21}=1/3((z_{aa}+\alpha z_{bb}+\alpha^2 z_{cc})+2(z_{ab}\alpha^2+z_{ac}\alpha+z_{bc})) \quad (\text{IX.23})$$

Para os sistemas considerados equilibrados e empregando-se as transposições para a linha de transmissão, tem-se as seguintes condições:

$$z_{aa} = z_{bb} = z_{cc} = z_{aa}^*$$

$$z_{ab} = z_{ac} = z_{bc} = z_{ab}^*$$



Logo, a impedância de seqüência nula para linhas equilibradas e transpostas será:

$$\begin{aligned} Z_{00} &= 1/3(3z_{aa}^* + 6z_{ab}^*) \\ Z_{00} &= z_{aa}^* + 2z_{ab}^* \end{aligned} \quad (\text{IX.24})$$

A impedância de seqüência positiva para linhas equilibradas e transpostas será:

$$\begin{aligned} Z_{11} &= 1/3(z_{aa} + z_{aa} + z_{aa} - z_{ab} - z_{ab} - z_{ab}) \\ Z_{11} &= z_{aa}^* - z_{ab}^* \end{aligned} \quad (\text{IX.25})$$

Os parâmetros representados com a simbologia (*) indicam valores médios.

Para o equacionamento do método aproximado serão utilizadas as seguintes fórmulas, originadas das equações (IX.1) e (IX.2) e do capítulo VIII.

$$z_{aa}^* = r_{aa} + \pi^2 10^{-4} f + j2.10^{-4} \omega \ln(De / rmg) \quad (\text{IX.26})$$

$$z_{ab}^* = \pi^2 10^{-4} f + j2.10^{-4} \omega \ln(De / dmg) \quad (\text{IX.27})$$

$$z_{ad}^* = \pi^2 10^{-4} f + j2.10^{-4} \omega \ln(De / D_I) \quad (\text{IX.28})$$

$$z_{ae}^* = \pi^2 10^{-4} f + j2.10^{-4} \omega \ln(De / D_{II}) \quad (\text{IX.29})$$

$$z_{ar1}^* = \pi^2 10^{-4} f + j2.10^{-4} \omega \ln(De / DMG_r) \quad (\text{IX.30})$$

$$z_{ar2}^* = \pi^2 10^{-4} f + j2.10^{-4} \omega \ln(De / DMG_{rs}) \quad (\text{IX.31})$$

$$z_{rs}^* = \pi^2 10^{-4} f + j2.10^{-4} \omega \ln(De / d_{rs}) \quad (\text{IX.32})$$

$$z_{rr}^* = r_{rr} + \pi^2 10^{-4} f + j2.10^{-4} \omega \ln(De / rmgp) \quad (\text{IX.33})$$

sendo:

d_{rs} : distância de "r" a "s"

rmg : raio médio geométrico, corrigido, do condutor, em metros

$rmgp$: raio médio geométrico, corrigido, do cabo pára-raios, em metros

dmg : Distância média geométrica entre os condutores do mesmo circuito, em metros

dmg_s : Distância média geométrica entre os condutores e o cabo pára-raios, em metros

dmg_{rs} : Distância média geométrica entre os condutores e os cabos pára-raios, em metros

DMG_r : Distância média geométrica entre o cabo pára-raios e as imagens das fases de um circuito, em metros

DMG_{rs} : Distância média geométrica entre os cabos pára-raios e as imagens das fases dos circuitos, em metros

D_I : Distância média geométrica entre condutores de mesma fase, em metros

D_{II} : Distância média geométrica entre condutores de fases diferentes, em metros

A expressão para dmg foi definida pela equação (VIII.18):

$$dmg = \sqrt[3]{d_{ab} d_{bc} d_{ac}}$$



$$dmg_r = \sqrt[3]{d_{ap} d_{bp} d_{cp}} \quad (\text{IX.34})$$

$$DMG_r = \sqrt[3]{D_{ap} D_{bp} D_{cp}} \quad (\text{IX.35})$$

As expressões para D_I e D_{II} foram definidas pelas equações (VIII.77) e (VIII.78)

Os parâmetros indicados com (*) representam valores médios.

IX.1. Linha trifásica de circuito simples sem cabo pára-raios

A matriz de impedâncias corrigidas $[Z_c]$ é dada por:

$$[Z_c] = [R] + k.[\Delta R] + j.\{ [X] + k[\Delta X] \} \quad (\text{IX.36})$$

onde: $k = 8.\pi.f.10^{-4}$

sendo:

$$[R] = \begin{bmatrix} R_{aa} & 0 & 0 \\ 0 & R_{bb} & 0 \\ 0 & 0 & R_{cc} \end{bmatrix} (\Omega/km)$$

$$[\Delta R] = k. \begin{bmatrix} \Delta R_{aa} & \Delta R_{ab} & \Delta R_{ac} \\ \Delta R_{ab} & \Delta R_{bb} & \Delta R_{bc} \\ \Delta R_{ac} & \Delta R_{cb} & \Delta R_{cc} \end{bmatrix} (\Omega/km)$$

$$[X] = \begin{bmatrix} x_{aa} & x_{ab} & x_{ac} \\ x_{ba} & x_{bb} & x_{bc} \\ x_{ca} & x_{cb} & x_{cc} \end{bmatrix} (\Omega/km)$$

Sendo:

$$[X] = w. \begin{bmatrix} l_{aa} & l_{ab} & l_{ac} \\ l_{ba} & l_{bb} & l_{bc} \\ l_{ca} & l_{cb} & l_{cc} \end{bmatrix} (\Omega/km)$$

$$[\Delta X] = k. \begin{bmatrix} \Delta X_{aa} & \Delta X_{ab} & \Delta X_{ac} \\ \Delta X_{ba} & \Delta X_{bb} & \Delta X_{bc} \\ \Delta X_{ca} & \Delta X_{cb} & \Delta X_{cc} \end{bmatrix} (\Omega/km)$$

Representação da matriz de impedâncias corrigidas:

$$[Z] = \begin{bmatrix} z_{aa} & z_{ab} & z_{ac} \\ z_{ba} & z_{bb} & z_{bc} \\ z_{ca} & z_{cb} & z_{cc} \end{bmatrix} (\Omega/km)$$

Equacionamento para queda de tensão em trecho considerado de comprimento unitário:



$$\begin{bmatrix} \Delta U_a \\ \Delta U_b \\ \Delta U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{aa} & z_{ab} & z_{ac} \\ z_{ba} & z_{bb} & z_{bc} \\ z_{ca} & z_{cb} & z_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} (V/km) \quad (IX.37)$$

A matriz de impedâncias seqüenciais, considerando o método exato de Carson, poderá ser obtida através da equação (IX.14).

Seus termos são representados pelas equações (IX.15) à (IX.23).

Seqüência nula:

$$Z_{00} = 1/3((z_{aa} + z_{bb} + z_{cc}) + 2.(z_{ab} + z_{bc} + z_{ac}))$$

Seqüência positiva:

$$Z_{11} = 1/3((z_{aa} + z_{bb} + z_{cc}) - (z_{ab} + z_{bc} + z_{ac}))$$

Seqüência negativa:

$$Z_{22} = 1/3((z_{aa} + z_{bb} + z_{cc}) - (z_{ab} + z_{bc} + z_{ac}))$$

Impedâncias mútuas entre as seqüências:

$$Z_{01} = 1/3((z_{aa} + \alpha^2 z_{bb} + \alpha z_{cc}) - z_{ab} \alpha - z_{ac} \alpha^2 - z_{bc})$$

$$Z_{10} = 1/3((z_{aa} + \alpha z_{bb} + \alpha^2 z_{cc}) - z_{ab} \alpha^2 - z_{ac} \alpha - z_{bc})$$

$$Z_{02} = 1/3((z_{aa} + \alpha z_{bb} + \alpha^2 z_{cc}) - z_{ab} \alpha^2 - z_{ac} \alpha - z_{bc})$$

$$Z_{20} = 1/3((z_{aa} + \alpha^2 z_{bb} + \alpha z_{cc}) - z_{ab} \alpha - z_{ac} \alpha^2 - z_{bc})$$

$$Z_{12} = 1/3((z_{aa} + \alpha^2 z_{bb} + \alpha z_{cc}) + 2(z_{ab} \alpha + z_{ac} \alpha^2 + z_{bc}))$$

$$Z_{21} = 1/3((z_{aa} + \alpha^2 z_{bb} + \alpha z_{cc}) + 2(z_{ab} \alpha^2 + z_{ac} \alpha + z_{bc}))$$

e) - Impedância de seqüência nula – método aproximado

Para a representação pelo método aproximado, considerando as condições ideais de sistema equilibrado e linha transposta, a impedância de seqüência nula será dada pela equação (IX.24) e a impedância de seqüência positiva será representada pela equação (IX.25).

$$Z_{00} = z_{aa}^* + 2z_{ab}^*$$

f) - Impedância de seqüência positiva – método aproximado

$$Z_{11} = z_{aa}^* - z_{ab}^*$$

$$Z_{11} = r_{aa} + \Delta r_{aa} - \Delta r_{ab} + jX_{LS}$$

$$Z_{11} = r_{aa} + jX_{LS}$$

Sendo X_{LS} deduzido no capítulo de indutâncias e definido por:

$$X_{LS} = \omega(l_{aa} - l_{ab}) \quad (\Omega/km)$$

$$Z_{11} = r_{aa} + j4\pi 10^4 f \ln(dm/g/rmg) \quad (\Omega/km) \quad (IX.38)$$



IX.2. Linha trifásica de circuito simples com um cabo pára-raios

A matriz de impedâncias corrigidas $[Z_c]$, de acordo com a equação (IX.36), será dada por:

$$[Z_c] = [R] + k[\Delta R] + j\{[X] + k[\Delta X]\}$$

$$\text{onde: } k = 8\pi f 10^{-4}$$

sendo:

$$[R] = \begin{bmatrix} R_{aa} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_{bb} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_{cc} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{rr} \end{bmatrix} (\Omega / km)$$

$$[\Delta R] = k \begin{bmatrix} \Delta R_{aa} & \Delta R_{ab} & \Delta R_{ac} & \Delta R_{ar} \\ \Delta R_{ba} & \Delta R_{bb} & \Delta R_{bc} & \Delta R_{br} \\ \Delta R_{ca} & \Delta R_{cb} & \Delta R_{cc} & \Delta R_{cr} \\ \Delta R_{ra} & \Delta R_{rb} & \Delta R_{rc} & \Delta R_{rr} \end{bmatrix} (\Omega / km)$$

$$[X] = \omega \begin{bmatrix} l_{aa} & l_{ab} & l_{ac} & l_{ar} \\ l_{ba} & l_{bb} & l_{bc} & l_{br} \\ l_{ca} & l_{cb} & l_{cc} & l_{cr} \\ l_{ra} & l_{rb} & l_{rc} & l_{rr} \end{bmatrix} (\Omega / km)$$

$$[\Delta X] = k \begin{bmatrix} \Delta X_{aa} & \Delta X_{ab} & \Delta X_{ac} & \Delta X_{ar} \\ \Delta X_{ba} & \Delta X_{bb} & \Delta X_{bc} & \Delta X_{br} \\ \Delta X_{ca} & \Delta X_{cb} & \Delta X_{cc} & \Delta X_{cr} \\ \Delta X_{ra} & \Delta X_{rb} & \Delta X_{rc} & \Delta X_{rr} \end{bmatrix} (\Omega / km)$$

A representação da matriz de impedâncias corrigidas é:

$$[Z_c] = \begin{bmatrix} z_{aa} & z_{ab} & z_{ac} & z_{ar} \\ z_{ba} & z_{bb} & z_{bc} & z_{br} \\ z_{ca} & z_{cb} & z_{cc} & z_{cr} \\ z_{ra} & z_{rb} & z_{rc} & z_{rr} \end{bmatrix} (\Omega / km)$$

Considerando processo semelhante à obtenção da matriz de indutâncias, tem-se a seguinte matriz equivalente de impedâncias para uma linha trifásica equivalente, sem a presença de cabos pára-raios:

$$[Z'] = \begin{bmatrix} z_{aa} - z_{ar}^2 / z_{rr} & z_{ba} - z_{br} z_{ar} / z_{rr} & z_{ca} - z_{cr} z_{ar} / z_{rr} \\ z_{ab} - z_{ar} z_{br} / z_{rr} & z_{bb} - z_{br}^2 / z_{rr} & z_{cb} - z_{cr} z_{br} / z_{rr} \\ z_{ac} - z_{ar} z_{cr} / z_{rr} & z_{bc} - z_{br} z_{cr} / z_{rr} & z_{cc} - z_{cr}^2 / z_{rr} \end{bmatrix}$$

A queda de tensão em trecho considerado de comprimento unitário é:



$$\begin{bmatrix} \Delta U_a \\ \Delta U_b \\ \Delta U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{aa} - z_{ar}^2 / z_{rr} & z_{ba} - z_{br} z_{ar} / z_{rr} & z_{ca} - z_{cr} z_{ar} / z_{rr} \\ z_{ab} - z_{ar} z_{br} / z_{rr} & z_{bb} - z_{br}^2 / z_{rr} & z_{cb} - z_{cr} z_{br} / z_{rr} \\ z_{ac} - z_{ar} z_{cr} / z_{rr} & z_{bc} - z_{br} z_{cr} / z_{rr} & z_{cc} - z_{cr}^2 / z_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} (V/km) \quad (V-39)$$

A equação da queda de tensão, representada em (IX.39) para uma linha equivalente com um circuito, sem a presença de cabos pára-raios, pode ser escrita como:

$$\begin{bmatrix} \Delta U_a \\ \Delta U_b \\ \Delta U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z'_{aa} & z'_{ba} & z'_{ca} \\ z'_{ab} & z'_{bb} & z'_{cb} \\ z'_{ac} & z'_{bc} & z'_{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} (V/km) \quad (IX.40)$$

A matriz de impedâncias seqüenciais, considerando o método de Carson, a partir da matriz Z' representada na equação (IX.40), poderá ser obtida através da equação (IX.14), com seus termos representados pelas equações (IX.15) à (IX.23).

a) – Impedância de seqüência nula – método exato

$$Z'_{00} = 1/3((z'_{aa} + z'_{bb} + z'_{cc}) + 2(z'_{ab} + z'_{bc} + z'_{ac}))$$

b) – Impedância de seqüência positiva – método exato

$$Z'_{11} = 1/3((z'_{aa} + z'_{bb} + z'_{cc}) - (z'_{ab} + z'_{bc} + z'_{ac}))$$

c) – Impedância de seqüência negativa – método exato

$$Z'_{22} = 1/3((z'_{aa} + z'_{bb} + z'_{cc}) - (z'_{ab} + z'_{bc} + z'_{ac}))$$

d) - Impedâncias mútuas entre as seqüências

$$Z'_{01} = 1/3((z'_{aa} + \alpha^2 z'_{bb} + \alpha z'_{cc}) - z'_{ab} \alpha - z'_{ac} \alpha^2 - z'_{bc})$$

$$Z'_{10} = 1/3((z'_{aa} + \alpha z'_{bb} + \alpha^2 z'_{cc}) - z'_{ab} \alpha^2 - z'_{ac} \alpha - z'_{bc})$$

$$Z'_{02} = 1/3((z'_{aa} + \alpha z'_{bb} + \alpha^2 z'_{cc}) - z'_{ab} \alpha^2 - z'_{ac} \alpha - z'_{bc})$$

$$Z'_{20} = 1/3((z'_{aa} + \alpha^2 z'_{bb} + \alpha z'_{cc}) - z'_{ab} \alpha - z'_{ac} \alpha^2 - z'_{bc})$$

$$Z'_{12} = 1/3((z'_{aa} + \alpha^2 z'_{bb} + \alpha z'_{cc}) + 2(z'_{ab} \alpha + z'_{ac} \alpha^2 + z'_{bc}))$$

$$Z'_{21} = 1/3((z'_{aa} + \alpha z'_{bb} + \alpha^2 z'_{cc}) + 2(z'_{ab} \alpha^2 + z'_{ac} \alpha + z'_{bc}))$$

e) - Impedância de seqüência nula – método aproximado

Para a representação pelo método aproximado, considerando-se as condições ideais de sistema equilibrado e linha transposta, a impedância de seqüência nula será dada por analogia com a equação (IX.24) e a impedância de seqüência positiva será representada por analogia com a equação (IX.25).

Impedância de seqüência nula:

$$Z_{00} = z_{aa}^* + 2z_{ab}^*$$

Impedância de seqüência positiva:

$$Z_{11} = z_{aa}^* - z_{ab}^*$$

Para obtenção das expressões de impedância de seqüência positiva e nula, em função das impedâncias originais do circuito trifásico, faremos as seguintes considerações:

Os condutores a , b e c possuem o mesmo “ rmg ”, o retorno pelo solo é representado por um único condutor fictício, com “ rmg ” igual a um. Ao sistema trifásico, pode-se supor a aplicação de uma tensão “ U_o ” em cada fase, a qual é percorrida por uma corrente “ I_o ”. Sendo assim, pelas leis fundamentais dos circuitos, tem-se a representação matricial, a seguir, para a linha trifásica de circuito simples e cabo pára-raios multi-aterrado,

$$\begin{bmatrix} U_o \\ U_o \\ U_o \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{aa} & z_{ab} & z_{ac} & z_{ar} \\ z_{ab} & z_{bb} & z_{bc} & z_{br} \\ z_{ac} & z_{bc} & z_{cc} & z_{cr} \\ z_{ar} & z_{br} & z_{cr} & z_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_o \\ I_o \\ I_o \\ I_r \end{bmatrix} (V/km) \quad (IX.41)$$

considerando o sistema equilibrado e a utilização de transposição na linha, tem-se:

$$z_{aa} = z_{bb} = z_{cc} = z_{aa}^*$$

$$z_{ab} = z_{ac} = z_{bc} = z_{ab}^*$$

$$z_{ar} = z_{br} = z_{cr} = z_{ar}^*$$

Desta forma obtém-se:

$$U_o = z_{aa}^* I_o + 2z_{ab}^* I_o + z_{ar}^* I_r$$

$$0 = z_{rr} I_r + 3z_{ar}^* I_o$$

Então:

$$Z_{00} = z_{aa}^* + 2z_{ab}^* - 3z_{ar}^{*2} / z_{rr} \quad (IX.42)$$

Sendo:

$$z_{aa}^* = z_{aa} - z_{ar}^2 / z_{rr}$$

$$z_{ab}^* = z_{ab} - z_{ar}^2 / z_{rr}$$

Os termos Z_{aa}^* e Z_{ab}^* são representados a partir da equação (IX.40).

f) - Impedância de seqüência positiva – método aproximado

$$Z_{11} = z_{aa}^* - z_{ab}^* = z_{aa} - z_{ab}$$

$$Z_{11} = r_{aa} + \Delta r_{aa} - \Delta r_{ab} + jX_{LS}$$

$$Z_{11} = r_{aa} + jX_{LS}$$

Sendo X_{LS} deduzido no capítulo VIII e definido por:

$$X_{LS} = \omega(l_{aa} - l_{ab}) \quad (\Omega/km)$$

Assim, obtém-se a expressão para a impedância de seqüência positiva descrita na equação (IX.38)

$$Z_{11} = r_{aa} + j4\pi 10^{-4} f \ln(dmg/rmg) \quad (\Omega/km)$$



IX.3. Linha trifásica de circuito simples com dois cabos pára-raios

A matriz de impedâncias corrigidas $[Z_c]$, definida pela equação (IX.36) é dada por:

$$[Z_c] = ([R] + k[\Delta R] + j\{[X] + k[\Delta X]\})$$

onde: $k = 8\pi \cdot 10^{-4}$

sendo:

$$[R] = \begin{bmatrix} R_{aa} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_{bb} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_{cc} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{rr} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_{ss} \end{bmatrix} (\Omega/km)$$

$$[\Delta R] = k \cdot \begin{bmatrix} \Delta R_{aa} & \Delta R_{ab} & \Delta R_{ac} & \Delta R_{ar} & \Delta R_{as} \\ \Delta R_{ba} & \Delta R_{bb} & \Delta R_{bc} & \Delta R_{br} & \Delta R_{bs} \\ \Delta R_{ca} & \Delta R_{cb} & \Delta R_{cc} & \Delta R_{cr} & \Delta R_{cs} \\ \Delta R_{ra} & \Delta R_{rb} & \Delta R_{rc} & \Delta R_{rr} & \Delta R_{rs} \\ \Delta R_{sa} & \Delta R_{sb} & \Delta R_{sc} & \Delta R_{sr} & \Delta R_{ss} \end{bmatrix} (\Omega/km)$$

$$[X] = \omega \begin{bmatrix} l_{aa} & l_{ab} & l_{ac} & l_{ar} & l_{as} \\ l_{ba} & l_{bb} & l_{bc} & l_{br} & l_{bs} \\ l_{ca} & l_{cb} & l_{cc} & l_{cr} & l_{cs} \\ l_{ra} & l_{rb} & l_{rc} & l_{rr} & l_{rs} \\ l_{sa} & l_{sb} & l_{sc} & l_{sr} & l_{ss} \end{bmatrix} (\Omega/km)$$

$$[\Delta X] = k \cdot \begin{bmatrix} \Delta X_{aa} & \Delta X_{ab} & \Delta X_{ac} & \Delta X_{ar} & \Delta X_{as} \\ \Delta X_{ba} & \Delta X_{bb} & \Delta X_{bc} & \Delta X_{br} & \Delta X_{bs} \\ \Delta X_{ca} & \Delta X_{cb} & \Delta X_{cc} & \Delta X_{cr} & \Delta X_{cs} \\ \Delta X_{ra} & \Delta X_{rb} & \Delta X_{rc} & \Delta X_{rr} & \Delta X_{rs} \\ \Delta X_{sa} & \Delta X_{sb} & \Delta X_{sc} & \Delta X_{sr} & \Delta X_{ss} \end{bmatrix} (\Omega/km)$$

A representação da matriz de impedâncias corrigidas será:

$$[Z_c] = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} & Z_{ar} & Z_{as} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} & Z_{br} & Z_{bs} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} & Z_{cr} & Z_{cs} \\ Z_{ra} & Z_{rb} & Z_{rc} & Z_{rr} & Z_{rs} \\ Z_{sa} & Z_{sb} & Z_{sc} & Z_{sr} & Z_{ss} \end{bmatrix} (\Omega/km)$$

Considerando processo semelhante à obtenção da matriz de indutâncias, tem-se a seguinte matriz equivalente de impedâncias para uma linha trifásica equivalente, sem a presença de cabos pára-raios:



$$[Z'] = [Z]$$

sendo:

$$[Z] = 1/(\tilde{\alpha}_{rr}\tilde{\alpha}_{ss} - \tilde{\alpha}_{rs}^2) \begin{bmatrix} L_1C_1 & L_1C_2 & L_1C_3 \\ L_2C_1 & L_2C_2 & L_2C_3 \\ L_3C_1 & L_3C_2 & L_3C_3 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} z'_{11} & z'_{12} & z'_{13} \\ z'_{21} & z'_{22} & z'_{23} \\ z'_{31} & z'_{32} & z'_{33} \end{bmatrix} = 1/(\tilde{\alpha}_{rr}\tilde{\alpha}_{ss} - \tilde{\alpha}_{rs}^2) \begin{bmatrix} L_1C_1 & L_1C_2 & L_1C_3 \\ L_2C_1 & L_2C_2 & L_2C_3 \\ L_3C_1 & L_3C_2 & L_3C_3 \end{bmatrix} \quad (\Omega/\text{km}) \quad (\text{IX.43})$$

Onde:

L_rC_j : representam os termos da linha “ r ” e da coluna “ j ”.

Sendo:

$$L_1C_1 = \tilde{\alpha}_{aa}(\tilde{\alpha}_{rr}\tilde{\alpha}_{ss} - \tilde{\alpha}_{rs}^2) - \tilde{\alpha}_{ar}^2\tilde{\alpha}_{ss} - \tilde{\alpha}_{as}^2\tilde{\alpha}_{rr} + 2\tilde{\alpha}_{rs}\tilde{\alpha}_{ar}\tilde{\alpha}_{as} \quad (\text{IX.44})$$

$$L_2C_1 = \tilde{\alpha}_{ab}(\tilde{\alpha}_{rr}\tilde{\alpha}_{ss} - \tilde{\alpha}_{rs}^2) - \tilde{\alpha}_{ar}\tilde{\alpha}_{br}\tilde{\alpha}_{ss} - \tilde{\alpha}_{as}\tilde{\alpha}_{bs}\tilde{\alpha}_{rr} + \tilde{\alpha}_{rs}(\tilde{\alpha}_{ar}\tilde{\alpha}_{bs} + \tilde{\alpha}_{as}\tilde{\alpha}_{br}) \quad (\text{IX.45})$$

$$L_3C_1 = \tilde{\alpha}_{ac}(\tilde{\alpha}_{rr}\tilde{\alpha}_{ss} - \tilde{\alpha}_{rs}^2) - \tilde{\alpha}_{ar}\tilde{\alpha}_{cr}\tilde{\alpha}_{ss} - \tilde{\alpha}_{as}\tilde{\alpha}_{cs}\tilde{\alpha}_{rr} + \tilde{\alpha}_{rs}(\tilde{\alpha}_{ar}\tilde{\alpha}_{cs} + \tilde{\alpha}_{as}\tilde{\alpha}_{cr}) \quad (\text{IX.46})$$

$$L_1C_2 = \tilde{\alpha}_{ab}(\tilde{\alpha}_{rr}\tilde{\alpha}_{ss} - \tilde{\alpha}_{rs}^2) - \tilde{\alpha}_{br}\tilde{\alpha}_{ar}\tilde{\alpha}_{ss} - \tilde{\alpha}_{bs}\tilde{\alpha}_{as}\tilde{\alpha}_{rr} + \tilde{\alpha}_{rs}(\tilde{\alpha}_{br}\tilde{\alpha}_{as} + \tilde{\alpha}_{bs}\tilde{\alpha}_{ar}) \quad (\text{IX.47})$$

$$L_2C_2 = \tilde{\alpha}_{bb}(\tilde{\alpha}_{rr}\tilde{\alpha}_{ss} - \tilde{\alpha}_{rs}^2) - \tilde{\alpha}_{br}^2\tilde{\alpha}_{ss} - \tilde{\alpha}_{bs}^2\tilde{\alpha}_{rr} + 2\tilde{\alpha}_{rs}\tilde{\alpha}_{br}\tilde{\alpha}_{bs} \quad (\text{IX.48})$$

$$L_3C_2 = \tilde{\alpha}_{bc}(\tilde{\alpha}_{rr}\tilde{\alpha}_{ss} - \tilde{\alpha}_{rs}^2) - \tilde{\alpha}_{br}\tilde{\alpha}_{cr}\tilde{\alpha}_{ss} - \tilde{\alpha}_{bs}\tilde{\alpha}_{cs}\tilde{\alpha}_{rr} + \tilde{\alpha}_{rs}(\tilde{\alpha}_{br}\tilde{\alpha}_{cs} + \tilde{\alpha}_{bs}\tilde{\alpha}_{cr}) \quad (\text{IX.49})$$

$$L_1C_3 = \tilde{\alpha}_{ac}(\tilde{\alpha}_{rr}\tilde{\alpha}_{ss} - \tilde{\alpha}_{rs}^2) - \tilde{\alpha}_{ar}\tilde{\alpha}_{cr}\tilde{\alpha}_{ss} - \tilde{\alpha}_{as}\tilde{\alpha}_{cs}\tilde{\alpha}_{rr} + \tilde{\alpha}_{rs}(\tilde{\alpha}_{ar}\tilde{\alpha}_{cs} + \tilde{\alpha}_{as}\tilde{\alpha}_{cr}) \quad (\text{IX.50})$$

$$L_2C_3 = \tilde{\alpha}_{bc}(\tilde{\alpha}_{rr}\tilde{\alpha}_{ss} - \tilde{\alpha}_{rs}^2) - \tilde{\alpha}_{br}\tilde{\alpha}_{cr}\tilde{\alpha}_{ss} - \tilde{\alpha}_{bs}\tilde{\alpha}_{cs}\tilde{\alpha}_{rr} + \tilde{\alpha}_{rs}(\tilde{\alpha}_{br}\tilde{\alpha}_{cs} + \tilde{\alpha}_{bs}\tilde{\alpha}_{cr}) \quad (\text{IX.51})$$

$$L_3C_3 = \tilde{\alpha}_{cc}(\tilde{\alpha}_{rr}\tilde{\alpha}_{ss} - \tilde{\alpha}_{rs}^2) - \tilde{\alpha}_{cr}^2\tilde{\alpha}_{ss} - \tilde{\alpha}_{cs}^2\tilde{\alpha}_{rr} + 2\tilde{\alpha}_{rs}\tilde{\alpha}_{cr}\tilde{\alpha}_{cs} \quad (\text{IX.52})$$

A equação da queda de tensão, representada em (IX.39) para uma linha equivalente com um circuito, sem a presença de cabos pára-raios, pode ser descrita pela equação (IX.40) como:

$$\begin{bmatrix} \Delta U_a \\ \Delta U_b \\ \Delta U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z'_{aa} & z'_{ba} & z'_{ca} \\ z'_{ab} & z'_{bb} & z'_{cb} \\ z'_{ac} & z'_{bc} & z'_{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (V/\text{km})$$

A matriz de impedâncias seqüenciais, considerando o método exato de Carson, a partir da matriz Z' representada na equação (IX.40), poderá ser obtida através da equação (IX.14), com seus termos representados pelas equações (IX.15) à (IX.23).

a) – Impedância de seqüência nula – método exato

$$Z'_{00} = 1/3((\tilde{\alpha}'_{aa} + \tilde{\alpha}'_{bb} + \tilde{\alpha}'_{cc}) + 2(\tilde{\alpha}'_{ab} + \tilde{\alpha}'_{bc} + \tilde{\alpha}'_{ac}))$$

b) – Impedância de seqüência positiva – método exato

$$Z'_{11} = 1/3((\tilde{\alpha}'_{aa} + \tilde{\alpha}'_{bb} + \tilde{\alpha}'_{cc}) - (\tilde{\alpha}'_{ab} + \tilde{\alpha}'_{bc} + \tilde{\alpha}'_{ac}))$$

c) – Impedância de seqüência negativa – método exato

$$Z'_{22} = 1/3((\tilde{\alpha}'_{aa} + \tilde{\alpha}'_{bb} + \tilde{\alpha}'_{cc}) - (\tilde{\alpha}'_{ab} + \tilde{\alpha}'_{bc} + \tilde{\alpha}'_{ac}))$$



d) - Impedâncias mútuas entre as seqüências

$$Z'_{01} = 1/3((\tilde{z}'_{aa} + \alpha^2 \tilde{z}'_{bb} + \alpha \tilde{z}'_{cc}) - \tilde{z}'_{ab} \alpha - \tilde{z}'_{ac} \alpha^2 - \tilde{z}'_{bc})$$

$$Z'_{10} = 1/3((\tilde{z}'_{aa} + \alpha \tilde{z}'_{bb} + \alpha^2 \tilde{z}'_{cc}) - \tilde{z}'_{ab} \alpha^2 - \tilde{z}'_{ac} \alpha - \tilde{z}'_{bc})$$

$$Z'_{02} = 1/3((\tilde{z}'_{aa} + \alpha \tilde{z}'_{bb} + \alpha^2 \tilde{z}'_{cc}) - \tilde{z}'_{ab} \alpha - \tilde{z}'_{ac} \alpha^2 - \tilde{z}'_{bc})$$

$$Z'_{20} = 1/3((\tilde{z}'_{aa} + \alpha^2 \tilde{z}'_{bb} + \alpha \tilde{z}'_{cc}) - \tilde{z}'_{ab} \alpha^2 - \tilde{z}'_{ac} \alpha - \tilde{z}'_{bc})$$

$$Z'_{12} = 1/3((\tilde{z}'_{aa} + \alpha^2 \tilde{z}'_{bb} + \alpha \tilde{z}'_{cc}) + 2(\tilde{z}'_{ab} \alpha + \tilde{z}'_{ac} \alpha^2 + \tilde{z}'_{bc}))$$

$$Z'_{21} = 1/3((\tilde{z}'_{aa} + \alpha^2 \tilde{z}'_{bb} + \alpha \tilde{z}'_{cc}) + 2(\tilde{z}'_{ab} \alpha^2 + \tilde{z}'_{ac} \alpha + \tilde{z}'_{bc}))$$

e) - Impedância de seqüência nula – método aproximado

Para a representação pelo método aproximado, considerando-se as condições ideais de sistema equilibrado e linha transposta, a impedância de seqüência nula será dada por analogia à equação (IX.24) e a impedância de seqüência positiva será representada por analogia à equação (IX.25).

Impedância de seqüência nula:

$$Z'_{00} = \tilde{z}'_{aa} + 2\tilde{z}'_{ab}$$

Impedância de seqüência positiva:

$$Z'_{11} = \tilde{z}'_{aa} - \tilde{z}'_{ab}$$

Pelos mesmos critérios considerados no item IX.2, desenvolvem-se as expressões para o circuito simples e dois cabos pára-raios.

$$\begin{bmatrix} U_o \\ U_o \\ U_o \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{aa} & z_{ab} & z_{ac} & z_{ar} & z_{as} \\ z_{ab} & z_{bb} & z_{bc} & z_{br} & z_{bs} \\ z_{ac} & z_{bc} & z_{cc} & z_{cr} & z_{cs} \\ z_{ar} & z_{br} & z_{cr} & z_{rr} & z_{rs} \\ z_{as} & z_{bs} & z_{cs} & z_{sr} & z_{ss} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_o \\ I_o \\ I_o \\ I_r \\ I_s \end{bmatrix} \quad (V/km) \quad (IX.53)$$

considerando o sistema equilibrado e a utilização de transposição na linha, tem-se:

$$\tilde{z}_{aa} = \tilde{z}_{bb} = \tilde{z}_{cc} = \tilde{z}_{aa}^*$$

$$\tilde{z}_{ab} = \tilde{z}_{ac} = \tilde{z}_{bc} = \tilde{z}_{ab}^*$$

$$\tilde{z}_{ar} = \tilde{z}_{br} = \tilde{z}_{cr} = \tilde{z}_{as} = \tilde{z}_{bs} = \tilde{z}_{cs} = \tilde{z}_{ar}^*$$

$$\tilde{z}_{rr} = \tilde{z}_{ss} = \tilde{z}_{rr}^*$$

tem-se:

$$U_o = \tilde{z}_{aa}^* I_o + 2\tilde{z}_{ab}^* I_o + \tilde{z}_{ar}^* (I_r + I_s)$$

$$0 = (\tilde{z}_{rr} I_r + \tilde{z}_{ss} I_s) + 6\tilde{z}_{ar}^* I_o$$

$$Z_{00} = \tilde{z}_{aa}^* + 2\tilde{z}_{ab}^* - 6\tilde{z}_{ar}^{*2} / (\tilde{z}_{rr} + \tilde{z}_{ss}) \quad (IX.54)$$

Das equações (IX.44) e (IX.45), tem-se:

$$\tilde{z}_{aa}^* = (\tilde{z}_{aa}(\tilde{z}_{rr}^2 - \tilde{z}_{ss}^2) - 2\tilde{z}_{ar}^2 \tilde{z}_{rr} + 2\tilde{z}_{rs} \tilde{z}_{ar}^2) / (\tilde{z}_{rr}^2 - \tilde{z}_{ss}^2)$$

$$\tilde{z}_{ab}^* = (\tilde{z}_{ab}(\tilde{z}_{rr}^2 - \tilde{z}_{rs}^2) - 2\tilde{z}_{ar}^2\tilde{z}_{rs} + 2\tilde{z}_{rs}\tilde{z}_{ar}^2) / (\tilde{z}_{rr}^2 - \tilde{z}_{rs}^2)$$

Termos representados a partir da equação (IX.40)

f) - Impedância de sequência positiva – método aproximado

$$Z_{11} = \tilde{z}_{aa}^* - \tilde{z}_{ab}^* = (\tilde{z}_{aa} - \tilde{z}_{ab})$$

$$Z_{11} = r_{aa} + \Delta r_{aa} - \Delta r_{ab} + jX_{LS}$$

$$Z_{11} = r_{aa} + jX_{LS}$$

Sendo X_{LS} deduzido no capítulo VIII e definido por:

$$X_{LS} = \omega \cdot (l_{aa} - l_{ab}) \quad (\Omega/km)$$

Assim, obtém-se a expressão para a impedância de sequência positiva pela equação (IX.38)

$$Z_{11} = r_{aa} + j4\pi 10^{-4} \cdot f \ln (dmg/rmg) \quad (\Omega/km)$$

IX.4. Linha trifásica de circuito duplo com um cabo pára-raios

A matriz de impedâncias corrigidas $[Zc]$, definida pela equação (IX.36) é dada por:

$$[Zc] = [R] + k[\Delta R] + j\{[X] + k[\Delta X]\}$$

onde: $k = 8\pi f 10^{-4}$

sendo:

$$[R] = \begin{bmatrix} R_{aa} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_{bb} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_{cc} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{rr} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_{dd} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_{ee} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_{ff} \end{bmatrix} \quad (\Omega/km)$$

$$[\Delta R] = k \begin{bmatrix} \Delta R_{aa} & \Delta R_{ab} & \Delta R_{ac} & \Delta R_{ar} & \Delta R_{ad} & \Delta R_{ae} & \Delta R_{af} \\ \Delta R_{ba} & \Delta R_{bb} & \Delta R_{bc} & \Delta R_{br} & \Delta R_{bd} & \Delta R_{be} & \Delta R_{bf} \\ \Delta R_{ca} & \Delta R_{cb} & \Delta R_{cc} & \Delta R_{cr} & \Delta R_{cd} & \Delta R_{ce} & \Delta R_{cf} \\ \Delta R_{ra} & \Delta R_{rb} & \Delta R_{rc} & \Delta R_{rr} & \Delta R_{rd} & \Delta R_{re} & \Delta R_{rf} \\ \Delta R_{da} & \Delta R_{db} & \Delta R_{dc} & \Delta R_{dr} & \Delta R_{dd} & \Delta R_{de} & \Delta R_{df} \\ \Delta R_{ea} & \Delta R_{eb} & \Delta R_{ec} & \Delta R_{er} & \Delta R_{ed} & \Delta R_{ee} & \Delta R_{ef} \\ \Delta R_{fa} & \Delta R_{fb} & \Delta R_{fc} & \Delta R_{fr} & \Delta R_{fd} & \Delta R_{fe} & \Delta R_{ff} \end{bmatrix} \quad (\Omega/km)$$

$$[X] = \omega \begin{bmatrix} l_{aa} & l_{ab} & l_{ac} & l_{ar} & l_{ad} & l_{ae} & l_{af} \\ l_{ba} & l_{bb} & l_{bc} & l_{br} & l_{bd} & l_{be} & l_{bf} \\ l_{ca} & l_{cb} & l_{cc} & l_{cr} & l_{cd} & l_{ce} & l_{cf} \\ l_{ra} & l_{rb} & l_{rc} & l_{rr} & l_{rd} & l_{re} & l_{rf} \\ l_{da} & l_{db} & l_{dc} & l_{dr} & l_{dd} & l_{de} & l_{df} \\ l_{ea} & l_{eb} & l_{ec} & l_{er} & l_{ed} & l_{ee} & l_{ef} \\ l_{fa} & l_{fb} & l_{fc} & l_{fr} & l_{fd} & l_{fe} & l_{ff} \end{bmatrix} (\Omega/km)$$

$$[\Delta X] = k \begin{bmatrix} \Delta X_{aa} & \Delta X_{ab} & \Delta X_{ac} & \Delta X_{ar} & \Delta X_{ad} & \Delta X_{ae} & \Delta X_{af} \\ \Delta X_{ba} & \Delta X_{bb} & \Delta X_{bc} & \Delta X_{br} & \Delta X_{bd} & \Delta X_{be} & \Delta X_{bf} \\ \Delta X_{ca} & \Delta X_{cb} & \Delta X_{cc} & \Delta X_{cr} & \Delta X_{cd} & \Delta X_{ce} & \Delta X_{cf} \\ \Delta X_{ra} & \Delta X_{rb} & \Delta X_{rc} & \Delta X_{rr} & \Delta X_{rd} & \Delta X_{re} & \Delta X_{rf} \\ \Delta X_{da} & \Delta X_{db} & \Delta X_{dc} & \Delta X_{dr} & \Delta X_{dd} & \Delta X_{de} & \Delta X_{df} \\ \Delta X_{ea} & \Delta X_{eb} & \Delta X_{ec} & \Delta X_{er} & \Delta X_{ed} & \Delta X_{ee} & \Delta X_{ef} \\ \Delta X_{fa} & \Delta X_{fb} & \Delta X_{fc} & \Delta X_{fr} & \Delta X_{fd} & \Delta X_{fe} & \Delta X_{ff} \end{bmatrix} (\Omega/km)$$

A representação da matriz de impedâncias corrigidas $[Z_c]$ será:

$$[Z_c] = \begin{bmatrix} z_{aa} & z_{ab} & z_{ac} & z_{ar} & z_{ad} & z_{ae} & z_{af} \\ z_{ba} & z_{bb} & z_{bc} & z_{br} & z_{bd} & z_{be} & z_{bf} \\ z_{ca} & z_{cb} & z_{cc} & z_{cr} & z_{cd} & z_{ce} & z_{cf} \\ z_{ra} & z_{rb} & z_{rc} & z_{rr} & z_{rd} & z_{re} & z_{rf} \\ z_{da} & z_{db} & z_{dc} & z_{dr} & z_{dd} & z_{de} & z_{df} \\ z_{ea} & z_{eb} & z_{ec} & z_{er} & z_{ed} & z_{ee} & z_{ef} \\ z_{fa} & z_{fb} & z_{fc} & z_{fr} & z_{fd} & z_{fe} & z_{ff} \end{bmatrix} (\Omega/km)$$

Considerando processo semelhante à obtenção da matriz de indutâncias, tem-se a seguinte matriz equivalente de impedâncias para uma linha trifásica equivalente, sem a presença de cabos pára-raios:

$[Z'_c] = [Z']$ onde:

$$[Z'] = \begin{bmatrix} (z_{aa} + z_{ad}) & (z_{ab} + z_{ae}) & (z_{ac} + z_{af}) \\ (z_{ba} + z_{bd}) & (z_{bb} + z_{be}) & (z_{bc} + z_{bf}) \\ (z_{ca} + z_{cd}) & (z_{cb} + z_{ce}) & (z_{cc} + z_{cf}) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} (z_{ap}^2 + z_{rd}z_{ar})/z_{rr} & (z_{br}z_{ar} + z_{rd}z_{br})/z_{rr} \\ (z_{br}z_{ar} + z_{re}z_{ar})/z_{rr} & (z_{br}^2 + z_{re}z_{br})/z_{rr} \\ (z_{cr}z_{ar} + z_{rf}z_{ar})/z_{rr} & (z_{br}z_{cr} + z_{rf}z_{br})/z_{rr} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} (z_{cr}z_{ar} + z_{rd}z_{cr})/z_{rr} \\ (z_{cr}z_{br} + z_{re}z_{cr})/z_{rr} \\ (z_{cr}^2 + z_{rf}z_{cr})/z_{rr} \end{bmatrix} (\Omega/km)$$



A equação da queda de tensão para uma linha equivalente com um circuito, sem a presença de cabos pára-raios será:

$$\begin{bmatrix} \Delta U_a \\ \Delta U_b \\ \Delta U_c \end{bmatrix} = \left\{ \begin{bmatrix} (z_{aa} + z_{ad}) (z_{ab} + z_{ae}) (z_{ac} + z_{af}) \\ (z_{ba} + z_{bd}) (z_{bb} + z_{be}) (z_{bc} + z_{bf}) \\ (z_{ca} + z_{cd}) (z_{cb} + z_{ce}) (z_{cc} + z_{cf}) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} (z_{ar}^2 + z_{rd} z_{ar}) / z_{rr} \\ (z_{br} z_{ar} + z_{re} z_{ar}) / z_{rr} \\ (z_{cr} z_{ar} + z_{rf} z_{ar}) / z_{rr} \end{bmatrix} \right. \\ \left. \begin{bmatrix} (z_{br} z_{ar} + z_{rd} z_{br}) / z_{rr} & (z_{cr} z_{ar} + z_{rd} z_{cr}) / z_{rr} \\ (z_{br}^2 + z_{re} z_{br}) / z_{rr} & (z_{cr} z_{br} + z_{re} z_{cr}) / z_{rr} \\ (z_{br} z_{cr} + z_{rf} z_{br}) / z_{rr} & (z_{rp}^2 + z_{rf} z_{cr}) / z_{rr} \end{bmatrix} \right\} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} (V/km) \quad (IX.55)$$

A equação da queda de tensão, representada em (IX.39) para uma linha equivalente com um circuito, sem a presença de cabos pára-raios, pode ser descrita pela equação (IX.40) como:

$$\begin{bmatrix} \Delta U_a \\ \Delta U_b \\ \Delta U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z'_{aa} & z'_{ba} & z'_{ca} \\ z'_{ab} & z'_{bb} & z'_{cb} \\ z'_{ac} & z'_{bc} & z'_{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} (V/km)$$

A matriz de impedâncias seqüenciais, considerando o método de Carson, a partir da matriz $[Z]$ representada na equação (IX.40), poderá ser obtida através da equação (IX.14), com seus termos representados pelas equações (IX.15) à (IX.23).

a) – Impedância de seqüência nula – método exato

$$Z'_{00} = 1/3((z'_{aa} + z'_{bb} + z'_{cc}) + 2(z'_{ab} + z'_{bc} + z'_{ac}))$$

b) – Impedância de seqüência positiva – método exato

$$Z'_{11} = 1/3((z'_{aa} + z'_{bb} + z'_{cc}) - (z'_{ab} + z'_{bc} + z'_{ac}))$$

c) – Impedância de seqüência negativa – método exato

$$Z'_{22} = 1/3((z'_{aa} + z'_{bb} + z'_{cc}) - (z'_{ab} + z'_{bc} + z'_{ac}))$$

d) - Impedâncias mútuas entre as seqüências

$$Z'_{01} = 1/3((z'_{aa} + \alpha^2 z'_{bb} + \alpha z'_{cc} - z'_{ab} \alpha - z'_{ac} \alpha^2 - z'_{bc}))$$

$$Z'_{10} = 1/3((z'_{aa} + \alpha z'_{bb} + \alpha^2 z'_{cc} - z'_{ab} \alpha^2 - z'_{ac} \alpha - z'_{bc}))$$

$$Z'_{02} = 1/3((z'_{aa} + \alpha z'_{bb} + \alpha^2 z'_{cc} - z'_{ab} \alpha^2 - z'_{ac} \alpha - z'_{bc}))$$

$$Z'_{20} = 1/3((z'_{aa} + \alpha^2 z'_{bb} + \alpha z'_{cc}) - z'_{ab} \alpha - z'_{ac} \alpha^2 - z'_{bc})$$

$$Z'_{12} = 1/3((z'_{aa} + \alpha^2 z'_{bb} + \alpha z'_{cc}) + 2(z'_{ab} \alpha + z'_{ac} \alpha^2 + z'_{bc}))$$

$$Z'_{21} = 1/3((z'_{aa} + \alpha^2 z'_{bb} + \alpha z'_{cc}) + 2(z'_{ab} \alpha^2 + z'_{ac} \alpha + z'_{bc}))$$

e) - Impedância de seqüência nula – método aproximado

Para a representação pelo método aproximado, considerando-se as condições ideais de sistema equilibrado e linha transposta, a impedância de seqüência nula será dada por analogia



com a equação (IX.24), e a impedância de sequência positiva será representada por analogia com a equação (IX.25).

Impedância de sequência nula:

$$Z_{00} = \tilde{z}_{aa}^* + 2\tilde{z}_{ab}^*$$

Impedância de sequência positiva:

$$Z'_{11} = \tilde{z}_{aa}^* - \tilde{z}_{ab}^*$$

Considerando as hipóteses indicadas nos casos para circuito simples, tem-se o seguinte desenvolvimento para a obtenção das impedâncias de sequência nula e positiva, baseadas nos parâmetros originais para uma linha transposta, equilibrada, circuito duplo, com um cabo pára-raios.

Admitindo-se que a linha é simétrica em relação ao seu eixo longitudinal, que os circuitos são iguais, injetando em todas as fases a corrente de sequência zero " I_0 ", sendo usado o processo de transposição das fases, serão somadas: a impedância mútua, calculada a seguir, com a impedância própria calculada no caso de circuito simples com um cabo pára-raios.

$$\begin{bmatrix} U_o \\ U_o \\ U_o \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{ad} & Z_{ae} & Z_{af} & Z_{ar} \\ Z_{bd} & Z_{be} & Z_{bf} & Z_{br} \\ Z_{cd} & Z_{ce} & Z_{cf} & Z_{cr} \\ Z_{ar} & Z_{br} & Z_{cr} & Z_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_o \\ I_o \\ I_o \\ I_r \end{bmatrix} \quad (V/km) \quad (IX.56)$$

Por simetria entre os circuitos, tem-se:

$$\tilde{z}_{ad} = \tilde{z}_{be} = \tilde{z}_{cf} = \tilde{z}_{ad}^*$$

$$\tilde{z}_{ae} = \tilde{z}_{bf} = \tilde{z}_{cd} = \tilde{z}_{df} = \tilde{z}_{ad} = \tilde{z}_{ae}^* = \tilde{z}_{ae}^*$$

$$\tilde{z}_{ar} = \tilde{z}_{br} = \tilde{z}_{cr} = \tilde{z}_{dr} = \tilde{z}_{ar} = \tilde{z}_{ar}^* = \tilde{z}_{ar}^*$$

Logo:

$$U_o = \tilde{z}_{ad}^* I_o + 2\tilde{z}_{ae}^* I_o + \tilde{z}_{ar}^* I_r$$

$$0 = \tilde{z}_{rr} I_r + 3\tilde{z}_{ar}^* I_o$$

Então:

$$Z_{00}^{II} = \tilde{z}_{ad}^* + 2\tilde{z}_{ae}^* - 3\tilde{z}_{ar}^{*2} / \tilde{z}_{rr} \quad (IX.57)$$

Sendo:

$$\tilde{z}_{ad}^* = (\tilde{z}_{ad} + \tilde{z}_{ad}) - (2\tilde{z}_{ar}^2) / \tilde{z}_{rr} \quad (IX.58)$$

$$\tilde{z}_{ab}^* = (\tilde{z}_{ab} + \tilde{z}_{ae}) - (2\tilde{z}_{ar}^2) / \tilde{z}_{rr} \quad (IX.59)$$

Expressões obtidas através da matriz representada na equação (IX.55)

$$Z_{00} = Z_{00}^I + Z_{00}^{II} \quad (IX.60)$$

Onde:

Z_{00}^I = impedância própria de sequência zero para o circuito I



Z_{00}^{II} = impedância própria de sequência zero para o circuito II

$$Z_{00} = \dot{z}_{aa}^* + 2\dot{z}_{ab}^* - 3\dot{z}_{ar}^{*2} / \dot{z}_{rr} + \dot{z}_{ad}^* + 2\dot{z}_{ae}^* - 3\dot{z}_{ar}^{*2} / \dot{z}_{rr}$$

$$Z_{00} = (\dot{z}_{aa}^* + \dot{z}_{ad}^*) + 2(\dot{z}_{ab}^* + \dot{z}_{ae}^*) - 6\dot{z}_{ar}^{*2} / \dot{z}_{rr}$$

Deduzindo-se pela expressão da impedância de sequência nula, obtém-se:

$$Z_{00} = \dot{z}_{aa}^* + 2\dot{z}_{ab}^*$$

$$Z_{00} = (\dot{z}_{aa}^* + \dot{z}_{ad}^*) - 2\dot{z}_{ar}^{*2} / \dot{z}_{rr} + 2(\dot{z}_{ab}^* + \dot{z}_{ae}^*) - 4\dot{z}_{ar}^{*2} / \dot{z}_{rr}$$

$$Z_{00} = (\dot{z}_{aa}^* + \dot{z}_{ad}^*) + 2(\dot{z}_{ab}^* + \dot{z}_{ae}^*) - 6\dot{z}_{ar}^{*2} / \dot{z}_{rr} \quad (\text{IX.61})$$

f) - Impedância de sequência positiva – método aproximado

$$Z_{11} = \dot{z}_{aa}^* - \dot{z}_{ab}^*$$

$$Z_{11} = (\dot{z}_{aa}^* + \dot{z}_{ad}^*) - (2\dot{z}_{ar}^{*2} / \dot{z}_{rr} - (\dot{z}_{ab}^* + \dot{z}_{ae}^*) + (2\dot{z}_{ar}^{*2} / \dot{z}_{rr}))$$

$$Z_{11} = (\dot{z}_{aa}^* - \dot{z}_{ab}^*) + (\dot{z}_{ad}^* - \dot{z}_{ae}^*)$$

$$Z_{11} = r_{aa} + jX_{LSI} + jX_{LSII} \quad (\text{IX.62})$$

$$Z_{11} = r_{aa} + j4\pi 10^{-4} f \ln(dm_g / rm_g) + j4\pi 10^{-4} f \ln(D_{II} / D_I)$$

$$Z_{11} = r_{aa} + j4\pi 10^{-4} f \ln(dm_g D_{II} / rm_g D_I) \quad (\text{IX.63})$$

conforme a expressão para reatância indutiva definida no capítulo VIII.

IX.5. Linha trifásica de circuito duplo com dois cabos pára-raios

A matriz de impedâncias corrigidas $[Z_c]$, conforme a equação (IX.36)

$$[Z_c] = [R] + k[\Delta R] + j\{[X] + k[\Delta X]\}$$

$$\text{onde: } k = 8\pi f 10^{-4}$$

sendo:

$$[R] = \begin{bmatrix} R_{aa} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_{bb} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_{cc} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{rr} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_{ss} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_{dd} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_{ee} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_{ff} \end{bmatrix} \quad (\Omega / km)$$



$$[\Delta R] = k \begin{bmatrix} \Delta R_{aa} & \Delta R_{ab} & \Delta R_{ac} & \Delta R_{ar} & \Delta R_{as} & \Delta R_{ad} & \Delta R_{ae} & \Delta R_{af} \\ \Delta R_{ba} & \Delta R_{bb} & \Delta R_{bc} & \Delta R_{br} & \Delta R_{bs} & \Delta R_{bd} & \Delta R_{be} & \Delta R_{bf} \\ \Delta R_{ca} & \Delta R_{cb} & \Delta R_{cc} & \Delta R_{cr} & \Delta R_{cs} & \Delta R_{cd} & \Delta R_{ce} & \Delta R_{cf} \\ \Delta R_{ra} & \Delta R_{rb} & \Delta R_{rc} & \Delta R_{rr} & \Delta R_{rs} & \Delta R_{rd} & \Delta R_{re} & \Delta R_{rf} \\ \Delta R_{sa} & \Delta R_{sb} & \Delta R_{sc} & \Delta R_{sr} & \Delta R_{ss} & \Delta R_{sd} & \Delta R_{se} & \Delta R_{sf} \\ \Delta R_{da} & \Delta R_{db} & \Delta R_{dc} & \Delta R_{dr} & \Delta R_{ds} & \Delta R_{dd} & \Delta R_{de} & \Delta R_{df} \\ \Delta R_{ea} & \Delta R_{eb} & \Delta R_{ec} & \Delta R_{er} & \Delta R_{es} & \Delta R_{ed} & \Delta R_{ee} & \Delta R_{ef} \\ \Delta R_{fa} & \Delta R_{fb} & \Delta R_{fc} & \Delta R_{fr} & \Delta R_{fs} & \Delta R_{fd} & \Delta R_{fe} & \Delta R_{ff} \end{bmatrix} (\Omega/km)$$

$$[X] = \omega \begin{bmatrix} x_{aa} & x_{ab} & x_{ac} & x_{ar} & x_{as} & x_{ad} & x_{ae} & x_{af} \\ x_{ba} & x_{bb} & x_{bc} & x_{br} & x_{bs} & x_{bd} & x_{be} & x_{bf} \\ x_{ca} & x_{cb} & x_{cc} & x_{cr} & x_{cs} & x_{cd} & x_{ce} & x_{cf} \\ x_{ra} & x_{rb} & x_{rc} & x_{rr} & x_{rs} & x_{rd} & x_{re} & x_{rf} \\ x_{sa} & x_{sb} & x_{sc} & x_{sr} & x_{ss} & x_{sd} & x_{se} & x_{sf} \\ x_{da} & x_{db} & x_{dc} & x_{dr} & x_{ds} & x_{dd} & x_{de} & x_{df} \\ x_{ea} & x_{eb} & x_{ec} & x_{er} & x_{es} & x_{ed} & x_{ee} & x_{ef} \\ x_{fa} & x_{fb} & x_{fc} & x_{fr} & x_{fs} & x_{fd} & x_{fe} & x_{ff} \end{bmatrix} (\Omega/km)$$

$$[\Delta X] = k \begin{bmatrix} \Delta X_{aa} & \Delta X_{ab} & \Delta X_{ac} & \Delta X_{ar} & \Delta X_{as} & \Delta X_{ad} & \Delta X_{ae} & \Delta X_{af} \\ \Delta X_{ba} & \Delta X_{bb} & \Delta X_{bc} & \Delta X_{br} & \Delta X_{bs} & \Delta X_{bd} & \Delta X_{be} & \Delta X_{bf} \\ \Delta X_{ca} & \Delta X_{cb} & \Delta X_{cc} & \Delta X_{cr} & \Delta X_{cs} & \Delta X_{cd} & \Delta X_{ce} & \Delta X_{cf} \\ \Delta X_{ra} & \Delta X_{rb} & \Delta X_{rc} & \Delta X_{rr} & \Delta X_{rs} & \Delta X_{rd} & \Delta X_{re} & \Delta X_{rf} \\ \Delta X_{sa} & \Delta X_{sb} & \Delta X_{sc} & \Delta X_{sr} & \Delta X_{ss} & \Delta X_{sd} & \Delta X_{se} & \Delta X_{sf} \\ \Delta X_{da} & \Delta X_{db} & \Delta X_{dc} & \Delta X_{dr} & \Delta X_{ds} & \Delta X_{dd} & \Delta X_{de} & \Delta X_{df} \\ \Delta X_{ea} & \Delta X_{eb} & \Delta X_{ec} & \Delta X_{er} & \Delta X_{es} & \Delta X_{ed} & \Delta X_{ee} & \Delta X_{ef} \\ \Delta X_{fa} & \Delta X_{fb} & \Delta X_{fc} & \Delta X_{fr} & \Delta X_{fs} & \Delta X_{fd} & \Delta X_{fe} & \Delta X_{ff} \end{bmatrix} (\Omega/km)$$

A representação da matriz de impedâncias corrigidas $[Z_c]$ será:

$$[Z_c] = \begin{bmatrix} z_{aa} & z_{ab} & z_{ac} & z_{ar} & z_{as} & z_{ad} & z_{ae} & z_{af} \\ z_{ba} & z_{bb} & z_{bc} & z_{br} & z_{bs} & z_{bd} & z_{be} & z_{bf} \\ z_{ca} & z_{cb} & z_{cc} & z_{cr} & z_{cs} & z_{cd} & z_{ce} & z_{cf} \\ z_{ra} & z_{rb} & z_{rc} & z_{rr} & z_{rs} & z_{rd} & z_{re} & z_{rf} \\ z_{sa} & z_{sb} & z_{sc} & z_{sr} & z_{ss} & z_{sd} & z_{se} & z_{sf} \\ z_{da} & z_{db} & z_{dc} & z_{dr} & z_{ds} & z_{dd} & z_{de} & z_{df} \\ z_{ea} & z_{eb} & z_{ec} & z_{er} & z_{es} & z_{ed} & z_{ee} & z_{ef} \\ z_{fa} & z_{fb} & z_{fc} & z_{fr} & z_{fs} & z_{fd} & z_{fe} & z_{ff} \end{bmatrix} (\Omega/km)$$



Considerando processo semelhante à obtenção da matriz de indutâncias, tem-se a seguinte matriz equivalente de impedâncias, da mesma forma que na equação (IX.43), para uma linha trifásica equivalente, sem a presença de cabos pára-raios, isto é:

$[Z'] = [Z']$ onde:

$$[Z'] = 1/(\tilde{z}_{rr}\tilde{z}_{ss} - \tilde{z}_{rs}^2) \begin{bmatrix} L_1 C_1 & L_1 C_2 & L_1 C_3 \\ L_2 C_1 & L_2 C_2 & L_2 C_3 \\ L_3 C_1 & L_3 C_2 & L_3 C_3 \end{bmatrix} (\Omega/km)$$

$$\begin{bmatrix} z'_{11} & z'_{12} & z'_{13} \\ z'_{21} & z'_{22} & z'_{23} \\ z'_{31} & z'_{32} & z'_{33} \end{bmatrix} = 1/(\tilde{z}_{rr}\tilde{z}_{ss} - \tilde{z}_{rs}^2) \begin{bmatrix} L_1 C_1 & L_1 C_2 & L_1 C_3 \\ L_2 C_1 & L_2 C_2 & L_2 C_3 \\ L_3 C_1 & L_3 C_2 & L_3 C_3 \end{bmatrix} (\Omega/km)$$

Onde:

$L_i C_j$: representam os termos da linha “i” e da coluna “j”.

Sendo:

$$L_1 C_1 = (\tilde{z}_{aa} + \tilde{z}_{ad})(\tilde{z}_{rr}\tilde{z}_{ss} - \tilde{z}_{rs}^2) - \tilde{z}_{ar}^2 \tilde{z}_{ss} - \tilde{z}_{as}^2 \tilde{z}_{rr} - \tilde{z}_{rs} \tilde{z}_{ar} \tilde{z}_{dr} - \tilde{z}_{rs} \tilde{z}_{as} \tilde{z}_{ds} + \tilde{z}_{rs} \tilde{z}_{dr} \tilde{z}_{as} + \tilde{z}_{rs} \tilde{z}_{ds} \tilde{z}_{ar} + 2\tilde{z}_{rs} \tilde{z}_{ar} \tilde{z}_{as} \quad (IX.64)$$

$$L_2 C_1 = (\tilde{z}_{ab} + \tilde{z}_{bd})(\tilde{z}_{rr}\tilde{z}_{ss} - \tilde{z}_{rs}^2) - \tilde{z}_{ar} \tilde{z}_{br} \tilde{z}_{ss} - \tilde{z}_{as} \tilde{z}_{bs} \tilde{z}_{rr} - \tilde{z}_{rs} \tilde{z}_{br} \tilde{z}_{dr} - \tilde{z}_{rs} \tilde{z}_{bs} \tilde{z}_{ds} + \tilde{z}_{rs} \tilde{z}_{dr} \tilde{z}_{bs} + \tilde{z}_{rs} \tilde{z}_{ds} \tilde{z}_{br} + \tilde{z}_{rs} (\tilde{z}_{ar} \tilde{z}_{bs} + \tilde{z}_{as} \tilde{z}_{br}) \quad (IX.65)$$

$$L_3 C_1 = (\tilde{z}_{ac} + \tilde{z}_{cd})(\tilde{z}_{rr}\tilde{z}_{ss} - \tilde{z}_{rs}^2) - \tilde{z}_{ar} \tilde{z}_{cr} \tilde{z}_{ss} - \tilde{z}_{as} \tilde{z}_{cs} \tilde{z}_{rr} - \tilde{z}_{rs} \tilde{z}_{cr} \tilde{z}_{dr} - \tilde{z}_{rs} \tilde{z}_{cs} \tilde{z}_{ds} + \tilde{z}_{rs} \tilde{z}_{dr} \tilde{z}_{cs} + \tilde{z}_{rs} \tilde{z}_{ds} \tilde{z}_{cr} + \tilde{z}_{rs} (\tilde{z}_{ar} \tilde{z}_{cs} + \tilde{z}_{as} \tilde{z}_{cr}) \quad (IX.66)$$

$$L_1 C_2 = (\tilde{z}_{ab} + \tilde{z}_{bd})(\tilde{z}_{rr}\tilde{z}_{ss} - \tilde{z}_{rs}^2) - \tilde{z}_{br} \tilde{z}_{ar} \tilde{z}_{ss} - \tilde{z}_{bs} \tilde{z}_{as} \tilde{z}_{rr} - \tilde{z}_{rs} \tilde{z}_{ar} \tilde{z}_{dr} - \tilde{z}_{rs} \tilde{z}_{as} \tilde{z}_{ds} + \tilde{z}_{rs} \tilde{z}_{ds} \tilde{z}_{ar} + \tilde{z}_{rs} \tilde{z}_{dr} \tilde{z}_{as} + \tilde{z}_{rs} (\tilde{z}_{br} \tilde{z}_{as} + \tilde{z}_{bs} \tilde{z}_{ar}) \quad (IX.67)$$

$$L_2 C_2 = (\tilde{z}_{bb} + \tilde{z}_{bd})(\tilde{z}_{rr}\tilde{z}_{ss} - \tilde{z}_{rs}^2) - \tilde{z}_{br}^2 \tilde{z}_{ss} - \tilde{z}_{bs}^2 \tilde{z}_{rr} - \tilde{z}_{rs} \tilde{z}_{br} \tilde{z}_{dr} - \tilde{z}_{rs} \tilde{z}_{bs} \tilde{z}_{ds} + \tilde{z}_{rs} \tilde{z}_{ds} \tilde{z}_{br} + \tilde{z}_{rs} \tilde{z}_{dr} \tilde{z}_{bs} + 2\tilde{z}_{rs} \tilde{z}_{br} \tilde{z}_{bs} \quad (IX.68)$$

$$L_3 C_2 = (\tilde{z}_{bc} + \tilde{z}_{cd})(\tilde{z}_{rr}\tilde{z}_{ss} - \tilde{z}_{rs}^2) - \tilde{z}_{br} \tilde{z}_{cr} \tilde{z}_{ss} - \tilde{z}_{bs} \tilde{z}_{cs} \tilde{z}_{rr} - \tilde{z}_{rs} \tilde{z}_{cr} \tilde{z}_{dr} - \tilde{z}_{rs} \tilde{z}_{cs} \tilde{z}_{ds} + \tilde{z}_{rs} \tilde{z}_{ds} \tilde{z}_{br} + \tilde{z}_{rs} \tilde{z}_{dr} \tilde{z}_{bs} + \tilde{z}_{rs} (\tilde{z}_{br} \tilde{z}_{cs} + \tilde{z}_{bs} \tilde{z}_{cr}) \quad (IX.69)$$

$$L_1 C_3 = (\tilde{z}_{ac} + \tilde{z}_{cd})(\tilde{z}_{rr}\tilde{z}_{ss} - \tilde{z}_{rs}^2) - \tilde{z}_{ar} \tilde{z}_{cr} \tilde{z}_{ss} - \tilde{z}_{as} \tilde{z}_{cs} \tilde{z}_{rr} - \tilde{z}_{rs} \tilde{z}_{cr} \tilde{z}_{dr} - \tilde{z}_{rs} \tilde{z}_{cs} \tilde{z}_{ds} + \tilde{z}_{rs} \tilde{z}_{ds} \tilde{z}_{ar} + \tilde{z}_{rs} \tilde{z}_{dr} \tilde{z}_{as} + \tilde{z}_{rs} (\tilde{z}_{ar} \tilde{z}_{cs} + \tilde{z}_{as} \tilde{z}_{cr}) \quad (IX.70)$$

$$L_2 C_3 = (\tilde{z}_{bc} + \tilde{z}_{cd})(\tilde{z}_{rr}\tilde{z}_{ss} - \tilde{z}_{rs}^2) - \tilde{z}_{br} \tilde{z}_{cr} \tilde{z}_{ss} - \tilde{z}_{bs} \tilde{z}_{cs} \tilde{z}_{rr} - \tilde{z}_{rs} \tilde{z}_{cr} \tilde{z}_{dr} - \tilde{z}_{rs} \tilde{z}_{cs} \tilde{z}_{ds} + \tilde{z}_{rs} \tilde{z}_{ds} \tilde{z}_{br} + \tilde{z}_{rs} \tilde{z}_{dr} \tilde{z}_{bs} + \tilde{z}_{rs} (\tilde{z}_{br} \tilde{z}_{cs} + \tilde{z}_{bs} \tilde{z}_{cr}) \quad (IX.71)$$

$$L_3 C_3 = (\tilde{z}_{cc} + \tilde{z}_{cd})(\tilde{z}_{rr}\tilde{z}_{ss} - \tilde{z}_{rs}^2) - \tilde{z}_{cr}^2 \tilde{z}_{ss} - \tilde{z}_{cs}^2 \tilde{z}_{rr} - \tilde{z}_{rs} \tilde{z}_{cr} \tilde{z}_{dr} - \tilde{z}_{rs} \tilde{z}_{cs} \tilde{z}_{ds} + \tilde{z}_{rs} \tilde{z}_{ds} \tilde{z}_{cr} + \tilde{z}_{rs} \tilde{z}_{dr} \tilde{z}_{cs} + 2\tilde{z}_{rs} \tilde{z}_{cr} \tilde{z}_{cs} \quad (IX.72)$$

A equação da queda de tensão, representada em (IX.39) para uma linha equivalente com um circuito, sem a presença de cabos pára-raios, pode ser descrita como:

$$\begin{bmatrix} \Delta U_a \\ \Delta U_b \\ \Delta U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z'_{aa} & z'_{ba} & z'_{ca} \\ z'_{ab} & z'_{bb} & z'_{cb} \\ z'_{ac} & z'_{bc} & z'_{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} (V/km)$$

A matriz de impedâncias sequenciais, considerando o método exato de Carson a partir da matriz $[Z']$, representada na equação (IX.40), poderá ser obtida através da transformação apresentada pela equação (IX.14), com seus termos dados pelas equações (IX.15) a (IX.23).

a) – Impedância de sequência nula – método exato

$$Z'_{00} = 1/3((\tilde{z}'_{aa} + \tilde{z}'_{bb} + \tilde{z}'_{cc}) + 2(\tilde{z}'_{ab} + \tilde{z}'_{bc} + \tilde{z}'_{ac}))$$

b) – Impedância de sequência positiva – método exato

$$Z'_{11} = 1/3((\tilde{z}'_{aa} + \tilde{z}'_{bb} + \tilde{z}'_{cc}) - (\tilde{z}'_{ab} + \tilde{z}'_{bc} + \tilde{z}'_{ac}))$$



c) - Impedância de seqüência negativa - método exato

$$Z'_{22} = 1/3((z'_{aa} + z'_{bb} + z'_{cc}) - (z'_{ab} + z'_{bc} + z'_{ac}))$$

d) - Impedâncias mútuas entre as seqüências

$$Z'_{01} = 1/3((z'_{aa} + \alpha^2 z'_{bb} + \alpha z'_{cc} - z'_{ab} - \alpha z'_{ac} - \alpha^2 z'_{bc}))$$

$$Z'_{10} = 1/3((z'_{aa} + \alpha z'_{bb} + \alpha^2 z'_{cc} - z'_{ab} - \alpha^2 z'_{ac} - \alpha z'_{bc}))$$

$$Z'_{02} = 1/3((z'_{aa} + \alpha z'_{bb} + \alpha^2 z'_{cc} - z'_{ab} - \alpha^2 z'_{ac} - \alpha z'_{bc}))$$

$$Z'_{20} = 1/3((z'_{aa} + \alpha^2 z'_{bb} + \alpha z'_{cc}) - z'_{ab} - \alpha z'_{ac} - \alpha^2 z'_{bc})$$

$$Z'_{12} = 1/3((z'_{aa} + \alpha^2 z'_{bb} + \alpha z'_{cc}) + 2(z'_{ab} \alpha + z'_{ac} \alpha^2 + z'_{bc}))$$

$$Z_{21} = 1/3((z'_{aa} + \alpha^2 z'_{bb} + \alpha z'_{cc}) + 2(z'_{ab} \alpha^2 + z'_{ac} \alpha + z'_{bc}))$$

e) - Impedância de seqüência nula - método aproximado

Considerando o método aproximado e ainda as condições ideais de sistema equilibrado e linha transposta, a impedância de seqüência nula será obtida por analogia com a equação (IX.24) e a impedância de seqüência positiva será obtida por analogia com a equação (IX.25).

Impedância de seqüência nula:

$$Z_{00} = z'^*_{aa} + 2z'^*_{ab}$$

Impedância de seqüência positiva:

$$Z'_{11} = z'^*_{aa} - z'^*_{ab}$$

Considerando as hipóteses citadas nos casos para circuito simples, tem-se o seguinte desenvolvimento para a obtenção das impedâncias de seqüência nula e positiva, baseadas nos parâmetros para uma linha transposta, equilibrada, circuito duplo, com dois cabos pára-raios.

Admitindo-se que a linha é simétrica em relação ao seu eixo longitudinal, que os circuitos são iguais, injetando em todas as fases a corrente de seqüência zero “ I_0 ” e sendo usado o processo de transposição das fases, serão somadas: a impedância mútua, calculada a seguir, com a impedância própria, calculada no caso de circuito simples, com um cabo pára-raios.

$$\begin{bmatrix} U_o \\ U_o \\ U_o \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{ad} & z_{ae} & z_{af} & z_{ar} & z_{as} \\ z_{bd} & z_{be} & z_{bf} & z_{br} & z_{bs} \\ z_{cd} & z_{ce} & z_{cf} & z_{cr} & z_{cs} \\ z_{ar} & z_{br} & z_{cr} & z_{rr} & z_{rs} \\ z_{as} & z_{bs} & z_{cs} & z_{rs} & z_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_o \\ I_o \\ I_o \\ I_r \\ I_s \end{bmatrix} \quad (V/km) \quad (IX.73)$$

Por simetria entre os circuitos, tem-se:

$$z_{ad} = z_{be} = z_{cf} = z'^*_{ad}$$

$$z_{ae} = z_{bf} = z_{cd} = z_{bf} = z_{cd} = z_{ce} = z'^*_{ae}$$

$$z_{ar} = z_{br} = z_{cr} = z_{ds} = z_{es} = z_{fs} = z'^*_{ar}$$

$$z_{as} = z_{bs} = z_{cs} = z_{dr} = z_{er} = z_{fr} = z'^*_{dr}$$



$$\tilde{z}_{rr} = \tilde{z}_{ss} = \tilde{z}_{rr}^*$$

Logo:

$$U_o = \tilde{z}_{aa}^* I_o + 2\tilde{z}_{ae}^* I_o + \tilde{z}_{ar}^* I_r + \tilde{z}_{dr}^* I_s$$

$$0 = 3\tilde{z}_{ar}^* I_o + \tilde{z}_{rr}^* I_r + \tilde{z}_{rs}^* I_s$$

$$0 = 3\tilde{z}_{as}^* I_o + \tilde{z}_{rs}^* I_r + \tilde{z}_{ss}^* I_s$$

$$0 = 3(\tilde{z}_{ar}^* + \tilde{z}_{as}^*) + (\tilde{z}_{rr}^* + \tilde{z}_{rs}^*)(I_r + I_s)$$

$$Z_{00}^{II} = \tilde{z}_{ad}^* + 2\tilde{z}_{ae}^* + (I_r/I_o)(\tilde{z}_{ar} - \tilde{z}_{dr}) - (3\tilde{z}_{dr}^{*2} + 3\tilde{z}_{dr}\tilde{z}_{ar})/(\tilde{z}_{rr}^* + \tilde{z}_{rs}^*)$$

Desprezando-se a parcela $(I_r/I_o)(\tilde{z}_{ar} - \tilde{z}_{dr})$, tem-se:

$$Z_{00}^{II} = \tilde{z}_{ad}^* + 2\tilde{z}_{ae}^* - (3\tilde{z}_{dr}^{*2} + 3\tilde{z}_{dr}\tilde{z}_{ar})/(\tilde{z}_{rr}^* + \tilde{z}_{rs}^*) \quad (\text{IX.74})$$

Sendo:

$$\tilde{z}_{ad}^* = (\tilde{z}_{aa}^* + \tilde{z}_{ad}^*) - (\tilde{z}_{ar}^* + \tilde{z}_{dr}^*)^2/(\tilde{z}_{rr}^* + \tilde{z}_{rs}^*) \quad (\text{IX.75})$$

$$\tilde{z}_{ab}^* = (\tilde{z}_{ab}^* + \tilde{z}_{ac}^*) - (\tilde{z}_{ar}^* + \tilde{z}_{dr}^*)^2/(\tilde{z}_{rr}^* + \tilde{z}_{rs}^*) \quad (\text{IX.76})$$

A partir de expressões obtidas através da equação (IX.73) e da equação (IX.54) têm-se a impedância de seqüência zero para o primeiro circuito.

Desta forma, a impedância de seqüência zero será:

$$Z_{00} = Z_{00}^I + Z_{00}^{II},$$

Onde:

Z_{00}^I = impedância própria de seqüência zero para o circuito I

Z_{00}^{II} = impedância própria de seqüência zero para o circuito II

$$Z_{00} = \tilde{z}_{aa}^* + 2\tilde{z}_{ab}^* - 6\tilde{z}_{ar}^{*2}/(\tilde{z}_{rr}^* + \tilde{z}_{rs}^*) + \tilde{z}_{ad}^* + 2\tilde{z}_{ae}^* - (3\tilde{z}_{dr}^{*2} + 3\tilde{z}_{dr}\tilde{z}_{ar})/(\tilde{z}_{rr}^* + \tilde{z}_{rs}^*)$$

$$Z_{00} = (\tilde{z}_{aa}^* + \tilde{z}_{ad}^*) + 2(\tilde{z}_{ab}^* + \tilde{z}_{ae}^*) - (6\tilde{z}_{ar}^{*2} + 3\tilde{z}_{dr}^{*2} + 3\tilde{z}_{dr}\tilde{z}_{ar})/(\tilde{z}_{rr}^* + \tilde{z}_{rs}^*) \quad (\text{IX.77})$$

Usualmente, as concessionárias de energia e várias publicações técnicas sobre linhas de transmissão simplificam essa fórmula, fazendo a consideração de $\tilde{z}_{ar}^* \cong \tilde{z}_{dr}^*$. Por este critério, a formula para a impedância de seqüência zero passa a ser escrita da seguinte forma:

$$Z_{00} = \tilde{z}_{aa}^* + \tilde{z}_{ad}^* + 2(\tilde{z}_{ab}^* + \tilde{z}_{ae}^*) - 12(\tilde{z}_{ar}^*)^2/(\tilde{z}_{rr}^* + \tilde{z}_{rs}^*) \quad (\text{IX.78})$$

f) - Impedância de seqüência positiva – método aproximado

$$Z_{11} = \tilde{z}_{aa}^* - \tilde{z}_{ab}^*$$

$$Z_{11} = (\tilde{z}_{aa}^* + \tilde{z}_{ad}^*) - (\tilde{z}_{ar}^* + \tilde{z}_{dr}^*)^2/(\tilde{z}_{rr}^* + \tilde{z}_{rs}^*) - (\tilde{z}_{ab}^* + \tilde{z}_{ae}^*) + (\tilde{z}_{ar}^* + \tilde{z}_{dr}^*)^2/(\tilde{z}_{rr}^* + \tilde{z}_{rs}^*)$$

$$Z_{11} = (\tilde{z}_{aa}^* - \tilde{z}_{ab}^*) + (\tilde{z}_{ad}^* - \tilde{z}_{ae}^*)$$

$$Z_{11} = r_{aa} + jX_{LSI} + jX_{LSII}$$

$$Z_{11} = r_{aa} + j4\pi 10^{-4} f \ln(dmg/rmg) + j4\pi 10^{-4} f \ln(D_{II}/D_I)$$

$$Z_{11} = r_{aa} + j4\pi 10^{-4} f \ln((dmg/rmg)(D_{II}/D_I))$$

Conforme a expressão para reatância indutiva, definida no capítulo VIII.

IX.6. Cálculo da impedância equivalente de uma linha de transmissão

Da mesma forma como foi desenvolvido o cálculo das indutâncias, pode-se calcular as impedâncias equivalentes de uma linha de transmissão para as cinco configurações estudadas, tanto pelo método “aproximado”, quanto pelo método “exato”.

Por meio dos resultados obtidos através do programa computacional, desenvolvido em função dessa formulação de impedâncias, poderão ser comparados os dois métodos, considerando que o método “exato” retrata as linhas de transmissão na sua condição real de utilização.

Além disso, o cálculo das impedâncias pelo método “exato” irá proporcionar plenas condições de análise para as diversas silhuetas de estruturas, atualmente empregadas, bem como apontar a influência da ausência de transposição de fases nas matrizes equivalentes de impedâncias das linhas de transmissão.

No *capítulo XIII* serão apresentados e analisados os resultados obtidos.



X. CÁLCULO DOS PARÂMETROS PARALELOS – ADMITÂNCIA

A condutância de dispersão e a capacitância entre os condutores e entre os condutores e o solo são os componentes para a formação dos parâmetros paralelos que compõem a representação dos circuitos equivalentes de uma linha de transmissão.

A capacitância pode ser definida como a medida da corrente de carga em uma linha de transmissão e expressa como a carga por Volt, requerida para colocar a carga na linha de transmissão [13], [15], [28].

A admitância de uma linha de transmissão, parâmetro que expressa a combinação da condutância e da capacitância, pode ser representada pela expressão:

$$[Y] = [G] + j[B] \quad (X.1)$$

Onde:

$[Y]$ = matriz de admitâncias de linha de transmissão

$[G]$ = matriz das condutâncias de dispersão, definida no capítulo VIII

$[B]$ = matriz de susceptância capacitiva

As condutâncias de dispersão das linhas de transmissão são determinadas em função das perdas no dielétrico e são inversamente proporcionais ao quadrado da tensão. Em geral, são desprezadas nos cálculos, por serem um parâmetro que não exerce influência significativa nos circuitos equivalentes.

A susceptância capacitiva é definida pela expressão:

$$b_c = 1/X_c \quad (X.2)$$

sendo a reatância capacitiva:

$$X_c = 1/\omega C \quad (X.3)$$

Onde:

$$\omega = 2\pi f$$

C : Capacitância

Logo:

$$b_c = \omega C \quad (X.4)$$

A partir da definição de capacitância como sendo carga por unidade de potencial, com a carga sendo especificada em Coulomb por metro de condutor, tem-se a formulação para dois condutores carregados:

$$C_{ab} = q/U_{ab} = (\pi\epsilon)/\ln(d/r) \quad (X.5)$$

Sendo:

d : distância em metros, entre eles



r : raio em metros – considerando $r_a = r_b = r$

q : carga em Coulomb por metro de condutor – considerando $q_a = q$ e $q_b = -q$

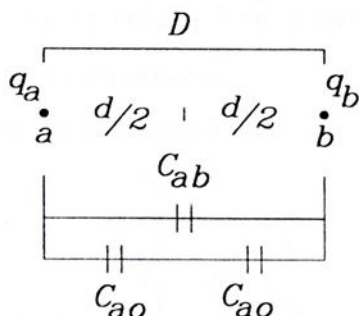


figura X.1. Capacitância entre dois condutores e um neutro

Sendo o solo um condutor de eletricidade, e os condutores das linhas aéreas de transmissão de energia elétrica estando a uma distância finita deste, o seu campo elétrico é influenciado por essa proximidade.

Nessas condições, o condutor comporta-se como um capacitor composto por um eletrodo longo, paralelo a um eletrodo plano.

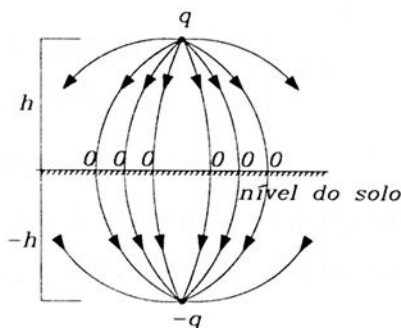


figura X.2. Campo elétrico entre um condutor e sua imagem, com o solo como plano neutro.

Adotando-se o condutor b como sendo o condutor imagem em relação ao solo, e o solo como um plano neutro entre eles, tem-se:

$$C_{an} = C_{bn} = 2C_{ab} \quad (\text{X.6})$$

A diferença de potencial entre o condutor a e o solo será:

$$u_a = (Q / (2\pi\epsilon)) \ln(2h/r) \quad (\text{V}) \quad (\text{X.7})$$

A formação da matriz para o caso geral de “n” condutores é semelhante ao processo para dois condutores sobre o solo e pode ser obtida por analogia ao caso de dois condutores:

$$u_a = (1 / (2\pi\epsilon)) (q_a \ln(2h_a/r_a) + q_b \ln(r_b/d_{ab}) - q_b \ln(r_b/D_{ab}))$$

$$u_a = (1 / (2\pi\epsilon)) (q_a \ln(2h_a/r_a) + q_b \ln(D_{ab}/d_{ab}))$$

Onde, potencial do condutor b em relação ao solo será:

$$u_b = (1 / (2\pi\epsilon)) (q_b \ln(2h_b/r_b) + q_a \ln(D_{ab}/d_{ab})) \quad (\text{X.8})$$



Sendo:

D_{ab} : distância entre o condutor a e a imagem do condutor b , em metros.

d_{ab} : distância entre o condutor a e o condutor b , em metros.

q_a : carga elétrica em Coulomb/m, no condutor a .

q_b : carga elétrica em Coulomb/m, no condutor b .

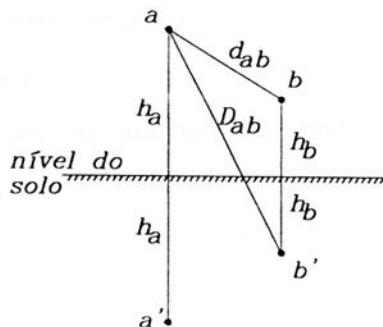


figura X.3. Representação de dois condutores sobre o solo e suas respectivas imagens.

Em termos de matriz tem-se:

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \end{bmatrix} = (1/(2\pi\epsilon)) \begin{bmatrix} \text{Ln}(2h_a/r_a) & \text{Ln}(D_{ab}/d_{ab}) \\ \text{Ln}(D_{ab}/d_{ab}) & \text{Ln}(2h_b/r_b) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_a \\ q_b \end{bmatrix} \quad (\text{V}) \quad (\text{X.9})$$

Escrevendo em forma de matriz para n condutores:

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ \vdots \\ u_m \end{bmatrix} = (1/(2\pi\epsilon)) \begin{bmatrix} \text{Ln}(2h_a/r_a) & \text{Ln}(D_{ab}/d_{ab}) & \dots & \text{Ln}(D_{an}/d_{an}) \\ \text{Ln}(D_{ab}/d_{ab}) & \text{Ln}(2h_b/r_b) & \dots & \text{Ln}(D_{bn}/d_{bn}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{Ln}(D_{am}/d_{am}) & \text{Ln}(D_{bm}/d_{bm}) & \dots & \text{Ln}(2h_m/r_m) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_a \\ q_b \\ \vdots \\ q_m \end{bmatrix} \quad (\text{V}) \quad (\text{X.10})$$

Chamando de $[E]$ a matriz:

$$[E] = (1/(2\pi\epsilon)) \begin{bmatrix} \text{Ln}(2h_a/r_a) & \text{Ln}(D_{ab}/d_{ab}) & \dots & \text{Ln}(D_{an}/d_{an}) \\ \text{Ln}(D_{ab}/d_{ab}) & \text{Ln}(2h_b/r_b) & \dots & \text{Ln}(D_{bn}/d_{bn}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{Ln}(D_{am}/d_{am}) & \text{Ln}(D_{bm}/d_{bm}) & \dots & \text{Ln}(2h_m/r_m) \end{bmatrix}$$

$$[E] = \begin{bmatrix} e_{aa} & e_{ab} & \dots & e_{am} \\ e_{ab} & e_{bb} & \dots & e_{bm} \\ e_{ac} & e_{bc} & \dots & e_{cm} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e_{am} & e_{bm} & \dots & e_{mm} \end{bmatrix}$$

A matriz $[E]$ é definida como *matriz dos coeficientes de potencial*, ou dos *coeficientes de campo elétrico*, de Maxwell e relaciona as tensões com as cargas elétricas. Os coeficientes de potência têm como dimensão (V/A) e sua unidade é (km/F) .

Para o caso de condutores singelos, os termos da diagonal principal são calculados por:

$$e_{ii} = (1/(2\pi\epsilon)) \ln(2h_i/r_{ci}) \quad (km/F)$$

Termos da diagonal para condutores singelos:

$$e_{ii} = (1/(2\pi\epsilon)) \ln(2h_i/rmg_i) \quad (km/F) \quad (X.11)$$

Os termos localizados fora da diagonal principal são obtidos por:

$$e_{ij} = (1/(2\pi\epsilon)) \ln(D_{ij}/d_{ij}) \quad (km/F) \quad (X.12)$$

Onde:

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r, \quad \epsilon_r = 1 \quad (\text{ar})$$

$$\epsilon_0 = 8,859 \cdot 10^{-9} (F/km) \text{ ou } (As/V.km) - \text{permissividade absoluta ou do vácuo.}$$

h_i : altura do condutor ao solo, em metros.

D_{ij} : distância do condutor "i" ao condutor "j", em metros.

$$D_{ij} = (4h_i h_j + d_{ij}^2)^{1/2} \quad \text{em metros} \quad (X.13)$$

d_{ij} : distância do condutor à imagem do condutor vizinho, em metros.

r_{ci} : raio do condutor, em metros.

O cálculo do r_{cm} (raio equivalente para bando de condutores, expresso em metros) é dado pela fórmula:

$$r_{cm} = \sqrt[n]{r_{ci} d_{12} d_{13} \dots d_{1n}} \quad (X.14)$$

A diferença de potencial com relação ao dos condutores presentes no arranjo, é dada por:

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ \vdots \\ U_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{aa} & e_{ab} & \cdot & e_{ma} \\ e_{ba} & e_{bb} & \cdot & e_{mb} \\ e_{ca} & e_{cb} & \cdot & e_{mc} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ e_{ma} & e_{mb} & \cdot & e_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_a \\ Q_b \\ \cdot \\ Q_m \end{bmatrix} \quad (V) \quad (X.15)$$

Onde:

$U_a, U_b, U_c, \dots, U_n$ são as diferenças de potencial com relação ao solo e $Q_a, Q_b, Q_c, \dots, Q_n$ para os condutores.

Usando a notação compacta, a equação (X.14) pode ser reescrita como segue:

$$[U] = [E][Q] \quad (V) \quad (X.16)$$

Sendo a capacitância definida como carga por unidade de potencial:

$$C = Q/U \quad (F) \quad (X.17)$$



Logo:

$$Q = C U \quad (C)$$

Expandindo a notação anterior para um arranjo de n condutores, tem-se:

$$\begin{bmatrix} Q_a \\ Q_b \\ . \\ . \\ Q_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (C_{aa} + C_{ab} + \dots + C_{am}) & \dots & -C_{am} \\ -C_{ab} & \dots & -C_{bm} \\ -C_{ac} & \dots & -C_{cm} \\ . & \dots & . \\ -C_{am} & \dots & (C_{mn} + C_{am} + C_{bm} + \dots) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ . \\ . \\ U_m \end{bmatrix} \quad (X.18)$$

Comparando-se com a equação $[U] = [E] [Q]$

Tem-se:

$$[C] = [E]^{-1} \quad (X.19)$$

Logo:

$$[E]^{-1} = [C] = (1/D) \begin{bmatrix} CF_{aa} & CF_{ab} & CF_{ac} & . & . & CF_{am} \\ CF_{ab} & CF_{bb} & CF_{bc} & . & . & CF_{bm} \\ . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . \\ CF_{am} & CF_{bm} & CF_{cm} & . & . & CF_{nm} \end{bmatrix} \quad (X.20)$$

sendo:

D : determinante da matriz $[E]$

CF_{ii} e CF_{ij} os cofatores da Matriz $[E]$

Comparando a matriz da expressão (X.18) com a matriz da expressão (X.20), obtém-se:

$$C_{aa} + C_{ab} + C_{ac} + \dots + C_{am} = CF_{aa} / D$$

$$C_{ba} + C_{ab} + C_{bc} + \dots + C_{bm} = CF_{bb} / D$$

$$C_{ca} + C_{ac} + C_{bc} + \dots + C_{cm} = CF_{cc} / D$$

$$C_{ma} + C_{am} + C_{bm} + \dots + C_{mm} = CF_{mm} / D$$

$$C_{ab} = -CF_{ab} / D \quad C_{ac} = -CF_{ac} / D \quad C_{bc} = -CF_{bc} / D$$

$$C_{am} = -CF_{am} / D \quad C_{bm} = -CF_{bm} / D \quad C_{cm} = -CF_{cm} / D$$



A partir dessas equações, chega-se às expressões para as capacitâncias parciais entre condutores e o solo:

$$C_{an} = (CF_{aa} + CF_{ab} + CF_{ac} + \dots + CF_{am}) / D$$

$$C_{bn} = (CF_{bb} + CF_{ab} + CF_{bc} + \dots + CF_{bm}) / D$$

$$C_{cn} = (CF_{cc} + CF_{ac} + CF_{bc} + \dots + CF_{cm}) / D$$

$$C_{nn} = (CF_{nn} + CF_{an} + CF_{bn} + \dots + CF_{(-1)_n}) / D \quad (X.21)$$

As capacitâncias aparentes são hipotéticas, definidas entre os condutores e um neutro de potencial nulo, no caso o solo. Elas produzem sobre o terminal gerador da linha o mesmo efeito que as capacitâncias parciais acopladas, não tendo, porém, um significado físico. O cálculo das capacitâncias aparentes será demonstrado nos casos descritos a seguir, para as diversas configurações de linhas de transmissão.

Normalmente, para o cálculo dos parâmetros de linha de transmissão, consideram-se as linhas equilibradas, definindo-se a capacitância para qualquer uma das fases, a qual é chamada capacitância de sequência positiva. As capacitâncias de sequência nula, utilizadas nos cálculos de curto-circuito, podem ser determinadas a partir das capacitâncias parciais.

Para o equacionamento do método aproximado serão utilizadas as seguintes fórmulas, originadas das equações (IX.1) e (IX.2) e do capítulo VIII.

$$e^*_{aa} = (1/(2\pi\epsilon)) \ln(2hmg / r_{cs}) \quad (X.22)$$

$$e^*_{ab} = (1/(2\pi\epsilon)) \ln(DMG / dm_g) \quad (X.23)$$

$$e^*_{ad} = (1/(2\pi\epsilon)) \ln(DMG_{MF} / D_I) \quad (X.24)$$

$$e^*_{ae} = (1/(2\pi\epsilon)) \ln(DMG_{FD} / D_{II}) \quad (X.25)$$

$$e^*_{ar} = (1/(2\pi\epsilon)) \ln(DMG_r / dm_{g,r}) \quad (X.26)$$

$$e^*_{rs} = (1/(2\pi\epsilon)) \ln(D_{rs} / d_{rs}) \quad (X.27)$$

$$e^*_{rr} = (1/(2\pi\epsilon)) \ln(2hmg / r_{csp}) \quad (X.28)$$

Nota: os parâmetros indicados com (*) representam valores médios.

sendo:

r_i : raio dos condutores expresso em metros, considerando $r_a = r_b = r$

hmg : altura média geométrica dos condutores de um circuito, em metros

$$hmg = \sqrt{h_a h_b h_c}$$

hmg_r : altura média geométrica dos cabos pára-raios, em metros

$$hmg_r = \sqrt{h_r h_s}$$



r_{cs} : raio de um condutor singelo, em *metros*

r_{cm} : raio de um condutor múltiplo, em *metros*

$$r_{cm} = \sqrt[n]{r_{cs} d_{12} d_{13} \dots d_{1n}} \quad (X.29)$$

h_r : altura do cabo pára-raios, em *metros*

r_r : raio do cabo pára-raios, em *metros*

DMG : distância média geométrica dos condutores à imagem dos condutores de outras fases de um mesmo circuito, em *metros*, conforme a equação (VIII.17).

$$DMG = \sqrt[3]{D_{ab} D_{ac} D_{bc}}$$

dmg : distância média geométrica entre os condutores de um mesmo circuito, em *metros*, conforme a equação (VIII.18).

$$dmg = \sqrt[3]{d_{ab} d_{ac} d_{bc}}$$

DMG_{MF} : distância média geométrica dos condutores das fases de um circuito às imagens dos condutores das fases correspondentes do outro circuito, em *metros*

$$DMG_{MF} = \sqrt[3]{D_{ad} D_{be} D_{cf}} \quad (X.30)$$

DMG_{FD} : distância média geométrica dos condutores das fases de um circuito às imagens dos condutores das fases distintas do outro circuito, em *metros*

$$DMG_{FD} = \sqrt[6]{D_{ae} D_{af} D_{bd} D_{bf} D_{cd} D_{ce}} \quad (X.31)$$

D_I : distância média geométrica entre condutores das fases correspondentes dos dois circuitos, em *metros*, conforme a equação (VIII.77).

$$D_I = \sqrt[3]{d_{ad} d_{be} d_{cf}}$$

D_{II} : distância média geométrica entre condutores de fases distintas dos dois circuitos, em *metros*, conforme a equação (VIII.78).

$$D_{II} = \sqrt[6]{d_{ae} d_{af} d_{bd} d_{bf} d_{cd} d_{ce}}$$

DMG_r : distância média geométrica entre os pára-raios e a imagem das fases de um circuito, em *metros*

$$DMGr = \sqrt[3]{D_{ar} D_{br} D_{cr}} \quad (X.32)$$

dmg_r : distância média geométrica entre as fases de um circuito e o cabo pára-raios, em *metros*, conforme a equação (IX.34).

$$dmg_r = \sqrt[3]{d_{ar} d_{br} d_{cr}}$$

D_r : distância entre o cabo pára-raios r e a imagem do cabo pára-raios s , em *metros*.

d_r : distância entre o cabo pára-raios r e o cabo pára-raios s , em *metros*.



X.1. Cálculo da matriz de capacitâncias, circuito simples, sem cabos pára-raios

a) – método exato

Para os condutores do arranjo da *figura VIII.1.* pode-se escrever que a diferença de potencial em relação ao solo é dada por:

$$\begin{bmatrix} \Delta U_a \\ \Delta U_b \\ \Delta U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{aa} & e_{ab} & e_{ac} \\ e_{ab} & e_{bb} & e_{bc} \\ e_{ac} & e_{bc} & e_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_a \\ Q_b \\ Q_c \end{bmatrix} \quad (V) \quad (X.33)$$

A carga nos condutores para o mesmo arranjo é dada por:

$$\begin{bmatrix} Q_a \\ Q_b \\ Q_c \end{bmatrix} = (1/D) \begin{bmatrix} CF_{aa} & CF_{ab} & CF_{ac} \\ CF_{ab} & CF_{bb} & CF_{bc} \\ CF_{ac} & CF_{bc} & CF_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} \quad (C/km) \quad (X.34)$$

Onde:

CF_{ij} : Cofator do elemento “ ij ” da matriz da equação (X.34)

D : determinante da matriz da equação (X.34)

Para o mesmo arranjo tem-se ainda:

$$\begin{bmatrix} Q_a \\ Q_b \\ Q_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (C_{an} + C_{ab} + C_{ac}) & -C_{ab} & -C_{ac} \\ -C_{ab} & (C_{bn} + C_{ab} + C_{bc}) & -C_{bc} \\ -C_{ac} & -C_{bc} & (C_{cn} + C_{bc} + C_{cc}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} \quad (C/km) \quad (X.35)$$

Comparando-se os elementos da matriz dada em (X.34) com a matriz dada em (X.35), obtém-se as capacitâncias parciais presentes no arranjo:

$$C_{an} = (CF_{aa} + CF_{ab} + CF_{ac})/D \quad (X.36)$$

$$C_{bn} = (CF_{bb} + CF_{ab} + CF_{bc})/D \quad (X.37)$$

$$C_{cn} = (CF_{cc} + CF_{ac} + CF_{bc})/D \quad (X.38)$$

$$C_{ab} = -CF_{ab}/D \quad C_{ac} = -CF_{ac}/D \quad C_{bc} = -CF_{bc}/D$$

Para os sistemas equilibrados, trifásicos, temos as seguintes condições:

$$U_a + U_b + U_c = 0$$

Nessas condições quando $U_a = U_{max}$, $U_b = U_c = (-1/2)U_{max}$

Logo:

$$Q_{a_{max}} = ((C_{an} + C_{ab} + C_{ac}) + (1/2)(C_{ab} + C_{ac}))U_{max}$$

$$Q_{b_{max}} = ((C_{bn} + C_{ab} + C_{bc}) + (1/2)(C_{ab} + C_{bc}))U_{max}$$

$$Q_{c_{max}} = ((C_{cn} + C_{ac} + C_{bc}) + (1/2)(C_{ac} + C_{bc}))U_{max}$$

$$Q_{a_{max}} = ((C_{an} + (3/2)(C_{ab} + C_{ac}))U_{max} \quad (X.39)$$

$$Q_{b_{max}} = ((C_{bn} + (3/2)(C_{ab} + C_{bc}))U_{max} \quad (X.40)$$



$$Q_{c_{max}} = ((C_{ca} + (3/2)(C_{ac} + C_{bc})) U_{max} \quad (X.41)$$

Lembrando da definição de capacitâncias, têm-se as capacitâncias aparentes das fases dadas:

$$C_a = C_{aa} + (3/2)(C_{ab} + C_{ac}) \quad (F/km) \quad (X.42)$$

$$C_b = C_{bb} + (3/2)(C_{ab} + C_{bc}) \quad (F/km) \quad (X.43)$$

$$C_c = C_{cc} + (3/2)(C_{ac} + C_{bc}) \quad (F/km) \quad (X.44)$$

b) método aproximado

Admitindo que a linha seja transposta, a matriz da equação (X.33), pode ser representada como segue:

$$[E] = \begin{bmatrix} e_{aa}^* & e_{ab}^* & e_{ab}^* \\ e_{ab}^* & e_{aa}^* & e_{ab}^* \\ e_{ab}^* & e_{ab}^* & e_{aa}^* \end{bmatrix}$$

Para a determinação da inversa da matriz [E], tem-se:

$$\text{Determinante } (D) = (e_{aa}^* - e_{ab}^*)^2 (e_{aa}^* + 2e_{ab}^*) \quad (X.45)$$

Termos da diagonal da matriz inversa:

$$\begin{aligned} a_{11} = a_{22} = a_{33} &= (e_{aa}^{*2} - e_{ab}^{*2}) / ((e_{aa}^* - e_{ab}^*)^2 (e_{aa}^* + 2e_{ab}^*)) \\ a_{11} &= (e_{aa}^* + e_{ab}^*) / ((e_{aa}^* - e_{ab}^*) (e_{aa}^* + 2e_{ab}^*)) \end{aligned} \quad (X.46)$$

Termos fora da diagonal da matriz inversa:

$$\begin{aligned} a_{12} = a_{13} = a_{21} = a_{31} = a_{23} = a_{32} &= -e_{ab}^* (e_{aa}^* - e_{ab}^*) / ((e_{aa}^* - e_{ab}^*)^2 (e_{aa}^* + 2e_{ab}^*)) \\ a_{12} &= -e_{ab}^* / ((e_{aa}^* - e_{ab}^*) (e_{aa}^* + 2e_{ab}^*)) \end{aligned} \quad (X.47)$$

Comparando com a matriz da equação (X.34) tem-se:

$$CF_{aa} = (e_{aa}^{*2} - e_{ab}^{*2}) \quad (X.48)$$

Sendo:

$$\begin{aligned} CF_{aa} &= CF_{bb} = CF_{cc} \\ CF_{ab} &= CF_{ac} = CF_{bc} = -e_{ab}^* (e_{aa}^* - e_{ab}^*) \end{aligned} \quad (X.49)$$

$$C_{aa} = C_{bb} = C_{cc} = C_{aa}^* \quad e \quad C_{ab} = C_{ac} = C_{bc} = C_{ab}^*$$

Os termos da diagonal para condutores singelos, obtidos pela equação (X.22):

$$e_{aa}^* = (1/2\pi\epsilon) \ln(2h_{mg}/r_{cs}) \quad (km/F)$$

Os termos fora da diagonal, obtidos pela equação (X.23):

$$e_{ab}^* = (1/2\pi\epsilon) \ln(DMG/dmg) \quad (km/F)$$

Logo, a capacitância de sequência nula, resulta:

$$\begin{aligned} C_o^* &= (e_{aa}^* + e_{ab}^*) / ((e_{aa}^* - e_{ab}^*) (e_{aa}^* + 2e_{ab}^*)) - 2e_{ab}^* / ((e_{aa}^* - e_{ab}^*) (e_{aa}^* + 2e_{ab}^*)) \\ C_o^* &= (e_{aa}^* - e_{ab}^*) / ((e_{aa}^* - e_{ab}^*) (e_{aa}^* + 2e_{ab}^*)) \\ C_o^* &= 1 / (e_{aa}^* + 2e_{ab}^*) \end{aligned} \quad (X.50)$$



Sendo:

$$C_o^* = C_{an} = C_{bn} = C_{cn}$$

Portanto, a capacitância de seqüência positiva será:

$$C_{ab}^* = -a_{12} = e_{ab}^* / ((e_{aa}^* - e_{ab}^*)(e_{aa}^* + 2e_{ab}^*)) \quad (X.51)$$

Sendo:

$$C_1 = C_o^* + 3C_{ab}^*$$

Resulta:

$$C_1 = 1 / (e_{aa}^* - e_{ab}^*) \quad (X.52)$$

Considerando que ($2hmg \cong DMG$) tem-se:

$$C_1 = (1 / (2\pi\epsilon)) \ln(dmg / r_{cs}) \quad (X.53)$$

X.2. Cálculo da matriz de capacitâncias, circuito simples, um cabo pára-raios

a) – método exato

Para os condutores do arranjo da *figura VIII.3.* pode-se escrever que a diferença de potencial em relação ao solo é dada por:

$$\begin{bmatrix} \Delta U_a \\ \Delta U_b \\ \Delta U_c \\ \Delta U_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{aa} & e_{ab} & e_{ac} & e_{ar} \\ e_{ba} & e_{bb} & e_{bc} & e_{br} \\ e_{ca} & e_{cb} & e_{cc} & e_{cr} \\ e_{ra} & e_{rb} & e_{rc} & e_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_a \\ Q_b \\ Q_c \\ Q_r \end{bmatrix} \quad (V) \quad (X.54)$$

Para esta situação, tem-se:

$$[E] = \begin{bmatrix} e_{aa} & e_{ba} & e_{ca} & e_{ar} \\ e_{ab} & e_{bb} & e_{cb} & e_{br} \\ e_{ac} & e_{bc} & e_{cc} & e_{cr} \\ e_{ar} & e_{br} & e_{cr} & e_{rr} \end{bmatrix}$$

Considerando o cabo pára-raios aterrado, pode-se obter a equação da diferença de potencial para um circuito equivalente sem a presença do cabo pára-raios:

$$[\Delta U'] = [E'] [Q'] \quad (V) \quad (X.55)$$

Onde:

$$[E'] = \begin{bmatrix} e_{aa} - e_{ar}^2 / e_{rr} & e_{ba} - e_{br} e_{ar} / e_{rr} & e_{ca} - e_{cr} e_{ar} / e_{rr} \\ e_{ab} - e_{ar} e_{br} / e_{rr} & e_{bb} - e_{br}^2 / e_{rr} & e_{cb} - e_{br} e_{cr} / e_{rr} \\ e_{ac} - e_{ar} e_{cr} / e_{rr} & e_{bc} - e_{br} e_{cr} / e_{rr} & e_{cc} - e_{cr}^2 / e_{rr} \end{bmatrix}$$

A carga nos condutores para o mesmo arranjo, considerando um circuito equivalente sem cabo pára-raios é dada por:



$$\begin{bmatrix} Q'_a \\ Q'_b \\ Q'_c \end{bmatrix} = (1/D') \begin{bmatrix} CF'_{aa} & CF'_{ab} & CF'_{ac} \\ CF'_{ba} & CF'_{bb} & CF'_{bc} \\ CF'_{ca} & CF'_{cb} & CF'_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U'_a \\ \Delta U'_b \\ \Delta U'_c \end{bmatrix} \quad (C/km) \quad (X.56)$$

Onde:

CF'_{ij} = Cofator do elemento “ ij ” da matriz da equação (X.55)

D' = determinante da matriz da equação (X.55)

Para o mesmo arranjo, tem-se a equação da carga nos condutores em (C/km):

$$\begin{bmatrix} Q'_a \\ Q'_b \\ Q'_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (C'_{an} + C_{ab} + C_{ac}) & -C_{ab} & -C_{ac} \\ -C_{ab} & (C'_{bn} + C_{ab} + C_{bc}) & -C_{bc} \\ -C_{ac} & -C_{bc} & (C_{ac} + C_{bc} + C'_{cn}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U'_a \\ \Delta U'_b \\ \Delta U'_c \end{bmatrix} \quad (X.57)$$

Comparando-se os elementos da matriz dada em (X.56) com a matriz dada em (X.57), obtém-se as capacitâncias parciais presentes no arranjo:

$$C'_{an} = (CF'_{aa} + CF'_{ab} + CF'_{ac})/D' \quad (X.58)$$

$$C'_{bn} = (CF'_{bb} + CF'_{ab} + CF'_{bc})/D' \quad (X.59)$$

$$C'_{cn} = (CF'_{cc} + CF'_{ac} + CF'_{bc})/D' \quad (X.60)$$

$$C'_{ab} = -CF'_{ab}/D' \quad C'_{ac} = -CF'_{ac}/D' \quad C'_{bc} = -CF'_{bc}/D'$$

Admitindo-se que $U_a + U_b + U_c = 0$, por analogia com os resultados obtidos para a situação de linha trifásica sem cabo pára-raios, resulta:

$$C'_a = C'_{an} + (3/2)(C'_{ab} + C'_{ac}) \quad (F/km) \quad (X.61)$$

$$C'_b = C'_{bn} + (3/2)(C'_{ab} + C'_{bc}) \quad (F/km) \quad (X.62)$$

$$C'_c = C'_{cn} + (3/2)(C'_{ac} + C'_{bc}) \quad (F/km) \quad (X.63)$$

b) método aproximado

Considerando a linha transposta, pode-se escrever:

$$[E] = \begin{bmatrix} e^*_{aa} & e^*_{ab} & e^*_{ab} & e^*_{ar} \\ e^*_{ab} & e^*_{aa} & e^*_{ab} & e^*_{ar} \\ e^*_{ab} & e^*_{ab} & e^*_{aa} & e^*_{ar} \\ e^*_{ar} & e^*_{ar} & e^*_{ar} & e^*_{rr} \end{bmatrix}$$

Os elementos “ e^*_{aa} ”, “ e^*_{ab} ” e “ e^*_{ar} ” (ou “ e^*_{arl} ”), e “ e^*_{rr} ” são valores médios tendo sido definidos pelas equações (X.22), (X.23) e (X.26), e o elemento “ e_{rr} ” foi definido na equação (X.28).

Incorporando o efeito do cabo pára-raios aos elementos representativos das fases, a matriz pode ser reescrita como segue:



$$[E'] = \begin{bmatrix} e_{aa}^* & e_{ab}^* & e_{ab}^* \\ e_{ab}^* & e_{aa}^* & e_{ab}^* \\ e_{ab}^* & e_{ab}^* & e_{aa}^* \end{bmatrix}$$

Da mesma forma que na situação anterior, a capacitância de seqüência nula será:

$$C_o^* = 1 / (e_{aa}^* + 2e_{ab}^*)$$

Sendo os elementos " e_{aa}^* " e " e_{ab}^* " obtidos pelas expressões abaixo:

$$e_{aa}^* = e_{aa}^* - e_{ar}^{*2} / e_{rr}$$

$$e_{ab}^* = e_{ab}^* - e_{ar}^{*2} / e_{rr}$$

Logo:

$$C_o^* = 1 / (e_{aa}^* + 2e_{ab}^* - 3e_{ar}^{*2} / e_{rr}) \quad (X.64)$$

De forma análoga, a capacitância de seqüência positiva será:

$$C_1 = 1 / (e_{aa}^* - e_{ab}^*)$$

$$C_1 = 1 / (e_{aa}^* - e_{ab}^*)$$

Considerando as equações (X.22) e (X.23) e, ainda, que ($2hmg \cong DMG$) a fórmula da capacitância de seqüência positiva será:

$$C_1 = (1 / (2\pi\epsilon)) \ln(dmg / r_{cs})$$

X.3. Cálculo da matriz de capacitâncias, circuito simples, dois cabos pára-raios

a) - método exato

Para os condutores do arranjo da *figura VIII.5.* e observando-se o mesmo processo e considerações utilizadas para circuito simples com um cabo pára-raios, chega-se à matriz $[E]$, descrita a seguir:

$$[E] = \begin{bmatrix} e_{aa} & e_{ba} & e_{ca} & e_{ra} & e_{sa} \\ e_{ab} & e_{bb} & e_{cb} & e_{rb} & e_{sb} \\ e_{ac} & e_{bc} & e_{cc} & e_{rc} & e_{sc} \\ e_{ar} & e_{br} & e_{cr} & e_{rr} & e_{sr} \\ e_{as} & e_{bs} & e_{cs} & e_{rs} & e_{ss} \end{bmatrix}$$

Considerando os cabos pára-raios aterrados, pode-se obter a equação da diferença de potencial para um circuito equivalente sem a presença do cabo pára-raios, semelhante à equação (X.55).

Para melhor visualização do equacionamento, a matriz reduzida $[E]$, representativa de uma linha equivalente sem a presença de cabos pára-raios será escrita da seguinte forma:



$$[E'] = 1/(e_{rr}e_{ss}-e_{rs}^2) \begin{bmatrix} L_1C_1 & L_1C_2 & L_1C_3 \\ L_2C_1 & L_2C_2 & L_2C_3 \\ L_3C_1 & L_3C_2 & L_3C_3 \end{bmatrix} \quad (X.65)$$

onde:

L_iC_j : representam os termos da linha "i" e da coluna "j".

Sendo:

$$L_1C_1 = e_{aa}(e_{rr}e_{ss}-e_{rs}^2) - e_{ar}^2e_{ss} - e_{as}^2e_{rr} + 2e_{rs}e_{ar}e_{as} \quad (X.66)$$

$$L_2C_1 = e_{ab}(e_{rr}e_{ss}-e_{rs}^2) - e_{ar}e_{br}e_{ss} - e_{as}e_{bs}e_{rr} + e_{rs}(e_{ar}e_{bs} + e_{as}e_{br}) \quad (X.67)$$

$$L_3C_1 = e_{ac}(e_{rr}e_{ss}-e_{rs}^2) - e_{ar}e_{cr}e_{ss} - e_{as}e_{cs}e_{rr} + e_{rs}(e_{ar}e_{cs} + e_{as}e_{cr}) \quad (X.68)$$

$$L_1C_2 = e_{ab}(e_{rr}e_{ss}-e_{rs}^2) - e_{br}e_{ar}e_{ss} - e_{bs}e_{as}e_{rr} + e_{rs}(e_{br}e_{as} + e_{bs}e_{ar}) \quad (X.69)$$

$$L_2C_2 = e_{bb}(e_{rr}e_{ss}-e_{rs}^2) - e_{br}^2e_{ss} - e_{bs}^2e_{rr} + 2e_{rs}e_{br}e_{bs} \quad (X.70)$$

$$L_3C_2 = e_{bc}(e_{rr}e_{ss}-e_{rs}^2) - e_{br}e_{cr}e_{ss} - e_{bs}e_{cs}e_{rr} + e_{rs}(e_{br}e_{cs} + e_{bs}e_{cr}) \quad (X.71)$$

$$L_1C_3 = e_{ac}(e_{rr}e_{ss}-e_{rs}^2) - e_{cr}e_{ar}e_{ss} - e_{cs}e_{as}e_{rr} + e_{rs}(e_{cr}e_{as} + e_{cs}e_{ar}) \quad (X.72)$$

$$L_2C_3 = e_{bc}(e_{rr}e_{ss}-e_{rs}^2) - e_{cr}e_{br}e_{ss} - e_{cs}e_{bs}e_{rr} + e_{rs}(e_{cr}e_{bs} + e_{cs}e_{br}) \quad (X.73)$$

$$L_3C_3 = e_{cc}(e_{rr}e_{ss}-e_{rs}^2) - e_{cr}^2e_{ss} - e_{cs}^2e_{rr} + 2e_{rs}e_{cr}e_{cs} \quad (X.74)$$

A carga nos condutores para o mesmo arranjo, considerando um circuito equivalente sem cabo pára-raios é dada por:

$$\begin{bmatrix} Q'_a \\ Q'_b \\ Q'_c \end{bmatrix} = (1/D') \begin{bmatrix} CF'_{aa} & CF'_{ab} & CF'_{ac} \\ CF'_{ba} & CF'_{bb} & CF'_{bc} \\ CF'_{ca} & CF'_{cb} & CF'_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U'_a \\ \Delta U'_b \\ \Delta U'_c \end{bmatrix} \quad (C/km)$$

Onde:

CF'_{ij} = Cofator do elemento "ij" de $[E']$

D' = determinante de $[E']$

Para o mesmo arranjo, tem-se a equação da carga nos condutores:

$$\begin{bmatrix} Q'_a \\ Q'_b \\ Q'_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (C'_{aa} + C_{ab} + C_{ac}) & -C_{ab} & -C_{ac} \\ -C_{ab} & (C'_{bb} + C_{ab} + C_{bc}) & -C_{bc} \\ -C_{ac} & -C_{bc} & (C_{ac} + C_{bc} + C'_{cc}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U'_a \\ \Delta U'_b \\ \Delta U'_c \end{bmatrix} \quad (C/km)$$

Comparando-se os elementos das matrizes dadas pelas duas equações imediatamente acima, obtém-se as capacitâncias parciais presentes no arranjo:

$$C'_{aa} = (CF'_{aa} + CF'_{ab} + CF'_{ac})/D'$$

$$C'_{bb} = (CF'_{bb} + CF'_{ab} + CF'_{bc})/D'$$

$$C'_{cc} = (CF'_{cc} + CF'_{ac} + CF'_{bc})/D'$$

$$C'_{ab} = -CF'_{ab}/D' \quad C'_{ac} = -CF'_{ac}/D' \quad C'_{bc} = -CF'_{bc}/D'$$



Admitindo-se que $U_a + U_b + U_c = 0$, por analogia com os resultados obtidos para a situação de linha trifásica sem cabo pára-raios, resulta:

$$C'_a = C'_{aa} + (3/2)(C'_{ab} + C'_{ac}) \quad (F/km)$$

$$C'_b = C'_{bb} + (3/2)(C'_{ab} + C'_{bc}) \quad (F/km)$$

$$C'_c = C'_{cc} + (3/2)(C'_{ac} + C'_{bc}) \quad (F/km)$$

b) método aproximado

Considerando a linha transposta, pode-se escrever:

$$[E] = \begin{bmatrix} e^*_{aa} & e^*_{ab} & e^*_{ab} & e^*_{ar} & e^*_{as} \\ e^*_{ab} & e^*_{aa} & e^*_{ab} & e^*_{ar} & e^*_{as} \\ e^*_{ab} & e^*_{ab} & e^*_{aa} & e^*_{ar} & e^*_{as} \\ e^*_{ar} & e^*_{ar} & e^*_{ar} & e^*_{rr} & e^*_{rs} \\ e^*_{as} & e^*_{as} & e^*_{as} & e^*_{rs} & e^*_{ss} \end{bmatrix}$$

Onde os elementos da matriz $[E]$ são definidos pelas equações (X.22), (X.23), (X.26), (X.27) e (X.28).

Incorporando o efeito do cabo pára-raios aos elementos representativos das fases, a matriz pode ser reescrita como segue:

$$[E'] = \begin{bmatrix} e'^*_{aa} & e'^*_{ab} & e'^*_{ab} \\ e'^*_{ab} & e'^*_{aa} & e'^*_{ab} \\ e'^*_{ab} & e'^*_{ab} & e'^*_{aa} \end{bmatrix}$$

Da mesma forma que na situação anterior, a capacitância de seqüência nula será:

$$C_o^* = 1/(e'^*_{aa} + 2e'^*_{ab})$$

Sendo os elementos " e'^*_{aa} " e " e'^*_{ab} " obtidos pelas expressões abaixo:

$$e'^*_{aa} = e^*_{aa} - e^{*2}_{ar2} / (e_{rr} + e_{rs})$$

$$e'^*_{ab} = e^*_{ab} - e^{*2}_{ar2} / (e_{rr} + e_{rs})$$

Logo:

$$C_o^* = 1/(e^*_{aa} + 2e^*_{ab} - 6e^{*2}_{ar2} / (e_{rr} + e_{rs})) \quad (X.75)$$

Onde $e_{ar} = e_{ar2}$.

De forma análoga, a capacitância de seqüência positiva será:

$$C_1 = 1/(e'^*_{aa} - e'^*_{ab})$$

$$C_1 = 1/(e^*_{aa} - e^*_{ab})$$

Considerando as equações (X.22) e (X.23) e a ainda que ($2hmg \cong DMG$) a fórmula da capacitância de seqüência positiva será:

$$C_1 = (1/(2\pi\epsilon)) \ln(dmg/r_{cs})$$



X.4. Cálculo da matriz de capacitâncias, circuito duplo, um cabo pára-raios

a) – método exato

Para os condutores do arranjo da *figura VIII.7* e observando-se o mesmo processo e considerações utilizadas para circuito simples com um cabo pára-raios, chega-se à matriz $[E]$, descrita a seguir:

$$[E] = \begin{bmatrix} e_{aa} & e_{ba} & e_{ca} & e_{ra} & e_{da} & e_{ea} & e_{fa} \\ e_{ab} & e_{bb} & e_{cb} & e_{rb} & e_{db} & e_{eb} & e_{fb} \\ e_{ac} & e_{bc} & e_{cc} & e_{rc} & e_{dc} & e_{ec} & e_{fc} \\ e_{ar} & e_{br} & e_{cr} & e_{rr} & e_{dr} & e_{er} & e_{fr} \\ e_{ad} & e_{bd} & e_{cd} & e_{rd} & e_{dd} & e_{ed} & e_{fd} \\ e_{ae} & e_{be} & e_{ce} & e_{re} & e_{de} & e_{ee} & e_{fe} \\ e_{af} & e_{bf} & e_{cf} & e_{rf} & e_{df} & e_{ef} & e_{ff} \end{bmatrix}$$

Considerando os cabos pára-raios aterrados, pode-se obter a equação da diferença de potencial para um circuito equivalente sem a presença do cabo pára-raios, semelhante à equação (X.55).

Para melhor visualização do equacionamento, a matriz reduzida $[E]$, representativa de uma linha equivalente, sem a presença de cabos pára-raios, será escrita da seguinte forma:

$$[E] = \begin{bmatrix} (e_{aa} + e_{ad}) & (e_{ab} + e_{ae}) & (e_{ac} + e_{af}) \\ (e_{ba} + e_{bd}) & (e_{bb} + e_{be}) & (e_{bc} + e_{bf}) \\ (e_{ca} + e_{cd}) & (e_{cb} + e_{ce}) & (e_{cc} + e_{cf}) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} (e_{ar}^2 + e_{rd} \cdot e_{ar})/e_{rr} \\ (e_{br} \cdot e_{ar} + e_{re} \cdot e_{ar})/e_{rr} \\ (e_{cr} \cdot e_{ar} + e_{rf} \cdot e_{ar})/e_{rr} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} (e_{br} \cdot e_{ar} + e_{rd} \cdot e_{br})/e_{rr} & (e_{cr} \cdot e_{ar} + e_{rd} \cdot e_{cr})/e_{rr} \\ (e_{br}^2 + e_{re} \cdot e_{br})/e_{rr} & (e_{cr} \cdot e_{br} + e_{re} \cdot e_{cr})/e_{rr} \\ (e_{br} \cdot e_{cr} + e_{rf} \cdot e_{br})/e_{rr} & (e_{cr}^2 + e_{rf} \cdot e_{cr})/e_{rr} \end{bmatrix}$$

A carga nos condutores para o mesmo arranjo, considerando um circuito equivalente sem cabo pára-raios é dada por:

$$\begin{bmatrix} Q'_a \\ Q'_b \\ Q'_c \end{bmatrix} = (1/D') \begin{bmatrix} CF'_{aa} & CF'_{ab} & CF'_{ac} \\ CF'_{ba} & CF'_{bb} & CF'_{bc} \\ CF'_{ca} & CF'_{cb} & CF'_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U'_a \\ \Delta U'_b \\ \Delta U'_c \end{bmatrix} \quad (C/km)$$

Onde:

CF'_{ij} : Cofator do elemento "ij" de $[E']$

D' : determinante de $[E']$

Para o mesmo arranjo, tem-se a equação da carga nos condutores:



$$\begin{bmatrix} Q'_a \\ Q'_b \\ Q'_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (C'_{an} + C_{ab} + C_{ac}) & -C_{ab} & -C_{ac} \\ -C_{ab} & (C'_{bn} + C_{ab} + C_{bc}) & -C_{bc} \\ -C_{ac} & -C_{bc} & (C_{ac} + C_{bc} + C'_{cn}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U'_a \\ \Delta U'_b \\ \Delta U'_c \end{bmatrix} (C/km)$$

Comparando-se os elementos das matrizes dadas pelas duas equações, imediatamente, acima, obtém-se as capacitâncias parciais presentes no arranjo:

$$C'_{an} = (CF'_{aa} + CF'_{ab} + CF'_{ac}) / D'$$

$$C'_{bn} = (CF'_{bb} + CF'_{ab} + CF'_{bc}) / D'$$

$$C'_{cn} = (CF'_{cc} + CF'_{ac} + CF'_{bc}) / D'$$

$$C'_{ab} = -CF'_{ab} / D' \quad C'_{ac} = -CF'_{ac} / D' \quad C'_{bc} = -CF'_{bc} / D'$$

Admitindo-se que $U_a + U_b + U_c = 0$, por analogia com os resultados obtidos para a situação de linha trifásica sem cabo pára-raios, resulta:

$$C'_a = C'_{an} + (3/2)(C'_{ab} + C'_{ac}) \quad (F/km)$$

$$C'_b = C'_{bn} + (3/2)(C'_{ab} + C'_{bc}) \quad (F/km)$$

$$C'_c = C'_{cn} + (3/2)(C'_{ac} + C'_{bc}) \quad (F/km)$$

b) método aproximado

Considerando a linha transposta, pode-se escrever:

$$[E] = \begin{bmatrix} e_{aa} & e_{ab} & e_{ab} & e_{ar} & e_{ad} & e_{ae} & e_{ae} \\ e_{ab} & e_{aa} & e_{ab} & e_{ar} & e_{ae} & e_{ad} & e_{ae} \\ e_{ab} & e_{ab} & e_{aa} & e_{ar} & e_{ae} & e_{ae} & e_{ad} \\ e_{ar} & e_{ar} & e_{ar} & e_{rr} & e_{ar} & e_{ar} & e_{ar} \\ e_{ad} & e_{ae} & e_{ae} & e_{ar} & e_{aa} & e_{ae} & e_{ae} \\ e_{ae} & e_{ad} & e_{ae} & e_{ar} & e_{ad} & e_{aa} & e_{ae} \\ e_{ae} & e_{ae} & e_{ad} & e_{ar} & e_{ad} & e_{ae} & e_{aa} \end{bmatrix}$$

Onde os elementos da matriz $[E]$ são definidos pelas equações (X.22), (X.23), (X.24), (X.25), (X.27) e (X.28).

Incorporando o efeito do cabo pára-raios aos elementos representativos das fases, a matriz pode ser reescrita como segue:

$$[E'] = \begin{bmatrix} e'^*_{aa} & e'^*_{ab} & e'^*_{ab} \\ e'^*_{ab} & e'^*_{aa} & e'^*_{ab} \\ e'^*_{ab} & e'^*_{ab} & e'^*_{aa} \end{bmatrix}$$

Da mesma forma que na situação anterior, a capacitância de sequência nula será:

$$C_o^* = 1 / (e'^*_{aa} + 2e'^*_{ab})$$

Sendo os elementos " e'^*_{aa} " e " e'^*_{ab} " obtidos pelas expressões abaixo:

$$e'^*_{aa} = (e^*_{aa} + e^*_{ad}) - (e^{*2}_{ar} + e_{dr} e^*_{ar}) / e_{rr}$$



Sendo $e_{dr}=e_{ar}$:

$$e_{aa}^*=(e_{aa}^*+e_{ad}^*)-(2e_{ar}^*)/e_{rr}$$

$$e_{ab}^*=(e_{ab}^*+e_{ad}^*)-(2e_{ar}^*)/e_{rr}$$

$$C_o^*=1/((e_{aa}^*+e_{ad}^*)+2(e_{ab}^*+e_{ac}^*)-6(e_{ar}^*)/e_{rr}) \quad (X.76)$$

Com e_{aa}^* , e_{ab}^* , e_{ad}^* , e_{ac}^* , e_{ar}^* e e_{rr} e calculados pelas equações (X.22), (X.23), (X.24), (X.25), (X.26), (X.27) e (X.28)

De forma análoga, a capacitância de sequência positiva será:

$$C_1=1/(e_{aa}^*-e_{ab}^*)$$

$$C_1=1/(e_{aa}^*-e_{ab}^*)$$

$$C_1=1/((1/(2\pi\epsilon))\ln(2hmg\text{ DMG}_{MF}\text{ dm}g\text{ D}_{II}/\text{DMG}\text{ r}_{\alpha}\text{ DMG}_{FD}\text{ D}_{II}))$$

Sendo, para as linhas aéreas de transmissão, a altura dos condutores ao solo muito superior ao valor da distância projetada horizontalmente entre os circuitos, pode-se considerar:

$$2hmg\cong\text{DMG} \text{ e } \text{DMG}_{MF}\cong\text{DMG}_{FD}$$

Desta forma, obtém-se a expressão tradicional para o cálculo da capacitância de sequência positiva para linhas de circuito duplo

$$C_1=1/((1/(2\pi\epsilon))\ln((dmg/rmg)(D_{II}/D_I))$$

$$C_1=1/((1/(2\pi\epsilon))(\ln(dmg/rmg)+\ln(D_{II}/D_I)) \quad (X.77)$$

X.5. Cálculo da matriz de capacitâncias, circuito duplo, dois cabos pára-raios

a) – método exato

Para os condutores do arranjo da *figura VIII.9* e observando-se o mesmo processo e considerações utilizadas para circuito simples com um cabo pára-raios, chega-se à matriz $[E]$, descrita a seguir:

$$[E] = \begin{bmatrix} e_{aa} & e_{ba} & e_{ca} & e_{ra} & e_{sa} & e_{da} & e_{ea} & e_{fa} \\ e_{ab} & e_{bb} & e_{cb} & e_{rb} & e_{sb} & e_{db} & e_{eb} & e_{fb} \\ e_{ac} & e_{bc} & e_{cc} & e_{rc} & e_{sc} & e_{dc} & e_{ec} & e_{fc} \\ e_{ar} & e_{br} & e_{cr} & e_{rr} & e_{sr} & e_{dr} & e_{er} & e_{fr} \\ e_{as} & e_{bs} & e_{cs} & e_{rs} & e_{ss} & e_{ds} & e_{es} & e_{fs} \\ e_{ad} & e_{bd} & e_{cd} & e_{rd} & e_{sd} & e_{dd} & e_{ed} & e_{fd} \\ e_{ae} & e_{be} & e_{ce} & e_{re} & e_{se} & e_{de} & e_{ee} & e_{fe} \\ e_{af} & e_{bf} & e_{cf} & e_{rf} & e_{sf} & e_{df} & e_{ef} & e_{ff} \end{bmatrix}$$



Considerando os cabos pára-raios aterrados, pode-se obter a equação da diferença de potencial para um circuito equivalente, sem a presença do cabo pára-raios, semelhante à equação (X.55).

Para melhor visualização do equacionamento, a matriz reduzida $[E]$, representativa de uma linha equivalente, sem a presença de cabos pára-raios, será escrita da seguinte forma:

$$[E'] = 1/(e_{rr}e_{ss}-e_{rs}^2) \begin{bmatrix} L_1C_1 & L_1C_2 & L_1C_3 \\ L_2C_1 & L_2C_2 & L_2C_3 \\ L_3C_1 & L_3C_2 & L_3C_3 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} e'_{11} & e'_{12} & e'_{13} \\ e'_{21} & e'_{22} & e'_{23} \\ e'_{31} & e'_{32} & e'_{33} \end{bmatrix} = 1/(e_{rr}e_{ss}-e_{rs}^2) \begin{bmatrix} L_1C_1 & L_1C_2 & L_1C_3 \\ L_2C_1 & L_2C_2 & L_2C_3 \\ L_3C_1 & L_3C_2 & L_3C_3 \end{bmatrix} \quad (X.78)$$

Onde:

L_iC_j : representam os termos da linha "i" e da coluna "j".

sendo:

$$L_1C_1 = (e_{aa} + e_{ad})(e_{rr}e_{ss}-e_{rs}^2) - e_{ar}^2e_{ss} - e_{as}^2e_{rr} - e_{ss}e_{ar}e_{dr} - e_{rr}e_{as}e_{ds} + e_{rs}e_{ds}e_{as} + e_{rs}e_{ds}e_{ar} + 2e_{rs}e_{ar}e_{as} \quad (X.79)$$

$$L_2C_1 = (e_{ab} + e_{bd})(e_{rr}e_{ss}-e_{rs}^2) - e_{ar}e_{br}e_{ss} - e_{as}e_{bs}e_{rr} - e_{ss}e_{br}e_{dr} - e_{rr}e_{bs}e_{ds} + e_{rs}e_{ds}e_{bs} + e_{rs}e_{ds}e_{br} + e_{rs}(e_{ar}e_{bs} + e_{as}e_{br}) \quad (X.80)$$

$$L_3C_1 = (e_{ac} + e_{cd})(e_{rr}e_{ss}-e_{rs}^2) - e_{ar}e_{cr}e_{ss} - e_{as}e_{cs}e_{rr} - e_{ss}e_{cr}e_{dr} - e_{rr}e_{cs}e_{ds} + e_{rs}e_{ds}e_{cs} + e_{rs}e_{ds}e_{cr} + e_{rs}(e_{ar}e_{cs} + e_{as}e_{cr}) \quad (X.81)$$

$$L_1C_2 = (e_{ab} + e_{ad})(e_{rr}e_{ss}-e_{rs}^2) - e_{br}e_{ar}e_{ss} - e_{bs}e_{as}e_{rr} - e_{ss}e_{ar}e_{dr} - e_{rr}e_{as}e_{ds} + e_{rs}e_{ds}e_{ar} + e_{rs}e_{ds}e_{as} + e_{rs}(e_{br}e_{as} + e_{bs}e_{ar}) \quad (X.82)$$

$$L_2C_2 = (e_{bb} + e_{bd})(e_{rr}e_{ss}-e_{rs}^2) - e_{br}^2e_{ss} - e_{bs}^2e_{rr} - e_{ss}e_{br}e_{dr} - e_{rr}e_{bs}e_{ds} + e_{rs}e_{ds}e_{br} + e_{rs}e_{ds}e_{bs} + 2e_{rs}e_{br}e_{bs} \quad (X.83)$$

$$L_3C_2 = (e_{bc} + e_{cd})(e_{rr}e_{ss}-e_{rs}^2) - e_{br}e_{cr}e_{ss} - e_{bs}e_{cs}e_{rr} - e_{ss}e_{cr}e_{dr} - e_{rr}e_{cs}e_{ds} + e_{rs}e_{ds}e_{cr} + e_{rs}e_{ds}e_{cs} + e_{rs}(e_{br}e_{cs} + e_{bs}e_{cr}) \quad (X.84)$$

$$L_1C_3 = (e_{ac} + e_{ad})(e_{rr}e_{ss}-e_{rs}^2) - e_{ar}e_{cr}e_{ss} - e_{as}e_{cs}e_{rr} - e_{ss}e_{ar}e_{dr} - e_{rr}e_{as}e_{ds} + e_{rs}e_{ds}e_{ar} + e_{rs}e_{ds}e_{as} + e_{rs}(e_{ar}e_{cs} + e_{as}e_{cr}) \quad (X.85)$$

$$L_2C_3 = (e_{bc} + e_{bd})(e_{rr}e_{ss}-e_{rs}^2) - e_{ar}e_{br}e_{ss} - e_{as}e_{bs}e_{rr} - e_{ss}e_{br}e_{dr} - e_{rr}e_{bs}e_{ds} + e_{rs}e_{ds}e_{br} + e_{rs}e_{ds}e_{bs} + e_{rs}(e_{ar}e_{bs} + e_{as}e_{br}) \quad (X.86)$$

$$L_3C_3 = (e_{cc} + e_{cd})(e_{rr}e_{ss}-e_{rs}^2) - e_{ar}^2e_{ss} - e_{as}^2e_{rr} - e_{ss}e_{ar}e_{dr} - e_{rr}e_{as}e_{ds} + e_{rs}e_{ds}e_{ar} + e_{rs}e_{ds}e_{as} + 2e_{rs}e_{ar}e_{as} \quad (X.87)$$

A carga nos condutores para o mesmo arranjo, considerando um circuito equivalente sem cabo pára-raios é dada por:

$$\begin{bmatrix} Q'_a \\ Q'_b \\ Q'_c \end{bmatrix} = (1/D') \begin{bmatrix} CF'_{aa} & CF'_{ab} & CF'_{ac} \\ CF'_{ba} & CF'_{bb} & CF'_{bc} \\ CF'_{ca} & CF'_{cb} & CF'_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U'_a \\ \Delta U'_b \\ \Delta U'_c \end{bmatrix} \quad (C/km)$$

Onde:

CF'_{ij} : Cofator do elemento "ij" de $[E']$

D' : determinante de $[E']$

Para o mesmo arranjo, tem-se a equação da carga nos condutores:



$$\begin{bmatrix} Q'_a \\ Q'_b \\ Q'_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (C'_{an} + C_{ab} + C_{ac}) & -C_{ab} & -C_{ac} \\ -C_{ab} & (C'_{bn} + C_{ab} + C_{bc}) & -C_{bc} \\ -C_{ac} & -C_{bc} & (C_{ac} + C_{bc} + C'_{cn}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U'_a \\ \Delta U'_b \\ \Delta U'_c \end{bmatrix} (C/km)$$

Comparando-se os elementos das matrizes dadas pelas duas equações, imediatamente acima, obtém-se as capacitâncias parciais presentes no arranjo:

$$C'_{an} = (CF'_{aa} + CF'_{ab} + CF'_{ac}) / D'$$

$$C'_{bn} = (CF'_{bb} + CF'_{ab} + CF'_{bc}) / D'$$

$$C'_{cn} = (CF'_{cc} + CF'_{ac} + CF'_{bc}) / D'$$

$$C'_{ab} = -CF'_{ab} / D' \quad C'_{ac} = -CF'_{ac} / D' \quad C'_{bc} = -CF'_{bc} / D'$$

Admitindo-se que $U_a + U_b + U_c = 0$, por analogia com os resultados obtidos para a situação de linha trifásica sem cabo pára-raios, resulta:

$$C'_a = C'_{an} + (3/2)(C'_{ab} + C'_{ac}) \quad (F/km)$$

$$C'_b = C'_{bn} + (3/2)(C'_{ab} + C'_{bc}) \quad (F/km)$$

$$C'_c = C'_{cn} + (3/2)(C'_{ac} + C'_{bc}) \quad (F/km)$$

b) método aproximado

Considerando a linha transposta, pode-se escrever:

$$[E] = \begin{bmatrix} e_{aa} & e_{ab} & e_{ab} & e_{ar} & e_{as} & e_{ad} & e_{ae} & e_{ae} \\ e_{ab} & e_{aa} & e_{ab} & e_{ar} & e_{as} & e_{ae} & e_{ad} & e_{ae} \\ e_{ab} & e_{ab} & e_{aa} & e_{ar} & e_{as} & e_{ae} & e_{ae} & e_{ad} \\ e_{ar} & e_{ar} & e_{ar} & e_{rr} & e_{rs} & e_{ar} & e_{ar} & e_{ar} \\ e_{as} & e_{as} & e_{as} & e_{rs} & e_{ss} & e_{ds} & e_{ds} & e_{ds} \\ e_{ad} & e_{ae} & e_{ae} & e_{dr} & e_{ds} & e_{aa} & e_{ab} & e_{ab} \\ e_{ae} & e_{ad} & e_{ae} & e_{dr} & e_{ds} & e_{ab} & e_{aa} & e_{ab} \\ e_{ae} & e_{ae} & e_{ad} & e_{dr} & e_{ds} & e_{ab} & e_{ab} & e_{aa} \end{bmatrix}$$

Onde os elementos da matriz $[E]$ são definidos pelas equações (X.22), (X.23), (X.24), (X.25), (X.27) e (X.28).

Incorporando o efeito do cabo pára-raios aos elementos representativos das fases, a matriz pode ser reescrita como segue:

$$[E'] = \begin{bmatrix} e'^*_{aa} & e'^*_{ab} & e'^*_{ab} \\ e'^*_{ab} & e'^*_{aa} & e'^*_{ab} \\ e'^*_{ab} & e'^*_{ab} & e'^*_{aa} \end{bmatrix}$$

Da mesma forma que na situação anterior, a capacitância de sequência nula será:

$$C_o^* = 1 / (e'^*_{aa} + 2e'^*_{ab})$$

Sendo os elementos " e'^*_{aa} " e " e'^*_{ab} " obtidos pelas expressões abaixo:

$$e'^*_{aa} = (e^*_{aa} + e^*_{ad}) + (e_{rs} - e_{rr})(e^*_{ar} + e^*_{dr})^2 / (e_{rr}^2 - e_{rs}^2)$$



$$\begin{aligned}
e_{aa}^* &= (e_{aa}^* + e_{ad}^*) - (e_{ar}^* + e_{dr}^*)^2 / (e_{rr} + e_{rs}) \\
e_{ab}^* &= (e_{ab}^* + e_{ad}^*) + ((e_{rs} - e_{rr})(e_{ar}^* + e_{dr}^*)^2) / (e_{rr}^2 - e_{rs}^2) \\
e_{ab}^* &= (e_{ab}^* + e_{ad}^*) - (e_{ar}^* + e_{dr}^*)^2 / (e_{rr} + e_{rs}) \\
C_o^* &= 1 / ((e_{aa}^* + e_{ad}^*) + 2(e_{ab}^* + e_{ad}^*) - 3(e_{ar}^* + e_{dr}^*)^2 / (e_{rr} + e_{rs}))
\end{aligned} \quad (X.88)$$

Admitindo-se o critério utilizado por diversas concessionárias de energia elétrica que simplificam a expressão obtida em (X.88), considerando a aproximação $e_{ar}^* \cong e_{dr}^*$, obtém-se a seguinte fórmula para a capacitância de sequência zero, para uma linha trifásica, aérea, de circuito duplo com dois cabos pára-raios:

$$C_o^* = 1 / ((e_{aa}^* + e_{ad}^*) + 2(e_{ab}^* + e_{ad}^*) - 12e_{ar}^{*2} / (e_{rr} + e_{rs})) \quad (X.89)$$

Com e_{aa}^* , e_{ab}^* , e_{ad}^* , e_{ar}^* , e_{dr}^* , e_{rs} e e_{rr} calculados pelas equações (X.22), (X.23), (X.24), (X.25), (X.26), (X.27) e (X.28), sendo $e_{ar}^* = e_{dr}^*$

De forma análoga, a capacitância de sequência positiva será:

$$C_1 = 1 / (e_{aa}^* - e_{ab}^*)$$

$$C_1 = 1 / (e_{aa}^* - e_{ab}^*)$$

$$C_1 = 1 / ((1 / (2\pi\epsilon)) \ln(2hmg \text{ DMG}_{MF} \text{ dm}g D_{II} / \text{DMG } r_{cs} \text{ DMG}_{FD} D_I))$$

Sendo para as linhas aéreas de transmissão, a altura dos condutores ao solo muito superior ao valor da distância projetada, horizontalmente, entre os circuitos, pode-se considerar:

$$2hmg \cong \text{DMG} \quad \text{e} \quad \text{DMG}_{MF} \cong \text{DMG}_{FD}$$

Desta forma, obtém-se a expressão tradicional para o cálculo da capacitância de sequência positiva para linhas de circuito duplo

$$C_1 = 1 / ((1 / (2\pi\epsilon)) \ln((dmg / rmg)(D_{II} / D_I)))$$

$$C_1 = 1 / ((1 / (2\pi\epsilon)) (\ln(dmg / rmg) + \ln(D_{II} / D_I)))$$

Portanto, a equação (X.76) também representa a capacitância de sequência positiva, pelo método aproximado para as linhas de circuito duplo, com dois cabos pára-raios.

X.6. Cálculo da capacitância equivalente de uma linha de transmissão

A exemplo do capítulo das impedâncias, foram obtidas expressões para a condição real das linhas de transmissão, descritas pelas capacitâncias aparentes, e também para o método “aproximado”, cujos valores são representados pelas capacitâncias de sequência, calculadas em função das distâncias médias geométricas. Os resultados obtidos serão apresentados no capítulo XIII, incluindo uma avaliação das características e parâmetros elétricos encontrados, os quais servirão para comparação dos métodos de cálculo, análises das novas configurações e compactação das linhas de transmissão dentro das classes de tensão de 69 e 138 kV.



XI. GRADIENTE DE POTENCIAL

XI.1. Gradiente de potencial na superfície dos condutores

O valor do gradiente de potencial elétrico na superfície dos condutores de uma linha de transmissão tem importância fundamental para o aparecimento de manifestações como o efeito corona, rádio interferência (RI), ruído audível (RA) e, por consequência, as perdas elétricas ao longo da linha.

Considerando que os condutores de uma linha de transmissão podem ser comparados a um cilindro reto de raio “ r ”, com grande comprimento, de maneira que se possa analisar um pedaço de comprimento unitário sem as influências das extremidades, esses condutores estando distantes de outros ou de outros planos condutores, com uma carga Q (*Coulomb/km*) uniformemente distribuída sobre sua superfície, terão seus campos elétricos originados de sua superfície de maneira uniforme e concêntrica.

A definição de densidade de fluxo elétrico na superfície dos condutores será:

$$D_c = Q/(2\pi.r) \text{ (C/m}^2\text{)} \quad (\text{XI.1})$$

O Gradiente de potencial relaciona-se com a densidade de fluxo de acordo com a expressão:

$$\Delta E = D / \varepsilon \text{ (V/m)} \quad (\text{XI.2})$$

onde:

ε : permissividade do meio, em (*F/m*)

Tem-se o gradiente de potencial na superfície do condutor dado por:

$$\Delta E = Q/(2\pi.r\varepsilon) \text{ (V/m)} \quad (\text{XI.3})$$

XI.1.1 O gradiente médio para linhas de transmissão

$$[\Delta E_i] = \{1/(2\pi\varepsilon)\} [1/r_i] [Q_i] \text{ (KV/cm)} \quad (\text{XI.4})$$

Considerando que:

$$[Q] = [E]^{-1} [U] \quad (\text{XI.5})$$

onde:

$[\Delta E_i]$: Vetor dos gradientes de potencial em (*KV/cm*)

$[1/r_i]$: Matriz dos inversos dos raios de condutores, em *cm*.

$[E]^{-1}$: Matriz inversa dos coeficientes de potencial entre condutores e o solo

$[U_i]$: Vetor das diferenças de potencial entre condutores e o solo, em *kV*

Desta forma, pode-se escrever:



$$[\Delta E] = \{1/(2\pi\epsilon)\} [1/r_i][E]^{-1}[U_i] \quad (kV/cm) \quad (XI.6)$$

Escrevendo a matriz $[E]$ como:

$$[E] = (1/(2\pi\epsilon)) \begin{bmatrix} \text{Ln}(2h_a/r_a) & \text{Ln}(D_{ab}/d_{ab}) & \cdot & \cdot & \text{Ln}(D_{an}/d_{an}) \\ \text{Ln}(D_{ab}/d_{ab}) & \text{Ln}(2h_b/r_b) & \cdot & \cdot & \text{Ln}(D_{bn}/d_{bn}) \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \text{Ln}(D_{am}/d_{am}) & \text{Ln}(D_{bm}/d_{bm}) & \cdot & \cdot & \text{Ln}(2h_m/r_m) \end{bmatrix} \quad (XI.7)$$

$$[E] = \begin{bmatrix} e_{aa} & e_{ab} & \cdot & e_{am} \\ e_{ab} & e_{bb} & \cdot & e_{bm} \\ e_{ac} & e_{bc} & \cdot & e_{cm} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ e_{am} & e_{bm} & \cdot & e_{mm} \end{bmatrix}$$

Para o cálculo da Matriz $[E]$, tem-se:

Termos da diagonal para condutores singelos, conforme a equação (X.11)

$$e_{ii} = (1/2\pi\epsilon) \text{Ln}(2h_i/r_{cs}) \quad (km/F)$$

Termos fora da diagonal são definidos conforme a equação (X.12)

$$e_{ij} = (1/2\pi\epsilon) \text{Ln}(D_{ij}/d_{ij}) \quad (km/F)$$

Onde:

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$$

$$\epsilon_r = 1 \quad (ar)$$

$$\epsilon_0 = 8,859 \cdot 10^{-9} \quad (F/km) \text{ ou } (As/V km) - \text{permissividade absoluta ou do vácuo}$$

h_i : altura do condutor "i" em relação ao solo

D_{ij} : distância do condutor "i" à imagem do condutor "j".

$$D_{ij} = (4h_i h_j + d_{ij}^2)^{1/2} \quad (m)$$

d_{ij} : distância do condutor "i" ao condutor "j".

r_{cs} : raio condutor, em metros.

r_{cm} : raio equivalente para bando de condutores, em metros. (substitui r_{cs})

$$\begin{bmatrix} \Delta E_a \\ \Delta E_b \\ \cdot \\ \cdot \\ \Delta E_m \end{bmatrix} = \{1/(2\pi\epsilon)\} \begin{bmatrix} 1/r_a \\ 1/r_b \\ \cdot \\ \cdot \\ 1/r_m \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} e_{aa} & e_{ab} & \cdot & e_{am} \\ e_{ab} & e_{bb} & \cdot & e_{bm} \\ e_{ac} & e_{bc} & \cdot & e_{cm} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ e_{am} & e_{bm} & \cdot & e_{mm} \end{bmatrix} \right\}^{-1} \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ \cdot \\ \cdot \\ U_m \end{bmatrix} \quad (KV/cm) \quad (XI.8)$$

sendo:

D : determinante da matriz $[E]$



r_i : raio do condutor “ i ” em metros

CF_{ii} e CF_{ij} os cofatores da Matriz $[E]$

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

Onde:

$[C]$: Matriz das capacitâncias da linha de transmissão.

Resulta:

$$[E]^{-1} = [C] = (1/D) \begin{bmatrix} CF_{aa} & CF_{ab} & CF_{ac} & \dots & CF_{am} \\ CF_{ab} & CF_{bb} & CF_{bc} & \dots & CF_{bm} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ CF_{am} & CF_{bm} & CF_{cm} & \dots & CF_{nm} \end{bmatrix}$$

Substituindo, na equação dos gradientes de potencial, para “ m ” condutores tem-se:

$$\begin{bmatrix} \Delta E_a \\ \Delta E_b \\ \cdot \\ \cdot \\ \Delta E_m \end{bmatrix} = \{1/(2\pi\epsilon)\} \begin{bmatrix} 1/r_a \\ 1/r_b \\ \cdot \\ \cdot \\ 1/r_m \end{bmatrix} (1/D) \begin{bmatrix} CF_{aa} & CF_{ab} & CF_{ac} & \dots & CF_{am} \\ CF_{ab} & CF_{bb} & CF_{bc} & \dots & CF_{bm} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ CF_{am} & CF_{bm} & CF_{cm} & \dots & CF_{nm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ \cdot \\ \cdot \\ U_m \end{bmatrix} \quad (KV/cm) \quad (XI.9)$$

XI.1.1.1. Gradiente de potencial em linha de circuito simples sem cabos pára-raios

Para este arranjo de linha de transmissão aérea de energia elétrica e observando-se as mesmas condições avaliadas no capítulo X, tem-se o seguinte desenvolvimento:

$$\begin{bmatrix} \Delta E_a \\ \Delta E_b \\ \Delta E_c \end{bmatrix} = \{1/(2\pi\epsilon)\} \begin{bmatrix} 1/r_a \\ 1/r_b \\ 1/r_c \end{bmatrix} (1/D) \begin{bmatrix} CF_{aa} & CF_{ab} & CF_{ac} \\ CF_{ab} & CF_{bb} & CF_{bc} \\ CF_{ac} & CF_{bc} & CF_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} \quad (KV/cm) \quad (XI.10)$$

Designando-se como $[T]$ a matriz:

$$[T] = \{1/(2\pi\epsilon)\} \begin{bmatrix} 1/r_a \\ 1/r_b \\ 1/r_c \end{bmatrix} (1/D) \begin{bmatrix} CF_{aa} & CF_{ab} & CF_{ac} \\ CF_{ab} & CF_{bb} & CF_{bc} \\ CF_{ac} & CF_{bc} & CF_{cc} \end{bmatrix}$$

É possível escrever:

$$\begin{bmatrix} t_{aa} & t_{ab} & t_{ac} \\ t_{ab} & t_{bb} & t_{bc} \\ t_{ac} & t_{bc} & t_{cc} \end{bmatrix} = \{1/(2\pi\epsilon)\} \begin{bmatrix} 1/r_a \\ 1/r_b \\ 1/r_c \end{bmatrix} (1/D) \begin{bmatrix} CF_{aa} & CF_{ab} & CF_{ac} \\ CF_{ab} & CF_{bb} & CF_{bc} \\ CF_{ac} & CF_{bc} & CF_{cc} \end{bmatrix}$$

Desta forma, pode-se escrever:

$$[\Delta E] = [T][U] \quad (KV/cm) \quad (XI.11)$$



$$\begin{bmatrix} \Delta E_a \\ \Delta E_b \\ \Delta E_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{aa} & t_{ab} & t_{ac} \\ t_{ab} & t_{bb} & t_{bc} \\ t_{ac} & t_{bc} & t_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} (kV/cm)$$

XI.1.1.2. Gradiente de potencial em linha de circuito simples com um cabo pára-raios

Para este arranjo de linha de transmissão aérea de energia elétrica e observando-se as mesmas condições avaliadas no capítulo X, tem-se o seguinte desenvolvimento a partir da equação (XI.11):

$$[\Delta E] = [T][U] \quad (kV/cm)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta E_a \\ \Delta E_b \\ \Delta E_c \\ \Delta E_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{aa} & t_{ab} & t_{ac} & t_{ar} \\ t_{ba} & t_{bb} & t_{bc} & t_{br} \\ t_{ca} & t_{cb} & t_{cc} & t_{cr} \\ t_{ra} & t_{rb} & t_{rc} & t_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \\ U_r \end{bmatrix} (kV/cm) \quad (XI.12)$$

Considerando o cabo pára-raios aterrado, tem-se a seguinte equação:

$$[\Delta E] = [T][U] \quad (kV/cm) \quad (XI.13)$$

onde:

$$[T] = \begin{bmatrix} t_{aa} - t_{ar}^2 / t_{rr} & t_{ba} - t_{br} t_{ar} / t_{rr} & t_{ca} - t_{cr} t_{ar} / t_{rr} \\ t_{ab} - t_{ar} t_{br} / t_{rr} & t_{bb} - t_{br}^2 / t_{rr} & t_{cb} - t_{cr} t_{br} / t_{rr} \\ t_{ac} - t_{ar} t_{cr} / t_{rr} & t_{bc} - t_{br} t_{cr} / t_{rr} & t_{cc} - t_{cr}^2 / t_{rr} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta E'_a \\ \Delta E'_b \\ \Delta E'_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t'_{aa} & t'_{ab} & t'_{ac} \\ t'_{ab} & t'_{bb} & t'_{cb} \\ t'_{ac} & t'_{bc} & t'_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} (kV/cm) \quad (XI.14)$$

XI.1.1.3. Gradiente de potencial em linha de circuito simples com dois cabos pára-raios

Para este arranjo de linha de transmissão aérea de energia elétrica e observando-se as mesmas condições avaliadas no capítulo X, tem-se o seguinte desenvolvimento a partir da equação (XI.11):

$$[\Delta E] = [T] \cdot [U] \quad (kV/cm)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta E_a \\ \Delta E_b \\ \Delta E_c \\ \Delta E_r \\ \Delta E_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{aa} & t_{ab} & t_{ac} & t_{ar} & t_{as} \\ t_{ba} & t_{bb} & t_{bc} & t_{br} & t_{bs} \\ t_{ca} & t_{cb} & t_{cc} & t_{cr} & t_{cs} \\ t_{ra} & t_{rb} & t_{rc} & t_{rr} & t_{rs} \\ t_{sa} & t_{sb} & t_{sc} & t_{sr} & t_{ss} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \\ U_r \\ U_s \end{bmatrix} \quad (kV/cm) \quad (XI.15)$$

Considerando que os cabos pára-raios são aterrados, tem-se o seguinte desenvolvimento:

$$[\Delta E] = [T] [U] \quad (kV/cm)$$

Sendo:

$$[T] = 1/(t_{rr} \cdot t_{ss} - t_{rs}^2) \begin{bmatrix} L_1 C_1 & L_1 C_2 & L_1 C_3 \\ L_2 C_1 & L_2 C_2 & L_2 C_3 \\ L_3 C_1 & L_3 C_2 & L_3 C_3 \end{bmatrix}$$

Onde:

$L_i C_j$: representam os termos da linha “i” e da coluna “j”.

Sendo:

$$L_1 C_1 = t_{aa}(t_{rr} t_{ss} - t_{rs}^2) - t_{ar}^2 t_{ss} - t_{as}^2 t_{rr} + 2 t_{rs} t_{ar} t_{as} \quad (XI.16)$$

$$L_2 C_1 = t_{ab}(t_{rr} t_{ss} - t_{rs}^2) - t_{ar} t_{br} t_{ss} - t_{as} t_{bs} t_{rr} + t_{rs}(t_{ar} t_{bs} + t_{as} t_{br}) \quad (XI.17)$$

$$L_3 C_1 = t_{ac}(t_{rr} t_{ss} - t_{rs}^2) - t_{ar} t_{cr} t_{ss} - t_{as} t_{cs} t_{rr} + t_{rs}(t_{ar} t_{cs} + t_{as} t_{cr}) \quad (XI.18)$$

$$L_1 C_2 = t_{ab}(t_{rr} t_{ss} - t_{rs}^2) - t_{br} t_{ar} t_{ss} - t_{bs} t_{as} t_{rr} + t_{rs}(t_{br} t_{as} + t_{bs} t_{ar}) \quad (XI.19)$$

$$L_2 C_2 = t_{bb}(t_{rr} t_{ss} - t_{rs}^2) - t_{br}^2 t_{ss} - t_{bs}^2 t_{rr} + 2 t_{rs} t_{br} t_{bs} \quad (XI.20)$$

$$L_3 C_2 = t_{bc}(t_{rr} t_{ss} - t_{rs}^2) - t_{br} t_{cr} t_{ss} - t_{bs} t_{cs} t_{rr} + t_{rs}(t_{br} t_{cs} + t_{bs} t_{cr}) \quad (XI.21)$$

$$L_1 C_3 = t_{ac}(t_{rr} t_{ss} - t_{rs}^2) - t_{cr} t_{ar} t_{ss} - t_{cs} t_{as} t_{rr} + t_{rs}(t_{cr} t_{as} + t_{cs} t_{ar}) \quad (XI.22)$$

$$L_2 C_3 = t_{bc}(t_{rr} t_{ss} - t_{rs}^2) - t_{cr} t_{br} t_{ss} - t_{cs} t_{bs} t_{rr} + t_{rs}(t_{cr} t_{bs} + t_{cs} t_{br}) \quad (XI.23)$$

$$L_3 C_3 = t_{cc}(t_{rr} t_{ss} - t_{rs}^2) - t_{cr}^2 t_{ss} - t_{cs}^2 t_{rr} + 2 t_{rs} t_{cr} t_{cs} \quad (XI.24)$$

Desta forma chegaremos à equação:

$$\begin{bmatrix} \Delta E'_a \\ \Delta E'_b \\ \Delta E'_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t'_{aa} & t'_{ab} & t'_{ac} \\ t'_{ab} & t'_{bb} & t'_{cb} \\ t'_{ac} & t'_{bc} & t'_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} \quad (kV/cm)$$

XI.1.1.4. Gradiente de potencial em linha de circuito duplo com um cabo pára-raios

Para este arranjo de linha de transmissão aérea de energia elétrica e observando-se as mesmas condições avaliadas no capítulo X, tem-se o seguinte desenvolvimento a partir da equação (XI.11):

$$[\Delta E] = [T] [U] \quad (KV/cm)$$



$$\begin{bmatrix} \Delta E_a \\ \Delta E_b \\ \Delta E_c \\ \Delta E_r \\ \Delta E_d \\ \Delta E_e \\ \Delta E_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{aa} & t_{ab} & t_{ac} & t_{ar} & t_{ad} & t_{ae} & t_{af} \\ t_{ba} & t_{bb} & t_{bc} & t_{br} & t_{bd} & t_{be} & t_{bf} \\ t_{ca} & t_{cb} & t_{cc} & t_{cr} & t_{cd} & t_{ce} & t_{cf} \\ t_{ra} & t_{rb} & t_{rc} & t_{rr} & t_{rd} & t_{re} & t_{rf} \\ t_{da} & t_{db} & t_{dc} & t_{dr} & t_{dd} & t_{de} & t_{df} \\ t_{ea} & t_{eb} & t_{ec} & t_{er} & t_{ed} & t_{ee} & t_{ef} \\ t_{fa} & t_{fb} & t_{fc} & t_{fr} & t_{fd} & t_{fe} & t_{ff} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \\ U_r \\ U_d \\ U_e \\ U_f \end{bmatrix} \quad (kV/cm) \quad (XI.25)$$

Considerando que o cabo pára-raios é aterrado, tem-se o seguinte desenvolvimento:

$$[\Delta E] = [T] [U] \quad (kV/cm)$$

onde:

$$[T] = \begin{bmatrix} (t_{aa} + t_{ad}) & (t_{ab} + t_{ae}) & (t_{ac} + t_{af}) \\ (t_{ba} + t_{bd}) & (t_{bb} + t_{be}) & (t_{bc} + t_{bf}) \\ (t_{ca} + t_{cd}) & (t_{cb} + t_{ce}) & (t_{cc} + t_{cf}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} (t_{ap}^2 + t_{rd}t_{ar})/t_{rr} & (t_{br}t_{ar} + t_{rd}t_{br})/t_{rr} \\ (t_{br}t_{ar} + t_{re}t_{ar})/t_{rr} & (t_{br}^2 + t_{re}t_{br})/t_{rr} \\ (t_{cr}t_{ar} + t_{rf}t_{ar})/t_{rr} & (t_{br}t_{cr} + t_{rf}t_{br})/t_{rr} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} (t_{cr}t_{ap} + t_{rd}t_{cr})/t_{rr} \\ (t_{cr}t_{br} + t_{re}t_{cr})/t_{rr} \\ (t_{cr}^2 + t_{rf}t_{cr})/t_{rr} \end{bmatrix}$$

Desta forma chegaremos à equação:

$$\begin{bmatrix} \Delta E'_a \\ \Delta E'_b \\ \Delta E'_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t'_{aa} & t'_{ab} & t'_{ac} \\ t'_{ab} & t'_{bb} & t'_{cb} \\ t'_{ac} & t'_{bc} & t'_{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} \quad (kV/cm)$$

XI.1.1.5. Gradiente de potencial em linha de circuito duplo com dois cabos pára-raios

Para este arranjo de linha de transmissão aérea de energia elétrica e observando-se as mesmas condições avaliadas no capítulo X, tem-se o seguinte desenvolvimento a partir da equação (XI.11):

$$[\Delta E] = [T] [U] \quad (kV/cm)$$



$$\begin{bmatrix} \Delta E_a \\ \Delta E_b \\ \Delta E_c \\ \Delta E_r \\ \Delta E_s \\ \Delta E_d \\ \Delta E_e \\ \Delta E_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{aa} & t_{ab} & t_{ac} & t_{ar} & t_{as} & t_{ad} & t_{ae} & t_{af} \\ t_{ba} & t_{bb} & t_{bc} & t_{br} & t_{bs} & t_{bd} & t_{be} & t_{bf} \\ t_{ca} & t_{cb} & t_{cc} & t_{cr} & t_{cs} & t_{cd} & t_{ce} & t_{cf} \\ t_{ra} & t_{rb} & t_{rc} & t_{rr} & t_{rs} & t_{rd} & t_{re} & t_{rf} \\ t_{sa} & t_{sb} & t_{sc} & t_{sr} & t_{ss} & t_{sd} & t_{se} & t_{sf} \\ t_{da} & t_{db} & t_{dc} & t_{dr} & t_{ds} & t_{dd} & t_{de} & t_{df} \\ t_{ea} & t_{eb} & t_{ec} & t_{er} & t_{es} & t_{ed} & t_{ee} & t_{ef} \\ t_{fa} & t_{fb} & t_{fc} & t_{fr} & t_{fs} & t_{fd} & t_{fe} & t_{ff} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \\ U_r \\ U_s \\ U_d \\ U_e \\ U_f \end{bmatrix} \quad (kV/cm) \quad (XI.26)$$

Considerando os cabos pára-raios aterrados, tem-se o seguinte desenvolvimento:

$$[\Delta E] = [T] [U] \quad (kV/cm)$$

onde:

$$[T] = 1/(t_{rr}t_{ss} - t_{rs}^2) \begin{bmatrix} L_1C_1 & L_1C_2 & L_1C_3 \\ L_2C_1 & L_2C_2 & L_2C_3 \\ L_3C_1 & L_3C_2 & L_3C_3 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} t'_{11} & t'_{12} & t'_{13} \\ t'_{21} & t'_{22} & t'_{23} \\ t'_{31} & t'_{32} & t'_{33} \end{bmatrix} = 1/(t_{rr}t_{ss} - t_{rs}^2) - \begin{bmatrix} L_1C_1 & L_1C_2 & L_1C_3 \\ L_2C_1 & L_2C_2 & L_2C_3 \\ L_3C_1 & L_3C_2 & L_3C_3 \end{bmatrix}$$

Onde:

L_iC_j : representam os termos da linha "i" e da coluna "j".

Sendo:

$$L_1C_1 = (t_{aa} + t_{ad})(t_{rr}t_{ss} - t_{rs}^2) - t_{ar}^2t_{ss} - t_{as}^2t_{rr} - t_{ar}t_{ss}t_{dr} - t_{rs}t_{as}t_{ds} + t_{rs}t_{dr}t_{as} + t_{rs}t_{ds}t_{ar} + 2t_{rs}t_{ar}t_{as} \quad (XI.27)$$

$$L_2C_1 = (t_{ab} + t_{bd})(t_{rr}t_{ss} - t_{rs}^2) - t_{ar}t_{br}t_{ss} - t_{as}t_{bs}t_{rr} - t_{ar}t_{br}t_{dr} - t_{rs}t_{bs}t_{ds} + t_{rs}t_{dr}t_{bs} + t_{rs}t_{ds}t_{br} + t_{rs}(t_{ar}t_{bs} + t_{as}t_{br}) \quad (XI.27)$$

$$L_3C_1 = (t_{ac} + t_{cd})(t_{rr}t_{ss} - t_{rs}^2) - t_{ar}t_{cr}t_{ss} - t_{as}t_{cs}t_{rr} - t_{ar}t_{cr}t_{dr} - t_{rs}t_{cs}t_{ds} + t_{rs}t_{dr}t_{cs} + t_{rs}t_{ds}t_{cr} + t_{rs}(t_{ar}t_{cs} + t_{as}t_{cr}) \quad (XI.28)$$

$$L_1C_2 = (t_{ab} + t_{ae})(t_{rr}t_{ss} - t_{rs}^2) - t_{br}t_{ar}t_{ss} - t_{bs}t_{as}t_{rr} - t_{ss}t_{ar}t_{er} - t_{rs}t_{as}t_{es} + t_{rs}t_{es}t_{er} + t_{rs}t_{ar}t_{es} + t_{rs}(t_{br}t_{as} + t_{bs}t_{ar}) \quad (XI.29)$$

$$L_2C_2 = (t_{bb} + t_{be})(t_{rr}t_{ss} - t_{rs}^2) - t_{br}^2t_{ss} - t_{bs}^2t_{rr} - t_{ss}t_{br}t_{er} - t_{rs}t_{bs}t_{es} + t_{rs}t_{es}t_{er} + t_{rs}t_{br}t_{es} + 2t_{rs}t_{br}t_{bs} \quad (XI.30)$$

$$L_3C_2 = (t_{bc} + t_{ce})(t_{rr}t_{ss} - t_{rs}^2) - t_{br}t_{cr}t_{ss} - t_{bs}t_{cs}t_{rr} - t_{ss}t_{cr}t_{er} - t_{rs}t_{cs}t_{es} + t_{rs}t_{es}t_{er} + t_{rs}t_{cr}t_{es} + t_{rs}(t_{br}t_{cs} + t_{bs}t_{cr}) \quad (XI.31)$$

$$L_1C_3 = (t_{ac} + t_{af})(t_{rr}t_{ss} - t_{rs}^2) - t_{ar}t_{cr}t_{ss} - t_{as}t_{cs}t_{rr} - t_{ss}t_{ar}t_{fr} - t_{rs}t_{as}t_{fs} + t_{rs}t_{fs}t_{fr} + t_{rs}t_{ar}t_{fs} + t_{rs}(t_{cr}t_{as} + t_{cs}t_{ar}) \quad (XI.32)$$

$$L_2C_3 = (t_{bc} + t_{bf})(t_{rr}t_{ss} - t_{rs}^2) - t_{ar}t_{br}t_{ss} - t_{as}t_{bs}t_{rr} - t_{ss}t_{br}t_{fr} - t_{rs}t_{bs}t_{fs} + t_{rs}t_{fs}t_{fr} + t_{rs}t_{br}t_{fs} + t_{rs}(t_{cr}t_{bs} + t_{cs}t_{br}) \quad (XI.33)$$

$$L_3C_3 = (t_{cc} + t_{cf})(t_{rr}t_{ss} - t_{rs}^2) - t_{ar}^2t_{ss} - t_{cs}^2t_{rr} - t_{ss}t_{cr}t_{fr} - t_{rs}t_{cs}t_{fs} + t_{rs}t_{fs}t_{fr} + t_{rs}t_{cr}t_{fs} + 2t_{rs}t_{cr}t_{cs} \quad (XI.34)$$

Desta forma chegaremos à equação:

$$\begin{bmatrix} \Delta E'_a \\ \Delta E'_b \\ \Delta E'_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t'_{aa} & t'_{ab} & t'_{ac} \\ t'_{ab} & t'_{bb} & t'_{cb} \\ t'_{ac} & t'_{bc} & t'_{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} \quad (kV/cm)$$



XI.2. Gradiente de campo elétrico no limite da faixa de servidão

Pela definição de campo elétrico, considerando o método das imagens para um condutor considerado infinito e tendo o solo como ideal, conforme ilustra a *figura XI.1*, a densidade de carga (λ) corresponde à carga elétrica por unidade de comprimento. Sendo assim, pode-se escrever a equação do campo elétrico como:

$$E = Q / (2\pi\epsilon r) \text{ (kV/m)}$$

Para “r” dado em metros.

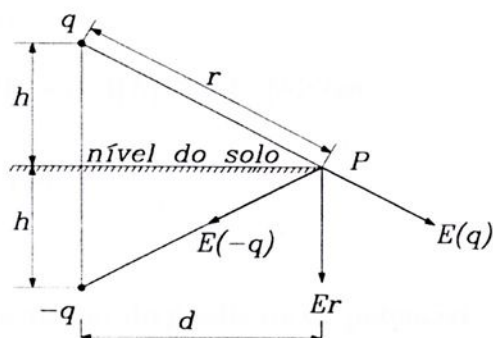


figura XI.1. Representação do campo elétrico de um condutor retilíneo infinito, em um ponto P, a uma distância r, pelo método das imagens

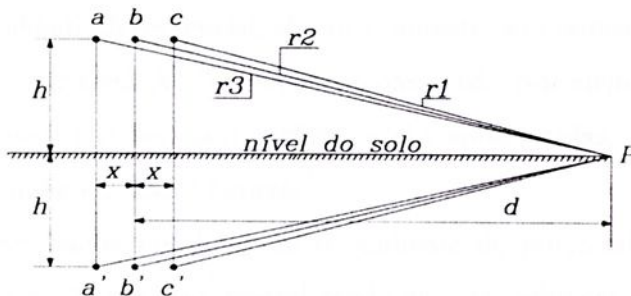


figura XI.2. Representação do campo elétrico de uma linha trifásica equivalente, em um ponto P, a uma distância “d” do eixo central dessa linha

Considerando o vetor de gradiente de campo elétrico obtido para uma linha trifásica equivalente, sem cabos pára-raios, conforme os casos anteriores deste capítulo e de acordo com a representação ilustrada na *figura XI.2*, pode-se escrever a seguinte equação:

$$E_r = E_{YA} + E_{YB} + E_{YC} \quad (\text{XI.35})$$

Onde:

$$E_{YA} = (Q_a / (2\pi\epsilon)) \{2h / (h^2 + (d+x)^2)\} \text{ (kV/m)} \quad (\text{XI.36})$$

$$E_{YB} = (Q_b / (2\pi\epsilon)) \{2h / (h^2 + d^2)\} \text{ (kV/m)} \quad (\text{XI.37})$$

$$E_{YC} = (Q_c / (2\pi\epsilon)) \{2h / (h^2 + (d-x)^2)\} \text{ (kV/m)} \quad (\text{XI.38})$$

sendo “ h ”, “ d ” e “ x ” dados em *metros*, e as cargas Q_a , Q_b e Q_c , em *Coulomb*.

Para efeito de comparação de valores do campo elétrico nos limites das faixas de servidão, com a especificação do item 12.5.1 da NBR 5422, será adotada a simplificação de $x=0$.

Essa simplificação acarretará erros de até 2%, para valores de “ x ” iguais ao comprimento horizontal das maiores mísulas ou braços de linhas de transmissão. Esses braços, para as atuais linhas de 138 kV, não ultrapassam, em média, o valor de 3,50 metros.

Comparando-se as equações (XI.36), (XI.37) e (XI.38) com equação (XI.6), pode-se escrever a expressão do gradiente de campo elétrico para o limite da faixa de servidão de uma linha de transmissão como sendo:

$$[\Delta E_i] = (1/(2\pi\epsilon))(2h/\sqrt{h^2 + d^2})[E]^{-1}[U_i] \quad (\text{kV}/\text{m}) \quad (\text{XI.39})$$

$$E_{\text{LIM-FX}} = \sum_{i=1}^3 \Delta E_i \quad (\text{kV}/\text{m}) \quad (\text{V.40})$$

XI.3. A importância da análise do gradiente de potencial

O valor do gradiente de potencial em um projeto de linha de transmissão é de fundamental importância para a análise das condições de operação da linha.

Em função do gradiente de potencial, são determinadas as condições de potencial nos limites da faixa de servidão (*ver tabela XI.1*), bem como das perdas por efeito corona, rádio e TV interferência e ruído audível. No próximo capítulo serão apresentadas, de forma ilustrativa, algumas características e condições desses fatores.

A avaliação dos resultados obtidos para o gradiente de potencial e para o potencial elétrico nos limites das faixas de servidão, considerando algumas silhuetas representativas para estruturas de circuito duplo, ilustradas no *apêndice C*, será mostrada no *capítulo XIII*.

Tabela XI.1. Recomendações para limite de gradiente de potencial – Ref.[27]

Área de avaliação	Valor do Gradiente em kV/m
Dentro da faixa de servidão	15
Faixa de 2 vezes a largura da linha	10
Fora dos limites da faixa de servidão (*)	5

(*) – Valor indicado no item 12.5.1 da referência [5]



XII. PERDAS POR DISPERSÃO E INTERFERÊNCIAS

As perdas por dispersão podem ser, em termos práticos, consideradas como uniformemente distribuídas ao longo das linhas, englobando as perdas nos isoladores e por efeito corona.

Essas perdas são representadas pela condutância de dispersão que apresenta características de admitância, representadas nos modelos de linhas como um elemento em derivação.

Por definição, essas perdas são expressas da seguinte forma:

$$g = \Delta p / U^2 10^{-3} \text{ (siemens/km)} \quad (\text{XII.1})$$

onde:

Δp : soma das perdas por dispersão, em uma fase da linha, em (kW/km)

U : tensão de operação, entre fase e neutro, em (kV)

Em relação às perdas nos isoladores, sabe-se que são devidas, em parte, às características dos materiais a partir do qual são fabricados. Elas também ocorrem ao longo de sua superfície. Esse escape de corrente em frequência normal implica em perda de energia cujo valor se dá em função de uma série de fatores, tais como: qualidade do material do isolador, condições de superfície, geometria, frequência da tensão aplicada, potencial a que são submetidos, condições meteorológicas, entre outros.

Essas perdas são, geralmente, estimadas em medições experimentais para cada classe de tensão.

XII.1. O efeito corona

As três principais manifestações do efeito corona que apresentam maiores preocupações nos projetos de linhas de transmissão e ocorrem simultaneamente são: perdas de energia, rádio interferências e ruídos auditivos. As perdas por corona representam problemas econômicos e se relacionam diretamente com o gradiente de potencial dos condutores. Por sua vez, a rádio interferência e os ruídos audíveis apresentam características de poluição ambiental.

O efeito Corona aparece na superfície dos condutores de uma linha área de transmissão quando o valor do gradiente de potencial supera o valor do gradiente crítico disruptivo do ar.

Várias condições determinam essa tensão disruptiva em campos elétricos uniformes como: pressão do ar, presença de vapor d'água, tensão aplicada, fotoionização incidente. Em campos não uniformes ao redor dos condutores, a divergência do campo provoca influências,



sendo que qualquer tipo de partícula ou irregularidade nos cabos provoca fontes pontuais de descargas.

Resumidamente, as perdas por efeito corona podem ser classificadas como manifestações físicas decorrentes do fenômeno corona, sobre o qual pode-se fazer as seguintes observações [30]:

- Existência de perdas elevadas sob chuva, neblina ou condições superficiais adversas;
- Em tempo bom, estas perdas seriam relevantes em condições superficiais ou sobretensões a 60 Hz elevadas;
- Durante as rejeições de cargas, as perdas corona podem ser significativas;
- Em estudos econômicos que consideram perdas médias, as perdas corona podem constituir um fator limitante;
- A coleta e análise das perdas corona, via de regra, são feitas estatisticamente;
- As perdas corona contém harmônicos e podem modificar substancialmente a frente de onda de surtos rápidos de tensão;
- Em linhas de transmissão, as perdas corona podem ser obtidas separando-as das perdas decorrentes do efeito Joule;
- Para as linhas que operam com gradiente baixo, as perdas corona são de difícil detecção em tempo bom, por serem pouco significativas.

XII.1.1. Gradiente máximo admissível e corona visual.

O gradiente crítico de efeito corona pode ser expresso pela formulação de F.W.Peek, a qual estabeleceu bases para o correto dimensionamento de condutores das linhas de transmissão, em função do fenômeno corona. Os resultados de seus trabalhos continuam válidos, tendo sido confirmados, posteriormente, pela literatura especializada.

A formulação obtida pelos estudos de Peek e complementada por C.J.Miller [13], para o cálculo do gradiente crítico visual, será apresentada neste item. Os valores obtidos servirão de base de comparação em relação ao gradiente de potencial elétrico calculado através do desenvolvimento da equação (XI.6) para as cinco configurações de linhas de transmissão, analisadas neste trabalho.

O fenômeno das descargas de corona pode ser verificado experimentalmente, caracterizando-se inicialmente por valores mais elevados na superfície dos condutores, sendo o menor desses valores designado por 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 foi denominada como distância de energia, sendo definida como $0,301/(r)^{1/2}$ (cm) em atmosfera padrão [13].

A partir dessa distância, definiu-se a expressão para gradiente crítico visual:

$$E_{CRV} = 18,1m\delta(1 + 0,54187/\sqrt{r_{eq}}\delta) \quad (kV/cm) \quad (XII.2)$$

Onde:

E_{CRV} : gradiente crítico visual

m : fator de superfície definido em pesquisa por C.J.Miller – (ver tabela XII.1)

r_{eq} : raio equivalente para condutores múltiplos ou “r” para condutores singelos

δ : Fator de correção calculado pela equação:

$$\delta = 0,386b/(273 + t) \quad (XII.3)$$

sendo:

$b = 760 - 0,086.b$ (em mmHg – $b(m)$), a pressão em relação ao nível do mar e “b”, a altitude média local.

t : temperatura em graus Celsius (utiliza-se a temperatura média anual)

$E_0 = 30,5(kV/cm)$ gradiente crítico disruptivo do ar atmosférico em atmosfera padrão de 20°C e pressão barométrica de 760 mm de Hg

$E_0 = 21,6 (kV/cm)$: valor eficaz para corrente alternada.

Tabela XII.1. Fatores de superfície, por C.J.Miller – Ref.[13]

Condições superficiais dos condutores		Fatores de superfície (m)
1	Condutores cilíndricos, polidos, 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 – (média 0,60)	0,53 a 0,73
6	Cabos molhados, novos ou usados	0,16 a 0,25

Para que uma linha apresente desempenho satisfatório em relação ao fenômeno corona, é necessário que o gradiente de potencial na superfície dos condutores seja inferior ao valor do gradiente crítico visual calculado para a linha, isto é:

$$E < E_{CRV}$$



Em relação às perdas e nível de intensidade de ruídos de rádio interferência, pode-se esperar um desempenho satisfatório para valores de gradiente de potencial inferiores a 17 kV/cm [13].

XII.1.2. Rádio Interferência

Devido ao efeito corona, ruídos de várias frequências são gerados nas linhas de transmissão, ruídos esses cuja intensidade pode ser medida por um sistema de antenas e um detector sintonizado a uma dada frequência. Esses ruídos são avaliados em Volts por metro.

Descargas ou eflúvios pontuais nas superfícies dos condutores provocam a formação de pulsos de corrente que se propagam ao longo das linhas, estabelecendo campos eletromagnéticos que se estendem lateralmente e que são detectados por receptores de rádios na faixa de frequência de 0,5 a 2 MHz [27].

A linha gera ruídos em todas essas frequências que sofrem atenuação até atingir a antena, atenuação esta que é maior quanto maior for a frequência. Assim, em se projetando uma linha em que a interferência é aceitável na faixa de ondas médias, em particular na faixa de 0,5 MHz, ela será também aceitável para as maiores.

O critério de aceitabilidade é avaliado pela relação sinal/ruído (SNR), ou seja, a relação entre a intensidade do sinal da estação e o ruído gerado a uma dada distância da linha de transmissão a uma altura do solo.

A unidade de medida da rádio-interferência é o decibel (dB), definida como:

$$dB = 20 \log(V_1 / V_2) \quad (XII.4)$$

onde:

$V_1 (\mu V/m)$: intensidade de campo do sinal ou da interferência

$V_2 (\mu V/m)$: unidade de referência, em geral igual a 1 ($\mu V/m$)

Definindo a relação sinal-ruído:

$$S(dB) = 20 \log(V_s / 1) \quad (XII.5)$$

$$R(dB) = 20 \log(V_r / 1) \quad (XII.6)$$

$$SNR(dB) = 20 \log(V_s / V_r)$$

$$SNR(dB) = 20 \log(V_s / 1) - 20 \log(V_r / 1)$$

Resulta:

$$SNR(dB) = S(dB) - R(dB) \quad (XII.7)$$

Os fatores que afetam a rádio-interferência e que constituem as variáveis na maioria dos métodos são: configuração ou distribuição espacial relativa dos condutores das linhas; fator de superfície; frequência de energia irradiada; resistividade do solo; umidade relativa do ar;



velocidade do vento e índice de precipitação de chuvas. Existem diferentes avaliações sobre a importância de cada um deles, sendo bastante complexos os estudos sobre o comportamento das linhas de transmissão quanto à rádio-interferência.

Diversos fatores, alguns ainda indefinidos, afetam esse comportamento observado nas linhas. Os efeitos cumulativos, referentes à rádio-interferência, acabam sendo considerados através de bases estatísticas, porém, existe um consenso sobre a influência das condições de superfície na aparição desse fenômeno.

A classificação sobre a qualidade de recepção pode ser feita em função da relação $SNR(dB)$ por meio das classes de recepção indicadas na *tabela XII.2*.

Tabela XII.2. Classes de recepção pela relação sinal-ruído. – Ref.[13], [19] e [27]

Relação Sinal/Ruído (SNR)	Qualidade de Recepção	Classe de Recepção
32	Inteiramente satisfatória	A
27 a 32	Muito boa, ruído não importuno	B
22 a 27	Razoavelmente boa, ruído evidente	C
16 a 22	Ruído muito evidente, palavras inteligíveis	D
6 a 16	Palavras inteligíveis com esforço de concentração	E
7	Palavras ininteligíveis	F

As intensidades mínimas de campo, exigidas por norma dos órgãos reguladores, são mostradas na *tabela XII.3*.

Tabela XII.3. Intensidades mínimas de campo, por tipo de áreas urbanas. - Ref.[27]

Natureza da área a ser servida	Intensidade de Campo Mínima ($dB\mu$)
Metropolitana Comercial ou Industrial	80
Metropolitana Residencial	66
Cidade de 2500 a 10.000 habitantes	66
Localidades até 2500 habitantes	40



XII.1.3. Métodos de cálculo de rádio interferência

Entre os métodos de cálculo de rádio interferência (RI), observa-se duas linhas bem definidas na modelagem. Uma corresponde aos métodos empíricos, onde uma equação empírica procura descrever o fenômeno. A outra linha pode ser denominada de semi-empírica, onde algumas formulações empíricas são associadas a parcelas de tratamentos analíticos.

Os métodos empíricos apresentam, como característica, a técnica de comparação, utilizando como base o desempenho de outras linhas semelhantes.

A equação geral característica utilizada para todos os métodos comparativos é considerada perfeitamente válida para os estudos de rádio interferência e pode ser expressa da seguinte forma [12], [21]:

$$E = E_0 + E_s + E_d + E_m + E_{Db} + E_f + E_T \quad (\text{XII.8})$$

Onde:

E : valor de RI calculado em dB/1 ($\mu\text{V}/\text{m}$)

E_0 : valor de referência de um nível de RI em dB acima de $1\mu\text{V}/\text{m}$

E_s : fator de correção pela variação do gradiente

E_d : fator de correção pelo diâmetro do condutor

E_m : fator de correção pela variação do número de sub-condutores

E_{Db} : fator de correção pela distância do condutor ao ponto de observação

E_f : fator de correção para efeito de variação da frequência do ruído

E_T : fator de correção para condições atmosféricas adversas

Todos os valores são calculados em dB, em relação à referência.

Tal formulação, pela maneira como foi estabelecida, exige cuidados na aplicação em virtude dos limites estabelecidos de validade, como também da característica de adequação à origem das linhas.

XII.1.3.1. Método Italiano – ENEL – ref.[12]

$$E = 50 + 3,8(g_{\max} - 15) + 40\log(r/2,5) + 10\log(n) + 30\log(20/D) + 20\log((1+0,5^2)/(1+f^2)) + ALT/300 + E_T \quad (\text{XII.9})$$

Onde:

ALT : altitude acima do nível do mar em metros

$E_T = 14$ (valor médio de distribuição adotado para condições de tempo ruins)

$E_T = 18$ (valor adotado para condições de chuva intensa)

$g_{\max}$: gradiente superficial máximo em kV/cm

r : raio do condutor em cm



n : número de sub-condutores

D : distância do condutor à antena, na altura do condutor, em metros

f : frequência de RI em Hertz

Todos os valores são calculados em dB, em relação à referência, sendo que os resultados obtidos representam o valor de 50% na distribuição de tempo bom.

XII.1.3.2. Método Canadense – Ontario Hydro – ref.[12] e [21]

$$E = E_0 + A \log(g_{\max} / 18,8) + 40 \log(d / 2,54) + B \log(30,5 / D) + 20 \log((C + 1) / (C + f^2)) \quad (\text{XII.10})$$

Onde os valores considerados são:

$E_0 = 34 \pm 6$ db – para linhas horizontais com 50% de tempo bom

$E_0 = 37 \pm 6$ db – para linhas verticais com 50% de tempo bom

$E_0 = 63$ db – para linhas horizontais - valor máximo - tempo ruim

$E_0 = 63$ db – para linhas verticais - valor máximo - tempo ruim

$A = 146$: tempo bom

$A = 120$: tempo ruim

$B = 40$: linhas horizontais

$B = 32$: linhas verticais

$C = 1$ (para frequências de RI ≥ 1 MHz)

$C = 0,5$ (para frequências de RI < 1 MHz)

Sendo:

$g_{\max}$: gradiente superficial máximo em kV/cm

d : diâmetro do condutor em metros

D : distância do condutor à antena e na altura do condutor

f : frequência de RI em Hertz

Todos os valores são calculados em dB, em relação à referência.

XII.1.4. Ruído Audível

As linhas de transmissão com tensão inferior a 500 kV pouco contribuem para a geração de ruídos acústicos.

Os ruídos são medidos através dos níveis de intensidade sonora, sendo esta definida como “a potência média transportada por uma onda sonora por unidade de área”.

Devido a uma variação muito ampla, considera-se uma escala logarítmica para a medição desses níveis:

$$NIS = 10 \cdot \log(I/I_0) \quad (dB) \quad (XII.11)$$

Onde:

$I \text{ (W/cm}^2\text{)} = \text{intensidade de ruído médio}$

$I_0 \text{ [W/cm}^2\text{)} = \text{valor arbitrário, geralmente considerado igual ao limite inferior da sensibilidade (10}^{-16} \text{ W/s)}$

$NIS = \text{Nível de intensidade sonora} - \text{definido como decibel acima de 0,0002 bar [27].}$

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 decibéis acima de 0,0002 bar.

Os ruídos acústicos, devidos às linhas de transmissão, são causados pelo fenômeno corona e ocorrem nos condutores e nas ferragens. Dentro da categoria de ruídos ambientais existentes, classificam-se na categoria fisiológica dos que não causam danos ao ouvido humano, cujos limites estabelecidos são entre 85 e 90 dB, sendo considerados em vários graus de incômodo. Os níveis representativos de intensidade sonora são indicados na *tabela XII.4*.

Tabela XII.4. Níveis representativos de intensidade sonora.-Ref.[13]

Descrição do Ruído	NIS em dB
Limite da sensação dolorosa	120
Marteletes ou rebitadores pneumáticos	95
Trem elétrico	90
Interior de carro esporte	84
Tráfego intenso	70
Conversação normal	65
Escritórios normais	50 a 60
Sala sem movimento	25 a 30
Murmúrio	20
Brisa leve em folhagens	10

Fatores que influenciam o surgimento de ruídos audíveis:

- Tensão de operação – apresentando valores significativos de ruídos para tensões acima de 500 kV;
- Condições atmosféricas – sob as chuvas pesadas, o ruído que estas provocam é normalmente maior que o ruído gerado pelas linhas. Em termos de ruídos audíveis, as



piores condições acontecem sob chuvas fracas e neblinas. Nesses casos, ocorre acúmulo de água na superfície dos condutores, aumentando-se o grau de perturbação. Para as condições de tempo bom, o nível de ruído chega a ser de 5 a 20 dB menor do que o caso para condutores molhados;

- Condutores - diâmetro dos condutores, número de condutores por feixe e a disposição geométrica desses feixes;
- Condições superficiais dos condutores – os condutores envelhecidos possuem superfícies mais lisas e como isso têm um desempenho melhor;
- Posição da linha de transmissão – a distância das linhas e a posição dos objetos refletoras;
- Condições de vento – grau de atenuação pelo ar, direções e intensidades dos ventos.

XII.1.5. Perdas de energia pelo fenômeno corona.

Mesmo considerando linhas bem dimensionadas e as condições climáticas como favoráveis, as linhas de transmissão nas quais as perdas por corona podem ser desprezadas na determinação dos parâmetros de linhas, podem apresentar valores significativos quando em condições de tempo passarem a ser adversas.

O valor das perdas corona aumenta com a taxa de precipitação até um ponto em que começa-se a notar uma certa saturação, em torno de 12 a 13 mm/h [30].

Formulações para determinação analítica dessas perdas devido ao efeito corona, são apresentadas considerando as equações de Peterson [13].

Essas formulações têm por objetivo uma análise geral para a avaliação das perdas por corona nas linhas de transmissão.

XII.1.5.1. Perda de potência sob tempo bom

$$P_{TB} = 0,00002094 f U^2 \phi / (\log(dm_g / r)) \quad (\text{XII.12})$$

f : frequência do sistema em Hertz

U : tensão eficaz entre fase e neutro em kV

r : raio externo do condutor ou do sub-condutor em cm

dm_g : distância média geométrica entre sub-condutores em cm

ϕ : fator experimental dependente da relação $U/U_0 = E/E_{CRV}$ – figura XII.1

E : gradiente de potencial do condutor ou sub-condutor em kV/cm

E_{CRV} : gradiente crítico visual do condutor ou sub-condutor em kV/cm

E/E_{CRV} : gradientes relativos - perdas em Watts/metro - figura XII.2.



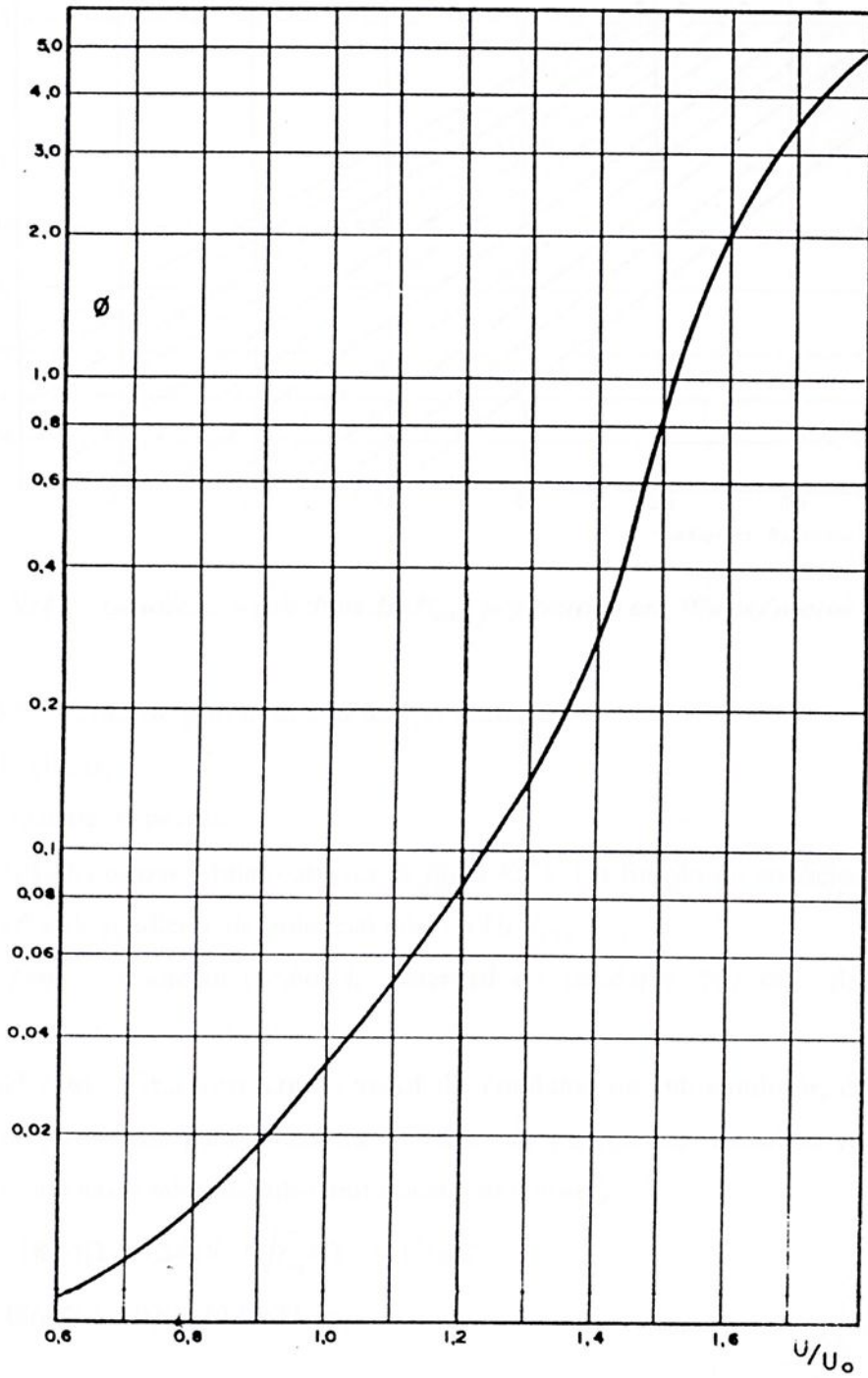


figura XII.1 - Coeficiente de perdas por corona (coeficiente de Peterson) - Ref.[13]

Valores de ϕ para a relação E/E_{CRV} entre 0,5 e 1,8. Para valores de $E/E_{CRV} < 1$, há perdas, mesmo sem a manifestação visual do efeito corona.

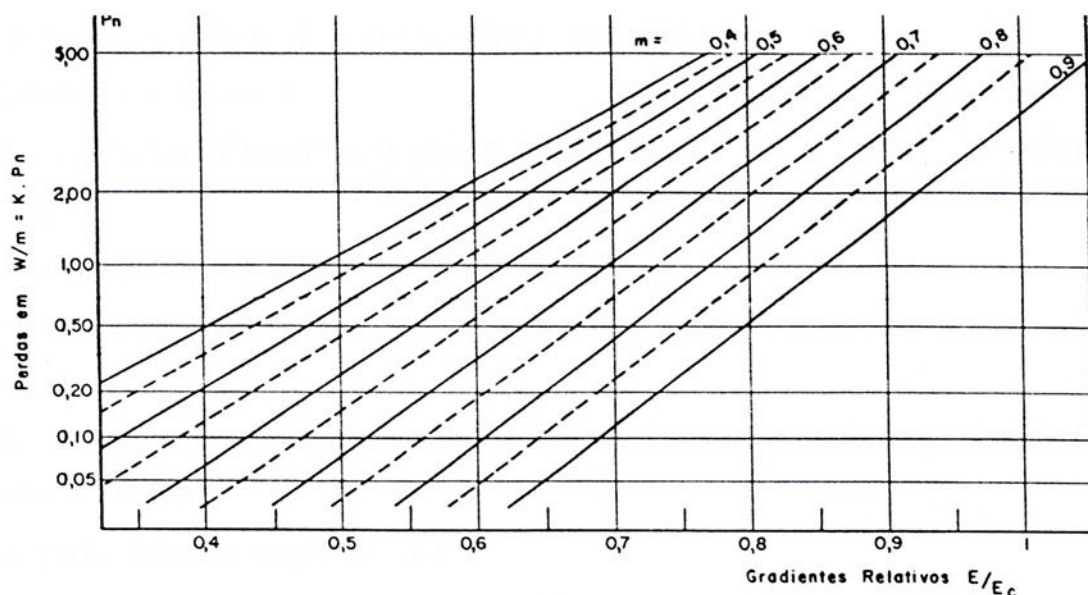


figura XII.2. Gradientes relativos E/E_{CRV} por perdas em Watts/metro - Ref.[13]

XII.1.5.2. Perda de potência sob tempo chuvoso

$$P = K P_n (W/m)$$

K : Coeficiente de perdas

P_n = Perdas reduzidas, obtidas através da figura XII.2, em função do coeficiente de estado de superfície " m " e do gradiente de potencial relativo E/E_{CRV} .

E (kV/cm): Gradiente médio de potencial do condutor. No caso de condutores múltiplos, utiliza-se o raio equivalente.

E_{CRV} (kV/cm): Gradiente crítico visual do condutor ou sub-condutor, calculado pela equação de Peek, corrigida para considerar o efeito da variação da densidade relativa do ar, considerando-se apenas o raio dos sub-condutores (condutores).

$$E_{CRV} = 18,1\delta(1 + 0,54187/\sqrt{r_{eq}\delta}) \quad (kV/cm) \quad (XII.13)$$

$$\delta = 0,386(760 - 0,086h)/(273 + t) \quad (XII.14)$$

sendo:

$b = 760 - 0,086h$ (em $mmHg$ - $h(m)$), a pressão em relação ao nível do mar e " h ", a altitude média local.

t : temperatura em graus Celsius (utilizando-se a temperatura média anual)

$E_0 = 30,5(kV/cm)$ gradiente crítico disruptivo do ar atmosférico em atmosfera padrão de $20^\circ C$ e pressão barométrica de $760 mm$ de Hg

$E_0 = 21,6(kV/cm)$ - valor eficaz para corrente alternada

Gráficos para o cálculo de perdas sob chuva - *figura XII.3*.

Cálculo do coeficiente K :

$$K = (f/50)(nr\beta)^2 \log(R/R_c) \log(\rho/R_c) / \log(R/\rho) \quad (\text{XII.15})$$

onde:

f : Frequência do sistema em *Hertz*

r : Raio externo dos " n " sub-condutores em *cm*

$$\beta = 1 + 0,3/(r)^{1/2}$$

R_c : raio do condutor equivalente do feixe de condutores, para cada fase, em *cm*, ou " r " para condutores simples

ρ : para condutores simples $\rho = 18.r^{1/2}$

ρ : para condutores múltiplos $\rho = 18.(nr+4)^{1/2}$

R : Raio, em *cm*, de um cilindro coaxial com o condutor, de potencial nulo, determinado a partir da capacitância de sequência positiva para a linha trifásica, sendo:

$$R = R_c \log^{-1}(0,02412 \cdot 10^{-6} / C_1) \quad (\text{XII.16})$$

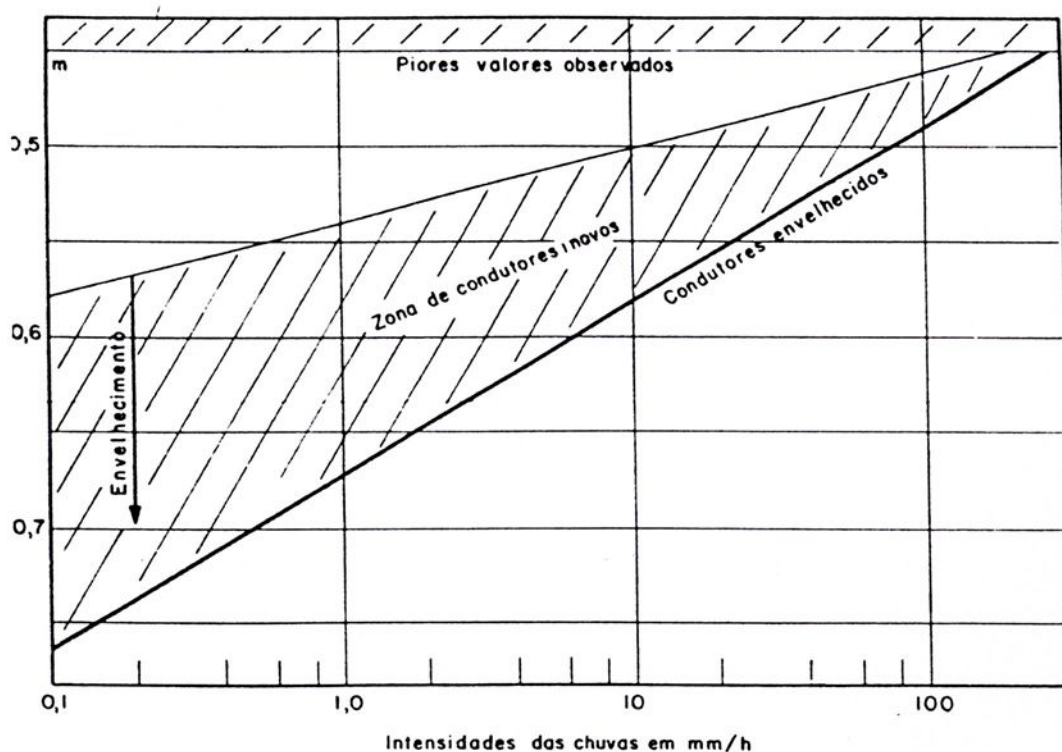


figura XII.3. Gráficos para o cálculo de perdas sob chuva - Ref.[13]



XII.2. Determinação das perdas de energia em uma linha de transmissão

As perdas de energia são de difícil determinação, por se tratar de uma componente dependente, na sua maioria, de condições climáticas e da conservação dos materiais. Constituem-se de grandezas definidas em termos estatísticos em função das condições às quais as linhas são submetidas.

Desta forma, a determinação do Gradiente de Potencial, em função do projeto da linha de transmissão, deve ser considerada como uma etapa importante para se obter resultados satisfatórios em termos de perdas de energia. Os fatores que influem na determinação do gradiente como: escolha dos condutores, determinação de espaçamentos e disposição de fases devem ser observados com especial atenção.



XIII. RESULTADOS OBTIDOS

XIII.1. O desenvolvimento dos estudos e o programa computacional

O desenvolvimento obtido nos capítulos relativos à indutância, impedância, capacitância e gradiente de potencial das linhas de transmissão permitiu a elaboração de um programa computacional, desenvolvido em linguagem Fortran, denominado *CPLTs*. Por meio desse programa foi possível a obtenção dos parâmetros elétricos sequenciais para linhas de transmissão, considerando os vários tipos de silhuetas de estruturas utilizadas atualmente pelas diversas concessionárias de energia elétrica no Brasil. Para o estudo comparativo dos métodos de cálculo e também das geometrias das estruturas, foi adotada a representação de circuitos sequenciais π . O programa *CPLTs* também elabora o cálculo dos parâmetros do projeto eletromecânico, tendo como base de entrada os dados listados pela *tabela B6* do *apêndice B*.

Essa tabela constitui a base de dados de entrada de todo o projeto, sendo confeccionada de forma sequencial, com indicação da fonte de consulta para cada dado de entrada.

No caso dos parâmetros elétricos, foi elaborado o cálculo para o método denominado “aproximado”, obtido através de simplificações do método de Carson e largamente utilizado pelas concessionárias. O programa também possibilita a obtenção de resultados através das matrizes completas dos parâmetros: resistência à corrente alternada, reatância indutiva, impedância, capacitância e gradiente de potencial. Essas matrizes equivalentes irão possibilitar a visualização da influência do não emprego de transposição de fases nos projetos de linhas de transmissão, por meio da observação dos termos localizados fora da diagonal principal.

Outra preocupação deste estudo foi enfatizar as classes de tensão de 69 e 138 kV. Esta opção poderá ser observada por meio das silhuetas de estruturas selecionadas e apresentadas no *apêndice C*. Tal preocupação deve-se ao fato dessas classes de tensão estarem sempre minimizadas nos diversos estudos de linhas de transmissão, por existir a cultura de que estão “esgotadas” em termos de avaliação.

Os cálculos em relação às novas concepções de estruturas, implantadas atualmente nos projetos de linhas de transmissão, juntamente com a análise dos casos reais das linhas sem a presença de transposição mostram, através dos valores obtidos pelo método “exato”, que a avaliação dessas classes de tensão não estão esgotadas e que as simplificações adotadas devem ser abandonadas, conforme poderá se comprovar pelos resultados a serem apresentados neste capítulo.



XIII.2. Aspectos gerais da análise dos parâmetros elétricos

As tabelas XIII.1 a XIII.16 apresentam os dados gerais dos parâmetros elétricos para sete silhuetas de estruturas, selecionadas entre os 38 tipos de estruturas ilustradas nas figuras do *apêndice C*. Esses sete tipos foram escolhidos em função da sua representatividade, considerando as linhas de transmissão atualmente em operação ou em fase de execução. Essas tabelas incluem os valores de resistência, reatância e susceptância entre seqüências, tradicionalmente desprezados.

As estruturas selecionadas para a análise foram:

- CDPM2P – Estrutura metálica para circuito duplo paralelo, com espaçamento convencional entre fases e dois cabos pára-raios. Considerada como estrutura de referência por sua larga e tradicional utilização nos projetos de linhas de transmissão para a classe de tensão de 138 kV, estando representada no *apêndice C* na *figura C31*.
- CDPP00 – Estrutura em concreto armado para circuito duplo paralelo, com dois cabos pára-raios, espaçamento compacto entre fases e ângulo de blindagem igual a zero grau. Utiliza isoladores do tipo pilar, estando representada no *apêndice C* como *figura C34*.
- CDPP15 – Estrutura em concreto armado para circuito duplo paralelo, com dois cabos pára-raios, espaçamento compacto entre as fases e ângulo de blindagem igual a quinze graus. Utiliza isoladores do tipo pilar, estando representada no *apêndice C* como *figura C37*.
- CDPC1P - Estrutura em concreto armado para circuito duplo paralelo, com espaçamento convencional entre as fases e um cabo pára-raios instalado na posição central. Utiliza cruzetas de concreto e cadeias de suspensão com isoladores do tipo disco. Está representada no *apêndice C* como *figura C27*.
- CDPP1P -. Estrutura em concreto armado para circuito duplo paralelo, com espaçamento compacto entre as fases e um cabo pára-raios instalado na posição central. Utiliza isoladores do tipo pilar, estando representada no *apêndice C* como *figura C29*.
- CDVC15 – Estrutura para circuito duplo, com instalação na mesma vertical, espaçamento convencional entre as fases e um cabo pára-raios para um ângulo de blindagem igual a quinze graus. Utiliza cruzetas de concreto e cadeias de suspensão com isoladores do tipo disco. Está representada no *apêndice C* como *figura C21*.



- CDVP29 – Estrutura para circuito duplo, com instalação na mesma vertical, espaçamento compacto entre as fases e um cabo pára-raios para um ângulo de blindagem igual a vinte e nove graus. Utiliza isoladores do tipo pilar. Está representada no *apêndice C* como *figura C23*.

O critério para a escolha dos condutores também foi o da representatividade em relação à grande quantidade de opções existentes no mercado e que são aplicadas nos projetos atuais de linhas de transmissão para um cabo por fase. Adotou-se o intervalo do condutor de menor diâmetro em uso nos projetos de 69 e 138 kV (CAA.226.600-CM-Partridge) até o de maior diâmetro normalmente utilizados (CAA.795.000-CM-Drake), passando por dois condutores intermediários de larga aplicação. (CAA.336.400-CM-Linnet e CAA.477.000-CM-Hawk).

XIII.2.1. Apresentação das tabelas dos parâmetros de seqüência

As tabelas XIII.1, XIII.2, XIII.3 e XIII.4, apresentadas a seguir, trazem os valores representativos dos circuitos π para as seqüências positiva e nula, considerando as estruturas e condutores escolhidos.

Cada uma delas permite a confrontação entre os dois métodos de cálculo, o “aproximado” e o “exato”, além de oferecer condição de comparação entre as estruturas CDPP00, CDPP15, CDPC1P, CDPP1P, CDVC15 e CDVP29 com a estrutura de referência CDPM2P. Já, a comparação entre elas mostra a diferença para o emprego de cada tipo de condutor.

A simbologia CD2P é utilizada para representar estruturas de circuito duplo com dois cabos pára-raios, enquanto a simbologia CD1P é utilizada para indicar as estruturas de circuito duplo com um cabo pára-raios.



Tabela XIII.1. Valores do circuito π para seqüência positiva e seqüência nula – condutores CAA.226.600-CM-Patridge – cabos pára-raios de diâmetro 7,94mm-EAR

Tipo da Silhueta	Método	SEQÜÊNCIA POSITIVA			SEQÜÊNCIA NULA		
		IMPEDÂNCIA		SUSCEPTÂNCIA (B) Siemens/km	IMPEDÂNCIA		SUSCEPTÂNCIA (B) Siemens/km
		Resistência Ohms/km	Reatância Ohms/km		Resistência Ohms/km	Reatância Ohms/km	
CDPM2P 1 - CD2P	Aprox.	0,3201536	0,5114491	0,000003192086	0,3201536	1,7370380	0,000001500692
	Exato	0,2535682	0,5146534	0,000003203631	0,8985286	2,6638520	0,000001534856
	Dif.M%	26,26%	-0,62%	-0,36%	-64,37%	-34,79%	-2,23%
	D% Base	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
CDPP00 4 - CD2P	Aprox.	0,3201536	0,4501843	0,000003642283	0,3201536	1,7167910	0,000001364283
	Exato	0,2545161	0,4528275	0,000003648050	0,9694234	2,8968780	0,000001452055
	Dif.M%	25,79%	-0,58%	-0,16%	-66,97%	-40,74%	-6,04%
	D% Base	0,37%	-12,01%	13,87%	7,89%	8,75%	-5,39%
CDPP15 7 - CD2P	Aprox.	0,3201536	0,4501843	0,000003642283	0,3201536	1,7422460	0,000001360351
	Exato	0,2543170	0,4522645	0,000003648758	0,9699532	2,8935100	0,000001440775
	Dif.M%	25,89%	-0,46%	-0,18%	-66,99%	-39,79%	-5,58%
	D% Base	0,30%	-12,12%	13,89%	7,95%	8,62%	-6,13%
CDPC1P 7 - CD1P	Aprox.	0,3201536	0,5152304	0,000003167918	0,3201536	2,1545510	0,000001333425
	Exato	0,2613685	0,5151570	0,000003243769	0,7593583	2,8403340	0,000001337983
	Dif.M%	22,49%	0,01%	-2,34%	-57,84%	-24,14%	-0,34%
	D% Base	3,08%	0,10%	1,25%	-15,49%	6,63%	-12,83%
CDPP1P 9 - CD1P	Aprox.	0,3201536	0,4501843	0,000003642283	0,3201536	2,1825550	0,000001236235
	Exato	0,2611708	0,4501445	0,000003709920	0,7866510	3,0189550	0,000001239473
	Dif.M%	22,58%	0,01%	-1,82%	-59,30%	-27,70%	-0,26%
	D% Base	3,00%	-12,53%	15,80%	-12,45%	13,33%	-19,24%
CDVC15 1 - CD1P	Aprox.	0,3201536	0,4777812	0,000003424711	0,3201536	2,3137380	0,000001305110
	Exato	0,2600551	0,5158334	0,000003343009	0,7305080	2,6605850	0,000001533038
	Dif.M%	23,11%	-7,38%	2,44%	-56,17%	-13,04%	-14,87%
	D% Base	2,56%	0,23%	4,35%	-18,70%	-0,12%	-0,12%
CDVP29 13 - CD1P	Aprox.	0,3201536	0,4476782	0,000003663417	0,3201536	2,3991360	0,000001159994
	Exato	0,2627006	0,4471215	0,000003720849	0,7508109	2,9890220	0,000001194586
	Dif.M%	21,87%	0,12%	-1,54%	-57,36%	-19,74%	-2,90%
	D% Base	3,60%	-13,12%	16,14%	-16,44%	12,21%	-22,17%



Tabela XIII.2. Valores do circuito π para seqüência positiva e seqüência nula – condutores CAA.336.400-CM-Linnet – cabos pára-raios de diâmetro 7,94mm-EAR

Tipo da Silhueta	Método	SEQÜÊNCIA POSITIVA			SEQÜÊNCIA NULA		
		IMPEDÂNCIA		SUSCEPTÂNCIA (B) Siemens/km	IMPEDÂNCIA		SUSCEPTÂNCIA (B) Siemens/km
		Resistência Ohms/km	Reatância Ohms/km		Resistência Ohms/km	Reatância Ohms/km	
CDPM2P 1 - CD2P	Aprox.	0,2661643	0,5026319	0,000003249016	0,2661643	1,7282210	0,000001513157
	Exato	0,1995707	0,5058257	0,000003261978	0,8449542	2,6554220	0,000001548471
	Dif.M%	33,37%	-0,63%	-0,40%	-68,50%	-34,92%	-2,28%
	D% Base	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
CDPP00 4 - CD2P	Aprox.	0,2661643	0,4413671	0,000003716591	0,2661643	1,7079740	0,000001374577
	Exato	0,2005199	0,4440010	0,000003724191	0,9159226	2,8885520	0,000001464576
	Dif.M%	32,74%	-0,59%	-0,20%	-70,94%	-40,87%	-6,15%
	D% Base	0,48%	-12,22%	14,17%	8,40%	8,78%	-5,42%
CDPP15 7 - CD2P	Aprox.	0,2661643	0,4413671	0,000003716591	0,2661643	1,7334290	0,000001370585
	Exato	0,2003204	0,4441378	0,000003724920	0,9164608	2,8851790	0,000001453108
	Dif.M%	32,87%	-0,62%	-0,22%	-70,96%	-39,92%	-5,68%
	D% Base	0,38%	-12,20%	14,19%	8,46%	8,65%	-6,16%
CDPC1P 7 - CD1P	Aprox.	0,2661643	0,5064132	0,000003223982	0,2661643	2,1457340	0,000001343257
	Exato	0,2073795	0,5063406	0,000003303211	0,7055460	2,8317450	0,000001347975
	Dif.M%	28,35%	0,01%	-2,40%	-62,28%	-24,23%	-0,35%
	D% Base	3,91%	0,10%	1,26%	-16,50%	6,64%	-12,95%
CDPP1P 9 - CD1P	Aprox.	0,2661643	0,4413671	0,000003716591	0,2661643	2,1737380	0,000001244682
	Exato	0,2071816	0,4413277	0,000003787929	0,7328620	3,0104080	0,000001248039
	Dif.M%	28,47%	0,01%	-1,88%	-63,68%	-27,79%	-0,27%
	D% Base	3,81%	-12,75%	16,12%	-13,27%	13,37%	-19,40%
CDVC15 1 - CD1P	Aprox.	0,2661643	0,4689640	0,000003490327	0,2661643	2,3049210	0,000001314528
	Exato	0,2060649	0,5070148	0,000003406915	0,6766706	2,6519520	0,000001547616
	Dif.M%	29,17%	-7,50%	2,45%	-60,67%	-13,09%	-15,06%
	D% Base	3,25%	0,24%	4,44%	-19,92%	-0,13%	-0,06%
CDVP29 13 - CD1P	Aprox.	0,2661643	0,4388610	0,000003738599	0,2661643	2,3903190	0,000001167428
	Exato	0,2087129	0,4383070	0,000003799358	0,6969908	2,9804190	0,000001202668
	Dif.M%	27,53%	0,13%	-1,60%	-61,81%	-19,80%	-2,93%
	D% Base	4,58%	-13,35%	16,47%	-17,51%	12,24%	-22,33%



Tabela XIII.3. Valores do circuito π para seqüência positiva e seqüência nula – condutores CAA.477.000-CM-Hawk – cabos pára-raios de diâmetro 7,94mm-EAR

Tipo da Silhueta	Método	SEQÜÊNCIA POSITIVA			SEQÜÊNCIA NULA		
		IMPEDÂNCIA		SUSCEPTÂNCIA	IMPEDÂNCIA		SUSCEPTÂNCIA
		Resistência <i>Ohms/km</i>	Reatância <i>Ohms/km</i>	(B) <i>Siemens/km</i>	Resistência <i>Ohms/km</i>	Reatância <i>Ohms/km</i>	(B) <i>Siemens/km</i>
CDPM2P 1 - CD2P	Aprox.	0,2051616	0,4896160	0,000003339552	0,2051616	1,7152050	0,000001532507
	Exato	0,1385557	0,4927942	0,000003354914	0,7845622	2,6429810	0,000001569673
	Dif.M%	48,07%	-0,64%	-0,46%	-73,85%	-35,10%	-2,37%
	D% Base	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
CDPP00 4 - CD2P	Aprox.	0,2051616	0,4283511	0,000003835537	0,2051616	1,6949580	0,000001390526
	Exato	0,1395069	0,4309713	0,000003846319	0,8556388	2,8762640	0,000001484088
	Dif.M%	47,06%	-0,61%	-0,28%	-76,02%	-41,07%	-6,30%
	D% Base	0,69%	-12,55%	14,65%	9,06%	8,83%	-5,45%
CDPP15 7 - CD2P	Aprox.	0,2051616	0,4283511	0,000003835537	0,2051616	1,7204130	0,000001386441
	Exato	0,1393068	0,4311079	0,000003847082	0,8561892	2,8728850	0,000001472323
	Dif.M%	47,27%	-0,64%	-0,30%	-76,04%	-40,12%	-5,83%
	D% Base	0,54%	-12,52%	14,67%	9,13%	8,70%	-6,20%
CDPC1P 7 - CD1P	Aprox.	0,2051616	0,4933972	0,000003313109	0,2051616	2,1327180	0,000001358483
	Exato	0,1463771	0,4933258	0,000003397905	0,6448031	2,8190680	0,000001363460
	Dif.M%	40,16%	0,01%	-2,50%	-68,18%	-24,35%	-0,37%
	D% Base	5,64%	0,11%	1,28%	-17,81%	6,66%	-13,14%
CDPP1P 9 - CD1P	Aprox.	0,2051616	0,4283511	0,000003835537	0,2051616	2,1607220	0,000001257744
	Exato	0,1461791	0,4283123	0,000003913075	0,6721535	2,9977930	0,000001261296
	Dif.M%	40,35%	0,01%	-1,98%	-69,48%	-27,92%	-0,28%
	D% Base	5,50%	-13,08%	16,64%	-14,33%	13,42%	-19,65%
CDVC15 1 - CD1P	Aprox.	0,2051616	0,4559481	0,000003595028	0,2051616	2,2919050	0,000001329106
	Exato	0,1450608	0,4939969	0,000003508930	0,6158910	2,6319209	0,000001570406
	Dif.M%	41,43%	-7,70%	2,45%	-66,69%	-12,92%	-15,37%
	D% Base	4,69%	0,24%	4,59%	-21,50%	-0,42%	0,05%
CDVP29 13 - CD1P	Aprox.	0,2051616	0,4258451	0,000003858982	0,2051616	2,3773030	0,000001178912
	Exato	0,1477126	0,4252954	0,000003925328	0,6362367	2,9677210	0,000001215180
	Dif.M%	38,89%	0,13%	-1,69%	-67,75%	-19,89%	-2,98%
	D% Base	6,61%	-13,70%	17,00%	-18,91%	12,29%	-22,58%



Tabela XIII.4. Valores do circuito π para seqüência positiva e seqüência nula – condutores CAA.795.000-CM-Drake – cabos pára-raios de diâmetro 9,54mm-EAR

Tipo da Silhueta	Método	SEQÜÊNCIA POSITIVA			SEQÜÊNCIA NULA		
		IMPEDÂNCIA		SUSCEPTÂNCIA	IMPEDÂNCIA		SUSCEPTÂNCIA
		Resistência <i>Ohms/km</i>	Reatância <i>Ohms/km</i>	(B) <i>Siemens/km</i>	Resistência <i>Ohms/km</i>	Reatância <i>Ohms/km</i>	(B) <i>Siemens/km</i>
CDPM2P 1 - CD2P	Aprox.	0,1467864	0,4701567	0,000003481033	0,1467864	1,6828550	0,000001566406
	Exato	0,0783222	0,4749643	0,000003499770	0,7936546	2,5433750	0,000001606968
	Dif.M%	87,41%	-1,01%	-0,54%	-81,51%	-33,83%	-2,52%
	D% Base	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
CDPP00 4 - CD2P	Aprox.	0,1467864	0,4088919	0,000004023345	0,1467864	1,6597840	0,000001420683
	Exato	0,0794876	0,4128813	0,000004038734	0,8833528	2,7621340	0,000001521836
	Dif.M%	84,67%	-0,97%	-0,38%	-83,38%	-39,91%	-6,65%
	D% Base	1,49%	-13,07%	15,40%	11,30%	8,60%	-5,30%
CDPP15 7 - CD2P	Aprox.	0,1467864	0,4088919	0,000004023345	0,1467864	1,6858810	0,000001416078
	Exato	0,0792603	0,4130876	0,000004039622	0,8825886	2,7572220	0,000001508952
	Dif.M%	85,20%	-1,02%	-0,40%	-83,37%	-38,86%	-6,15%
	D% Base	1,20%	-13,03%	15,43%	11,21%	8,41%	-6,10%
CDPCIP 7 - CD1P	Aprox.	0,1467864	0,4739380	0,000003452312	0,1467864	2,0985560	0,000001384636
	Exato	0,0881331	0,4738149	0,000003546893	0,6283093	2,7652590	0,000001390058
	Dif.M%	66,55%	0,03%	-2,67%	-76,64%	-24,11%	-0,39%
	D% Base	12,53%	-0,24%	1,35%	-20,83%	8,72%	-13,50%
CDPP1P 9 - CD1P	Aprox.	0,1467864	0,4088919	0,000004023345	0,1467864	2,1243590	0,000001281176
	Exato	0,0878752	0,4088249	0,000004111849	0,6634759	2,9393780	0,000001285096
	Dif.M%	67,04%	0,02%	-2,15%	-77,88%	-27,73%	-0,31%
	D% Base	12,20%	-13,93%	17,49%	-16,40%	15,57%	-20,03%
CDVC15 1 - CD1P	Aprox.	0,1467864	0,4364888	0,000003759516	0,1467864	2,2615080	0,000001352240
	Exato	0,0864340	0,4747229	0,000003669345	0,5912191	2,5703240	0,000001607646
	Dif.M%	69,82%	-8,05%	2,46%	-75,17%	-12,69%	-15,89%
	D% Base	10,36%	-0,05%	4,85%	-25,51%	1,85%	0,04%
CDVP29 13 - CD1P	Aprox.	0,1467864	0,4063858	0,000004049150	0,1467864	2,3444920	0,000001197752
	Exato	0,0898736	0,4055189	0,000004125238	0,6171462	2,9154300	0,000001235645
	Dif.M%	63,33%	0,21%	-1,84%	-76,22%	-19,58%	-3,07%
	D% Base	14,75%	-14,62%	17,87%	-22,24%	14,63%	-23,11%

XIII.2.2. Apresentação das tabelas dos parâmetros entre seqüências

Os efeitos da não utilização de transposição de fases nos projetos das linhas poderão ser vistos ao se analisar as tabelas XIII.5 a XIII.16. Elas apresentam os valores dos parâmetros entre os circuitos de seqüência. Os valores listados nessas tabelas foram obtidos por meio do cálculo pelo método “exato”. Destacam-se os valores comparativos percentuais para cada parâmetro tabelado, de cada estrutura em relação à referência CDPM2P.

As tabelas XIII.5, XIII.6, XIII.7 e XIII.8, apresentadas a seguir, referem-se aos parâmetros entre os circuitos de seqüência positiva e de seqüência nula, utilizando o mesmo critério de elaboração das tabelas XIII.1 a XIII.4.

Tabela XIII.5. Parâmetros entre os circuitos π de seqüência positiva e nula – condutores CAA.226.600-CM-Patridge – cabo pára-raios de diâmetro 7,94mm-EAR

Tipo da Silhueta	Método	SEQÜÊNCIA POSITIVA			SEQÜÊNCIA NULA		
		IMPEDÂNCIA		SUSCEPTÂNCIA	IMPEDÂNCIA		SUSCEPTÂNCIA
		Resistência <i>Ohms/km</i>	Reatância <i>Ohms/km</i>	(B) <i>Siemens/km</i>	Resistência <i>Ohms/km</i>	Reatância <i>Ohms/km</i>	(B) <i>Siemens/km</i>
CDPM2P	Exato	-0,0278288	-0,0148236	0,000000067469	0,0181993	-0,0059356	0,000000067469
1 - CD2P	%Seq(+)	10,97%	2,88%	2,11%	7,18%	1,15%	2,11%
CDPP00	Exato	-0,0259942	-0,0138274	0,000000036937	0,0174136	-0,0062074	0,000000036937
4 - CD2P	%Seq(+)	10,21%	3,05%	1,01%	6,84%	1,37%	1,01%
CDPP15	Exato	-0,0263017	-0,0139008	0,000000037078	0,0173381	-0,0058952	0,000000037078
7 - CD2P	%Seq(+)	10,34%	3,07%	1,02%	6,82%	1,30%	1,02%
CDPC1P	Exato	-0,0309768	-0,0161754	0,000000050664	0,0184712	-0,0068929	0,000000050664
7 - CD1P	%Seq(+)	11,85%	3,14%	1,56%	7,07%	1,34%	1,56%
CDPP1P	Exato	-0,0265184	-0,0136631	0,000000027566	0,0161188	-0,0064734	0,000000027566
9 - CD1P	%Seq(+)	10,15%	3,04%	0,74%	6,17%	1,44%	0,74%
CDVC15	Exato	-0,0249401	-0,0135673	0,000000065257	0,0170741	-0,0070709	0,000000065257
1 - CD1P	%Seq(+)	9,59%	2,63%	1,95%	6,57%	1,37%	1,95%
CDVP29	Exato	0,0141933	-0,0492032	0,000000136721	-0,0158646	-0,0487018	0,000000136721
13 - CD1P	%Seq(+)	5,40%	11,00%	3,67%	6,04%	10,89%	3,67%

Tabela XIII.6. Parâmetros entre os circuitos π de seqüência positiva e nula – condutores CAA.336.400-CM-Linnet – cabo pára-raios de diâmetro 7,94mm-EAR

Tipo da Silhueta	Método	SEQÜÊNCIA POSITIVA			SEQÜÊNCIA NULA		
		IMPEDÂNCIA		SUSCEPTÂNCIA	IMPEDÂNCIA		SUSCEPTÂNCIA
		Resistência <i>Ohms/km</i>	Reatância <i>Ohms/km</i>	(B) <i>Siemens/km</i>	Resistência <i>Ohms/km</i>	Reatância <i>Ohms/km</i>	(B) <i>Siemens/km</i>
CDPM2P	Exato	-0,0782790	-0,0148361	0,000000069265	0,0181870	-0,0059378	0,000000069265
1 - CD2P	%Seq(+)	39,22%	2,93%	2,12%	9,11%	1,17%	2,12%
CDPP00	Exato	-0,0259933	-0,0138380	0,000000038074	0,0174031	-0,0062096	0,000000038074
4 - CD2P	%Seq(+)	12,96%	3,12%	1,02%	8,68%	1,40%	1,02%
CDPP15	Exato	-0,0263009	-0,0139119	0,000000038217	0,0173271	-0,0058972	0,000000038217
7 - CD2P	%Seq(+)	13,13%	3,13%	1,03%	8,65%	1,33%	1,03%
CDPC1P	Exato	-0,0309748	-0,0161901	0,000000052035	0,0184578	-0,0068991	0,000000052035
7 - CD1P	%Seq(+)	14,94%	3,20%	1,58%	8,90%	1,36%	1,58%
CDPP1P	Exato	-0,0265171	-0,0136747	0,000000028445	0,0161084	-0,0064787	0,000000028445
9 - CD1P	%Seq(+)	12,80%	3,10%	0,75%	7,78%	1,47%	0,75%
CDVC15	Exato	-0,0249386	-0,0135771	0,000000067079	0,0170648	-0,0070744	0,000000067079
1 - CD1P	%Seq(+)	12,10%	2,68%	1,97%	8,28%	1,40%	1,97%
CDVP29	Exato	0,0141930	-0,0492049	0,000000140312	-0,0158658	-0,0487030	0,000000140312
13 - CD1P	%Seq(+)	6,80%	11,23%	3,69%	7,60%	11,11%	3,69%

Tabela XIII.7. Parâmetros entre os circuitos π de seqüência positiva e nula – condutores CAA.477.000-CM-Hawk – cabo pára-raios de diâmetro 7,94mm-EAR

Tipo da Silhueta	Método	SEQÜÊNCIA POSITIVA			SEQÜÊNCIA NULA		
		IMPEDÂNCIA		SUSCEPTÂNCIA	IMPEDÂNCIA		SUSCEPTÂNCIA
		Resistência <i>Ohms/km</i>	Reatância <i>Ohms/km</i>	(B) <i>Siemens/km</i>	Resistência <i>Ohms/km</i>	Reatância <i>Ohms/km</i>	(B) <i>Siemens/km</i>
CDPM2P	Exato	-0,0278266	-0,0148546	0,000000072144	0,0181688	-0,0059410	0,000000072144
1 - CD2P	%Seq(+)	20,08%	3,01%	2,15%	13,11%	1,21%	2,15%
CDPP00	Exato	-0,0259920	-0,0138536	0,000000039916	0,0173878	-0,0062129	0,000000039916
4 - CD2P	%Seq(+)	18,63%	3,21%	1,04%	12,46%	1,44%	1,04%
CDPP15	Exato	-0,0262998	-0,0139284	0,000000040060	0,0173110	-0,0059004	0,000000040060
7 - CD2P	%Seq(+)	18,88%	3,23%	1,04%	12,43%	1,37%	1,04%
CDPC1P	Exato	-0,0309719	-0,0162117	0,000000054235	0,0184380	-0,0069084	0,000000054235
7 - CD1P	%Seq(+)	21,16%	3,29%	1,60%	12,60%	1,40%	1,60%
CDPP1P	Exato	-0,0265151	-0,0136919	0,000000029872	0,0160930	-0,0064868	0,000000029872
9 - CD1P	%Seq(+)	18,14%	3,20%	0,76%	11,01%	1,51%	0,76%
CDVC15	Exato	-0,0249362	-0,0135916	0,000000070010	0,0170512	-0,0070798	0,000000070010
1 - CD1P	%Seq(+)	17,19%	2,75%	2,00%	11,75%	1,43%	2,00%
CDVP29	Exato	0,0141925	-0,0492975	0,000000146074	-0,0158676	-0,0487049	0,000000146074
13 - CD1P	%Seq(+)	9,61%	11,59%	3,72%	10,74%	11,45%	3,72%

Tabela XIII.8. Parâmetros entre os circuitos π de seqüência positiva e nula – condutores CAA.795.000-CM-Drake – cabo pára-raios de diâmetro 9,53mm-EAR

Tipo da Silhueta	Método	SEQÜÊNCIA POSITIVA			SEQÜÊNCIA NULA		
		IMPEDÂNCIA		SUSCEPTÂNCIA	IMPEDÂNCIA		SUSCEPTÂNCIA
		Resistência <i>Ohms/km</i>	Reatância <i>Ohms/km</i>	(B) <i>Siemens/km</i>	Resistência <i>Ohms/km</i>	Reatância <i>Ohms/km</i>	(B) <i>Siemens/km</i>
CDPM2P	Exato	-0,0301473	-0,0148946	0,000000076176	0,0178945	-0,0036466	0,000000076176
1 - CD2P	%Seq(+)	38,49%	3,14%	2,18%	22,85%	0,77%	2,18%
CDPP00	Exato	-0,0279597	-0,0139115	0,000000042286	0,0170770	-0,0042733	0,000000042286
4 - CD2P	%Seq(+)	35,17%	3,37%	1,05%	21,48%	1,03%	1,05%
CDPP15	Exato	-0,0283586	-0,0139601	0,000000042465	0,0170267	-0,0038656	0,000000042465
7 - CD2P	%Seq(+)	35,78%	3,38%	1,05%	21,48%	0,94%	1,05%
CDPC1P	Exato	-0,0337209	-0,0164962	0,000000056754	0,0173461	-0,0043716	0,000000056754
7 - CD1P	%Seq(+)	38,26%	3,48%	1,60%	19,68%	0,92%	1,60%
CDPP1P	Exato	-0,0287074	-0,0138729	0,000000031243	0,0151410	-0,0045044	0,000000031243
9 - CD1P	%Seq(+)	32,67%	3,39%	0,76%	17,23%	1,10%	0,76%
CDVC15	Exato	-0,0267871	-0,0138348	0,000000074063	0,0164324	-0,0053298	0,000000074063
1 - CD1P	%Seq(+)	30,99%	2,91%	2,02%	19,01%	1,12%	2,02%
CDVP29	Exato	0,0138758	-0,0491366	0,000000155263	-0,0160919	-0,0484692	0,000000155263
13 - CD1P	%Seq(+)	15,44%	12,12%	3,76%	17,91%	11,95%	3,76%

Para os parâmetros entre os circuitos de seqüência negativa e nula, as tabelas são XIII.9, XIII.10, XIII.11 e XIII.12.

Tabela XIII.9. Parâmetros entre os circuitos π de seqüência negativa e nula – condutores CAA.226.600-CM-Patridge – cabo pára-raios de diâmetro 7,94mm-EAR

Tipo da Silhueta	Método	SEQÜÊNCIA POSITIVA			SEQÜÊNCIA NULA		
		IMPEDÂNCIA		SUSCEPTÂNCIA	IMPEDÂNCIA		SUSCEPTÂNCIA
		Resistência <i>Ohms/km</i>	Reatância <i>Ohms/km</i>	(B) <i>Siemens/km</i>	Resistência <i>Ohms/km</i>	Reatância <i>Ohms/km</i>	(B) <i>Siemens/km</i>
CDPM2P	Exato	0,0181993	-0,0059356	0,000000067469	-0,0278288	-0,0148236	0,000000067469
1 - CD2P	%Seq(+)	7,18%	1,15%	2,11%	10,97%	2,88%	2,11%
CDPP00	Exato	0,0174136	-0,0062074	0,000000036937	-0,0259942	-0,0138274	0,000000036937
4 - CD2P	%Seq(+)	6,84%	1,37%	1,01%	10,21%	3,05%	1,01%
CDPP15	Exato	0,0173381	-0,0058952	0,000000037078	-0,0263017	-0,0139008	0,000000037078
7 - CD2P	%Seq(+)	6,82%	1,30%	1,02%	10,34%	3,07%	1,02%
CDPC1P	Exato	0,0184712	-0,0068929	0,000000050664	-0,0309768	-0,0161754	0,000000050664
7 - CD1P	%Seq(+)	7,07%	1,34%	1,56%	11,85%	3,14%	1,56%
CDPP1P	Exato	0,0161188	-0,0064734	0,000000027566	-0,0265184	-0,0136631	0,000000027566
9 - CD1P	%Seq(+)	6,17%	1,44%	0,74%	10,15%	3,04%	0,74%
CDVC15	Exato	0,0170741	-0,0070709	0,000000065257	-0,0249401	-0,0135673	0,000000065257
1 - CD1P	%Seq(+)	6,57%	1,37%	1,95%	9,59%	2,63%	1,95%
CDVP29	Exato	-0,0158646	-0,0487018	0,000000136721	0,0141933	-0,0492032	0,000000136721
13 - CD1P	%Seq(+)	6,04%	10,89%	3,67%	5,40%	11,00%	3,67%

Tabela XIII.10. Parâmetros entre os circuitos π de seqüência negativa e nula – condutores CAA.336.400-CM-Linnet – cabo pára-raios de diâmetro 7,94mm-EAR

Tipo da Silhueta	Método	SEQÜÊNCIA POSITIVA			SEQÜÊNCIA NULA		
		IMPEDÂNCIA		SUSCEPTÂNCIA	IMPEDÂNCIA		SUSCEPTÂNCIA
		Resistência <i>Ohms/km</i>	Reatância <i>Ohms/km</i>	(B) <i>Siemens/km</i>	Resistência <i>Ohms/km</i>	Reatância <i>Ohms/km</i>	(B) <i>Siemens/km</i>
CDPM2P	Exato	0,0181870	-0,0059378	0,000000069265	-0,0782790	-0,0148361	0,000000069265
1 - CD2P	%Seq(+)	9,11%	1,17%	2,12%	39,22%	2,93%	2,12%
CDPP00	Exato	0,0174031	-0,0062096	0,000000038074	-0,0259933	-0,0138380	0,000000038074
4 - CD2P	%Seq(+)	8,68%	1,40%	1,02%	12,96%	3,12%	1,02%
CDPP15	Exato	0,0173271	-0,0058972	0,000000038217	-0,0263009	-0,0139119	0,000000038217
7 - CD2P	%Seq(+)	8,65%	1,33%	1,03%	13,13%	3,13%	1,03%
CDPC1P	Exato	0,0184578	-0,0068991	0,000000052035	-0,0309748	-0,0161901	0,000000052035
7 - CD1P	%Seq(+)	8,90%	1,36%	1,58%	14,94%	3,20%	1,58%
CDPP1P	Exato	0,0161084	-0,0064787	0,000000028445	-0,0265171	-0,0136747	0,000000028445
9 - CD1P	%Seq(+)	7,78%	1,47%	0,75%	12,80%	3,10%	0,75%
CDVC15	Exato	0,0170648	-0,0070744	0,000000067079	-0,0249386	-0,0135771	0,000000067079
1 - CD1P	%Seq(+)	8,28%	1,40%	1,97%	12,10%	2,68%	1,97%
CDVP29	Exato	-0,0158658	-0,0487030	0,000000140312	0,0141930	-0,0492049	0,000000140312
13 - CD1P	%Seq(+)	7,60%	11,11%	3,69%	6,80%	11,23%	3,69%



Tabela XIII.11. Parâmetros entre os circuitos π de seqüência negativa e nula – condutores CAA.477.000-CM-Hawk – cabo pára-raios de diâmetro 7,94mm-EAR

Tipo da Silhueta	Método	SEQÜÊNCIA POSITIVA			SEQÜÊNCIA NULA		
		IMPEDÂNCIA		SUSCEPTÂNCIA (B) Siemens/km	IMPEDÂNCIA		SUSCEPTÂNCIA (B) Siemens/km
		Resistência Ohms/km	Reatância Ohms/km		Resistência Ohms/km	Reatância Ohms/km	
CDPM2P	Exato	0,0181688	-0,0059410	0,000000072144	-0,0278266	-0,0148546	0,000000072144
1 - CD2P	%Seq(+)	13,11%	1,21%	2,15%	20,08%	3,01%	2,15%
CDPP00	Exato	0,0173878	-0,0062129	0,000000039916	-0,0259920	-0,0138536	0,000000039916
4 - CD2P	%Seq(+)	12,46%	1,44%	1,04%	18,63%	3,21%	1,04%
CDPP15	Exato	0,0173110	-0,0059004	0,000000040060	-0,0262998	-0,0139284	0,000000040060
7 - CD2P	%Seq(+)	12,43%	1,37%	1,04%	18,88%	3,23%	1,04%
CDPC1P	Exato	0,0184380	-0,0069084	0,000000054235	-0,0309719	-0,0162117	0,000000054235
7 - CD1P	%Seq(+)	12,60%	1,40%	1,60%	21,16%	3,29%	1,60%
CDPP1P	Exato	0,0160930	-0,0064868	0,000000029872	-0,0265151	-0,0136919	0,000000029872
9 - CD1P	%Seq(+)	11,01%	1,51%	0,76%	18,14%	3,20%	0,76%
CDVC15	Exato	0,0170512	-0,0070798	0,000000070010	-0,0249362	-0,0135916	0,000000070010
1 - CD1P	%Seq(+)	11,75%	1,43%	2,00%	17,19%	2,75%	2,00%
CDVP29	Exato	-0,0158676	-0,0487049	0,000000146074	0,0141925	-0,0492975	0,000000146074
13 - CD1P	%Seq(+)	10,74%	11,45%	3,72%	9,61%	11,59%	3,72%

Tabela XIII.12. Parâmetros entre os circuitos π de seqüência negativa e nula – condutores CAA.795.000-CM-Drake – cabo pára-raios de diâmetro 9,53mm-EAR

Tipo da Silhueta	Método	SEQÜÊNCIA POSITIVA			SEQÜÊNCIA NULA		
		IMPEDÂNCIA		SUSCEPTÂNCIA (B) Siemens/km	IMPEDÂNCIA		SUSCEPTÂNCIA (B) Siemens/km
		Resistência Ohms/km	Reatância Ohms/km		Resistência Ohms/km	Reatância Ohms/km	
CDPM2P	Exato	0,0178945	-0,0036466	0,000000076176	-0,0301473	-0,0148946	0,000000076176
1 - CD2P	%Seq(+)	22,85%	0,77%	2,18%	38,49%	3,14%	2,18%
CDPP00	Exato	0,0170770	-0,0042733	0,000000042286	-0,0279597	-0,0139115	0,000000042286
4 - CD2P	%Seq(+)	21,48%	1,03%	1,05%	35,17%	3,37%	1,05%
CDPP15	Exato	0,0170267	-0,0038656	0,000000042465	-0,0283586	-0,0139601	0,000000042465
7 - CD2P	%Seq(+)	21,48%	0,94%	1,05%	35,78%	3,38%	1,05%
CDPC1P	Exato	0,0173461	-0,0043716	0,000000056754	-0,0337209	-0,0164962	0,000000056754
7 - CD1P	%Seq(+)	19,68%	0,92%	1,60%	38,26%	3,48%	1,60%
CDPP1P	Exato	0,0151410	-0,0045044	0,000000031243	-0,0287074	-0,0138729	0,000000031243
9 - CD1P	%Seq(+)	17,23%	1,10%	0,76%	32,67%	3,39%	0,76%
CDVC15	Exato	0,0164324	-0,0053298	0,000000074063	-0,0267871	-0,0138348	0,000000074063
1 - CD1P	%Seq(+)	19,01%	1,12%	2,02%	30,99%	2,91%	2,02%
CDVP29	Exato	-0,0160919	-0,0484692	0,000000155263	0,0138758	-0,0491366	0,000000155263
13 - CD1P	%Seq(+)	17,91%	11,95%	3,76%	15,44%	12,12%	3,76%



Os valores dos parâmetros entre as seqüências positiva e negativa são expressos nas tabelas XIII.13, XIII.14, XIII.15 e XIII.16.

Tabela XIII.13. Parâmetros entre os circuitos π de seqüência positiva e negativa – condutores CAA.226.600-CM-Patridge – cabo pára-raios de diâmetro 7,94mm-EAR

Tipo da Silhueta	Método	SEQÜÊNCIA POSITIVA			SEQÜÊNCIA NULA		
		IMPEDÂNCIA		SUSCEPTÂNCIA	IMPEDÂNCIA		SUSCEPTÂNCIA
		Resistência <i>Ohms/km</i>	Reatância <i>Ohms/km</i>	(B) <i>Siemens/km</i>	Resistência <i>Ohms/km</i>	Reatância <i>Ohms/km</i>	(B) <i>Siemens/km</i>
CDPM2P	Exato	-0,0442042	0,0201842	0,000000067469	0,0443181	0,0287519	0,000000067469
1 - CD2P	%Seq(+)	17,43%	3,92%	2,11%	17,48%	5,59%	2,11%
CDPP00	Exato	-0,0419606	0,0196668	0,000000036937	0,0418743	0,0270281	0,000000036937
4 - CD2P	%Seq(+)	16,49%	4,34%	#DIV/0!	16,45%	5,97%	1,01%
CDPP15	Exato	-0,0420546	0,0195736	0,000000037078	0,0419273	0,0271411	0,000000037078
7 - CD2P	%Seq(+)	16,54%	4,33%	1,02%	16,49%	6,00%	1,02%
CDPC1P	Exato	-0,0463445	0,0272636	0,000000050664	0,0466034	0,0264382	0,000000050664
7 - CD1P	%Seq(+)	17,73%	5,29%	1,56%	17,83%	5,13%	1,56%
CDPP1P	Exato	-0,0402813	0,0235317	0,000000027566	0,0404492	0,0230930	0,000000027566
9 - CD1P	%Seq(+)	15,42%	5,23%	0,74%	15,49%	5,13%	0,74%
CDVC15	Exato	-0,0399663	0,0225248	0,000000065257	0,0402749	0,0234596	0,000000065257
1 - CD1P	%Seq(+)	15,37%	4,37%	1,95%	15,49%	4,55%	1,95%
CDVP29	Exato	-0,0408192	0,0189236	0,000000136721	0,0418624	0,0175106	0,000000136721
13 - CD1P	%Seq(+)	15,54%	4,23%	3,67%	15,94%	3,92%	3,67%

Tabela XIII.14. Parâmetros entre os circuitos π de seqüência positiva e negativa – condutores CAA.336.400-CM-Linnet – cabo pára-raios de diâmetro 7,94mm-EAR

Tipo da Silhueta	Método	SEQÜÊNCIA POSITIVA			SEQÜÊNCIA NULA		
		IMPEDÂNCIA		SUSCEPTÂNCIA	IMPEDÂNCIA		SUSCEPTÂNCIA
		Resistência <i>Ohms/km</i>	Reatância <i>Ohms/km</i>	(B) <i>Siemens/km</i>	Resistência <i>Ohms/km</i>	Reatância <i>Ohms/km</i>	(B) <i>Siemens/km</i>
CDPM2P	Exato	-0,0441980	0,0201795	0,000000069265	0,0443120	0,0287567	0,000000069265
1 - CD2P	%Seq(+)	22,15%	3,99%	2,12%	22,20%	5,69%	2,12%
CDPP00	Exato	-0,0419554	0,0196627	0,000000038074	0,0418689	0,0270320	0,000000038074
4 - CD2P	%Seq(+)	20,92%	4,43%	1,02%	20,88%	6,09%	1,02%
CDPP15	Exato	-0,0420492	0,0195693	0,000000038217	0,0419219	0,0271452	0,000000038217
7 - CD2P	%Seq(+)	20,99%	4,41%	1,03%	20,93%	6,11%	1,03%
CDPC1P	Exato	-0,0463451	0,0272640	0,000000052035	0,0466042	0,0264382	0,000000052035
7 - CD1P	%Seq(+)	22,35%	5,38%	1,58%	22,47%	5,22%	1,58%
CDPP1P	Exato	-0,0402816	0,0235319	0,000000028445	0,0404496	0,0230931	0,000000028445
9 - CD1P	%Seq(+)	19,44%	5,33%	0,75%	19,52%	5,23%	0,75%
CDVC15	Exato	-0,0399655	0,0225246	0,000000067079	0,04027430	0,02346040	0,000000067079
1 - CD1P	%Seq(+)	19,39%	4,44%	1,97%	19,544%	46,27%	1,97%
CDVP29	Exato	-0,0408198	0,01892510	0,000000140312	0,04186400	0,0175109	0,000000140312
13 - CD1P	%Seq(+)	19,56%	43,18%	3,69%	200,58%	4,00%	3,69%



Tabela XIII.15. Parâmetros entre os circuitos π de seqüência positiva e negativa – condutores CAA.477.000-CM-Hawk – cabo pára-raios de diâmetro 7,94mm-EAR

Tipo da Silhueta	Método	SEQÜÊNCIA POSITIVA			SEQÜÊNCIA NULA		
		IMPEDÂNCIA		SUSCEPTÂNCIA (B)	IMPEDÂNCIA		SUSCEPTÂNCIA (B)
		Resistência <i>Ohms/ km</i>	Reatância <i>Ohms/ km</i>		Resistência <i>Ohms/ km</i>	Reatância <i>Ohms/ km</i>	
CDPM2P	Exato	-0,0441888	0,0201725	0,000000072144	0,0443030	0,0287639	0,000000072144
1 - CD2P	%Seq(+)	31,89%	4,09%	2,15%	31,97%	5,84%	2,15%
CDPP00	Exato	-0,0419475	0,0196568	0,000000039916	0,0418610	0,0270378	0,000000039916
4 - CD2P	%Seq(+)	30,07%	4,56%	1,04%	30,01%	6,27%	1,04%
CDPP15	Exato	-0,0420413	0,0195631	0,000000040060	0,0419137	0,0271512	0,000000040060
7 - CD2P	%Seq(+)	30,18%	4,54%	1,04%	30,09%	6,30%	1,04%
CDPC1P	Exato	-0,0463460	0,0272647	0,000000054235	0,0466052	0,0264382	0,000000054235
7 - CD1P	%Seq(+)	31,66%	5,53%	1,60%	31,84%	5,36%	1,60%
CDPP1P	Exato	-0,0402821	0,0235324	0,000000029872	0,0404501	0,0230931	0,000000029872
9 - CD1P	%Seq(+)	27,56%	5,49%	0,76%	27,67%	5,39%	0,76%
CDVC15	Exato	-0,0399643	0,0225241	0,000000070010	0,4027330	0,0234616	0,000000070010
1 - CD1P	%Seq(+)	27,55%	4,56%	2,00%	277,63%	4,75%	2,00%
CDVP29	Exato	-0,0408209	0,0189273	0,000000146074	0,0418665	0,0175112	0,000000146074
13 - CD1P	%Seq(+)	27,64%	4,45%	3,72%	28,34%	4,12%	3,72%

Tabela XIII.16. Parâmetros entre os circuitos π de seqüência positiva e negativa – condutores CAA.795.000-CM-Drake – cabo pára-raios de diâmetro 9,53mm-EAR

Tipo da Silhueta	Método	SEQÜÊNCIA POSITIVA			SEQÜÊNCIA NULA		
		IMPEDÂNCIA		SUSCEPTÂNCIA (B)	IMPEDÂNCIA		SUSCEPTÂNCIA (B)
		Resistência <i>Ohms/ km</i>	Reatância <i>Ohms/ km</i>		Resistência <i>Ohms/ km</i>	Reatância <i>Ohms/ km</i>	
CDPM2P	Exato	-0,0451198	0,0190822	0,000000076176	0,0452646	0,0298357	0,000000076176
1 - CD2P	%Seq(+)	57,61%	4,02%	2,18%	57,79%	6,28%	2,18%
CDPP00	Exato	-0,0427432	0,0187241	0,000000042286	0,0426349	0,0279905	0,000000042286
4 - CD2P	%Seq(+)	53,77%	4,53%	1,05%	53,64%	6,78%	1,05%
CDPP15	Exato	-0,0428793	0,0186223	0,000000042465	0,0427202	0,0281218	0,000000042465
7 - CD2P	%Seq(+)	54,10%	4,51%	1,05%	53,90%	6,81%	1,05%
CDPC1P	Exato	-0,0462576	0,0273736	0,000000056754	0,0465953	0,2629770	0,000000056754
7 - CD1P	%Seq(+)	52,49%	5,78%	1,60%	52,87%	55,50%	1,60%
CDPP1P	Exato	-0,0402303	0,0235890	0,000000031243	0,0404494	0,0230166	0,000000031243
9 - CD1P	%Seq(+)	45,78%	5,77%	0,76%	46,03%	5,63%	0,76%
CDVC15	Exato	-0,0400222	0,0223702	0,000000074063	0,0404235	0,0235724	0,000000074063
1 - CD1P	%Seq(+)	46,30%	4,71%	2,02%	46,77%	4,97%	2,02%
CDVP29	Exato	-0,0405362	0,0190482	0,000000155263	0,0418965	0,0172014	0,000000155263
13 - CD1P	%Seq(+)	45,10%	4,70%	3,76%	46,62%	4,24%	3,76%

Os valores dos parâmetros elétricos entre os circuitos de seqüência, apresentados nas tabelas XIII.5 a XIII.16, não seriam observados, caso a linha tivesse as condições ideais de transposição de fase. Encontrou-se para a resistência variações de -57% a +57%, para o caso do condutor de maior diâmetro e de -17% a +17%, para o condutor de menor diâmetro. No caso das reatâncias, a variação ocorreu na faixa de -3 a +6% e a susceptância encontrada ficou na casa dos 2% em relação ao valor de seqüência positiva.



XIII.3. Parâmetros de seqüência positiva

Os valores de resistência, reatância e impedância de seqüência positiva, calculados pelos métodos denominados “exato” e “aproximado”, neste trabalho, são apresentados na *tabela XIII.17*. Nesta tabela, aparecem as diferenças percentuais entre os dois métodos de cálculo, além das diferenças percentuais de cada estrutura analisada em relação à estrutura de referência CDPM2P.

Em relação aos valores de impedância, a comparação entre os métodos indica um aumento entre 2,3% e 6,4% para o cálculo pelo método aproximado. Entretanto, para a estrutura de circuito duplo com disposição vertical, CDVC15, ocorre o inverso. Neste caso, o cálculo pelo método aproximado aponta valores menores, entre 0,4% e 4,6%, em relação ao cálculo pelo método exato.

A *tabela XIII.17* indica que aumenta a diferença percentual entre os métodos, à medida que se diminui o diâmetro dos condutores, para cada estrutura analisada.

As *figuras XIII.1 a XIII.7* ilustram a distribuição dos parâmetros de resistência, reatância e impedância, todos expressos em “ohms/km”, para cada estrutura analisada, em função do tipo de condutor empregado. Essas figuras mostram, sob a forma de gráfico, os dados da *tabela XIII.17*.

Dessa forma, pode-se visualizar, em cada figura, as diferenças entre o cálculo pelo método “aproximado”(MA) e pelo método “exato”(ME), além da influência do diâmetro de condutor na determinação de cada parâmetro.

Em linhas gerais, os parâmetros calculados diminuem com o aumento do diâmetro do condutor.

Ao comparar as *figuras XIII.1 a XIII.7*, entre si, nota-se a influência da compactação das silhuetas sobre a resistência, reatância e impedância. Para a seqüência positiva, a compactação das silhuetas diminui o valor de cada parâmetro.



Tabela XIII.17. Parâmetros de sequência positiva do circuito PI equivalente

Tabela XIII.17. Parâmetros de seqüência positiva do circuito PI equivalente																
Config.	Cond.	Método Exato						Método Aproximado						Dif.% (Ra-Re)/ Re	Dif.% (Xa-Xe)/ Xe	Dif.% (Za-Ze)/ Ze
		R	XL	Z	R%	X%	Z%	R	XL	Z	R%	X%	Z%			
		Ohms/km			% - Estr. Referência			Ohms/km			% - Estr. Referência					
CD2P	P	0,2535682	0,5146534	0,5737290	0,00%	0,00%	0,00%	0,3201536	0,51114491	0,6033892	0,00%	0,00%	0,00%	-0,62%	5,17%	
	L	0,1995707	0,5058257	0,5437721	0,00%	0,00%	0,00%	0,2661643	0,5026319	0,5687550	0,00%	0,00%	0,00%	-0,63%	4,59%	
	H	0,1385557	0,4927942	0,51119021	0,00%	0,00%	0,00%	0,2051616	0,4896160	0,5308626	0,00%	0,00%	0,00%	-0,64%	3,70%	
CDPM2P	D	0,0783222	0,4749643	0,4813787	0,00%	0,00%	0,00%	0,1467864	0,4701567	0,4925379	0,00%	0,00%	0,00%	-1,01%	2,32%	
	P	0,2545161	0,4528275	0,5194528	0,37%	-12,01%	-9,46%	0,3201536	0,4501843	0,5524167	0,00%	-11,98%	-2,87%	-0,58%	6,35%	
	L	0,2005199	0,4440010	0,4871808	0,48%	-12,22%	-10,41%	0,2661643	0,4413671	0,5154109	0,00%	-12,19%	-2,91%	-0,59%	5,79%	
CDPP00	H	0,1395069	0,4309713	0,4529883	0,69%	-12,55%	-11,51%	0,2051616	0,4283511	0,4749484	0,00%	-12,51%	-3,57%	-0,61%	4,85%	
	D	0,0794876	0,4128813	0,4204631	1,49%	-13,07%	-12,65%	0,1467864	0,4088919	0,4344408	0,00%	-13,03%	-23,62%	-0,97%	3,32%	
	P	0,2543170	0,4522645	0,5188644	0,30%	-12,12%	-9,56%	0,3201536	0,4501843	0,5524167	0,00%	-11,98%	4,06%	-0,46%	6,47%	
CD2P	L	0,2003204	0,4441378	0,4872234	0,38%	-12,20%	-10,40%	0,2661643	0,4413671	0,5154109	0,00%	-12,19%	4,64%	-0,62%	5,79%	
	H	0,1393068	0,4311079	0,4530567	0,54%	-12,52%	-11,50%	0,2051616	0,4283511	0,4749484	0,00%	-12,51%	-16,49%	-0,64%	4,83%	
	D	0,0792603	0,4130876	0,4206228	1,20%	-13,03%	-12,62%	0,1467864	0,4088919	0,4344408	0,00%	-13,03%	-18,16%	-1,02%	3,29%	
7	P	0,2613685	0,5151570	0,5776679	3,08%	0,10%	0,69%	0,3201536	0,5152304	0,6065976	0,00%	0,74%	23,16%	0,01%	5,01%	
	L	0,2073795	0,5063406	0,5471627	3,91%	0,10%	0,62%	0,2661643	0,5064132	0,5720994	0,00%	0,75%	0,59%	0,01%	4,56%	
	H	0,1463771	0,4933258	0,5145839	5,64%	0,11%	0,52%	0,2051616	0,4933972	0,5343520	0,00%	0,77%	0,66%	0,01%	3,84%	
CDPC1P	D	0,0881331	0,4738149	0,4819419	12,53%	-0,24%	0,12%	0,1467864	0,4739380	0,4961486	0,00%	0,80%	0,73%	0,03%	2,95%	
	P	0,2611708	0,4501445	0,5204232	3,00%	-12,53%	-9,29%	0,3201536	0,4501843	0,5524167	0,00%	-11,98%	-2,87%	0,01%	6,15%	
	L	0,2071816	0,4413277	0,4875391	3,81%	-12,75%	-10,34%	0,2661643	0,4413671	0,5154109	0,00%	-12,19%	-2,91%	0,01%	5,72%	
CD1P	H	0,1461791	0,4283123	0,4525702	5,50%	-13,08%	-11,59%	0,2051616	0,4283511	0,4749484	0,00%	-12,51%	-3,57%	0,01%	4,94%	
	D	0,0878752	0,4088249	0,4181625	12,20%	-13,93%	-13,13%	0,1467864	0,4088919	0,4344408	0,00%	-13,03%	-23,62%	0,02%	3,89%	
	P	0,2600551	0,5158334	0,5776788	2,56%	0,23%	0,69%	0,3201536	0,4777812	0,5751289	0,00%	-6,58%	8,34%	-7,38%	-0,44%	
9	L	0,2060649	0,5070148	0,5472904	3,25%	0,24%	0,65%	0,2661643	0,4689640	0,5392316	0,00%	-6,70%	9,48%	-7,50%	-1,47%	
	H	0,1450608	0,4939969	0,5148549	4,69%	0,24%	0,58%	0,2051616	0,4559481	0,4999800	0,00%	-6,88%	-12,09%	-7,70%	-2,89%	
	D	0,0864340	0,4747229	0,4825274	10,36%	-0,05%	0,24%	0,1467864	0,4364888	0,4605092	0,00%	-7,16%	-13,25%	-8,05%	-4,56%	
CDVC15	P	0,2627006	0,4471215	0,5185839	3,60%	-13,12%	-9,61%	0,3201536	0,4476782	0,5503763	0,00%	-12,47%	11,74%	0,12%	6,13%	
	L	0,2087129	0,4383070	0,4854628	4,58%	-13,35%	-10,72%	0,2661643	0,4388610	0,5132664	0,00%	-12,69%	-9,76%	0,13%	5,73%	
	H	0,1477126	0,4252954	0,4502168	6,61%	-13,70%	-12,05%	0,2051616	0,4258451	0,4726895	0,00%	-13,02%	-10,96%	0,13%	4,99%	
13	D	0,0898736	0,4055189	0,4153587	14,75%	-14,62%	-13,71%	0,1467864	0,4063858	0,4320829	0,00%	-13,56%	-12,27%	0,21%	4,03%	

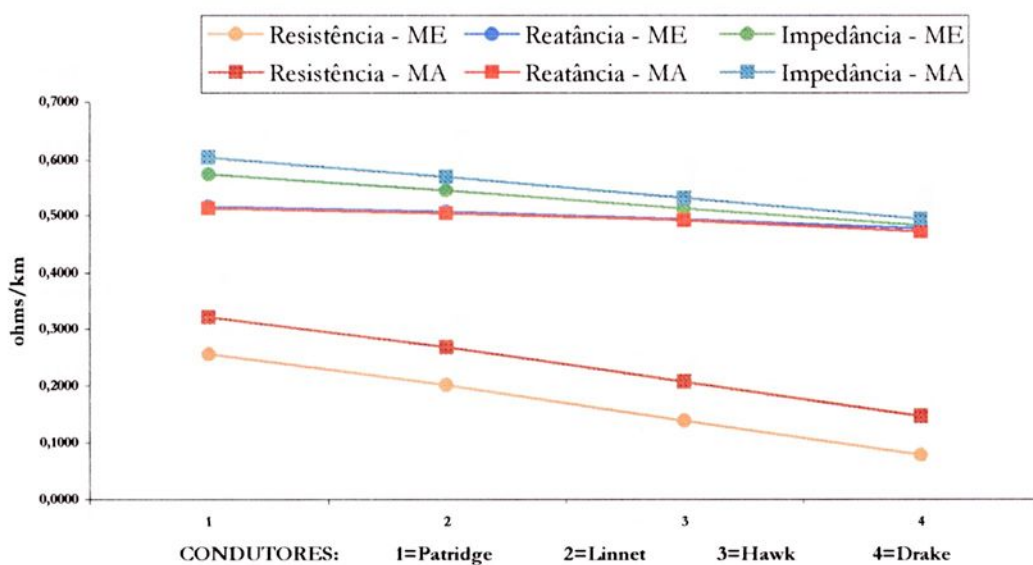


figura XIII.1. Estrutura CDPM2P – parâmetros de seqüência positiva

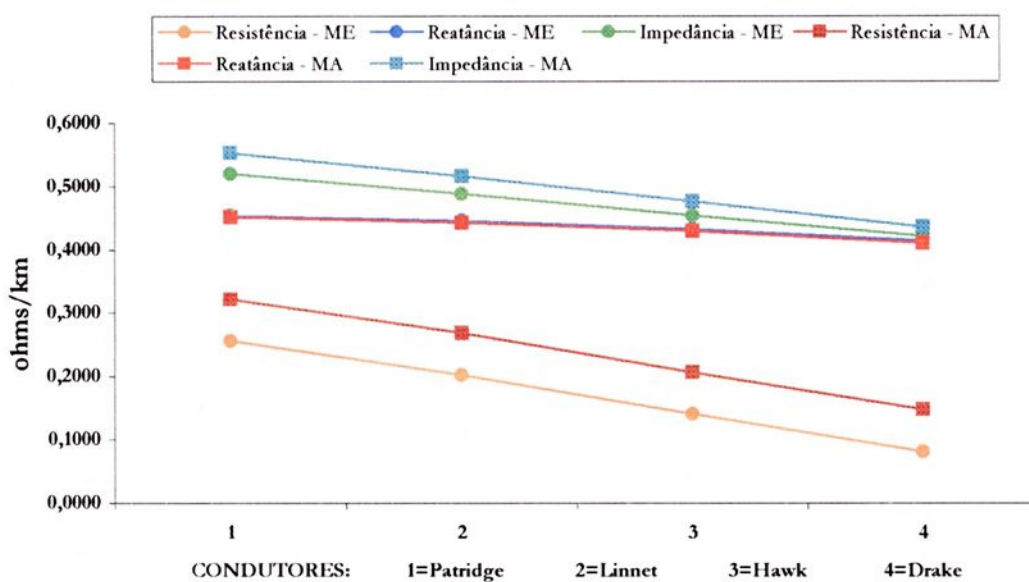


figura XIII.2. Estrutura CDPP00 – parâmetros de seqüência positiva



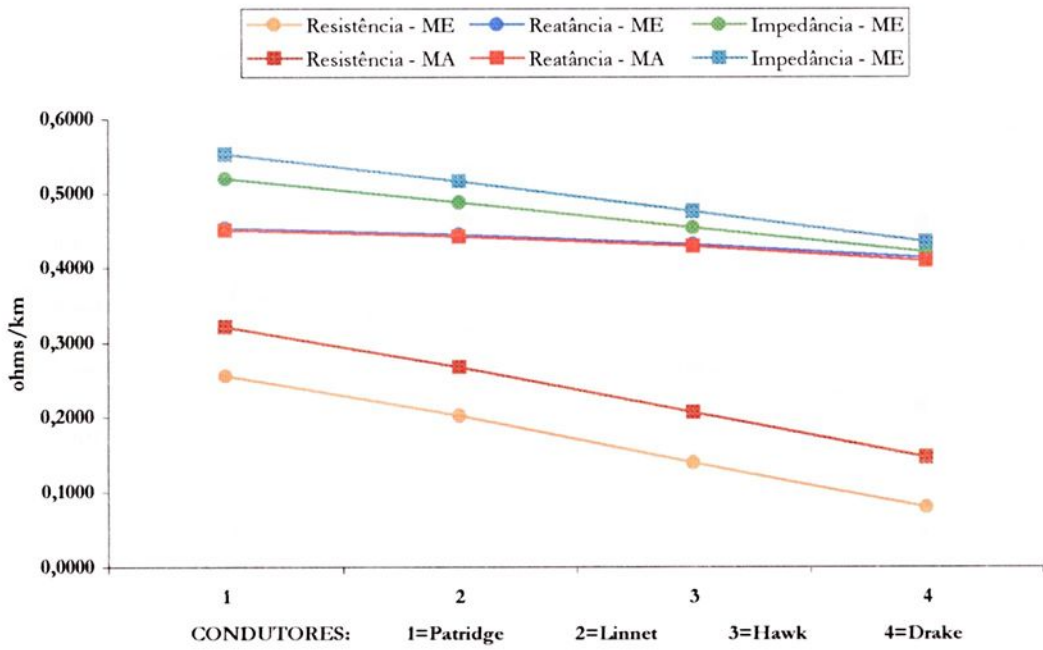


figura XIII.3. Estrutura CDPP15 – parâmetros de seqüência positiva

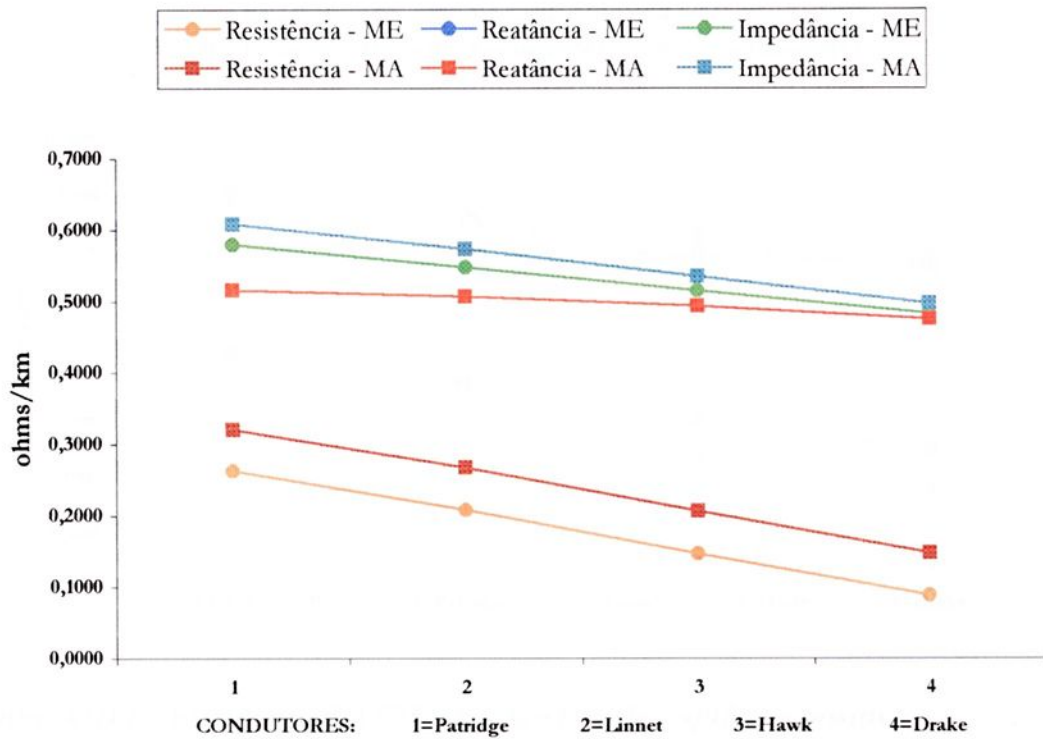


figura XIII.4. Estrutura CDPC1P – parâmetros de seqüência positiva



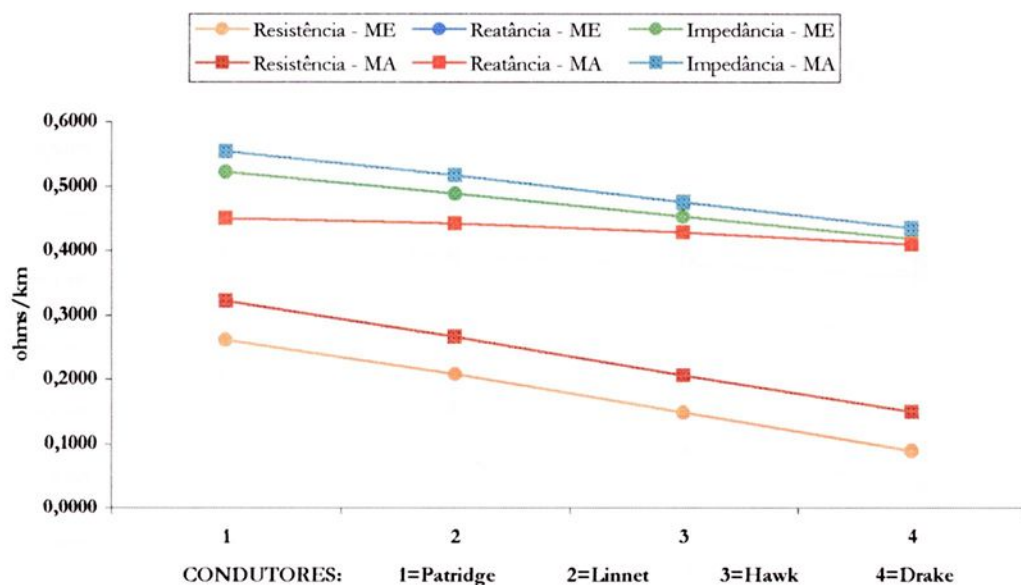


figura XIII.5. Estrutura CDPP1P – parâmetros de seqüência positiva

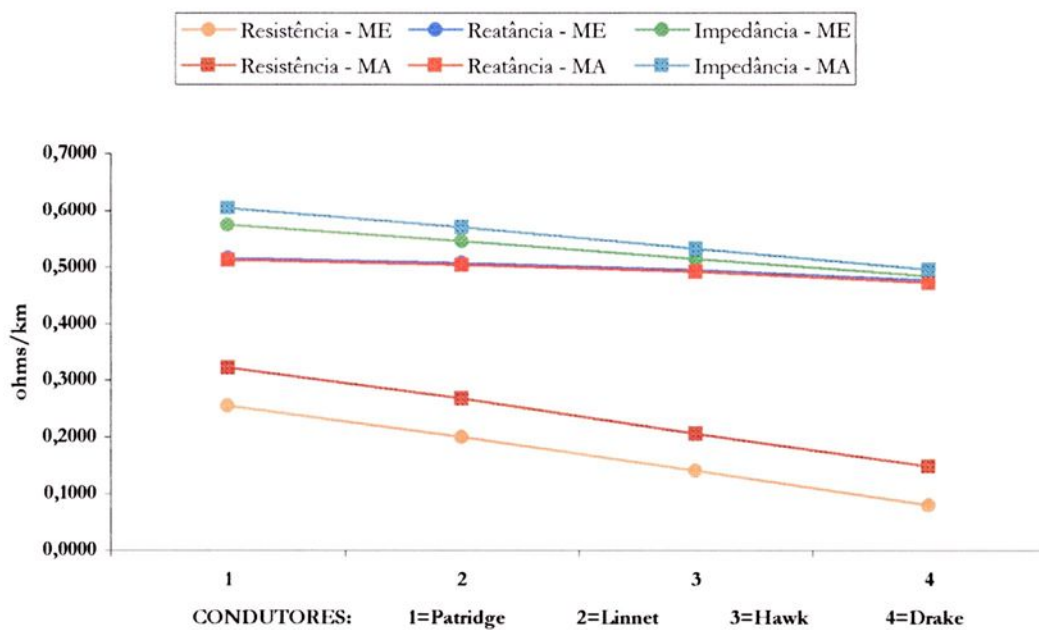


figura XIII.6. Estrutura CDVC15 – parâmetros de seqüência positiva



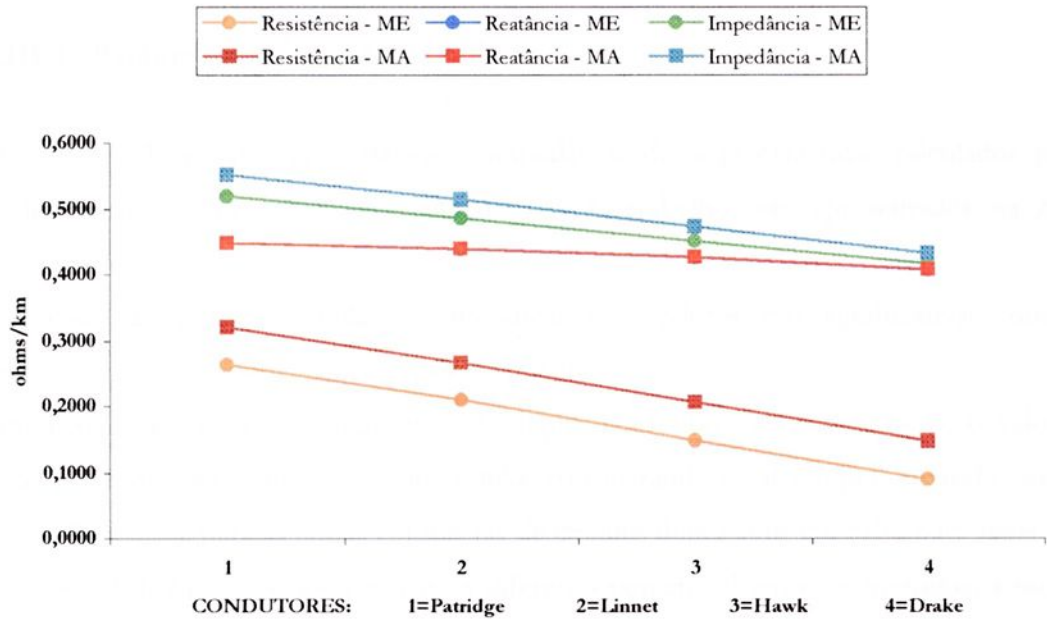


figura XIII.7. Estrutura CDVP29 – parâmetros de seqüência positiva



XIII.4. Parâmetros de seqüência nula

Os valores de resistência, reatância e impedância de seqüência nula, calculados pelos métodos denominados “exato” e “aproximado”, neste trabalho, são apresentados na *tabela XIII.18*.

No caso da seqüência nula, as diferenças nos valores são significativas, quando comparadas aos valores obtidos para a seqüência positiva.

Nas estruturas compactas para circuito duplo, com dois cabos pára-raios, o valor da impedância apresenta uma redução superior a 40%, considerando o cálculo pelo método “exato” e, na faixa, de 20 a 30%, para as linhas compactas de circuito duplo com um cabo pára-raios.

A *tabela XIII.18* indica que aumenta a diferença percentual entre os métodos, à medida que se diminui o diâmetro dos condutores, para cada estrutura analisada.

As *figuras XIII.8 a XIII.14* ilustram a distribuição dos parâmetros de resistência, reatância e impedância, todos expressos em “ohms/km”, para cada estrutura analisada, em função do tipo de condutor empregado. Essas figuras mostram, sob a forma de gráfico, os dados da *tabela XIII.18*.

De forma análoga à seqüência positiva, pode-se visualizar, em cada figura, as diferenças entre o cálculo pelo método “aproximado”(MA) e pelo método “exato”(ME), além da influência do diâmetro de condutor na determinação de cada parâmetro.

Em linhas gerais, os parâmetros calculados para a seqüência nula também diminuem com o aumento do diâmetro do condutor, porém com uma proporção menor em relação ao cálculo dos mesmos parâmetros na seqüência positiva.

Ao comparar as *figuras XIII.8 a XIII.14*, entre si, nota-se a influência da compactação das silhuetas sobre a resistência, reatância e impedância. Para a seqüência nula, a compactação das silhuetas aumenta o valor de cada parâmetro.



Tabela XIII.18. Parâmetros de sequência nula do circuito PI equivalente

Tabela XIII.18. Parâmetros de sequência nula do circuito PI equivalente																
Config.	Cond.	Método Exato						Método Aproximado						Dif.% (Ra-Re)/ Re	Dif.% (Xa-Xe)/ Xe	Dif.% (Za-Ze)/ Ze
		R	XL	Z	R%	X%	Z%	R	XL	Z	R%	X%	Z%			
		Ohms/km			% - Estr. Referência			Ohms/km			% - Estr. Referência					
CID2P	P	0,8985286	2,6638520	2,8113095	0,00%	0,00%	0,00%	0,3201536	1,7370380	1,7662954	0,00%	0,00%	0,00%	-64,37%	-34,79%	-37,17%
	L	0,8449542	2,6554220	2,7866133	0,00%	0,00%	0,00%	0,2661643	1,7282210	1,7485969	0,00%	0,00%	0,00%	-68,50%	-34,92%	-37,25%
	H	0,7845622	2,6429810	2,7569705	0,00%	0,00%	0,00%	0,2051616	1,7152050	1,7274315	0,00%	0,00%	0,00%	-73,85%	-35,10%	-37,34%
	D	0,7936546	2,5433750	2,6643281	0,00%	0,00%	0,00%	0,1467864	1,6828550	1,6892446	0,00%	0,00%	0,00%	-81,51%	-33,83%	-36,60%
CID2P	P	0,9694234	2,8968780	3,0547805	7,89%	8,75%	8,66%	0,3201536	1,7167910	1,7463876	0,00%	-1,17%	-1,13%	-66,97%	-40,74%	-42,83%
	L	0,9159226	2,8885520	3,0302882	8,40%	8,78%	8,74%	0,2661643	1,7079740	1,7285886	0,00%	-1,17%	-1,14%	-70,94%	-40,87%	-42,96%
	H	0,8556388	2,8762640	3,0008353	9,06%	8,83%	8,85%	0,2051616	1,6949580	1,7073295	0,00%	-1,18%	-1,16%	-76,02%	-41,07%	-43,10%
	D	0,8833528	2,7621340	2,8999477	11,30%	8,60%	8,84%	0,1467864	1,6597840	1,6662620	0,00%	-1,37%	-1,36%	-83,38%	-39,91%	-42,54%
CIDPP00	P	0,9699532	2,8935100	3,0517551	7,95%	8,62%	8,55%	0,3201536	1,7422460	1,7714174	0,00%	0,30%	0,29%	-66,99%	-39,79%	-41,95%
	L	0,9164608	2,8851790	3,0272361	8,46%	8,65%	8,63%	0,2661643	1,7334290	1,7537444	0,00%	0,30%	0,29%	-70,96%	-39,92%	-42,07%
	H	0,8561892	2,8728850	2,9977539	9,13%	8,70%	8,73%	0,2051616	1,7204130	1,7326027	0,00%	0,30%	0,30%	-76,04%	-40,12%	-42,20%
	D	0,8825886	2,7572220	2,8950364	11,21%	8,41%	8,66%	0,1467864	1,6858810	1,6922591	0,00%	0,18%	0,18%	-83,37%	-38,86%	-41,55%
CIDP	P	0,7593583	2,8403340	2,9400888	-15,49%	6,63%	4,58%	0,3201536	2,1545510	2,1782076	0,00%	24,04%	23,32%	-57,84%	-24,14%	-25,91%
	L	0,7055460	2,8317450	2,9183171	-16,50%	6,64%	4,73%	0,2661643	2,1457340	2,1621790	0,00%	24,16%	23,65%	-62,28%	-24,23%	-25,91%
	H	0,6448031	2,8190680	2,8918706	-17,81%	6,66%	4,89%	0,2051616	2,1327180	2,1425633	0,00%	24,34%	24,03%	-68,18%	-24,35%	-25,91%
	D	0,6283093	2,7652590	2,8357415	-20,83%	8,72%	6,43%	0,1467864	2,0985560	2,1036833	0,00%	24,70%	24,53%	-76,64%	-24,11%	-25,82%
CIDPC1P	P	0,7866510	3,0189550	3,1197611	-12,45%	13,33%	10,97%	0,3201536	2,1825550	2,2059113	0,00%	25,65%	24,89%	-59,30%	-27,70%	-29,29%
	L	0,7328620	3,0104080	3,0983291	-13,27%	13,37%	11,19%	0,2661643	2,1737380	2,1899727	0,00%	25,78%	25,24%	-63,68%	-27,79%	-29,32%
	H	0,6721535	2,9977930	3,0722228	-14,33%	13,42%	11,43%	0,2051616	2,1607220	2,1704402	0,00%	25,97%	25,65%	-69,48%	-27,92%	-29,35%
	D	0,6634759	2,9393780	3,0133276	-16,40%	15,57%	13,10%	0,1467864	2,1243590	2,1294242	0,00%	26,24%	26,06%	-77,88%	-27,73%	-29,33%
CIDP	P	0,7305080	2,6605850	2,7590496	-18,70%	-0,12%	-1,86%	0,3201536	2,3137380	2,3357829	0,00%	33,20%	32,24%	-56,17%	-13,04%	-15,34%
	L	0,6766706	2,6519520	2,7369203	-19,92%	-0,13%	-1,78%	0,2661643	2,3049210	2,3202380	0,00%	33,37%	32,69%	-60,67%	-13,09%	-15,22%
	H	0,6158910	2,6319209	2,7030223	-21,50%	-0,42%	-1,96%	0,2051616	2,2919050	2,3010693	0,00%	33,62%	33,21%	-66,69%	-12,92%	-14,87%
	D	0,5912191	2,5903240	2,6569378	-25,51%	1,85%	-0,28%	0,1467864	2,2615080	2,2662667	0,00%	34,39%	34,16%	-75,17%	-12,69%	-14,70%
CIDVC15	P	0,7508109	2,9890220	3,0818776	-16,44%	12,21%	9,62%	0,3201536	2,3991360	2,4204032	0,00%	38,12%	37,03%	-57,36%	-19,74%	-21,46%
	L	0,6969908	2,9804190	3,0608322	-17,51%	12,24%	9,84%	0,2661643	2,3903190	2,4050922	0,00%	38,31%	37,54%	-61,81%	-19,80%	-21,42%
	H	0,6362367	2,9677210	3,0351549	-18,91%	12,29%	10,09%	0,2051616	2,3773030	2,3861393	0,00%	38,60%	38,13%	-67,75%	-19,89%	-21,38%
	D	0,6171462	2,9154300	2,9800338	-22,24%	14,63%	11,85%	0,1467864	2,3444920	2,3490826	0,00%	39,32%	39,06%	-76,22%	-19,58%	-21,17%

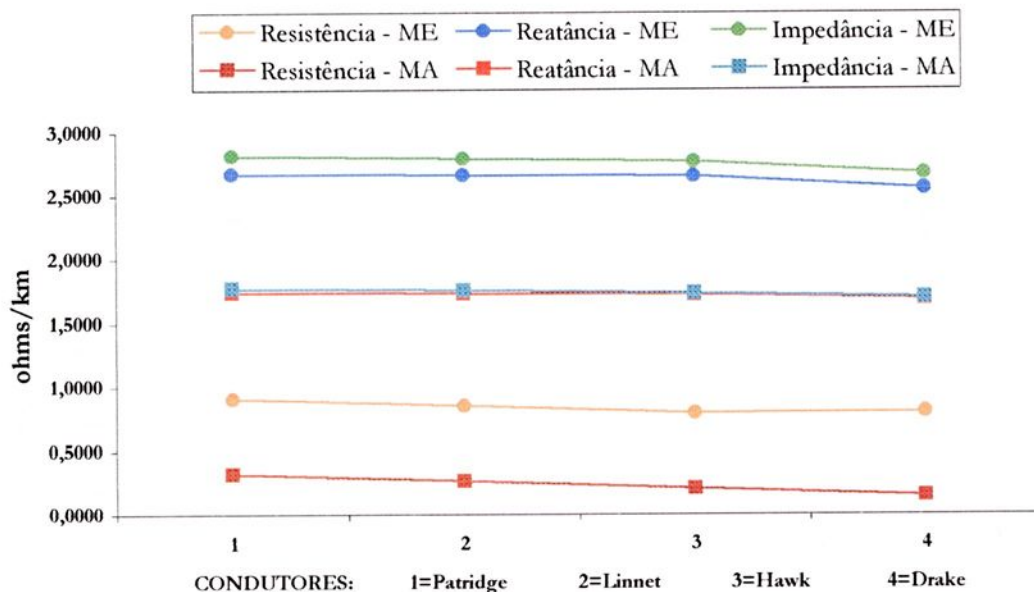


figura XIII.8. Estrutura CDPM2P – parâmetros de sequência nula

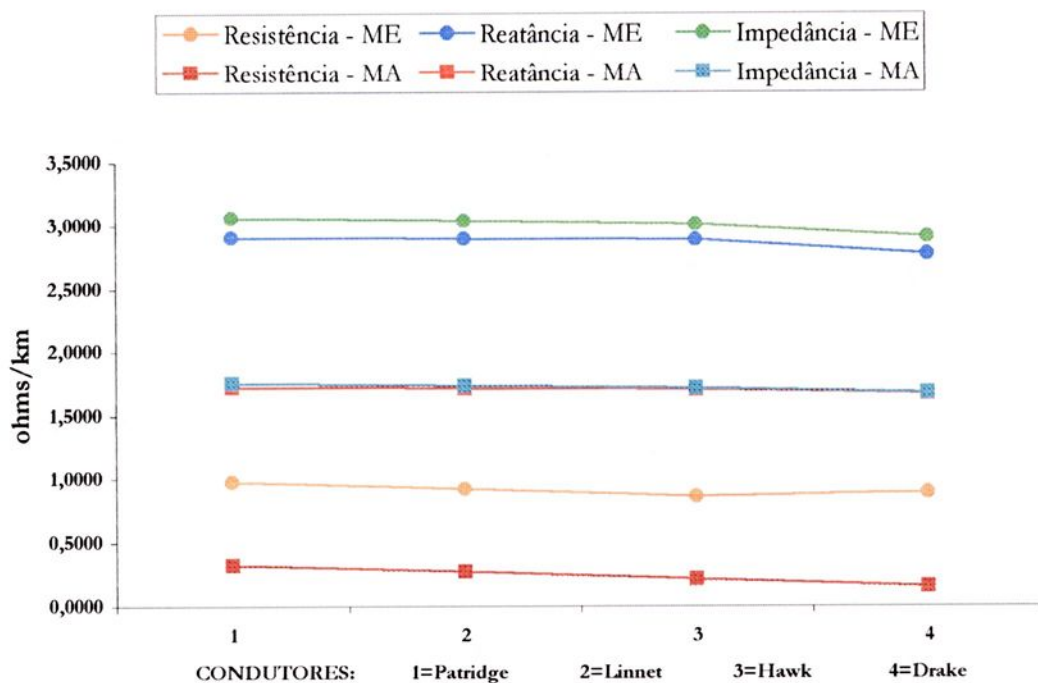


figura XIII.9. Estrutura CDPP00 – parâmetros de sequência nula



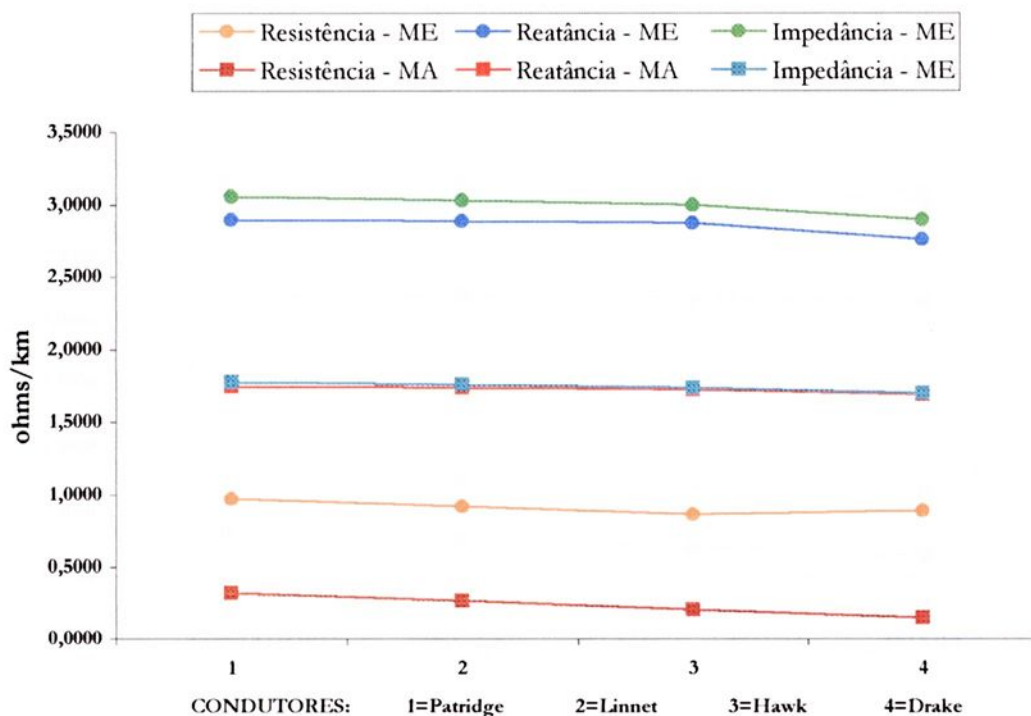


figura XIII.10. Estrutura CDPP15 – parâmetros de sequência nula

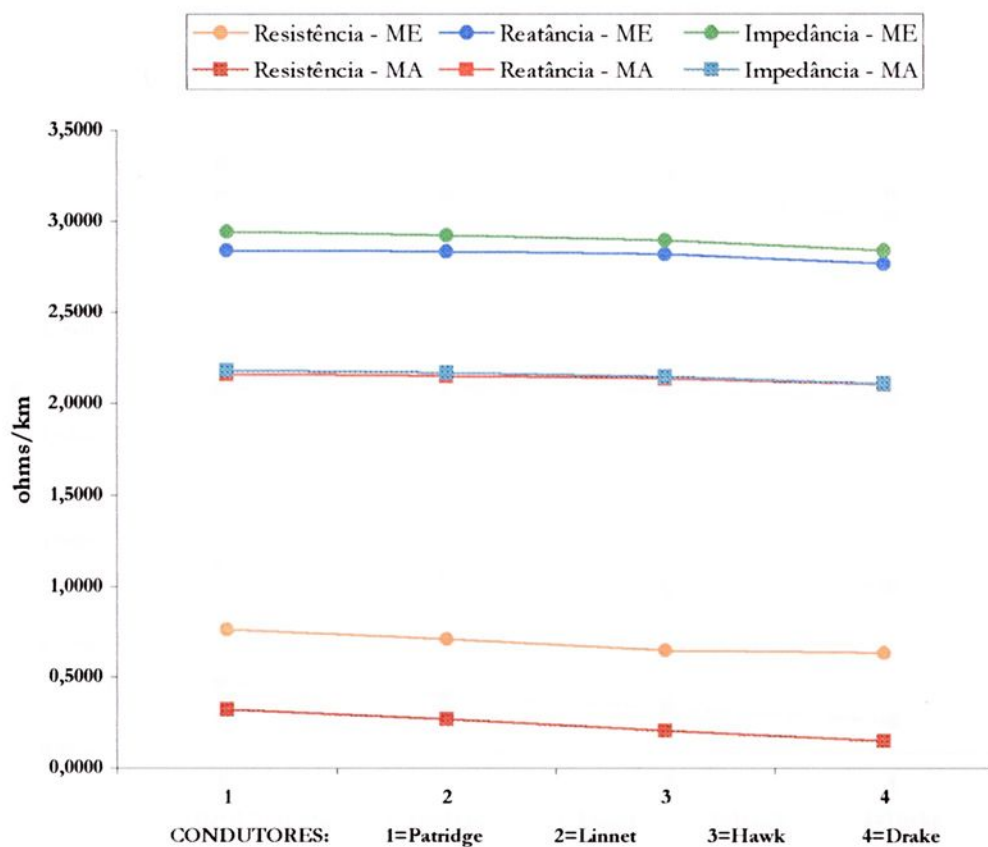


figura XIII.11. Estrutura CDPC1P – parâmetros de sequência nula



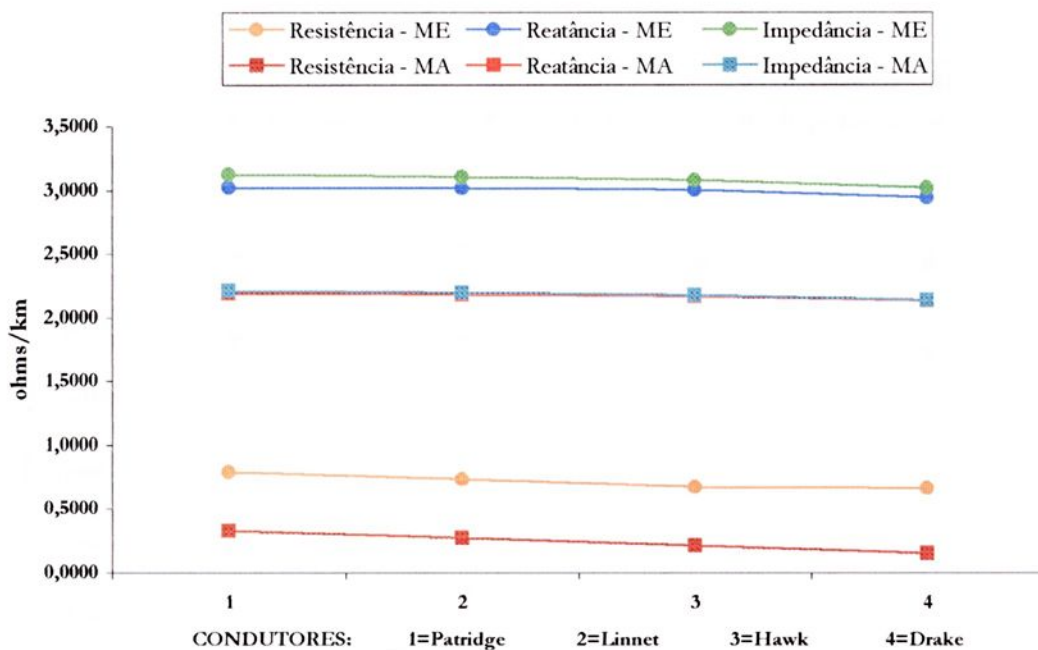


figura XIII.12. Estrutura CDPP1P – parâmetros de seqüência nula

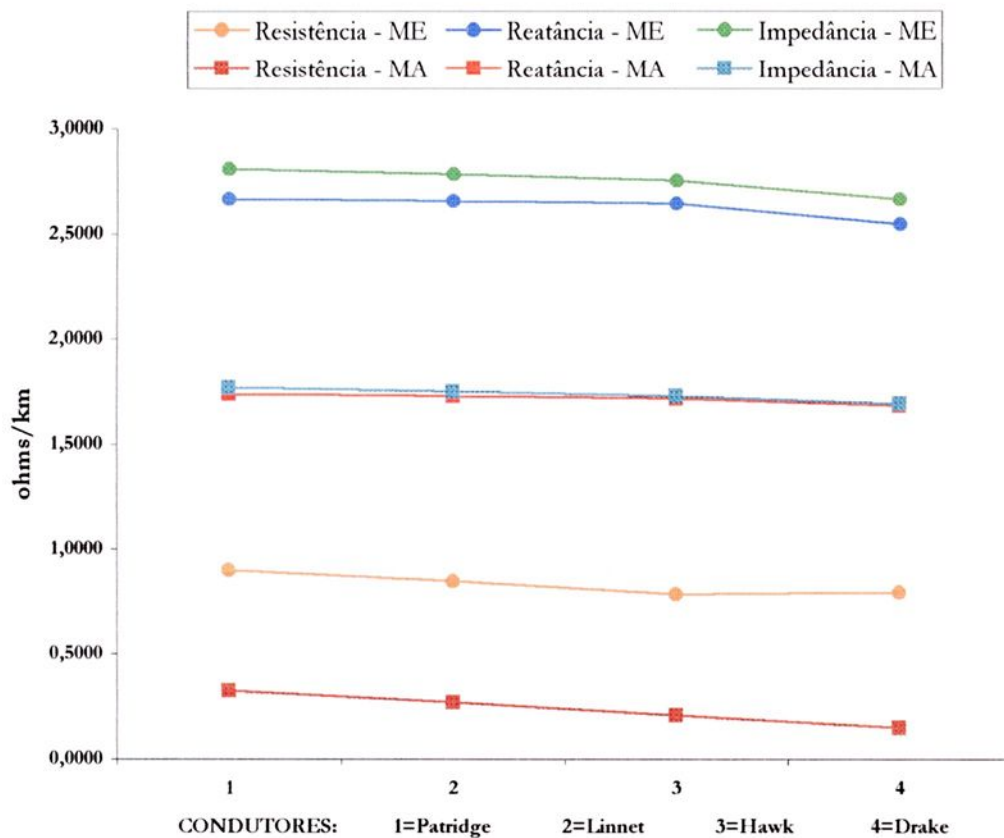


figura XIII.13. Estrutura CDVC15 – parâmetros de seqüência nula



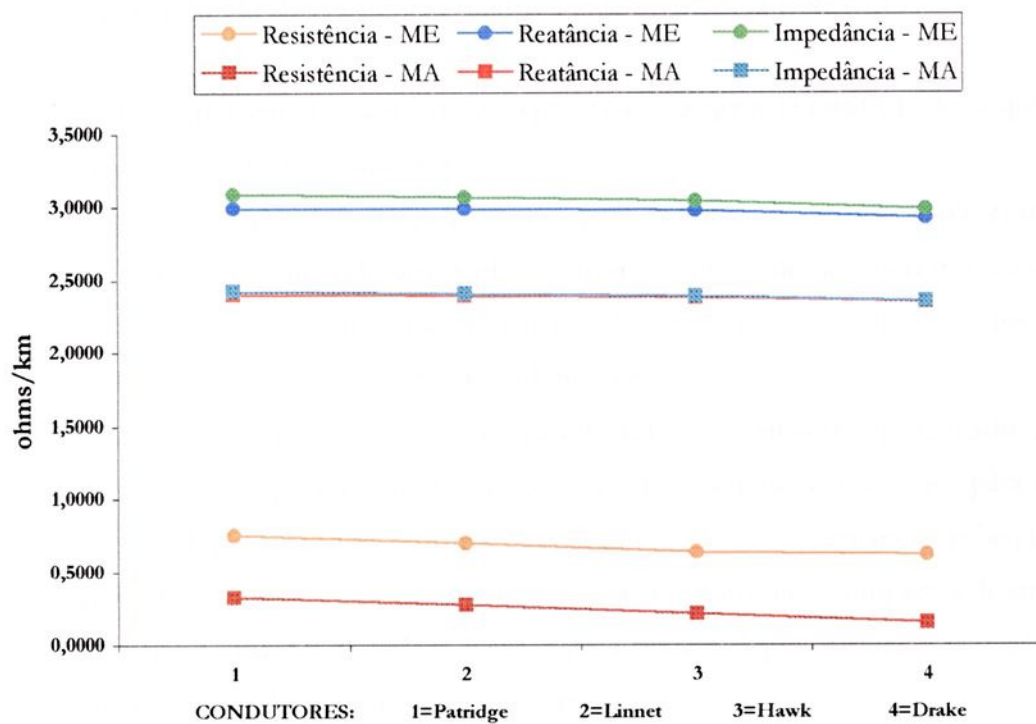


figura XIII.14. Estrutura CDVP29 – parâmetros de seqüência nula



XIII.5. Susceptância de seqüência positiva e de seqüência nula

A *tabela XIII.19* apresenta os dados de susceptâncias de seqüência positiva e de seqüência nula calculadas pelos dois métodos analisados.

No caso da susceptância de seqüência positiva para as linhas de circuito duplo com um cabo pára-raios, o cálculo pelo método aproximado apresenta uma redução inferior a 2,2% em relação ao método exato. Já, para as linhas de circuito duplo com dois cabos pára-raios, essa redução da susceptância de seqüência positiva foi inferior a 0,5%.

Para a seqüência nula, a redução nos valores calculados pelo método aproximado, neste trabalho, chega à casa dos 6% para as linhas compactas de circuito duplo e dois cabos pára-raios. Nas linhas de circuito duplo, com um cabo pára-raios, a redução na susceptância de seqüência nula é pouco significativa para as estruturas convencionais e para estruturas compactas de circuito duplo paralelo, registrando valores da ordem de 3% para o circuito duplo compacto vertical e em torno de 15% para o circuito duplo, convencional, vertical.

As *figuras XIII.15 a XIII.21* ilustram os valores da susceptância de seqüência positiva e de seqüência nula, por estrutura, calculada pelo método “aproximado” (*B.ap*) e pelo método “exato” (*B.ex*), em função do tipo de condutor empregado. Nota-se, pelas figuras, que o valor da susceptância aumenta para os condutores de maior diâmetro.

No caso das susceptâncias, a maior variação percentual ocorre para os condutores de maior diâmetro, porém dentro de um intervalo de valores muito pequeno, conforme poderá ser observado nas colunas “*dif.%*” da *tabela XIII.19*, apresentada a seguir.



Tabela XIII.19. Susceptâncias dos circuito PI equivalentes

Tabela XIII.19. Susceptâncias dos circuito PI equivalentes												
Config.	Cond.	Seqüência Positiva				Seqüência Nula				Dif. % (Ba-Be)/Be Seq. Positiva	Dif. % (Ba-Be)/Be Seq. Nula	
		% - Estr-Referência		Siemens/km	% - Estr-Referência		Siemens/km	% - Estr-Referência				
		Be%	Ba%		Be%	Ba%		Be%	Ba%			
CD2P	Partridge	0,000003203631	0,000003192086	0,00%	0,00%	0,000001534856	0,000001500692	0,00%	0,00%	-0,36%	-2,23%	
	Linnet	0,000003261978	0,000003249016	0,00%	0,00%	0,000001548471	0,000001513157	0,00%	0,00%	-0,40%	-2,28%	
	Hawk	0,000003354914	0,000003339552	0,00%	0,00%	0,000001569673	0,000001532507	0,00%	0,00%	-0,46%	-2,37%	
	Drake	0,000003499770	0,000003481033	0,00%	0,00%	0,000001606968	0,000001566406	0,00%	0,00%	-0,54%	-2,52%	
CD2P	Partridge	0,000003648050	0,000003642283	13,87%	14,10%	0,000001452055	0,000001364283	-5,39%	0,00%	-0,16%	-6,04%	
	Linnet	0,000003724191	0,000003716591	14,17%	14,39%	0,000001464576	0,000001374577	-5,42%	0,00%	-0,20%	-6,15%	
	Hawk	0,000003846319	0,000003835537	14,65%	14,85%	0,000001484088	0,000001390526	-5,45%	0,00%	-0,28%	-6,30%	
	Drake	0,000004038734	0,000004023345	15,40%	15,58%	0,000001521836	0,000001420683	-5,30%	0,00%	-0,38%	-6,65%	
CDPP00	Partridge	0,000003648758	0,000003642283	13,89%	14,10%	0,000001440775	0,000001360351	-6,13%	0,00%	-0,18%	-5,58%	
	Linnet	0,000003724920	0,000003716591	14,19%	14,39%	0,000001453108	0,000001370585	-6,16%	0,00%	-0,22%	-5,68%	
	Hawk	0,000003847082	0,000003835537	14,67%	14,85%	0,000001472323	0,000001386441	-6,20%	0,00%	-0,30%	-5,83%	
	Drake	0,000004039622	0,000004023345	15,43%	15,58%	0,000001508952	0,000001416078	-6,10%	0,00%	-0,40%	-6,15%	
CD1P	Partridge	0,000003243769	0,000003167918	1,25%	-0,76%	0,000001337983	0,000001333425	-12,83%	0,00%	-2,34%	-0,34%	
	Linnet	0,000003303211	0,000003223982	1,26%	-0,77%	0,000001347975	0,000001343257	-12,95%	0,00%	-2,40%	-0,35%	
	Hawk	0,000003397905	0,000003313109	1,28%	-0,79%	0,000001363460	0,000001358483	-13,14%	0,00%	-2,50%	-0,37%	
	Drake	0,000003546893	0,000003452312	1,35%	-0,83%	0,000001390058	0,000001384636	-13,50%	0,00%	-2,67%	-0,39%	
CDPC1P	Partridge	0,000003709920	0,000003642283	15,80%	14,10%	0,000001239473	0,000001236235	-19,24%	0,00%	-1,82%	-0,26%	
	Linnet	0,000003787929	0,000003716591	16,12%	14,39%	0,000001248039	0,000001244682	-19,40%	0,00%	-1,88%	-0,27%	
	Hawk	0,000003835537	0,000003835537	16,64%	14,85%	0,000001261296	0,000001257744	-19,65%	0,00%	-1,98%	-0,28%	
	Drake	0,000004111849	0,000004023345	17,49%	15,58%	0,000001285096	0,000001281176	-20,03%	0,00%	-2,15%	-0,31%	
CDPP1P	Partridge	0,000003343009	0,000003424711	4,35%	7,29%	0,000001533038	0,000001305110	-0,12%	0,00%	2,44%	-14,87%	
	Linnet	0,000003406915	0,000003490327	4,44%	7,43%	0,000001547616	0,000001314528	-0,06%	0,00%	2,45%	-15,06%	
	Hawk	0,000003508930	0,000003595028	4,59%	7,65%	0,000001570406	0,000001329106	0,05%	0,00%	2,45%	-15,37%	
	Drake	0,000003669345	0,000003759516	4,85%	8,00%	0,000001607646	0,000001352240	0,04%	0,00%	2,46%	-15,89%	
CDVC15	Partridge	0,000003720849	0,000003663417	16,14%	14,77%	0,000001194586	0,000001159994	-22,17%	0,00%	-1,54%	-2,90%	
	Linnet	0,000003799358	0,000003738599	16,47%	15,07%	0,000001202668	0,000001167428	-22,33%	0,00%	-1,60%	-2,93%	
	Hawk	0,000003925328	0,000003858982	17,00%	15,55%	0,000001215180	0,000001178912	-22,58%	0,00%	-1,69%	-2,98%	
	Drake	0,000004125238	0,000004049150	17,87%	16,32%	0,000001235645	0,000001197752	-23,11%	0,00%	-1,84%	-3,07%	

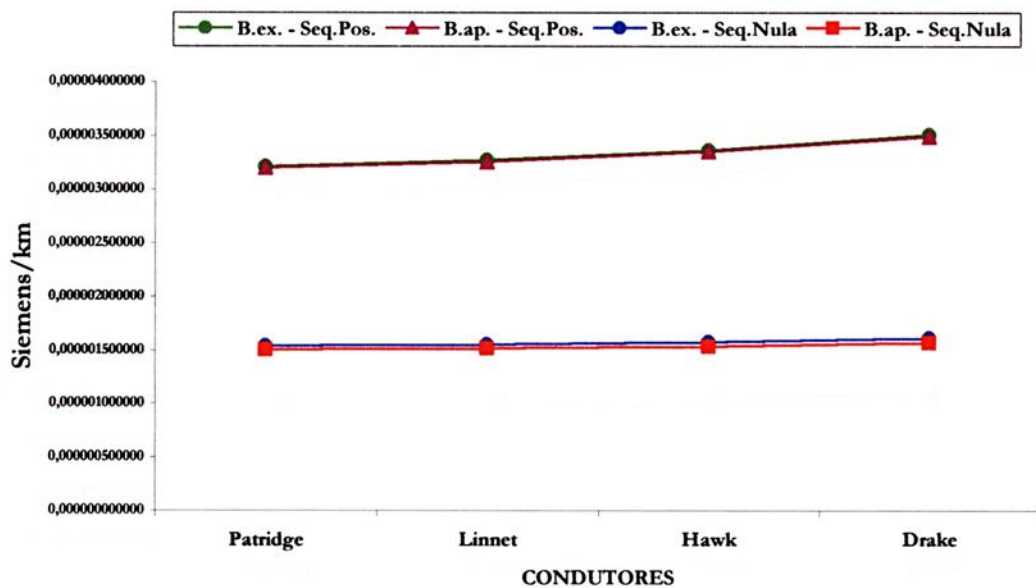


figura XIII.15. Estrutura CDPM2P – susceptâncias de seqüência

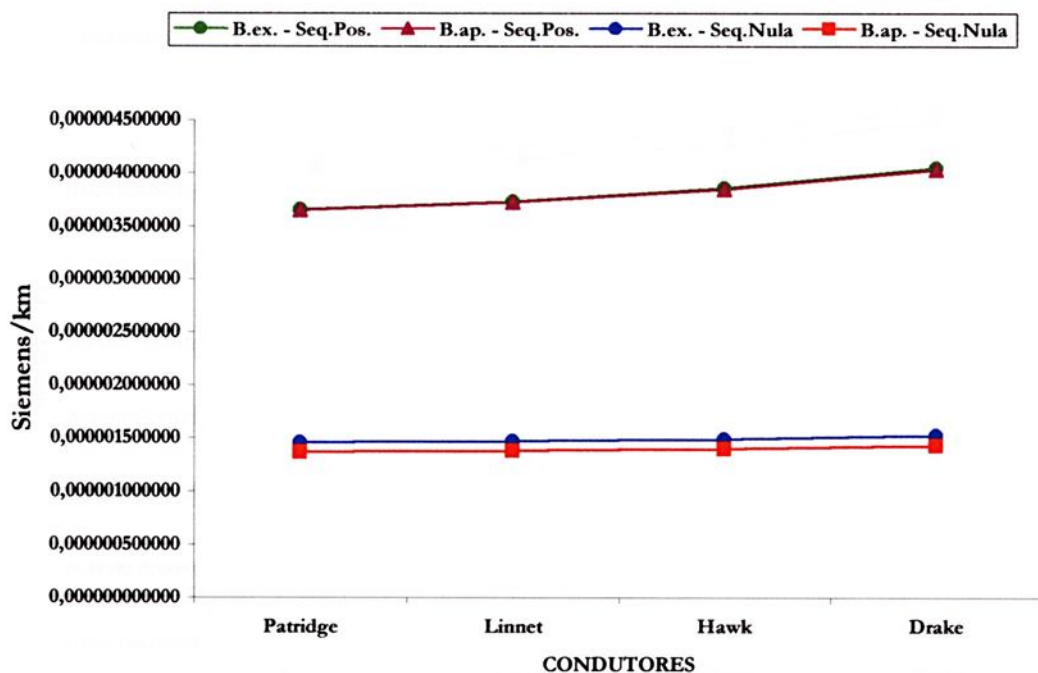


figura XIII.16. Estrutura CDPP00 – susceptâncias de seqüência



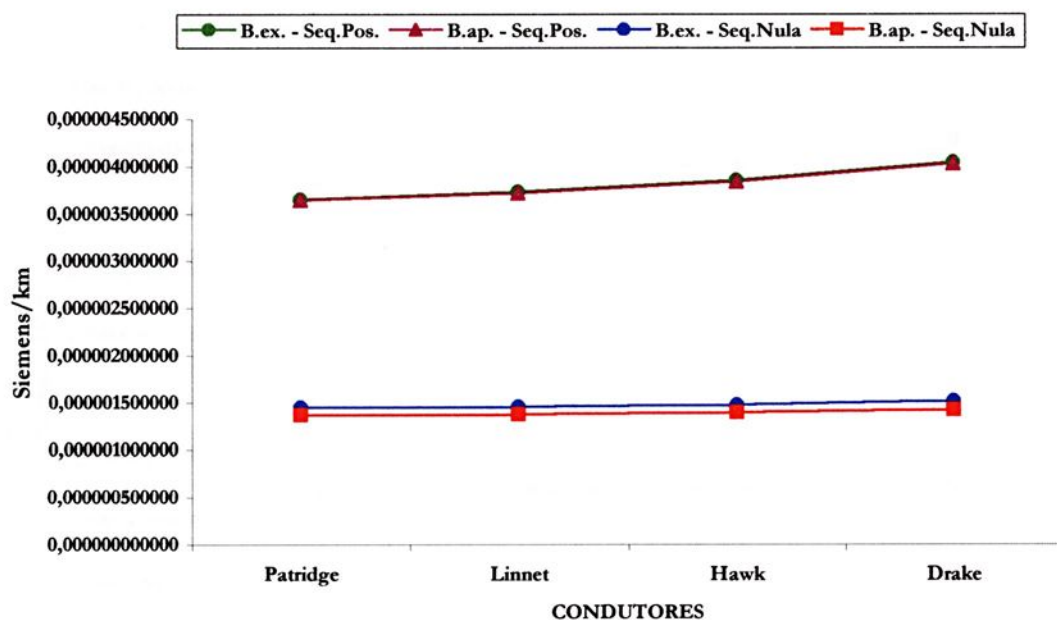


figura XIII.17. Estrutura CDPP15 – susceptâncias de seqüência

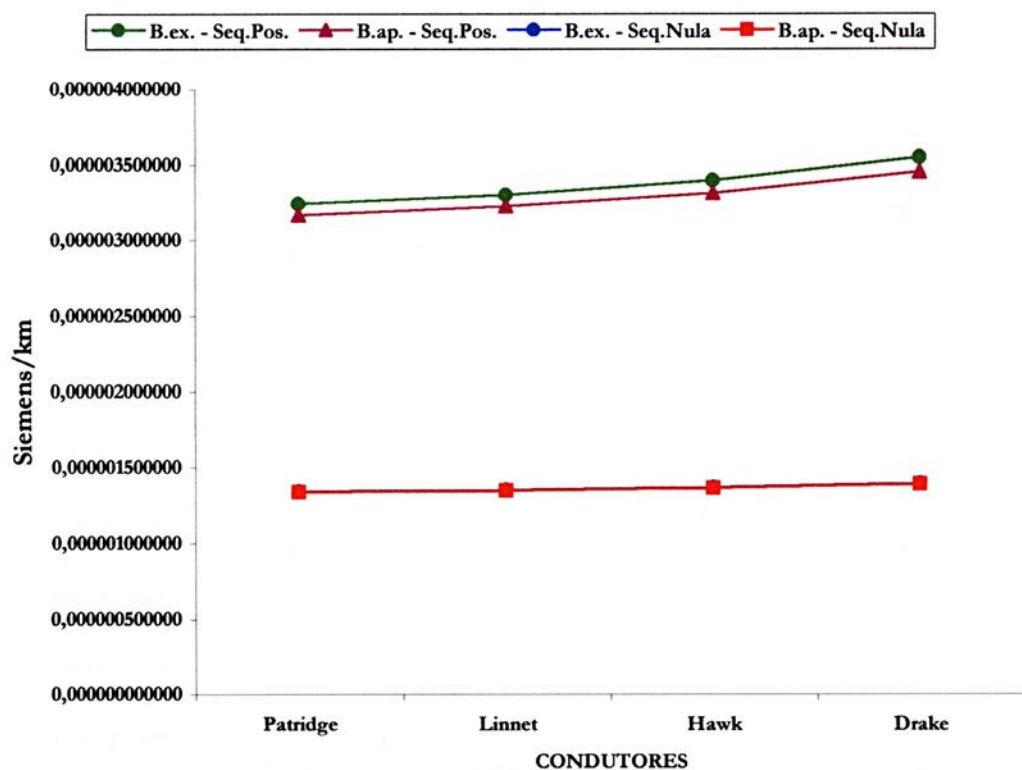


figura XIII.18. Estrutura CDPC1P – susceptâncias de seqüência



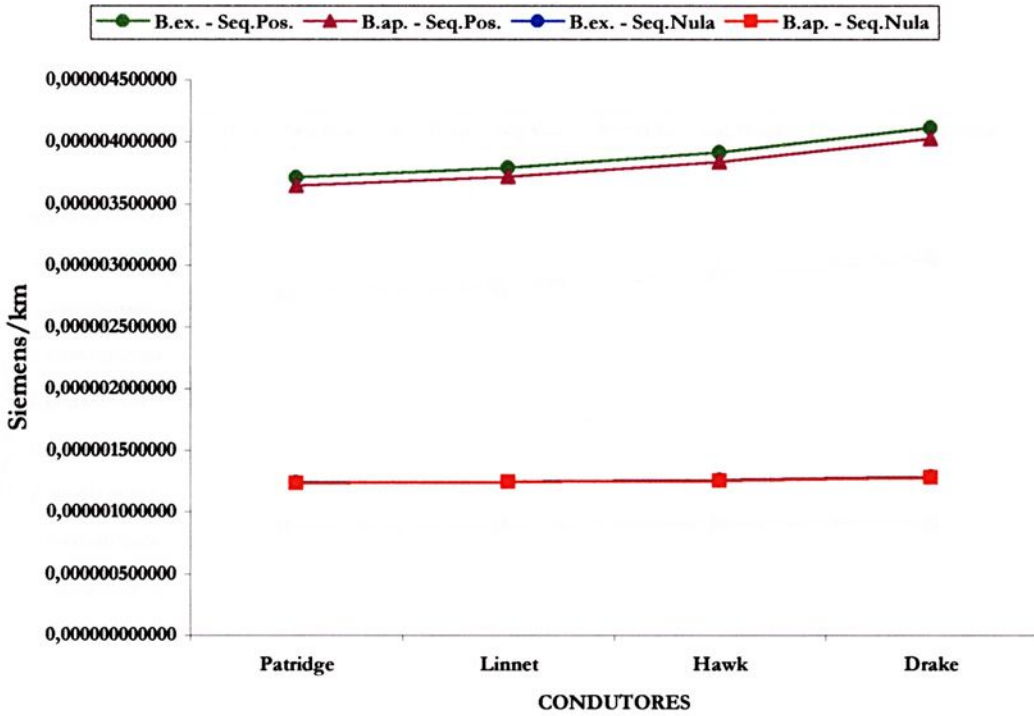


figura XIII.19. Estrutura CDPP1P – susceptâncias de seqüência

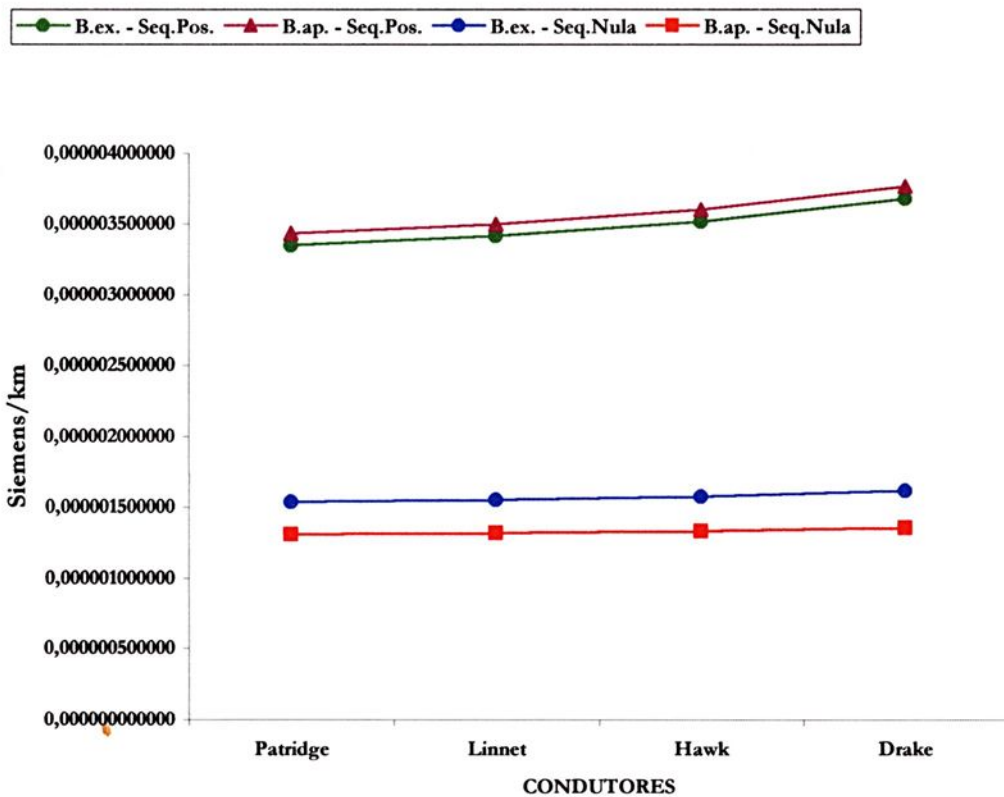


figura XIII.20. Estrutura CDVC15 – susceptâncias de seqüência



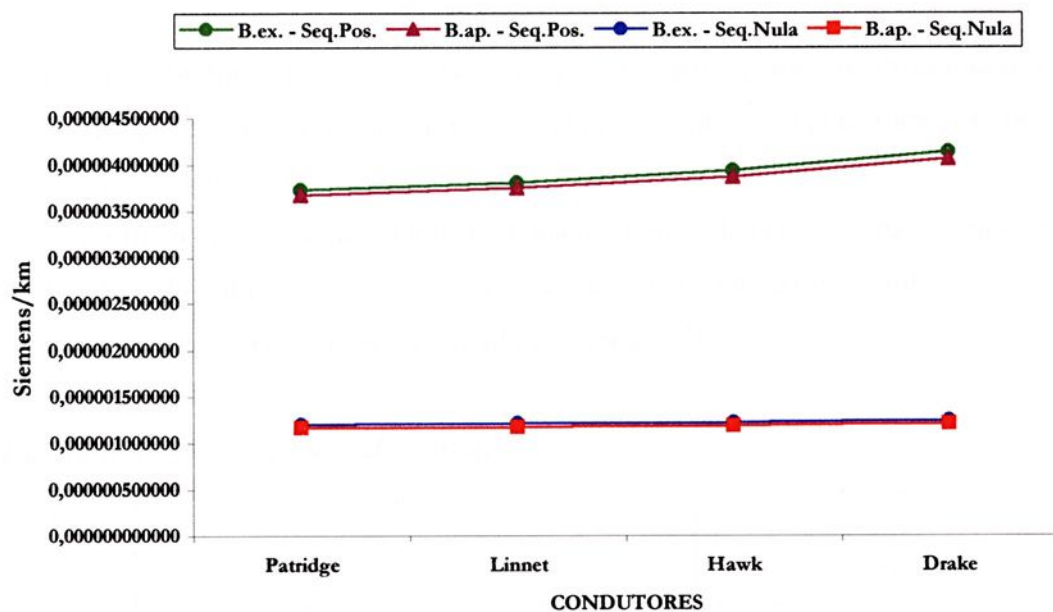


figura XIII.21. Estrutura CDVP29 – susceptâncias de seqüência



XIII.6. Gradiente de potencial

Os valores obtidos para os condutores apontam para possíveis extrapolações das condições máximas, determinadas pelas fórmulas de gradiente crítico, ou pela orientação da NBR 5422-[05], no caso dos limites de faixa.

A *tabela XIII.20* apresenta os valores de gradiente crítico de potencial para tempo seco e tempo úmido, além do valor do gradiente médio, calculado em função do condutor, para cada tipo de estrutura, conforme também representado nas *figuras XIII.23 a XIII.29*.

Tabela XIII.20. Gradiente de potencial

Config.	Cond.	Gradiente de potencial					Potencial Elétrico - Faixa		
		kV/cm			Dif%		Semi-faixa de servidão metros	Potencial kV/m	Dif.% NBR5422
		Tempo seco	Tempo úmido	Valor Médio	Tempo seco	Tempo úmido			
CD2P CDPM2P 1	P	25,15	4,37	35,53	41,28%	712,34%	11,65	7,04	40,83%
	L	24,61	4,28	31,93	29,72%	645,88%	11,65	7,10	41,98%
	H	23,85	4,15	27,13	13,78%	554,23%	11,65	7,19	43,77%
	D	22,85	3,97	21,47	-6,05%	440,23%	11,65	7,34	46,83%
CD2P CDPPP00 4	P	25,15	4,37	33,19	31,96%	658,74%	10,20	7,50	49,92%
	L	24,61	4,28	29,80	21,09%	596,28%	10,20	7,55	51,06%
	H	23,85	4,15	25,31	6,12%	510,20%	10,20	7,64	52,83%
	D	22,85	3,97	20,03	-12,32%	404,17%	10,20	7,81	56,18%
CD2P CDPP15 7	P	25,15	4,37	32,95	30,99%	653,21%	10,20	7,44	48,83%
	L	24,61	4,28	29,58	20,20%	591,17%	10,20	7,50	49,95%
	H	23,85	4,15	25,12	5,34%	505,67%	10,20	7,58	51,70%
	D	22,85	3,97	19,88	-13,01%	400,20%	10,20	7,75	54,94%
CD1P CDPC1P 7	P	25,15	4,37	32,39	28,78%	640,46%	10,70	6,82	36,30%
	L	24,61	4,28	29,08	18,16%	579,40%	10,70	6,87	37,32%
	H	23,85	4,15	24,69	3,53%	495,28%	10,70	6,94	38,90%
	D	22,85	3,97	19,50	-14,66%	390,70%	10,70	7,08	41,61%
CD1P CDPP1P 9	P	25,15	4,37	30,00	19,29%	585,94%	10,20	6,78	35,54%
	L	24,61	4,28	26,92	9,40%	529,04%	10,20	6,82	36,47%
	H	23,85	4,15	22,84	-4,23%	450,68%	10,20	6,90	37,92%
	D	22,85	3,97	18,03	-21,11%	353,65%	10,20	7,03	40,52%
CD1P CDVC15 1	P	25,15	4,37	32,24	28,17%	636,97%	9,20	7,37	47,38%
	L	24,61	4,28	28,94	17,57%	576,04%	9,20	7,42	48,45%
	H	23,85	4,15	24,56	2,97%	492,09%	9,20	7,50	50,09%
	D	22,85	3,97	19,36	-15,25%	387,31%	9,20	7,64	52,78%
CD1P CDVP29 13	P	25,15	4,37	28,98	15,23%	562,59%	10,00	6,63	32,63%
	L	24,61	4,28	26,01	5,66%	507,56%	10,00	6,68	33,54%
	H	23,85	4,15	22,06	-7,51%	431,79%	10,00	6,75	34,93%
	D	22,85	3,97	17,38	-23,92%	337,48%	10,00	6,86	37,29%



Em função do valor médio do gradiente de potencial, são apresentadas as diferenças de percentuais em relação aos gradientes críticos.

Pelos dados obtidos, nota-se que, em nenhuma hipótese, o gradiente médio está dentro dos limites calculados para tempo úmido. No caso de tempo seco, o gradiente médio situa-se dentro do limite estabelecido pelo gradiente crítico, quando o condutor empregado é de maior bitola, auxiliado pela compactação da geometria da parte superior das estruturas.

A *figura XIII.22* ilustra o comportamento do gradiente de potencial para cada estrutura analisada. Nota-se, pela figura, que a estrutura de referência registra os valores mais severos.

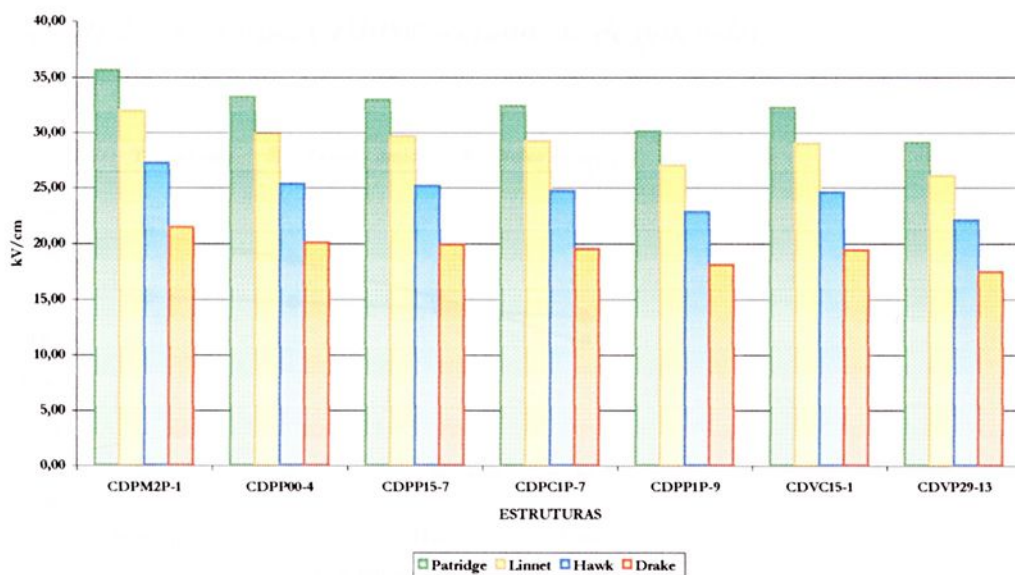


figura XIII.22. Valores médios do gradiente de potencial

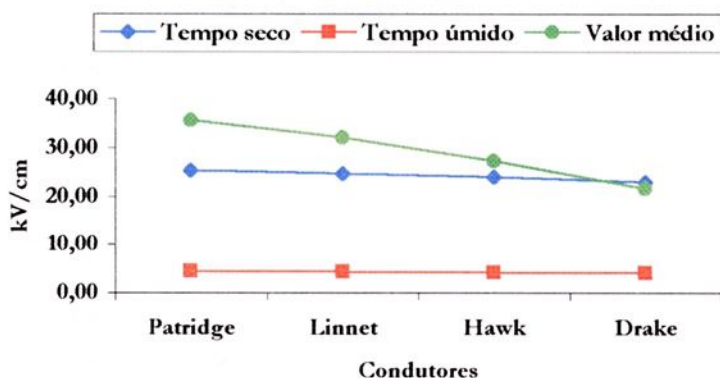


figura XIII.23. Estrutura CDPM2P – gradiente de potencial

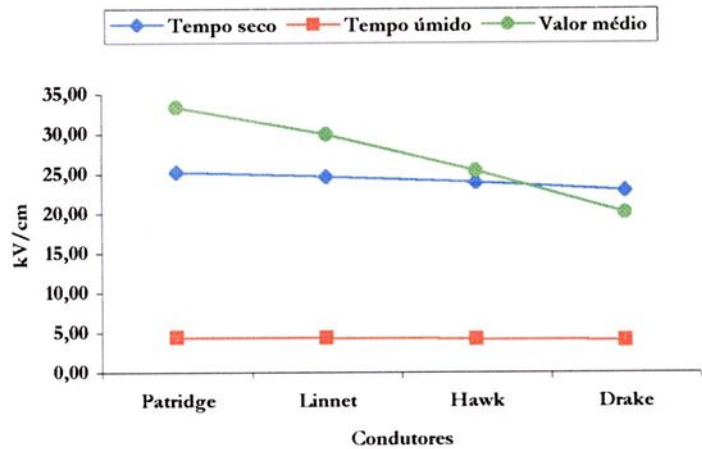


figura XIII.24. Estrutura CDPP00 – gradiente de potencial

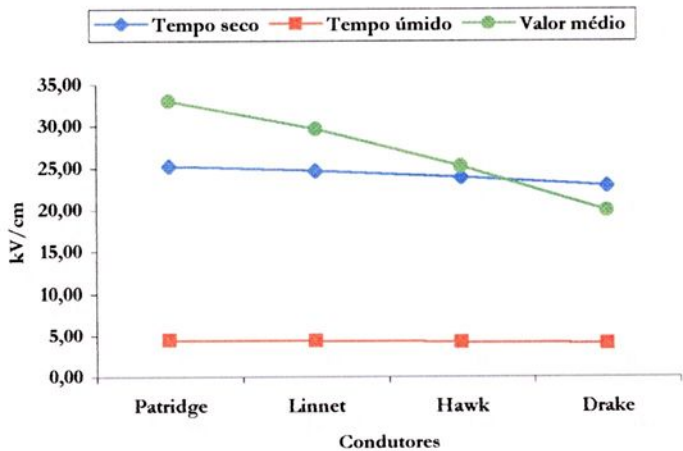


figura XIII.25. Estrutura CDPP15 – gradiente de potencial

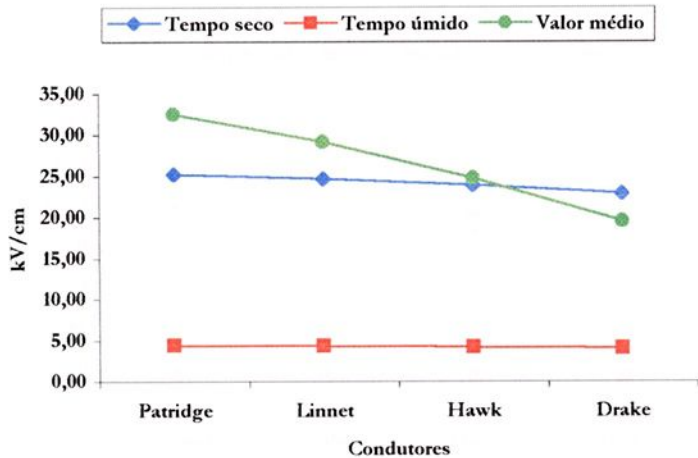


figura XIII.26. Estrutura CDPC1P – gradiente de potencial



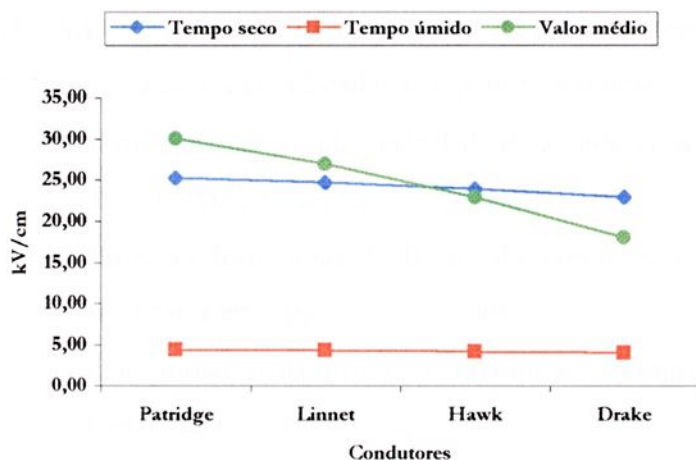


figura XIII.27. Estrutura CDPP1P – gradiente de potencial

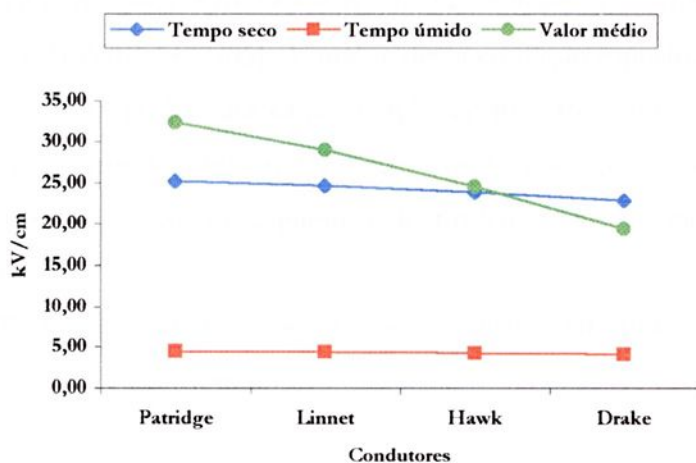


figura XIII.28. Estrutura CDVC15 – gradiente de potencial

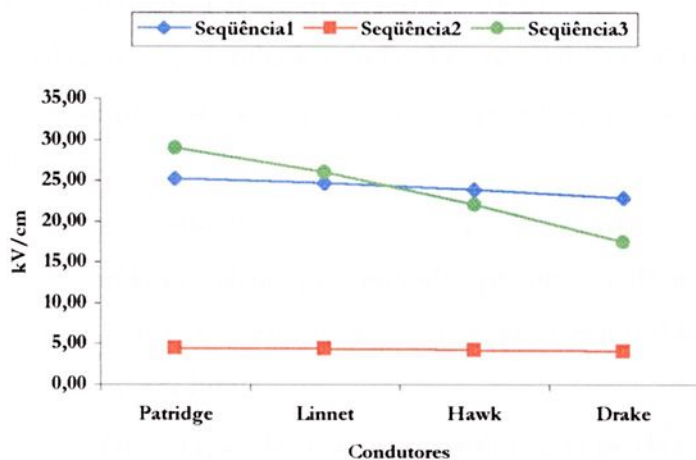


figura XIII.29. Estrutura CDVP29 – gradiente de potencial



XIII.6.1. Potencial elétrico no limite da faixa de servidão

Para esta análise foram adotadas as seguintes hipóteses:

- Semi-faixa de servidão calculada de acordo com a formulação proposta pelo *item 12.2 da NBR 5422-[05]*;
- Projeção horizontal da flecha do condutor e do comprimento da cadeia de isoladores igual para todos os casos;
- Comprimento da mísula das estruturas, do braço ou do isolador pilar, de acordo com cada tipo de silhueta;
- Limite de comparação fornecido pelo *item 12.5.1 da NBR 5422-[05]*, estipulado em $5kV/m$.

Os dados obtidos para o limite da semi-faixa de servidão e para o limite de potencial são apresentados na *tabela XIII.20*. Os resultados indicam que nenhuma silhueta analisada atendeu à orientação da *NBR 5422-[05]*. A análise dessa condição específica serve como base para indicar a necessidade do cálculo para cada situação de projeto, sendo que os resultados obtidos devem obrigar os projetistas a buscar alternativas quanto ao tipo de estrutura a ser utilizada, largura de faixa necessária, altura de segurança de projeto e vão médio da linha de transmissão a ser projetada.

Todos esses fatores deverão ser avaliados em função das condições e interferências encontradas em cada projeto.

XIII.7. Análise da estrutura de referência – CPDM2P

A estrutura *CPDM2P* (*apêndice C – figura C31*) foi escolhida como referência por se tratar do tipo mais usual para a classe de tensão de $138 kV$.

Analisando os resultados indicados nas tabelas *XIII.17*, *XIII.18* e *XIII.19*, pode-se estabelecer comparações e analogias entre os casos apresentados. Considerando a estrutura *CPDM2P*, têm-se:

- Aumento de 2 a 5% no valor da impedância de sequência positiva quando se utiliza o cálculo pelo método aproximado, de acordo com a *tabela XIII.17* e a *figura XIII.1*. Por esta figura nota-se que a maior diferença ocorre para o condutor de menor bitola.
- Diminuição de 36 a 37% no valor da impedância de sequência nula ao se utilizar o método aproximado para o cálculo, conforme mostra a *tabela XIII.18*. A *figura XIII.8* ilustra a diferença quase uniforme entre os dois métodos, em função do



condutor utilizado, sendo que a maior diferença, a exemplo do cálculo para seqüência positiva, também ocorre para o condutor de menor bitola.

- A *tabela XIII.19* indica pequena redução percentual no caso das susceptâncias calculas pelo método aproximado, em relação ao cálculo pelo método exato. No caso de seqüência positiva, essa diminuição não chega a 1% e, para a seqüência nula, fica em torno de 3%. A *figura XIII.15* ilustra, através de gráfico, essas pequenas diferenças entre os métodos de cálculo para a susceptância.
- A análise dos dados obtidos para o gradiente de potencial, apresentados na *tabela XIII.20*, mostra que apenas para o caso do condutor *CAA 795.000-CM – Drake* é atendido o limite de gradiente de potencial para tempo seco. No caso de comparação com o valor de gradiente de potencial crítico para tempo úmido, observa-se que os valores médios obtidos para todos os condutores são muito superiores.
- A *tabela XIII.20* apresenta o valor de potencial elétrico no limite da faixa de servidão. Os resultados obtidos foram superiores para todos os condutores analisados, comparados com o limite apresentado pela *NBR 5422-[05]*. Os valores apresentados nessa tabela foram calculados em função de flecha média de condutor e altura de segurança de condutor ao solo pré-estabelecidas, tendo a largura da faixa sido determinada pela fórmula apresentada na *NBR 5422-[05]*. Essa condição exemplificada na *tabela XIII.20* indica que o gradiente de potencial deve ser calculado especificamente para cada projeto, em função de existir grande possibilidade dele ser um fator determinante no projeto, em termos de altura média da linha de transmissão e de largura da faixa de servidão necessária. A *figura XIII.22* ilustra a variação do valor do gradiente de potencial em função do condutor analisado e a *figura XIII.23* mostra a comparação com o valor do gradiente médio com os valores de gradiente de potencial crítico para tempo seco e tempo úmido.

XIII.8. Análise da estrutura CDVP29 em relação à referência

A estrutura de configuração vertical dos circuitos e espaçamento compacto entre fases, *CDVP29* (*apêndice C – figura C23*), possui um só cabo pára-raios instalado na posição central, sendo utilizada para linhas urbanas onde haja a necessidade de redução da faixa de passagem.



Por meio dos dados das tabelas *XIII.1*, *XIII.2*, *XIII.3*, *XIII.4*, *XIII.17*, *XIII.18* e *XIII.19* pode-se fazer comparações entre a estrutura de referência e as demais silhuetas analisadas. Tomada como exemplo, a estrutura *CDVP29* apresenta, em relação à referência:

- Aumento de 3,6% a 14,75% para a resistência de seqüência positiva;
- Diminuição de 13% a 14% para a reatância de seqüência positiva;
- Diminuição de 9,6% a 13,7% para a impedância de seqüência positiva;
- Aumento de 16% a 18% na susceptância de seqüência positiva;
- Diminuição de 16% a 22% na resistência de seqüência nula;
- Aumento de 12% a 14% na reatância de seqüência nula;
- Aumento de 9,6% a 11,8% na impedância de seqüência nula;
- Diminuição de 22% a 23% na susceptância de seqüência nula.

XIII.9. Análise das estruturas CDPP00 e CDPP15 em relação à referência

Os efeitos da compactação das silhuetas de estruturas podem ser observados através dos dados obtidos para as estruturas compactas *CDPP00* (*apêndice C – figura C34*) e *CDPP15* (*apêndice C – figura C37*) de circuito duplo, com dois cabos pára-raios.

Através das tabelas *XIII.17*, *XIII.18* e *XIII.19*, pode-se estabelecer as seguintes comparações entre as silhuetas compactas *CDPP00* e *CDPP15* com relação à estrutura de referência *CDPM2P*:

- Diminuição de 9,4% a 12,6% para a impedância de seqüência positiva;
- Aumento de 8,5% a 8,8% para a impedância de seqüência nula;
- Aumento de 13,8% a 15,4% para a susceptância de seqüência positiva;
- Diminuição de 5,4% a 6,2% para a susceptância de seqüência nula.

XIII.10. Análise das estruturas compactas em relação à referência

De forma geral, pode-se destacar, para as estruturas com espaçamento compacto entre as fases, as seguintes características, comparando-se à estrutura de referência:

- Aumento na resistência de seqüência positiva de 3% a 14,7%, para as estruturas de circuito duplo com um cabo pára-raios. Para as estruturas de circuito duplo com dois cabos pára-raios esse aumento não ultrapassa 1,5%;
- Redução de 12% a 14,6% para a reatância indutiva de seqüência positiva;



- Aumento de 13,8% a 17,5% para a susceptância de sequência positiva;
- Aumento de 7,9% a 11,3% para a resistência de sequência nula nas estruturas com dois cabos pára-raios;
- Diminuição de 12,4% a 22,2% para a resistência de sequência nula nas estruturas de circuito duplo com um cabo pára-raios;
- Aumento de 8% a 9% para a reatância indutiva de sequência nula nas estruturas de circuito duplo com dois cabos pára-raios e de 12% a 15% para as estruturas de circuito duplo com um cabo pára-raios;
- Diminuição de 5% a 6% para a susceptância de sequência nula nas estruturas de circuito duplo com dois cabos pára-raios;
- Diminuição de 0,3% a 3,0% para a susceptância de sequência nula nas estruturas de circuito duplo com um cabo pára-raios.

XIII.11. A matriz real de impedâncias

Além dos parâmetros sequenciais avaliados neste capítulo, a matriz de impedância obtida em função da consideração das condições reais das linhas de transmissão revela aspectos interessantes para a análise elétrica dos sistemas transmissão.

Para essa avaliação foram escolhidas duas silhuetas de estruturas. A primeira é a estrutura de referência constituída de circuito duplo paralelo, dois cabos pára-raios e espaçamento convencional entre fases para a classe de tensão de 138 kV. A outra estrutura escolhida, *CDVP00*, compacta, circuito duplo vertical, com um cabo pára-raios, pode ser vista como o extremo oposto nas configurações dessa classe de tensão. Trata-se de uma disposição recente no campo das linhas de transmissão:

A matriz equivalente de impedância $[Z_d]$ para a estrutura *CDPM2P* apresenta os seguintes valores:

$$\begin{bmatrix} 0,308646 + j1,168380 & 0,230027 + j0,718187 & 0,242729 + j0,638267 \\ 0,220914 + j0,722944 & 0,317437 + j1,164107 & 0,242577 + j0,711956 \\ 0,215956 + j0,652347 & 0,224507 + j0,721417 & 0,324216 + j1,160817 \end{bmatrix}$$

Nota-se, nesta matriz, a presença de termos diferentes de zero nas posições fora da diagonal principal. Esse resultado é o esperado para os casos onde não existe a transposição de fases ao longo da linha de transmissão.



No outro extremo da família das estruturas, tem-se a matriz equivalente de impedância $[Z_c]$ para a estrutura compacta *CDVP00*:

$$\begin{bmatrix} 0,261204 + j1,229014 & 0,176715 + j0,828979 & 0,181124 + j0,758154 \\ 0,175792 + j0,881649 & 0,266563 + j1,227013 & 0,183577 + j0,826393 \\ 0,178404 + j0,880685 & 0,181753 + j0,879434 & 0,274113 + j1,224195 \end{bmatrix}$$

Da mesma forma que a matriz obtida para o modelo convencional de estruturas de linhas de transmissão, a estrutura compacta, vertical, para circuito duplo, com um cabo pára-raios, também apresenta valores diferentes de zero nos elementos fora da diagonal principal, demonstrando a realidade das linhas onde não é empregada a transposição de fases.

XIII.12. Avaliação geral dos resultados

Os resultados obtidos podem sugerir diversos procedimentos em termos de novos projetos de linhas de transmissão, avaliação de condições dos sistemas em operação e estudos paralelos a serem desenvolvidos. Desta forma, destacam-se alguns pontos:

- A opção pelo uso do método de cálculo denominado “exato”, baseado na série proposta por J.R.Carson e o conseqüente abandono do método “aproximado”, tanto em função dos recursos computacionais, atualmente disponíveis, quanto pela imprecisão observada neste método.
- Maior condição para o cálculo das perdas de energia em uma linha de transmissão, a partir dos parâmetros série de seqüência positiva mais confiáveis.
- Melhor análise das condições de aterramento e das correntes de retorno pelo solo, calculadas em função dos resultados obtidos para o circuito equivalente de seqüência nula.
- Possibilidade de informar as áreas de operação das empresas responsáveis pela transmissão de energia sobre as condições reais representativas das linhas, não se limitando aos circuitos equivalentes de seqüência, nos casos onde não seja empregada a transposição de fases.
- Auxílio aos estudos para a determinação de geometrias de estruturas em função das configurações adotadas para condutores e cabos pára-raios.



- Necessidade de avaliação, caso a caso, do Gradiente de Potencial, tanto para a determinação das condições de projeto como faixa de servidão, espaçamentos e alturas de estruturas, como para minimizar os efeitos decorrentes do valor do gradiente, como perdas por efeito corona, rádio e TV interferência e ruído audível.
- Avaliação da condição real das linhas em operação, inserida nos estudos de aumento da capacidade transporte e da avaliação de perdas de energia, além do diagnóstico das condições existentes no que diz respeito ao equilíbrio e a proteção do sistema elétrico.



XIV. CONCLUSÕES

A análise de todas as etapas envolvidas na concepção e desenvolvimento de uma linha de transmissão mostra-se um instrumento fundamental para seu estudo como instalação técnica.

Por meio do conhecimento de toda a trajetória de um projeto, suas dificuldades, necessidades e particularidades, pode-se avaliar onde os desenvolvimentos são necessários.

O projeto de uma linha de transmissão é sempre dinâmico e deve estar atento às evoluções e solicitações tecnológicas, econômicas e ambientais.

O trabalho apresentado teve como base a metodologia da *NBR 5422-[05]*, para o projeto eletromecânico. Entretanto, procurou deixar claro que existem vários pontos que poderiam ser explorados e outras normas que podem ser utilizadas. A *NBR 5422-[05]* é uma delas e pode ser vista como um bom ponto de partida para análises, principalmente no Brasil, onde é adotada em todas as concessionárias.

A análise sobre a metodologia de cálculos dos parâmetros elétricos mostrou a importância da escolha do método e das considerações técnicas que devem ser feitas. Simplificações, comumente adotadas pelas concessionárias, mostraram-se indevidas em inúmeros casos, levando à obtenção de resultados imprecisos, conforme pode-se observar pelos resultados apresentados no capítulo XIII.

A avaliação dos parâmetros elétricos auxilia o projetista quanto à definição de componentes importantes de um projeto como: a escolha dos condutores, dos cabos pára-raios, a altura de segurança entre condutores e o solo, o tipo do sistema de aterramento e a geometria das estruturas a serem implantadas. Por consequência, essas definições implicam no custo do investimento por parte das concessionárias ou das empresas envolvidas.

A forma de apresentação deste trabalho procurou envolver os estudos elétricos no contexto geral do projeto eletromecânico, fazendo com que a determinação desses parâmetros ficasse relacionada com a realidade técnica, comercial e social de um empreendimento de linha de transmissão de energia elétrica.



XV. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [01] ALCAN ALUMÍNIO DO BRASIL S.A.— *Catálogo de Cabos Condutores*. Ouro Preto: s.d.
- [02] ALCOA – DIVISÃO DE CONDUTORES.— *Catálogo de Cabos Condutores*. Poços de Caldas: s.d.
- [03] ANAUATE, S. *Técnicas de construção de linhas de transmissão*. ABNT-COBEI-CT11. In: ENCONTRO REGIONAL SOBRE LINHAS DE TRANSMISSÃO. São Paulo: Anais do ERST, 1988, p.1-17.
- [04] ANSI/IEEE STANDARD 80. *Guide for safety in AC substation grounding*, Cidade: 1986.
- [05] Associação Brasileira de Normas Técnicas. *Projetos eletromecânicos de linhas aéreas de transmissão de energia*: NBR 5422. Rio de Janeiro, 1985.
- [06] Associação Brasileira de Normas Técnicas. *Revisão da NBR 5422 – Projeto eletromecânico de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica*: CT 11.1. Rio de Janeiro, 1997, 54p.
- [07] BRASIL, D.A.O. – *Dimensionamento elétrico de linhas de transmissão, coordenação de isolamento, estudos elétricos*. Campinas: CPFL – Curso de transmissão de energia elétrica, 1997, p.1-45.
- [08] COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA. *Manual de aterramento Copel*. Superintendência de obras de transmissão da companhia paranaense de energia, Curitiba, 1990, 181p.
- [09] CPFL – *Relatórios Técnicos de Projetos de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica*. Campinas: sd.
- [10] DOMMEL, H.W. *EMTP theory book*. 2 ed. Vancouver: Bristish Columbia, 1992.
- [11] EPRI *Transmission Line Grounding*, EPRI project 1494-1, Final Report, October 1982.
- [12] FERNANDES C. *Rádio interferência*. In: SEMINÁRIO SOBRE PESQUISAS APLICADAS EM SISTEMAS DE TRANSMISSÃO, Rio de Janeiro: Anais do Seminário sobre pesquisas aplicadas em sistemas de transmissão, RJ, 1983. p 1-27.
- [13] FUCHS, R.D. – *Transmissão de energia elétrica, linhas aéreas*. Rio de Janeiro: Livros técnicos e científicos editora S.A., 1977, v.1 e v.2.



- [14] FUCHS, R.D. ALMEIDA, M.T. – *Projetos mecânicos das linhas aéreas de transmissão*. Itajubá: Edgard Blücher Ltda, 1982.
- [15] HEDMAN, D. E. *Teoria das linhas de transmissão II*. 2.ed. trad. F.A. Farret. Santa Maria: Edições UFSM, 1983.
- [16] HOFFMANN, J.N. *Aterramento de linhas de transmissão em aéreas urbanas*. In: XI SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, Rio de Janeiro: Anais do XI Seminário nacional de produção e transmissão de energia elétrica, G III, GLT02, 1991, p.1-6.
- [17] HOFFMANN, J.N. – *Controle das tensões de toque e passo em linhas de transmissão urbanas*. In: SEMINÁRIO AVANÇADO EM LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 1996, Belo Horizonte: Anais do Seminário avançado em linhas de transmissão de energia elétrica , 1996, p.1-9.
- [18] IEC Publication 479. *Effects of current passing through the human body*, 1984.
- [19] MARTIN C.; SONCIN A.; SANTIAGO N.H.C. *RI e TVI em decorrência de LTs 138 kV urbanas compactas da Copel*. In: VII - SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, Brasília: Anais do XI seminário nacional de produção e transmissão de energia, 1983, p.1-6.
- [20] MATZENBACHER, S.R. *Identificação e análise de problemas no cálculo da faixa de segurança de linhas aéreas de transmissão*. In: XV SNPTEE, Foz do Iguaçu: Anais do XV SNPTEE, G III, GLT14, 1999, p.1-6
- [21] MENEZES JR A. A.; COUTINHO C. E.; FERNANDES C. *Sistematização de medidas de rádio interferência no campo e aprimoramento dos modelos de cálculo*. In: V SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, Recife: Anais do V Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, GIII, GLT05, 1979. p.1-14.
- [22] MONTICELLI, A.; GARCIA, A. *Introdução a sistemas de energia elétrica*. Campinas: Editora da Unicamp, 1999.
- [23] NEGRISOLI, M.E.M. *Aterramento de segurança em instalações elétricas*. Itajubá: Núcleo de tecnologia, 1991, 1v.
- [24] PORTELA, C. M. J. C. M. ; TAVARES, M. C. D. – “*Modeling, Simulation and Optimization of Transmission Lines. Applicability and Limitations of Some Used Procedures*” - Transmission and Distribution 2002, IEEE Institute of Electrical and Electronic Engineers - PES Society, 38 p. , Invited speech , Available: <http://www.ieee/pesTD2002>, São Paulo, Brasil, Março de 2002



- [25] PROSDÓCIMO, N. *Diretrizes para projetos de linhas aéreas de transmissão compactas urbanas*. In: XII SNPTEE, Recife: Anais do XII SNPTEE, 1993, p.1-10.
- [26] PROSDÓCIMO, N. MOKDESE, H. *Linhas de transmissão urbanas compactas em 69 kV para circuito duplo*. In: XVI SNPTEE, Campinas: Anais do XVI SNPTEE, G III, GLT01, 2001, p.1-6.
- [27] REZENDE F.M.; SATO W.; BRASIL D.O.C.; JARDINI J.A. – THEMAG - *Geometria das torres de uma linha de transmissão: considerações gerais*. In: CONFERÊNCIA 1º ENCONTRO TECNOLÓGICO EM SISTEMAS DE POTÊNCIA, Recife: Anais da conferência 1º encontro tecnológico em sistemas de potência, 1976, p.1-65.
- [28] STENVENSON JR., W.D. *Elementos de análise de sistemas de potência*. Trad. A. M. B. Cotrin. Recife: McGraw-Hill do Brasil Ltda.
- [29] SVERAK, J.G. et all. *Electrical Shock Safety Criteria*. Pergamon Press Inc, 1985.
- [30] YAMAGUTI K. *Perdas Corona em Linhas de Transmissão em Corrente Alternada*. In: SEMINÁRIO SOBRE PESQUISAS APLICADAS EM SISTEMAS DE TRANSMISSÃO; Rio de Janeiro: Anais do Seminário sobre pesquisas aplicadas em sistemas de transmissão, 1983, p.1-22.



GLOSSÁRIO

EDS – Sigla da expressão de língua inglesa “*every-day-stress*” que traduzida literalmente significa “acúmulo diário”. Na linguagem comum às áreas de linhas de transmissão essa sigla indica o valor de tensão mecânica, expressa em kgf, que mais ocorre durante a vida da linha em função do seu local de instalação. A *tabela B16* do *apêndice B* apresenta valores sugeridos pela NBR 5422 [5], para utilização nos projetos de acordo com o tipo do cabo a ser empregado.

Condição de EDS – Situação de referência para o cálculo de todas as tensões aplicadas à linha de transmissão. Refere-se à porcentagem da tensão de ruptura do cabo aplicada à temperatura de referência para a região de instalação.

Condição de emergência – situação em que a linha transporta corrente acima do valor nominal do projeto, durante período de tempo considerado curto em relação ao período anual de operação.

Estrutura de ancoragem – Estruturas de linhas de transmissão de energia elétrica que possibilitam às linhas maior rigidez mecânica, facilitando o trabalho de tensionamento dos cabos. Nessas estruturas os condutores são seccionados, sendo a passagem da corrente elétrica efetuada por laços de condutores.

Estruturas de suspensão – Estruturas que possibilitam a sustentação dos condutores tendo os cabos passantes por suas cadeias de isoladores.

Locação de estruturas – Ato de posicionar as estruturas no desenho do perfil topográfico na etapa de projeto, sendo a expressão também utilizada para o ato de definir a posição exata de instalação da estrutura no local de construção através de aparelhos de topografia.

Faixa de servidão – Também chamada de faixa de passagem ou faixa de segurança. Área geralmente em forma de retângulo, sendo dividida ao meio pelo eixo central da linha de transmissão. Definida através de cálculo específico, regulamentado pelas normas técnicas, a faixa é registrada através de contratos nos órgãos competentes. Por meio desse registro e em função da legislação vigente para o sistema elétrico, as concessionárias de energia elétrica adquirem o direito



de definir a ocupação e utilização, por ela própria e por terceiros, além do direito de manutenção dessas áreas.

Fluência ou fluência metalúrgica – Trata-se do escoamento ou deformação plástica do material dos cabos. Ocorre com o tempo, sob carga, após a deformação inicial resultante da aplicação de uma carga extra. Juntamente com a variação do módulo de elasticidade dos cabos é responsável pelo alongamento, durante a vida útil da linha.

Mísula – Espécie de braço, em estruturas metálicas, destinado à instalação das cadeias de isoladores.

Período de retorno – intervalo médio entre ocorrências sucessivas de um mesmo evento durante um período de tempo indefinidamente longo. Corresponde ao inverso da probabilidade de ocorrência do evento no período de um ano.

Suporte – Termo utilizado para definir as estruturas das linhas de transmissão, incluindo as mísulas (*braços*) para estruturas metálicas, e cruzetas, para as estruturas em concreto armado.

Tramo – Distância entre duas estruturas de ancoragem consecutivas, também denominado “seção de tensionamento”.

Temperatura de referência – Valor de temperatura que ocorre com maior frequência para uma região considerada. Seu valor poderá ser consultado através da *figura A8* do *apêndice A*.

Vão de peso de um suporte (Vão Gravante) – distância entre os pontos com tangente horizontal das catenárias dos vãos adjacentes ao suporte.

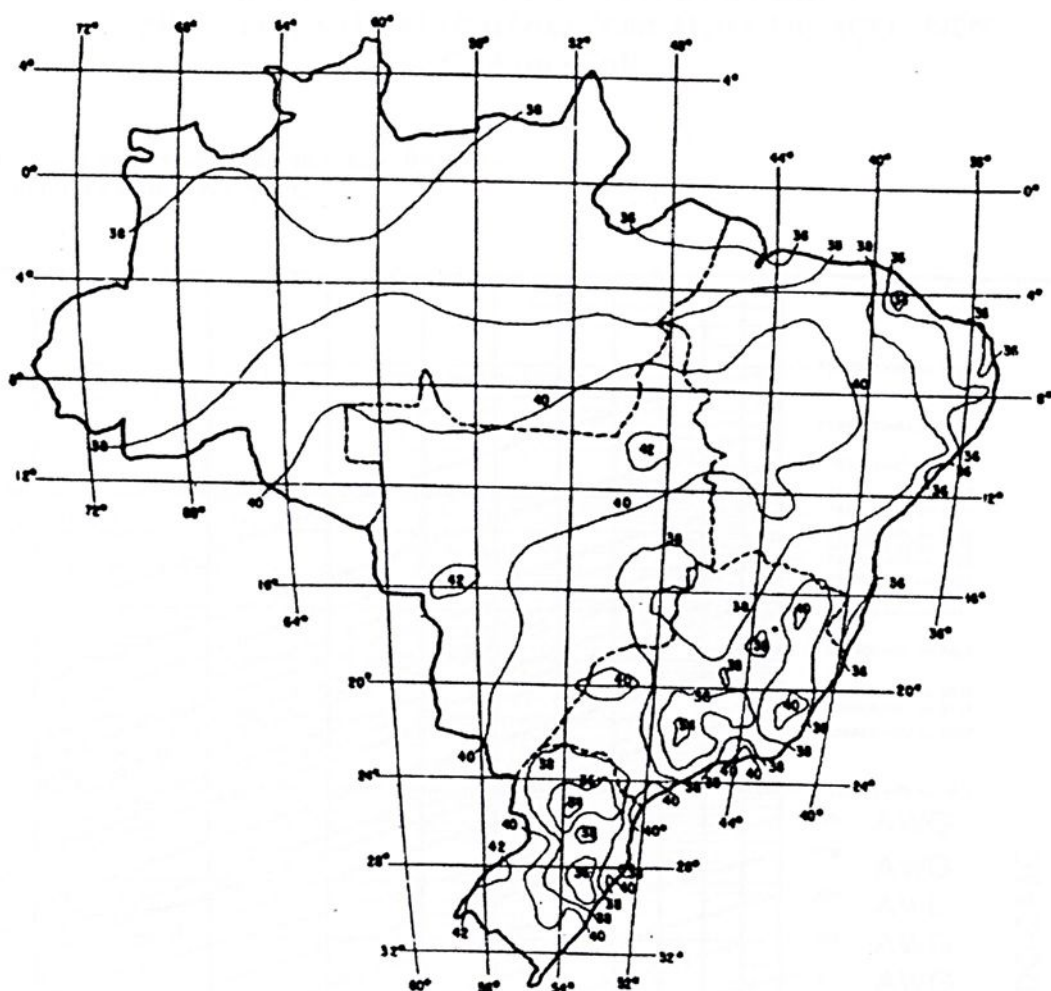
Vão de vento de um suporte (Vão Médio) – média aritmética dos vãos adjacentes ao suporte.



IMPLANTAÇÃO, ESTUDOS E AVALIAÇÃO
PARAMÉTRICA DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

APÊNDICE A
FIGURAS E GRÁFICOS





TEMPERATURA MÁXIMA (°C)

figura A1 - Mapa das temperaturas máximas no Brasil – NBR 5422 – Ref.[05]

CURVA DE AQUECIMENTO DOS CABOS **CONDUTORES DE ALUMÍNIO COM ALMA DE AÇO - NÚS** **CAA ou ACSR**

Notas:

- 1 - Velocidade do ar transversal ao cabo = 0,61 m/s
- 2- Temperatura ambiente = 40 °C.

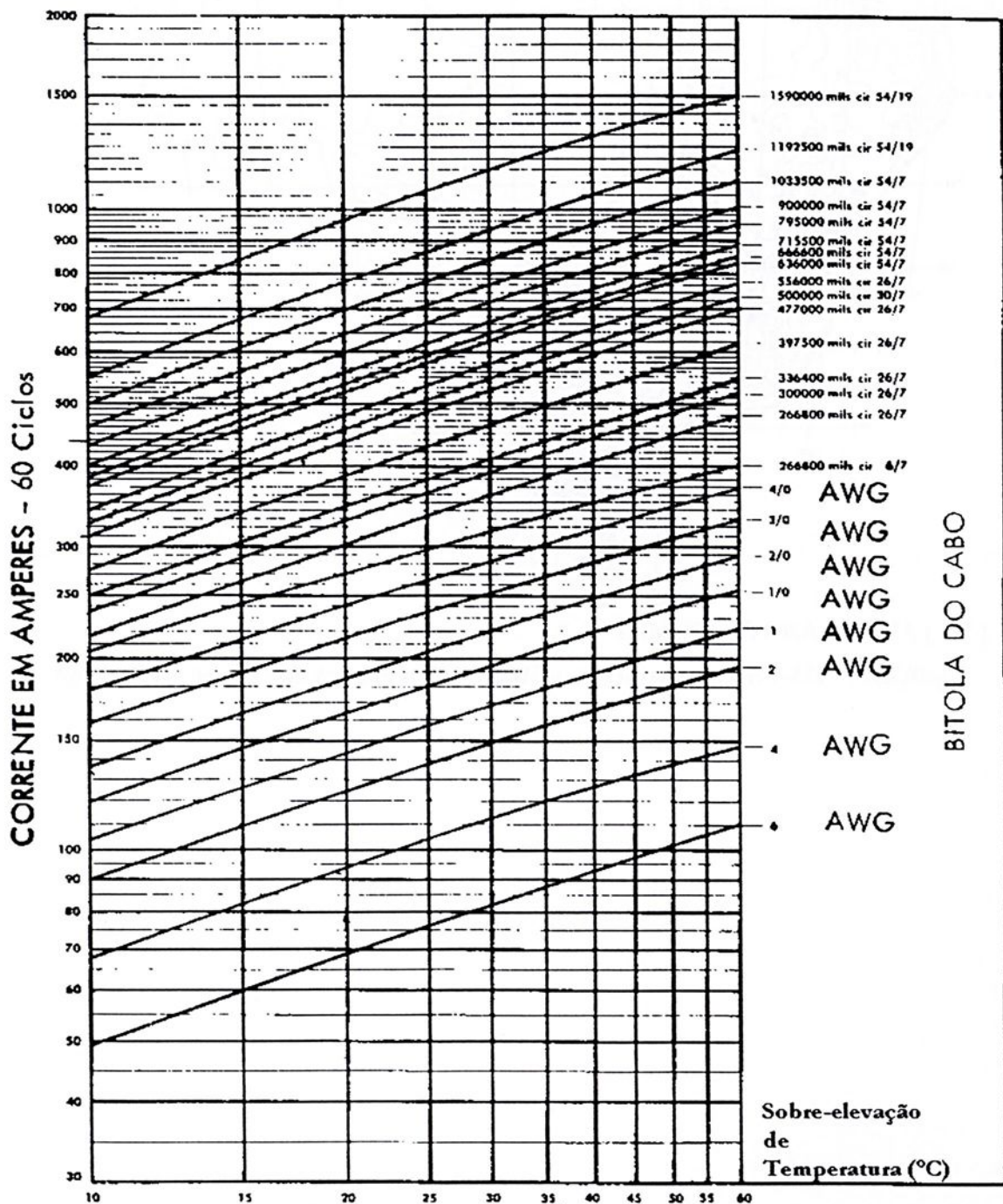


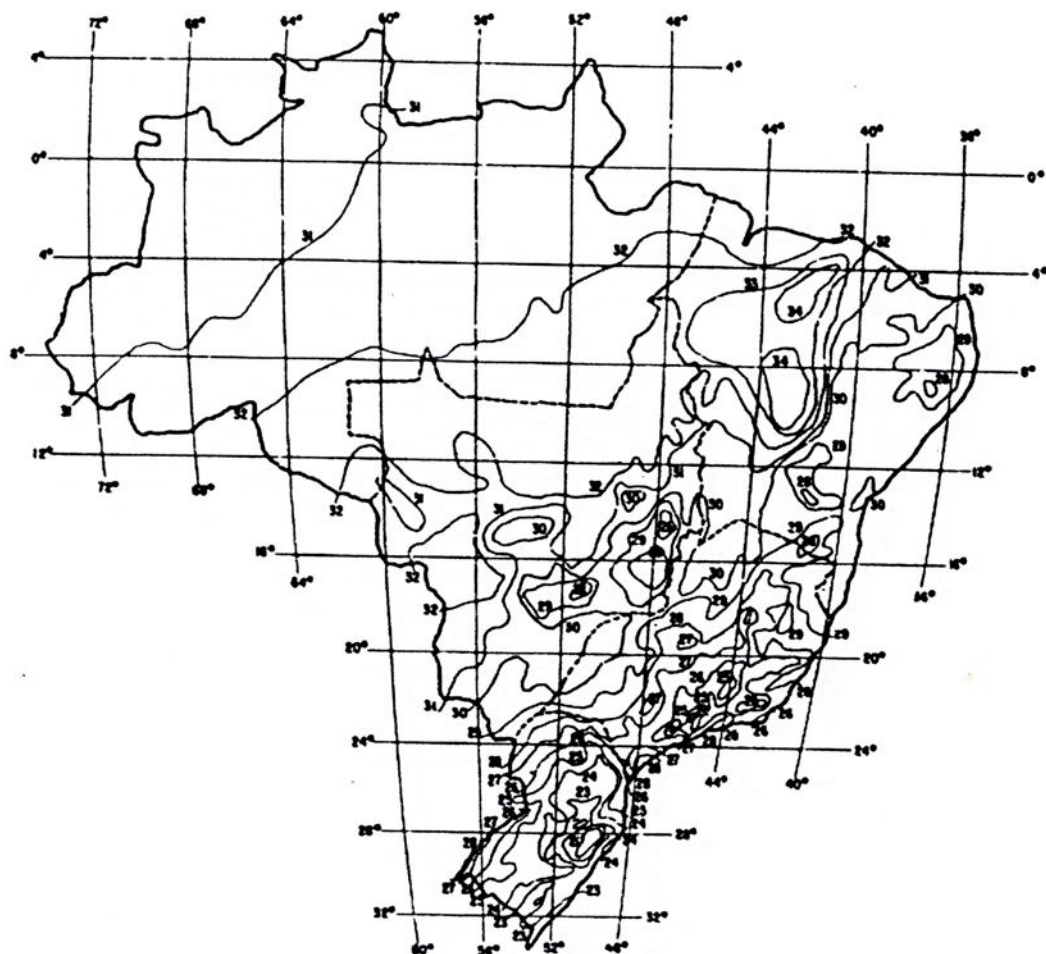
Gráfico do Fabricante (Alcan Alumínio do Brasil S/A)

figura A2 - Gráficos das curvas de aquecimento dos condutores para cabos com alma de aço - Ref.[01]



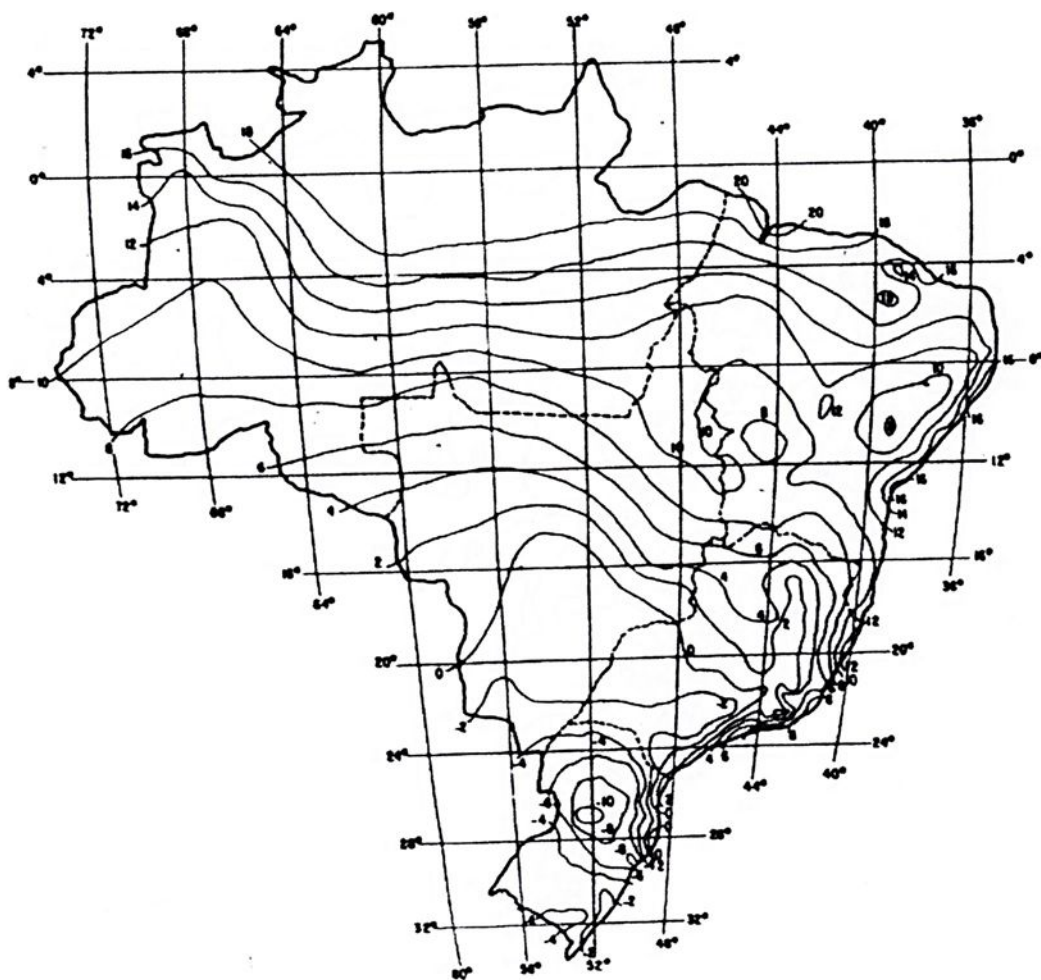
figura A3 – Mapa das temperaturas médias no Brasil – NBR 5422 – Ref.[05]





TEMPERATURA MÁXIMA MÉDIA (°C)

figura A4 – Mapa das temperaturas “máxima-média” no Brasil – NBR 5422 – Ref.[05]



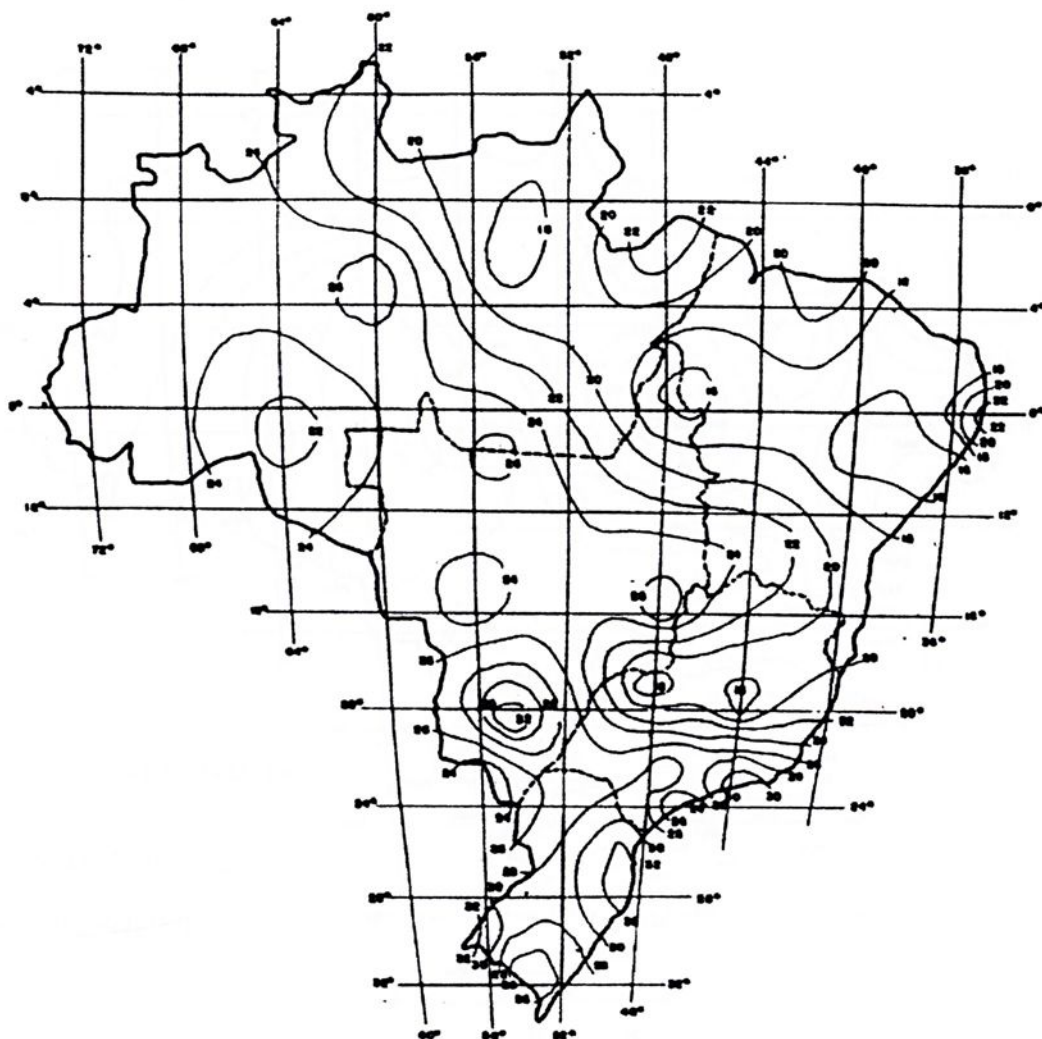
TEMPERATURA MÍNIMA (°C)

figura A5 – Mapa das temperaturas mínimas no Brasil – NBR 5422 – Ref.[05]



MÉDIA DAS TEMPERATURAS MÍNIMAS DIÁRIAS (°C)

figura A6 – Mapa das temperaturas mínimas diárias no Brasil – NBR 5422 – Ref.[05]



VELOCIDADE BÁSICA DE VENTO - (m/s)

tempo de integração da média: 10 min

período de retorno: 50 anos

a 10 m de altura

terreno de categoria B

figura A7 – Mapa das velocidades básicas de vento no Brasil – NBR 5422 – Ref.[05]



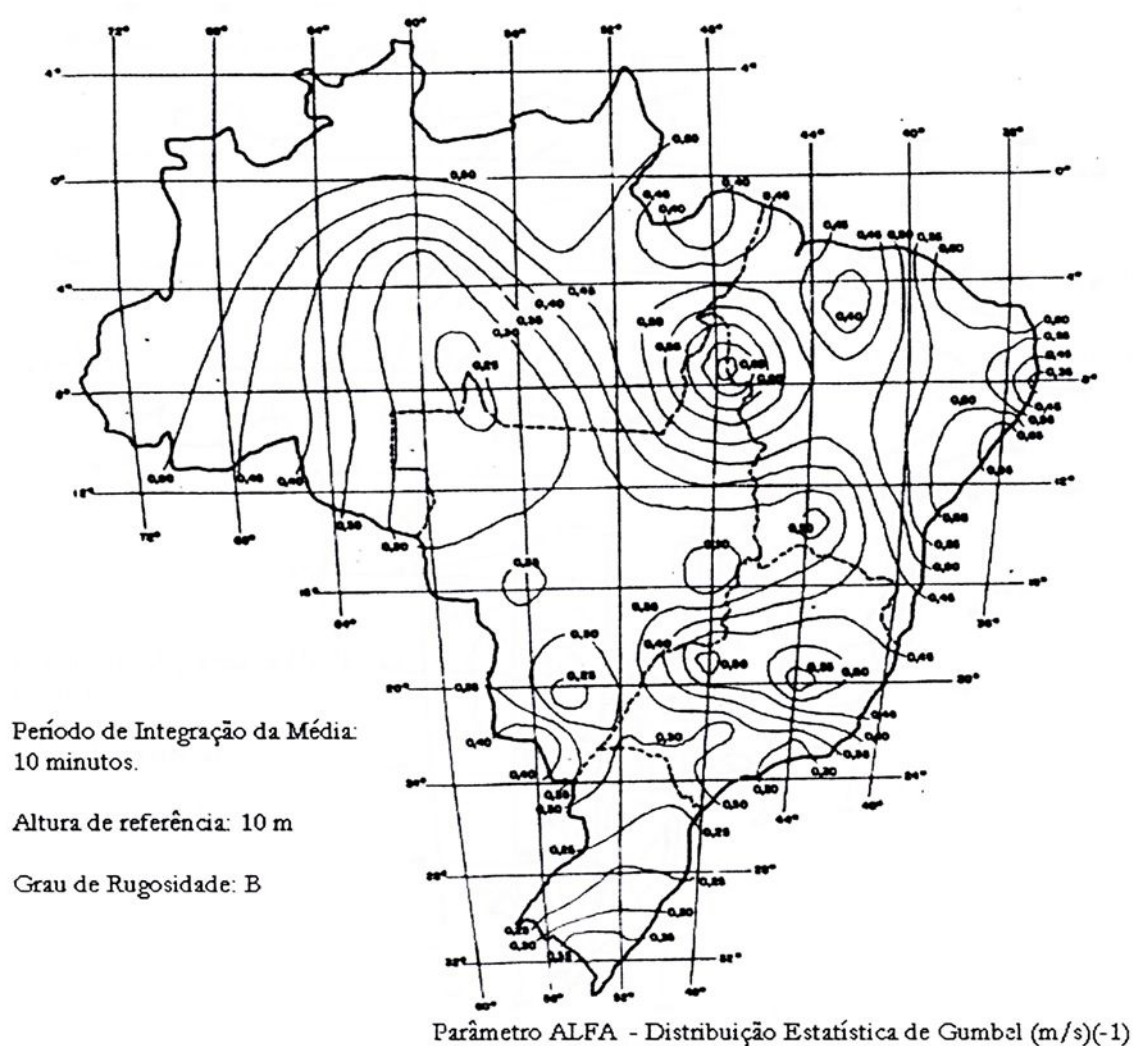


figura A8 – Mapa com a distribuição estatística de Gumbel – parâmetro alfa – NBR 5422 – Ref.[05]



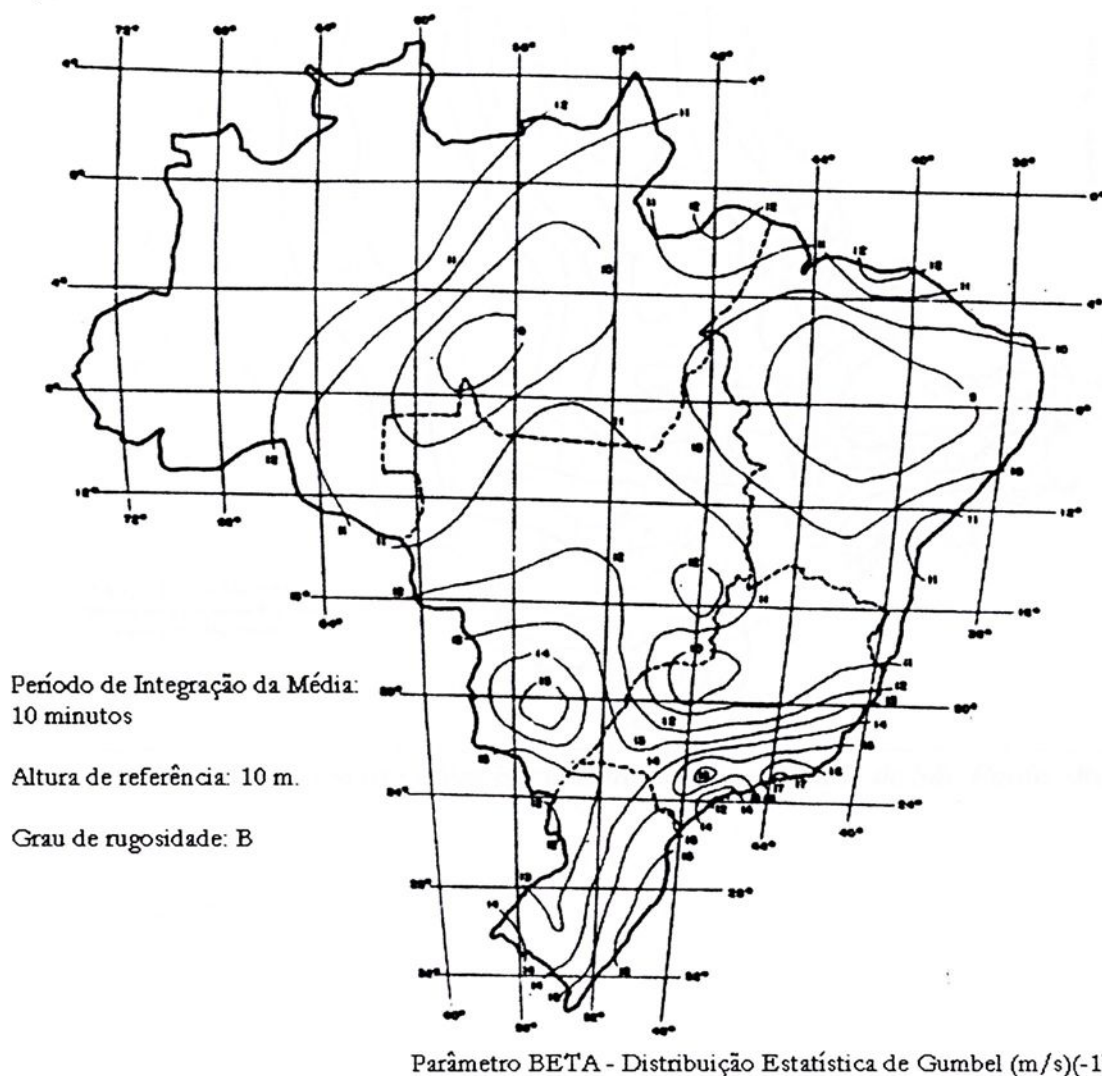


figura A9 – Mapa com a distribuição estatística de Gumbel – parâmetro beta – NBR 5422 – Ref.[05]

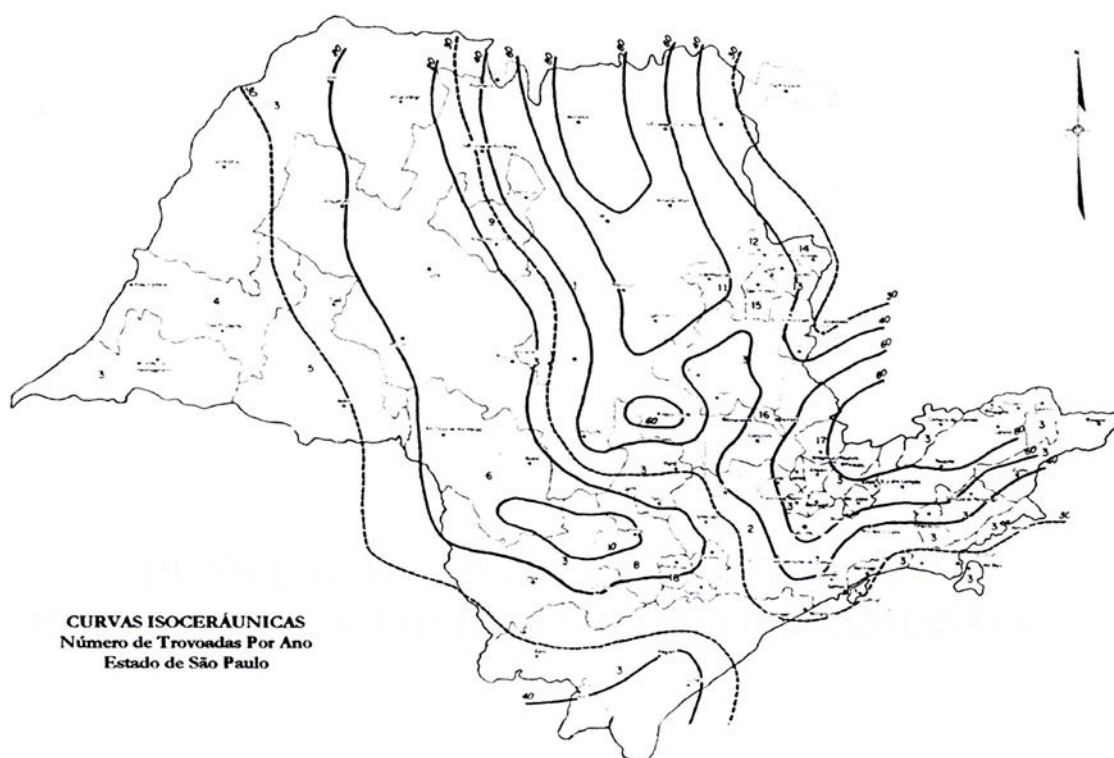


figura A10 – Mapa com as curvas isoceraúnicas para o Estado de São Paulo –Ref.[09]

IMPLANTAÇÃO, ESTUDOS E AVALIAÇÃO
PARAMÉTRICA DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

APÊNDICE B
PLANILHAS E TABELAS



Tabela B1 - Módulos de Elasticidade e Coeficientes de Dilatação Linear – Ref.[01] e [02]

Númeração de Tipo	Tipo de Arame ou Condutor	Encordamento (Enc)	Módulo de Elasticidade (kgf/mm ²)	Coeficiente de Dilatação Linear (°C) ⁻¹ x 10 ⁻⁶
001	Alumínio - CA	7	6.200	23,0
002	Alumínio - CA	19	6.000	23,0
003	Aço Galvanizado -EAR	1	20.000	11,5
004	Aço Galvanizado - EAR	7	19.000	11,5
005	Alumínio com Alma de Aço - CAA	6x1	8.000	19,1
006	Alumínio com Alma de Aço - CAA	26x7	8.000	18,9
007	Alumínio com Alma de Aço - CAA	30x7	8.000	17,8
900	Linha sem cabo pára-raios			

Tabela B2 - Características Mecânicas dos Cabos – Ref.[01] e [02]

Número	Cabo	Especificação	Enc.	Diâmetro (d – mm)	Área (S – mm ²)	Tensão de Ruptura (kgf)	Peso (kgf/m)
001	Penguin	CAA 4/0AWG	6x1	14,31	125,09	3.786	0,4332
002	Patridge	CAA 226.800-CM	26x7	16,30	157,23	5.124	0,5468
003	Linnet	CAA 336.400-CM	26x7	18,29	198,17	6.392	0,6887
004	Oriole	CAA 336.400-CM	30x7	18,83	210,24	7.597	0,7844
005	Hawk	CAA 477.00-CM	26x7	21,79	281,04	8.860	0,9769
006	Grosbeak	CAA 636.000-CM	26x7	25,16	374,73	11.428	1,3027
007	Tern	CAA 795.000-CM	45x7	27,01	430,66	10.013	1,3337
008	Drake	CAA 795.000-CM	26x7	28,13	468,42	14.289	1,6284
009	Aço 7	7,94 mm EAR	7	7,94	38,32	5.081	0,3050
010	Aço 9	9,53 mm EAR	7	9,53	51,14	6.986	0,4060
011	Oxilip	CA 4/0-AWG	7	13,25	107,22	1.736	0,2956
012	Tulip	CA 336.400-CM	19	16,91	170,46	2.786	0,4700
013	Cosmos	CA 477.000-CM	19	20,12	241,70	3.792	0,6664
900		Linhas sem Cabo Pára-Raios					



Tabela B3 - Propriedades Físicas e Elétricas – Ref.[01] e [02]

Nº		Condu- tividade Mínima (%IACS)	Resistividade Máxima (ohms.mm ² /m)	Resistividade Máxima (ohms.mm ² /m)	Coef. de Temperatura (Resistência por Grau C)	Coef. de Temperatura (Resistência por Grau C)	Densidade A 20°C
		(%)	20°C	25°C	20°C	25°C	(g/cm ³)
001	Fio de Alumínio 1350(EC)	61,0	0,028264	0,028834	0,00403	0,00395	2,703
002	Fio de Liga de Alumínio 6201	52,5	0,032840	0,033373	0,00347	0,00340	2,703
003	Fio de Cobre Duro Comercial	97,0	0,017774	0,018113	0,00381	0,00374	8,89
004	Padrão Internacional Cobre Recozido(IACS)	100,0	0,017241	0,017579	0,00393	0,00385	8,89
005	Fio de Aço Galvanizado	9,0	0,19157	---	---	---	7,78
900	Linhas Sem C-PR						



Tabela B4 - Características Elétricas dos Cabos – Ref.[01] e [02]

Numero	Cabo	Especificação	Resistência Elétrica- 20°C $\Omega/m(\text{máximo})$	Resistência Elétrica -75°C $\Omega/m(\text{máximo})$	Raio (r – mm)	Raio Corrigido (r' – mm)
001	Penguin	CAA 4/0AWG	0,000267610	0,00032693	7,155	2,4800
002	Patridge	CAA 266.800-CM	0,000214300	0,00026180	8,150	6,6100
003	Linnet	CAA 336.400-CM	0,000169960	0,00020763	9,145	7,4300
004	Oriole	CAA 336.400-CM	0,000170370	0,00020813	9,4150	7,7700
005	Hawk	CAA 477.00-CM	0,000119860	0,00014643	10,895	8,8300
006	Grosbeak	CAA 636.000-CM	0,000089898	0,000010982	12,580	10,2100
007	Tern	CAA 795.000-CM	0,000071918	0,00008786	13,505	10,7000
008	Drake	CAA 795.000-CM	0,000071918	0,00008786	14,065	11,4300
009	Aço 7 r'=r.0,726	7,94 mm - EAR	0,00499961	0,00499961	3,970	2,8822
010	Aço 9 r'=r.0,726	9,53 mm - EAR	0,00374577	0,00374577	4,765	3,4594
011	Oxilip r'=r.0,726	CA 4/0-AWG	0,00026888	0,00026888	6,625	4,8098
012	Tulip r'=r.0,758	CA 336.400-CM	0,00016913	0,00016913	8,455	6,4089
013	Cosmos r'=r.0,758	CA 477.000-CM	0,00011928	0,00011928	10,06	7,6255
900		Linhas sem C-P.Raios				



Tabela B5 – Configurações de silhuetas para estruturas de linha de transmissão.

NÚMERO NS	CSSP (***)	CS1P (***)	CS2P (***)	CD1P (***)	CD2P (***)
001	CST-SP	CST-CM	CSH-2P	CDVC15	CDPM2P
002	CSH-SP	CST-CC		CDVR15	CDPC00
003		CST-RC		CDVP29	CDPR00
004		CST-PC		CDVC00	CDPP00
005		CST-CD		CDVR00	CDPC09
006		CST-RD		CDVP00	CDPR09
007		CST-PD		CDPC1P	CDPP15
008		CSVC00		CDPR1P	CDPC2P
009		CSVR00		CDPP1P	CDPM2P (**)
010		CSVP00		CDHC1P	CDPC00 (**)
011		CSVC09		CDVC15 (*)	CDPR00 (**)
012		CSVR09		CDVR15 (*)	CDPP00 (**)
013		CSVP09		CDVP29 (*)	CDPC09 (**)
014		CSVC29		CDVC00 (*)	CDPR09 (**)
015		CSVR29		CDVR00 (*)	CDPP15 (**)
016		CSVP29		CDVP00 (*)	CDPC2P (**)
017				CDPC1P (*)	
018				CDPR1P (*)	
019				CDPP1P (*)	
020				CDHC1P (*)	

Notas:

(*) - Estruturas de circuito duplo, tipo CD1P, com faseamento na condição de máxima indutância.

(**) - Estruturas de circuito duplo, tipo CD2P, com faseamento na condição de máxima indutância.

(***) – Ver os desenhos das silhuetas das estruturas no apêndice C.

Os números indicados na coluna “NS” são destinados à aplicação na tabela B6.



Tabela B6 - Dados de entrada do programa CPLTs.for - Fl.01/02

Parâmetro	Descrição	Fonte	Valor	Unidade
Tmax	Temperatura máxima da região da LT	Figura A1 - Apêndice A	40.0	°C
Tmed	Temperatura média da região da LT	Figura A3 - Apêndice A	21.0	°C
Tmin	Temperatura mínima da região da LT	Figura A5 - Apêndice A	0.0	°C
Tcoinc	Temperatura com vento coincidente	Figura A6 - Apêndice A	15.0	°C
Tse	Limite de sobre-elevação da temperatura	Planejamento da LT	35.0	°C
Tdesv	Desvio padrão para a temperatura média	Mapas IBGE/ABNT	1.0	°C
Alfa	Parâmetro da distribuição de Gumbel	Figura A8 - Apêndice A	0.30	(m/s) ⁻¹
Beta	Parâmetro da distribuição de Gumbel	Figura A9 - Apêndice A	14.0	(m/s) ⁻¹
Kr	Coefficiente de rugosidade	Tabela IV.1	1.0	*****
Kd	Coefficiente de correção de rugosidade	Figura IV.1	1.22	*****
Ka	Coefficiente de correção de altura	Tabela IV.2	11.0	*****
Tret	Período de retorno	Projetista (Recom:50)	50.0	anos
Pin	Período de integração	Projetista (Recom:30)	30.0	segundos
Cxc	Coefficiente de arrasto	NBR 5422 (P/cabos)	1.00	*****
Kv	Fator de efetividade do vento	Figura IV.2	0.90	*****
ALT	Altitude média da região da LT	Plantas do IBGE	590.0	metros
Teta	Ângulo de incidência do vento	Projetista (Recom:90°)	90.0	graus
Flm	Flecha média da LT	Projeto eletromecânico	5.0	metros
Rss	Resistividade média do solo	Medições no local	600.0	Ohms.m
Dcs	Distância de segurança condutor/solo	NBR 5422/Empresas	9.0	metros
Fhz	Frequência da rede	Fixada	60.0	Hertz



Tabela B6 - Dados de entrada do programa CPLTs.for - Fl.02/02

Parâmetro	Descrição	Fonte	Valor	Unidade
R1	Resistência do corpo humano	Tabela III-2	650.0	Ohms
R2	Resistência de um pé calçado	Pior caso - sem calçado	10.0	Ohms
R3	Resistência de contato de aterramento	Tabela III-5	930.0	Ohms
Ip	Corrente de passo	Tabela III-3	0.020	Amperes
It	Corrente de toque	Tabela III-3	0.006	Amperes
Kp	Coefficiente de correção de passo	Tabela III-1	1.10	*****
Kt	Coefficiente de correção de toque	Tabela III-1	0.95	*****
FGS	Fator de superfície p/gradiente de potencial - Tempo seco	Tabela XII.1	0,92	metros
FGU	Fator de superfície p/gradiente de potencial - Tempo Úmido	Tabela XII.1	0,16	metros
Vlt	Tensão	Tensão da LT	138.0	kV
Flvm	Fecha do maior vão da linha de transmissão	Projeto eletromecânico	7.0	metros
Lcad	Comprimento da cadeia de isoladores	Padrão de ferragens e estruturas	1.70	metros
AngB	Ângulo de balanço no maior vão da linha de transmissão	Projeto eletromecânico	60.0	graus
LLT	Comprimento da linha de transmissão	Projeto eletromecânico	10,00	km
NS	Nº - Silhueta - Estrutura da LT	Tabela B5 - Apêndice B		*****
NCc	Nº - Condutor	Tabela B2 e B4 -Apêndice B		*****
NCpr	Nº - Cabo pára-raios	Tabela B2 e B4 -Apêndice B		*****
NTc	Nº - Tipo da configuração - condutor	Tabela B1 - Apêndice B	6	*****
NTpr	Nº - Tipo da configuração - Cabo pára-raios	Tabela B1 - Apêndice B	4	*****
NMc	Nº - Tipo do material - Condutor	Tabela B3 - Apêndice B	1	*****
NMpr	Nº - Tipo do material - Cabo pára-raios	Tabela B3 - Apêndice B	5	*****



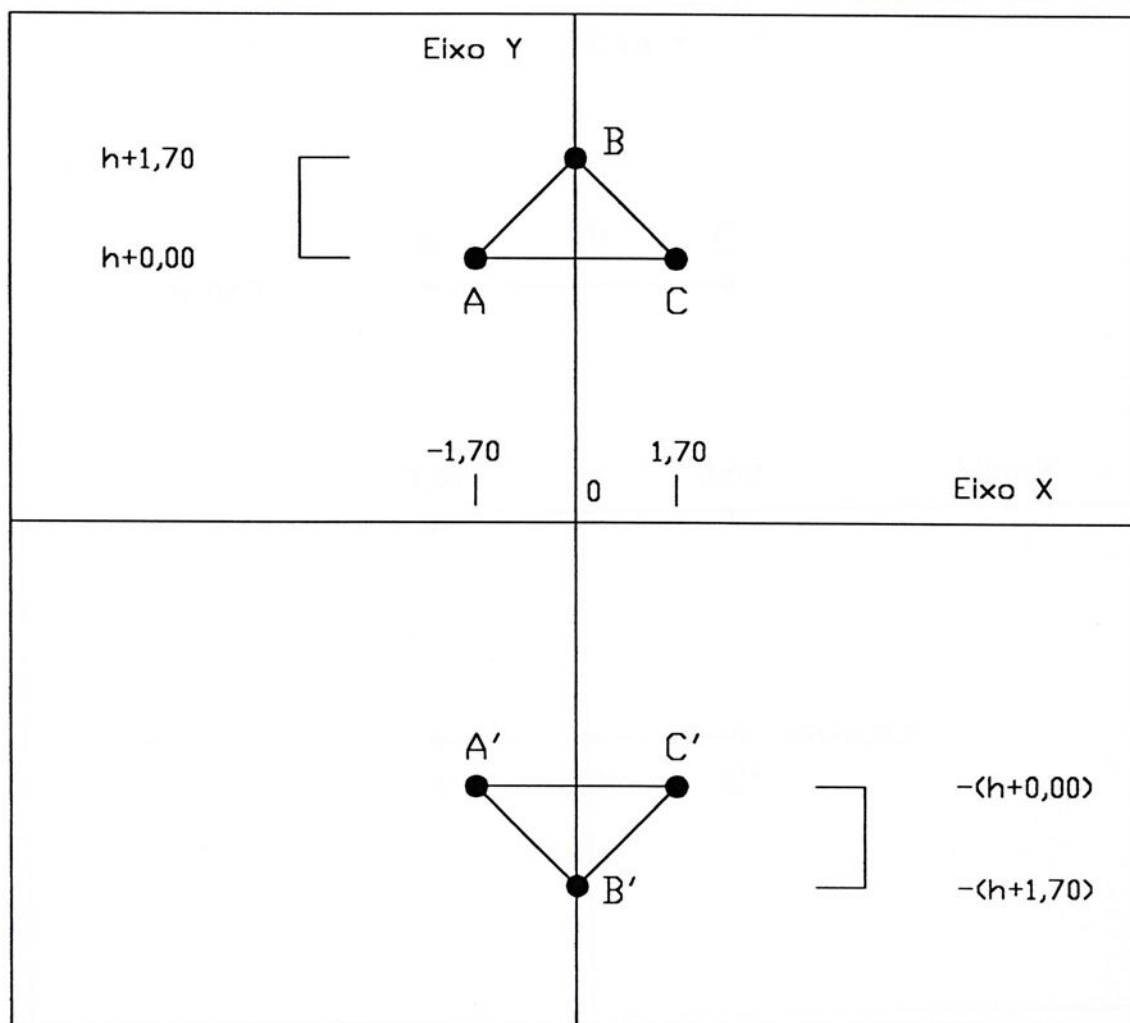
Parâmetros de Projeto Eletromecânico de Linhas de Transmissão				Valor	Unidade
Parâmetro <i>Alfa</i>		NBR 5422/1985 - Figura 29		0,3	adimensional
Parâmetro <i>Beta</i>		NBR 5422/1985 - Figura 30		14	adimensional
Período de Retorno 1 (T^1)				50	anos
Período de Retorno 2 (T^2)				10	anos
Categoria do Terreno				B	classificação
Coeficiente de Rugosidade (K_r)				1	adimensional
Período de Integração (t)				30	segundos
Correção de Rugosidade (K_d)				1,22	adimensional
Coeficiente para correção de H (n)				11	adimensional
Altura Média dos Condutores (H)				15	metros
Temperatura Coincidente (t_c)				15	graus Celsius
Altitude Média do Local (ALT)				590	metros
Coeficiente de Arrasto (C_{xc})				1	adimensional
Fator de Efetividade do Vento (a)				0,92	adimensional
Ângulo de Incidência do Vento ($Teta$)				90	graus
Condutor	CAA 336.400 CM	LINNET	Cabo Pára-Raios	7,94 mm EAR	Aço-7
Peso do Condutor	0,6887	kgf/m	Peso do Cabo Pára-Raios	0,305	kgf/m
Tensão de Ruptura do Condutor	6392	kgf	Tensão de Ruptura do Cabo Pára-Raios	5081	kgf
Encordamento	26x7	Fios Al/Aço	Encordamento	7	Fios Al/Aço
Diâmetro do Cabo (d)	18,29	mm	Diâmetro do Cabo Pára-Raios (d)	7,94	mm
Módulo de Elasticidade (E)	8000	kgf/mm ²	Módulo de Elasticidade (E)	19000	kgf/mm ²
Área transversal do Cabo (S)	198,17	mm ²	Área transversal do Cabo Pára-Raios (S)	38,32	mm ²
Coeficiente de Dilatação Linear ($alfa$)	18,9.E(-06)	°C(-1)	Coeficiente de Dilatação Linear-PR-($alfa$)	11,5.E(-06)	°C(-1)
Velocidade Básica de Vento				27,01	m/s
Vel. de Vento - Correção de Altura				28,02	m/s
Velocidade de Vento de Projeto				34,19	m/s
Velocidade de Vento de Projeto				123,07	km/h
Massa Específica do Ar				1,1431	kg/m ³
Pressão de Vento				667,9419	N/m ²
Pressão de Vento				68,0879	kgf/m ²
Força de Vento do Condutor	1,1457	kgf/m	Força de Vento do Cabo Pára-Raios	0,4974	kgf/m
Peso com Vento do Condutor	1,3368	kgf/m	Peso com Vento do Cabo Pára-Raios	0,5834	kgf/m



IMPLANTAÇÃO, ESTUDOS E AVALIAÇÃO
PARAMÉTRICA DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

APÊNDICE C
SILHUETAS DE ESTRUTURAS





h = altura média do condutor inferior ao solo, em metros.

$h = Dcs + 0,75 \text{ Flm}$

onde:

Dcs = distância de segurança condutor ao solo, em metros

Flm = flecha média da linha de transmissão, em metros

UNESP

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Ilha Solteira - SP

ESTRUTURA TIPO CSTSP

CIRCUITO SIMPLES TRIANGULAR

Espaçamento Compacto

Sem cabos pára-raios

Orientador

Prof. Dr. Luiz Fernando Bovolato

Figura C-01

Apêndice C

MESTRADO

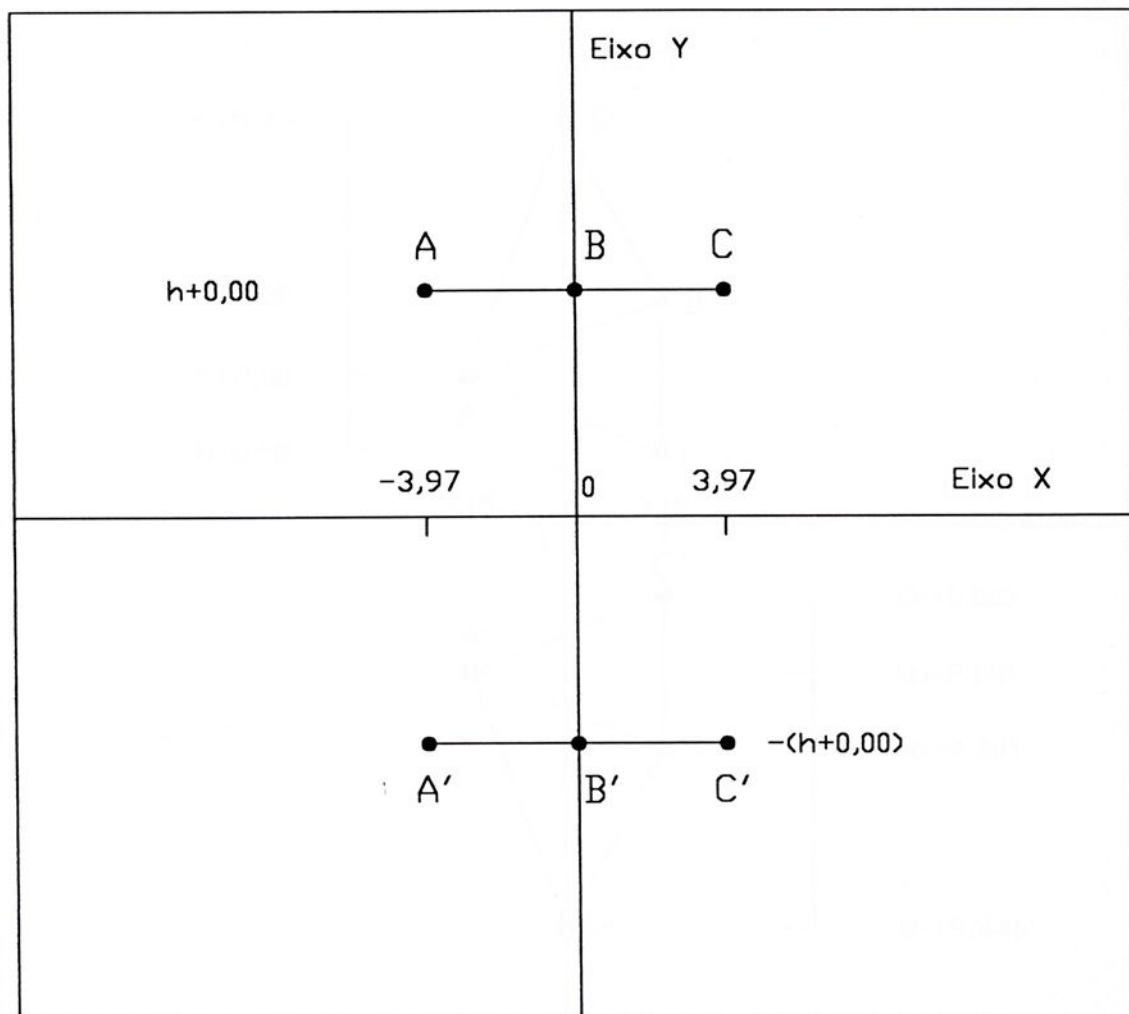
Marco Antônio Fernandes

sem escala

valores em metros

Folha A-4





h = altura média do condutor ao solo, em metros.

$h = Dcs + 0,75 Flm$

onde:

Dcs = distância de segurança condutor ao solo, em metros

Flm = flecha média da linha de transmissão, em metros

UNESP
UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
 Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
 Ilha Solteira - SP

ESTRUTURA TIPO CSHSP
 CIRCUITO SIMPLES HORIZONTAL
 Espaçamento Convencional
 Sem cabos pára-raios

Orientador | Prof. Dr. Luiz Fernando Bovolato

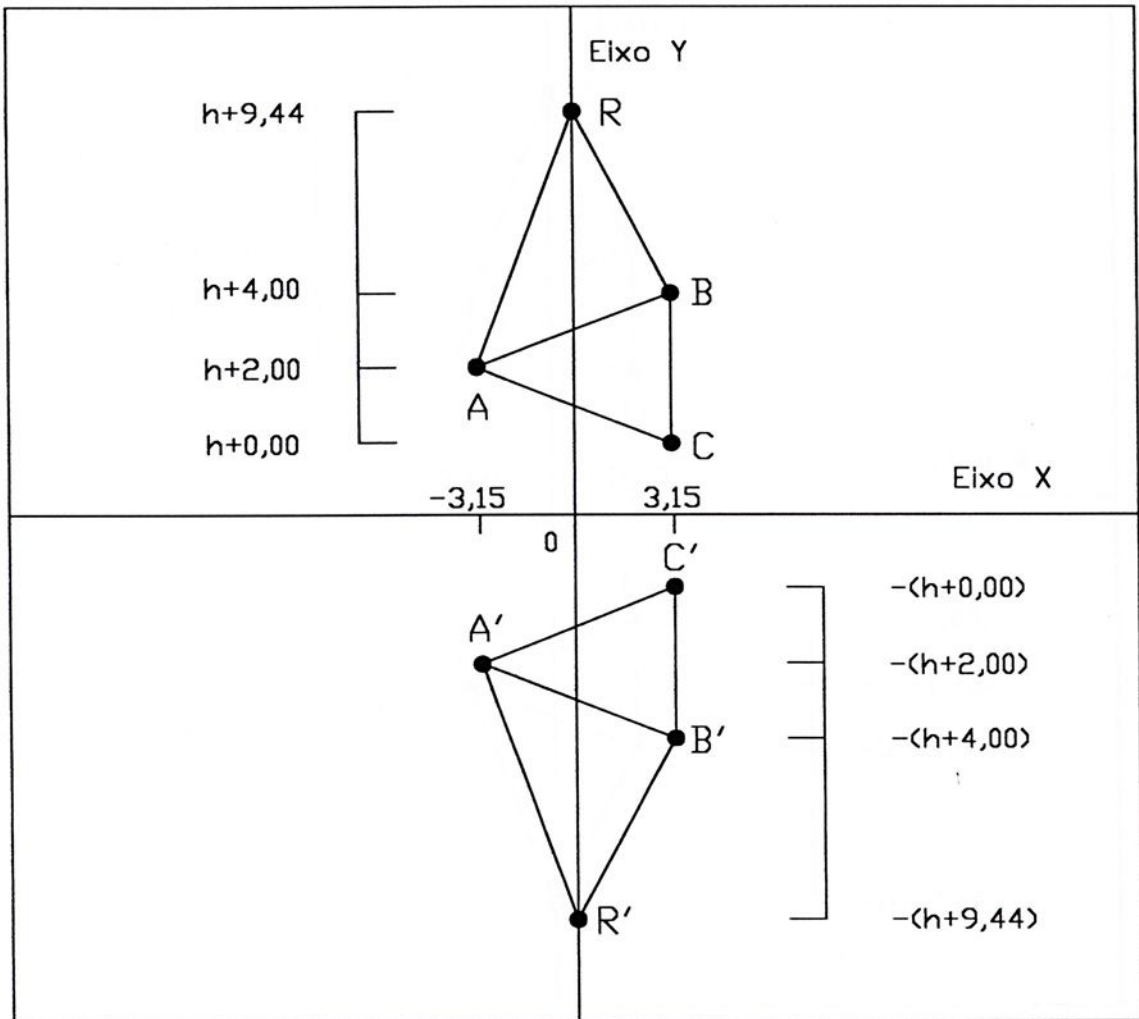
MESTRADO | Marco Antônio Fernandes

Figura C-02

Apêndice C

sem escala | valores em metros | Folha A-4





h = altura média do condutor inferior ao solo, em metros.

$h = Dcs + 0,75 \text{ Flm}$

onde:

Dcs = distância de segurança condutor ao solo, em metros

Flm = flecha média da linha de transmissão, em metros

UNESP

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Ilha Solteira - SP

Orientador

Prof. Dr. Luiz Fernando Bovolato

MESTRADO

Marco Antônio Fernandes

ESTRUTURA TIPO CSTCM

CIRCUITO SIMPLES TRIANGULAR

Espaçamento Convencional

Um cabo pára-raios central

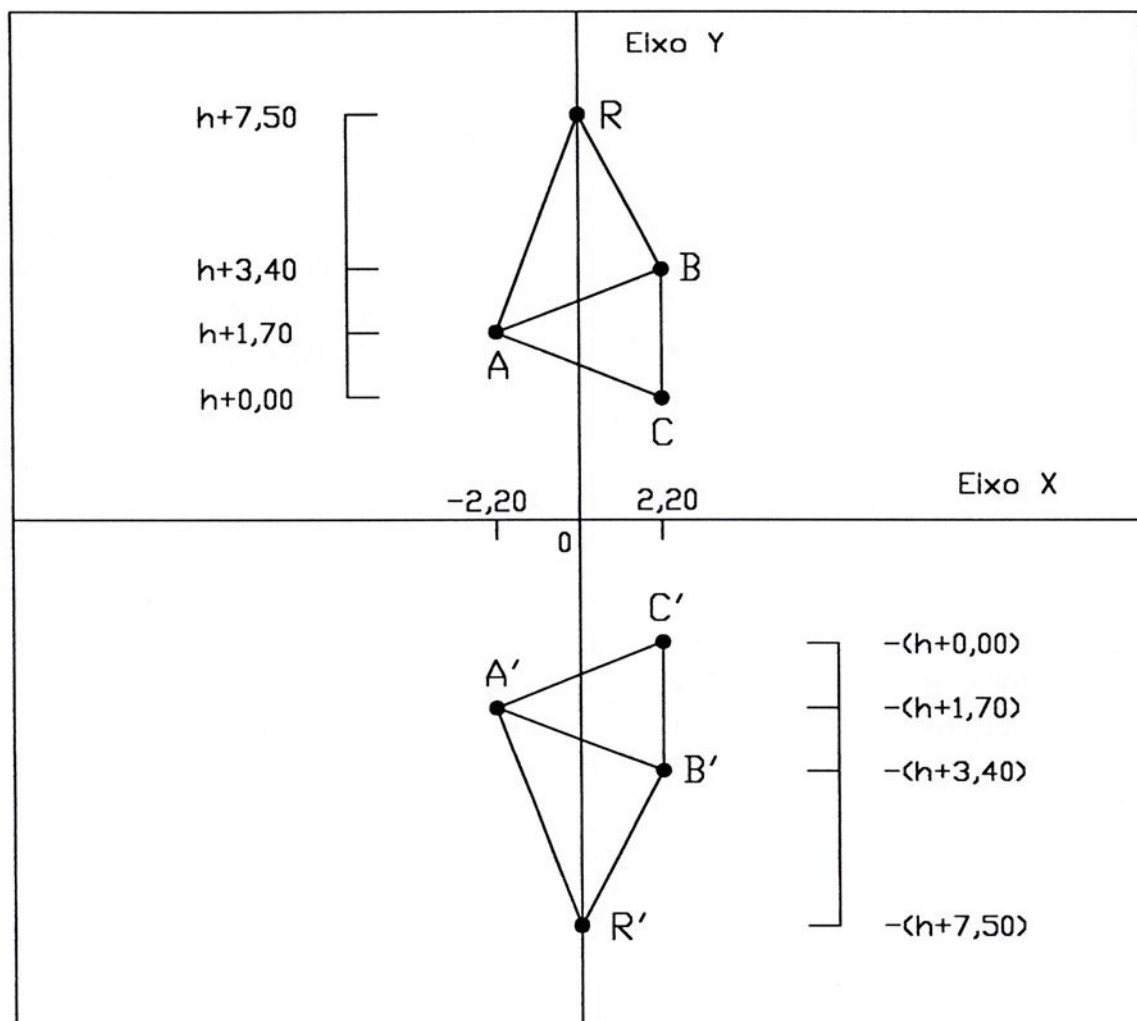
Ângulo de Blindagem = $30^{\circ}04'22''$

Figura C-03

Apêndice C

sem escala | valores em metros | Folha A-4





h = altura média do condutor inferior ao solo, em metros.

$h = Dcs + 0,75 \text{ Flm}$

onde:

Dcs = distância de segurança condutor ao solo, em metros

Flm = flecha média da linha de transmissão, em metros

UNESP

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Ilha Solteira - SP

Orientador

Prof. Dr. Luiz Fernando Bovolato

MESTRADO

Marco Antônio Fernandes

ESTRUTURA TIPO CSTCC

CIRCUITO SIMPLES TRIANGULAR

Espaçamento Convencional

Um cabo pára-raios central

Ângulo de Blindagem = $28^{\circ}13'02''$

Figura C-04

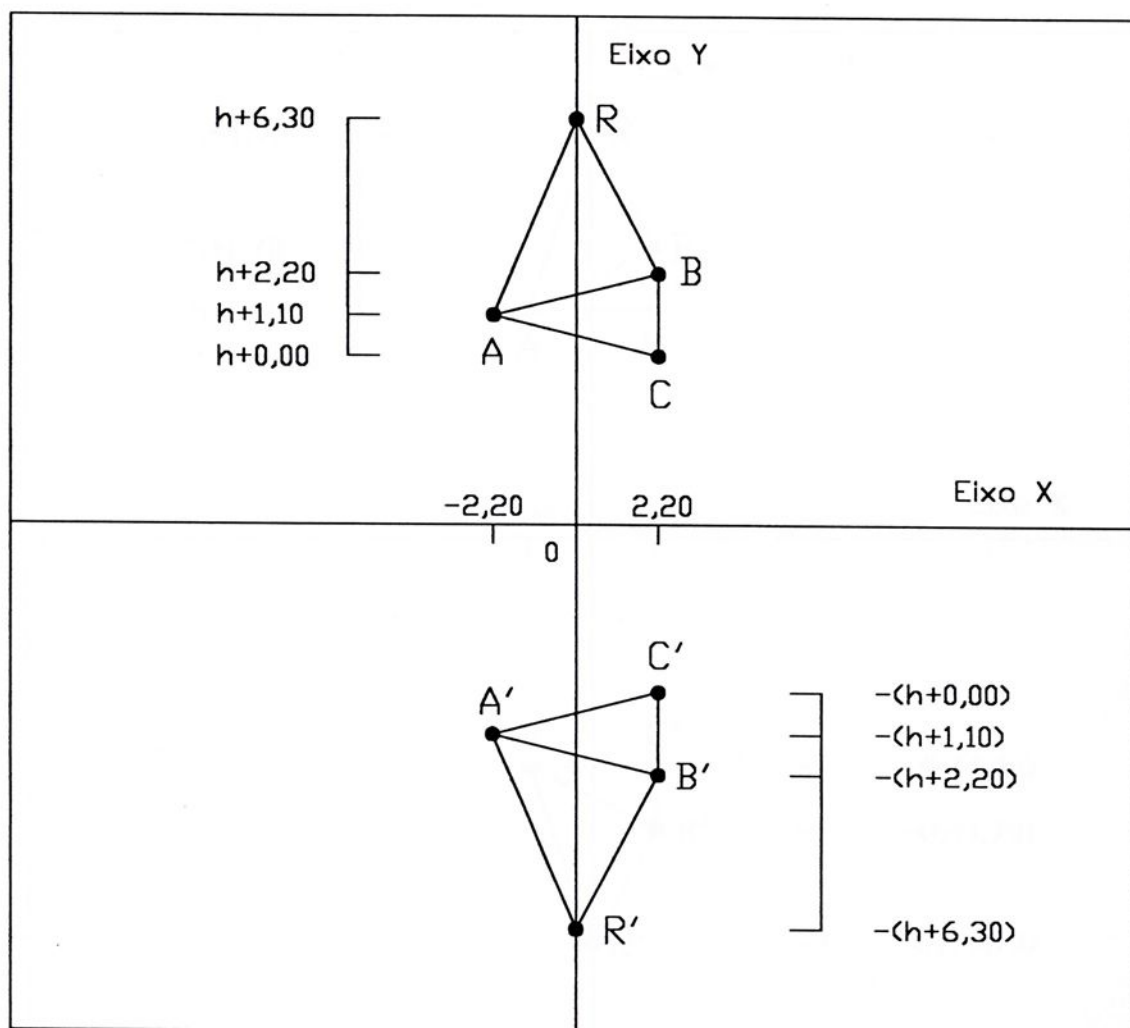
Apêndice C

sem escala

valores em metros

Folha A-4





h = altura média do condutor inferior ao solo, em metros.

$h = Dcs + 0,75 Flm$

onde:

Dcs = distância de segurança condutor ao solo, em metros

Flm = flecha média da linha de transmissão, em metros

UNESP

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Ilha Solteira - SP

Orientador

Prof. Dr. Luiz Fernando Bovolato

MESTRADO

Marco Antônio Fernandes

ESTRUTURA TIPO CSTRC

CIRCUITO SIMPLES TRIANGULAR

Espaçamento Reduzido

Um cabo pára-raios central

Ângulo de Blindagem = $28^{\circ}13'02''$

Figura C-05

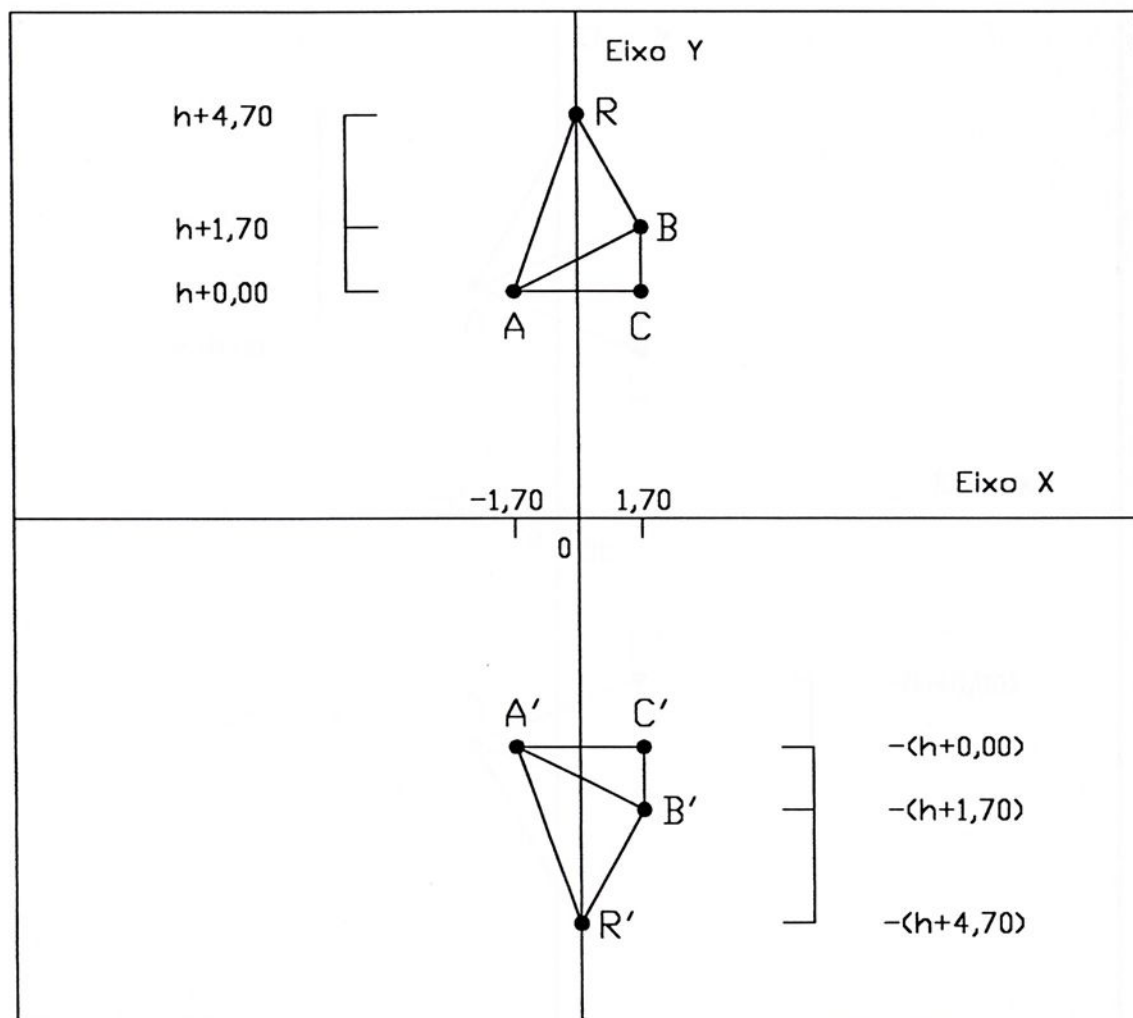
Apêndice C

sem escala

valores em metros

Folha A-4





h = altura média do condutor inferior ao solo, em metros.

$h = Dcs + 0,75 \text{ Flm}$

onde:

Dcs = distância de segurança condutor ao solo, em metros

Flm = flecha média da linha de transmissão, em metros

UNESP

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Ilha Solteira - SP

Orientador

Prof. Dr. Luis Fernando Bovolato

MESTRADO

Marco Antônio Fernandes

ESTRUTURA TIPO CSTPC

CIRCUITO SIMPLES TRIANGULAR

Espaçamento Compacto

Um cabo pára-raios central

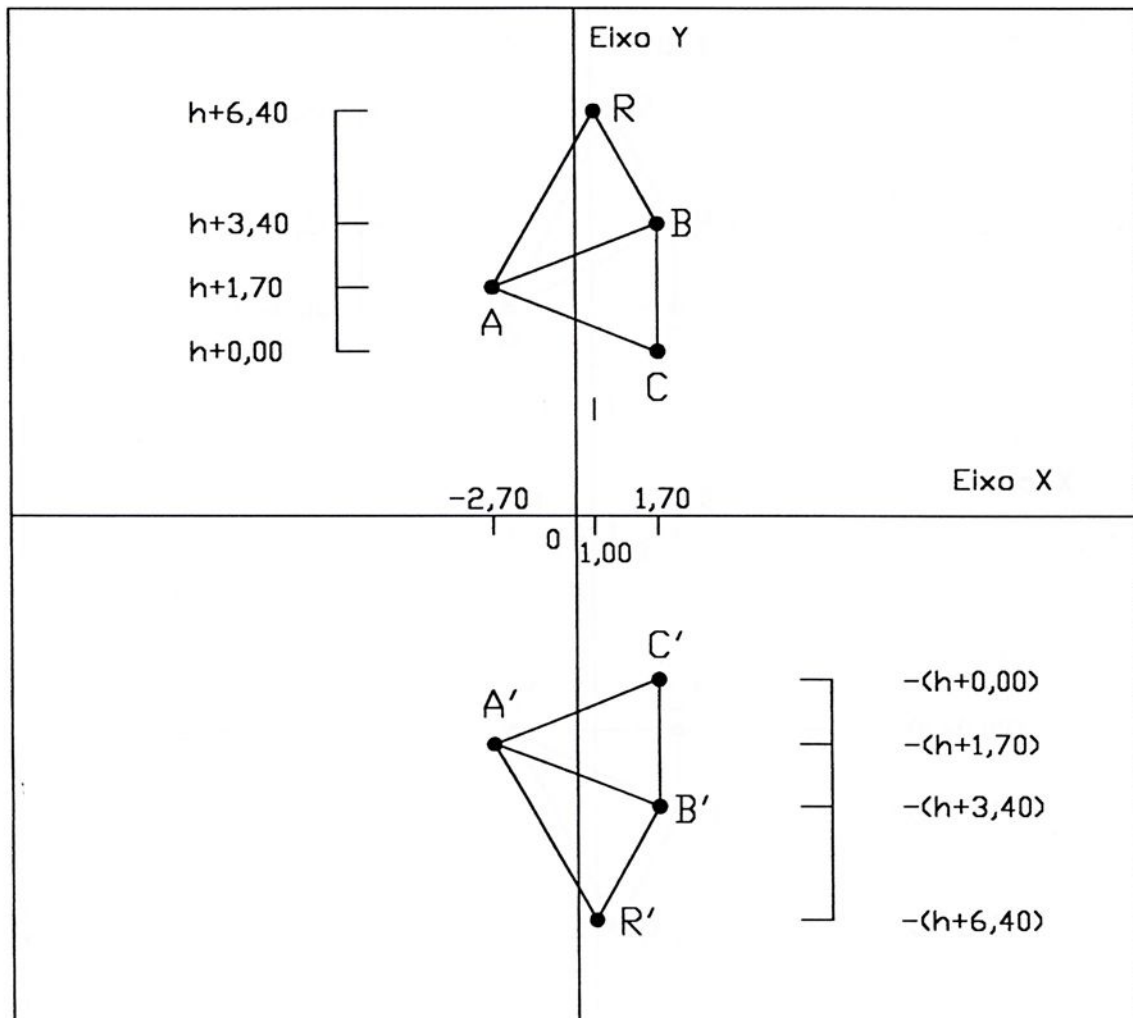
Ângulo de Blindagem = $29^{\circ}32'20''$

Figura C-06

Apêndice C

sem escala | valores em metros | Folha A-4





h = altura média do condutor inferior ao solo, em metros.

$h = Dcs + 0,75 Flm$

onde:

Dcs = distância de segurança condutor ao solo, em metros

Flm = flecha média da linha de transmissão, em metros

UNESP

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Ilha Solteira - SP

Orientador

Prof. Dr. Luiz Fernando Bovolato

MESTRADO

Marco Antônio Fernandes

ESTRUTURA TIPO CSTCD

CIRCUITO SIMPLES TRIANGULAR

Espaçamento Convencional

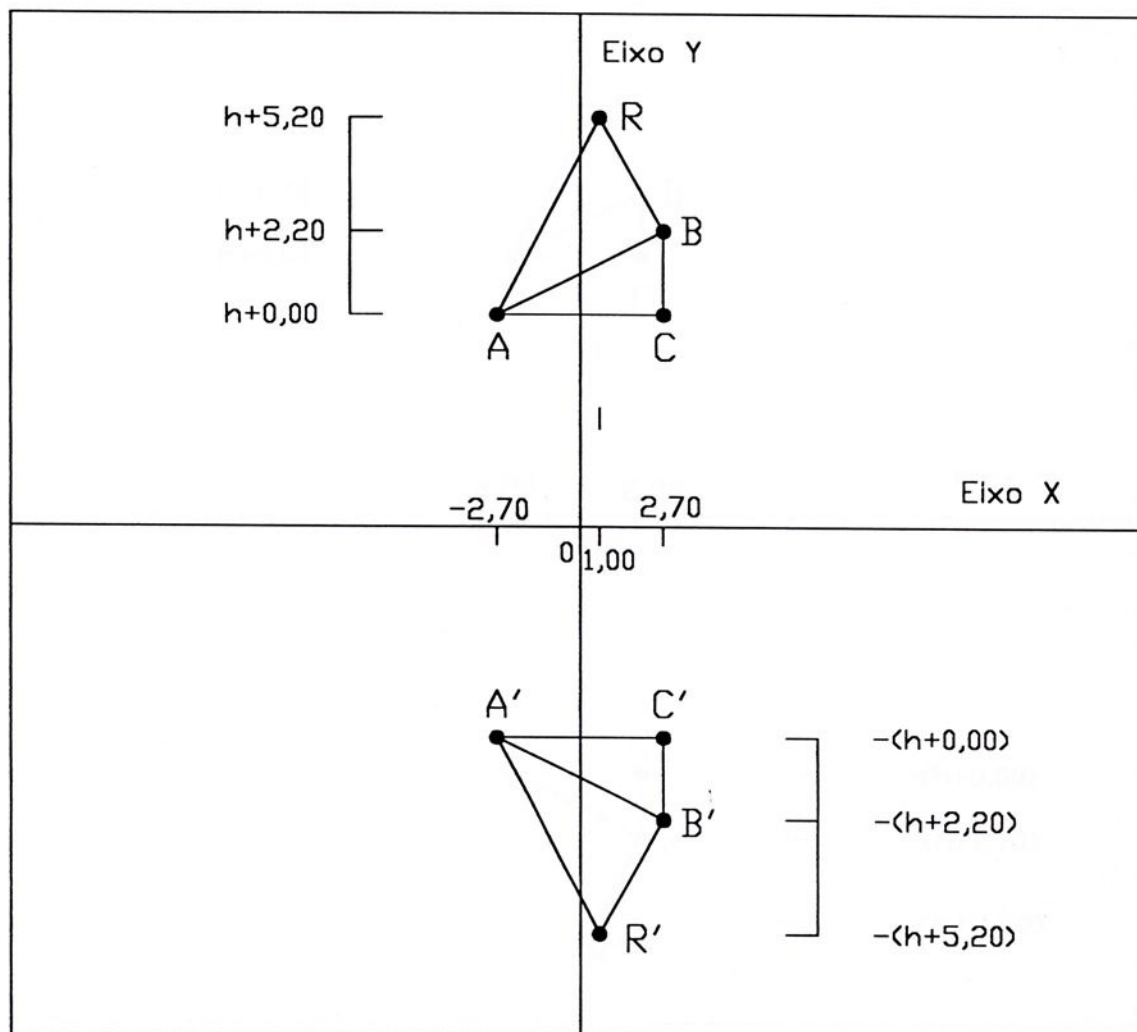
Um cabo pára-raios deslocado

Ângulo de Blindagem = $29^{\circ}32'20''$

Figura C-07

Apêndice C

sem escala | valores em metros | Folha A-4



h = altura média do condutor inferior ao solo, em metros.

$h = Dcs + 0,75 Flm$

onde:

Dcs = distância de segurança condutor ao solo, em metros

Flm = flecha média da linha de transmissão, em metros

UNESP

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Ilha Solteira - SP

Orientador

Prof. Dr. Luiz Fernando Bovolato

MESTRADO

Marco Antônio Fernandes

ESTRUTURA TIPO CSTRD

CIRCUITO SIMPLES TRIANGULAR

Espaçamento Reduzido

Um cabo pára-raios deslocado

Ângulo de Blindagem = $29^{\circ}32'20''$

Figura C-08

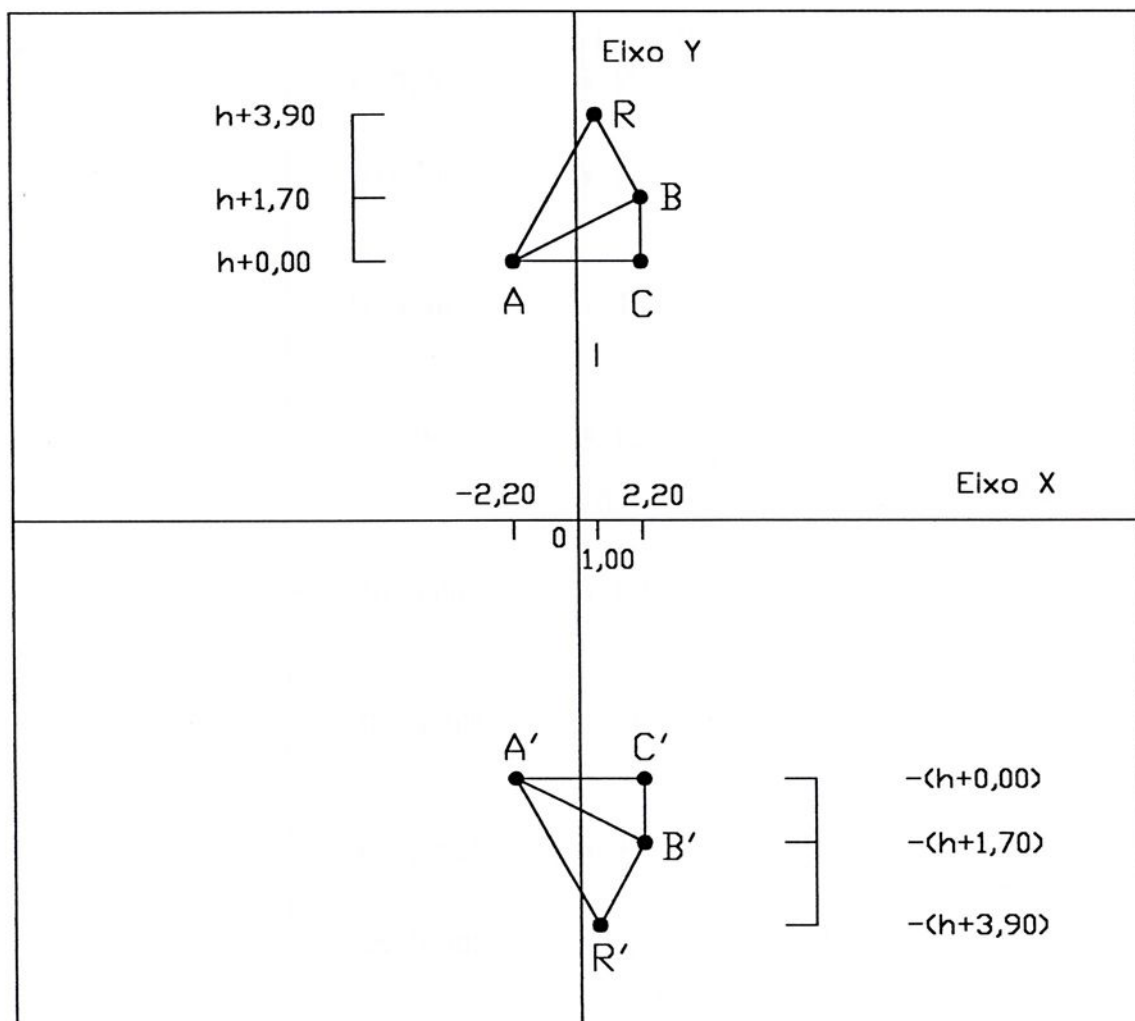
Apêndice C

sem escala

valores em metros

Folha A-4





h = altura média do condutor inferior ao solo, em metros.

$h = Dcs + 0,75 Flm$

onde:

Dcs = distância de segurança condutor ao solo, em metros

Flm = flecha média da linha de transmissão, em metros

UNESP

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Ilha Solteira - SP

Orientador

Prof. Dr. Luiz Fernando Bovolato

MESTRADO

Marco Antônio Fernandes

ESTRUTURA TIPO CSTPD

CIRCUITO SIMPLES TRIANGULAR

Espaçamento Compacto

Um cabo pãra-raios deslocado

Ângulo de Blindagem = $29^{\circ}25'39''$

Figura C-09

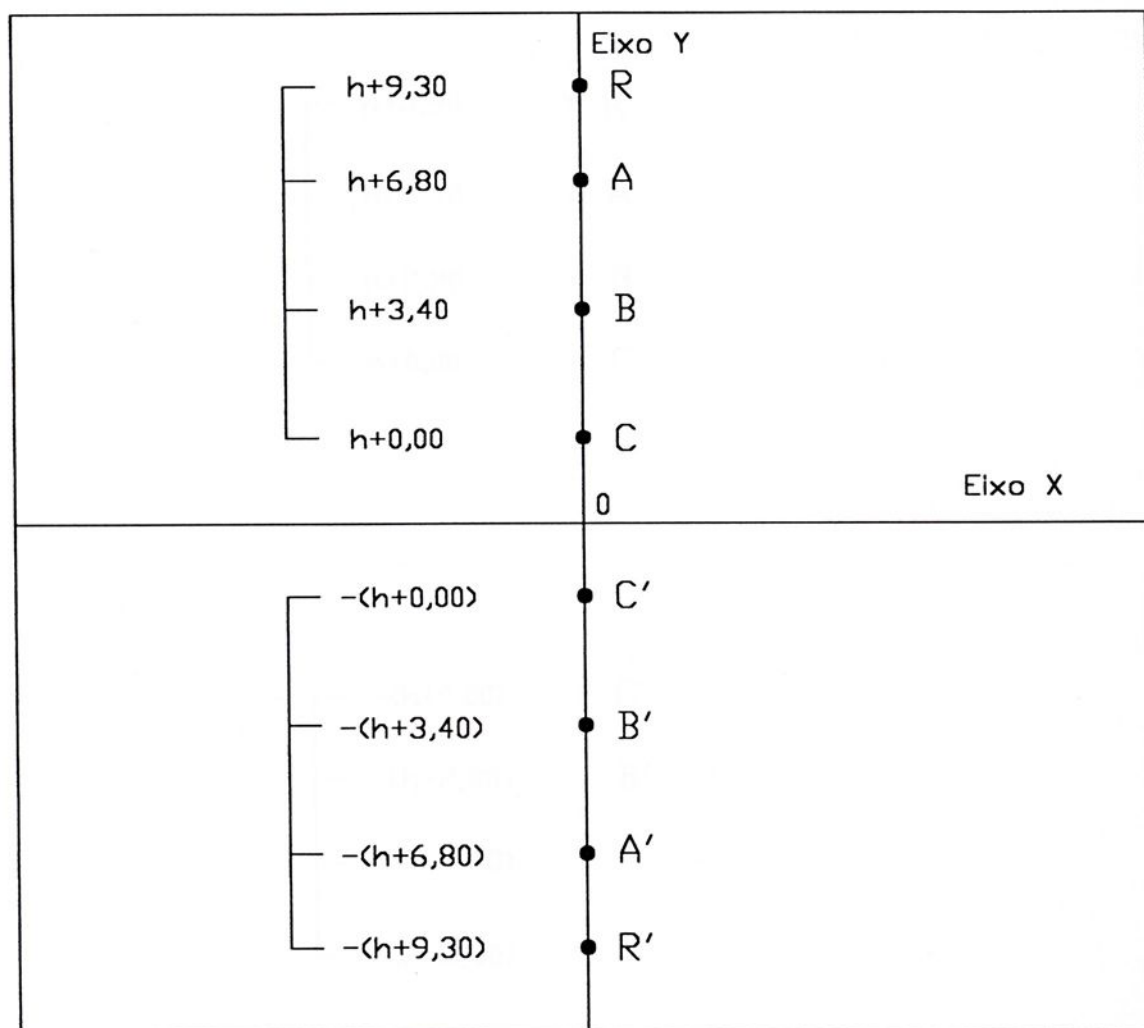
Apêndice C

sem escala

valores em metros

Folha A-4





h = altura média do condutor inferior ao solo, em metros.

$h = Dcs + 0,75 Flm$

onde:

Dcs = distância de segurança condutor ao solo, em metros

Flm = flecha média da linha de transmissão, em metros

UNESP

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Ilha Solteira - SP

Orientador

Prof. Dr. Luiz Fernando Bovolato

MESTRADO

Marco Antônio Fernandes

ESTRUTURA TIPO CSVCO0

CIRCUITO SIMPLES VERTICAL

Espaçamento Convencional

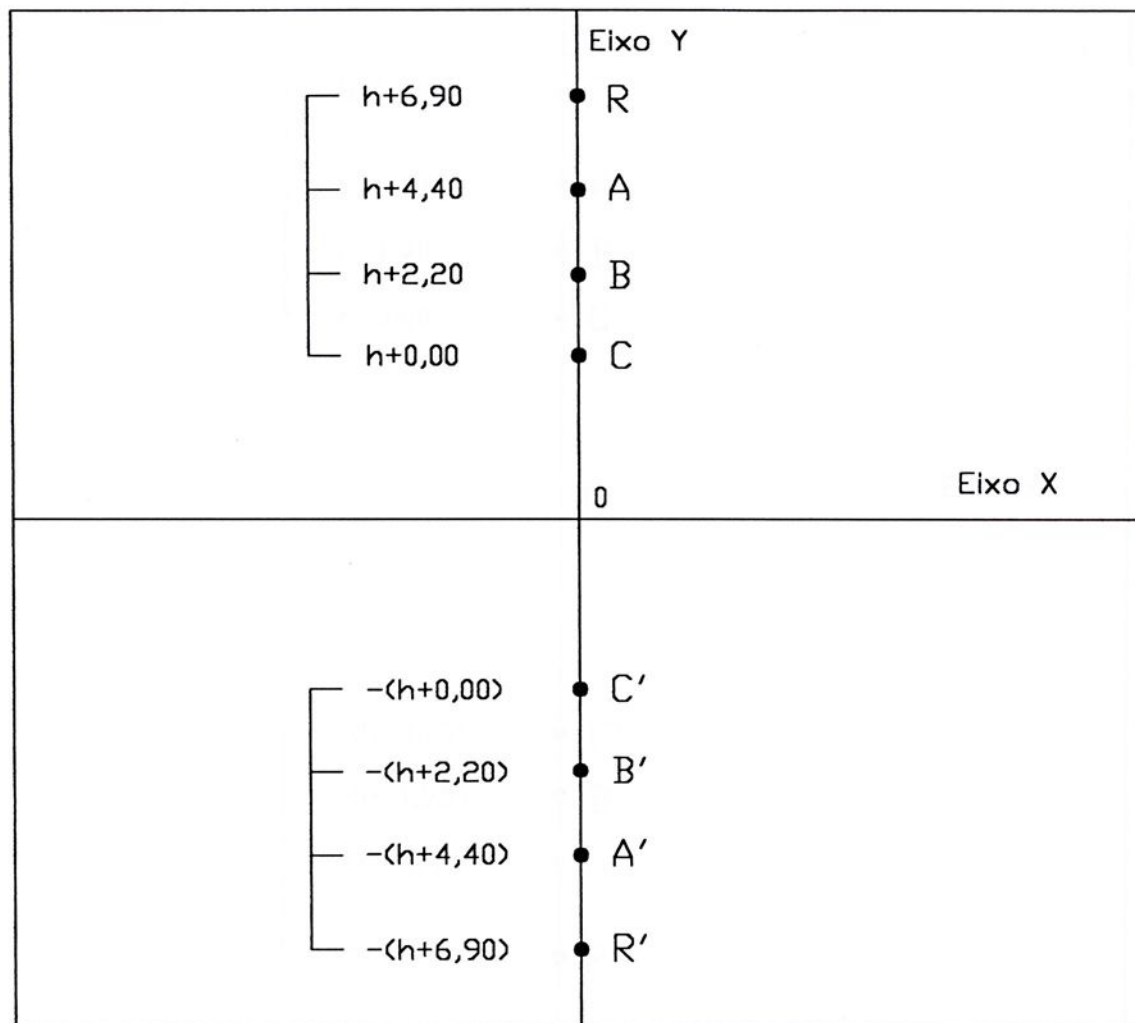
Um cabo pára-raios

Ângulo de Blindagem = 0°

Figura C-10

Apêndice C

sem escala | valores em metros | Folha A-4



h = altura média do condutor inferior ao solo, em metros.

$h = Dcs + 0,75 Flm$

onde:

Dcs = distância de segurança condutor ao solo, em metros

Flm = flecha média da linha de transmissão, em metros

UNESP

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Ilha Solteira - SP

Orientador

Prof. Dr. Luiz Fernando Bovolato

MESTRADO

Marco Antônio Fernandes

ESTRUTURA TIPO CSV00

CIRCUITO SIMPLES VERTICAL

Espaçamento Reduzido

Um cabo pára-raios

Ângulo de Blindagem = 0°

Figura C-11

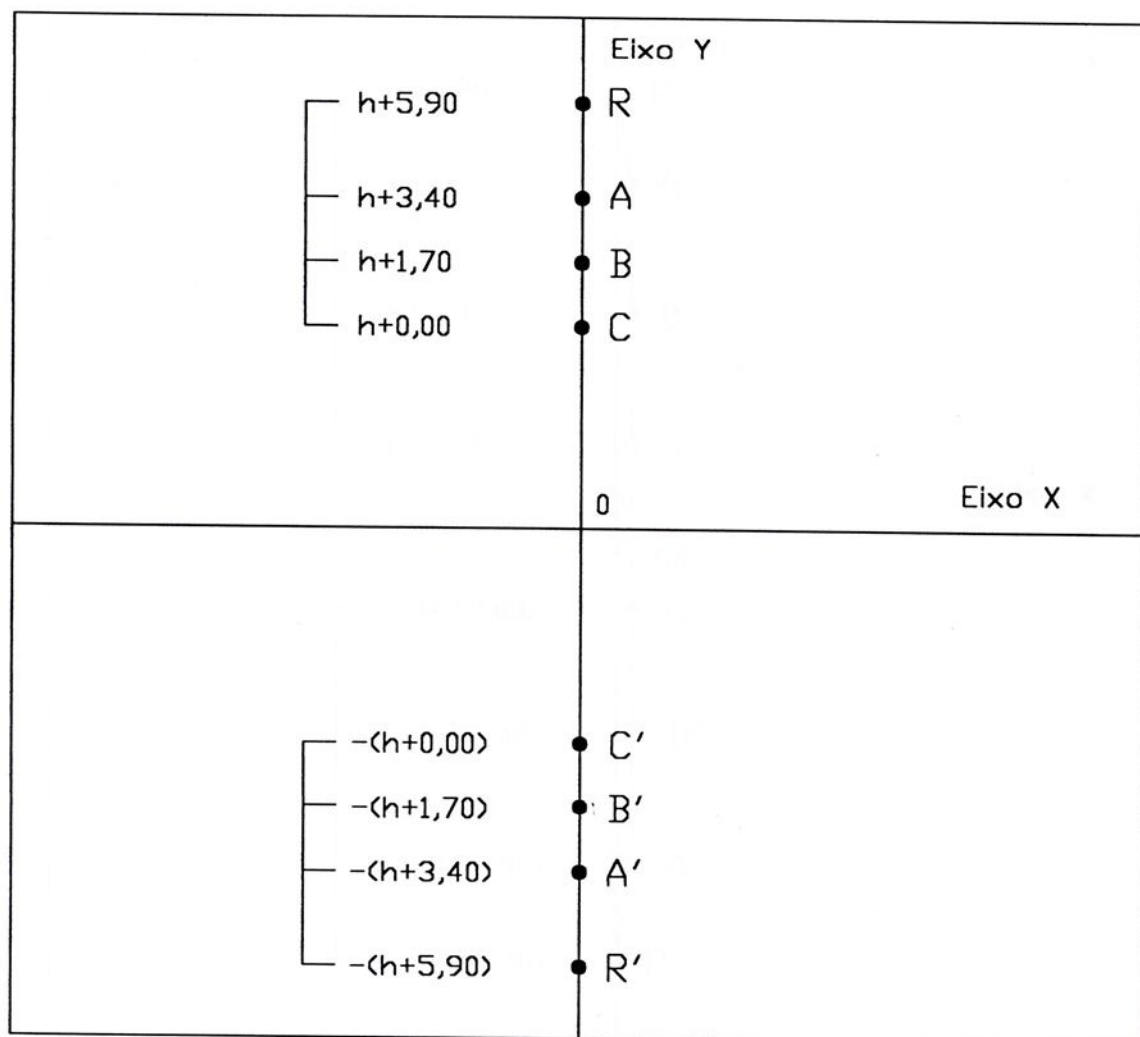
Apêndice C

sem escala

valores em metros

Folha A-4





h = altura média do condutor inferior ao solo, em metros.

$h = Dcs + 0,75 Flm$

onde:

Dcs = distância de segurança condutor ao solo, em metros

Flm = flecha média da linha de transmissão, em metros

UNESP

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Ilha Solteira - SP

ESTRUTURA TIPO CSV00

CIRCUITO SIMPLES VERTICAL

Espaçamento Compacto

Um cabo pára-raios

Ângulo de Blindagem = 0°

Figura C-12

Apêndice C

Orientador

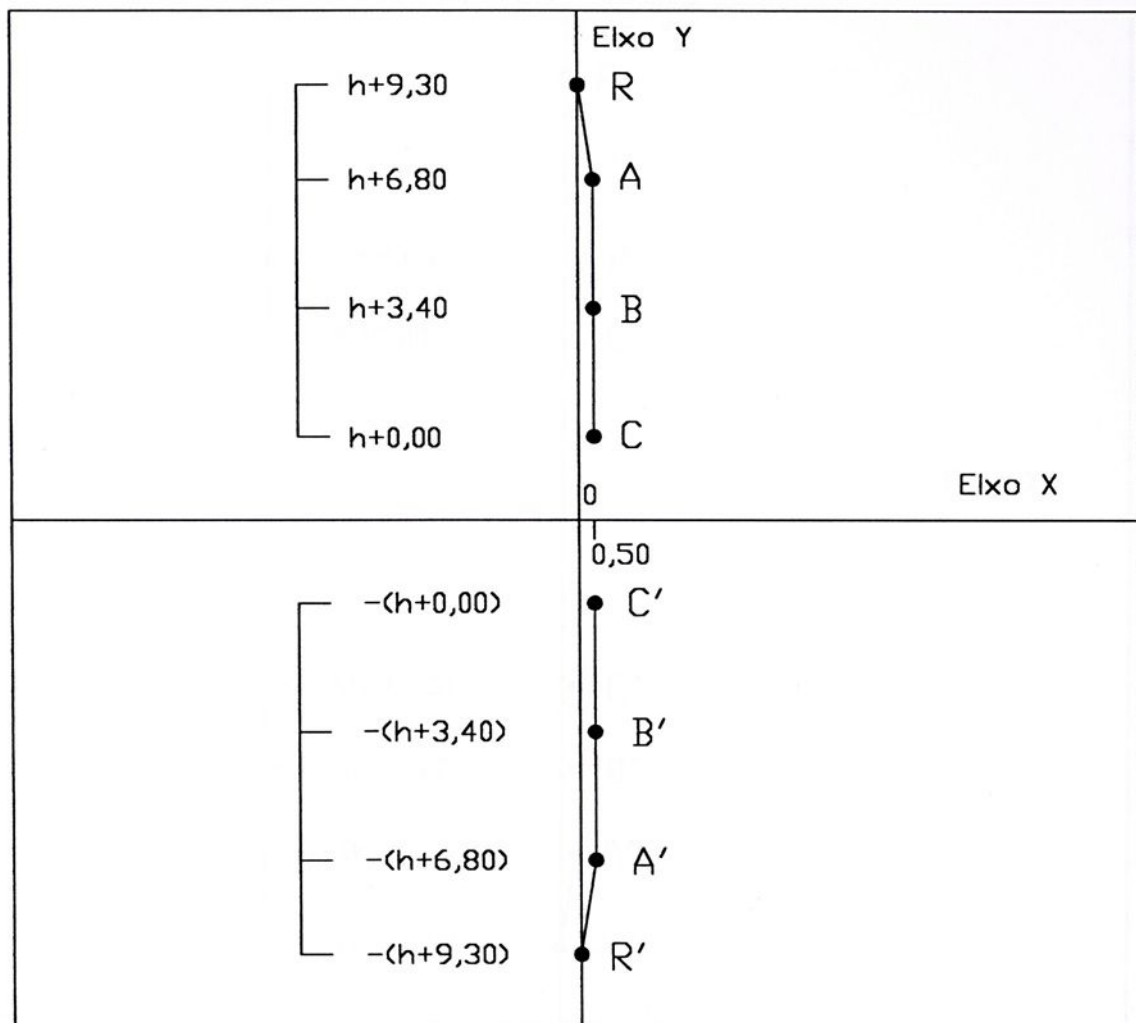
Prof. Dr. Luiz Fernando Bovolato

MESTRADO

Marco Antônio Fernandes

sem escala | valores em metros | Folha A-4





h = altura média do condutor inferior ao solo, em metros.

$h = D_{cs} + 0,75 F_{lm}$

onde:

D_{cs} = distância de segurança condutor ao solo, em metros

F_{lm} = flecha média da linha de transmissão, em metros

UNESP

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Ilha Solteira - SP

Orientador

Prof. Dr. Luiz Fernando Bovolato

MESTRADO

Marco Antônio Fernandes

ESTRUTURA TIPO CSVCO9

CIRCUITO SIMPLES VERTICAL

Espaçamento Convencional

Um cabo pára-raios

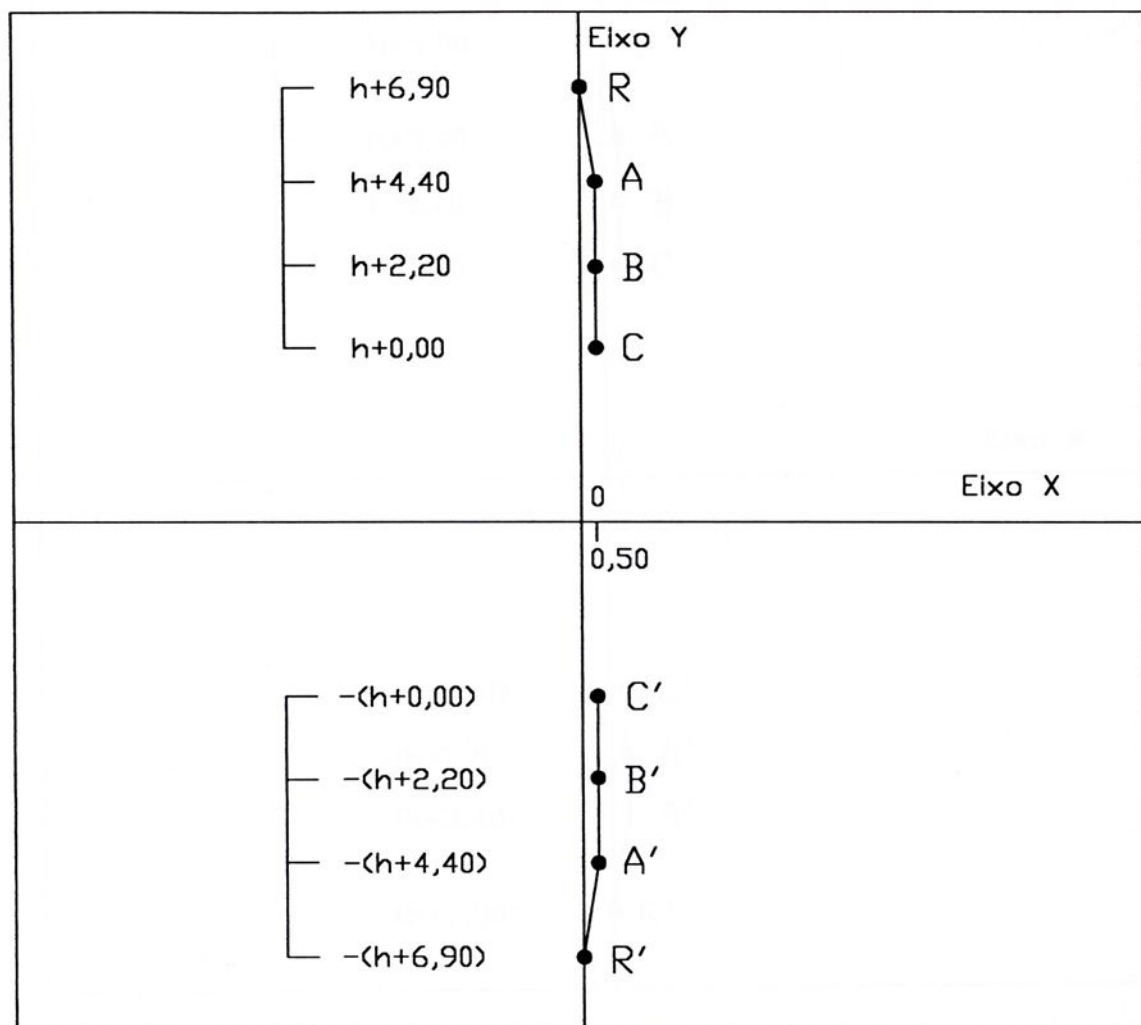
Ângulo de Blindagem = $09^{\circ}05'25''$

Figura C-13

Apêndice C

sem escala | valores em metros | Folha A-4





h = altura média do condutor inferior ao solo, em metros.

$h = D_{cs} + 0,75 F_{lm}$

onde:

D_{cs} = distância de segurança condutor ao solo, em metros

F_{lm} = flecha média da linha de transmissão, em metros

UNESP

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Ilha Solteira - SP

Orientador

Prof. Dr. Luiz Fernando Bovolato

MESTRADO

Marco Antônio Fernandes

ESTRUTURA TIPO CSVR09

CIRCUITO SIMPLES VERTICAL

Espaçamento Reduzido

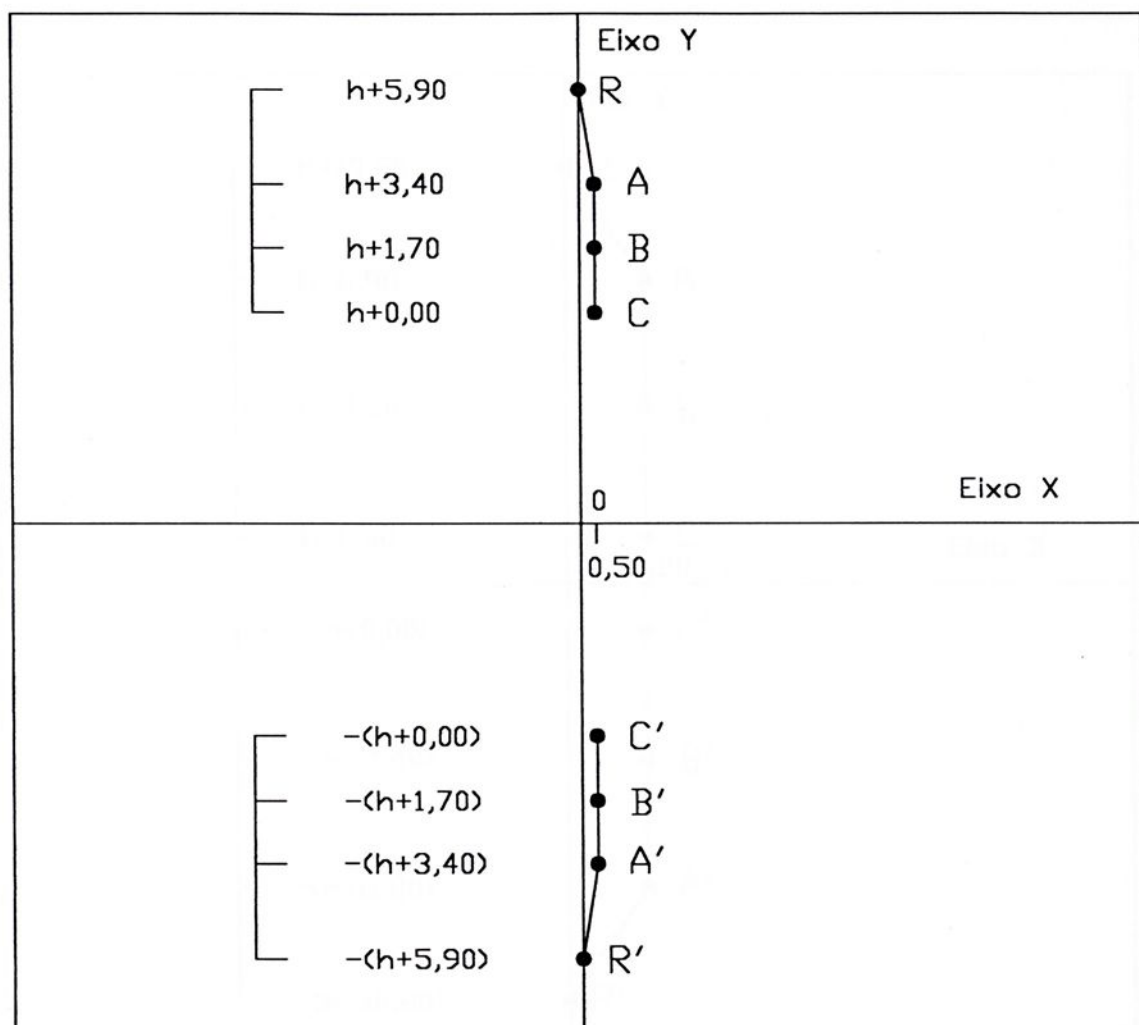
Um cabo pára-raios

Ângulo de Blindagem = $09^{\circ}05'25''$

Figura C-14

Apêndice C

sem escala | valores em metros | Folha A-4



h = altura média do condutor inferior ao solo, em metros.

$h = Dcs + 0,75 \text{ Flm}$

onde:

Dcs = distância de segurança condutor ao solo, em metros

Flm = flecha média da linha de transmissão, em metros

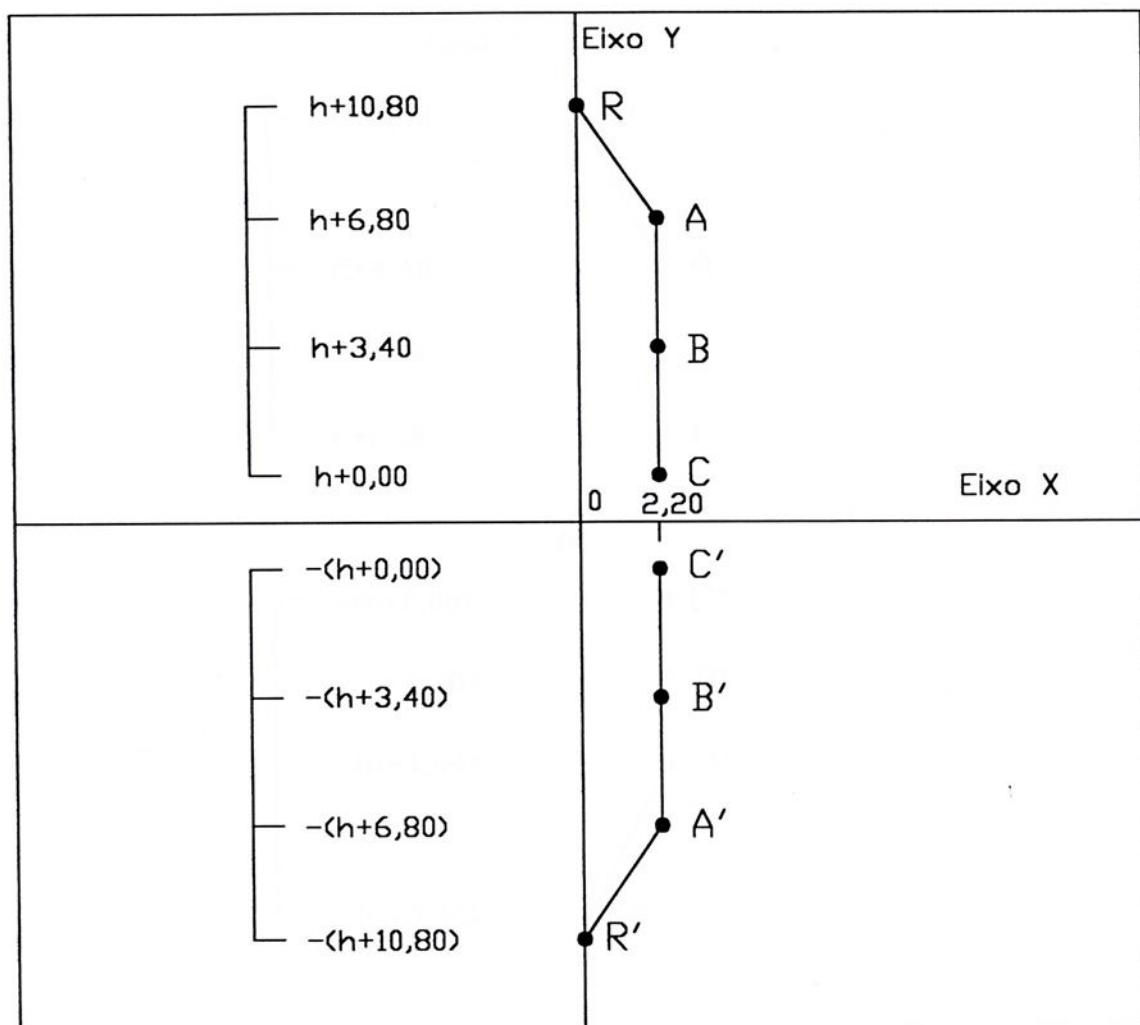
UNESP
UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Ilha Solteira - SP

Orientador	Prof. Dr. Luiz Fernando Bovolato
MESTRADO	Marco Antônio Fernandes

ESTRUTURA TIPO CSVP09
CIRCUITO SIMPLES VERTICAL
Espaçamento Compacto
Um cabo pára-raios
Ângulo de Blindagem = $09^{\circ}05'25''$
Figura C-15 | Apêndice C

sem escala	valores em metros	Folha A-4
------------	-------------------	-----------





h = altura média do condutor inferior ao solo, em metros.

$h = Dcs + 0,75 \text{ Flm}$

onde:

Dcs = distância de segurança condutor ao solo, em metros

Flm = flecha média da linha de transmissão, em metros

UNESP

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Ilha Solteira - SP

Orientador

Prof. Dr. Luiz Fernando Bovolato

MESTRADO

Marco Antônio Fernandes

ESTRUTURA TIPO CSVC29

CIRCUITO SIMPLES VERTICAL

Espaçamento Convencional

Um cabo pára-raios

Ângulo de Blindagem = $28^{\circ}48'39''$

Figura C-16

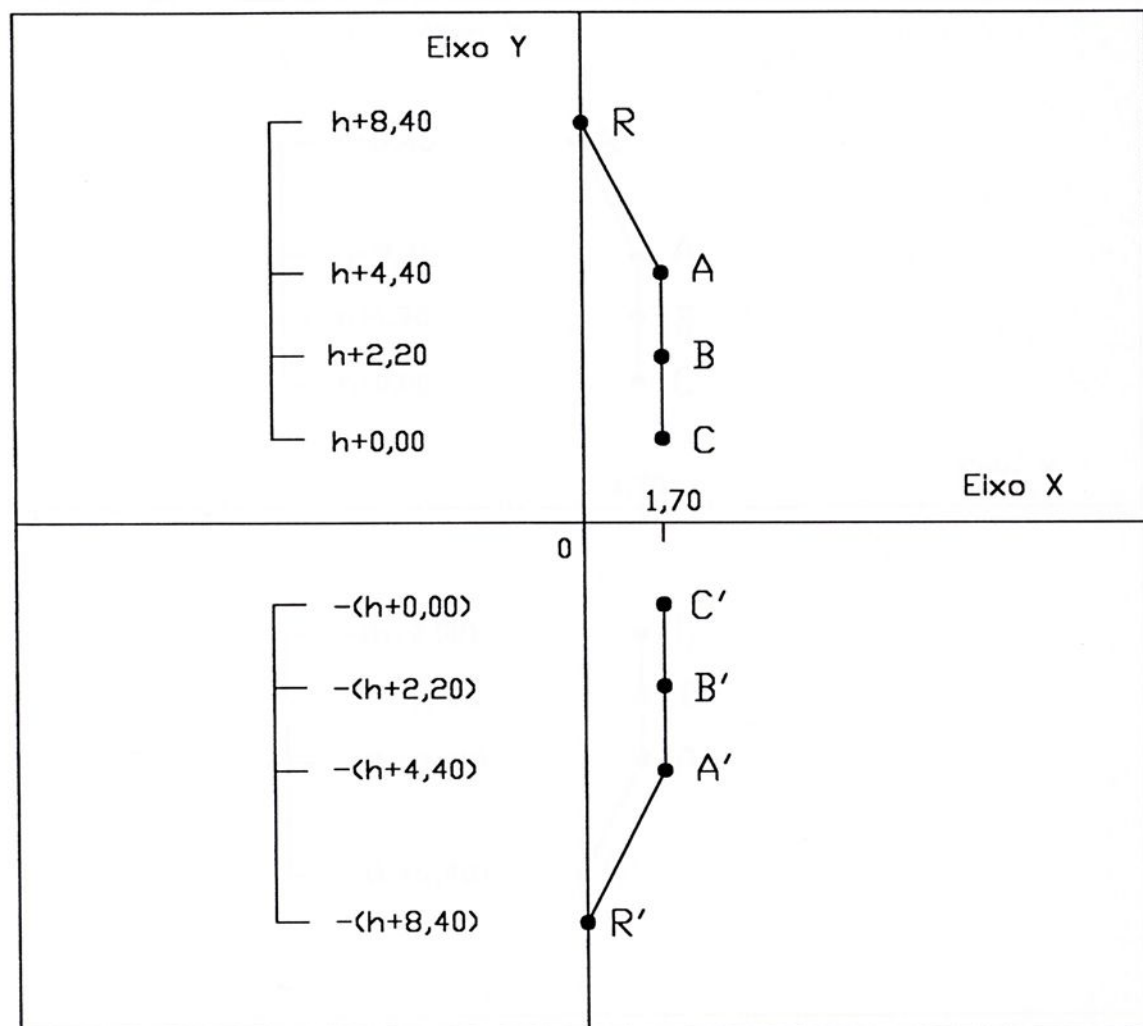
Apêndice C

sem escala

valores em metros

Folha A-4





h = altura média do condutor inferior ao solo, em metros.

$h = Dcs + 0,75 \text{ Flm}$

onde:

Dcs = distância de segurança condutor ao solo, em metros

Flm = flecha média da linha de transmissão, em metros

UNESP

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Ilha Solteira - SP

Orientador

Prof. Dr. Luis Fernando Bovolato

MESTRADO

Marco Antônio Fernandes

ESTRUTURA TIPO CSV-R29

CIRCUITO SIMPLES VERTICAL

Espaçamento Reduzido

Um cabo pára-raios

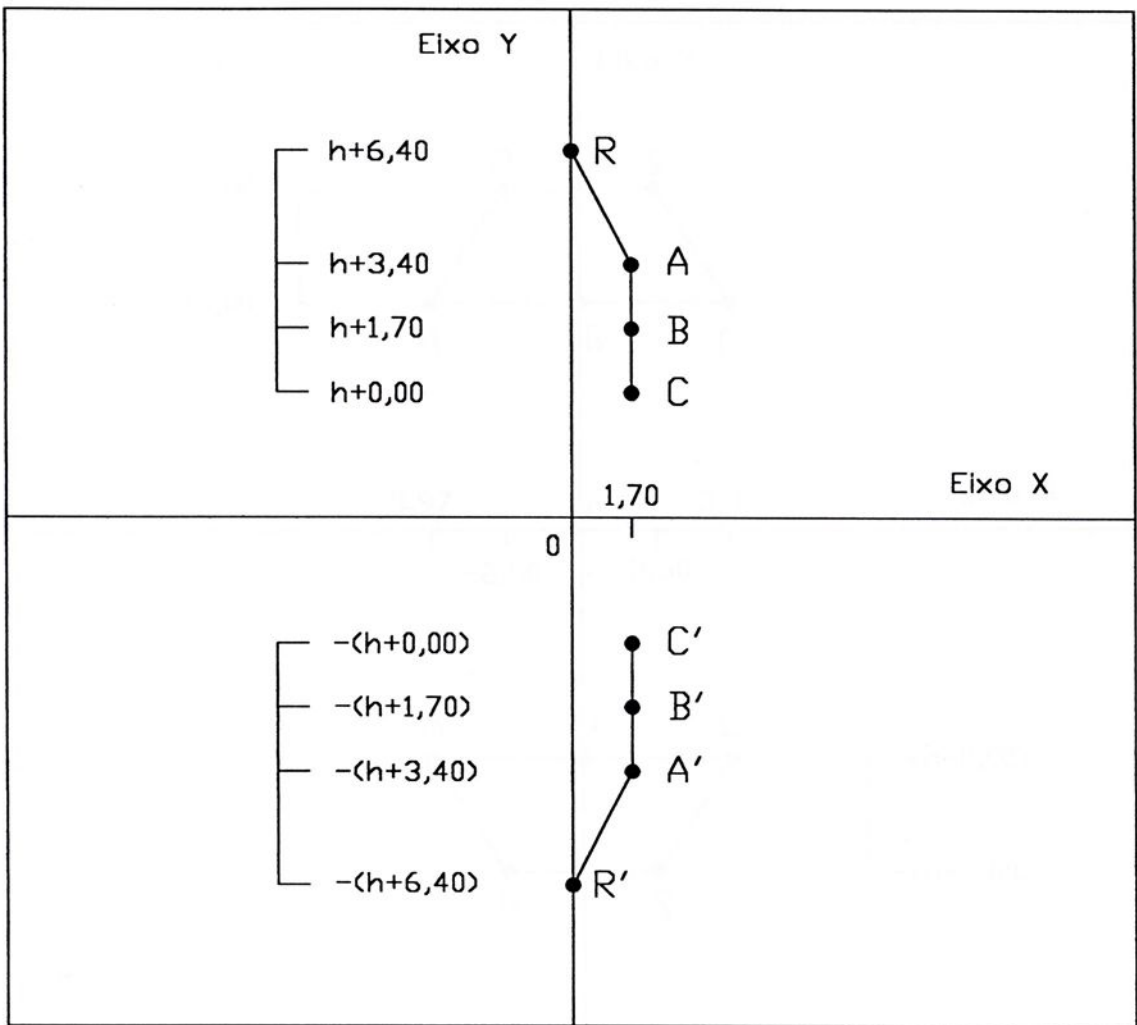
Ângulo de Blindagem = $28^{\circ}48'39''$

Figura C-17

Apêndice C

sem escala | valores em metros | Folha A-4





h = altura média do condutor inferior ao solo, em metros.

$$h = Dcs + 0,75 \text{ Flm}$$

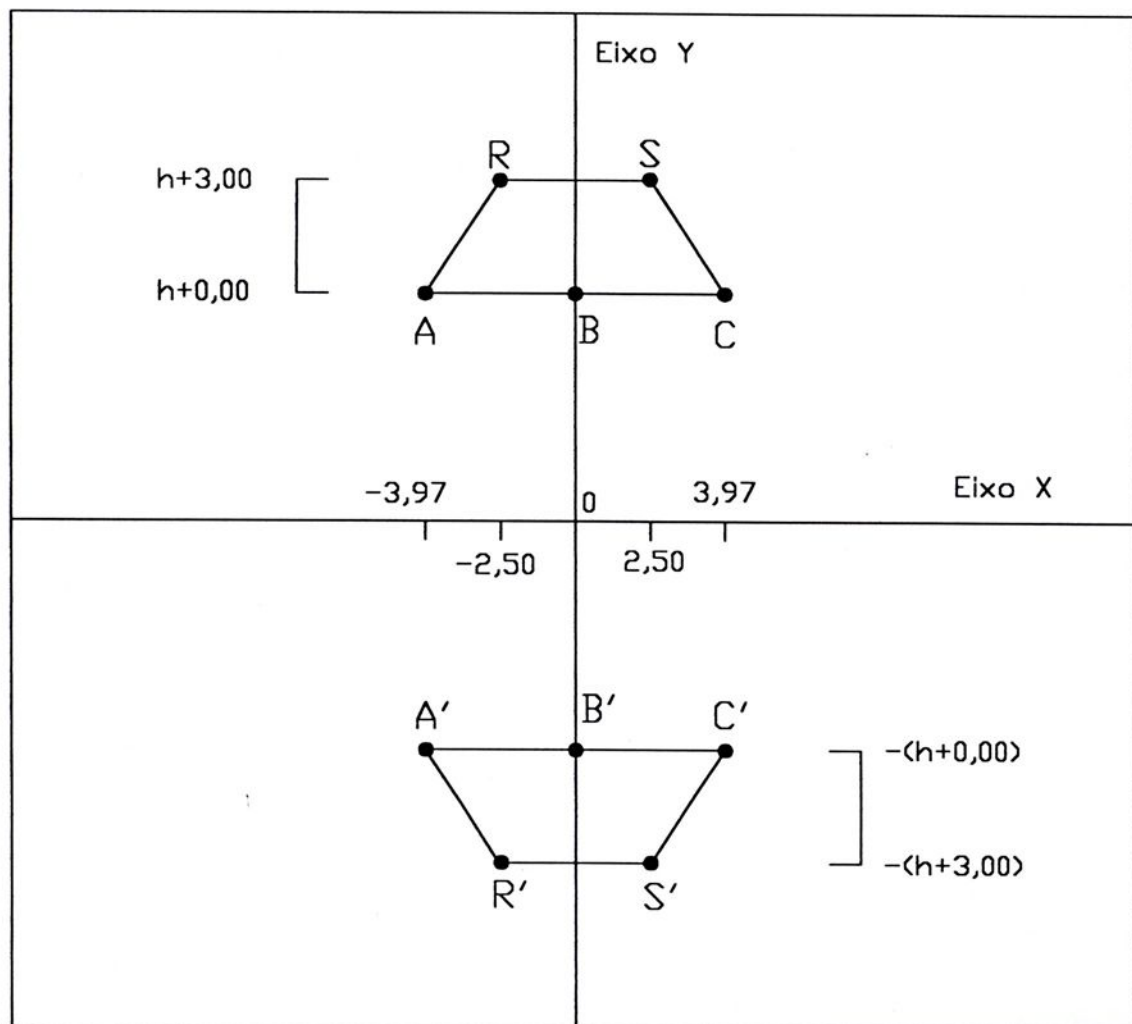
onde:

Dcs = distância de segurança condutor ao solo, em metros

Flm = flecha média da linha de transmissão, em metros

UNESP UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica Ilha Solteira - SP		ESTRUTURA TIPO CSVP29 CIRCUITO SIMPLES VERTICAL Espaçamento Compacto Um cabo pára-raios Ângulo de Blindagem = 29°32'20"		
Orientador	Prof. Dr. Luiz Fernando Bovolato	Figura C-18	Apêndice C	
MESTRADO	Marco Antônio Fernandes	sem escala	valores em metros	Folha A-4





h = altura média do condutor inferior ao solo, em metros.

$h = Dcs + 0,75 \text{ Flm}$

onde:

Dcs = distância de segurança condutor ao solo, em metros

Flm = flecha média da linha de transmissão, em metros

UNESP

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Ilha Solteira - SP

Orientador

Prof. Dr. Luiz Fernando Bovolato

MESTRADO

Marco Antônio Fernandes

ESTRUTURA TIPO CSH2P

CIRCUITO SIMPLES HORIZONTAL

Espaçamento Convencional

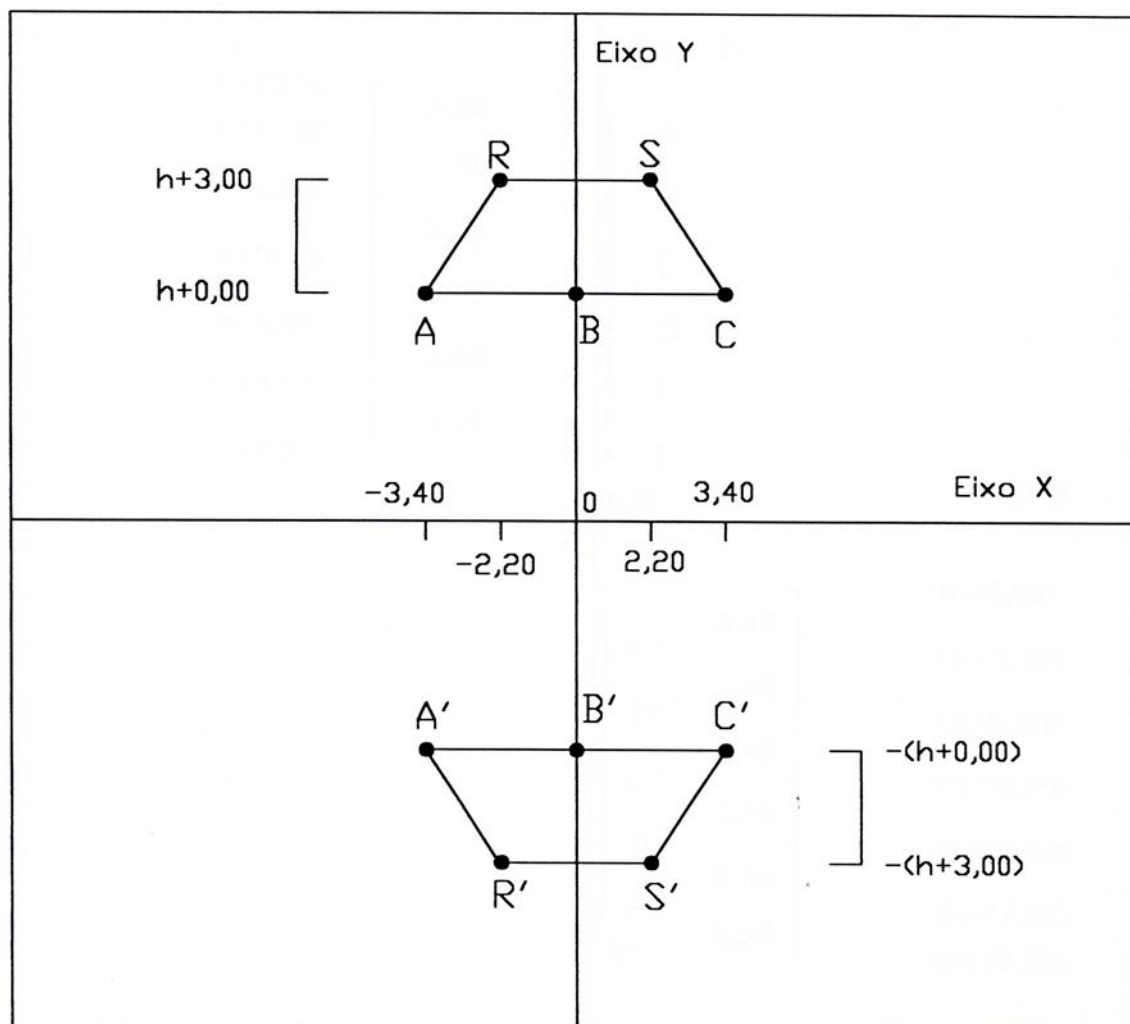
Dois cabos pára-raios

Ângulo de Blindagem = $26^{\circ}06'17''$

Figura C-19

Apêndice C

sem escala | valores em metros | Folha A-4



h = altura média do condutor inferior ao solo, em metros.

$h = Dcs + 0,75 Flm$

onde:

Dcs = distância de segurança condutor ao solo, em metros

Flm = flecha média da linha de transmissão, em metros

UNESP

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Ilha Solteira - SP

ESTRUTURA TIPO CSR2P

CIRCUITO SIMPLES HORIZONTAL

Espaçamento Reduzido

Dois cabos pára-raios

Ângulo de Blindagem = $21^{\circ}48'05''$

Figura C-20

Apêndice C

Orientador

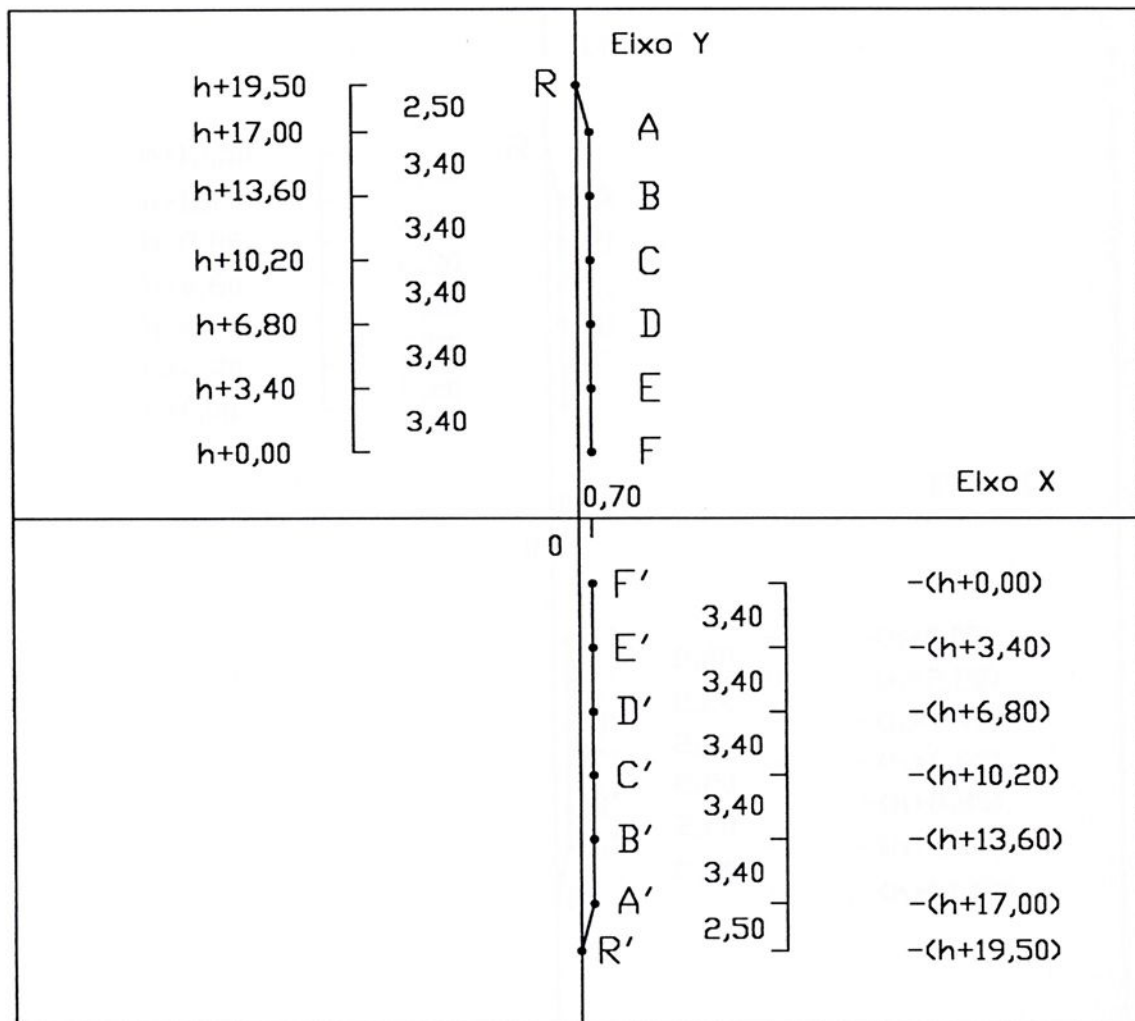
Prof. Dr. Luiz Fernando Bovolato

MESTRADO

Marco Antônio Fernandes

sem escala | valores em metros | Folha A-4





h = altura média do condutor inferior ao solo, em metros.

$h = Dcs + 0,75 Flm$

onde:

Dcs = distância de segurança condutor ao solo, em metros

Flm = flecha média da linha de transmissão, em metros

UNESP

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Ilha Solteira - SP

ESTRUTURA TIPO CDVC15

CIRCUITO DUPLO VERTICAL

Espaçamento Convencional

Um cabo pára-raios

Ângulo de Blindagem = $15^{\circ}38'32''$

Figura C-21

Apêndice C

Orientador

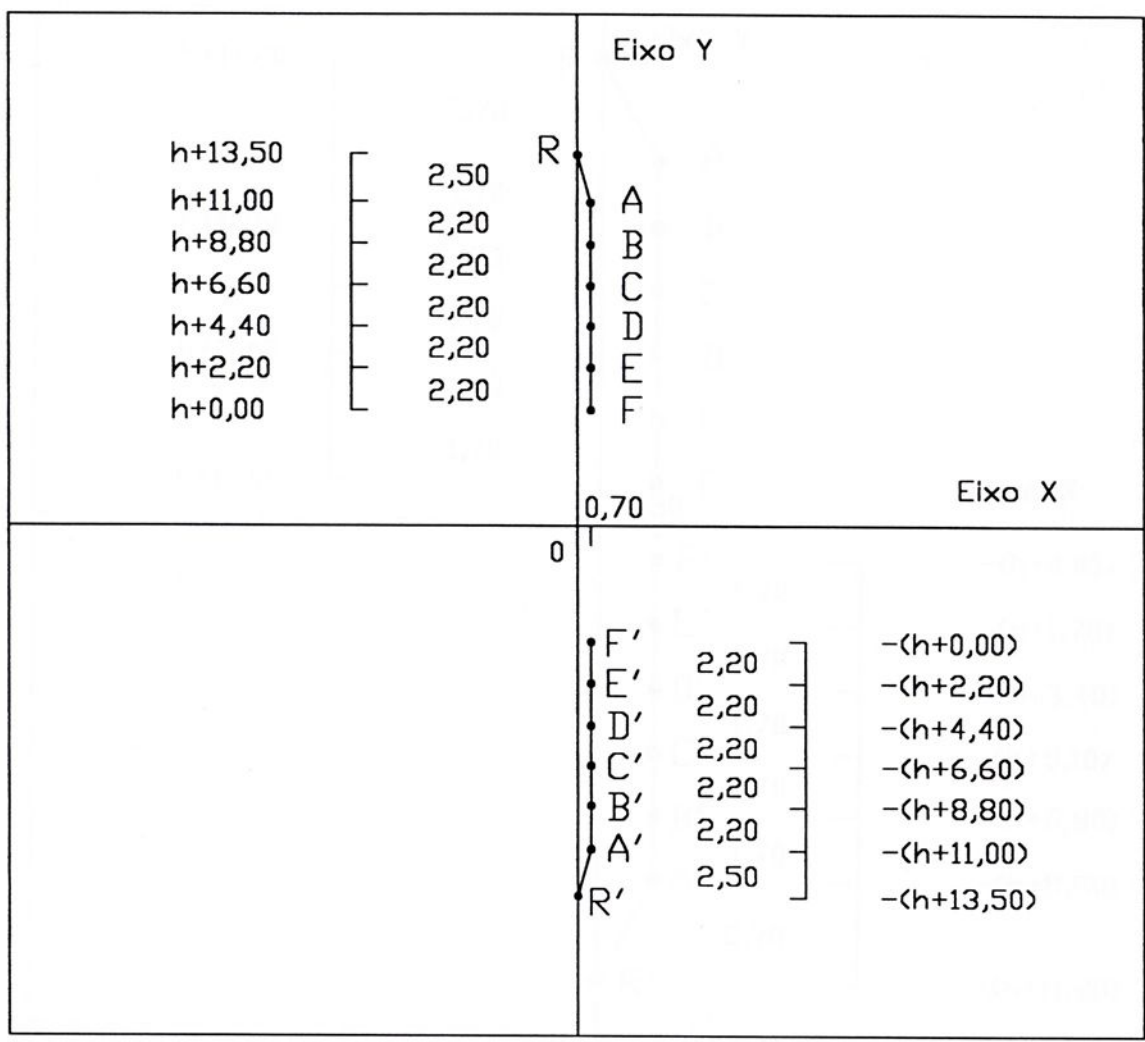
Prof. Dr. Luiz Fernando Bovolato

MESTRADO

Marco Antônio Fernandes

sem escala | valores em metros | Folha A-4





h = altura média do condutor inferior ao solo, em metros.

$h = Dcs + 0,75 \text{ Flm}$

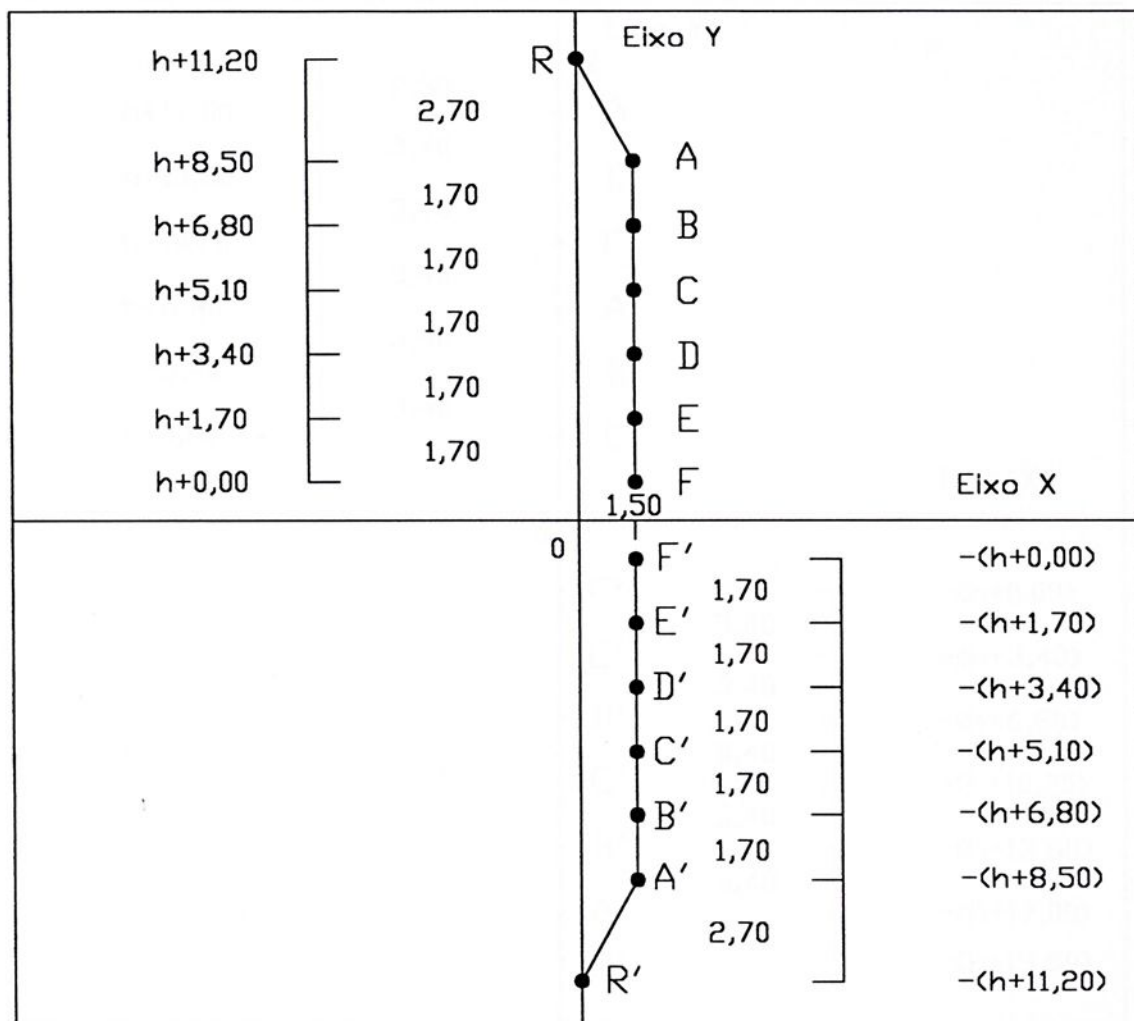
onde:

Dcs = distância de segurança condutor ao solo, em metros

Flm = flecha média da linha de transmissão, em metros

UNESP UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica Ilha Solteira - SP		ESTRUTURA TIPO CDVR15 CIRCUITO DUPLO VERTICAL Espaçamento Reduzido Um cabo pára-raios Ângulo de Blindagem = 15°38'32" Figura C-22 Apêndice C		
Orientador	Prof. Dr. Luiz Fernando Bovolato	sem escala	valores em metros	Folha A-4
MESTRADO	Marco Antônio Fernandes			





h = altura média do condutor inferior ao solo, em metros.

$h = Dcs + 0,75 \text{ Flm}$

onde:

Dcs = distância de segurança condutor ao solo, em metros

Flm = flecha média da linha de transmissão, em metros

UNESP

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Ilha Solteira - SP

ESTRUTURA TIPO CDVP29

CIRCUITO DUPLO VERTICAL

Espaçamento Compacto

Um cabo pára-raios

Ângulo de Blindagem = $29^{\circ}03'17''$

Figura C-23

Apêndice C

Orientador

Prof. Dr. Luiz Fernando Bovolato

MESTRADO

Marco Antônio Fernandes

sem escala

valores em metros

Folha A-4



		Eixo Y				Eixo X	
h+19,50	[	2,50	•	R			
h+17,00			•	A			
		3,40					
h+13,60	[	3,40	•	B			
			3,40				
h+10,20	[	3,40	•	C			
			3,40				
h+6,80	[	3,40	•	A			
			3,40				
h+3,40	[	3,40	•	B			
			3,40				
h+0,00			•	C			
0							
			•	F'			-(h+0,00)
			•	E'	3,40	[	-(h+3,40)
			•	D'	3,40		-(h+6,80)
			•	C'	3,40	-(h+10,20)	
			•	B'	3,40	-(h+13,60)	
			•	A'	3,40	-(h+17,00)	
			•	R'	2,50	-(h+19,50)	

h = altura média do condutor inferior ao solo, em metros.

$h = D_{cs} + 0,75 \text{ Flm}$

onde:

D_{cs} = distância de segurança condutor ao solo, em metros

Flm = flecha média da linha de transmissão, em metros

UNESP

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Ilha Solteira - SP

ESTRUTURA TIPO CDVC00

CIRCUITO DUPLO VERTICAL

Espaçamento Convencional

Um cabo pára-raios

Ângulo de Blindagem = 0°

Figura C-24

Apêndice C

Orientador

Prof. Dr. Luiz Fernando Bovolato

MESTRADO

Marco Antônio Fernandes

sem escala

valores em metros

Folha A-4



			Elxo Y			
h+13,50	[		•	R		
h+11,00		2,50	•	A		
h+8,80		2,20	•	B		
h+6,60		2,20	•	C		
h+4,40		2,20	•	D		
h+2,20		2,20	•	E		
h+0,00		2,20	•	F		
					Elxo X	
			F', ⁰			
			•	2,20	[	-(h+0,00)
			E'	2,20		-(h+2,20)
			D'	2,20		-(h+4,40)
			C'	2,20		-(h+6,60)
			B'	2,20		-(h+8,80)
			A'	2,20		-(h+11,00)
			R'	2,50		-(h+13,50)

h = altura média do condutor inferior ao solo, em metros.

$h = D_{cs} + 0,75 F_{lm}$

onde:

D_{cs} = distância de segurança condutor ao solo, em metros

F_{lm} = flecha média da linha de transmissão, em metros

UNESP

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Ilha Solteira - SP

Orientador

Prof. Dr. Luiz Fernando Bovolato

MESTRADO

Marco Antônio Fernandes

ESTRUTURA TIPO CDVR00

CIRCUITO DUPLO VERTICAL

Espaçamento Reduzido

Um cabo pára-raios

Ângulo de Blindagem = 0°

Figura C-25

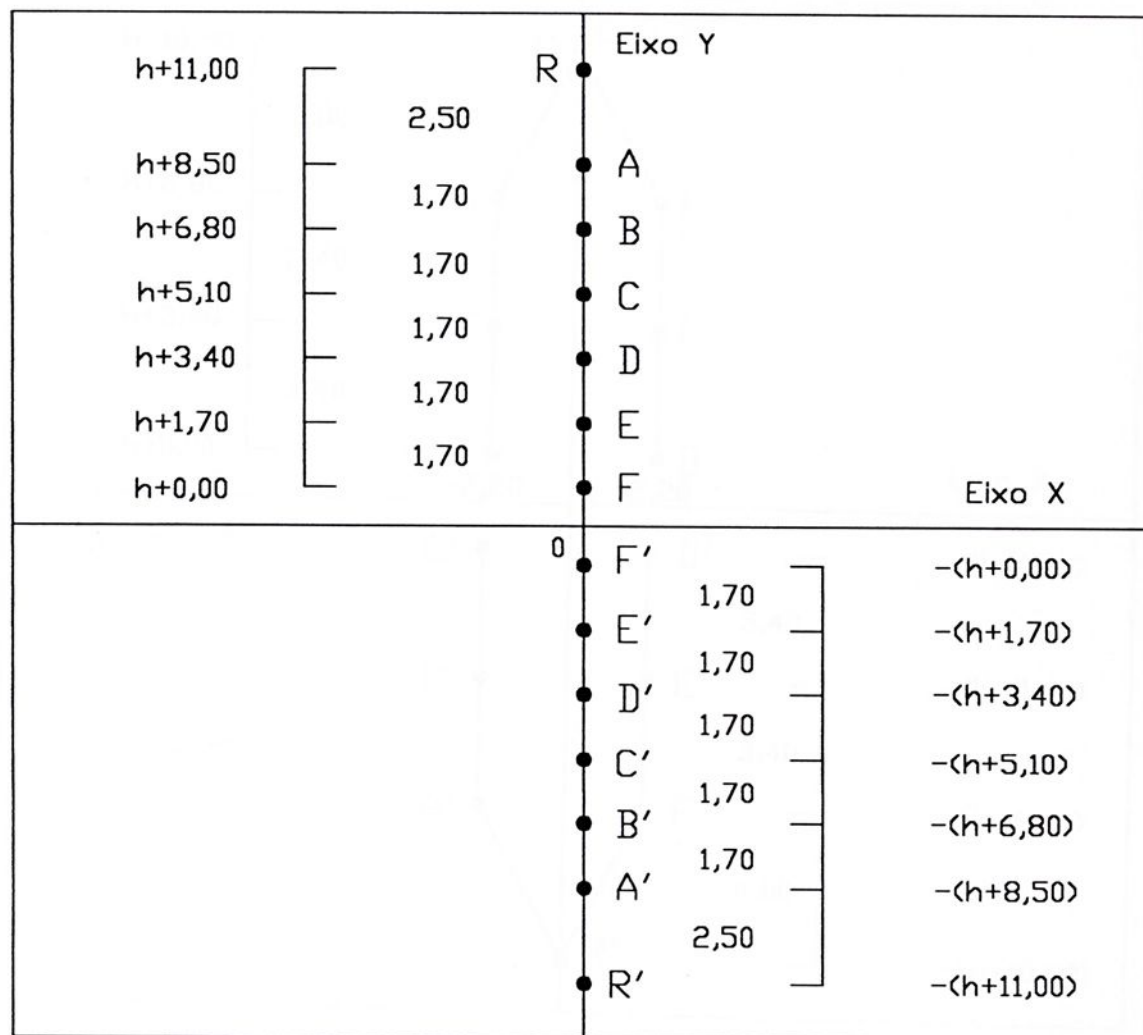
Apêndice C

sem escala

valores em metros

Folha A-4





h = altura média do condutor inferior ao solo, em metros.

$h = Dcs + 0,75 \text{ Flm}$

onde:

Dcs = distância de segurança condutor ao solo, em metros

Flm = flecha média da linha de transmissão, em metros

UNESP

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Ilha Solteira - SP

Orientador

Prof. Dr. Luiz Fernando Bovolato

MESTRADO

Marco Antônio Fernandes

ESTRUTURA TIPO CDVP00

CIRCUITO DUPLO VERTICAL

Espaçamento Compacto

Um cabo pára-raios

Ângulo de Blindagem = 0°

Figura C-26

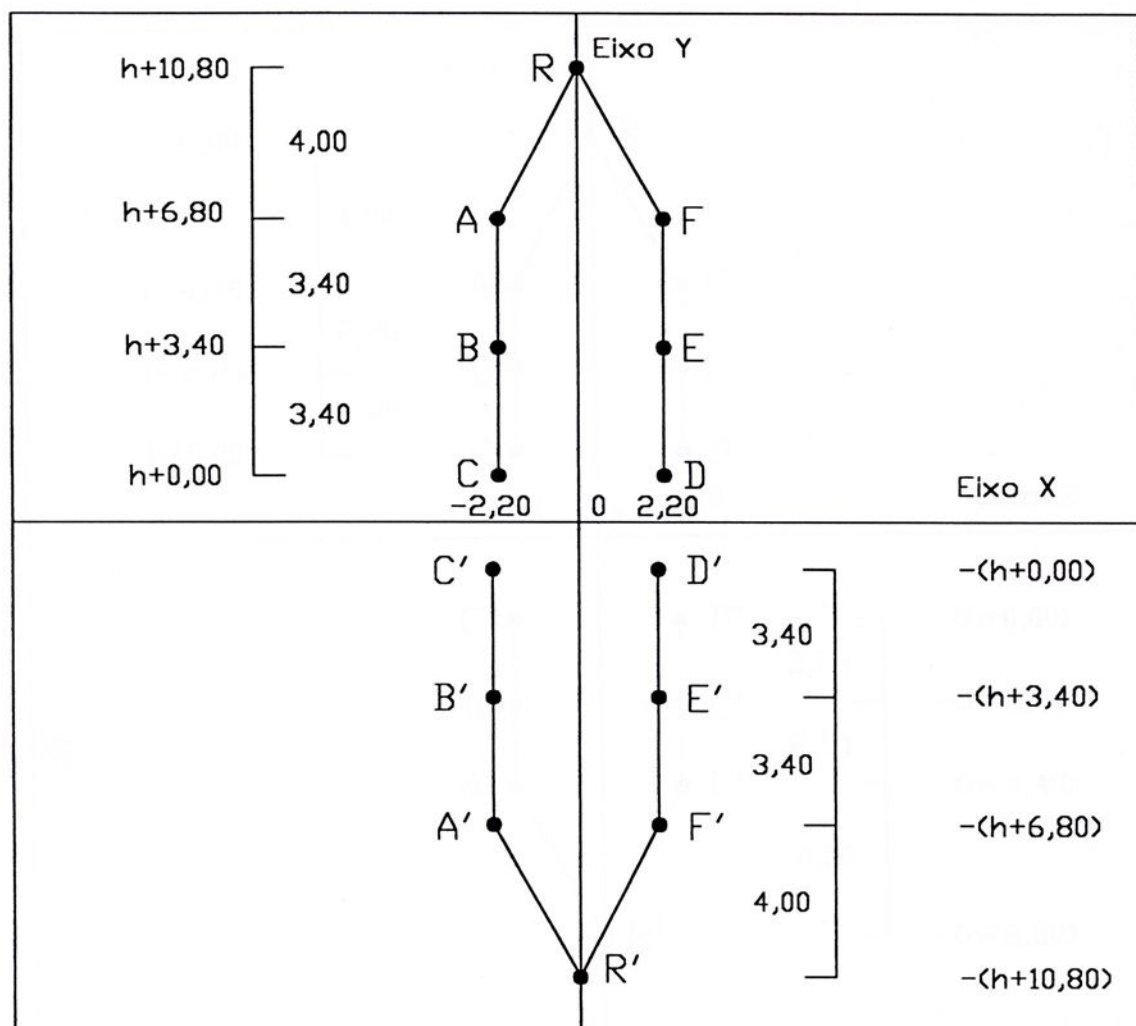
Apêndice C

sem escala

valores em metros

Folha A-4





h = altura média do condutor inferior ao solo, em metros.

$h = Dcs + 0,75 Flm$

onde:

Dcs = distância de segurança condutor ao solo, em metros

Flm = flecha média da linha de transmissão, em metros

UNESP

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Ilha Solteira - SP

Orientador

Prof. Dr. Luiz Fernando Bovolato

MESTRADO

Marco Antônio Fernandes

ESTRUTURA TIPO CDPC1P

CIRCUITO DUPLO PARALELO

Espaçamento Convencional

Um cabo pára-raios

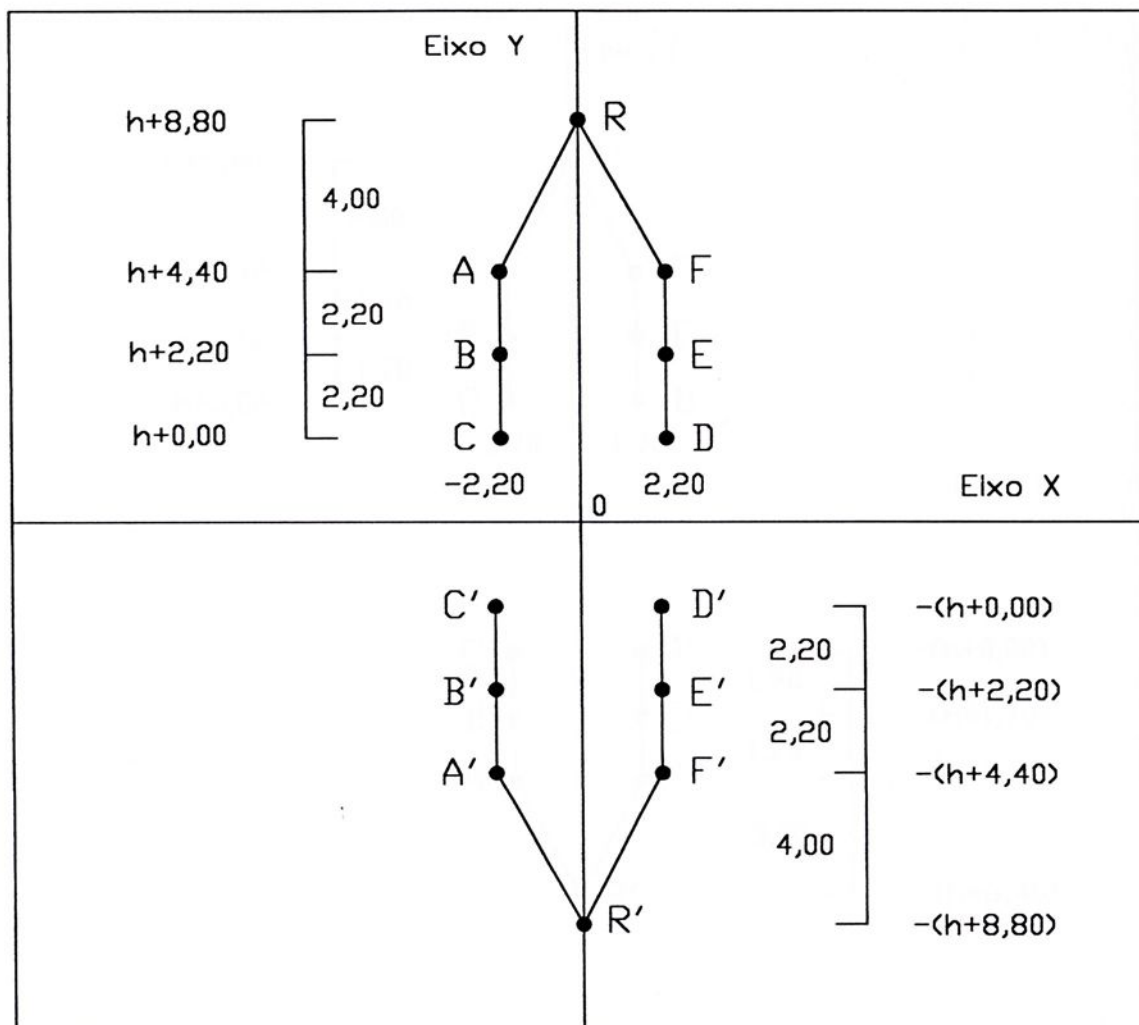
Ângulo de Blindagem = $28^{\circ}48'39''$

Figura C-27

Apêndice C

sem escala | valores em metros | Folha A-4





h = altura média do condutor inferior ao solo, em metros.

$h = Dcs + 0,75 \text{ Flm}$

onde:

Dcs = distância de segurança condutor ao solo, em metros

Flm = flecha média da linha de transmissão, em metros

UNESP

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Ilha Solteira - SP

ESTRUTURA TIPO CDPR1P

CIRCUITO DUPLO PARALELO

Espaçamento Reduzido

Um cabo pára-raios

Ângulo de Blindagem = $28^{\circ}48'39''$

Figura C-28

Apêndice C

Orientador

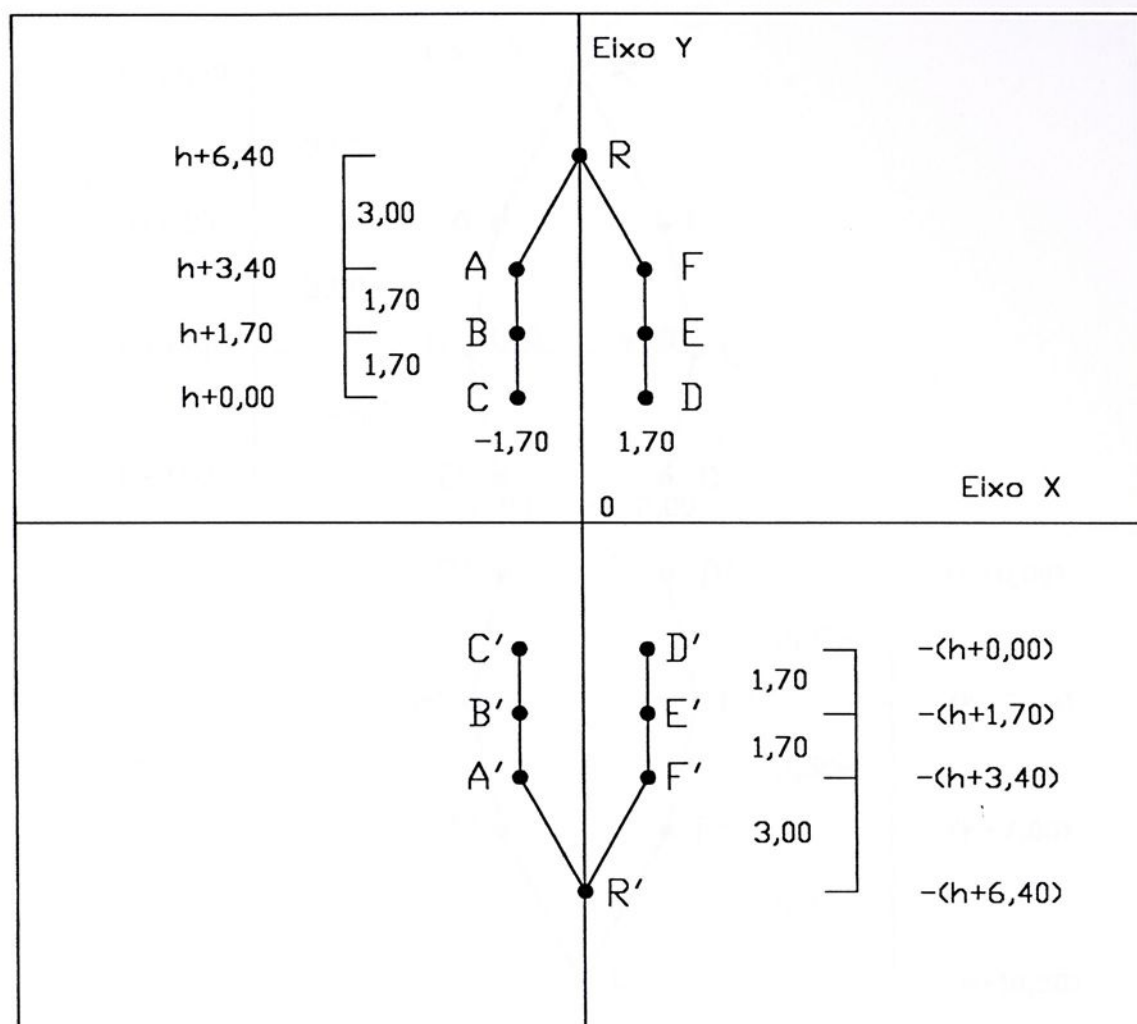
Prof. Dr. Luiz Fernando Bovolato

MESTRADO

Marco Antônio Fernandes

sem escala | valores em metros | Folha A-4





h = altura média do condutor inferior ao solo, em metros.

$h = Dcs + 0,75 Flm$

onde:

Dcs = distância de segurança condutor ao solo, em metros

Flm = flecha média da linha de transmissão, em metros

UNESP

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Ilha Solteira - SP

ESTRUTURA TIPO CDPP1P

CIRCUITO DUPLO PARALELO

Espaçamento Compacto

Um cabo pára-raios

Ângulo de Blindagem = $29^{\circ}32'20''$

Figura C-29

Apêndice C

Orientador

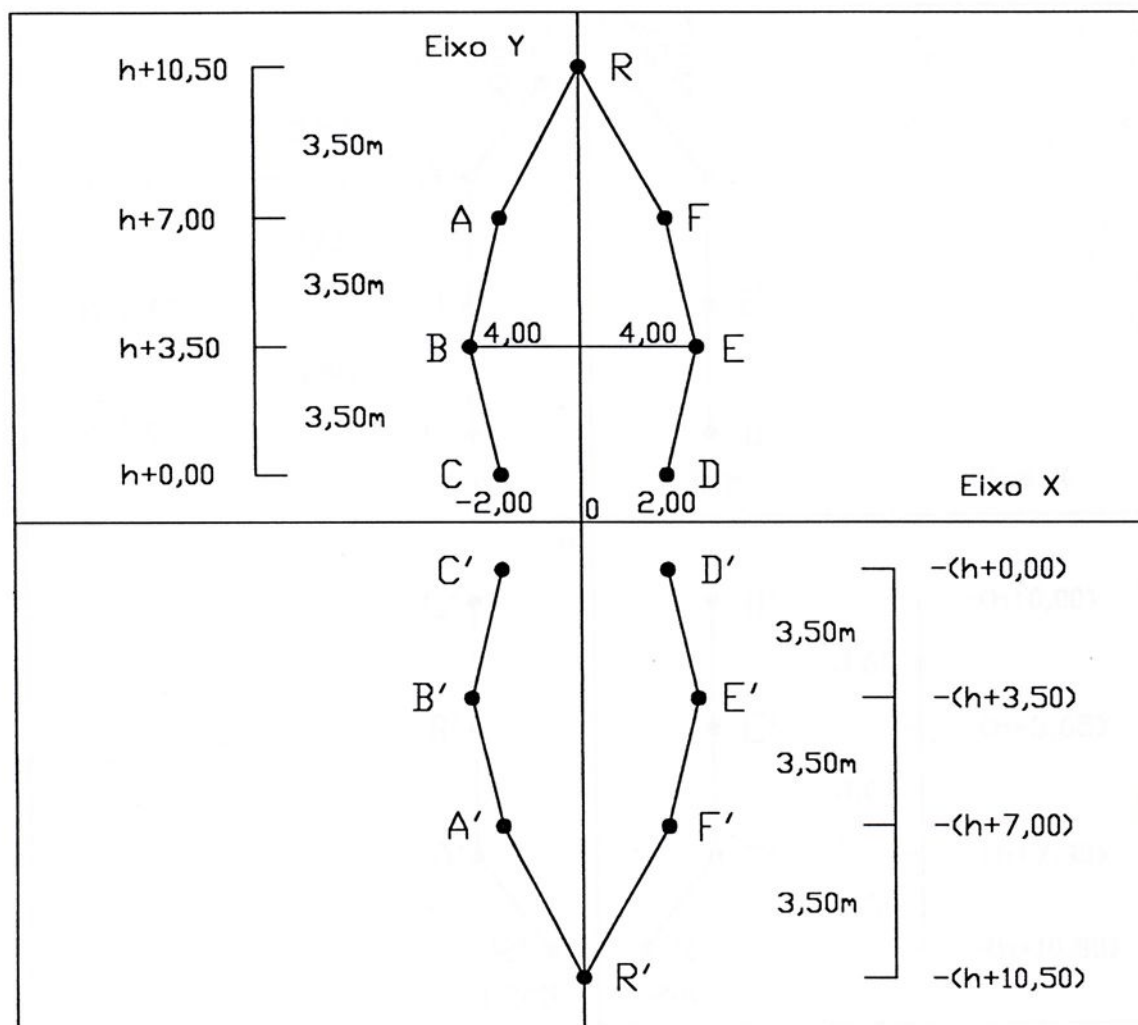
Prof. Dr. Luiz Fernando Bovolato

MESTRADO

Marco Antônio Fernandes

sem escala | valores em metros | Folha A-4





h = altura média do condutor inferior ao solo, em metros.

$h = Dcs + 0,75 Flm$

onde:

Dcs = distância de segurança condutor ao solo, em metros

Flm = flecha média da linha de transmissão, em metros

UNESP

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Ilha Solteira - SP

Orientador

Prof. Dr. Luiz Fernando Hovolato

MESTRADO

Marco Antônio Fernandes

ESTRUTURA TIPO CDHC1P

CIRCUITO DUPLO HEXAGONAL

Um cabo pára-raios

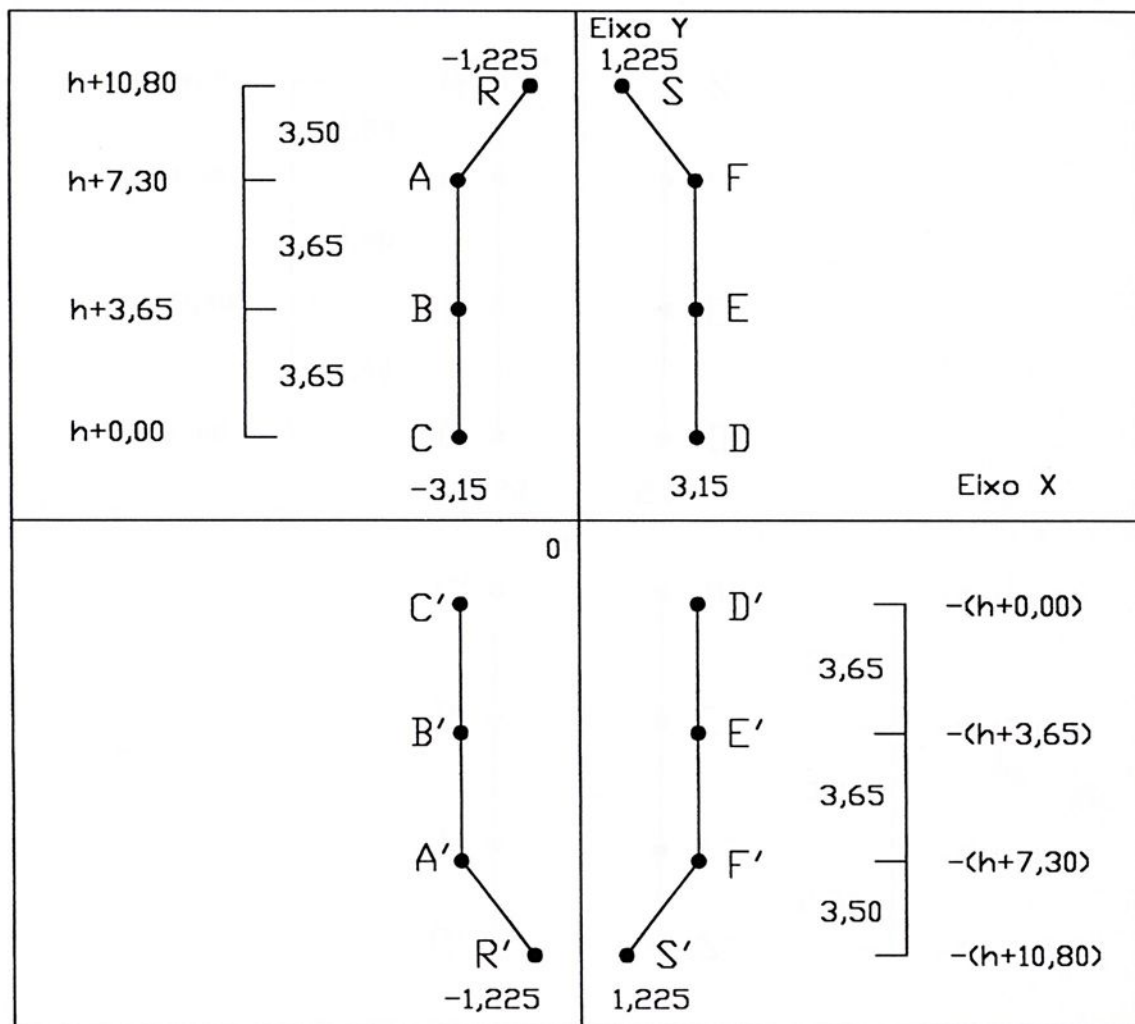
Ângulo de Blindagem $29^{\circ}44'42''$

Figura C-30

Apêndice C

sem escala | valores em metros | Folha A-4





h = altura média do condutor inferior ao solo, em metros.

$h = Dcs + 0,75 \text{ Flm}$

onde:

Dcs = distância de segurança condutor ao solo, em metros

Flm = flecha média da linha de transmissão, em metros

UNESP

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Ilha Solteira - SP

Orientador

Prof. Dr. Luiz Fernando Bovolato

MESTRADO

Marco Antônio Fernandes

ESTRUTURA TIPO CDPM2P

CIRCUITO DUPLO PARALELO

Estrutura Metálica

Dois cabos pára-raios

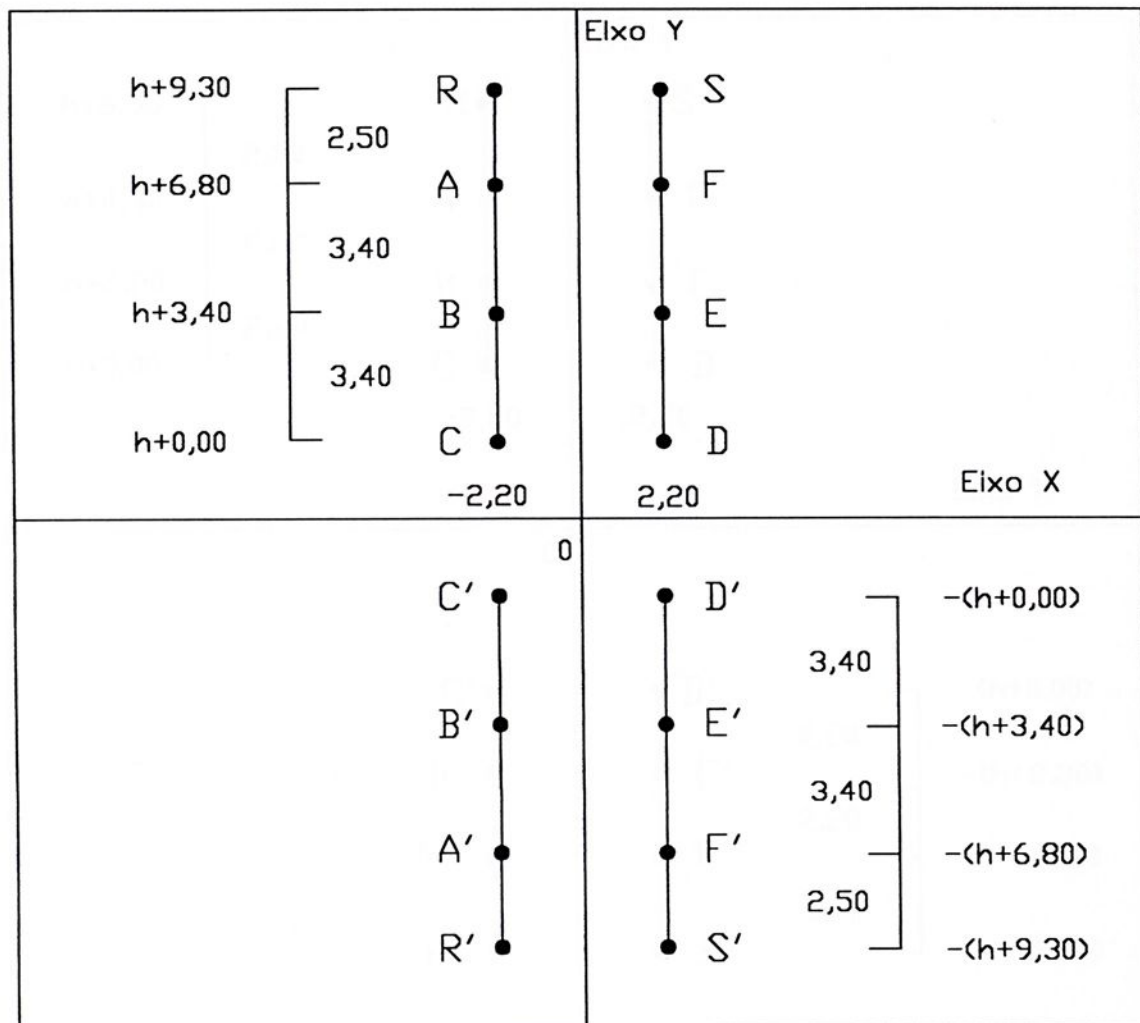
Ângulo de Blindagem = $28^{\circ}48'39''$

Figura C-31

Apêndice C

sem escala | valores em metros | Folha A-4





h = altura média do condutor inferior ao solo, em metros.

$h = Dcs + 0,75 \text{ Flm}$

onde:

Dcs = distância de segurança condutor ao solo, em metros

Flm = flecha média da linha de transmissão, em metros

UNESP

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Ilha Solteira - SP

Orientador

Prof. Dr. Luiz Fernando Bovolato

MESTRADO

Marco Antônio Fernandes

ESTRUTURA TIPO CDPC00

CIRCUITO DUPLO PARALELO

Espaçamento Convencional

Dois cabos pára-raios

Ângulo de Blindagem = 0°

Figura C-32

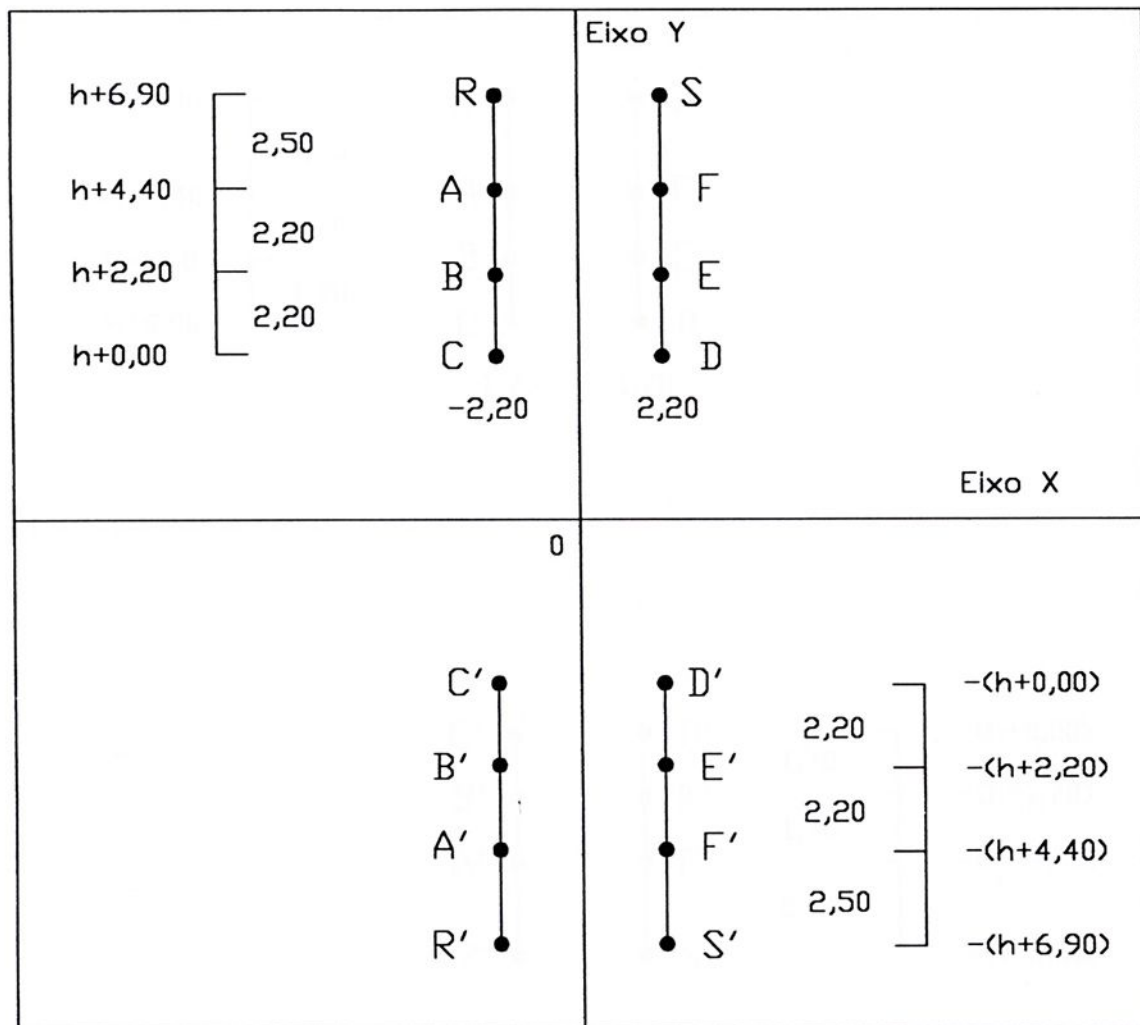
Apêndice C

sem escala

valores em metros

Folha A-4





h = altura média do condutor inferior ao solo, em metros.

$h = Dcs + 0,75 Flm$

onde:

Dcs = distância de segurança condutor ao solo, em metros

Flm = flecha média da linha de transmissão, em metros

UNESP

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Ilha Solteira - SP

Orientador

Prof. Dr. Luiz Fernando Bovolato

MESTRADO

Marco Antônio Fernandes

ESTRUTURA TIPO CDP000

CIRCUITO DUPLO PARALELO

Espaçamento Reduzido

Dois cabos pára-raios

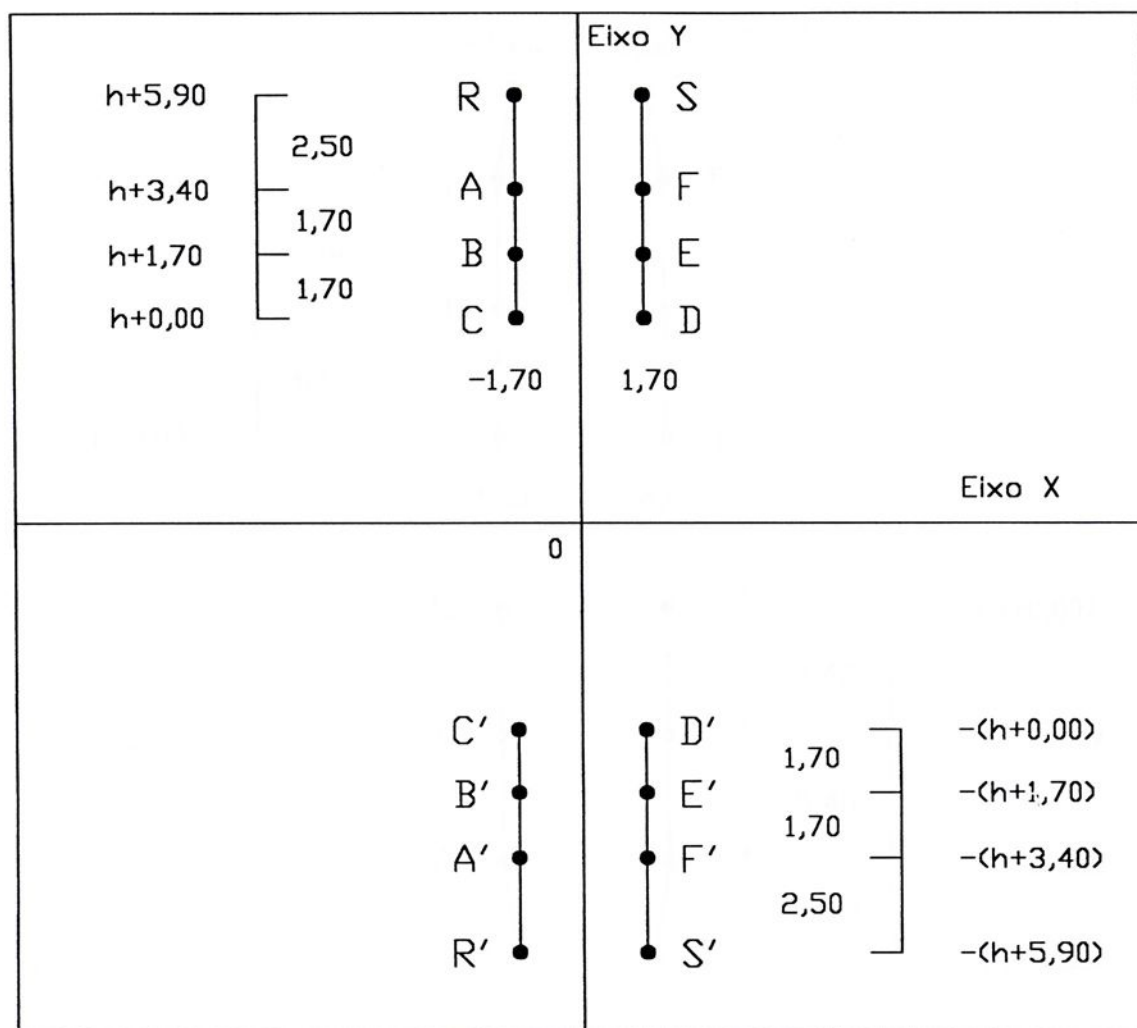
Ângulo de Blindagem = 0°

Figura C-33

Apêndice C

sem escala | valores em metros | Folha A-4





h = altura média do condutor inferior ao solo, em metros.

$h = Dcs + 0,75 Flm$

onde:

Dcs = distância de segurança condutor ao solo, em metros

Flm = flecha média da linha de transmissão, em metros

UNESP

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Ilha Solteira - SP

Orientador

Prof. Dr. Luiz Fernando Bovolato

MESTRADO

Marco Antônio Fernandes

ESTRUTURA TIPO CDPP00

CIRCUITO DUPLO PARALELO

Espaçamento Compacto

Dois cabos pára-raios

Ângulo de Blindagem = 0°

Figura C-34

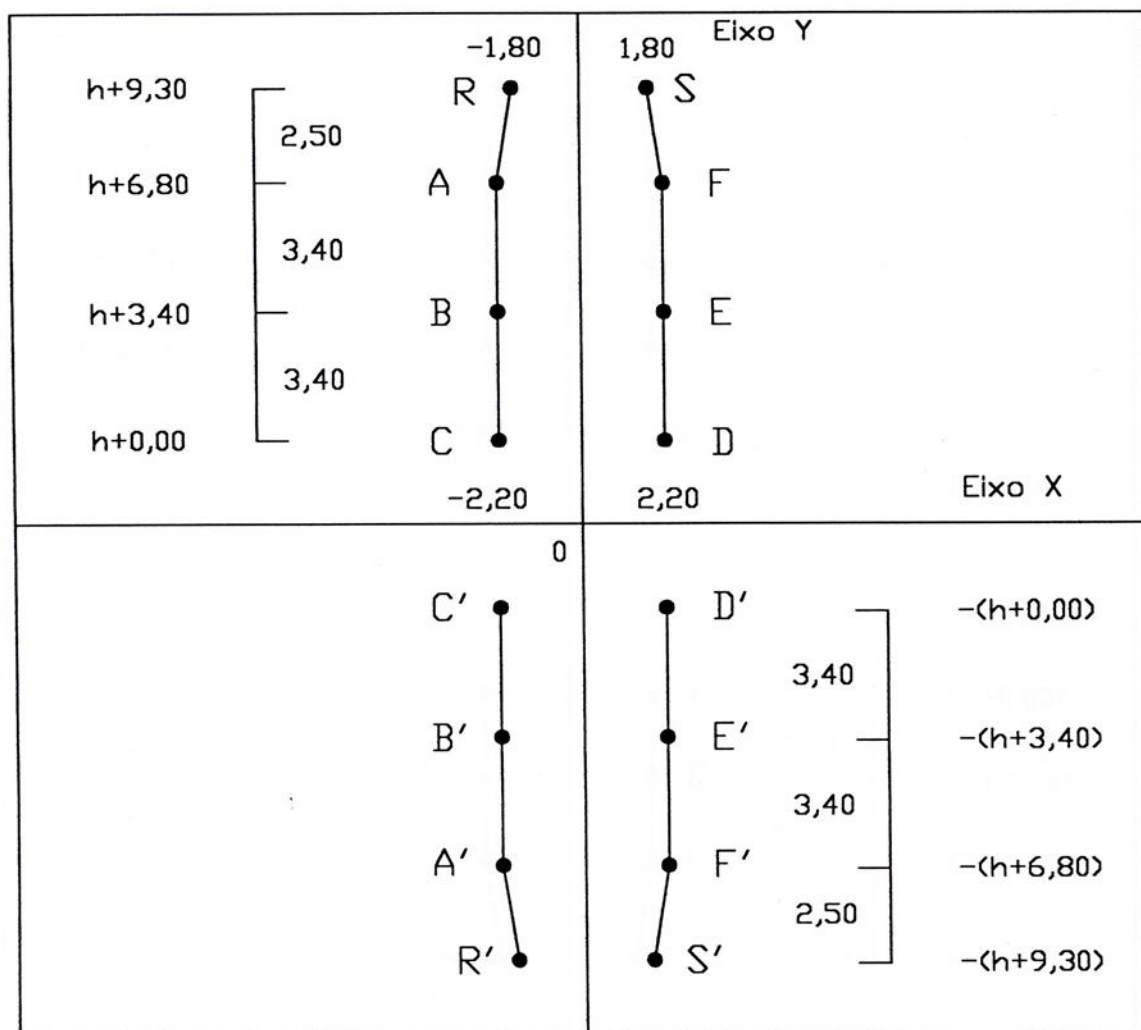
Apêndice C

sem escala

valores em metros

Folha A-4





h = altura média do condutor inferior ao solo, em metros.

$h = Dcs + 0,75 \text{ Flm}$

onde:

Dcs = distância de segurança condutor ao solo, em metros

Flm = flecha média da linha de transmissão, em metros

UNESP

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Ilha Solteira - SP

Orientador

Prof. Dr. Luiz Fernando Bovolato

MESTRADO

Marco Antônio Fernandes

ESTRUTURA TIPO CDPC09

CIRCUITO DUPLO PARALELO

Espaçamento Convencional

Dois cabos pára-raios

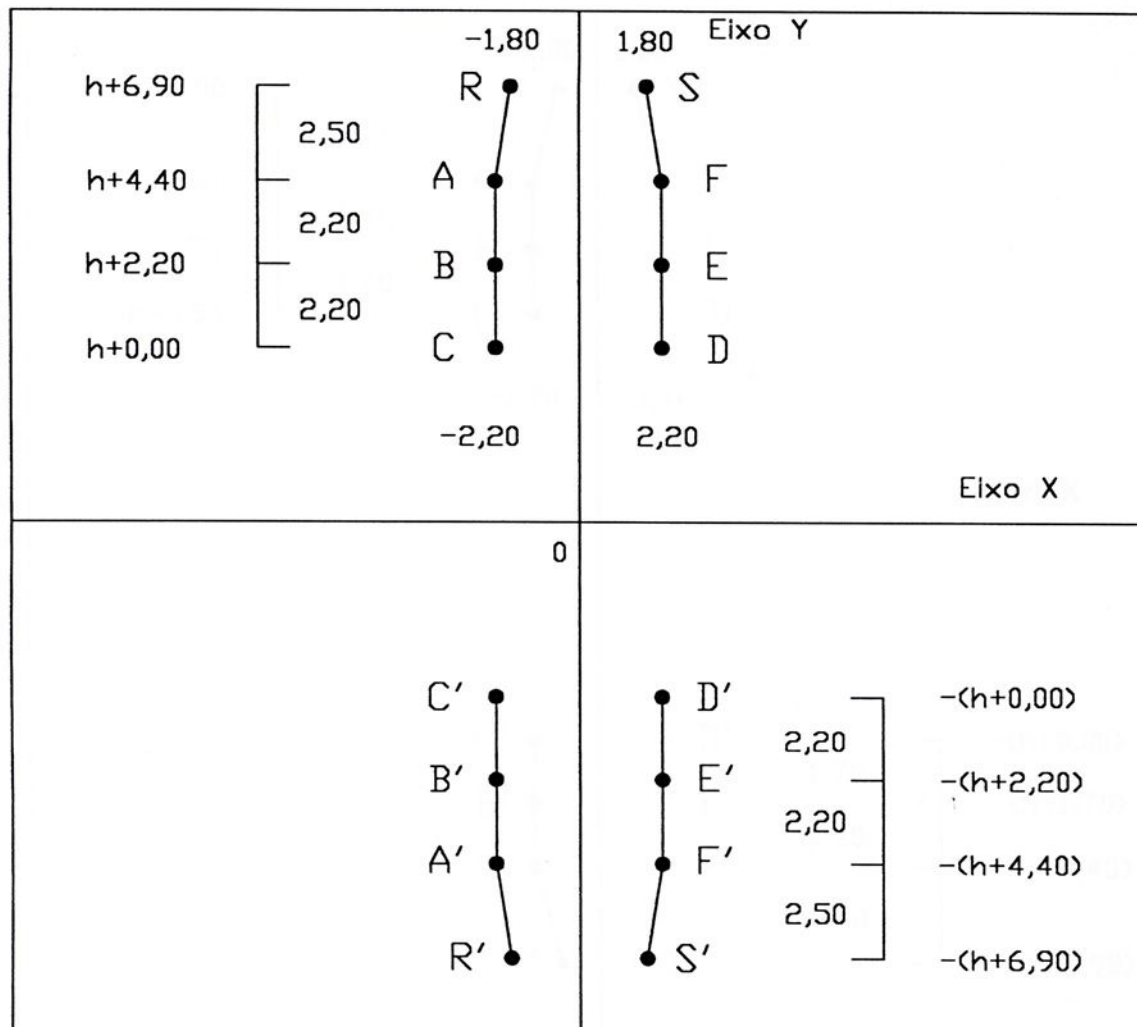
Ângulo de Blindagem = $09^{\circ}05'25''$

Figura C-35

Apêndice C

sem escala | valores em metros | Folha A-4





h = altura média do condutor inferior ao solo, em metros.

$h = Dcs + 0,75 Flm$

onde:

Dcs = distância de segurança condutor ao solo, em metros

Flm = flecha média da linha de transmissão, em metros

UNESP

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Ilha Solteira - SP

Orientador

Prof. Dr. Luiz Fernando Bovolato

MESTRADO

Marco Antônio Fernandes

ESTRUTURA TIPO CDP09

CIRCUITO DUPLO PARALELO

Espaçamento Reduzido

Dois cabos pára-raios

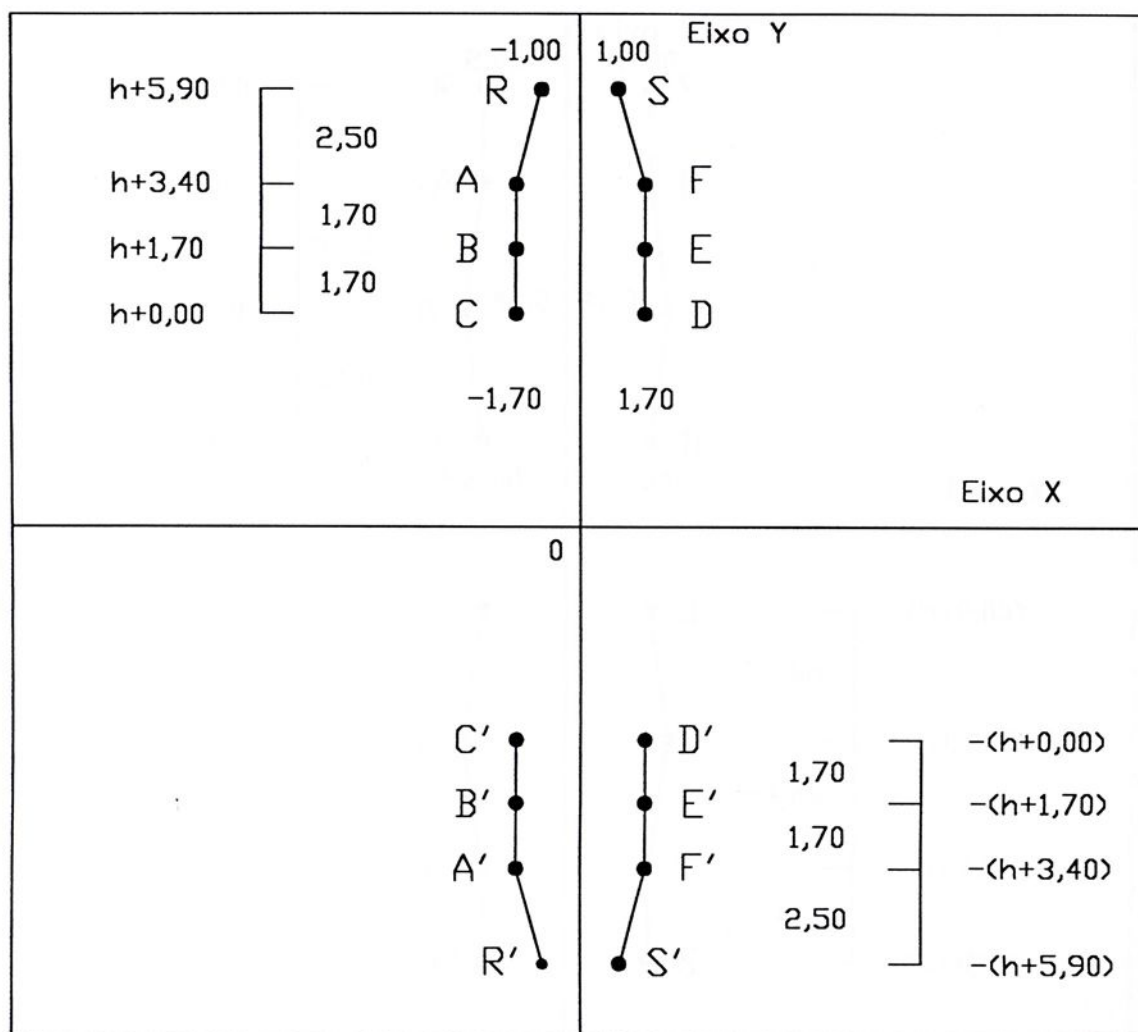
Ângulo de Blindagem = $09^{\circ}05'25''$

Figura C-36

Apêndice C

sem escala | valores em metros | Folha A-4





h = altura média do condutor inferior ao solo, em metros.

$h = Dcs + 0,75 \text{ Flm}$

onde:

Dcs = distância de segurança condutor ao solo, em metros

Flm = flecha média da linha de transmissão, em metros

UNESP

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Ilha Solteira - SP

Orientador

Prof. Dr. Luiz Fernando Bovolato

MESTRADO

Marco Antônio Fernandes

ESTRUTURA TIPO CDPP15

CIRCUITO DUPLO PARALELO

Espaçamento Compacto

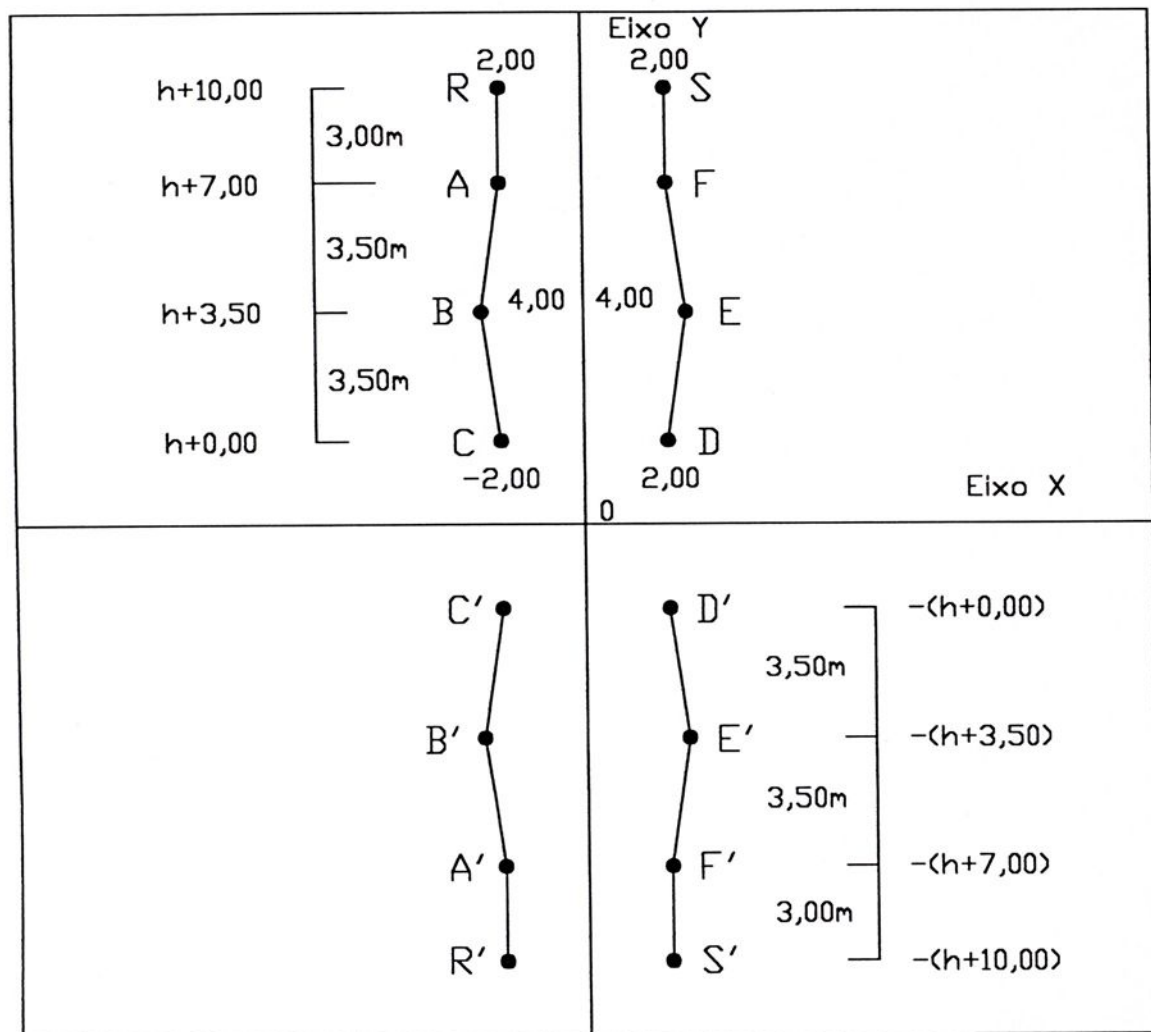
Dois cabos pára-raios

Ângulo de Blindagem = $15^{\circ}38'32''$

Figura C-37

Apêndice C

sem escala | valores em metros | Folha A-4



h = altura média do condutor inferior ao solo, em metros.

$h = D_{cs} + 0,75 \text{ Flm}$

onde:

D_{cs} = distância de segurança condutor ao solo, em metros

Flm = flecha média da linha de transmissão, em metros

UNESP
UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
 Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
 Ilha Solteira - SP

ESTRUTURA TIPO CDHC2P

CIRCUITO DUPLO HEXAGONAL

Dois cabos pára-raios

Ângulo de Blindagem 17°06'10"

Figura C-38

Apêndice C

Orientador

Prof. Dr. Luiz Fernando Bovolato

MESTRADO

Marco Antônio Fernandes

sem escala | valores em metros | Folha A-4





UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

Câmpus de Ilha Solteira
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Av. Brasil Centro, 56
15385-000 Ilha Solteira - SP
www.dee.feis.unesp.br

