

TESE
470



Ministério da Educação e Cultura
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ



ANEXO II

FOLHA DE JULGAMENTO DA COMISSÃO EXAMINADORA

Título da Dissertação: "Estudo das Influências causadas por Linhas de Transmissão de Energia Elétrica em Corrente Alternada sobre Tubulações Metálicas Próximas".

Autor: JOSE RAFAEL DACONTI

JULGAMENTO

EXAMINADORES	CONCEITO	RUBRICA
1º	A ⁺	<i>[assinatura]</i>
2º	A ⁺	<i>[assinatura]</i>
3º	A ⁺	<i>[assinatura]</i>

Resultado médio: Conceito A⁺, ou seja APROVADO COM
DISTINÇÃO

Observações:

Itajubá, 18 de outubro de 1986.

[assinatura]

1º Examinador

Dr. José Antonio Jardini

- THEMAG -

[assinatura]

2º Examinador

Prof. Antonio Eduardo Hermeto

- EFEI -

[assinatura]

3º Examinador/Orientador

Prof. Renato de Aquino Faria Nunes

- EFEI -

CLASS. 621.315:621.3.025 (043.2)
CUT. D 117e
TOMBO 470

CU... D 117

TOMBO 490

EFEI / BIBLIOTECA

24-10-97
24.95.99
23/06/99

JOSÉ RAFAEL DACONTI



ESTUDO DAS INFLUÊNCIAS CAUSADAS
POR LINHAS DE TRANSMISSÃO
DE ENERGIA ELÉTRICA
EM CORRENTE ALTERNADA
SOBRE TUBULAÇÕES METÁLICAS PRÓXIMAS

ORIENTADOR: PROF. DR. RENATO DE AQUINO FARIA NUNES

CO-ORIENTADOR: ENGº DALTON DE OLIVEIRA CAMPOS DO BRASIL

DISSERTAÇÃO APRESENTADA À BANCA EXAMINADORA DA ESCOLA
FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ (EFEI) COMO PARTE
DOS REQUISITOS PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM
ENGENHARIA ELÉTRICA.

ITAJUBÁ, JULHO DE 1986.

DECLARAÇÃO

Posterior ao término de mais um ano de trabalho, a Comissão de Trabalho do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) tem o prazer de declarar que, durante este período, o Sr. Dr. João A. P. Silva, pesquisador do Departamento de Física da Universidade de São Paulo, participou ativamente das atividades da Comissão, contribuindo com sua experiência e conhecimentos para o desenvolvimento das pesquisas em Física Nuclear. O Sr. Dr. Silva foi nomeado para a Comissão em 1960 e permaneceu nela até 1961, quando foi transferido para o Departamento de Física da Universidade de São Paulo. Durante este período, o Sr. Dr. Silva participou das reuniões da Comissão, das reuniões de trabalho e das reuniões de divulgação, além de ter participado das atividades de ensino e de pesquisa. O Sr. Dr. Silva também participou das atividades de divulgação da Comissão, sendo responsável pela elaboração e distribuição de folhetos informativos sobre as atividades da Comissão. O Sr. Dr. Silva também participou das atividades de ensino e de pesquisa, sendo responsável pela elaboração e distribuição de folhetos informativos sobre as atividades da Comissão. O Sr. Dr. Silva também participou das atividades de divulgação da Comissão, sendo responsável pela elaboração e distribuição de folhetos informativos sobre as atividades da Comissão.

À minha esposa Liège
À nossa filhinha Renata
Aos meus pais

A G R A D E C I M E N T O S

Gostaria de expressar os meus sinceros agradecimentos:

- Ao Orientador e ao Co-orientador desta Dissertação, respectivamente, Prof. Dr. Renato A. F. Nunes e Engº Dalton O.C. Brasil, sem a ajuda dos quais este trabalho não teria sido realizado. Gostaria de ressaltar a grande ajuda recebida do Engº Dalton com quem tive oportunidade de manter um contato mais freqüente.
- Aos Engºs Marcos José Lopes (Chefe do Departamento de Estudos do Sistema - DES em 1980) e Cláudio Pinto de Melo (Chefe da Divisão de Estudos e Técnicas de Alta Tensão - DEAT em 1980), responsáveis por minha participação no Curso CESE-81 realizado em Itajubá.
- Aos Engºs Roberto M. G. Alcoforado (Atual Chefe do DES) e Antonio Perez Puente (Atual Chefe da DEAT), pelo apoio recebido durante o período em que trabalhei nesta Dissertação.
- A todos os profissionais que participaram dos serviços de datilografia e desenho desta Dissertação, ou que contribuíram de alguma outra forma para o engrandecimento deste trabalho.
- Aos familiares que de alguma forma tenham me ajudado a atingir esta importante meta profissional.

Gostaria, ainda, de reservar os meus mais profundos agradecimentos:

- A Liêge: Por ter sido a grande incentivadora deste trabalho; pelo seu espírito de compreensão, paciência e renúncia nos diversos momentos em que precisei isolar-me da família para trabalhar nesta Dissertação; por ter sido a minha maior colaboradora nesta tarefa; e pelos bons momentos que tem proporcionado a mim e a Renatinha.
- A Renatinha: Pela grande alegria que nos proporciona com a sua presença e bom humor.
- Aos meus pais: Por tudo o que fizeram por mim.

R E S U M O

Neste trabalho são analisadas as influências causadas por linhas de transmissão de energia elétrica em corrente alternada (LT's) sobre tubulações metálicas próximas destinadas ao transporte de fluidos (oleodutos, gasodutos, acidodutos, aquedutos, etc)

Foram desenvolvidos dois importantes programas computacionais, um dos quais calcula parâmetros elétricos de tubulações metálicas, sendo o outro destinado a calcular a distribuição da corrente de curto-circuito entre os cabos pára-raios da linha de transmissão e a terra.

São apresentadas metodologias simples que permitem estimar a resistividade elétrica de solos reais (complexos). São, também analisados os fenômenos influentes, as condições nas quais os mesmos ocorrem e os riscos envolvidos; bem como são sugeridos critérios de segurança a adotar nas aproximações e cruzamentos entre LT's e tubulações metálicas. É sugerido um procedimento para análise de casos reais que se apresentem, bem como são feitas recomendações para projeto, instalação e manutenção/operação de tubulações próximas a LT's.

Os programas computacionais desenvolvidos e a teoria exposta neste trabalho permitirão investigações mais precisas das influências provocadas por LT's sobre tubulações metálicas.

S U M M A R Y

This work deals with the influence of A.C. transmission lines on nearby mettalic pipelines used for transporting fluids (e.g, oil, gas, acid and water).

Two computational programs have been developed to perform a comprehensive analysis of the problem incorporating accurate methodologies. The first program calculates electrical parameters and the second one evaluates the short-circuit current distribution between ground-wires and earth.

An easy methodology to evaluate the electrical resistivity of a complex soil is presented. The physical phenomena including the conditions under which they occur and the risks involved are presented, and safe project criteria are suggested. Procedures for real cases analysis, with recommendations for project, installation and maintenance/operation of pipelines are given.

The computational tools developed will allow a more objective, simple and efficient investigation of the influence of transmission lines on mettalic pipelines.

ÍNDICE

Pág.

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2 - RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO SOLO	5
2.1. INTRODUÇÃO	6
2.2. FATORES QUE INFLUENCIAM A RESISTIVIDADE DO SOLO	7
2.2.1. Efeito do Tipo de Solo	7
2.2.2. Efeito dos Sais Dissolvidos na Água do Solo	9
2.2.3. Efeito da Proporção da Mistura Água/Solo	10
2.2.4. Efeito da Temperatura do Solo.....	12
2.2.5. Efeito da Compactação das camadas do Solo	13
2.2.6. Efeito das Dimensões e Distribuição dos Grãos de Solo.....	13
2.3. DISTRIBUIÇÃO DE CORRENTE NUM SOLO HOMOGÊNEO (IDEAL).....	14
2.4. SOLO DE DUAS CAMADAS	17
2.4.1. Coeficiente de Reflexão (k).....	18
2.4.2. Equação dos Potenciais no Solo.....	19
2.4.3. Resistividade Aparente do Solo para a Configuração Wenner	19
2.4.4. Curvas Padronizadas.....	23
2.4.5. Relação entre ponto de inflexão da curva $\rho_a \times a$ e profundidade da camada superior do solo	24
2.4.6. Interpretação das Curvas de Profundidade Visando à Estratificação do Solo.....	26

ÍNDICE (continuação)

	Pág.
2.4.6.1. Métodos Empíricos	27
2.4.6.2. Métodos Teóricos	30
2.4.7. Resistividade Equivalente a um Solo de duas Camadas	38
2.5. SOLOS COM MULTI-CAMADAS.....	40
2.6. TIPO DE RESISTIVIDADE A CONSIDERAR EM FUNÇÃO DA ANÁLISE A EFETUAR	41
2.7. CONCLUSÕES	42
CAPÍTULO 3 - PARÂMETROS ELÉTRICOS DAS TUBULAÇÕES METÁLICAS.....	43
3.1. INTRODUÇÃO	44
3.2. MÉTODO DE CÁLCULO DOS PARÂMETROS Z , Y , γ E Z_c DA TUBULAÇÃO	45
3.2.1. Cálculo da Impedância Linear da Tubulação (Z)	45
3.2.1.1. Tubulação Aérea	45
3.2.1.2. Tubulação Enterrada	48
3.2.2. Cálculo da Admitância Linear da Tubulação para a Terra (Y)	49
3.2.2.1. Tubulação Aérea	49
3.2.2.2. Tubulação Enterrada	50
3.2.3. Cálculo da Constante de Propagação (γ) da Tubulação	53
3.2.3.1. Tubulação Aérea	53
3.2.3.2. Tubulação Enterrada.....	54

ÍNDICE (continuação)

	Pág.
3.2.4. Cálculo da Impedância Característica (Z_c) da Tubulação.....	55
3.2.4.1. Tubulação Aérea	55
3.2.4.2. Tubulação Enterrada	56
3.3. MÉTODO NÃO ITERATIVO PARA CÁLCULO APROXIMADO DOS PARÂMETROS Z , Y , γ e Z_c DE TUBULAÇÕES ENTERRADAS.....	56
3.4. VALORES TÍPICOS DE CARACTERÍSTICAS DE TUBULAÇÕES E DOS SEUS REVESTIMENTOS	62
3.5. PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA O CÁLCULO DE Z , Y , γ E Z_c DE TUBULAÇÕES	62
3.6. CONCLUSÕES	63
CAPÍTULO 4 - ANÁLISE DOS ASPECTOS INFLUENTES.....	64
4.1. INTRODUÇÃO.....	65
4.2. FENÔMENOS A CONSIDERAR	66
4.3. INDUÇÃO ELETROSTÁTICA NA TUBULAÇÃO	70
4.3.1. Descrição do Fenômeno	70
4.3.2. Campo Elétrico ao Nível do Solo (G)	73
4.3.3. Indução Eletrostática em Tubulações Submetidas, ao Longo dos seus Comprimentos, a Campos Elétricos Constantes.....	76

ÍNDICE (continuação)

	Pág.
4.3.4. Indução Eletrostática em Tubulações Submetidas, ao Longo dos seus Comprimentos, a Campos Elétricos Variáveis	77
4.3.5. Casos Interessantes de Aproximação LT-Tubulação	79
4.3.6. Distância máxima a Considerar a Partir do Eixo da LT	81
4.3.7. Influência da Presença de Cabos Pára-raios na LT	83
4.3.8. Influência da Presença de Pontos de Aterramento na Tubulação	83
4.3.9. Influência da Presença de Juntas Isolantes Seccionando a Tubulação.....	84
4.4. INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA NA TUBULAÇÃO	85
4.4.1. Descrição do Fenômeno.....	85
4.4.2. Impedâncias Mútuas entre LT's e Tubulações Paralelas	87
4.4.3. Indução Eletromagnética em Tubulações Paralelas a LT's	90
4.4.4. Indução Eletromagnética em Tubulações não Paralelas a LT's	92
4.4.5. Casos Interessantes de Aproximação LT-Tubulação	96
4.4.6. Distância máxima Entre Eixos de Paralelismo a Considerar.....	100

ÍNDICE (continuação)

	Pág.
4.4.7. Influência da Presença de Cabos Pára-raios na LT	101
4.4.8. Influência da Presença de Pontos de Aterramen <u>to</u> na Tubulação.....	101
4.4.9. Influência da Presença de Juntas Isolantes Sec <u>cionando</u> a Tubulação.....	102
4.5. INJEÇÃO DE CORRENTE NO SOLO	103
4.5.1. Descrição do Fenômeno	103
4.5.2. Resistências Elétricas de Sistemas de Aterra <u>mento</u> de LT's	105
4.5.3. Cálculo da Corrente Injetada no Solo pela LT.	109
4.5.4. Influência da Presença de Cabos Pára-raios na LT	109
4.6. CÁLCULO DOS EFEITOS ASSOCIADOS À INJEÇÃO DE CORRENTE NO SOLO	110
4.6.1. Cálculo dos Potenciais Criados na Superfície do Solo	110
4.6.2. Justificativa para a Utilização de Arranjos de Fios Contrapesos Assimétricos	114
4.6.3. Influência da Resistência de Aterramento da LT na Elevação de Potencial do Solo	115
4.6.4. Cálculo dos Potenciais Transferidos do Solo para a Tubulação	116

ÍNDICE (continuação)

	Pág.
4.7. CÁLCULO DA DIFERENÇA DE POTENCIAL TUBULAÇÃO-SOLO AO LONGO DA TUBULAÇÃO	117
4.7.1. Impedâncias para a Terra Vistas de Cada Ponto da Tubulação	118
4.7.2. Perfil da Diferença de Potencial Tubulação-Solo ao Longo da Tubulação	121
4.7.2.1. Tensões em um Trecho de Tubulação Devidas à Indução Eletromagnética no Próprio Trecho..	121
4.7.2.2. Tensões em um Trecho de Tubulação devidas à Propagação de Potenciais Vindos de Outros Trechos	123
4.8. RISCOS A CONSIDERAR	125
4.8.1. Risco de Eletrocução de Pessoas	125
4.8.2. Risco de Danificação/Perfuração da Tubulação Metálica e do seu Revestimento	128
4.8.3. Risco de Danificação/Perfuração de Juntas Isolantes	130
4.8.4. Risco de Danificação do Sistema de Proteção Catódica	131

ÍNDICE (continuação)

	Pág.
4.9. CRITÉRIOS A ADOPTAR	132
4.9.1. Contra Eletrocução de Pessoas	132
4.9.2. Contra Danificação/Perfuração da Tubulação e do seu Revestimento	133
4.9.3. Contra Danificação/Perfuração de Juntas Iso- lantes	133
4.9.4. Contra Danificação de Sistemas de Proteção Catódica	133
4.10. PROCEDIMENTO PARA A ANÁLISE DE UM CASO	134
4.11. ASPECTOS A CONSIDERAR NA BUSCA DE MEIOS PARA A MITIGAÇÃO DOS EFEITOS	136
4.11.1. Distâncias e Ângulos de Aproximação Entre LT e Tubulação	136
4.11.2. Presença de Cabos Pára-raios Aterrados na LT	137
4.11.3. Presença de Pontos de Aterramento na Tubula- ção	137
4.11.4. Presença de Juntas Isolantes na Tubulação...	137
4.11.5. Presença do Sistema de Aterramento da LT ...	138
4.11.6. Presença de Revestimentos Dotados de Baixa Resistência de Fuga em Tubulações Enterradas.	138

ÍNDICE (continuação)

	Pág.
4.11.7. Presença de Corpos Metálicos que Propiciem Blindagem à Tubulação Contra os Fenômenos Provocados Pela LT	138
4.11.8. Corrente de Curto-Circuito e Resistividade do Solo	138
4.12. RECOMENDAÇÕES PARA PROJETO, INSTALAÇÃO E MANUTENÇÃO/OPERAÇÃO DE TUBULAÇÕES PRÓXIMAS A LT'S.....	139
4.12.1 Diretrizes para escolhada rota da tubulação	139
4.12.2. Sobre as características da tubulação ...	139
4.12.3. Sobre meios para mitigação dos efeitos provocados pela linha de transmissão.....	140
4.12.4. Cuidados na fase de instalação da tubulação..	141
4.12.5. Cuidados durante a manutenção/operação da tubulação.....	141
4.13. CONCLUSÕES	142
CAPÍTULO 5 - EXEMPLOS NUMÉRICOS	143
5.1. INTRODUÇÃO	144

ÍNDICE (continuação)

5.2.	EXEMPLO DIDÁTICO Nº 1	145
5.2.1.	Cálculo da Indução Eletrostática	147
5.2.2.	Avaliação dos riscos	153
5.3.	EXEMPLO DIDÁTICO Nº 2	154
5.3.1.	Cálculo da Indução Eletromagnética	157
5.3.2.	Cálculo da Elevação do Potencial do Solo e da Transferência de Potencial do Solo para a Tubulação.....	174
5.3.3.	Superposição dos fenômenos e avaliação dos riscos	183
5.4.	ANÁLISE DE UM CASO REAL	187
	CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES	188
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	193

ÍNDICE (continuação)

	Pág.
ANEXO I - VALORES TÍPICOS DE CARACTERÍSTICAS DE TUBULAÇÕES	198
ANEXO II - PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA O CÁLCULO DOS PARÂMETROS ELÉTRICOS Z , Y , γ E Z_c DE TUBULAÇÕES METÁLICAS.....	202
ANEXO III - METODOLOGIA PARA CÁLCULO DA DISTRIBUIÇÃO DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO ENTRE CABOS PÁRA-RAIOS E A TERRA	243
ANEXO IV - PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA O CÁLCULO DA DISTRIBUIÇÃO DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO ENTRE CABOS PÁRA-RAIOS E TERRA.....	252
ANEXO V - INFLUÊNCIA DE PONTOS DE ATERRAMENTO NA TUBULAÇÃO METÁLICA.....	312
ANEXO VI - SOBRE AS TENSÕES DE TOQUE E DE PASSO.....	327
ANEXO VII - DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DO CABO PÁRA-RAIOS EQUIVALENTE	332

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

Neste trabalho serão analisadas as influências causadas por linhas de transmissão de energia elétrica em corrente alternada sobre tubulações metálicas próximas.

Este assunto apesar de ser muito vasto, constitui apenas uma parte de um tema ainda mais amplo denominado Ecologia Eletromagnética, o qual engloba a análise de todas as interferências causadas por instalações elétricas sobre o meio ambiente e sobre outras instalações. Tais influências revelam-se muito importantes nas regiões mais industrializadas, principalmente onde as aproximações entre linhas de transmissão de energia elétrica (LT's) e tubulações industriais como oleodutos, gasodutos, acidodutos, aquedutos, são cada vez mais frequentes. Vale ressaltar que estas influências quando não devidamente analisadas podem ocasionar, dentre outros, risco de choque elétrico em pessoas e risco de perfuração das tubulações.

Pretende-se neste trabalho descrever, analisar e propor metodologias bem como desenvolver programas computacionais que sejam úteis nas etapas de projeto das aproximações/cruzamentos entre LT's e tubulações, ou na ocasião da análise de projetos já existentes. Não se pretende, contudo, esgotar o assunto, sendo apresentadas ao final do trabalho algumas sugestões para o prosseguimento do mesmo. Acredita-se também que grande parte do material apresentado nos diversos capítulos possa ser utilizado como base de um curso para todos aqueles que desejarem aprofundar-se no tema.

O crescente número de casos de aproximações e cruzamentos verificados entre linhas de transmissão da Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF) e tubulações metálicas, bem como a inexistência de uma regulamentação nacional sobre o tema, além do grande interesse no assunto demonstrado pela Conférence Internationale des Grandes Réseaux Électriques à Haute Tension (CIGRÉ) podem ser citados como os principais aspectos que motivaram este trabalho.

Com relação à bibliografia pesquisada vale ressaltar que a Electricité de France (EdF) publicou um importante artigo (1) que é citado em quase todas as outras referências bibliográficas consultadas. O tema também mereceu a atenção da CIGRE (2)(3)(4)(5)(6)(7)(8)(9)(10)(11) e do EPRI (Electric Power Research Institute), tendo este juntamente com a AGA (American Gas Association) desenvolvido um trabalho de pesquisa em duas etapas que culminaram com a publicação de dois importantes relatórios (12)(13). Outras publicações internacionais (14)(15)(16)(17) também merecem destaque, sendo conveniente citar alguns trabalhos desenvolvidos no Brasil (18)(19)(20)(21)(22)(23)(24)(25)(26) inclusive pela PETROBRÁS (27)(28). Foram, ainda, consultadas diversas referências bibliográficas relativas a interferências provocadas por linhas de transmissão em linhas de telecomunicação (29)(30)(31)(32)(33)(34)(35) e em cercas metálicas (36)(37) as quais contribuíram para uma melhor elucidação de conceitos físicos. Além destas, foram utilizadas outras referências bibliográficas, valendo ressaltar que os estudos desenvolvidos neste trabalho possibilitaram a publicação de um artigo (56) na Sessão Bienal 1986 da CIGRE.

No capítulo 2 é feita, inicialmente, uma análise dos fatores que influenciam a resistividade do solo, ficando aparente quão difícil se torna estimar um valor preciso para a mesma. Em seguida, são feitas análises relativas a solos homogêneos e a solos constituídos por duas camadas horizontais, sendo sugeridas metodologias simples que permitem estratificar um solo real bastante complexo em um solo composto de duas camadas para transformá-lo, a seguir, em um solo homogêneo equivalente. Após isto, são apresentados os motivos pelos quais não serão feitas análises para solos compostos por três ou mais camadas. São, então, definidos os tipos de resistividade do solo que devem ser considerados em função das análises a efetuar nos capítulos seguintes.

No capítulo 3 é apresentado, inicialmente, um método de cálculo de parâmetros elétricos de tubulações metálicas, o qual poderá ser utilizado para tubulações aéreas ou enterradas que sejam ou não revestidas com vários tipos de materiais anti-corrosivos usuais. Entretanto, quando se trata de tubulações enterradas, este método recai em equações transcendentais as quais precisam ser resolvidas por processos iterativos. Desta forma, é sugerido um método não iterativo bastante simples para o cálculo destes parâmetros, o qual fornece valores aproximados que podem ser utilizados como boas estimativas para inicializar os processos iterativos anteriormente citados.

No capítulo 4 são descritos, inicialmente, os fenômenos a considerar e as condições nas quais os mesmos ocorrem. Seguem-se a isto as análises de cada um destes fenômenos compreendendo estudos de: mecanismos físicos, parâmetros influentes e métodos de cálculo; influências causadas pela presença de cabos para-raios na linha de transmissão; influência de pontos de aterramento e de juntas isolantes na tubulação. A partir daí, são analisados os riscos a considerar e estabelecidos os critérios a adotar, bem como é sugerido um procedimento para analisar casos que surgem na prática. São, então, descritos os principais aspectos a considerar na busca de meios para a mitigação dos fenômenos, sendo dadas, a seguir, recomendações para projeto, instalação e manutenção/operação de tubulações metálicas próximas a linhas de transmissão.

No capítulo 5 apresenta-se, inicialmente, um exemplo didático através do qual é demonstrada uma aplicação da metodologia de cálculo da Indução Eletrostática. A seguir, é apresentado outro exemplo didático no qual são demonstradas aplicações das metodologias de cálculo da Indução Eletromagnética e dos Efeitos Associados à Injeção de Corrente no Solo. Faz-se, então, referência a um caso real já analisado pela Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF) utilizando-se destas metodologias.

CAPÍTULO 2 - RESISTIVIDADE

ELÉTRICA DO SOLO

2.1. INTRODUÇÃO

Estimar um valor preciso para a resistividade do solo, tanto é muito difícil, quanto muito necessário para os estudos de interferência entre linhas de transmissão e tubulações metálicas. Isto se deve, principalmente, ao fato de que o solo é um ambiente muito complexo sob o aspecto de sua constituição. Em geral, tenta-se elaborar modelos adequados para estudar o solo, mas os mesmos podem ser considerados no máximo como aproximações razoáveis.

Este capítulo faz, inicialmente, uma análise dos fatores que influenciam a resistividade do solo, ficando aparente quão difícil se torna estimar um valor preciso para a mesma. Em seguida, são feitas análises relativas a solos homogêneos e a solos constituídos por duas camadas horizontais, sendo sugeridas metodologias simples que permitem estratificar um solo real bastante complexo em um solo composto de duas camadas e transformá-lo, a seguir, em um solo homogêneo equivalente. Após isto, são apresentados os motivos pelos quais não serão feitas análises para solos compostos por três ou mais camadas. São, então, definidos os tipos de resistividade do solo que devem ser considerados em função das análises a efetuar nos próximos capítulos deste trabalho.

Por fim, são citadas algumas conclusões importantes do capítulo.

2.2. FATORES QUE INFLUENCIAM A RESISTIVIDADE DO SOLO

A maioria dos solos e rochas não é condutora de eletricidade quando estes estão completamente secos. Exceções disto' são certos corpos minerais que são condutores devido ao seu conteúdo metálico. A areia e a argila secas que possuem resistividades tão altas a ponto de serem consideradas não condutoras, passam a ter uma boa condutividade quando' estão impregnadas com água.

Desta forma, a condução através do solo pode ser considerada como uma condução através da água contida no solo e, portanto, uma condução eletrolítica.

Os principais fatores que determinam a resistividade do solo são:

- a) Tipo do solo
- b) Composição química e concentração dos sais dissolvidos na água do solo
- c) Proporção da mistura água/solo
- d) Temperatura do solo
- e) Compactação das camadas do solo
- f) Dimensões dos grãos do material do solo e distribuição dos mesmos.

2.2.1. Efeito do tipo de solo

Torna-se difícil precisar de que tipo é um solo, pois para a mesma denominação podem-se ter grandes variações. Por exemplo, o barro pode ser de vários tipos e mesmo aqueles de tipo idêntico podem ter resistividades diferentes em função da região geográfica onde se encontram.

Dependendo do tipo de solo, a resistividade pode variar de valores extremamente baixos tais como 1 ohm. metro a valores extremamente altos tais como 1000 ohm.metro. Às vezes, a resistividade pode ser estimada através de mapas geológicos. Um estudo destes mapas pode indicar o tipo de variação esperado da resistividade com a profundidade. Se, por exemplo, há uma camada superior de solo constituída por areia e uma camada inferior constituída por xisto, espera-se que a resistividade decresça de um valor muito alto na superfície do solo para um valor baixo, a medida que forem atingidas camadas mais profundas. Se por outro lado, o material da camada superficial de solo é barro, enquanto que a camada inferior é constituída por granito, espera-se que a resistividade aumente com a profundidade.

Algumas pesquisas relacionam a resistividade do solo com a sua formação geológica. Em geral, a resistividade aumenta proporcionalmente à idade da formação geológica⁽⁴⁷⁾.

A tabela 2.1⁽⁴⁸⁾ expressa valores típicos de resistividade para o território brasileiro:

TIPO DE SOLO	$\rho(\Omega.m)$
limo	20 a 100
humus	10 a 150
lama	5 a 100
terra de jardim com 50% de umidade	140
terra de jardim com 20% de umidade	480
argila com 40% de umidade	80
argila com 20% de umidade	330
argila seca	1.500 a 5.000
areia com 90% de umidade	1.300
areia comum	3.000 a 8.000
calcáreo fissurado	500 a 1.000
calcáreo compacto	1.000 a 5.000
granito	1.500 a 10.000
basalto	10.000 a 20.000

Tabela 2.1

2.2.2. Efeito dos sais dissolvidos na água do solo

A resistividade da água do solo depende da natureza e da concentração dos sais dissolvidos na mesma. A figura seguinte⁽⁴⁶⁾ mostra isto. Ela mostra que uma pequena quantidade de sais dissolvidos na água pode diminuir muito sua resistividade. Mostra ainda que diferentes sais provocam diferentes efeitos.

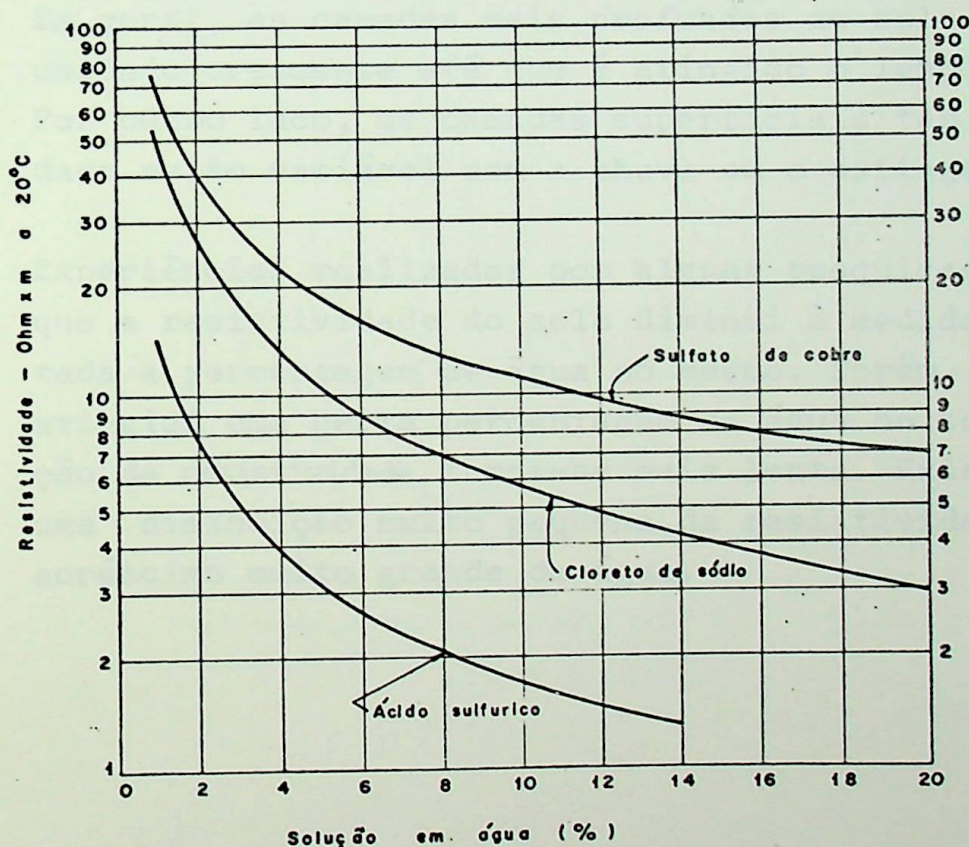


Figura 2.1

2.2.3. Efeito da proporção da mistura água/solo

Além de ser influenciada pela natureza e concentração dos sais dissolvidos na água do solo, a resistividade do solo também é influenciada pela proporção da mistura água/solo. A proporção de água no solo é variável com as condições atmosféricas, a época do ano, a natureza do sub-solo e a profundidade do lençol d'água, caso exista. É muito raro ter-se um solo totalmente seco, no entanto areias desérticas ou regiões submetidas a períodos de longa estiagem tendem a apresentar solos deste tipo. Por outro lado, solos com percentagem de água superior a 40% também não são comuns.

Em geral, as camadas mais profundas de solo apresentam umidade crescente até que é atingido o lençol freático. Por outro lado, as camadas superficiais têm uma resistividade muito variável com a chuva ou a estiagem.

Experiências realizadas por alguns pesquisadores indicam que a resistividade do solo diminui à medida que é aumentada a percentagem de água no mesmo. Porém, após ser atingida uma certa percentagem de água no solo, a diminuição da resistividade torna-se mais lenta. Existe, assim, uma diminuição muito pequena da resistividade para um acréscimo muito grande de água.

A figura seguinte⁽⁴⁶⁾ ilustra a variação de resistividade com a percentagem de água no solo.

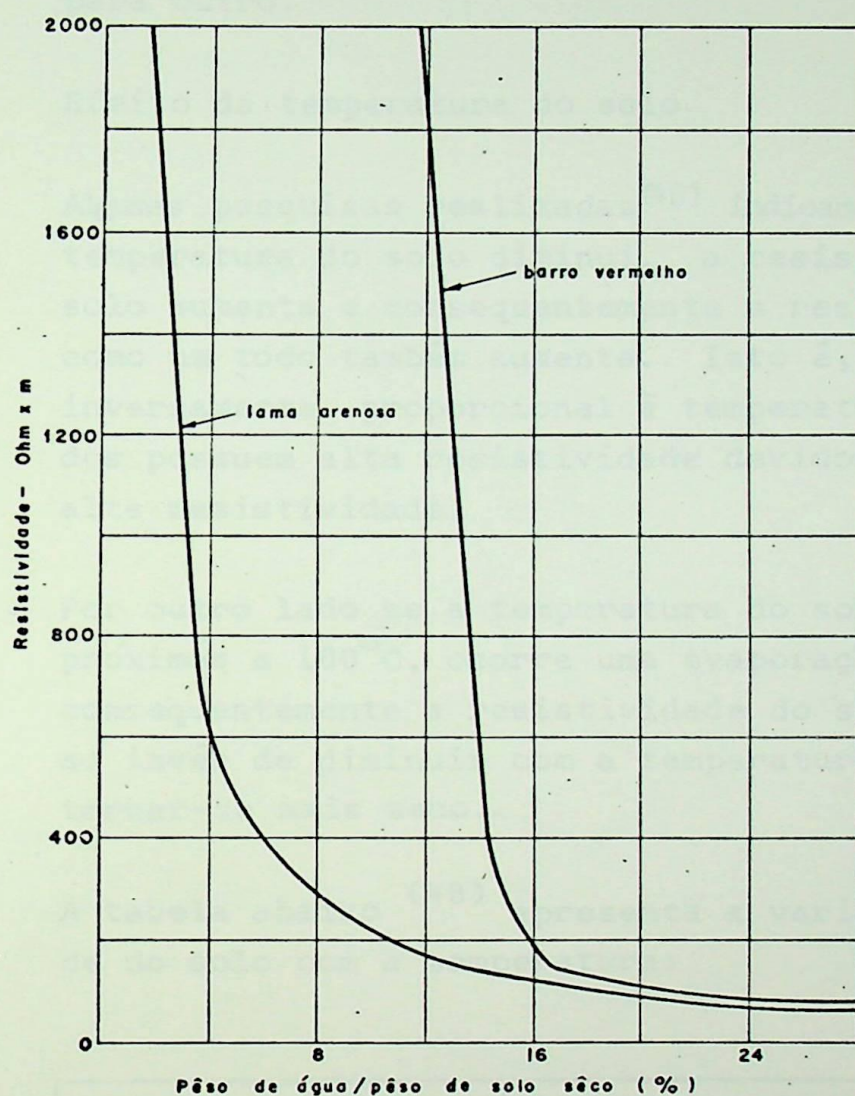


Figura 2.2

Tem-se observado que para um mesmo tipo de solo pode-se

ter diferentes resistividades dependendo da região geográfica. Isto deve-se ao fato de que tanto os sais dissolvidos na água do solo (natureza e concentração), como a proporção da mistura água/solo, costumam variar de um local para outro.

2.2.4. Efeito da temperatura do solo

Algumas pesquisas realizadas⁽⁴⁶⁾ indicam que à medida que a temperatura do solo diminui, a resistividade da água do solo aumenta e consequentemente a resistividade do solo como um todo também aumenta. Isto é, a resistividade é inversamente proporcional à temperatura. Solos congelados possuem alta resistividade devido ao gelo apresentar alta resistividade.

Por outro lado se a temperatura do solo atingir valores próximos a 100°C , ocorre uma evaporação da água do solo e consequentemente a resistividade do solo passa a aumentar ao invés de diminuir com a temperatura, devido ao solo tornar-se mais seco.

A tabela abaixo⁽⁴⁸⁾ apresenta a variação da resistividade do solo com a temperatura:

TEMPERATURA ($^{\circ}\text{C}$)	RESISTIVIDADE DO SOLO ARENOSO ($\Omega \cdot \text{m}$)	ACRÉSCIMO DA RESISTIVIDADE EM RELAÇÃO A 20°C
20	72	-
10	99	38%
0 (água)	138	92%
0 (gêlo)	300	317%
- 5	790	997%
- 15	3.300	4.483%

Tabela 2.2

2.2.5. Efeito da compactação das camadas do solo

Não há muitos dados sobre o efeito da pressão mecânica sobre o solo. Entretanto espera-se que altas pressões que provoquem uma maior compactação do solo, promovam uma queda na resistividade do solo.

Quanto mais compacto for o solo, maior deverá ser a área de contacto entre os grãos do mesmo e conseqüentemente menor será a resistência do mesmo à passagem de corrente elétrica.

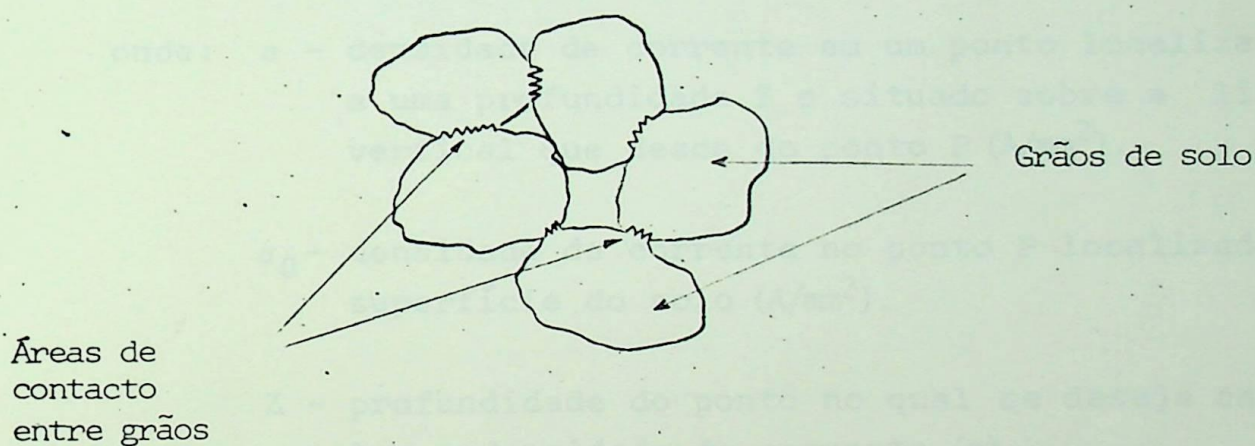


Figura 2.3

Ou seja, o solo apresentará uma menor resistividade..

2.2.6. Efeito das dimensões e distribuição dos grãos de solo.

As dimensões e distribuição dos grãos de solo afetam a resistividade na medida em que os espaços vazios deixados pelos grãos podem ser preenchidos com água e desta forma a proporção água/solo variar.

2.3. DISTRIBUIÇÃO DE CORRENTE NUM SOLO HOMOGÊNEO (IDEAL)

Suponha-se que é injetada corrente num solo homogêneo através de um ponto A localizado na superfície do mesmo e retirada através de um ponto B também localizado nesta superfície. Chame-se de P o ponto médio da reta que une A e B.

Conforme demonstrado na bibliografia ⁽⁴⁶⁾, a variação da densidade de corrente ao longo de uma linha vertical que desça do ponto P penetrando no solo, é dada pela fórmula:

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{Z}{D} \right)^2 \right]^{3/2}} \quad (\text{Eq. 2.1})$$

onde: σ - densidade de corrente em um ponto localizado a uma profundidade Z e situado sobre a linha vertical que desce do ponto P (A/mm^2).

σ_0 - densidade de corrente no ponto P localizado na superfície do solo (A/mm^2).

Z - profundidade do ponto no qual se deseja calcular a densidade de corrente (m).

D - distância entre os pontos A e P ou P e B (m).

Esta equação permite traçar a curva que se apresenta na figura seguinte.

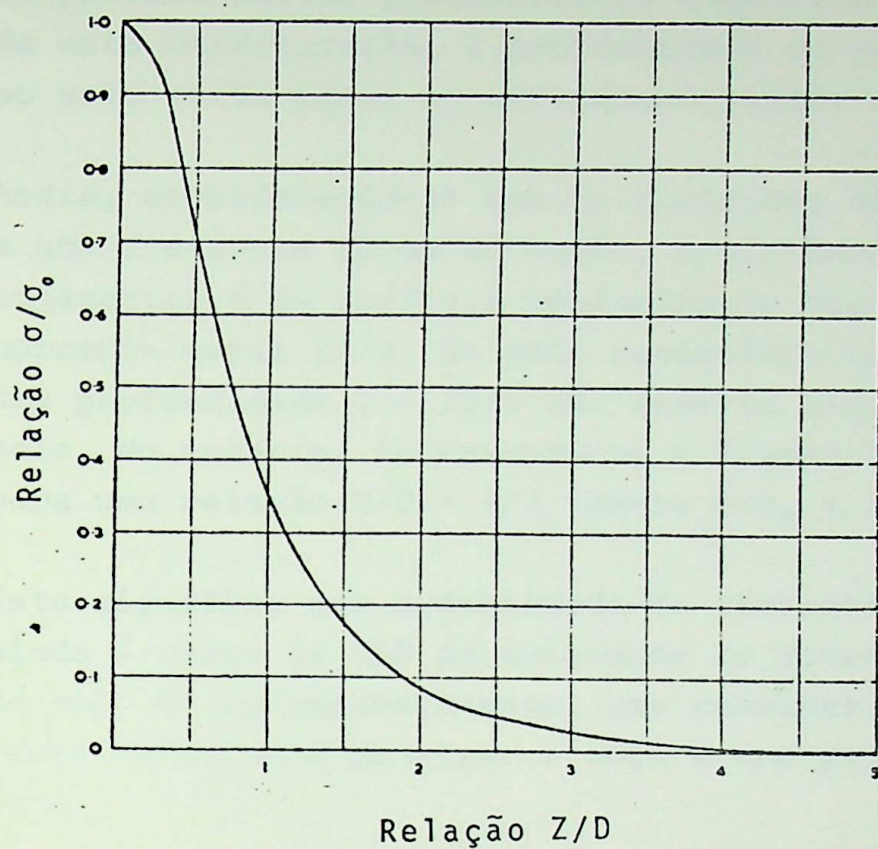


Figura 2.4

Considere-se, agora, a configuração de 4 eletrodos igualmente espaçados ilustrada na figura seguinte.

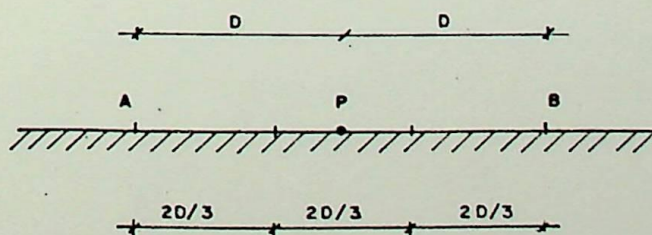


Figura 2.5

No passado muitos pesquisadores sugeriram que ao ser utilizada esta configuração, a profundidade de penetração da corrente no solo seria igual ao espaçamento entre eletrodos adjacentes.

Assim, considerando-se que os eletrodos das extremidades estão a uma distância $2D$ um do outro, a distância entre eletrodos adjacentes é de $2D/3$ e a profundidade efetiva de penetração da corrente seria $2D/3$. Se este raciocínio estivesse certo, após uma profundidade $Z = 2D/3$ não deveria haver mais corrente no solo. No entanto, observando-se a figura 2.4, verifica-se que para uma relação $Z/D = 2/3$ tem-se $\sigma/\sigma_0 = 58\%$.

Isto significa que a densidade de corrente a esta profundidade ainda é cerca de 58% da densidade de corrente na superfície do solo e, conseqüentemente, uma considerável parcela da corrente total deve penetrar o solo a uma profundidade maior que esta.

Contudo, vale ressaltar que para solos homogêneos a resistividade medida pela Configuração Wenner pode ser considerada como o valor médio da resistividade do solo para uma profundidade numericamente igual à separação entre eletrodos.

Além disso, deve-se atentar para o fato de que para solos heterogêneos, a distribuição de corrente ilustrada na figura anterior será modificada conforme o grau de não homogeneidade do solo, e a resistividade medida não pode ser considerada como o valor médio da resistividade do solo para uma profundidade igual à separação entre eletrodos.

2.4. SOLO DE 2 CAMADAS

Em geral os solos são NÃO HOMOGÊNEOS e estas não homogeneidades podem tomar várias formas. Em muitos casos há várias camadas de solo, as quais podem ser de argila, areia, cascalho, rochas ou camadas mistas. Estas camadas podem aproximadamente horizontais e paralelas à superfície do solo ou podem ser inclinadas de um ângulo em relação à superfície. O lençol d'água subterrâneo também constitui uma camada independente pois apresenta resistividade bastante diferente das outras camadas. Desta forma, é conveniente estratificar o solo em camadas para possibilitar uma determinação mais precisa da resistividade de solos não homogêneos..

A mais simples das estratificações supõe que o solo seja formado por 2 camadas: a primeira com resistividade ρ_1 e profundidade h e a segunda com resistividade ρ_2 e profundidade infinita.

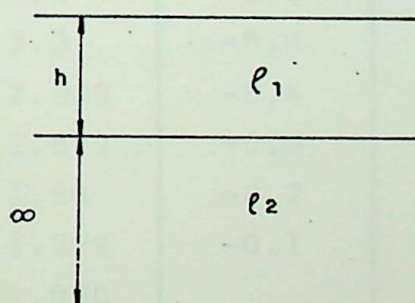


Figura 2.6

Apesar de ser apenas uma aproximação para muitos casos práticos, esta estratificação é o ponto de partida para estratificações mais complexas.

2.4.1. Coeficiente de reflexão (K)

Este coeficiente expressa a maior ou menor absorção da corrente que penetra no solo pelas camadas constituintes do mesmo. Varia entre +1 e -1 da seguinte forma: se a camada mais profunda tiver $\rho_2 = \infty$ então $K = +1$; se a camada mais profunda tiver $\rho_2 = 0$ então $K = -1$.

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} = \frac{\rho_2 / \rho_1 - 1}{\rho_2 / \rho_1 + 1} \quad (\text{Eq. 2.2})$$

A tabela seguinte fornece alguns valores de K em função da relação ρ_2 / ρ_1 .

K	ρ_2 / ρ_1	K	ρ_2 / ρ_1
+ 1.0	∞	-1.0	0.
+ 0.9	19.0	-0.9	0.0526
+ 0.8	9.0	-0.8	0.1111
+ 0.7	5.67	-0.7	0.1765
+ 0.6	4.0	-0.6	0.2500
+ 0.5	3.0	-0.5	0.3333
+ 0.4	2.333	-0.4	0.4286
+ 0.3	1.857	-0.3	0.5384
+ 0.2	1.50	-0.2	0.6667
+ 0.1	1.222	-0.1	0.8182
0	1.000		

Tabela 2.3

Quando o solo é homogêneo $\rho_1 = \rho_2$, portanto $K = 0$.

2.4.2. Equação dos potenciais no solo

Conforme a bibliografia⁽⁴⁶⁾, o desenvolvimento matemático das equações de Laplace para um solo estratificado em duas camadas leva à seguinte solução para o potencial criado em qualquer ponto da superfície do solo quando uma corrente é injetada neste:

$$V = \frac{I\rho_1}{2\pi} \left[\frac{1}{r} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\{r^2 + (2nh)^2\}^{1/2}} \right] \quad (\text{Eq. 2.3})$$

onde: I - corrente que penetra no solo

ρ_1 - resistividade da camada superficial do solo

r - distância do eletrodo que introduz corrente no solo ao ponto no qual se deseja saber o potencial

K - coeficiente de reflexão

n - índice que varia de 1 a ∞

h - profundidade da camada superficial de solo

2.4.3. Resistividade aparente do solo para a configuração Wenner

A configuração Wenner é mostrada na figura seguinte.

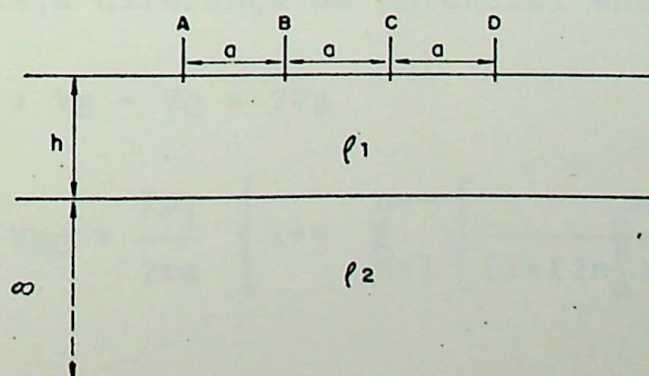


Figura 2.7

Nesta configuração, a corrente entra no solo através do eletrodo A e sai através do eletrodo D, sendo o potencial medido entre os eletrodos B e C.

Desta forma, o potencial no ponto B, devido à corrente que entra no solo pelo ponto A, vale:

$$V_B = \frac{I\rho}{2\pi} \left[\frac{1}{a} + 2 \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{K^n}{\{a^2 + (2nh)^2\}^{1/2}} \right] \quad (\text{Eq. 2.4})$$

O potencial no ponto B, devido à corrente que sai do solo pelo ponto D, vale:

$$V_B = - \frac{I\rho}{2\pi} \left[\frac{1}{2a} + 2 \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{K^n}{\{4a^2 + (2nh)^2\}^{1/2}} \right] \quad (\text{Eq. 2.5})$$

O potencial total no ponto B vale:

$$V_B = \frac{I\rho}{2\pi} \left\{ \frac{1}{2a} + \sum_{n=1}^{n=\infty} \left[\frac{K^n}{\{a^2 + (2nh)^2\}^{1/2}} - \frac{K^n}{\{4a^2 + (2nh)^2\}^{1/2}} \right] \right\} \quad (\text{Eq. 2.6})$$

Pela simetria do sistema:

$$V_C = - V_B \quad (\text{Eq. 2.7})$$

Assim, a diferença de potencial entre B e C vale:

$$V_{BC} = V_B - V_C = 2V_B \quad (\text{Eq. 2.8})$$

$$\therefore V_{BC} = \frac{I\rho}{2\pi a} \left\{ 1 + 4 \sum_{n=1}^{n=\infty} \left[\frac{K^n}{\{1 + (2n\frac{h}{a})^2\}^{1/2}} - \frac{K^n}{\{4 + (2n\frac{h}{a})^2\}^{1/2}} \right] \right\} \quad (\text{Eq. 2.9})$$

Logo;

$$2\pi a \frac{V_{BC}}{I} = \rho_1 \left\{ 1 + 4 \sum_{n=1}^{n=\infty} \left[\frac{K^n}{\left\{ 1 + \left(\frac{2nh}{a} \right)^2 \right\}^{1/2}} - \frac{K^n}{\left\{ 4 + \left(\frac{2nh}{a} \right)^2 \right\}^{1/2}} \right] \right\}$$

(Eq. 2.10)

A fração $\frac{V_{BC}}{I}$ do lado esquerdo da equação é a resistência medida R . Assim, o termo do lado esquerdo da equação vale $2\pi a R$. Em caso de solos homogêneos, $2\pi a R$ representa a resistividade do mesmo, sendo ela constante e independente de a . Em casos de solos heterogêneos, $2\pi a R$ representa a "resistividade aparente (ρ_a)" do mesmo, sendo ela uma grandeza variável com o espaçamento a .

Assim:

$$\frac{\rho_a}{\rho_1} = 1 + 4 \underbrace{\sum_{n=1}^{n=\infty} \left(\frac{K^n}{\left\{ 1 + \left(2n \frac{h}{a} \right)^2 \right\}^{1/2}} - \frac{K^n}{\left\{ 4 + \left(2n \frac{h}{a} \right)^2 \right\}^{1/2}} \right)}_F \quad (\text{Eq. 2.11})$$

$$\therefore \frac{\rho_a}{\rho_1} = 1 + 4 F \quad (\text{Eq. 2.12})$$

onde F é a soma da série infinita.

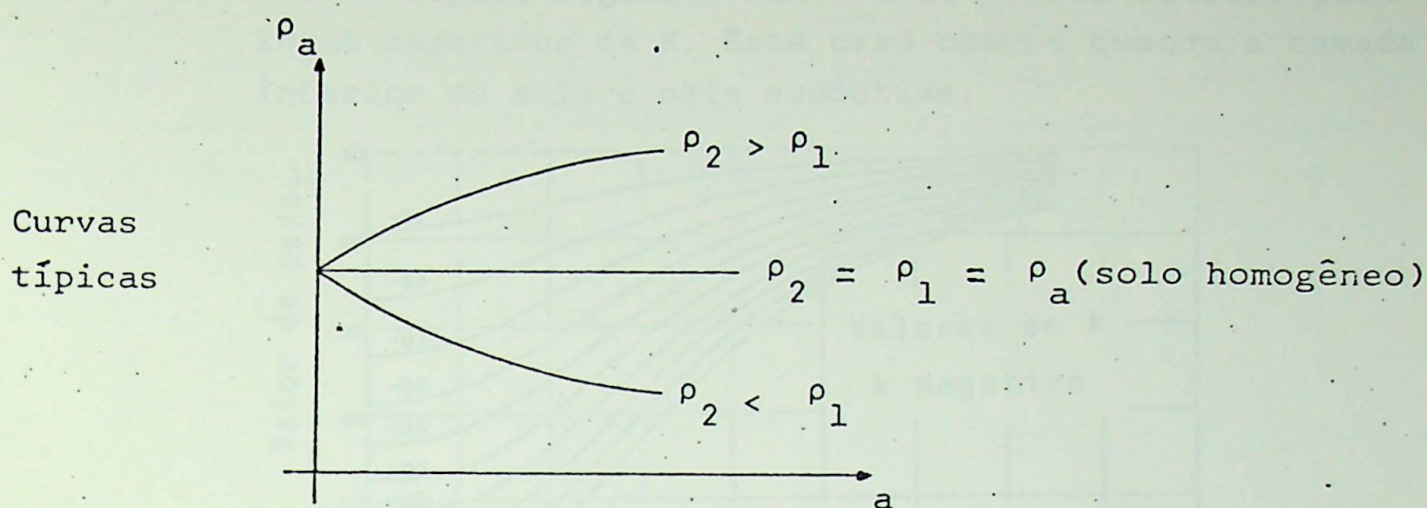


Figura 2.8

Note-se que para outra configuração de eletrodos que não seja a Configuração Wenner, a equação acima será diferente. Ou seja, só há sentido em falar-se sobre resistividade aparente de um solo, desde que associe-se à mesma uma determinada configuração de eletrodos e um certo espaçamento entre os mesmos.

Utilizando-se a equação 2.12, é possível calcular para cada valor de K (-1 a +1) uma curva que relacione ρ_a/ρ_1 com h/a . A figura seguinte ilustra as curvas obtidas para valores negativos de K . Este caso ocorre quando a camada inferior do solo é mais condutiva.

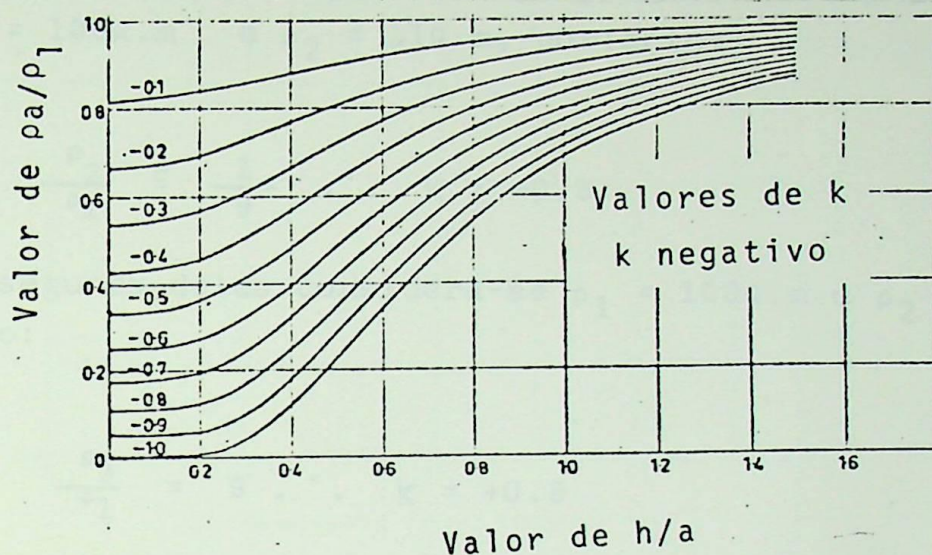


Figura 2.9

Para valores positivos de K é mais conveniente calcular o inverso da relação ρ_a/ρ_1 pois isto resulta em números menores que 1. Assim:

$$\sigma_a = \frac{1}{\rho_a} \text{ e } \sigma_1 = \frac{1}{\rho_1} \quad (\text{Eq. 2.13})$$

As curvas seguintes mostram as relações entre σ_a/σ_1 e h/a para valores positivos de K . Este caso ocorre quando a camada inferior do solo é menos condutiva.

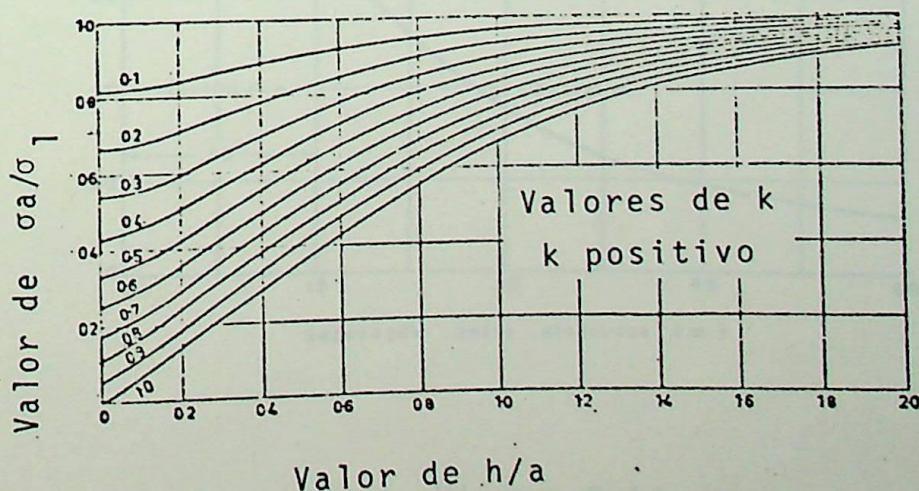


Figura 2.10

2.4.5. Relação entre ponto de inflexão da curva $\rho_a \times a$ e profundidade da camada superior do solo

Alguns exemplos de tipos de curvas de $\rho_a \times a$ são ilustrados nas figuras seguintes. Na primeira delas considera-se $\rho_1 = 100 \Omega.m$ e $\rho_2 = 11 \Omega.m$, portanto:

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} \approx \frac{1}{9} \therefore K = -0.8$$

Na segunda delas considera-se $\rho_1 = 100 \Omega.m$ e $\rho_2 = 900 \Omega.m$, logo:

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = 9 \therefore K = +0.8$$

Em ambos os casos $h = 15m$.

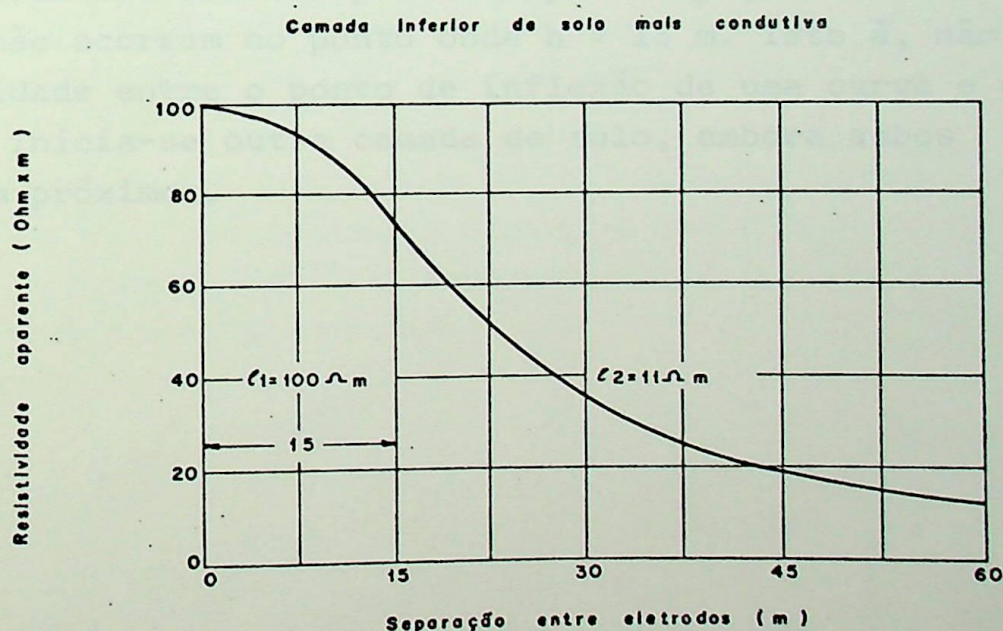


Figura 2.11

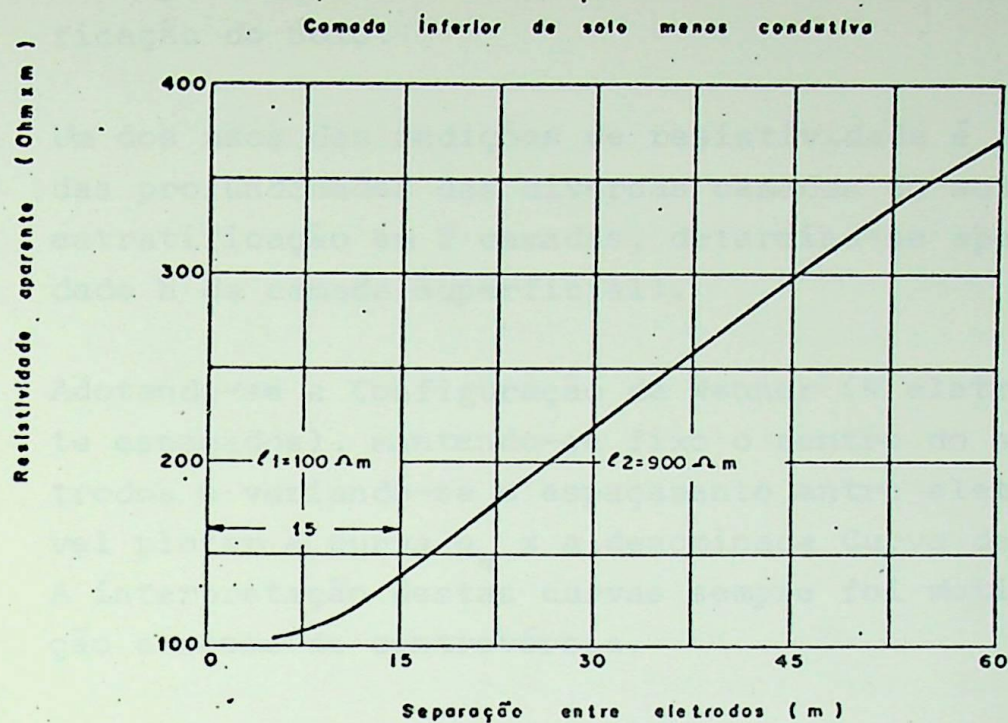


Figura 2.12

Apesar de existirem pontos de inflexão nestas curvas, é difícil localizá-los com precisão por inspeção. Pode-se verificar que não ocorrem no ponto onde $h = 15$ m. Isto é, não há uma identidade entre o ponto de inflexão de uma curva e o ponto no qual inicia-se outra camada de solo, embora ambos geralmente sejam próximos.

2.4.6. Interpretação das Curvas de Profundidade visando a Estratificação do Solo.

Um dos usos das medições de resistividade é a determinação das profundidades das diversas camadas do solo (No caso da estratificação em 2 camadas, determina-se apenas a profundidade h da camada superficial).

Adotando-se a Configuração de Wenner (4 eletrodos igualmente espaçados), mantendo-se fixo o centro do sistema de eletrodos e variando-se o espaçamento entre eletrodos, é possível plotar a curva $\rho_a \times a$, denominada Curva de Profundidade. A interpretação destas curvas sempre foi motivo de preocupação e mesmo de controvérsia.

Os métodos de interpretação destas curvas, até agora desenvolvidos, podem ser grosseiramente divididos em duas classes ⁽⁴⁶⁾. A primeira delas é inteiramente empírica e baseada parcialmente em experiências. A segunda consiste de vários métodos teóricos. Há dois outros métodos que são uma combinação destas duas classes principais. De qualquer forma deve-se salientar que a experiência profissional do engenheiro associada a bons conhecimentos de geologia e eletromagnetismo é muito importante num trabalho de definição da estratificação do solo de uma certa região.

Devido à vasta quantidade de métodos de interpretação existentes ⁽⁴⁶⁾, serão abordados alguns métodos de interesse histórico, e aqueles que obtiveram mais sucesso tendo, portanto, sido mais utilizados.

2.4.6.1. Métodos Empíricos.

a) Método de Gish e Rooney

Este método supunha que as medições feitas em campo davam o valor médio da resistividade para uma profundidade igual à separação entre eletrodos. A partir daí, deduzia-se utilizando a Curva de Profundidade levantada em campo que outra camada de solo seria atingida na profundidade em que ocorresse uma quebra ou mudança na curvatura.

Porém, conforme o exposto no item 2.3, a resistividade medida só pode ser considerada como valor médio para o solo a uma profundidade igual à separação entre eletrodos se o solo for homogêneo.

E conforme o exposto no item 2.4.5: Não há uma identidade entre o ponto de inflexão e o ponto onde se inicia outra camada do solo, embora ambos geralmente sejam próximos.

Vê-se daí que o método pode levar a conclusões falsas.

b) Método dos Pontos de Inflexão

Conforme exposto no item 2.4.5, não se pode dizer que há uma identidade entre o ponto de inflexão de uma curva $\rho_a \times a$ e a profundidade da camada superficial do solo. A observação das curvas do item 2.4.4 mostra que em cada curva há um ponto de inflexão, apesar deste ponto não ser facilmente localizado por inspeção.

Entretanto, Lancaster-Jones sugeriram que este ponto de

inflexão ocorre próximo ao ponto onde $a = 3h/2$. Assim, a profundidade da camada mais profunda poderia ser tomada como sendo igual a $2/3$ da separação entre eletrodos para a qual o ponto de inflexão ocorre.

O ponto de inflexão ocorre quando:

$$\frac{d^2(\rho_a/\rho_1)}{da^2} = 0 \quad (\text{Eq. 2.14})$$

O valor de h/a , para o qual isto ocorre, pode ser determinado a partir da equação 2.12:

$$\rho_a/\rho_1 = 1 + 4F$$

A figura seguinte apresenta os valores de a/h que tornam o termo $d^2(\rho_a/\rho_1)/da^2$ igual a zero, para todos os valores possíveis de k .

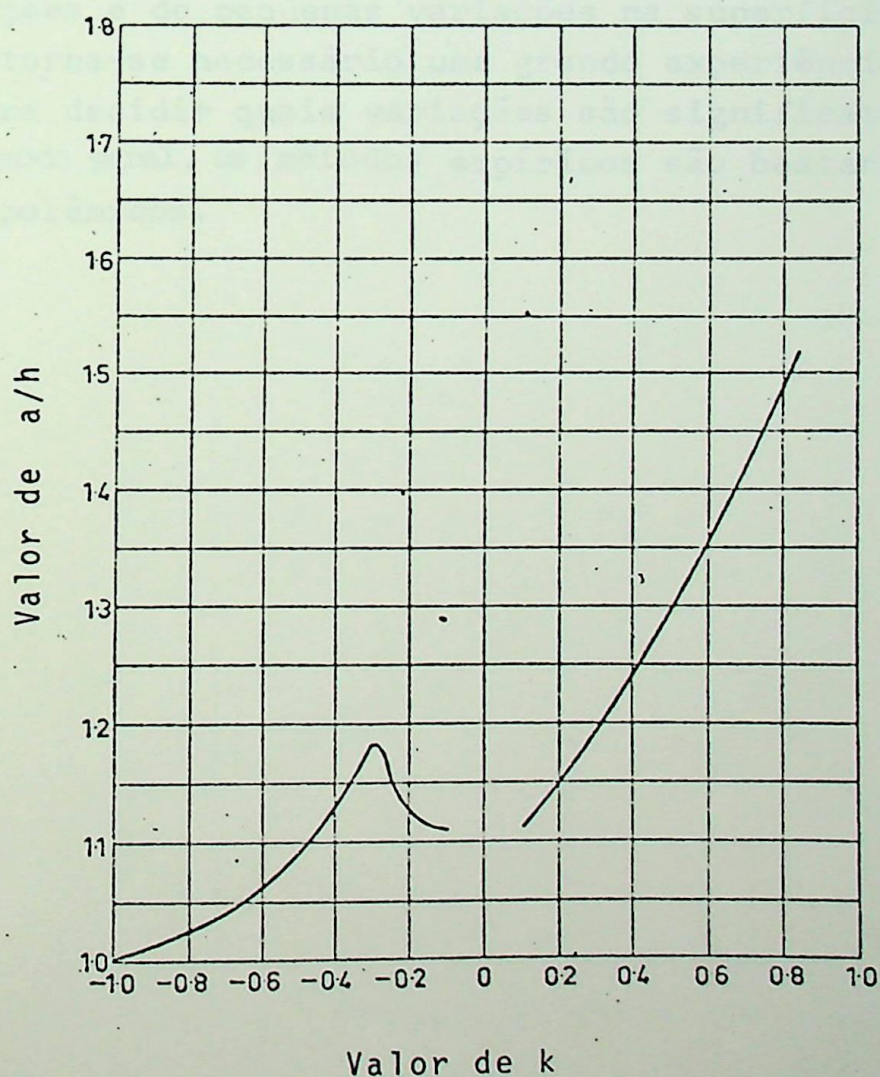


Figura 2.13

Observa-se que a relação a/h varia entre 1.0 e 1.5 e só se aproxima do valor 1.5 sugerido por Lancaster-Jones quando K aproxima-se de +1.0. Isto é, quando a camada inferior tem altíssima resistividade.

Isto significa que mesmo localizando-se com precisão o ponto de inflexão, este não deve ser utilizado como meio de interpretação das curvas de profundidade. Pode-se concluir que este método pode conduzir a resultados falsos.

c) Outros métodos empíricos

Alguns métodos empíricos sugerem a diferenciação da Curva de Profundidade, mas isto pode permitir que irregularidades acidentais sejam enfatizadas. Estas irregularidades acidentais podem ser devidas a erros de instrumentos, de observações e de pequenas variações na superfície do solo. Assim, torna-se necessário uma grande experiência do observador para decidir quais variações são significativas ou não. De um modo geral, os métodos empíricos são bastantes subjetivos e polêmicos.



Figura 2.1a

2.4.6.2. Métodos teóricos.

Em geral o maior empecilho para a utilização destes métodos é que eles consideram condições ideais, isto é, camadas isotrópicas uniformes e paralelas à superfície do solo. Apesar disto, em geral, os resultados obtidos são úteis. Quando há falhas grandes, isto significa que as condições reais diferem muito das assumidas teoricamente.

a) 1º método de TAGG

Observe-se a figura seguinte que ilustra uma Curva de Profundidade típica.

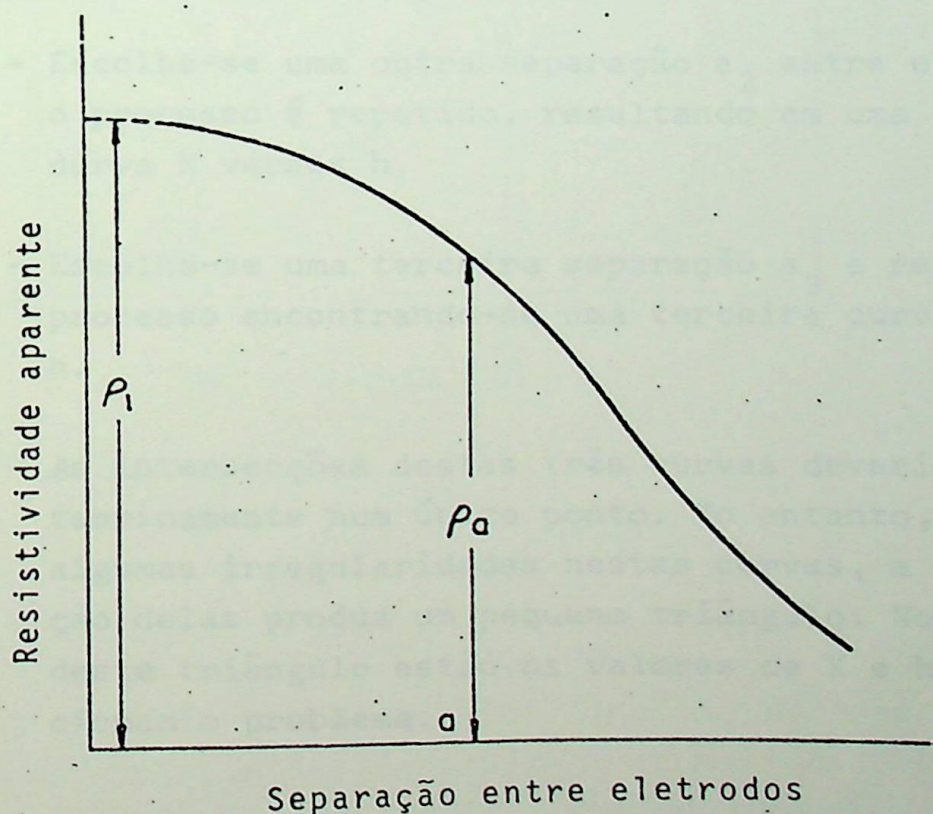


Figura 2.14

Etapas do método:

- É possível extrapolar a curva para a esquerda até que a mesma corte o eixo de ρ_a . Neste ponto de corte, tem-se $\rho_a = \rho_1$. Fica assim determinado o valor de ρ_1 e, conseqüentemente, o valor de σ_1 .

Em seguida, toma-se uma separação entre eletrodos igual a a_1 . Lê-se ρ_{a1} na figura e calcula-se σ_{a1} . As relações ρ_{a1}/ρ_1 e σ_{a1}/σ_1 são então calculadas.

- Através das Curvas Padronizadas do item 2.4.4, determina-se para cada valor de K o valor h/a correspondente.
- Com esta série de valores de h/a, determinados a partir das Curvas Padronizadas, multiplica-se cada valor h/a por a_1 para obter uma série de valores h.
- Plota-se, então, uma curva K versus h.
- Escolhe-se uma outra separação a_2 entre eletrodos e o processo é repetido, resultando em uma segunda curva K versus h.
- Escolhe-se uma terceira separação a_3 e repete-se o processo encontrando-se uma terceira curva K versus h.
- As intersecções destas três curvas deveriam ocorrer teoricamente num único ponto. No entanto, devido a algumas irregularidades nestas curvas, a intersecção delas produz um pequeno triângulo. No centro deste triângulo estão os valores de K e h que solucionam o problema.

- Sendo ρ_1 e K conhecidos, pode-se determinar o valor de ρ_2 . Assim, todas as incógnitas (ρ_1 , ρ_2 e h) ficam determinadas. Está feita a estratificação.

A figura seguinte ilustra um caso típico para eletrodos afastados de 45 a 120 m, onde resultaram:

$$K = 0.702$$

$$h = 43\text{m}$$

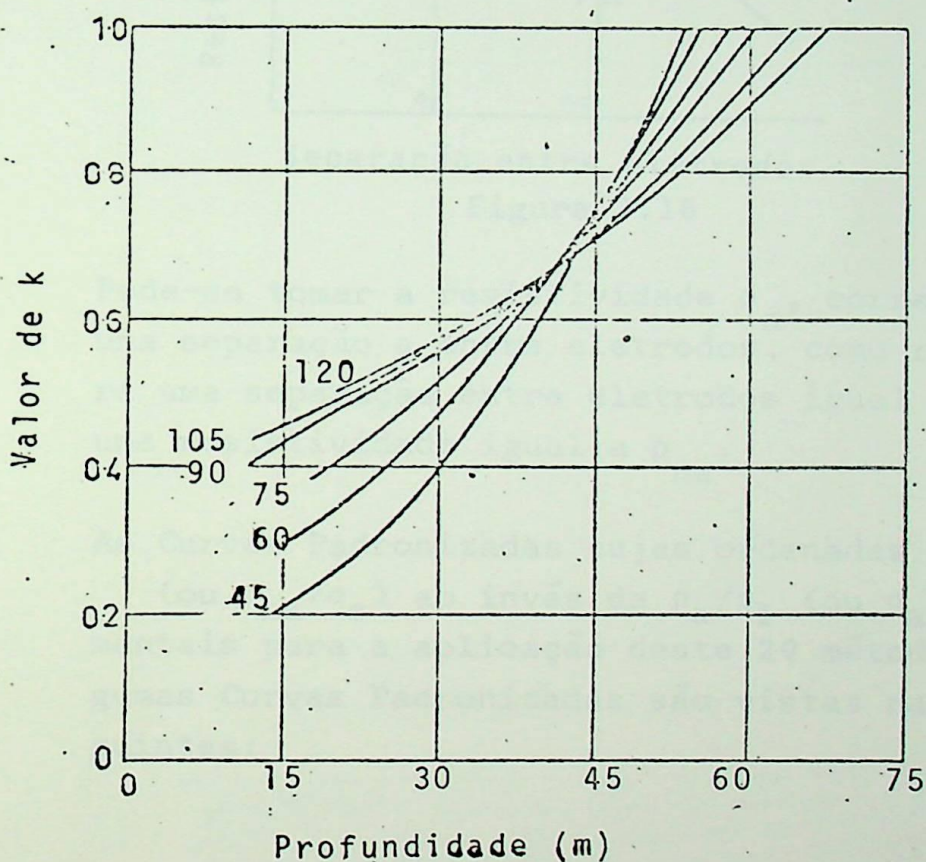


Figura 2.15

b) 2º método de TAGG

A determinação da resistividade ρ_1 através da simples extrapolação das Curvas de Profundidade sempre possibilita alguns erros no valor encontrado. Assim, surgiu a idéia de tomar uma resistividade conhecida, correspondente a um determinado espaçamento entre eletrodos, e utilizá-la como referência ao invés de ρ_1 .

Observe-se a figura seguinte:

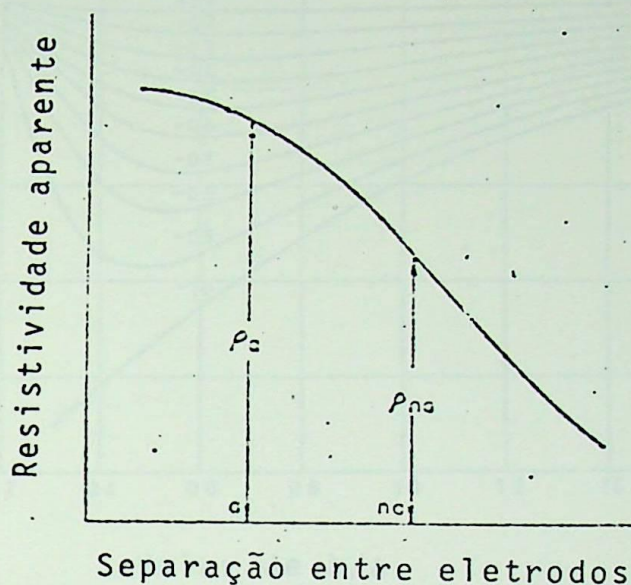


Figura 2.16

Pode-se tomar a resistividade ρ_a , correspondente a uma separação a entre eletrodos, como referência. Para uma separação entre eletrodos igual a na , tem-se uma resistividade igual a ρ_{na} .

As Curvas Padronizadas cujas ordenadas expressam ρ_{na}/ρ_a (ou σ_{na}/σ_a) ao invés de ρ_a/ρ_1 (ou σ_a/σ_1) são fundamentais para a aplicação deste 2º método de TAGG. Algumas Curvas Padronizadas são vistas nas figuras seguintes:

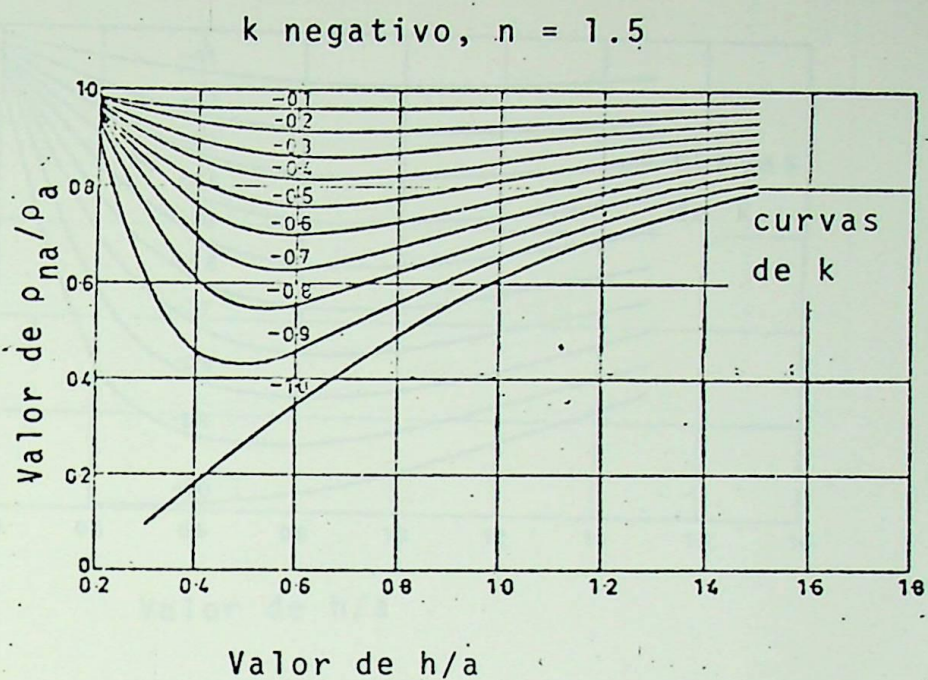


Figura 2.17

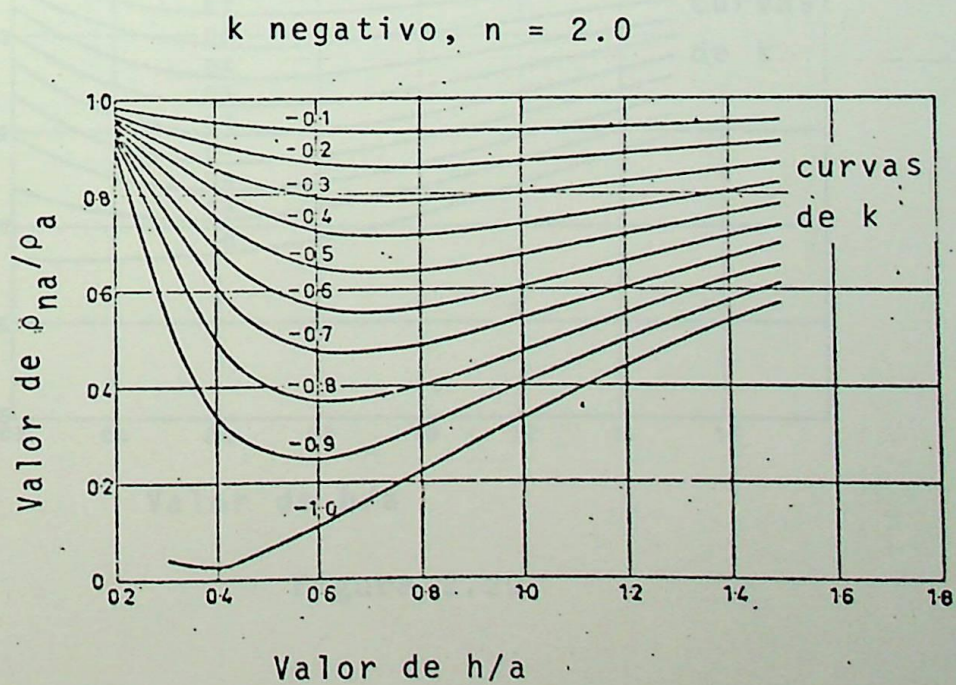


Figura 2.18

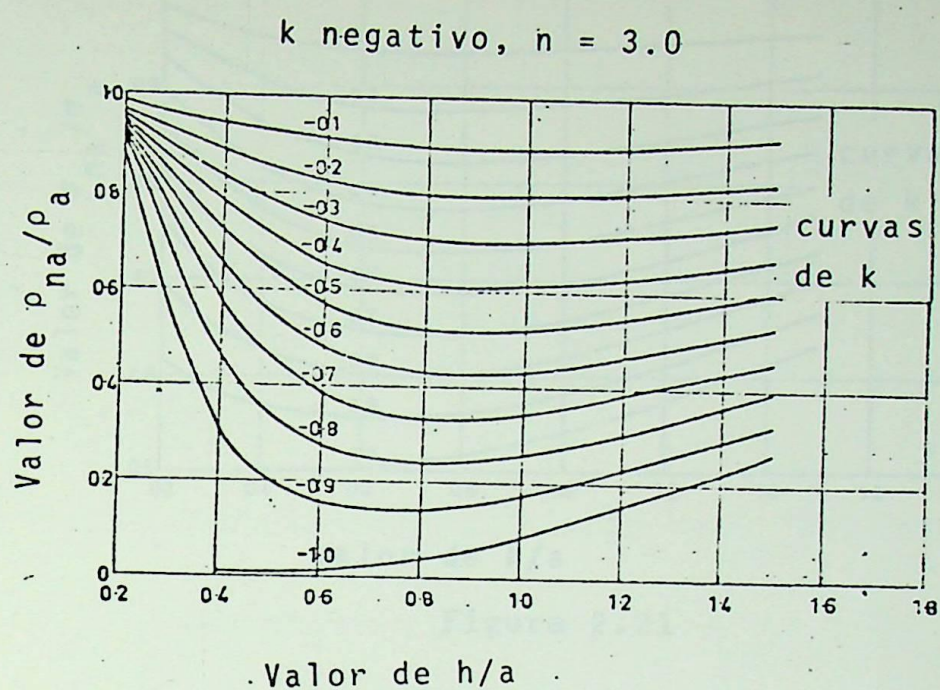


Figura 2.19

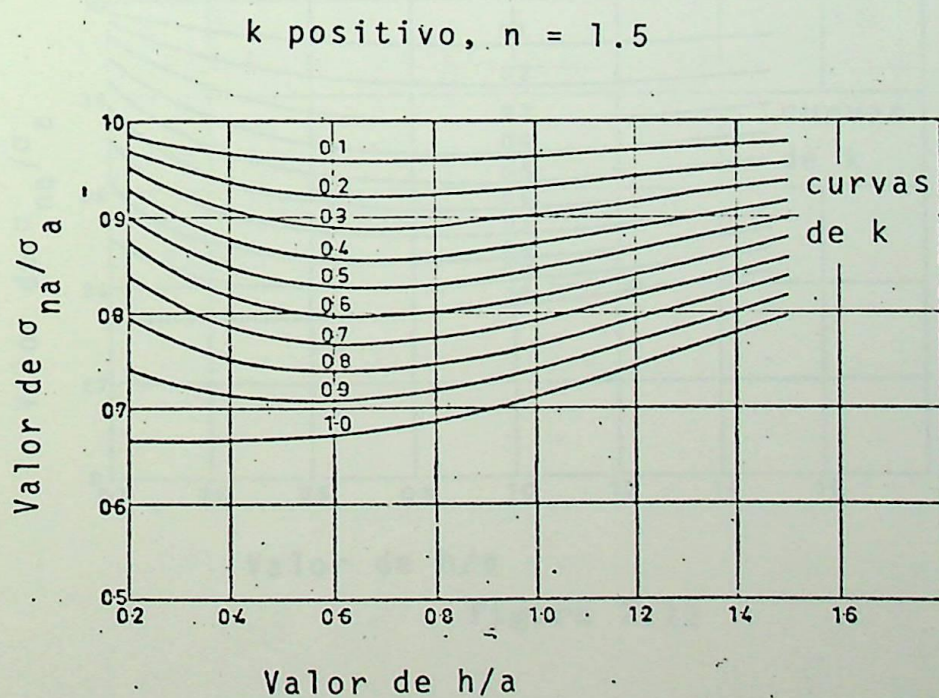


Figura 2.20

k positivo, $n = 2.0$

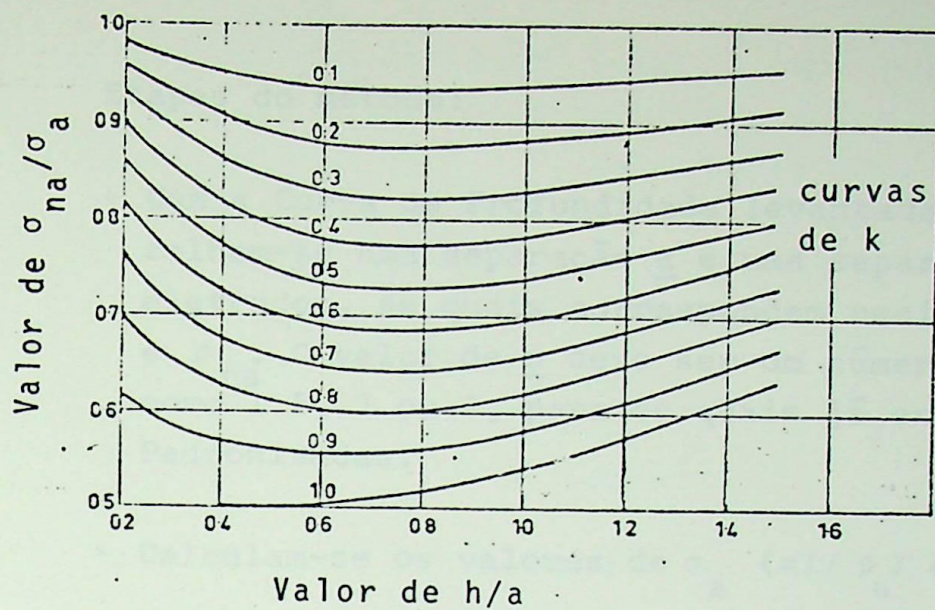


Figura 2.21

k positivo, $n = 3.0$

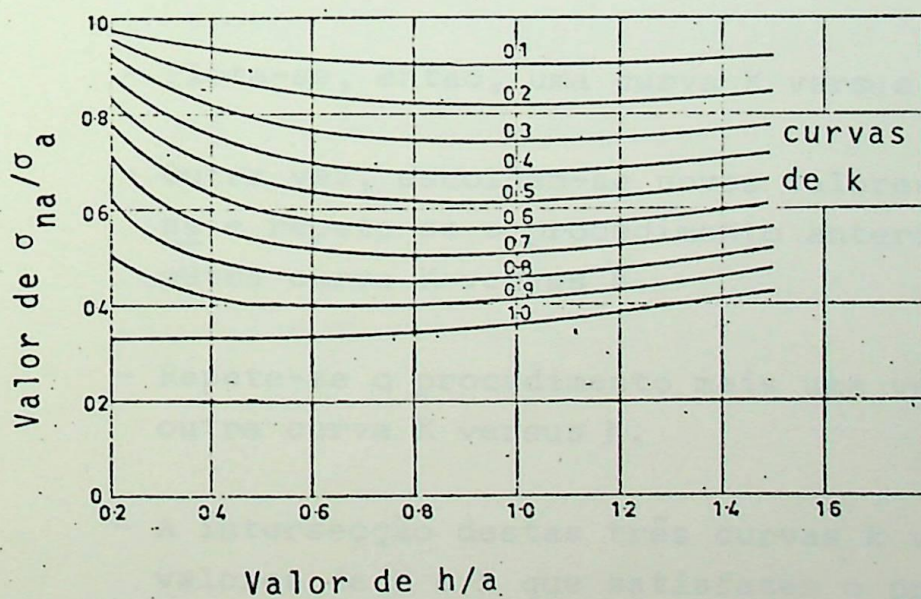


Figura 2.22

Etapas do método:

- Com a Curva de Profundidade levantada em campo, es-
colhem-se uma separação $\underline{a}$ e uma separação $\underline{n_a}$ entre
eletrodos, às quais correspondem resistividades ρ_a
e ρ_{n_a} . O valor de $\underline{n}$ deve ser um número conveniente
como 1.5, 2 ou 3, para os quais já existem Curvas'
Padronizadas.
- Calculam-se os valores de $\sigma_a (=1/\rho_a)$ e $\sigma_{n_a} (=1/\rho_{n_a})$
- Calculam-se as relações ρ_{n_a} / ρ_a e σ_{n_a} / σ_a
- Dependendo do valor escolhido para $\underline{n}$, entra-se nas
Curvas Padronizadas correspondentes e para cada va-
lor de K, determina-se um valor h/a .
- Com esta série de valores h/a , multiplica-se cada'
um deles pelo valor da separação $\underline{a}$ já escolhida e
obtem-se uma série de valores para h .
- Plota-se, então, uma curva K versus h .
- Outra vez, escolhem-se novos valores para $\underline{a}$, $\underline{n}$ e
 $\underline{n_a}$ e repete-se o procedimento anterior. Obtem-se '
outra curva K versus h .
- Repete-se o procedimento mais uma vez e traça-se '
outra curva K versus h .
- A intersecção destas três curvas k versus h dá os
valores de K e h que satisfazem o problema.

- Agora, com um valor medido ρ_a qualquer, com o valor correspondente da separação a entre eletrodos e com os valores de h e K , calcula-se através da equação 2.12 o valor de ρ_1 .
- Uma vez que os valores de K e ρ_1 já estão definidos, pode-se calcular ρ_2 .
- Está feita a estratificação.

2.4.7. Resistividade Equivalente a um solo de duas camadas

A bibliografia⁽⁴⁷⁾ apresenta o equacionamento matemático que permite determinar-se a resistividade equivalente a um solo de duas camadas. Na citada referência, bem como em diversas outras⁽¹⁾⁽³⁵⁾, são apresentados gráficos a partir dos quais conhecendo-se os valores de ρ_1 , ρ_2 e h pode-se determinar a resistividade equivalente do solo (ρ_e). Os gráficos seguintes⁽⁴⁷⁾ permitem este cálculo.

Sugere-se neste trabalho que o gráfico da figura 2.23a seja utilizado para determinar o valor de ρ_e a ser utilizado aos cálculos dos acoplamentos indutivos (Indução Eletromagnética) e que o gráfico da figura 2.23b seja utilizado para subsidiar a escolha de um valor para ρ_e a ser utilizado nos cálculos dos acoplamentos resistivos (Elevação do Potencial do Solo).

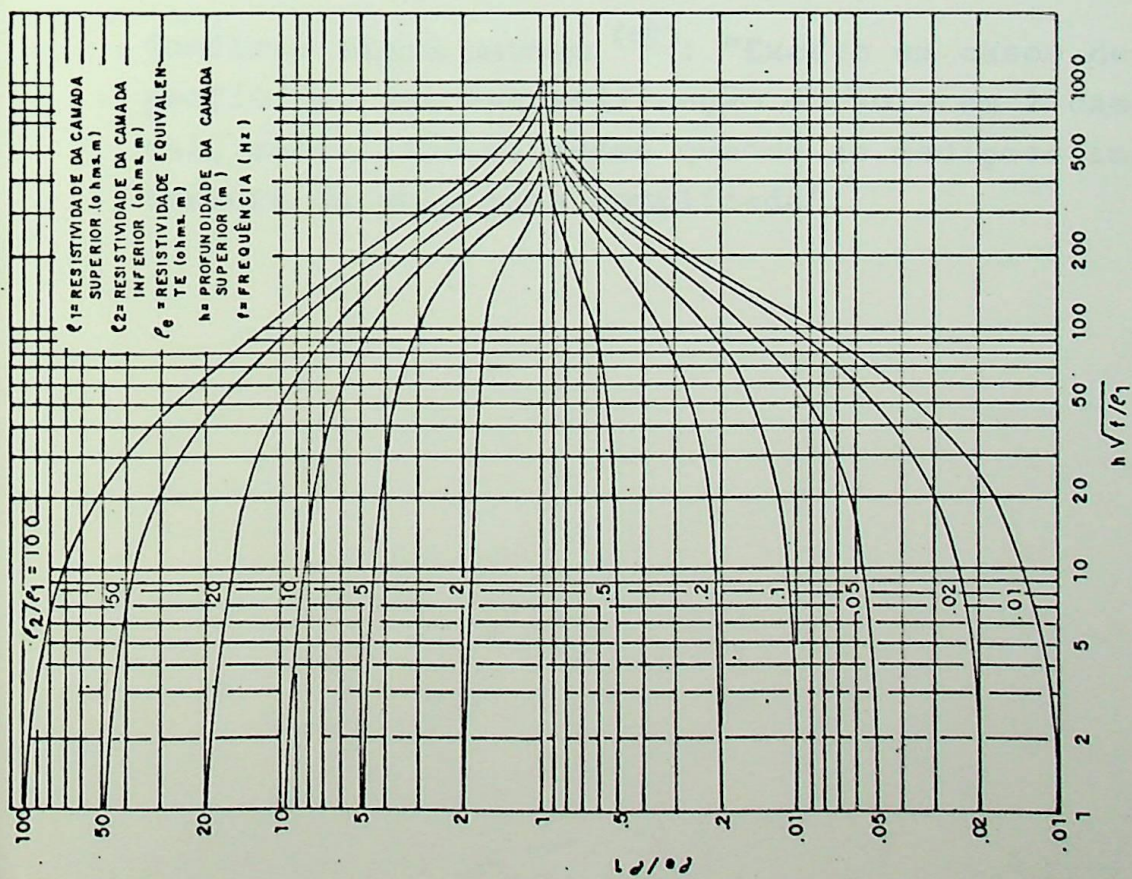


FIGURA 2.23a

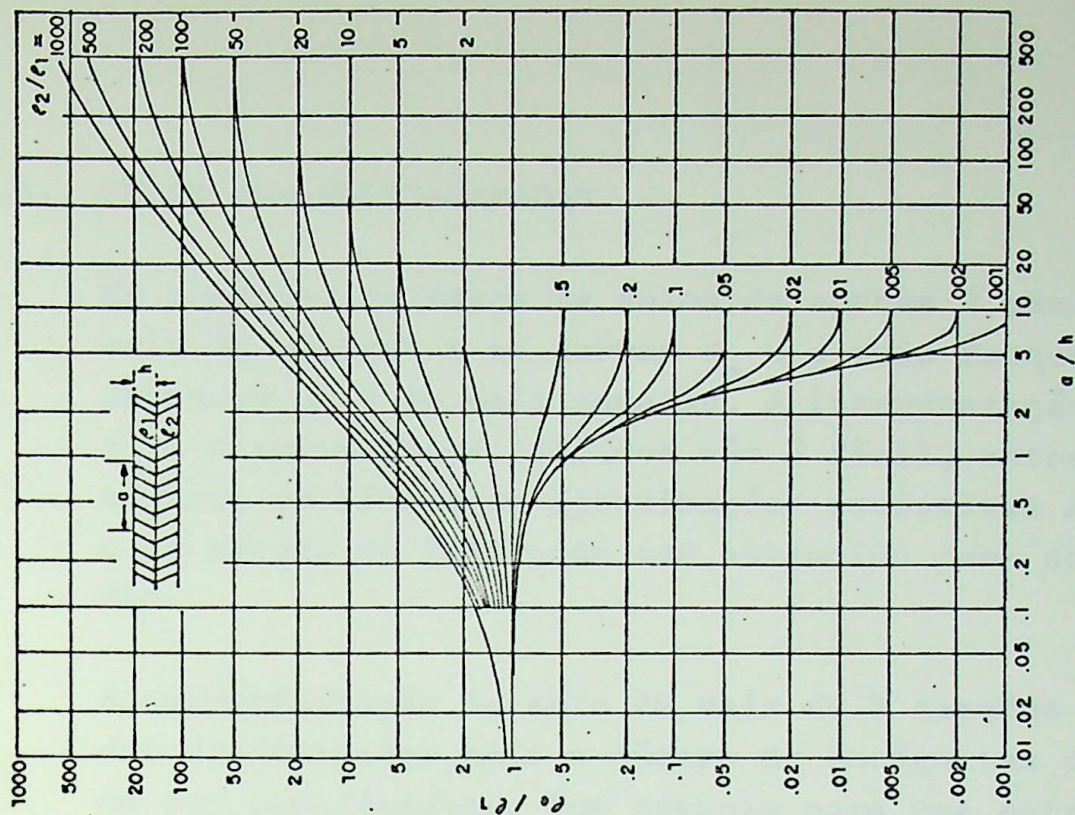


FIGURA 2.23b

2.5. SOLOS COM MULTI-CAMADAS

Na prática, os casos de solos de apenas 2 camadas são difíceis de ocorrer e as curvas $\rho_a \times a$ mais frequentes sugerem a presença de 3 ou mais camadas. A interpretação das curvas $\rho_a \times a$ por métodos teóricos não é fácil, entretanto Pirson sugeriu um método de aproximações sucessivas através do qual o 1º método de TAGG pode ser estendido para solos de 3 camadas.

A estratificação do solo em mais de 3 camadas apresenta grandes dificuldades, pois o número de incógnitas do problema pode ser considerável. Por exemplo, para uma estratificação em 4 camadas tem-se 7 incógnitas: $\rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_4, h_1, h_2$ e h_3 . Estas incógnitas são todas independentes entre si e podem assumir qualquer valor. Com um número grande de camadas torna-se difícil produzir uma série de soluções que satisfaçam todos os casos práticos.

Conforme alguns autores ⁽⁴⁷⁾: "Exceto em casos de prospecção geofísica, uma estratificação do solo em 2 camadas é, em geral, satisfatória, mesmo quando as medições indicam uma estrutura de solo mais complicada".

2.6. TIPO DE RESISTIVIDADE A CONSIDERAR EM FUNÇÃO DA ANÁLISE A EFETUAR

Foi visto neste capítulo que os solos são em geral NÃO HOMO-
GÊNEOS podendo ser representados satisfatoriamente através
da estratificação dos mesmos em apenas duas camadas.

Entretanto; os equacionamentos matemáticos apresentados nos
capítulos seguintes foram desenvolvidos para solos constituí-
dos de uma única camada. Assim, torna-se necessário definir
um valor único de resistividade (ρ) que possa representar a
dequadamente o solo (já estratificado em duas camadas de re-
sistividades ρ_1 e ρ_2) em função da análise a efetuar.

A definição deste valor de resistividade pode ser muito difí-
cil por exigir uma grande sensibilidade do engenheiro ao pro-
blema sob análise. No presente trabalho foram definidas as
seguintes regras simplificadoras:

- As resistências de arranjos de aterramento devem ser calcu-
ladas com base na resistividade aparente do solo vista pe-
lo arranjo.
- Nos demais cálculos deverá ser utilizada a resistividade
equivalente conforme foi definida no item 2.4.7.

2.7. CONCLUSÕES

Neste capítulo foi enfocado o importante e difícil problema da determinação da resistividade elétrica do solo.

Do exposto pode-se concluir que: O tema abordado é bastante complexo e uma melhor modelagem do solo pode ser obtida à medida que seja maior a sensibilidade do engenheiro para o problema em questão; A resistividade medida na configuração Wenner só pode ser considerada como o valor médio de resistividade do solo para uma profundidade numericamente igual a separação entre eletrodos, em caso de solos homogêneos; Só há sentido em falar-se sobre resistividade aparente de um solo, desde que se associe-se à mesma, uma determinada configuração de eletrodos e um certo espaçamento entre os mesmos; Não há uma identidade entre o ponto de inflexão de uma curva de profundidade ($\rho_a \times a$) e a profundidade onde se inicia uma nova camada de solo, embora ambos geralmente sejam próximos; Para uma região geográfica, pode ser necessário adotar diferentes valores de resistividade do solo em função do tipo de análise que se pretende efetuar.

Os principais méritos deste capítulo são: sugerir metodologia simples que possibilita a determinação do valor da resistividade equivalente do solo a ser utilizado no cálculo dos acoplamentos indutivos e que fornece subsídios para a escolha do valor da resistividade equivalente a ser utilizado no cálculo dos acoplamentos resistivos; e definir o tipo de resistividade de solo que deve ser considerado em função da análise a ser realizada.

CAPÍTULO 3 - PARÂMETROS ELÉTRICOS DAS TUBULAÇÕES METÁLICAS

3.1. INTRODUÇÃO

Os parâmetros elétricos das tubulações metálicas constituem in formações importantíssimas para o cálculo dos perfis de tensões induzidas pelas linhas de transmissão sobre tubulações próxi mas.

Este capítulo apresenta um método de cálculo dos parâmetros elé tricos das tubulações metálicas, o qual poderá ser utilizado para tubulações aéreas ou enterradas que sejam ou não revesti das com vários tipos de materiais anti-corrosivos usuais. Entre tanto, quando se trata de tubulações enterradas, este método recai em equações transcendentais as quais precisam ser resol vidas por processos iterativos. Desta forma é sugerido um méto do não iterativo bastante simples para cálculo destes parâme tros, o qual fornece valores aproximados que podem ser utiliza dos como boas estimativas para inicializar os processos itera tivos anteriormente citados.

Finalmente, são citadas algumas conclusões importantes do capí tulo.

3.2. MÉTODO DE CÁLCULO DOS PARÂMETROS Z , Y , γ E Z_c DA TUBULAÇÃO

3.2.1. Cálculo da Impedância Linear da Tubulação (Z)

3.2.1.1. Tubulação Aérea

Considere-se a figura abaixo:

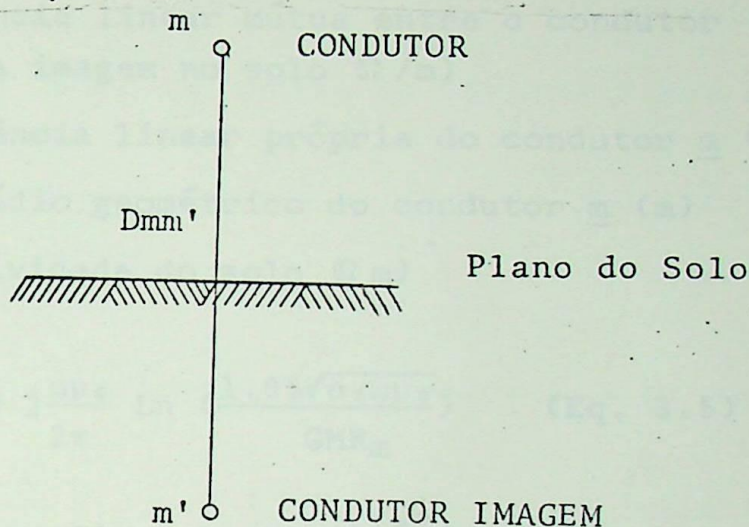


Figura 3.1

Utilizando-se as equações de Carson⁽¹⁴⁾⁽³²⁾, tem-se que:

$$Z_{mm} = Z'_{mm} + Z_g - 2Z_{mg} \quad (\text{Eq. 3.1})$$

onde:

$$Z'_{mm} = r_m + j \frac{\omega \mu_0}{2 \pi} \ln \left(\frac{1}{\text{GMR}_m} \right) \quad (\text{Eq. 3.2})$$

$$Z_g = \frac{\omega \mu_0}{8} \quad (\text{Eq. 3.3})$$

$$Z_{mg} = j \frac{\omega \mu_0}{4 \pi} \ln \frac{1}{1.85 \sqrt{\rho / \omega \mu_0}} \quad (\text{Eq. 3.4})$$

sendo:

Z_{mm} - Impedância linear própria do condutor m , considerando que o retorno de corrente é feito pelo solo (Ω/m).

- Z'_{mm} - Impedância linear própria do condutor $\underline{m}$ sem considerar o retorno pelo solo (Ω/m)
 Z_g - Impedância linear do caminho de retorno pelo solo $\underline{m'}$ (Ω/m).
 Z_{mg} - Impedância linear mútua entre o condutor $\underline{m}$ e a sua imagem no solo (Ω/m)
 r_m - Resistência linear própria do condutor $\underline{m}$ (Ω/m)
 GMR_m - Raio médio geométrico do condutor $\underline{m}$ (m)
 ρ - Resistividade do solo (Ωm)

logo:

$$Z_{mm} = r_m + \frac{\omega\mu_0}{8} + j \frac{\omega\mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{1.85\sqrt{\rho/\omega\mu_0}}{GMR_m} \right) \quad (\text{Eq. 3.5})$$

Conforme bibliografia consultada⁽⁴²⁾, para um condutor tubular o raio médio geométrico (GMR) é igual ao raio $\underline{a}$ ($= \frac{D}{2}$) do mesmo. Assim:

$$Z_{mm} = r_m + \frac{\omega\mu_0}{8} + j \frac{\omega\mu_0}{2\pi} \ln \frac{1.85\sqrt{\rho/\omega\mu_0}}{(D/2)} \quad (\text{Eq. 3.6})$$

sendo:

D - diâmetro médio do condutor tubular (m)

Alguns autores⁽¹⁴⁾⁽³⁹⁾ demonstram que o efeito pelicular (skin) é responsável por uma impedância linear, adicional à anterior (Z_{mm}), cujo valor é dado por

$$Z_{\text{skin}} = \frac{\sqrt{\rho_T \mu_T \cdot \omega/2}}{\pi D} (1+j1) \quad (\text{Eq. 3.7})$$

sendo:

ρ_T - Resistividade do material do condutor tubular (Ωm)

μ_T - Permeabilidade magnética do material do condutor tubular (H/m)

Desta forma, a impedância linear da tubulação vale

$$Z = Z_{mm} + Z_{skin}$$

$$\therefore Z = r_m + \frac{\omega\mu_0}{8} + \frac{\sqrt{\rho_T \mu_T \omega/2}}{\pi D} + j \left[\frac{\omega\mu_0}{2\pi} \ln \frac{3.7 \sqrt{\rho / \omega\mu_0}}{D} + \frac{\sqrt{\rho_T \mu_T \omega/2}}{\pi D} \right] \quad (\text{Eq. 3.8})$$

Em geral, despreza-se o termo r_m devido ao seu valor ser muito inferior ao valor de

$$\frac{\omega\mu_0}{8} + \frac{\sqrt{\rho_T \mu_T \omega/2}}{\pi D}$$

Entretanto, desejando-se considerá-lo seu valor é dado por

$$r_m = \rho_T \frac{1}{\pi a_1^2 - \pi a_2^2} \quad \Omega/m \quad (\text{Eq. 3.9})$$

sendo:

$$a_1 - \text{raio externo da tubulação } (= a + \frac{t}{2})$$

$$a_2 - \text{raio interno da tubulação } (= a - \frac{t}{2})$$

$$a - \text{raio médio da tubulação (m)}$$

$$t - \text{espessura da tubulação (m)}$$

Alguns autores⁽⁰⁴⁾⁽¹⁹⁾ desprezam o termo r_m e apresentam a equação conforme mostrado a seguir:

$$Z = \frac{\omega\mu_0}{8} + \frac{\sqrt{\rho_T \mu_T \omega/2}}{\pi D} + j \left[\frac{\omega\mu_0}{2\pi} \ln \frac{3.7 \sqrt{\rho / \omega\mu_0}}{D} + \frac{\sqrt{\rho_T \mu_T \omega/2}}{\pi D} \right] \quad (\text{Eq. 3.10})$$

Há autores⁽¹²⁾ que denominam impedância interna da tubulação (Z_i) ao termo:

$$Z_i = \frac{\omega\mu_0}{8} + \frac{\sqrt{\rho_T \mu_T \omega/2}}{\pi D} (1 + j) \quad (\text{Eq. 3.11})$$

Assim, a impedância linear das tubulações aéreas vale:

$$Z = Z_i + j \frac{\omega\mu_0}{2\pi} \ln \frac{3.7\sqrt{\rho/\omega\mu_0}}{D} \quad (\Omega/\text{m}) \quad (\text{Eq. 3.12})$$

3.2.1.2. Tubulação enterrada

Os mesmos autores⁽¹²⁾ citam que, a impedância linear das tubulações enterradas é dada pela expressão:

$$Z = Z_i + j \frac{\omega\mu_0}{2\pi} \ln \frac{1.85}{a' \sqrt{\gamma^2 + j\omega\mu_0 \left(\frac{1}{\rho} + j\omega\epsilon\right)}} \quad (\text{Eq. 3.13})$$

$$\text{onde: } a' = \sqrt{a^2 + 4\bar{h}^2} \quad (\text{Eq. 3.14})$$

sendo: Z_i - impedância interna da tubulação (Ω/m)
já definida no item 3.2.1.1

a' - raio equivalente da tubulação (m)

a - raio médio da tubulação (m)

$\bar{h}$ - profundidade de enterramento da tubulação (m)

γ - constante de propagação da tubulação (m^{-1})

ρ - resistividade do solo (Ωm)

ϵ - permissividade elétrica do solo (F/m)

Note-se daí que Z só poderá ser calculado após conhecer-se o valor de γ .

3.2.2. Cálculo da Admitância Linear da Tubulação para a Terra (Y)

3.2.2.1. Tubulação aérea

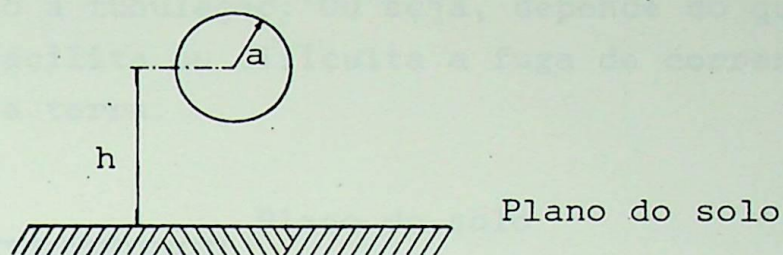


Figura 3.2

Conforme conhecida referência⁽⁴³⁾, sabe-se que a condutância (G) e a capacitância (C) lineares de um condutor aéreo para a terra são dadas por:

$$G \approx 0 \quad \text{S/m} \quad (\text{Eq. 3.15})$$

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{2h}{a}} \quad \text{F/m} \quad (\text{Eq. 3.16})$$

sendo:

h - altura do centro da tubulação para o solo (m)

a - raio médio da tubulação (m)

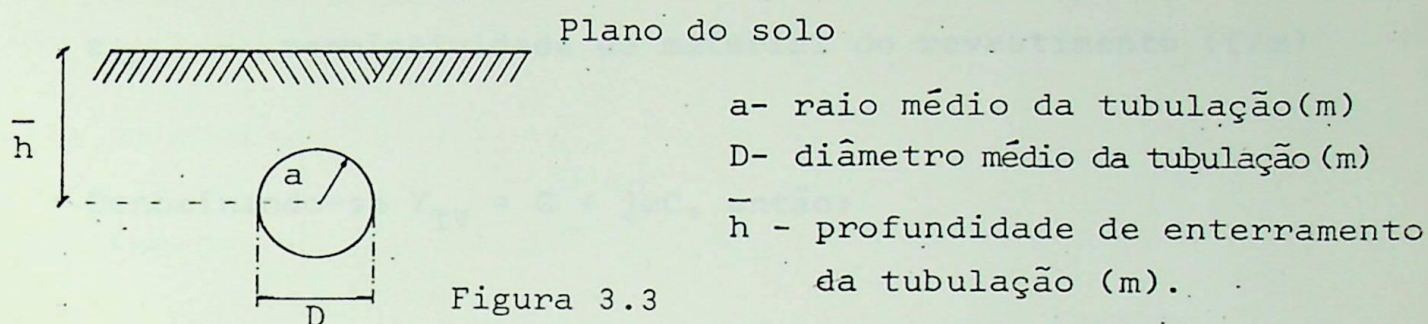
como $Y = G + j\omega C$, então:

$$Y = j\omega \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{2h}{a}} \quad \text{S/m} \quad (\text{Eq. 3.17})$$

Esta equação permite calcular a admitância linear da tubulação aérea para a terra.

3.2.2.2. Tubulação Enterrada

Neste tipo de tubulação, a admitância linear para a terra' depende fundamentalmente das características do revestimen_ to externo à tubulação. Ou seja, depende do quanto o reves_ timento facilita ou dificulta a fuga de corrente da tubula_ ção para a terra.



Sabe-se que a resistência oferecida por um corpo à passa - gem de corrente elétrica depende da resistividade deste ' corpo, da distância a ser percorrida pela corrente através deste corpo e da área da secção condutora. Aplicando-se is_ to para o revestimento da tubulação, tem-se^(14.) :

$$G = \frac{1}{R_f} = \frac{1}{\rho_{rev} \frac{\delta_{rev}}{2\pi a}} = \frac{\pi D}{\rho_{rev} \delta_{rev}} \quad \text{V/m} \quad (\text{Eq. 3.18})$$

sendo:

G - condutância linear da tubulação para a terra (V/m)

R_f - resistência de fuga linear da tubulação para a terra ($\Omega \cdot m$)

ρ_{rev} - resistividade do material do revestimento ($\Omega \cdot m$)

δ_{rev} - espessura do revestimento (m)

Sabe-se que a capacitância de um capacitor genérico depende da permissividade do seu dielétrico, da área das suas placas e da espessura do seu dielétrico. Aplicando-se isto para o revestimento da tubulação tem-se⁽⁰⁴⁾:

$$C = \epsilon_{\text{rev}} \frac{2 \pi a}{\delta_{\text{rev}}} = \frac{\epsilon_{\text{rev}} \cdot \pi D}{\delta_{\text{rev}}} \quad \text{F/m} \quad (\text{Eq. 3.19})$$

sendo:

ϵ_{rev} - permissividade do material do revestimento (F/m)

Denominando-se $Y_{TV} = G + j\omega C$, então:

$$Y_{TV} = \frac{\pi D}{\rho_{\text{rev}} \delta_{\text{rev}}} + j\omega \frac{\epsilon_{\text{rev}} \pi D}{\delta_{\text{rev}}} \quad \text{S/m} \quad (\text{Eq. 3.20})$$

Esta equação apenas exprime a admitância da tubulação para a terra imediatamente vizinha à mesma.

Há, no entanto, um termo adicional que precisa ser considerado para levar em conta o efeito do solo no qual a tubulação está imersa. Ou seja, a admitância total para a terra é constituída por duas parcelas: uma admitância para a terra imediatamente vizinha à tubulação (que depende fundamentalmente das características do revestimento isolante e do diâmetro da tubulação) e uma admitância para uma terra remota (que depende fundamentalmente da resistividade do solo, do raio médio da tubulação, da profundidade de enterramento da tubulação e da constante de propagação da mesma).

Conforme alguns autores⁽⁰⁷⁾ a tubulação da figura seguinte

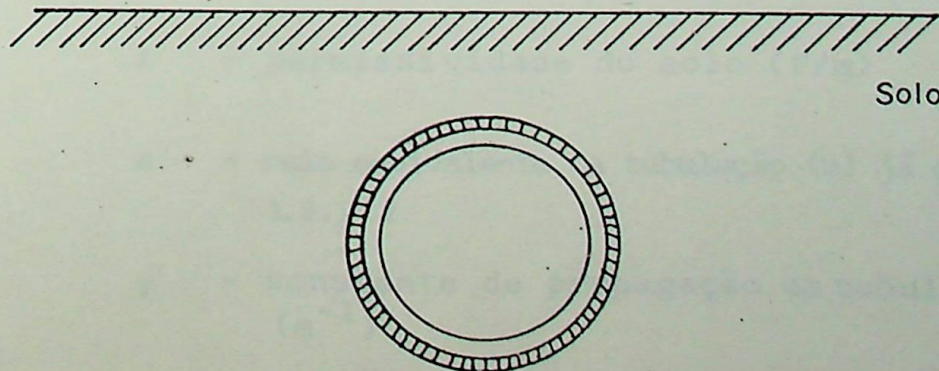


Figura 3.4

pode ser representada pelo seguinte circuito equivalente:

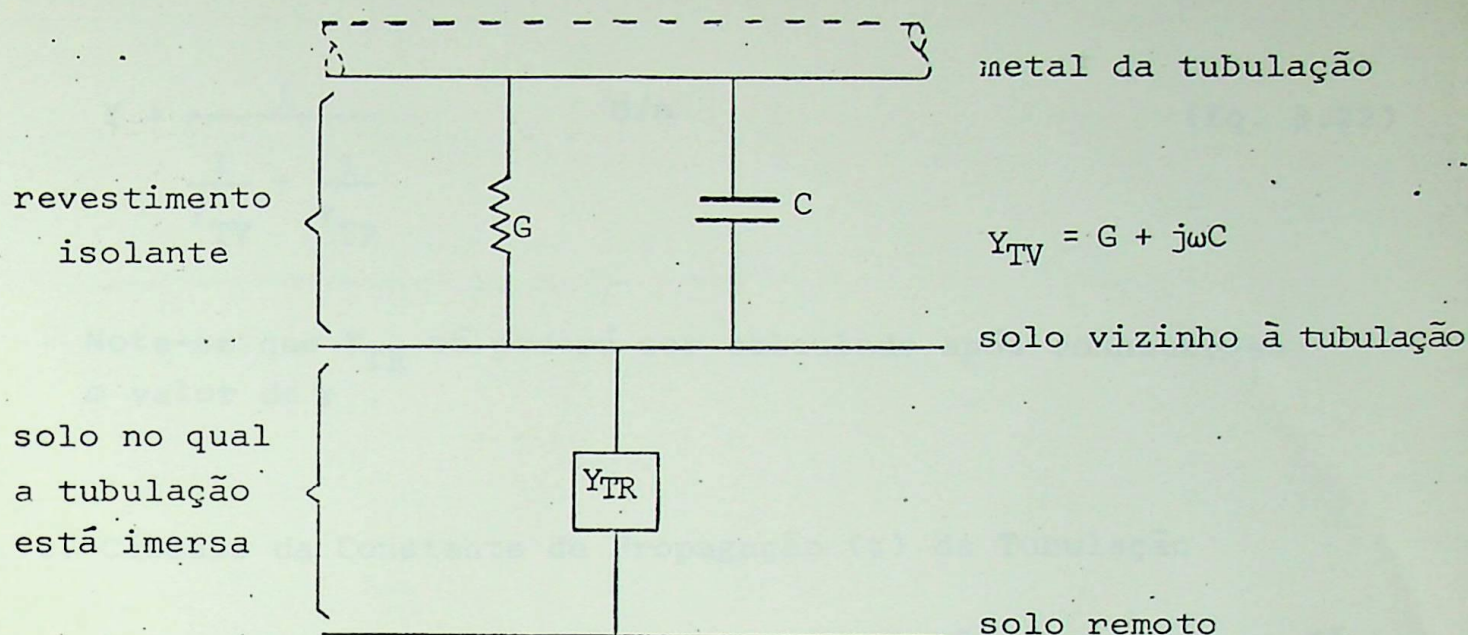


Figura 3.5.

Sabe-se também que⁽¹²⁾:

$$Y_{TR} = \frac{\pi \left(\frac{1}{\rho} + j\omega\epsilon \right)}{\ln\left(\frac{1.12}{\gamma a'} \right)} \quad \text{V/m} \quad (\text{Eq. 3.21})$$

sendo:

Y_{TR} - admitancia entre uma terra imediatamente vizinha à tubulação e uma terra remota (V/m)

ρ - resistividade do solo ($\Omega \cdot m$)

ϵ - permissividade do solo (F/m)

a' - raio equivalente da tubulação (m) já definido no item 3.2.1.2

γ - constante de propagação da tubulação metálica (m^{-1})

Desta forma, a admitância linear total da tubulação enterada para a terra será expressa por:

$$Y = \frac{1}{\frac{1}{Y_{TV}} + \frac{1}{Y_{TR}}} \quad \text{U/m} \quad (\text{Eq. 3.22})$$

Note-se que Y_{TR} só poderá ser calculado após conhecer-se o valor de γ .

3.2.3. Cálculo da Constante de Propagação (γ) da Tubulação

A constante de propagação de uma tubulação é a grandeza física que governa a forma pela qual as tensões e correntes se propagam ao longo da mesma. A constante de propagação é uma grandeza complexa formada por uma parte real α denominada constante de atenuação e expressa em nepers/m; e uma parte imaginária β denominada constante de fase e expressa em radianos/m. A constante de propagação pode ser calculada através da equação abaixo:

$$\gamma = \sqrt{Z \cdot Y} = \alpha + j\beta \quad \text{m}^{-1} \quad (\text{Eq. 3.23})$$

sendo:

Z - impedância linear da tubulação (Ω/m)

Y - admitância linear da tubulação para a terra (U/m)

3.2.3.1. Tubulação Aérea

Do exposto nos itens 3.2.1.1 e 3.2.2.1, tem-se:

$$Z = Z_i + j \frac{\omega \mu_0}{2\pi} \ln \frac{3.7 \sqrt{\rho / \omega \mu_0}}{D} \quad (\text{Eq. 3.12})$$

$$Y = j\omega \frac{2\pi \epsilon_0}{\ln \frac{2h}{a}} \quad (\text{Eq. 3.17})$$

Pode-se calcular γ aplicando diretamente a equação 3.23

$$\gamma = \sqrt{ZY}$$

3.2.3.2. Tubulação Enterrada

Do exposto nos itens 3.2.1.2 e 3.2.2.2, tem-se:

$$Z = Z_i + j \frac{\omega \mu_0}{2\pi} \ln \frac{1.85}{a' \sqrt{\gamma^2 + j\omega \mu_0 \left(\frac{1}{\rho} + j\omega \epsilon\right)}} \quad (\text{Eq. 3.13})$$

$$Y = \frac{1}{\frac{1}{Y_{TV}} + \frac{1}{Y_{TR}}} \quad (\text{Eq. 3.22})$$

$$Y_{TV} = \frac{\pi D}{\rho_{rev.} \delta_{rev.}} + j\omega \frac{\epsilon_{rev.} \pi D}{\delta_{rev.}} \quad (\text{Eq. 3.20})$$

$$Y_{TR} = \frac{\pi \left(\frac{1}{\rho} + j\omega \epsilon\right)}{\ln\left(\frac{1.12}{\gamma a'}\right)} \quad (\text{Eq. 3.21})$$

como: $\gamma = \sqrt{ZY}$

então: $\gamma^2 \cdot \frac{1}{Y} = Z$

Substituindo valores, tem-se:

$$\gamma^2 \left[\frac{1}{Y_{TV}} + \frac{\ln\left(\frac{1.12}{\gamma a'}\right)}{\pi \left(\frac{1}{\rho} + j\omega \epsilon\right)} \right] = Z_i + j \frac{\omega \mu_0}{2\pi} \ln \frac{1.85}{a' \sqrt{\gamma^2 + j\omega \mu_0 \left(\frac{1}{\rho} + j\omega \epsilon\right)}} \quad (\text{Eq. 3.24})$$

Note-se que o valor de γ não pode ser obtido diretamente da equação, pois a mesma é transcendental, devendo ser obtido através de um processo iterativo. Sugere-se neste capítulo que pode ser obtida uma boa estimativa inicial para γ utilizando a metodologia proposta no item 3.3.

3.2.4. Cálculo da Impedância Característica (Z_c) da Tubulação

A impedância característica de uma tubulação é definida como a impedância de entrada vista de uma das extremidades desta tubulação, quando o comprimento da mesma for infinito.

Às vezes, o conceito de Impedância Característica (Z_c) é confundido erroneamente com o conceito de Impedância de Surto (Z_0). Entretanto:

$$Z_c = \sqrt{\frac{\bar{Z}}{\bar{Y}}} = \sqrt{\frac{R + j \omega L}{G + j \omega C}} \quad \Omega \quad (\text{Eq. 3.25})$$

$$\text{e } Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad \Omega \quad (\text{Eq. 3.26})$$

Assim Z_0 só será próximo de Z_c , quando:

$$R \ll \omega L$$

$$G \ll \omega C$$

sendo:

Z - impedância linear da tubulação (Ω/m)

R - resistência linear da tubulação (Ω/m)

L - indutância linear da tubulação (H/m)

Y - admitância linear da tubulação para a terra (S/m)

G - condutância linear da tubulação para a terra (S/m)

C - capacitância linear da tubulação para a terra (F/m)

3.2.4.1. Tubulação Aérea

Uma vez conhecidos Z e Y (itens 3.2.1.1 e 3.2.2.1) pode-se calcular Z_c aplicando diretamente a equação 3.25:

$$Z_c = \sqrt{\frac{\bar{Z}}{\bar{Y}}}$$

3.2.4.2. Tubulação Enterrada

Uma vez calculado γ através da equação 3.24 pode-se substituí-lo nas equações de Z e Y e calcular Z_c através da equação 3.25.

$$Z_c = \sqrt{\frac{Z}{Y}}$$

ou pode-se, ainda, fazer $Z_c = \gamma \frac{1}{Y}$, daí:

$$Z_c = \gamma \left[\frac{1}{Y_{TV}} + \frac{\text{Ln}\left(\frac{1.12}{\gamma a'}\right)}{\pi\left(\frac{1}{\rho} + j\omega\epsilon\right)} \right] \quad (\text{Eq. 3.27})$$

3.3. MÉTODO NÃO ITERATIVO PARA CÁLCULO APROXIMADO DOS PARÂMETROS Z, Y, γ E Z_c DE TUBULAÇÕES ENTERRADAS

Sugere-se neste item que pode-se obter, de uma forma bastante simples, uma aproximação para os valores de Z, Y, γ e Z_c de tubulações enterradas (nuas ou revestidas) utilizando-se:

$$a) \quad Z = Z_i + j \frac{\omega\mu_0}{2\pi} \text{Ln} \frac{3.7 \sqrt{\rho/\omega\mu_0}}{D} \quad \Omega/\text{m} \quad (\text{Eq. 3.12})$$

ao invés de:

$$Z = Z_i + j \frac{\omega\mu_0}{2\pi} \text{Ln} \frac{1.85}{a' \sqrt{\gamma^2 + j\omega\mu_0\left(\frac{1}{\rho} + j\omega\epsilon\right)}} \quad \Omega/\text{m} \quad (\text{Eq. 3.13})$$

$$b) \quad Y_{TR} = \frac{1}{\frac{\rho}{\pi} \left[\text{Ln} \frac{2000}{\sqrt{2D'h}} - 1 \right]} \quad \text{S}/\text{m} \quad (\text{Eq. 3.28})$$

onde: $D' = D + 2 \times \delta_{rev}$

sendo: D - diâmetro médio da tubulação (m)

ρ - resistividade do solo (Ωm)

δ_{rev} - espessura do revestimento (m)

$\bar{h}$ - profundidade de enterramento da tubulação (m)

ao invés de:

$$Y_{\text{TR}} = \frac{\pi \left(\frac{1}{\rho} + j\omega\epsilon \right)}{\ln \left(\frac{1.12}{\gamma a'} \right)} \quad \text{V/m} \quad (\text{Eq. 3.21})$$

Neste método as equações para a tubulação enterrada fi cam sendo:

$$Z = Z_i + j \frac{\omega\mu_0}{2\pi} \ln \frac{3.7 \sqrt{\rho/\omega\mu_0}}{D} \quad \Omega/\text{m} \quad (\text{Eq. 3.12})$$

$$Y = \frac{1}{\frac{1}{Y_{\text{TV}}} + \frac{1}{Y_{\text{TR}}}} \quad \text{V/m} \quad (\text{Eq. 3.22})$$

$$Y_{\text{TV}} = \frac{\pi D}{\rho_{\text{rev}} \cdot \delta_{\text{rev}}} + j \omega \frac{\epsilon_{\text{rev}} \cdot \pi D}{\delta_{\text{rev}}} \quad \text{V/m} \quad (\text{Eq. 3.20})$$

$$Y_{\text{TR}} = \frac{1}{\frac{\rho}{\pi} \left[\frac{2000}{\sqrt{2D'\bar{h}}} - 1 \right]} \quad \text{V/m} \quad (\text{Eq. 3.28})$$

$$\gamma = \sqrt{ZY} \quad \text{m}^{-1} \quad (\text{Eq. 3.23})$$

$$Z_c = \sqrt{\frac{Z}{Y}} \quad \Omega \quad (\text{Eq. 3.25})$$

Uma comparação entre valores de γ e Z_c obtidos através deste "método não iterativo aproximado" com valores lidos

através das curvas do EPRI⁽¹²⁾, as quais foram calculadas com base na metodologia exposta nos itens 3.2.3.2 e 3.2.4.2, é apresentada nas tabelas que se seguem. Nestas tabelas varia-se o diâmetro da tubulação, a resistividade do solo e os tipos de revestimentos dentro de faixas típicas.

Propõe-se que os valores de γ obtidos por este método aproximado sirvam como estimativa inicial para o processo iterativo necessário à obtenção dos valores exatos dos parâmetros Z , Y , γ e Z_c .

Tubulação Enterrada Nua

Resistividade do Solo: 20 ohm.m

		$\gamma(m^{-1}) \times 10^{-3}$		Z_C (ohms)	
		Real	Imag.	Real	Imag.
D = 0.10m	MÉTODO NÃO ITERATIVO	4.00	2.71	0.189	0.128
	EPRI	4.8	3.2	0.140	0.072
D = 0.60m	MÉTODO NÃO ITERATIVO	2.96	2.43	0.123	0.101
	EPRI	3.0	2.6	0.097	0.067
D = 1.20m	MÉTODO NÃO ITERATIVO	2.79	2.35	0.110	0.092
	EPRI	2.8	2.6	0.095	0.066

Tabela 3.1

Tubulação Enterrada Nua

Resistividade do Solo: 2000 ohm.m

		$\gamma(m^{-1}) \times 10^{-3}$		Z_C (ohms)	
		Real	Imag.	Real	Imag.
D = 0.10m	MÉTODO NÃO ITERATIVO	0.42	0.30	1.99	1.42
	EPRI	0.40	0.28	1.9	1.2
D = 0.60m	MÉTODO NÃO ITERATIVO	0.33	0.28	1.36	1.17
	EPRI	0.28	0.25	1.4	1.1
D = 1.20m	MÉTODO NÃO ITERATIVO	0.32	0.28	1.23	1.13
	EPRI	0.26	0.25	1.3	1.1

Tabela 3.2

Tubulação Enterrada Revestida ($r_f = 9290 \, \Omega \, m^2$)

Resistividade do Solo: 20 ohm.m

		$\gamma(m^{-1}) \times 10^{-3}$		Z_C (ohms)	
		Real	Imag.	Real	Imag.
D = 0.10m	MÉTODO NÃO ITERATIVO	0.158	0.111	4.80	3.10
	EPRI	0.15	0.09	4.60	2.50
D = 0.60m	MÉTODO NÃO ITERATIVO	0.260	0.227	1.36	1.08
	EPRI	0.27	0.20	1.30	0.90
D = 1.20m	MÉTODO NÃO ITERATIVO	0.344	0.301	0.97	0.72
	EPRI	0.35	0.27	0.80	0.63

Tabela 3.3

Tubulação Enterrada Revestida ($r_f = 9290 \, \Omega \, m^2$)

Resistividade do Solo: 2000 ohm.m

		$\gamma(m^{-1}) \times 10^{-3}$		Z_C (ohms)	
		Real	Imag.	Real	Imag.
D = 0.10m	MÉTODO NÃO ITERATIVO	0.154	0.114	5.42	3.74
	EPRI	0.14	0.10	4.8	3.1
D = 0.60m	MÉTODO NÃO ITERATIVO	0.220	0.193	2.13	1.71
	EPRI	0.19	0.17	2.0	1.6
D = 1.20m	MÉTODO NÃO ITERATIVO	0.246	0.220	1.59	1.30
	EPRI	0.20	0.19	1.7	1.4

Tabela 3.4

Tubulação Enterrada Revestida ($r_f = 92900 \Omega \cdot m^2$)

Resistividade do Solo: 20 ohm.m

		$\gamma(m^{-1}) \times 10^{-3}$		Z_C (ohms)	
		Real	Imag.	Real	Imag.
D = 0.10m	MÉTODO NÃO ITERATIVO	0.045	0.045	11.4	5.0
	EPRI	0.046	0.029	15.0	6.9
D = 0.60m	MÉTODO NÃO ITERATIVO	0.074	0.088	4.63	2.50
	EPRI	0.082	0.065	3.9	2.8
D = 1.20m	MÉTODO NÃO ITERATIVO	0.096	0.117	3.02	1.71
	EPRI	0.105	0.090	2.5	2.0

Tabela 3.5

Tubulação Enterrada Revestida ($r_f = 92900 \Omega \cdot m^2$)

Resistividade do Solo: 2000 ohm.m

		$\gamma(m^{-1}) \times 10^{-3}$		Z_C (ohms)	
		Real	Imag.	Real	Imag.
D = 0.10m	MÉTODO NÃO ITERATIVO	0.047	0.048	11.9	5.6
	EPRI	0.048	0.031	14.0	9.3
D = 0.60m	MÉTODO NÃO ITERATIVO	0.080	0.096	5.35	3.20
	EPRI	0.080	0.070	4.5	3.9
D = 1.20m	MÉTODO NÃO ITERATIVO	0.103	0.124	3.64	2.30
	EPRI	0.105	0.095	3.2	2.9

Tabela 3.6

3.4. VALORES TÍPICOS DE CARACTERÍSTICAS DE TUBULAÇÕES E DOS SEUS REVESTIMENTOS

O Anexo I apresenta alguns valores, os quais poderão ser utilizados em caso de não se dispor das características de uma tubulação específica que precise ser analisada.

3.5. PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA O CÁLCULO DE Z , Y , γ E Z_c DE TUBULAÇÕES

O Anexo II apresenta o programa computacional desenvolvido em linguagem FORTRAN com base nos métodos apresentados neste capítulo.

A análise dos resultados obtidos através do mesmo revelou que:

- O método descrito no item 3.3. é eficaz na estimativa de um valor inicial para γ , pois o programa convergiu em todos os casos.
- Para uma tubulação que possua alguns trechos aéreos e outros enterrados, Z_c será maior nos trechos aéreos que nos trechos enterrados. Por outro lado γ será maior nos trechos enterrados que nos trechos aéreos.
- Nas tubulações aéreas, tanto Z_c quanto γ são diretamente proporcionais à resistividade do solo.
- Nas tubulações enterradas, Z_c é diretamente proporcional e γ é inversamente proporcional à resistividade do solo, sendo que nas tubulações enterradas quanto menor for o valor da resistência específica do revestimento (r_f), mais sensíveis serão γ e Z_c à resistividade do solo.

3.6. CONCLUSÕES

Neste capítulo foi enfocado o cálculo dos parâmetros elétricos de tubulações metálicas.

Do exposto pode-se concluir que: O cálculo preciso destes parâmetros elétricos exige a solução de equações transcendentais, as quais necessitam ser resolvidas por processos iterativos, sendo possível estimar valores iniciais para estes parâmetros através de métodos não iterativos; Tubulações cujo revestimento tenha baixa resistência de fuga apresentam parâmetros elétricos muito sensíveis à resistividade do solo e vice-versa.

Os principais méritos deste capítulo são: Apresentar uma metodologia para o cálculo preciso dos parâmetros elétricos das tubulações metálicas, a qual tem sido pouco divulgada; E sugerir um método não iterativo bastante simples através do qual é possível obter-se boas estimativas para inicializar o processo iterativo já citado.

CAPÍTULO 4 - ANÁLISE
DOS ASPECTOS INFLUENTES

4.1. INTRODUÇÃO

As informações dadas e as análises efetuadas neste capítulo constituem o coroamento deste trabalho, uma vez que as mesmas consideram os principais aspectos que devem ser levados em conta nas fases de projeto e/ou de análise para aprovação das aproximações/cruzamentos entre linhas de transmissão de energia elétrica em corrente alternada e tubulações metálicas.

Inicialmente, são descritos os fenômenos a considerar e as condições nas quais os mesmos ocorrem. Seguem-se a isto as análises de cada um destes fenômenos compreendendo estudos de: mecanismos físicos, parâmetros influentes e métodos de cálculo; influências causadas pela presença de cabos pára-raios na linha de transmissão ; influência de pontos de aterramento e de juntas isolantes na tubulação. A partir daí, são analisados os riscos a considerar e estabelecidos os critérios a adotar, bem como é sugerido um procedimento para analisar casos que surgem na prática. São, então, descritos os principais aspectos a considerar na busca de meios para a mitigação dos fenômenos, sendo dadas, a seguir, recomendações para projeto, instalação e manutenção/operação de tubulações metálicas próximas a linhas de transmissão.

Por fim, são citadas algumas conclusões importantes do capítulo.

4.2. FENÔMENOS A CONSIDERAR

Quando uma linha de transmissão de energia elétrica em corrente alternada e uma tubulação metálica (oleoduto, gasoduto, acidoduto, aqueduto, etc) encontram-se próximas, verifica-se existir acoplamentos capacitivos (através das capacitâncias mútuas linha - tubulação) e acoplamentos indutivos (através das impedâncias mútuas linha - tubulação) entre ambas.

Enquanto a linha está operando sob condição de regime permanente, observa-se que:

- A tubulação fica submetida a uma indução eletrostática que é função de tensão de operação da linha e do acoplamento capacitivo entre ambas;
- A tubulação fica submetida a uma indução eletromagnética que é função da corrente de regime da linha e do acoplamento indutivo entre ambas. Esta indução normalmente é muito pequena, devido às correntes de fase serem bastante equilibradas e defasadas de 120° ;

Se ocorrer nesta linha um curto-circuito monofásico à terra (este tipo de curto-circuito leva geralmente aos maiores valores de corrente de falta), verifica-se que:

- A tubulação poderá ficar submetida a uma indução eletrostática maior ou menor que a anterior, pois esta indução depende do campo elétrico da linha, o qual costuma deformar-se podendo dobrar sua intensidade em alguns pontos e reduzir-se à metade em outros;
- A tubulação fica submetida a uma indução eletromagnética bastante superior à da condição de regime (devido ao alto valor de corrente de curto-circuito na fase defeituosa, bem como ao desequilíbrio que passa a existir entre as correntes das três fases da linha);

- Uma parcela da corrente total de curto-circuito retorna às subestações terminais da LT através dos cabos pára-raios. Esta parcela reduz a indução eletromagnética global, conforme será visto no item 4.4;
- Outra parcela da corrente total de curto-circuito é injetada no solo através dos sistemas de aterramento das diversas torres da LT, provocando uma elevação de potencial do solo. Esta elevação de potencial do solo provoca o surgimento de tensões de passo no mesmo e pode provocar transferência de potencial do solo para a tubulação caso a mesma seja aterrada;

Assim, teoricamente todas as análises abaixo precisam ser realizadas.

		FENÔMENO A CONSIDERAR	CONDIÇÃO OPERATIVA DA LINHA DE TRANSMISSÃO
Tubulação Aérea (Nua ou Revestida)	Totalmente isolada do solo	Indução Eletrostática	. Regime permanente . Curto-circuito
		Indução Eletromagnética	. Regime permanente . Curto-circuito
	Aterrada em um(1) ou mais pontos	Indução Eletrostática	. Regime permanente . Curto-circuito
		Indução Eletromagnética	. Regime permanente . Curto-circuito
		Efeitos Associados à Injeção de Corrente no Solo	. Curto-circuito
Tubulação Enterrada (Nua ou Revestida)		Indução Eletrostática	. Regime permanente . Curto-circuito
		Indução Eletromagnética	. Regime permanente . Curto-circuito
		Efeitos Associados à Injeção de Corrente no Solo	. Curto-circuito

Tabela 4.1

Entretanto, na prática o número de análises a realizar pode ser reduzido considerando que:

- Normalmente as tubulações aéreas são nuas e às tubulações enterradas são revestidas.
- Conforme será visto mais adiante, a Indução Eletrostática só precisa ser calculada para secções de tubulação que sejam efetiva - mente isoladas do solo (item 4.3.8), enquanto que a Indução Eletromagnética não precisa ser calculada para estas secções (item 4.4.8)

Assim, a tabela anterior se torna:

		FENÔMENO A CONSIDERAR	CONDIÇÃO OPERATIVA DA LINHA DE TRANSMISSÃO
Tubulação Aérea Nua	Totalmente isolada do solo	Indução Eletrostática	. Regime permanente . Curto-circuito
	Aterrada em um(1) ou mais pontos	Indução Eletromagnética	. Regime permanente . Curto-circuito
		Efeitos Associados à Injeção de Corrente no Solo	. Curto-circuito
Tubulação Enterrada Revestida		Indução Eletromagnética	. Regime permanente . Curto-circuito
		Efeitos Associados à Injeção de Corrente no Solo	. Curto-circuito

Tabela 4.2

Finalmente, considerando que as condições mais severas para o cálculo da Indução Eletrostática e da Indução Eletromagnética ocorrerem para a LT operando em regime permanente e em curto-circuito, respectivamente (item 4.9.1), a tabela anterior pode tomar a forma:

		FENÔMENO A CONSIDERAR	CONDIÇÃO OPERATIVA DA LINHA DE TRANSMISSÃO
Tubulação Aérea Nua	Totalmente isolada do solo	Indução Eletrostática	Regime permanente
	Aterrada em um(1) ou mais pontos	Indução Eletromagnética	Curto-circuito
		Efeitos Associados à Injeção de Corrente no Solo	Curto-circuito
Tubulação Enterrada Revestida		Indução Eletromagnética	Curto-circuito
		Efeitos Associados à Injeção de Corrente no Solo	Curto-circuito

Tabela 4.3

4.3. INDUÇÃO ELETROSTÁTICA NA TUBULAÇÃO

Pelos motivos expostos no item anterior, a indução eletrostática na tubulação será analisada apenas em condições normais de operação da LT e para tramos aéreos de tubulação que sejam efetivamente isolados do solo.

4.3.1. Descrição do fenômeno

A indução eletrostática é causada pelo campo elétrico associado à tensão de operação da LT, através do acoplamento proporcionado pelas capacitâncias entre LT e tubulação.

A figura abaixo ilustra estes acoplamentos.

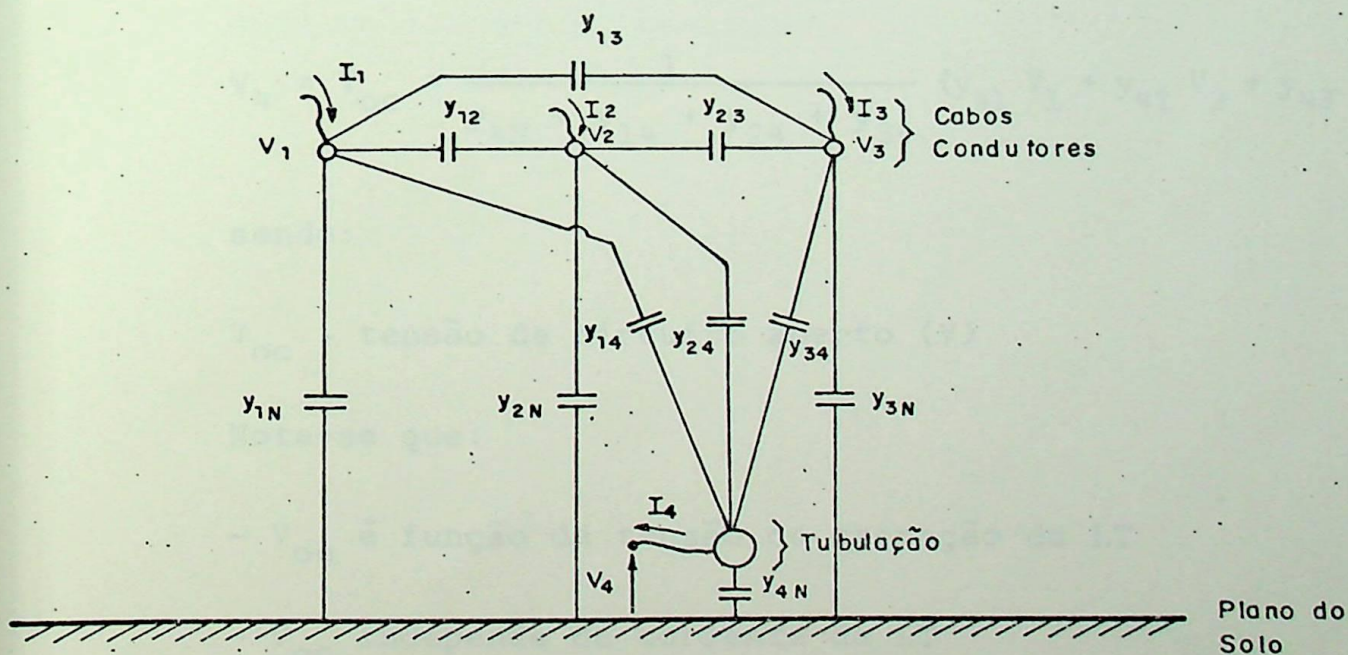


Figura 4.1

Sendo:

V_1, V_2, V_3 - tensões eficazes fase-neutro (V)

y_{12}, y_{13}, y_{23} - admitâncias mútuas entre fases da LT (U/m)

y_{14}, y_{24}, y_{34} - admitâncias mútuas entre LT e tubulação (U/m)

y_{1N}, y_{2N}, y_{3N} - admitâncias da LT para a terra (U/m)

y_{4N} - admitância da tubulação para a terra (U/m)

I_1, I_2, I_3 - correntes capacitivas associadas à LT (A/m)

V_4 - tensão entre tubulação e solo (V)

I_4 - corrente capacitiva associada à tubulação (A/m)

Conforme o exposto no Anexo V, para tubulações aéreas efetivamente isoladas do solo, tem-se:

$$V_4 = V_{oc} = \frac{1}{y_{4N} + y_{14} + y_{24} + y_{34}} (y_{41} V_1 + y_{42} V_2 + y_{43} V_3) \quad (\text{Eq. 4.1})$$

sendo:

V_{oc} - tensão de circuito aberto (V)

Note-se que:

- V_{oc} é função da tensão de operação da LT

- V_{oc} independe da corrente da LT

- V_{oc} independe do comprimento de paralelismo entre LT e tubulação

Segundo o Anexo V, quando esta tubulação for curto-circuitada para a terra, ter-se-á:

$$I_4 = I_{sc} = y_{41} V_1 + y_{42} V_2 + y_{43} V_3 \quad (\text{Eq. 4.2})$$

sendo:

I_{sc} - corrente de curto-circuito para a terra (A/m)

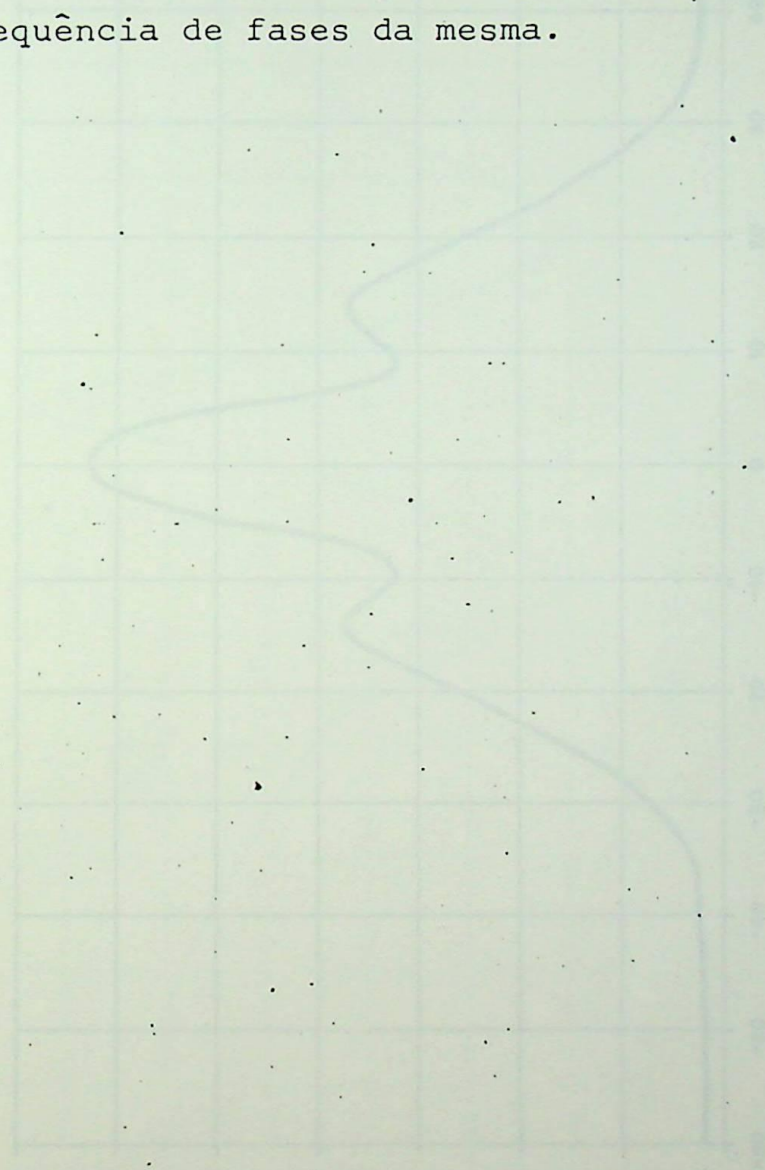
Note-se que:

- I_{sc} é função da tensão de operação da LT
- I_{sc} independe da corrente da LT
- I_{sc} depende do comprimento de paralelismo entre LT e tubulação

Também é possível apresentar a expressão de I_{sc} em função ' do campo elétrico ao nível do solo criado pela LT no local ' onde se encontra a tubulação.

4.3.2. Campo elétrico ao nível do solo (G)

O campo elétrico (gradiente de potencial) ao nível do solo criado pela LT é uma grandeza definida em módulo e ângulo de fase e sua metodologia de cálculo é facilmente encontrada ⁽³⁸⁾. As figuras seguintes ilustram gráficos de módulo e ângulo de fase do campo elétrico ao nível do solo no sentido transversal ao eixo de uma LT 500kV. Note-se que os gráficos de campo elétrico ao nível do solo variam bastante em função da geometria da torre da LT e da sequência de fases da mesma.



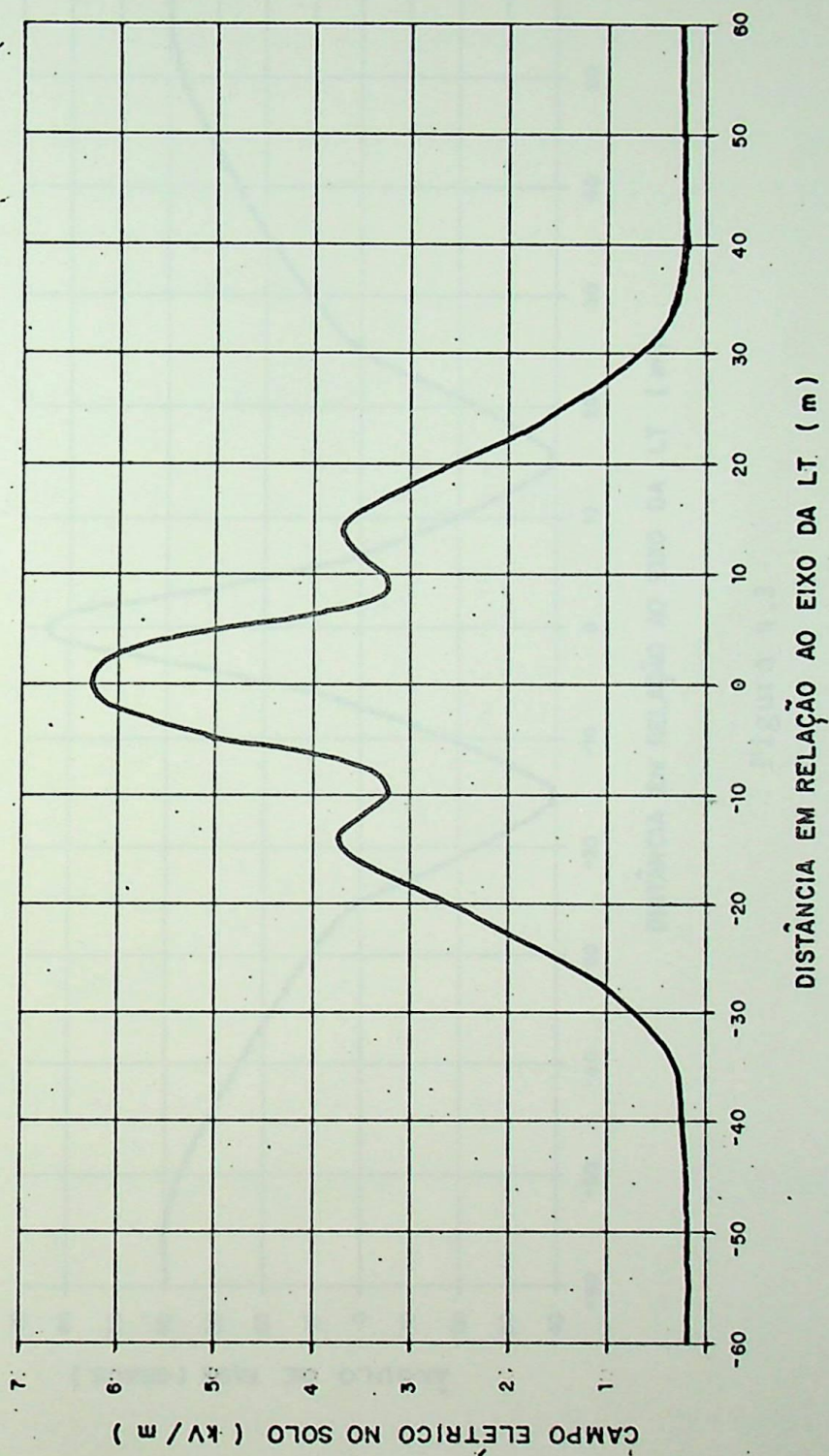


Figura 4.2

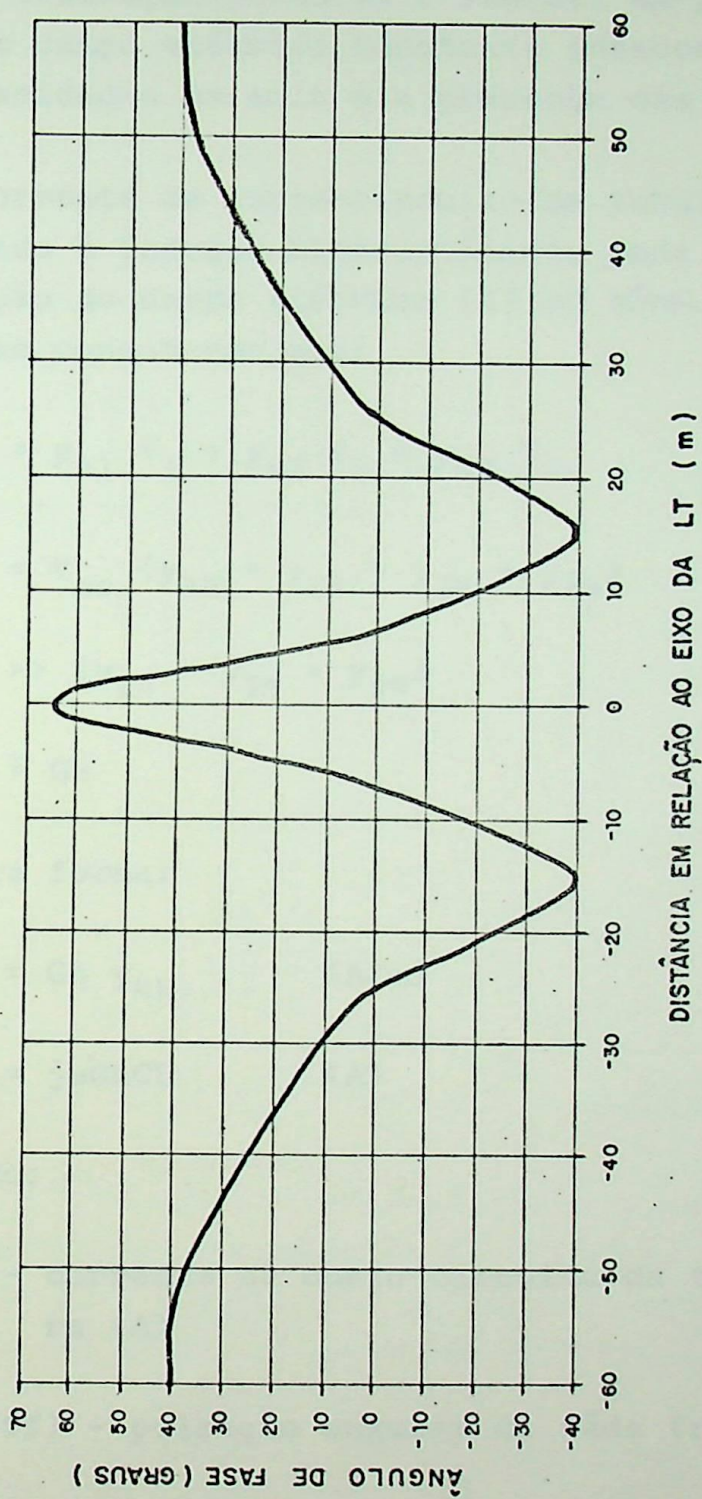


Figura 4.3

4.3.3. Indução Eletrostática em tubulações submetidas, ao longo dos seus comprimentos, a campos elétricos constantes.

Uma tubulação paralela a uma LT, em geral, fica submetida a um campo elétrico constante (desconsiderando-se as irregularidades do solo e a presença das torres).

A corrente de curto-circuito da tubulação para a terra, devida à Indução Eletrostática, pode ser expressa ⁽³⁸⁾ em função do campo elétrico (G) ao nível do solo. Para isto deve-se considerar que:

$$I_{sc} = y_{41} V_1 + y_{42} V_2 + y_{43} V_3$$

$$\therefore I_{sc} = V_{oc} (y_{4N} + y_{14} + y_{24} + y_{34}) \quad (\text{Eq. 4.3})$$

$$y_{4N} \gg (y_{14} + y_{24} + y_{34}) \quad (\text{Eq. 4.4})$$

$$V_{oc} \approx Gh \quad (\text{Eq. 4.5})$$

Desta forma:

$$I_{sc} = Gh y_{4N} \quad (\text{A/m})$$

$$\therefore I_{sc} = j\omega Gh CL \quad (\text{A}) \quad (\text{Eq. 4.6})$$

sendo:

I_{sc} - corrente de curto-circuito da tubulação para a terra (A)

$\omega (= 2\pi f)$ - pulsação angular da rede (rad/s)

G - campo elétrico ao nível do solo no ponto onde se localiza a tubulação (V/m)

h - altura da tubulação (m)

C - capacitância da tubulação para o solo (F/m)

L - comprimento de paralelismo entre LT e tubulação (m).

4.3.4. Indução Eletrostática em tubulações submetidas, ao longo dos seus comprimentos, a campos elétricos variáveis.

Trechos de tubulação que sejam perpendiculares ou oblíquos a uma LT ficam submetidos a um campo elétrico variável.

Nestes casos, a metodologia de cálculo da corrente de curto-circuito para a terra (I_{sc}) consiste em subdividir a tubulação em várias secções, aplicando-se para cada uma delas a equação 4.6 descrita no item anterior. O valor da corrente total de curto-circuito da tubulação para o solo é obtido somando-se os valores de I_{sc} encontrados para cada uma das secções em que a tubulação foi dividida, considerando-se para cada uma delas o campo elétrico médio que atua sobre a mesma⁽⁴⁹⁾.

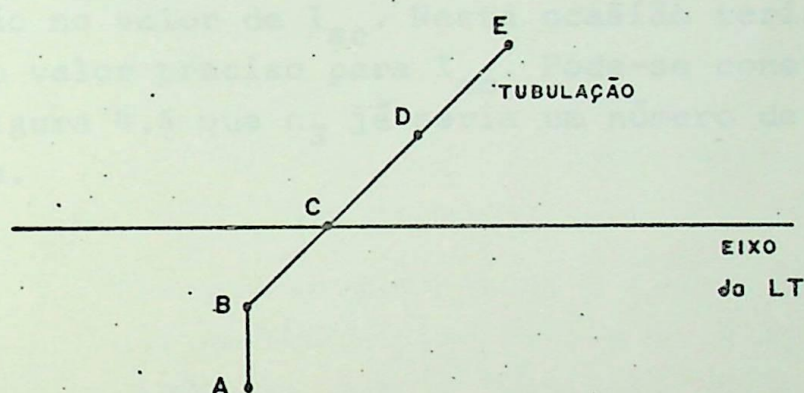


Figura 4.4

$$I_{sc \text{ total}} = I_{sc}(AB) + I_{sc}(BC) + I_{sc}(CD) + I_{sc}(DE) \quad (\text{Eq. 4.7})$$

Note-se que, quanto menores forem estas secções, maior será a precisão dos resultados obtidos. Entretanto, a subdivisão da tubulação em um número muito grande de secções, leva a uma grande quantidade de cálculos. Por outro lado, os gráficos do campo elétrico ao nível do solo (módulo e fase) variam bastante de LT para LT e, inclusive, para uma mesma LT apresentam-se muito variáveis, conforme ilustrado pelas figuras 4.2 e 4.3. Torna-se, assim, difícil estabelecer, em termos gerais e definitivos, uma relação matemática que dite a forma de subdivisão da tubulação,

em um número mínimo de secções, de modo a minimizar a quantidade de cálculos, mantendo uma boa precisão nos resultados.

Uma forma de contornar este problema seria:

- a) subdividir a tubulação em um número n_1 de secções calculando o valor de I_{sc} total.
- b) subdividir a tubulação em um número n_2 de secções calculando o novo valor de I_{sc} total.
- c) caso estes dois valores de I_{sc} sejam muito diferentes, a tubulação seria subdividida sucessivamente em números maiores de secções até que fosse observada uma saturação no valor de I_{sc} . Nesta ocasião teria sido atingido um valor preciso para I_{sc} . Pode-se constatar através da figura 4.5 que n_3 já seria um número de secções suficiente.

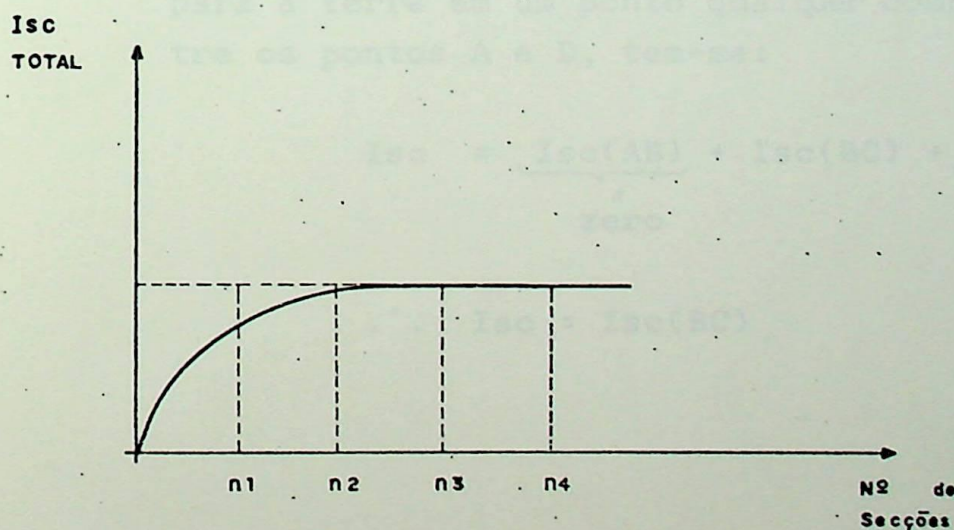


Figura 4.5

4.3.5. Casos interessantes de aproximação LT-tubulação

A seguir, são ilustrados alguns casos típicos de aproximações e cruzamentos entre LT e tubulação. Note-se que os limites da área de influência do campo elétrico causada pela LT são definidos por linhas tracejadas perpendiculares ao eixo da LT responsável pela indução eletrostática. Assim:

1º caso) Indução eletrostática em apenas um trecho da tubulação

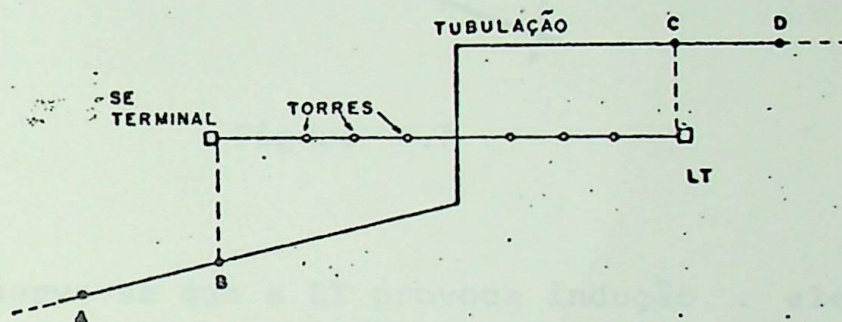


Figura 4.6

Observe-se que apenas o trecho BC sofre indução eletrostática devida ao campo elétrico da LT. Portanto, caso a tubulação seja curto-circuitada para a terra em um ponto qualquer compreendido entre os pontos A e D, tem-se:

$$I_{sc} = \underbrace{I_{sc}(AB)}_{\text{zero}} + I_{sc}(BC) + \underbrace{I_{sc}(CD)}_{\text{zero}}$$

$$\therefore I_{sc} = I_{sc}(BC)$$

2º caso) Indução eletrostática ao longo de toda a tubulação

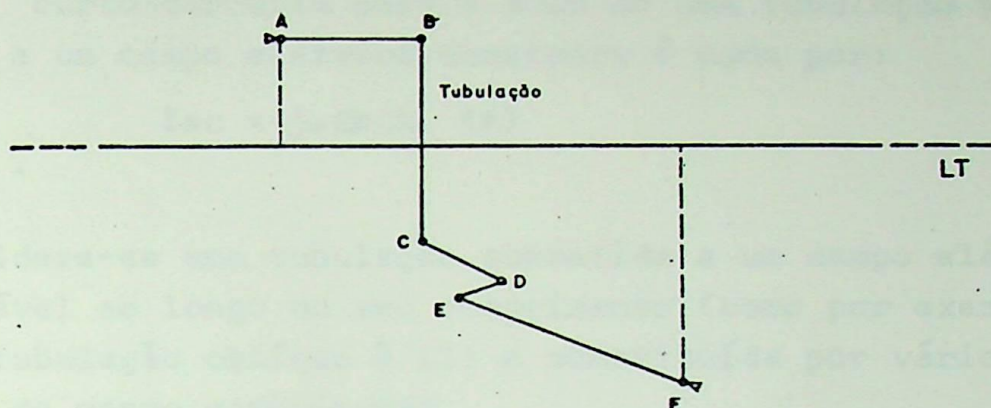


Figura 4.7

Observe-se que a LT provoca indução eletrostática ao longo de toda a extensão da tubulação, inclusive no trecho de tubulação perpendicular à LT. Portanto, caso a tubulação seja curto-circuitada para a terra em um ponto qualquer compreendida entre os pontos A e F, tem-se:

$$I_{sc} = I_{sc}(AB) + I_{sc}(BC) + I_{sc}(CD) + I_{sc}(DE) + I_{sc}(EF)$$

4.3.6. Distância máxima a considerar a partir do eixo da LT

Conforme exposto pela equação 4.6, o valor eficaz da corrente de curto-circuito para o solo de uma tubulação submetida a um campo elétrico constante é dado por:

$$I_{sc} = j\omega G h C L \quad (A)$$

Considere-se uma tubulação submetida a um campo elétrico variável ao longo do seu comprimento (como por exemplo uma tubulação oblíqua à LT) e constituída por vários trechos de mesmo comprimento.

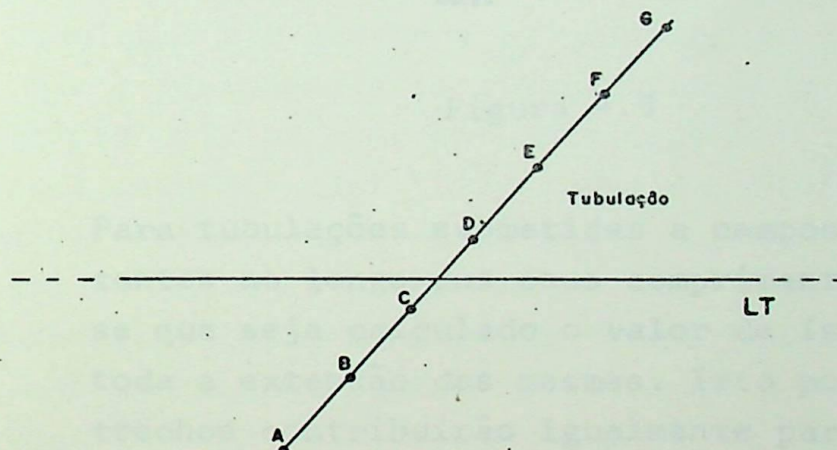


Figura 4.8

Observe-se que os trechos mais distantes do eixo da LT, por ficarem submetidos a menores valores do campo elétrico (G), contribuem menos para a corrente total de curto-circuito para o solo.

Recomenda-se, assim, que o cálculo da indução eletrostática para tubulações submetidas a campos elétricos variáveis seja feito até uma distância onde se observe uma saturação da I_{sc} total para o solo, tal como ilustrado na figura seguinte:

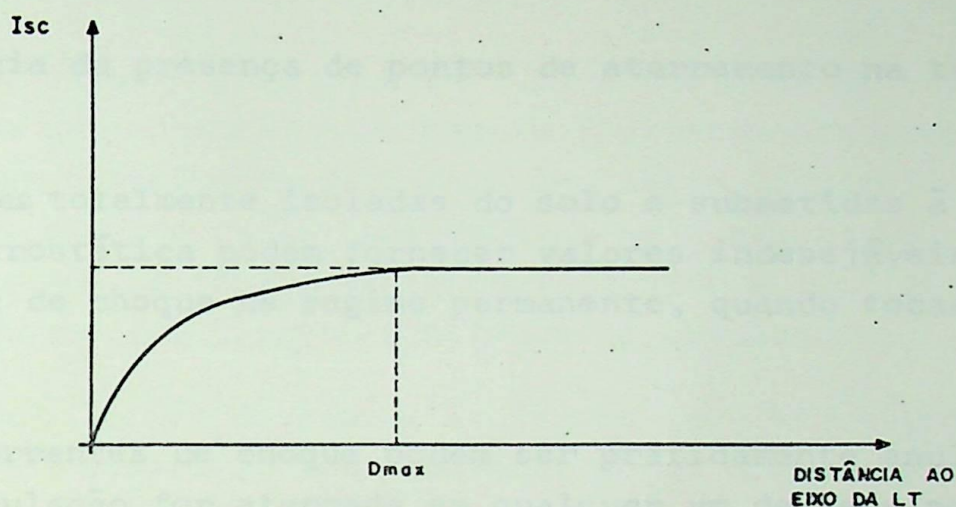


Figura 4.9

Para tubulações submetidas a campos elétricos constantes ao longo dos seus comprimentos, recomenda-se que seja calculado o valor de I_{sc} considerando toda a extensão das mesmas. Isto porque todos os trechos contribuirão igualmente para a I_{sc} total, não havendo efeito de saturação.

4.3.7. Influência da presença de cabos pára-raios na LT.

A presença de cabos pára-raios aterrados na LT reduz o campo elétrico ao nível do solo provocado pela mesma. Entretanto, segundo alguns autores ⁽³⁸⁾, para as configurações usuais de torres de LT's, esta redução vale cerca de apenas 2%.

Assim, exceto nos casos onde os cabos pára-raios sejam propositalmente posicionados de forma a atuarem com blindagem ao campo elétrico, a presença dos cabos pára-raios pode ser desconsiderada.

4.3.8. Influência da presença de pontos de aterramento na tubulação.

Tubulações totalmente isoladas do solo e submetidas à indução eletrostática podem fornecer valores indesejáveis de corrente de choque de regime permanente, quando tocadas por pessoas.

Estas correntes de choque podem ser praticamente anuladas, se a tubulação for aterrada em qualquer um de seus pontos, mesmo que a resistência do aterramento seja alta, pois o aterramento cria um caminho elétrico entre tubulação e terra para a corrente capacitiva induzida eletrostaticamente em regime permanente. Ou seja, sob o aspecto de indução eletrostática, qualquer aterramento, "por pior que seja", sempre será eficaz para anular, em termos práticos, a corrente de choque que uma pessoa receberá ao tocar a tubulação aterrada ⁽⁴⁹⁾.

Assim, torna-se desnecessário analisar problemas relativos à corrente de choque de regime permanente para:

- tubulações aéreas aterradas em qualquer de seus pontos, mesmo que este aterramento não possua resistência muito baixa.
- tubulações enterradas nuas.
- tubulações enterradas revestidas, pois para qualquer tipo de revestimento a resistência de fuga (R_f) não é infinita, possibilitando uma drenagem de cargas através do mesmo para o solo.

Por outro lado, o aterramento da tubulação pode trazer à mesma problemas de corrosão.

Vide Anexo V, que analisa com detalhes o que foi exposto neste item 4.3.8.

4.3.9. Influência da presença de juntas isolantes seccionando a tubulação.

Conforme exposto pela equação 4.6, a corrente de curto-circuito da tubulação para o solo é diretamente proporcional ao comprimento da tubulação. Assim, é possível reduzir-se o valor de I_{sc} seccionando-se a tubulação metálica através de juntas isolantes, de modo a limitar os comprimentos dos trechos contínuos de tubulação.

Entretanto, o uso de juntas isolantes deve ser evitado, sempre que possível, pois qualquer ponto de emenda na tubulação sempre facilita o surgimento de defeitos (vazamentos) na mesma, além de tornar o projeto mais caro. Há entretanto, necessidade de usar juntas isolantes quando é feita proteção catódica na tubulação.

Além disso, deve-se verificar se a junta isolante é eficaz conforme a natureza do fluido transportado pela tubulação. Por exemplo, caso a tubulação transporte ácido sulfúrico, que é um ótimo condutor de eletricidade, a junta isolante torna-se ineficaz, pois fica curto-circuitada pelo ácido.

4.4 INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA NA TUBULAÇÃO

Pelos motivos expostos no item 4.2, a indução eletromagnética na tubulação será analisada apenas na condição de curto-circuito monofásico na LT, não sendo necessário analisá-la para tubulações aéreas totalmente isoladas do solo.

4.4.1. Descrição do fenômeno

A indução eletromagnética é causada pelas correntes que circulam nos cabos da LT (cabos fase e cabos pára-raios) através do acoplamento proporcionado pelas impedâncias mútuas entre a LT e a tubulação.

Na ocasião do curto-circuito monofásico, a corrente de falta na fase defeituosa é muito maior que as correntes das fases sãs, podendo-se considerar a indução total como sendo aquela provocada apenas pela corrente da fase defeituosa e pelas correntes dos cabos pára-raios, sendo desprezadas as correntes das outras fases.

A figura seguinte ilustra, de modo simplificado, as correntes presentes nos vários vãos de uma LT com subestações terminais A e B durante a ocorrência de um curto-circuito monofásico na LT.

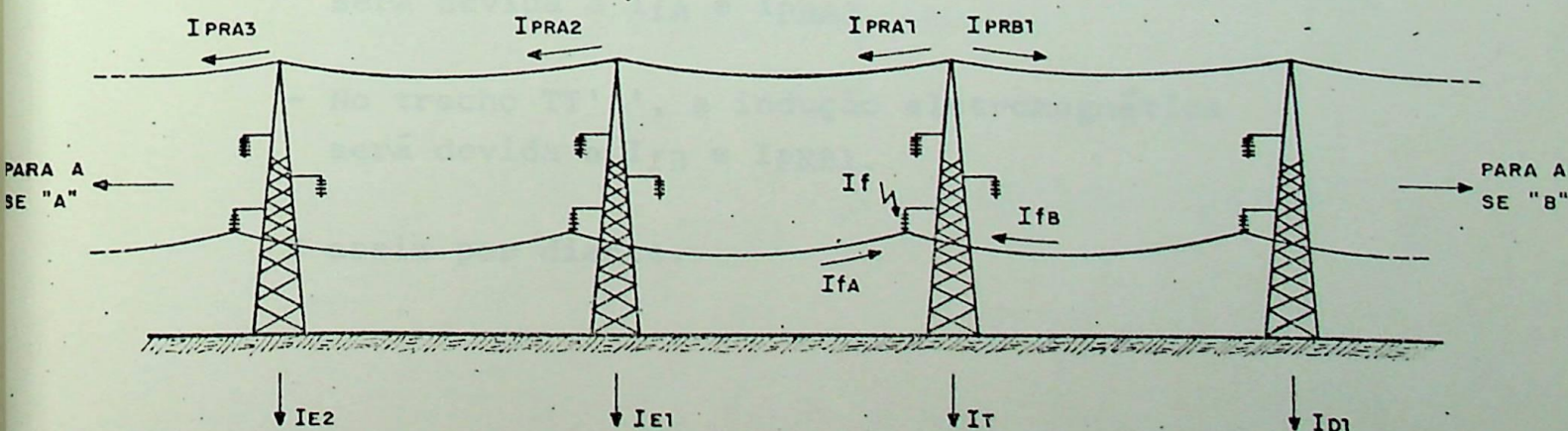


Figura 4.10

Observe-se que I_{fA} e I_{fB} são as contribuições das subestações A e B à corrente total de curto-circuito I_f . Observe-se, ainda, que I_{PRA1} , I_{PRA2} , I_{PRA3} e I_{PRB1} são correntes que circulam nos cabos pára-raios equivalentes ao longo de diversos vãos da LT. Observe-se também que I_T , I_{E1} , I_{E2} e I_{D1} são correntes injetadas no solo através das várias torres da LT.

Supondo-se que haja uma tubulação metálica próxima a esta LT,

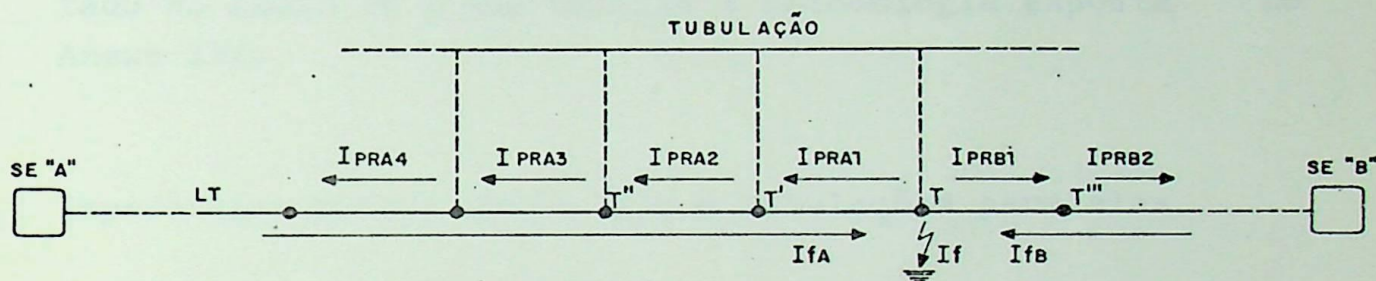


Figura 4.11

esta tubulação sofrerá as seguintes influências eletromagnéticas:

- No trecho TT' , a indução eletromagnética será devida a I_{fA} e I_{PRA1} .
- No trecho TT'' , a indução eletromagnética será devida a I_{fA} e I_{PRA2} .
- No trecho TT''' , a indução eletromagnética será devida a I_{fB} e I_{PRB1} .

E assim por diante.

Conforme será visto no item 4.4.3, a tensão induzida por efeito eletromagnético em um tramo de tubulação:

- depende das correntes indutoras circulantes na linha
- independe da tensão de operação da linha
- depende do comprimento de paralelismo LT - tubulação

Vale ressaltar que a distribuição da corrente de curto-circuito entre os cabos pára-raios da LT e a terra pode ser calculada através do programa computacional que é apresentado no Anexo IV e que utiliza a metodologia exposta no Anexo III.

4.4.2. Impedâncias mútuas entre LT's e tubulações paralelas

Considere-se a figura abaixo:

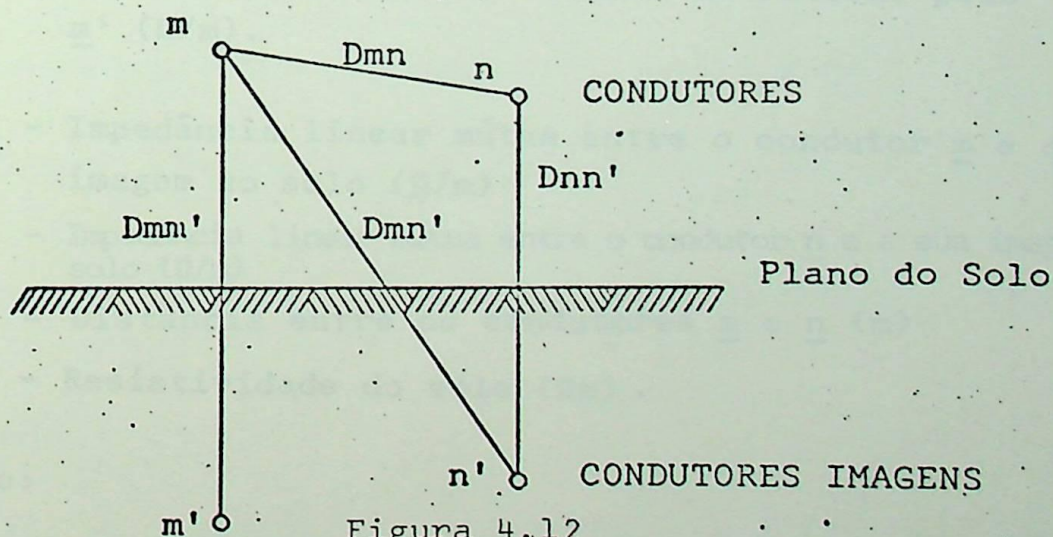


Figura 4.12

Utilizando-se as equações de Carson(14)(38), tem-se que:

$$Z_{mn} = Z'_{mn} + Z_g - Z_{mg} - Z_{ng} \quad (\text{Eq. 4.8})$$

onde:

$$Z'_{mn} = j \frac{\omega \mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{1}{D_{mn}} \right) \quad (\text{Eq. 4.9})$$

$$Z_g = \frac{\omega \mu_0}{8} \quad (\text{Eq. 4.10})$$

$$Z_{mg} = Z_{ng} = j \frac{\omega \mu_0}{4\pi} \ln \frac{1}{1.85 \sqrt{\rho/\omega \mu_0}} \quad (\text{Eq. 4.11})$$

sendo:

Z_{mn} - Impedância linear mútua entre os condutores $\underline{m}$ e $\underline{n}$, considerando que o retorno de corrente é feito pelo solo (Ω/m).

Z'_{mn} - Impedância linear mútua entre $\underline{m}$ e $\underline{n}$ sem considerar o retorno pelo solo (Ω/m)

Z_g - Impedância linear do caminho de retorno pelo solo $\underline{m}'$ (Ω/m).

Z_{mg} - Impedância linear mútua entre o condutor $\underline{m}$ e a sua imagem no solo (Ω/m)

Z_{ng} - Impedância linear mútua entre o condutor $\underline{n}$ e a sua imagem no solo (Ω/m)

D_{mn} - Distância entre os condutores $\underline{m}$ e $\underline{n}$ (m)

ρ - Resistividade do solo (Ωm).

logo:

$$Z_{mn} = \frac{\omega \mu_0}{8} + j \frac{\omega \mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{1.85 \sqrt{\rho/\omega \mu_0}}{D_{mn}} \right) \quad (\text{Eq. 4.12})$$

Considere-se, agora, a figura a seguir:

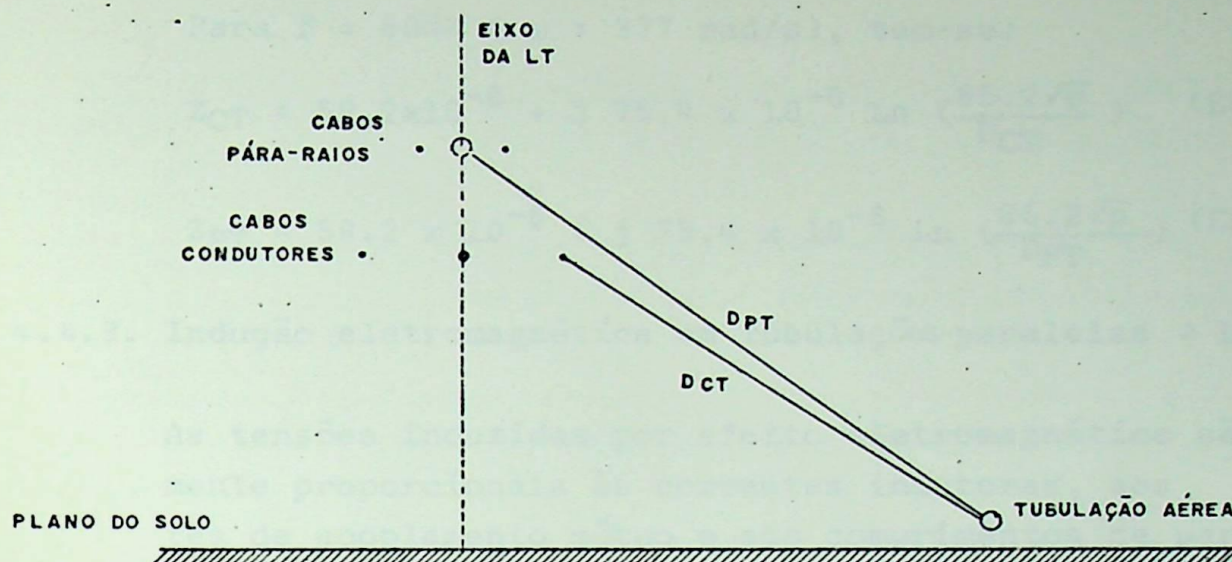


Figura 4.13

sendo:

D_{CT} - Distância entre um determinado cabo condutor de uma LT e a tubulação metálica paralela (m).

D_{PT} - Distância entre o cabo pára-raios equivalente da LT e a tubulação metálica paralela (m).

Por analogia com o já exposto, tem-se que:

$$Z_{CT} = \frac{\omega \mu_0}{8} + \frac{\omega \mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{1.85 \sqrt{\rho/\omega\mu_0}}{D_{CT}} \right) \quad (\text{Eq. 4.13})$$

$$Z_{PT} = \frac{\omega \mu_0}{8} + \frac{\omega \mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{1.85 \sqrt{\rho/\omega\mu_0}}{D_{PT}} \right) \quad (\text{Eq. 4.14})$$

sendo:

Z_{CT} = Impedância linear mútua entre cabo condutor e tubulação metálica paralela (Ω/m)

Z_{PT} = Impedância linear mútua entre cabo pára-raios equivalente e tubulação metálica paralela (Ω/m)

sabe-se que:

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

Para $f = 60\text{Hz}$ ($\omega = 377 \text{ rad/s}$), tem-se:

$$Z_{CT} = 59.2 \times 10^{-6} + j 75.4 \times 10^{-6} \ln \left(\frac{85.2\sqrt{\rho}}{D_{CT}} \right) \quad (\text{Eq. 4.15})$$

$$Z_{PT} = 59.2 \times 10^{-6} + j 75.4 \times 10^{-6} \ln \left(\frac{85.2\sqrt{\rho}}{D_{PT}} \right) \quad (\text{Eq. 4.16})$$

4.4.3. Indução eletromagnética em tubulações paralelas a LT's.

As tensões induzidas por efeito eletromagnético são diretamente proporcionais às correntes indutoras, aos coeficientes de acoplamento mútuo e aos comprimentos de paralelismo' entre LT e tubulação.

Neste trabalho, para os casos de tubulações paralelas a LT's, o cálculo da indução eletromagnética sobre as primeiras será feito considerando o maior fator de acoplamento (menor distância) possível entre fase defeituosa e tubulação, o que levará aos resultados mais severos.

As figuras seguintes ilustram acoplamentos entre fase defeituosa/tubulação e cabo pára-raios equivalente/tubulação para dois casos típicos de situações encontradas na prática.

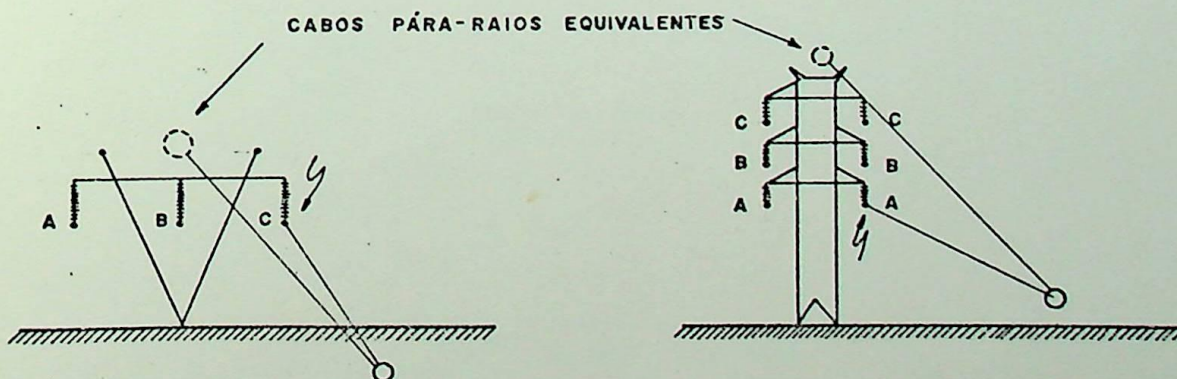


Figura 4.14

O valor eficaz da tensão induzida é dado por;

$$E = Z_{CT} I_f - Z_{PT} I_{PR} \quad (V/m) \quad (Eq. 4.17)$$

sendo:

Z_{CT} - Impedância linear mútua entre fase defeituosa e tubulação metálica paralela (Ω/m)

Z_{PT} - Impedância linear mútua entre cabo pára-raios equivalente e tubulação metálica paralela (Ω/m)

I_f - Corrente de falta na fase defeituosa (A)

I_{PR} - Corrente que retorna à SE terminal através do cabo pára-raios equivalente (A)

4.4.4. Indução eletromagnética em tubulações NÃO paralelas a LT's.

Trechos de tubulação que sejam perpendiculares à LT indu^{to}ra sofrem indução eletromagnética nula, devido a não haver acoplamento magnético entre a LT e a tubulação.

Não caso de uma tubulação que se mantém sempre, ao longo do seu trajeto, em um mesmo lado em relação ao eixo da LT, não é difícil saber qual é a fase da LT que possui o maior fator de acoplamento com a tubulação metálica. Entretanto, para os casos em que há cruzamento entre a LT e a tubulação, pode tornar-se difícil definir qual das fases da LT tem o maior acoplamento com a tubulação. Assim, este trabalho considera, nestes casos, que a fase defeituosa estará localizada, para fins de cálculo, sobre o eixo da LT. As figuras seguintes ilustram um caso típico.

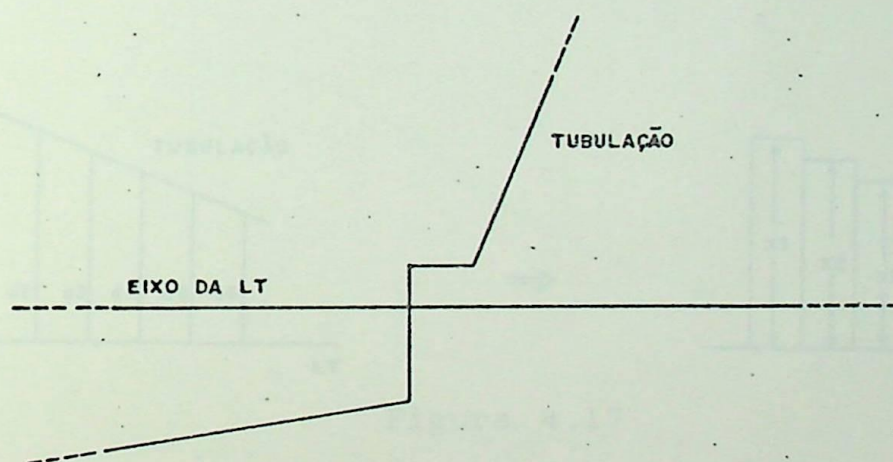


Figura 4.15

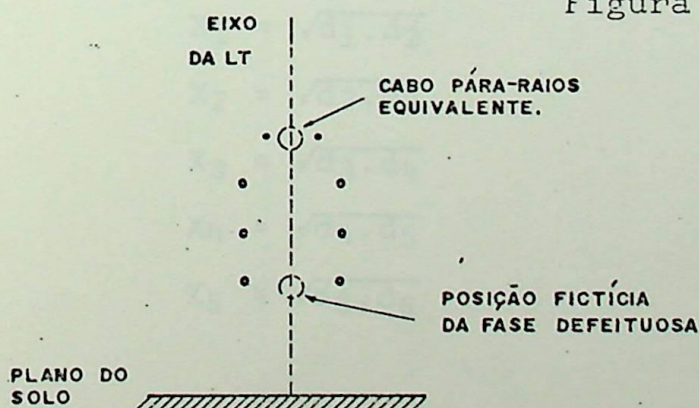


Figura 4.16

Para os trechos de tubulação oblíquos à LT, torna-se necessário fazer certas considerações, de modo a encontrar trechos equivalentes (fictícios) aos mesmos, que sejam paralelos à LT, para que seja possível aplicar a equação 4.17.

A técnica de determinação de trechos paralelos equivalentes aos trechos oblíquos é assunto tratado por diversas referências bibliográficas (01)(03)(30)(31).

Esta técnica consiste em subdividir a tubulação oblíqua em vários intervalos tão pequenos quanto possível, substituindo-os posteriormente por intervalos paralelos equivalentes de mesmas características. Observe-se que a tubulação oblíqua da figura seguinte pode ser representada através desta técnica por vários pedaços de tubulações paralelas à LT, tornando-se, assim, possível aplicar aos mesmos a equação 4.17.

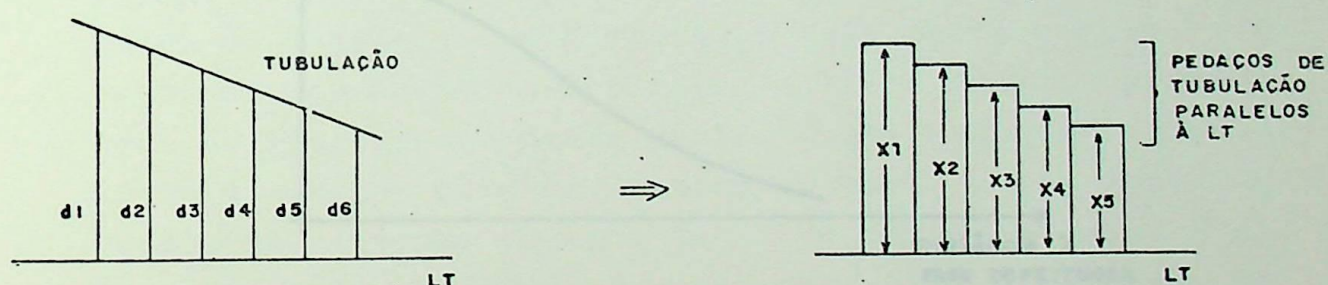


Figura 4.17

sendo:

$$x_1 = \sqrt{d_1 \cdot d_2}$$

$$x_2 = \sqrt{d_2 \cdot d_3}$$

$$x_3 = \sqrt{d_3 \cdot d_4}$$

$$x_4 = \sqrt{d_4 \cdot d_5}$$

$$x_5 = \sqrt{d_5 \cdot d_6}$$

Segundo alguns autores⁽³⁰⁾, é preferível definir $X_1 = \sqrt{d_1 \cdot d_2}$ ao invés de $X_1 = (d_1 + d_2)/2$ porque o cálculo de X_1 como média geométrica leva em conta o fato de que Z_{CT} e Z_{PT} variam não linearmente com a distância. Vide equações 4.13 a 4.16.

Note-se que, quanto menores forem estes intervalos, maior será a precisão dos resultados obtidos. Entretanto, a subdivisão da tubulação oblíqua em um número muito grande de intervalos provocaria um grande aumento na quantidade de cálculos.

Assim, visando minimizar a quantidade de cálculos, várias referências bibliográficas consultadas (01)(03)(30)(31), indicam que devido à forma suave como variam Z_{CT} e Z_{PT} ,

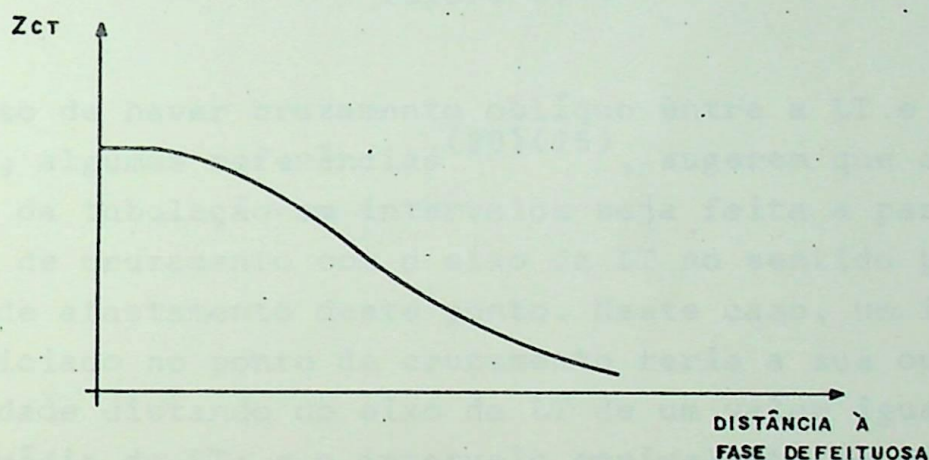


Figura 4.18

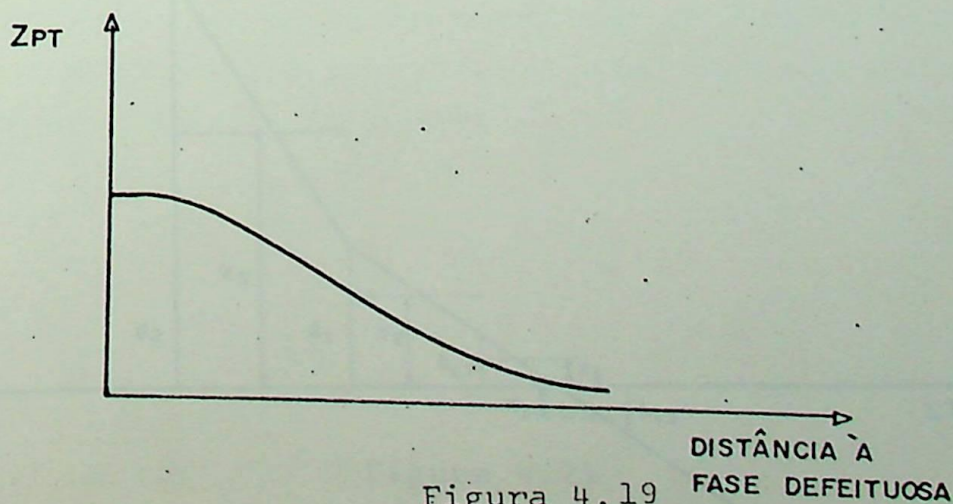


Figura 4.19

é possível obter resultados razoavelmente precisos, desde que a subdivisão da tubulação sob análise obedea à relação:

$$\frac{1}{3} \leq \frac{d_i}{d_{i+1}} \leq 3$$

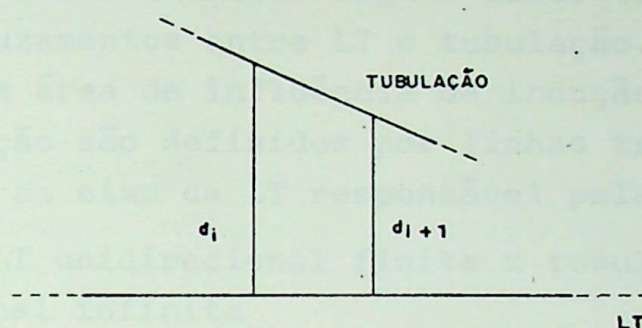


Figura 4.20

No caso de haver cruzamento oblíquo entre a LT e a tubulação, algumas referências⁽²⁰⁾⁽²⁵⁾, sugerem que a subdivisão da tubulação em intervalos seja feita a partir do ponto de cruzamento com o eixo da LT no sentido progressivo de afastamento deste ponto. Neste caso, um intervalo iniciado no ponto de cruzamento teria a sua outra extremidade distando do eixo da LT de um valor igual à altura média da LT; e o intervalo equivalente ao mesmo, paralelo à LT, distaria do eixo desta de um valor igual à média aritmética das suas extremidades. A figura seguinte esclarece melhor o explicado.

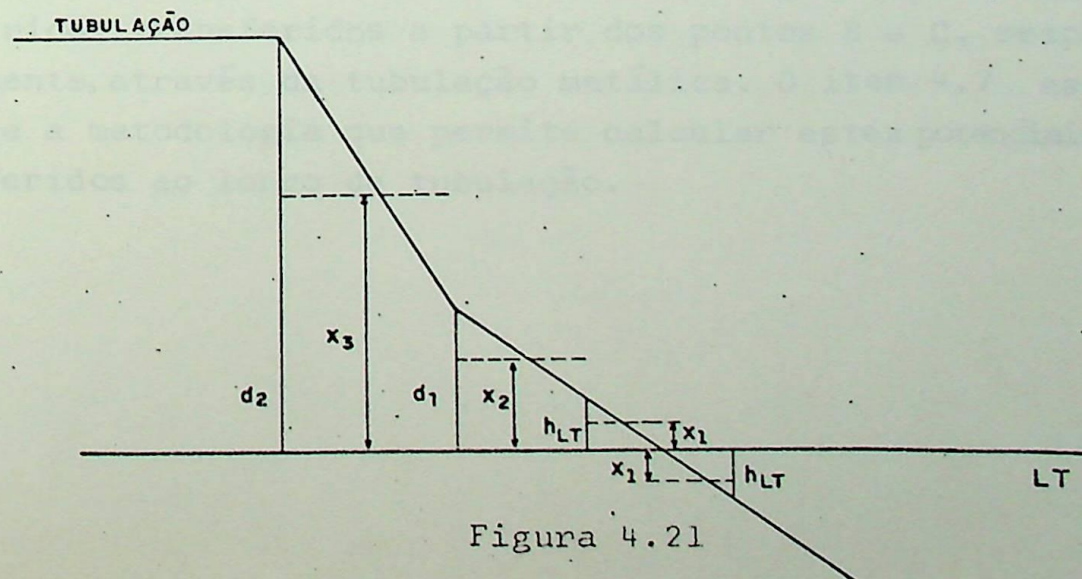


Figura 4.21

2º caso) LT unidirecional infinita x tubulação multidirecional finita.

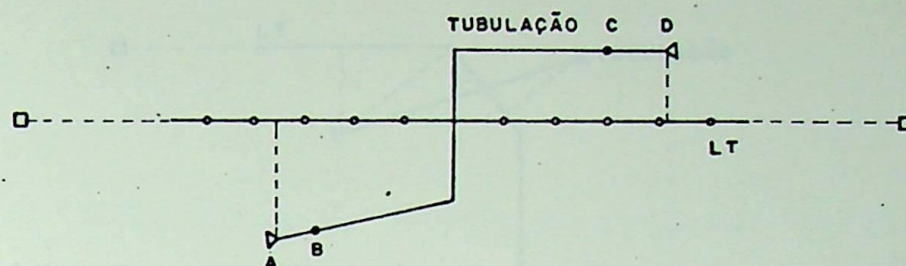


Figura 4.23

Observe-se que a LT provoca indução ao longo de toda a extensão da tubulação, exceto no trecho de tubulação perpendicular à LT.

3º caso) LT multidirecional finita x tubulação unidirecional infinita.

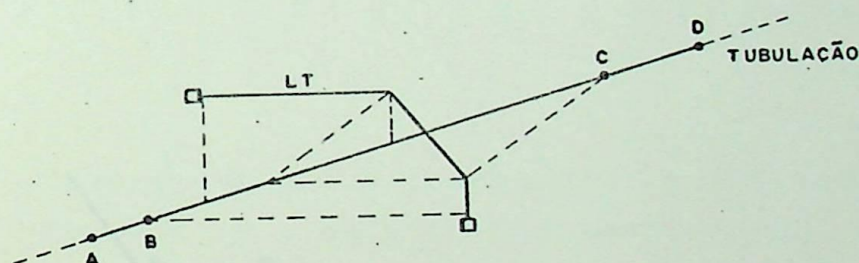


Figura 4.24

Atente-se, para as zonas de influência de cada trecho de LT sobre a tubulação. Note-se que tensões elétricas que surjam nos pontos A e D terão sido transferidas dos pontos B e C respectivamente.

Observe-se que a tensão induzida total entre os pontos A e E é dada por:

$$E_{AE} = E_{AB} + E_{BC} + E_{CD} + \underbrace{E_{DE}}_{= -E_{ED}}$$

6º caso) Curto-circuito dentro da zona sob análise

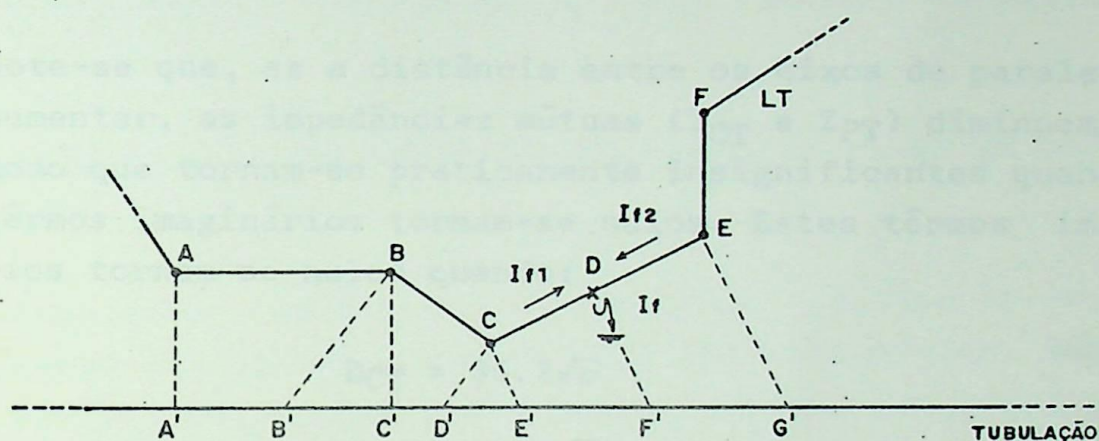


Figura 4.27

Observe-se que o trecho B'C' sofre indução dos trechos AB e BC simultaneamente e que o trecho D'E' não sofre indução de qualquer trecho da LT. Observe-se, ainda, que as induções nos trechos E'F' e F'G' têm sinal contrário.

4.4.6. Distância máxima entre eixos de paralelismo a considerar

Conforme as equações 4.15 e 4.16, as impedâncias mútuas entre LT e tubulação metálica paralelas, quando $f = 60\text{Hz}$, são dadas por:

$$Z_{CT} = 59.2 \times 10^{-6} + j 75.4 \times 10^{-6} \ln \frac{85.2\sqrt{\rho}}{D_{CT}}$$

e

$$Z_{PT} = 59.2 \times 10^{-6} + j 75.4 \times 10^{-6} \ln \frac{85.2\sqrt{\rho}}{D_{PT}}$$

Note-se que, se a distância entre os eixos de paralelismo aumentar, as impedâncias mútuas (Z_{CT} e Z_{PT}) diminuem, de modo que tornam-se praticamente insignificantes quando os termos imaginários tornam-se nulos. Estes termos imaginários tornam-se nulos quando:

$$D_{CT} = 85.2\sqrt{\rho}$$

$$D_{PT} = 85.2\sqrt{\rho}$$

Assim, neste trabalho, para distâncias entre eixos de paralelismo LT - tubulação iguais ou superiores a

$$85.2\sqrt{\rho} \quad (\text{m})$$

não serão calculadas as induções eletromagnéticas na tubulação, devido às mesmas serem insignificantes. Ou seja:

$$D_{\max} \leq 85.2\sqrt{\rho} \quad (\text{m}) \quad (\text{Eq. 4.18})$$

Algumas referências bibliográficas consideram $D_{\max} \leq 100\sqrt{\rho}$ tendo assim uma maior segurança.

4.4.7. Influência da presença de cabos pára-raios na LT

Através da equação 4.17 , é possível notar que a presença dos cabos pára-raios contribui para aliviar a indução total provocada pela LT sobre a tubulação. Isto deve-se ao sentido contrário de circulação da corrente nos cabos pára-raios em relação à corrente da fase defeituosa.

Assim, a presença de cabos pára-raios na LT é muito importante sob o aspecto de reduzir a indução eletromagnética na tubulação. Note-se que estes cabos pára-raios devem ' ser conectados às malhas de terra das SE's terminais da LT.

4.4.8. Influência da presença de pontos de aterramento na tubulação.

Tubulações que não sejam totalmente isoladas do solo, ao serem submetidas a uma indução eletromagnética, podem ocasionar choques elétricos quando tocadas por pessoas.

Assim, às vezes, é desejável reduzir a tensão elétrica com relação à terra, ao longo de uma tubulação metálica submetida a uma indução eletromagnética, através da aplicação ' de pontos de aterramento ao longo da tubulação. Nota-se, entretanto, que esta redução de tensão só será possível se as resistências dos pontos de aterramento forem muito baixas ou se os pontos de terra ao longo da tubulação forem muito próximos.

Note-se que só haverá corrente de circulação devida à indução eletromagnética, caso haja uma malha fechada para a circulação desta corrente. Assim, torna-se desnecessário analisar a indução eletromagnética para tubulações aereas totalmente isoladas do solo.

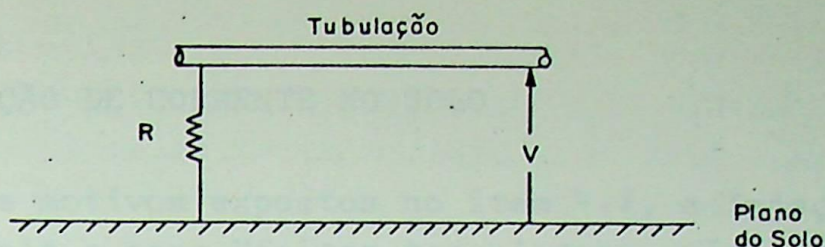


Figura 4.28

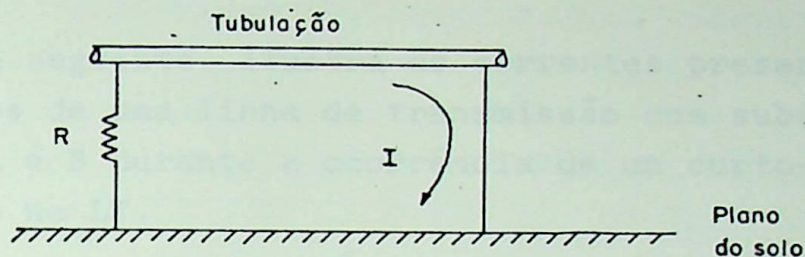


Figura 4.29

Além disto, o aterramento da tubulação pode trazer à mesma problemas de corrosão.

Vide Anexo V, que analisa com detalhes o que foi exposto' neste item 4.4.8.

4.4.9. Influência da presença de juntas isolantes seccionando a tubulação.

Por vezes, são utilizadas juntas isolantes para limitar os comprimentos contínuos de tubulação submetidos à indução eletromagnética, de forma a reduzir o perfil da diferença de potencial tubulação-solo.

Deve-se atentar para os aspectos já citados no item 4.3.9 relativos a: evitar o uso de juntas isolantes, ineficácia da junta em função do fluido transportado, custos das juntas e necessidade de junta quando da proteção catódica.

4.5. INJEÇÃO DE CORRENTE NO SOLO

Pelos motivos expostos no item 4.2, a Injeção de Corrente no Solo e seus Efeitos Associados serão analisados apenas em condição de curto-circuito monofásico na LT.

4.5.1. Descrição do Fenômeno

A figura seguinte ilustra as correntes presentes nos vários vãos de uma linha de transmissão com subestações terminais A e B durante a ocorrência de um curto-circuito monofásico na LT.

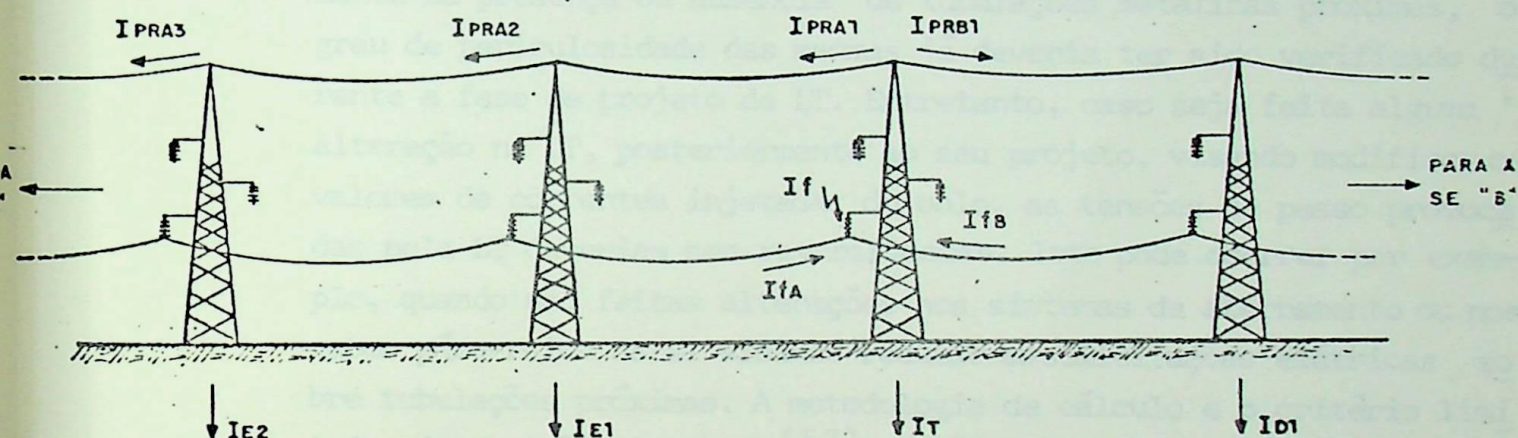


Figura 4.30

Note-se que são injetadas correntes no solo através dos sistemas de aterramento das diversas torres da LT em toda a extensão desta.

Em geral, as maiores intensidades de correntes injetadas no solo ocorrem na torre onde houve o curto-circuito e nas torres mais próximas à mesma.

Estas correntes injetadas no solo elevam o potencial do mesmo localmente em relação a um solo remoto localizado teoricamente no infinito. A partir desta ELEVAÇÃO DE POTENCIAL DO SOLO são criadas TENSÕES DE PASSO no mesmo e caso haja uma tubulação próxima ao local do curto, aterrada em qualquer de seus pontos, pode haver uma TRANSFERÊNCIA DE POTENCIAL DO SOLO PARA A TUBULAÇÃO através deste ponto de aterramento, surgindo uma diferença de potencial entre tubulação e solo. Nas tubulações aéreas totalmente isoladas do solo torna-se desnecessário analisar os efeitos conjuntos da ELEVAÇÃO DE POTENCIAL DO SOLO e da TRANSFERÊNCIA DE POTENCIAL DO SOLO PARA A TUBULAÇÃO.

Uma vez que as TENSÕES DE PASSO são provocadas pela LT independentemente da presença ou ausência de tubulações metálicas próximas, o grau de periculosidade das mesmas já deveria ter sido verificado durante a fase de projeto da LT. Entretanto, caso seja feita alguma alteração na LT, posteriormente ao seu projeto, visando modificar os valores de correntes injetadas do solo, as tensões de passo provocadas pela LT deveriam ser reavaliadas. Isto pode ocorrer por exemplo, quando são feitas alterações nos sistemas de aterramento ou nos cabos pára-raios da LT visando reduzir as solicitações elétricas sobre tubulações próximas. A metodologia de cálculo e o critério limitador das tensões de passo⁽⁵²⁾ estão descritos detalhadamente no Anexo VI deste trabalho.

Assim, neste trabalho, relativamente aos EFEITOS ASSOCIADOS À INJEÇÃO DE CORRENTE NO SOLO pode-se dizer que: A ELEVAÇÃO DE POTENCIAL DO SOLO bem como a TRANSFERÊNCIA DE POTENCIAL DO SOLO PARA A TUBULAÇÃO são sempre verificados, exceto para tubulações aéreas totalmente isoladas do solo.

4.5.2. Resistências elétricas de sistemas de aterramento de LT's

Dentre os vários tipos usuais de sistemas de aterramento' de LT's, uma das configurações mais utilizadas pelas em - presas de energia elétrica brasileiras é a ilustrada na figura seguinte.

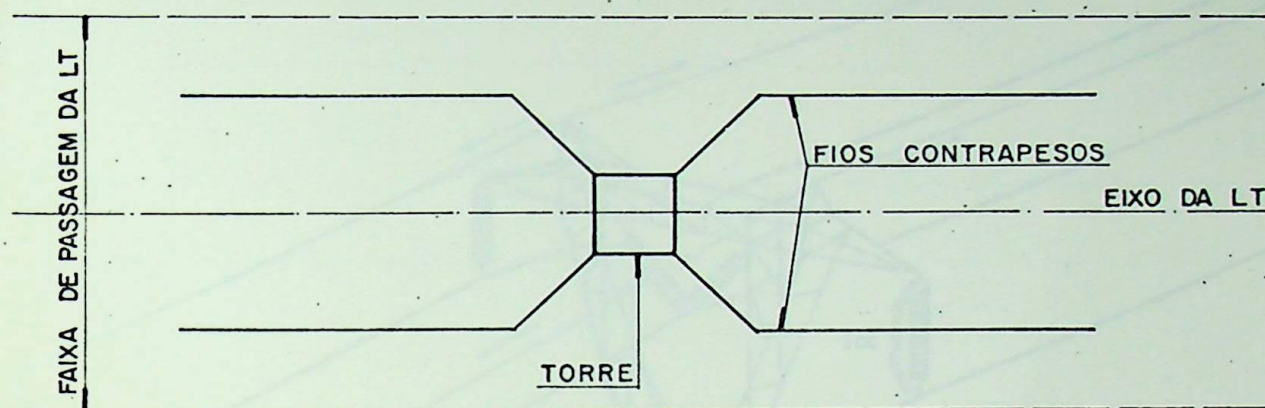


Figura 4.31

Nesta figura pode-se observar que saem radialmente de cada torre da LT 4 pernas de fio contrapeso, as quais são enterradas no solo e tornam-se paralelas entre si após afastarem-se de uma certa distância da torre de origem visando não ultrapassar os limites da faixa de passagem da LT.

A próxima figura ilustra tri-dimensionalmente o que acabou de ser exposto.

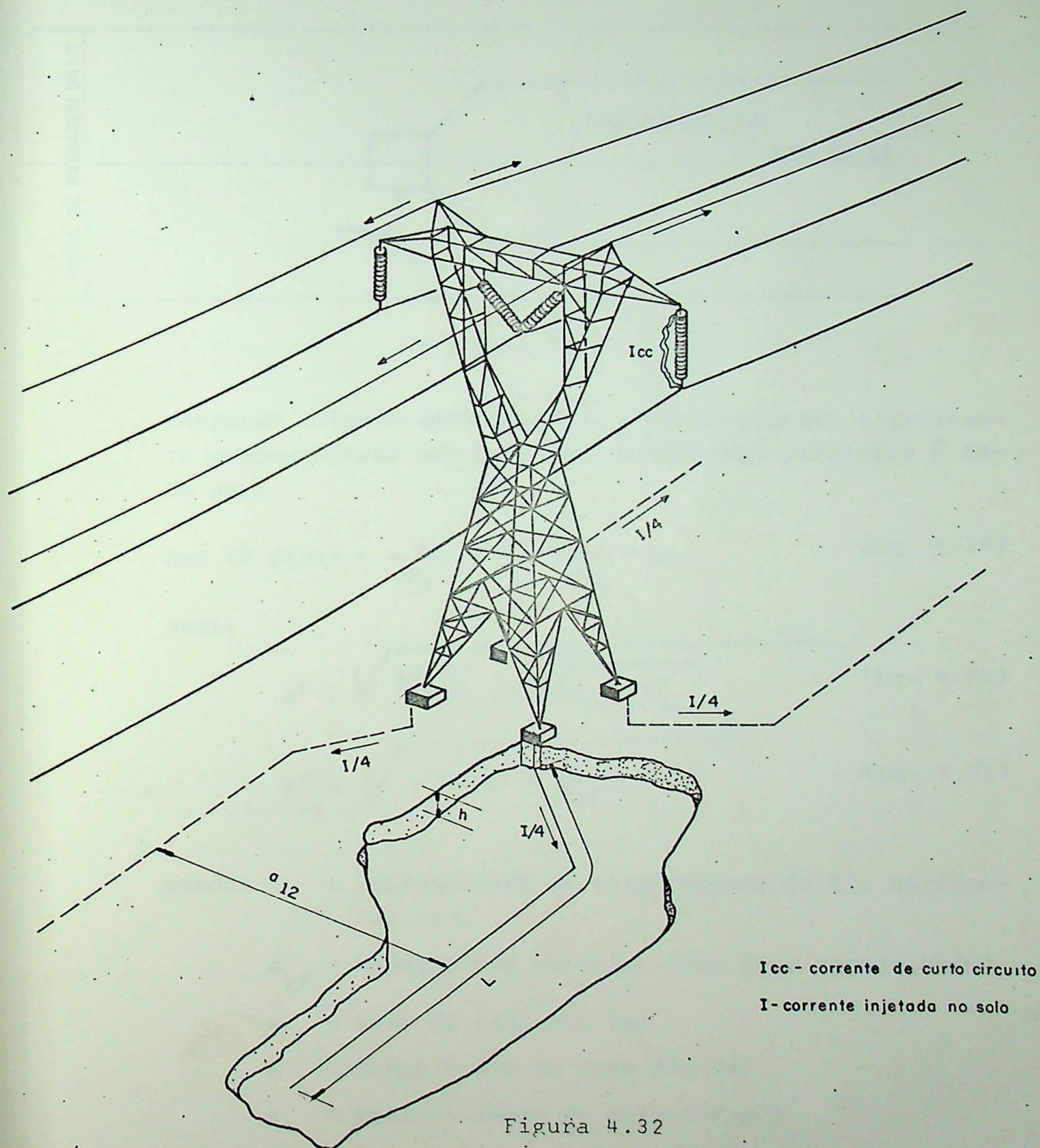


Figura 4.32

Este sistema/configuração/arranjo simétrico de aterramento é modificado, às vezes, por motivos que estão expostos no item 4.6.2, de modo a tornar-se assimétrico, conforme pode ser visto na figura seguinte.

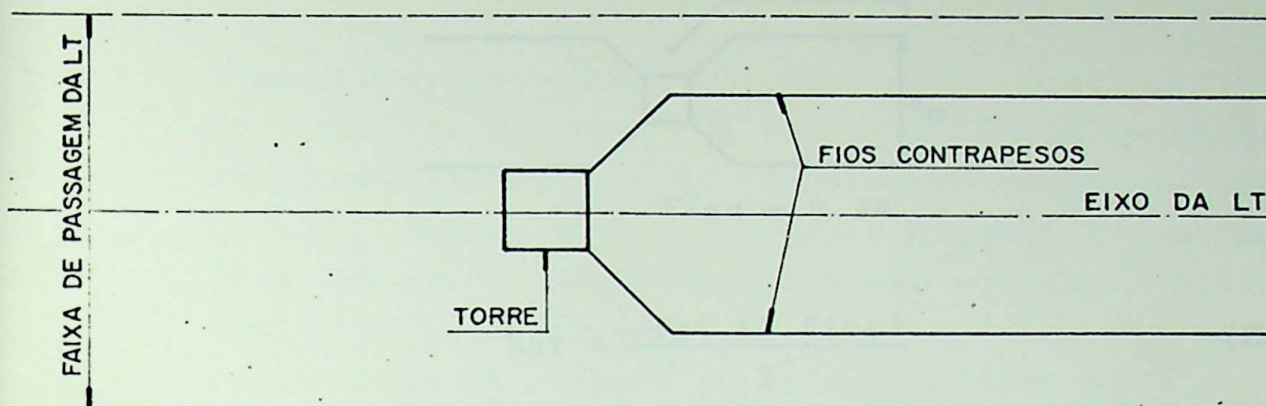


Figura 4.33

Conforme conhecida referência⁽⁴⁷⁾, a resistência de aterramento proporcionada por dois fios enterrados paralelos é dada por:

$$R_{at} (2 \text{ fios}) = \frac{\rho}{\pi L} \left(\ln \frac{2L}{a'} - 1 \right) \quad (\text{Eq. 4.19})$$

onde:

$$a' = \sqrt{\sqrt{2ah} \times \sqrt{a_{12} \cdot a'_{12}}} \quad (\text{Eq. 4.20})$$

$$a'_{12} = \sqrt{(4h^2 + a_{12}^2)} \quad (\text{Eq. 4.21})$$

sendo: h - profundidade de enterramento do fio horizontal (m):

a_{12} - espaçamento entre os dois fios paralelos (m).

a - raio de cada fio (m)

L - comprimento de cada fio (m)

ρ - resistividade do solo ($\Omega \cdot m$)

Assim, tem-se:

a) para a configuração de aterramento simétrica

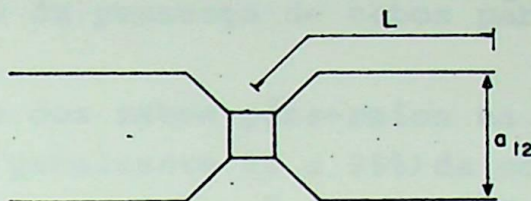


Figura 4.34

$$R_{at} = \frac{R_{at} (2 \text{ fios})}{2} \quad (\text{Eq. 4.22})$$

b) para a configuração de aterramento assimétrica

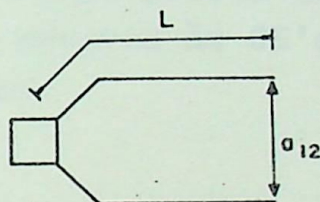


Figura 4.35

$$R_{at} = R_{at} (2 \text{ fios}) \quad (\text{Eq. 4.23})$$

Há autores⁽⁴⁶⁾⁽⁴⁷⁾⁽⁴⁸⁾⁽⁵²⁾⁽⁵³⁾⁽⁵⁴⁾⁽⁵⁵⁾, que ilustram vários tipos de arranjos de aterramento utilizáveis em LT's e fornecem, também, as expressões analíticas para cálculo das resistências de aterramento destes arranjos.

4.5.3. Cálculo da Corrente Injetada no Solo pela LT

Este cálculo pode ser feito através do programa computacional apresentado no Anexo IV, baseado na metodologia descrita no Anexo III.

4.5.4. Influência da presença de cabos pára-raios na LT

A presença dos cabos pára-raios na LT possibilita que grande parte (geralmente 90 a 95%) da corrente da curto-circuito monofásico retorne às subestações terminais através dos mesmos. Assim, apenas uma pequena parte (aproximadamente 10 a 5%) desta corrente é injetada no solo. Estes percentuais são bastante variáveis em função da distância do ponto de curto em relação às SE's terminais da LT.

Deste modo, a presença de cabos pára-raios na LT é muito importante sob o aspecto de reduzir a injeção de corrente no solo. Caso a LT não possua cabos pára-raios, toda a corrente de curto retorna às SE's terminais através do solo, o que não é bom.

4.6. CÁLCULO DOS EFEITOS ASSOCIADOS À INJEÇÃO DE CORRENTE NO SOLO.

Conforme exposto no item 4.5, os Efeitos Associados à Injeção de Corrente no Solo serão analisados apenas em condição de curto-circuito monofásico na LT.

4.6.1. Cálculo dos potenciais criados na superfície do solo.

Conforme conhecida referência⁽⁴⁷⁾, o potencial criado em um ponto $P(x,y)$ da superfície do solo no qual encontra-se enterrado um fio horizontal nu (por exemplo: fio contrapeço) é dado por:

$$V(x,y) = \frac{I \cdot \rho}{2\pi L} \ln \frac{\left[(x + L/2)^2 + y^2 + h^2 \right]^{1/2} + x + L/2}{\left[(x - L/2)^2 + y^2 + h^2 \right]^{1/2} + x - L/2} \quad (V) \quad (Eq. 4.24)$$

onde: I - corrente injetada no fio enterrado (A)

ρ - resistividade do solo ($\Omega \cdot m$)

L - comprimento do fio enterrado (m)

h - profundidade de enterramento do fio relativa ao plano do solo (m)

x - distância longitudinal do ponto P ao ponto médio do fio enterrado (m)

y - afastamento horizontal do ponto P em relação ao eixo do fio enterrado (m).

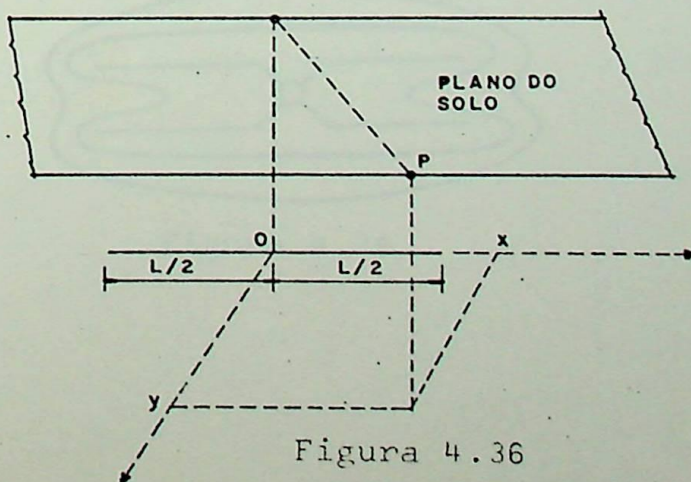


Figura 4.36

Havendo vários fios interligados e enterrados (ex: sistema de aterramento da LT), o potencial resultante em um ponto P da superfície do solo devido a uma corrente injetada I , pode ser obtido somando-se os potenciais provocados neste ponto P por cada um dos fios individualmente. Note-se que, havendo n fios contrapesos no sistema de aterramento, deve-se considerar que em cada um deles é injetada uma corrente igual a I/n . Observe-se que para cada fio enterrado precisa haver um sistema independente de eixos' cartesianos.

As figuras seguintes ilustram curvas equipotenciais criadas na superfície do solo em PONTOS PRÓXIMOS a:

a) um único fio enterrado

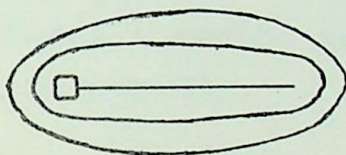


Figura 4.37

b) um arranjo simétrico de 4 fios contrapesos

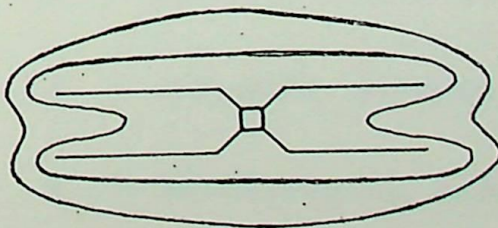


Figura 4.38

c) um arranjo assimétrico de 2 fios contrapesos

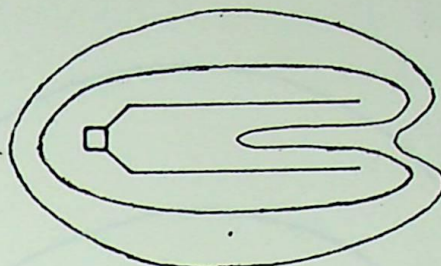


Figura 4.39

Nota-se que o gradiente de potencial no solo (caracterizado pela proximidade entre as curvas equipotenciais) é máximo no sentido longitudinal dos fios contrapesos e é mínimo no sentido transversal dos mesmos.

A figura seguinte mostra que para PONTOS AFASTADOS da torre pode-se considerar que as equipotenciais são aproximadamente circulares e, assim, para um ponto P distante x metros da torre ter-se-ia:

$$V_x = \frac{\rho I}{2\pi x} \quad (\text{Eq. 4.25})$$

onde:

V_x - potencial no ponto P (V)

ρ - resistividade do solo ($\Omega.m$)

I - corrente injetada no solo (A)

x - distância da torre ao ponto P (m)

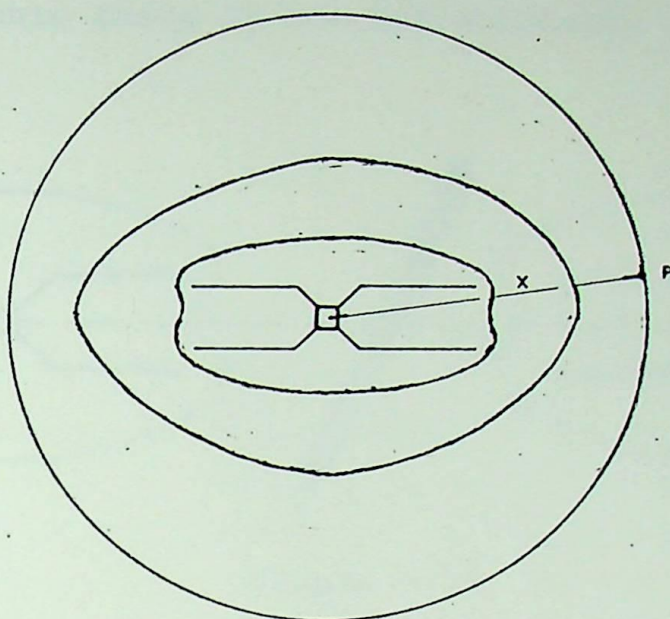


Figura 4.40

Neste trabalho será considerado que a partir de uma distância igual a 3 vezes o comprimento de maior perna de fio contrapêso do arranjo de aterramento, já se pode admitir que as curvas equipotenciais são circulares.

Ou seja:

- Quando $x < 3L$, tem-se a equação 4.24

$$V(x,y) = \frac{I \cdot \rho}{2\pi L} \ln \frac{\left[(x + L/2)^2 + y^2 + h^2 \right]^{1/2} + x + L/2}{\left[(x - L/2)^2 + y^2 + h^2 \right]^{1/2} + x - L/2}$$

- Quando $x \geq 3L$, tem-se a equação 4.25

$$V_x = \frac{\rho I}{2\pi x}$$

4.6.2. Justificativa para a utilização de arranjos de fios contrapesos assimétricos.

A figura seguinte ilustra um vão de LT no qual ocorre um cruzamento desta LT com uma tubulação metálica enterrada.

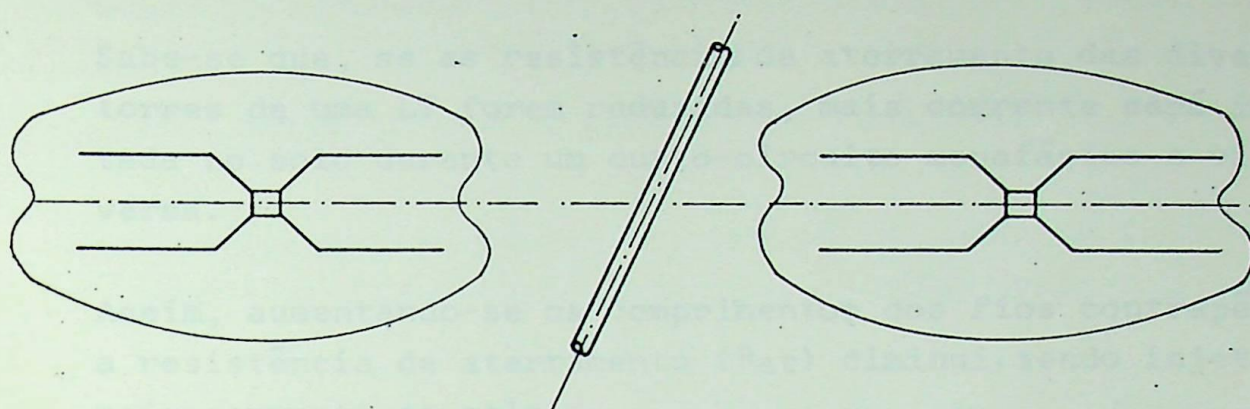


Figura 4.41

Modificando-se os arranjos de aterramento do vão de cruzamento de modo a torná-los assimétricos pode-se observar que a tubulação fica submetida a uma menor solicitação elétrica, pois as mesmas equipotenciais da figura anterior ficam mais distantes da tubulação.

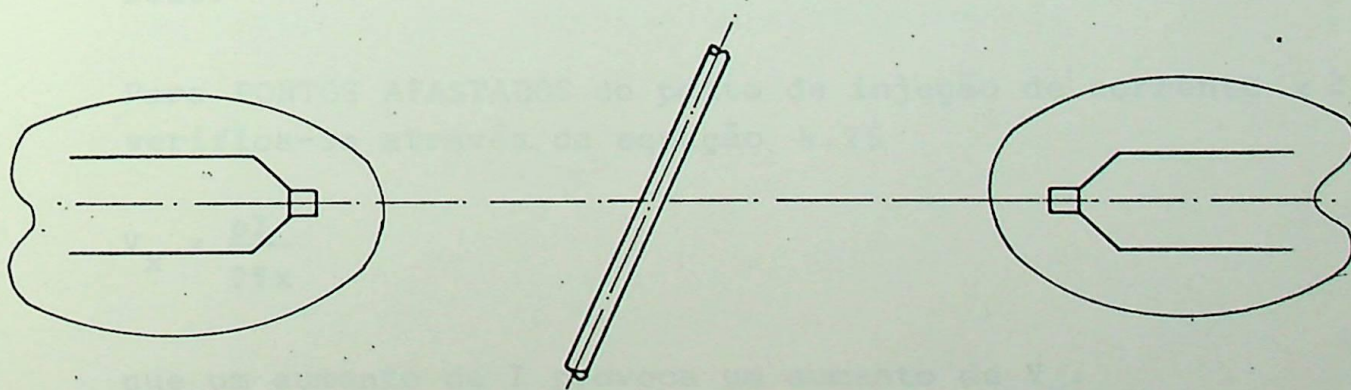


Figura 4.42

Consegue-se, assim, através da utilização de contrapesos assimétricos, aliviar as tensões elétricas que solicitam a tubulação metálica.

4.6.3. Influência da resistência de aterramento da LT na elevação de potencial do solo.

Sabe-se que, se as resistências de aterramento das diversas torres de uma LT forem reduzidas, mais corrente será injetada no solo durante um curto-circuito monofásico e vice-versa.

Assim, aumentando-se os comprimentos dos fios contrapêso, a resistência de aterramento (R_{at}) diminui, sendo injetada mais corrente ao solo.

Para PONTOS PRÓXIMOS ao ponto de injeção de corrente ($x < 3L$) verifica-se através da equação 4.24

$$V(x,y) = \frac{\rho I}{2\pi L} \ln \frac{[(x + L/2)^2 + y^2 + h^2]^{1/2} + x + L/2}{[(x - L/2)^2 + y^2 + h^2]^{1/2} + x - L/2}$$

que há uma solução de compromisso entre L , I e $V(x,y)$ não se podendo afirmar a priori se a redução da resistência de aterramento da LT provoca potenciais maiores ou menores no solo.

Para PONTOS AFASTADOS do ponto de injeção de corrente ($x \geq 3L$) verifica-se através da equação 4.25

$$V_x = \frac{\rho I}{2\pi x}$$

que um aumento de I provoca um aumento de V_x .

4.6.4. Cálculo dos potenciais transferidos do solo para a tubulação.

Havendo pontos de aterramento na tubulação, podem ser transferidos potenciais do solo para a mesma quando da elevação do potencial deste provocada por injeções de correntes no mesmo.

Assim, neste trabalho, será considerado que:

- Para tubulações aéreas totalmente isoladas do solo não haverá transferência de potencial do solo para as mesmas.
- Para tubulações aéreas aterradas em qualquer ponto e para tubulações enterradas nuas, o potencial do solo transferir-se-á de forma integral para a tubulação, independentemente do valor da resistência de aterramento.
- Para tubulações enterradas revestidas nenhuma parcela de potencial do solo será transferida para a mesma.

Uma vez que haja transferência de potencial do solo para a tubulação, deverá ser utilizada a metodologia de cálculo exposta no item 4.7 para calcular o perfil de tensão na tubulação devido a esta transferência de potencial.

4.7 - Cálculo da diferença de potencial tubulação-solo ao longo da tubulação

As metodologias expostas nos itens 4.4 a 4.6 permitem calcular a indução eletromagnética em cada secção de tubulação, bem como os potenciais que podem ser transferidos do solo para a mesma através de cada ponto de aterramento, quando da ocorrência de um curto-circuito monofásico numa linha de transmissão próxima. Este item apresenta as equações que permitem calcular como estes potenciais se propagam ao longo de toda a extensão da tubulação, possibilitando a determinação do perfil da diferença de potencial tubulação-solo.

A aplicação destas equações exige que em cada local onde houver uma junta isolante, ou um ponto de aterramento no meio de um tramo, sejam criados dois pontos auxiliares conforme ilustrado nas figuras seguintes. As razões disto ficarão claras quando da leitura dos itens 5.3.1, 5.3.2 e 5.3.3.

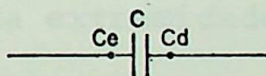


Figura 4.43

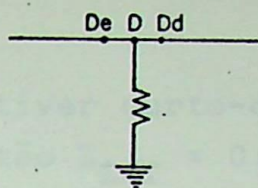


Figura 4.44

Sendo:

C_e e D_e - pontos imediatamente à esquerda dos pontos C e D

C_d e D_d - pontos imediatamente à direita dos pontos C e D

4.7.1. Impedâncias para a terra vistas de cada ponto da tubulação

Suponha-se que se deseja determinar a impedância para a terra vista à direita de um ponto A (pertencente a um tramo AB de tubulação) sabendo-se que a impedância para a terra vista à direita da extremidade B é igual a Z_{EXT} . Vide figura seguinte.

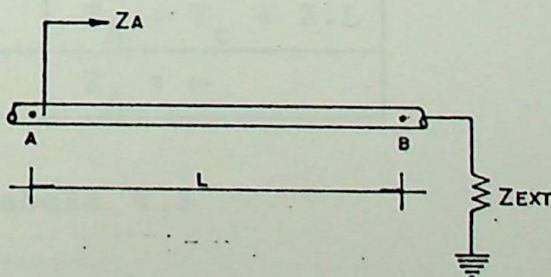


Figura 4.45

Note-se que:

- Se a tubulação estiver curto-circuitada para a terra na extremidade B, então $Z_{EXT} = 0$;
- Se a tubulação for contínua e estender-se da extremidade B até o infinito, então $Z_{EXT} = Z_c$;
- Se a tubulação estiver com a extremidade B isolada do solo, então $Z_{EXT} = \infty$;

Note-se que Z_A e Z_{EXT} são expressas em ohms.

Conforme apresentado por alguns autores ⁽¹⁹⁾, com base nos equacionamentos matemáticos desenvolvidos por outros ⁽¹⁴⁾, pode-se afirmar que:

a) para tubulações aéreas:

$$Z_A = Z_{EXT} + Z.L \quad (\text{Eq. 4.26})$$

sendo:

Z - impedância linear da tubulação (Ω/m)

L - comprimento do tramo (m)

por exemplo:

se	ter-se-á
$Z_{EXT} = 0$	$Z_A = Z.L$
$Z_{EXT} = Z_c$	$Z_A = Z_c + Z.L$
$Z_{EXT} = \infty$	$Z_A = \infty$

Tabela 4.5

b) para tubulações enterradas:

$$Z_A = Z_C \frac{(Z_{EXT} + Z_C) + (Z_{EXT} - Z_C) e^{-2\gamma L}}{(Z_{EXT} + Z_C) - (Z_{EXT} - Z_C) e^{-2\gamma L}} \quad (\text{Eq. 4.27})$$

sendo:

Z_C - impedância característica da tubulação (Ω)

γ - constante da propagação da tubulação (m^{-1})

por exemplo:

se	ter-se-á
$Z_{EXT} = 0$	$Z_A = Z_C \frac{1 - e^{-2\gamma L}}{1 + e^{-2\gamma L}}$
$Z_{EXT} = Z_C$	$Z_A = Z_C$
$Z_{EXT} = \infty$	$Z_A = Z_C \frac{1 + e^{-2\gamma L}}{1 - e^{-2\gamma L}}$

Tabela 4.6

Desta forma, pode-se determinar as impedâncias para a terra vistas à esquerda e à direita dos diversos pontos de uma tubulação, bastando para isto aplicar as equações anteriores sucessivamente. A sequência de figuras que se seguem servirão para esclarecer melhor a questão.

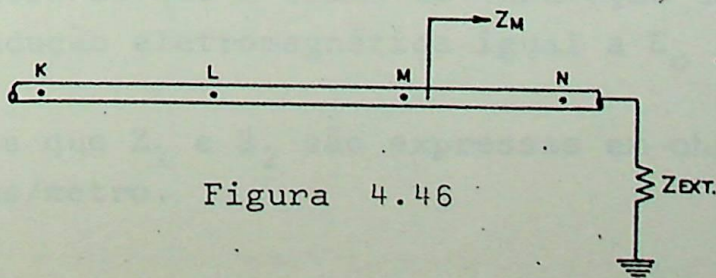


Figura 4.46

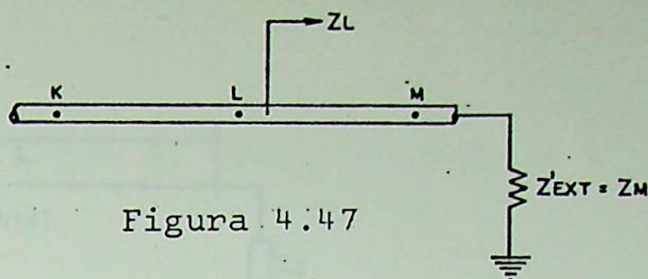


Figura 4.47

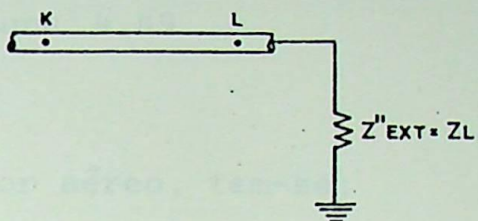


Figura 4.48

E assim sucessivamente.

A questão "h.1" do exemplo numérico exposto no item 5.3.1 utiliza as equações que acabaram de ser apresentadas na montagem de uma tabela de impedâncias para a terra, vistas à esquerda e à direita de diversos pontos da tubulação.

Note-se que estas equações devem ser aplicadas partindo-se das extremidades de cada tramo.

4.7.2. Perfil da diferença de potencial tubulação-solo ao longo da tubulação.

As equações seguintes ⁽¹⁹⁾ foram baseadas nos equacionamentos matemáticos desenvolvidos por alguns autores ⁽¹⁴⁾.

4.7.2.1. Tensões em um trecho de tubulação devidas à indução eletromagnética no próprio trecho.

Considere-se que o tramo de tubulação da figura seguinte sofre uma indução eletromagnética igual a E_0 (V/m).

Note-se que Z_1 e Z_2 são expressas em ohms e que Z é expressa em ohms/metro.

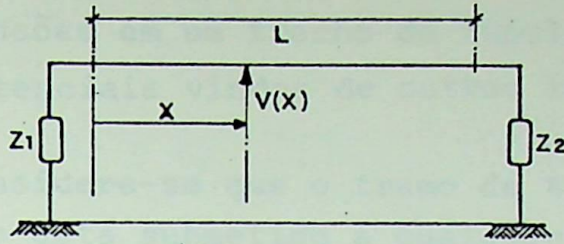


Figura 4.49

a) se o tramo for aéreo, tem-se:

$$V(x) = -E_0 \left[\frac{Z_1(L-x) - Z_2x}{Z_1 + Z_2 + Z_0 L} \right] \quad (\text{Eq. 4.28})$$

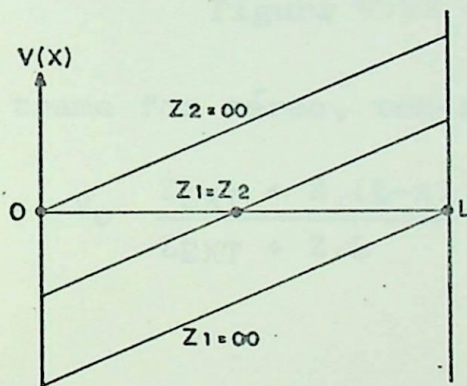


Figura 4.50

b) se o tramo for enterrado, tem-se a Eq. 4.29 abaixo:

$$V(x) = -\frac{E_0}{\gamma} \frac{Z_1(Z_C + Z_2)e^{\gamma x} + Z_2(Z_C - Z_1)e^{-\gamma(L-x)} - Z_1(Z_C - Z_2)e^{-\gamma x} - Z_2(Z_C + Z_1)e^{\gamma(L-x)}}{(Z_C + Z_1)(Z_C + Z_2)e^{\gamma L} - (Z_C - Z_1)(Z_C - Z_2)e^{-\gamma L}}$$

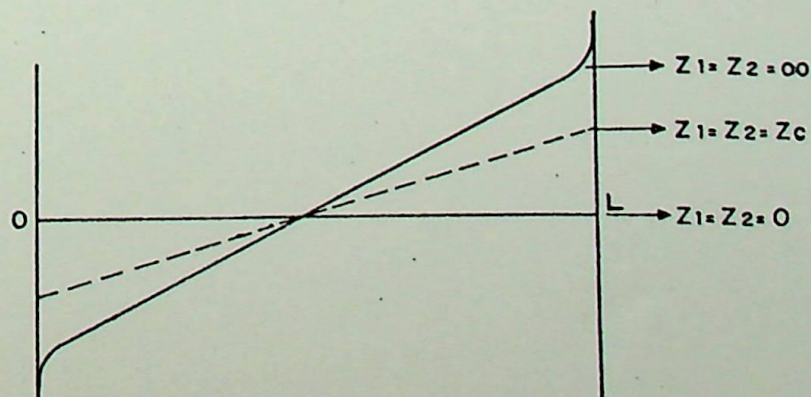


Figura 4.51

4.7.2.2. Tensões em um trecho de tubulação devidas à propagação de potenciais vindos de outros trechos.

Considere-se que o tramo de tubulação da figura seguinte não está submetido a qualquer indução eletromagnética, porém é aplicada em uma das suas extremidades uma tensão elétrica igual a V_0 (volts).

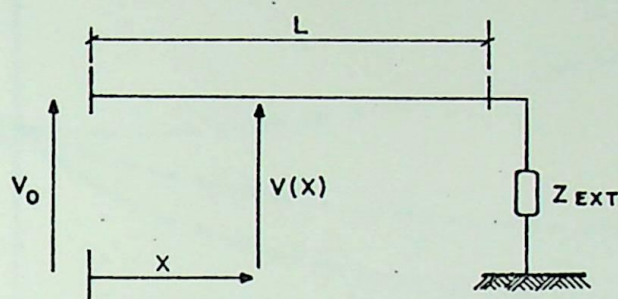


Figura 4.52

a) se o tramo for aéreo, tem-se:

$$V(x) = V_0 \frac{Z_{EXT} + Z \cdot (L-x)}{Z_{EXT} + Z \cdot L} \quad (\text{Eq. 4.30})$$

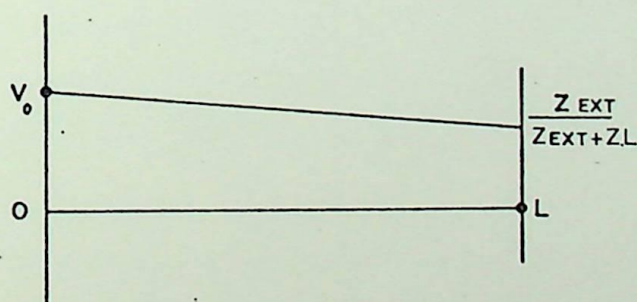


Figura 4.53

b) se o tramo for enterrado, tem-se:

$$V(x) = V_0 \frac{(Z_{EXT} - Z_C) e^{\gamma x} + (Z_{EXT} + Z_C) e^{\gamma(2L-x)}}{(Z_{EXT} + Z_C) e^{2\gamma L} + (Z_{EXT} - Z_C)} \quad (\text{Eq. 4.31})$$

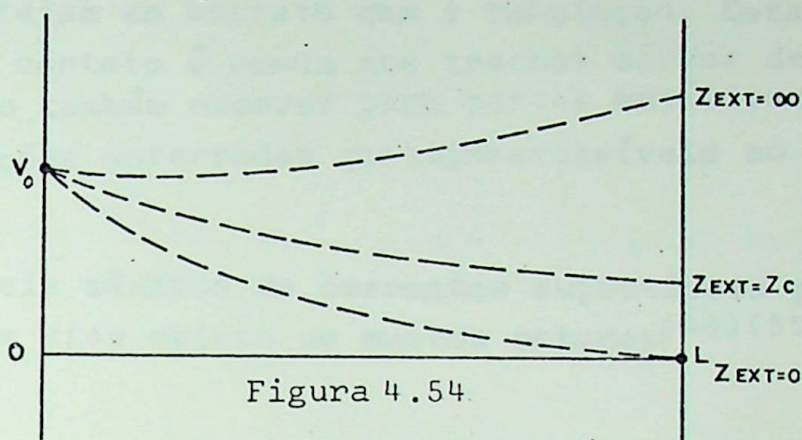


Figura 4.54

4.8. RISCOS A CONSIDERAR

4.8.1. Risco de eletrocução de pessoas

Devido à atuação dos fenômenos citados no item 4.2, tanto em condição de regime permanente, como em condição de curto-circuito, pode haver perigo de eletrocução de pessoas que estejam em contato com a tubulação. Esta possibilidade de contato é comum nos trechos aéreos de tubulação, podendo também ocorrer para partes metálicas conectadas a tubulações enterradas que sejam acessíveis ao contato humano.

Os níveis máximos de correntes suportáveis por sêres humanos têm sido objeto de muitos estudos⁽⁴⁹⁾⁽⁵⁰⁾⁽⁵¹⁾.

A seguir são dadas algumas definições qualitativas sobre respostas humanas a choques elétricos:

- a) Limiar de percepção - A pessoa percebe conscientemente uma sensação de choque elétrico, não necessariamente desagradável.
- b) Contração muscular inesperada - Se o choque ocorrer inesperadamente, provavelmente produzirá um reflexo muscular não intencional, o qual poderá ser perigoso sob uma série de circunstâncias.
- c) Perda de controle muscular - Enquanto o choque durar, a pessoa não terá controle sobre os seus músculos (por exemplo: não consegue abrir a mão para soltar-se do condutor que a está eletrocutando).
- d) Tétano respiratório - Enquanto o choque durar, a pessoa não conseguirá respirar devido à contração dos músculos torácicos.
- e) Fibrilação ventricular - O coração passa a bater descoordenadamente, de modo que não produz nenhuma ação de bombeamento.

Experiências com homens e mulheres revelaram as seguintes reações a correntes de 60Hz em regime permanente para choques de contato direto⁽⁴⁹⁾.

Corrente eficaz (rms)	Reação/Sensação
mA	
0,73	Limiar de percepção para 50% das mulheres.
1,10	Limiar de percepção para 50% dos homens.
2,20 (valor estimado)	Contração muscular inesperada para 50% das mulheres, quando do contato do braço com a fonte responsável pelo choque.
3,20 (valor estimado)	Contração muscular inesperada para 50% das mulheres, quando do contato dos dedos polegar e indicador simultaneamente com a fonte responsável pelo choque.
4,5 (valor estimado)	Perda de controle muscular para 0,5% das crianças.
6,0	Perda de controle muscular para 0,5% das mulheres.

Tabela 4.7

Corrente eficaz (rms) mA	Reação/Sensação
9.0	Perda de controle muscular para 0.5% dos homens.
10.5	Perda de controle muscular para 50% das mulheres.
16.0	Perda de controle muscular para 50% dos homens.
15.0	Tétano respiratório para 50% das mulheres.
23.0	Tétano respiratório para 50% dos homens.
35.0 (valor estimado)	Ocorrência de fibrilação ventricular em 3 segundos para 0.5% das crianças (pêso: 20 kg).
100.0 (valor estimado)	Ocorrência de fibrilação ventricular em 3 segundos para 0,5% dos adultos (pêso: 70kg).

Tabela 4.7 (continuação)

Pesquisas experimentais com animais têm tentado estabelecer uma relação entre o nível da corrente que provoca a fibrilação ventricular, a duração desta corrente e o pêso do animal.

Os resultados destas pesquisas levaram Dalziel⁽⁵⁰⁾⁽⁵¹⁾ a estabelecer sua famosa "equação de eletrocução". Esta equação é válida para um adulto de pêso típico igual a 50 kg e serve para calcular o valor de corrente em que há uma probabilidade menor ou igual a 0.5% de ocorrer fibrilação ventricular.

A equação de eletrocução tem a forma:

$$I = \frac{K}{\sqrt{t}} \quad (\text{Eq. 4.32})$$

sendo:

$$116 \leq K \leq 185$$

onde:

I - corrente de choque (mA)

t - tempo de duração do choque (s)

Observe-se que para um choque de duração igual a 3 segundos em um adulto de peso igual a 50kg, ter-se-ia:

- Corrente mínima de fibrilação:

$$K_{\min} = 116 \quad \therefore \quad I_{\min} = \frac{116}{\sqrt{3}} = 67 \text{ mA}$$

- Corrente máxima de NÃO fibrilação:

$$K_{\max} = 185 \quad \therefore \quad I_{\max} = \frac{185}{\sqrt{3}} = 107 \text{ mA}$$

A comparação destes valores de corrente com as correntes de fibrilação apresentadas na tabela anterior mostra uma boa coerência.

4.8.2. Risco de danificação/perfuração da tubulação metálica e do seu revestimento.

As tubulações enterradas, em geral, possuem um revestimento externo que visa protegê-las da corrosão eletroquímica. Este revestimento é constituído normalmente por material à base de alcatrão de hulha (que possui baixa estabilidade térmica) ou à base de polietileno (que possui alta estabilidade térmica). Os revestimentos de baixa estabilidade térmica podem derreter-se, se a tempera-

tura a que estão submetidos aumentar muito, e podem se rachar caso esta temperatura baixe muito.

Estando a tubulação enterrada, este revestimento atua como um isolamento elétrico entre o metal da tubulação e o solo no qual a mesma está imersa.

Não é necessária qualquer análise de indução eletrostática, devido à tubulação estar enterrada. Também não se faz necessário analisar a indução eletromagnética em regime permanente uma vez que esta é muito pequena nesta condição.

Havendo, porém, um curto-circuito numa LT próxima à tubulação, surge no metal da mesma uma tensão elétrica provocada pela indução eletromagnética. Simultaneamente, surge no solo uma elevação de potencial devida à injeção da corrente no mesmo. Pode, ainda, surgir uma tensão elétrica no metal da tubulação provocada por uma transferência de potencial do solo para a tubulação através de um ponto de aterramento.

A atuação conjunta e simultânea destes fenômenos pode submeter o revestimento externo anti-corrosivo da tubulação a uma elevada diferença de potencial, a qual pode gerar um arco elétrico que perfure este revestimento. Este arco elétrico, ao liberar grande quantidade de calor, pode causar danos à tubulação metálica, podendo inclusive perfurá-la. Vale salientar que, mesmo não havendo perfuração da tubulação, a simples deterioração do revestimento anti-corrosivo poderá trazer futuros problemas ao duto metálico.

Algumas referências consultadas (01)(03)(25) apresentam resultados de ENSAIOS DE CURTA DURAÇÃO, realizados pela Eletricité de France em tubulações de aço (espessura = 5mm) com revestimento de alcatrão de hulha (espessura = 4mm).

Estes resultados indicam que:

- Para uma diferença de potencial de 5 kV, aplicada sobre o revestimento, ao fim de 1s nenhum ataque ao metal da tubulação foi constatado.
- Para uma diferença de potencial de 10 kV, aplicada sobre o revestimento, ao fim de 1s o metal da tubulação foi danificado mas não foi perfurado.
- Para uma diferença de potencial de 15 kV, aplicada sobre o revestimento, em menos de 1s a tubulação foi perfurada.

4.8.3. Risco de danificação/perfuração de juntas isolantes.

Conforme foi visto nos itens 4.3 e 4.4, tanto a corrente induzida eletrostaticamente, quanto a tensão induzida eletromagneticamente na tubulação metálica, são diretamente proporcionais ao comprimento da mesma. Assim, há projetos em que a tubulação metálica é seccionada através de juntas isolantes, com o objetivo de minimizar os efeitos eletrostáticos e eletromagnéticos, obtendo-se menores trechos eletricamente contínuos de tubulação.

Outra situação na qual secciona-se a tubulação através de juntas isolantes ocorre quando se pretende prover proteção catódica àquela.

Algumas vezes, estas juntas isolantes podem ficar submetidas a diferenças de potencial, entre suas extremidades, suficientemente perigosas para danificá-las ou mesmo perfurá-las. Estas diferenças de potencial podem ocorrer tanto em regime permanente quanto em curto-circuito.

O valor da diferença de potencial, a partir do qual há riscos de danificação/perfuração da junta isolante, varia conforme as características particulares da junta (ex: fabricante, material utilizado, etc), de modo que torna-se difícil referir um único valor que seja comum a todos os tipos de juntas isolantes. Além disto, este valor deverá ser diferente para condição de regime permanente ou condição de curto-circuito.

Alguns autores ⁽⁰³⁾ citam que, por vezes, são usados descarregadores, aplicados entre as extremidades das juntas isolantes, cuja suportabilidade dielétrica se_ja inferior à da junta, de modo que, quando a tensão nos terminais da junta atingir um certo valor, haverá uma descarga através do mesmo e não através da junta, a qual ficará intacta. Os descarregadores devem ter capacidade para suportar a energia que será descarregada sem se danificar.

4.8.4. Risco de danificação do sistema de proteção catódica

Conforme alguns autores ⁽¹²⁾, tubulações enterradas e revestidas protegidas contra a corrosão por sistemas de proteção catódica podem ter estes sistemas danificados devido a tensões induzidas por LT's próximas.

Não é necessária qualquer análise de indução eletrostática, devido à tubulação estar enterrada. Também não se faz necessário analisar a indução eletromagnética em regime permanente uma vez que esta é muito pequena nesta condição. Contudo faz-se necessário analisá-la em condição de curto-circuito.

Os valores de tensões a partir dos quais podem haver problemas dependem das características particulares do sistema de proteção catódica.

4.9. CRITÉRIOS A ADOPTAR

4.9.1. Contra eletrocução de pessoas

Diante do exposto no item 4.8.1, recomenda-se adotar os seguintes critérios para trechos aéreos de tubulação:

- Em condição de regime permanente de operação da LT, qual quer pessoa que entre em contato com a tubulação não deverá receber uma corrente de choque superior a 4.5 mA.
- Em condição de curto-circuito monofásico na LT, será admitido que o tempo de eliminação do efeito pela proteção do sistema é de 0.5s (30 ciclos), e será usada a Equação de Eletrocução de Dalziel com $k = 116$. Assim, qualquer pessoa não deverá receber uma corrente de choque superior a:

$$\frac{116}{\sqrt{0.5}} = 164 \text{ mA}$$

Note-se daí que, em condição de curto-circuito, será admitida uma corrente de choque 36 vezes maior, que aquela da condição de regime permanente. Isto deve-se ao pequeno tempo de duração do choque naquela condição.

Tipicamente o campo elétrico ao nível do solo provocado pela LT na condição de curto-circuito pode até dobrar de valor em relação àquele da condição de regime permanente. Ou trossim, tipicamente, as correntes durante um curto-circuito são superiores a 36 vezes os valores das mesmas anteriormente ao curto-circuito.

Assim, pode-se concluir que:

- A maior relação corrente de choque/corrente suportável (situação mais severa) devido à indução eletrostática ocorre para a condição de regime permanente.
- A maior relação corrente de choque/corrente suportável (situação mais severa) devido à indução eletromagnética ocorre para a condição de curto-circuito.

4.9.2. Contra danificação/perfuração da tubulação e do seu revestimento

Diante do exposto no item 4.8.2, recomenda-se adotar o seguinte critério para trechos enterrados de tubulação:

- Em condição de curto-circuito na LT (CURTA DURAÇÃO) será adotado 5kV como valor máximo para diferenças de potencial que possam ser aplicadas ao revestimento da tubulação.

4.9.3. Contra danificação/perfuração de juntas isolantes

Diante do exposto no item 4.8.3, recomenda-se adotar os seguintes critérios para juntas aplicadas sobre trechos enterrados da tubulação:

- As suportabilidades dielétricas das juntas isolantes devem ser compatíveis com as máximas tensões às quais as mesmas poderão ficar submetidas em condição de curto-circuito.
- As juntas isolantes deverão ser dotadas dos descarregadores citados no item 4.8.3, os quais devem ser dimensionados prevendo a máxima energia de descarga à qual poderão ficar submetidos.

4.9.4. Contra danificação de sistemas de proteção catódica

Diante do exposto no item 4.8.4, recomenda-se adotar o seguinte critério:

- O dimensionamento do sistema de proteção catódica deve torná-lo compatível com as máximas tensões às quais o mesmo ficará submetido em condições de curto-circuito.

4.10. PROCEDIMENTO PARA A ANÁLISE DE UM CASO

Com base no que foi exposto nos itens 4.2 e 4.8 pode-se montar a tabela 4.8, a qual resume os riscos e os fenômenos a considerar em função do tipo de tubulação sob análise.

Em um projeto adequado da tubulação, exige-se que os fenômenos atuantes em cada caso atendam aos critérios definidos no item 4.9. Deve-se notar que os fenômenos da Indução Eletromagnética e Efeitos Associados à Injeção de Corrente no Solo, devem ser superpostos pois ocorrem simultaneamente.

Características da Tubulação Sob Análise		Riscos a Considerar	Fenômenos a Considerar	Duração do Fenômeno	Condição Operativa da Linha de Transmissão
Tubulação Aérea	Totalmente Isolada do Solo	Choque Elétrico em Pessoas Danificação de Juntas Isolantes (*)	Indução Eletrostática	Longa Duração	Regime Permanente
	Aterrada em um (1) ou mais Pontos	Choque Elétrico em Pessoas Danificação de Juntas Isolantes (*)	Indução Eletromagnética e Efeitos Associados à Injeção de Corrente no Solo	Curta Duração	Curto - Circuito Monofásico
Tubulação Enterrada		Choque Elétrico em Pessoas (**) Danificação da Tubulação e do Seu Revestimento	Indução Eletromagnética e Efeitos Associados à Injeção de Corrente no Solo	Curta Duração	Curto - Circuito Monofásico
Tubulação Revestida		Danificação de Sist. de Proteção Catódica			

(**) - Este Risco é Eliminado Automaticamente ao se Eliminar o Risco de Choque em Pessoas

(*) - Este Risco é Eliminado Automaticamente ao se Eliminar o Risco de Choque em Pessoas

TABELA 4.8

(**) - Este Risco é Eliminado Automaticamente ao se Eliminar o Risco de Choque em Pessoas

(*) - Este Risco é Eliminado Automaticamente ao se Eliminar o Risco de Choque em Pessoas

4.11. ASPECTOS A CONSIDERAR NA BUSCA DE MEIOS PARA A MITIGAÇÃO DOS EFEITOS

4.11.1. Distâncias e ângulos de aproximação entre LT e tubulação.

Quanto maior for a distância entre ponto de injeção de corrente no solo e tubulação metálica, mais atenuados serão os efeitos da elevação de potencial do solo.

À medida que a distância de paralelismo entre LT e tubulação aumenta, reduzem-se, a princípio, os efeitos das induções eletrostáticas e eletromagnéticas sobre a tubulação. Uma exceção a esta regra pode ocorrer no cálculo da indução eletrostática quando no interior da faixa de passagem da LT onde o campo elétrico comporta-se conforme a figura seguinte.

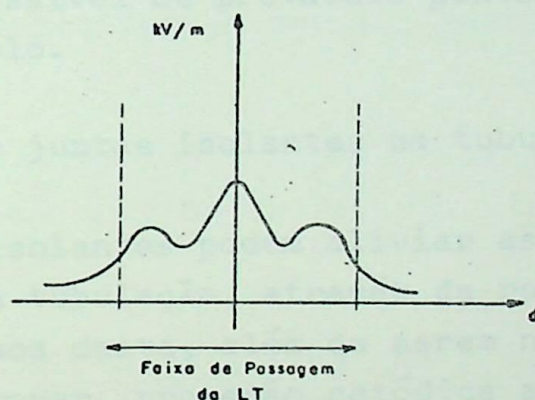


Figura 4.55

Quanto mais ortogonal for a aproximação entre LT e tubulação, mais reduzidos serão os efeitos da indução eletromagnética. Assim, o ideal seria que as aproximações fossem feitas sempre com ângulos de 90° .

4.11.2. Presença de cabos pára-raios aterrados na LT.

É sempre benéfica pois reduz bastante a corrente injetada no solo e a indução eletromagnética, reduzindo também um pouco a indução eletrostática (cêrca de apenas 2%).

4.11.3. Presença de pontos de aterramento na tubulação.

É eficaz sob o aspecto de eliminar a indução eletrostática. Entretanto, além de ser pouco eficaz sob o aspecto de indução eletromagnética possibilitando inclusive o fechamento de malhas através de contato humano, o que é indesejável; é desaconselhável por permitir pontos de transferência de potencial do solo para a tubulação. Considere-se ainda que estes aterramentos requerem cuidados especiais visando evitar possíveis pontos de corrosão na tubulação. No caso de serem utilizados, devem ser instalados o mais distante possível de prováveis pontos de injeção de corrente no solo.

4.11.4. Presença de juntas isolantes na tubulação

As juntas isolantes podem aliviar as solicitações elétricas sobre a tubulação, através da redução dos comprimentos contínuos desta, além de serem necessárias quando se pretende prover proteção catódica a tubulações enterradas revestidas. Entretanto, podem ser ineficazes quando o fluído transportado é bom condutor de eletricidade. Além disto, o seu uso deve ser evitado devido às mesmas facilitarem o surgimento de vazamentos na tubulação.

4.11.5. Presença do sistema de aterramento da LT

Considerando que no projeto da LT há um valor máximo de resistência/impedância de aterramento a respeitar (para que fique garantido um bom desempenho da LT quanto a descargas atmosféricas), pode-se alterar o arranjo de aterramento simétrico (normal) para um arranjo assimétrico (especial), mantendo-se a mesma resistência de aterramento, porém aliviando-se as solicitações elétricas sobre a tubulação.

4.11.6. Presença de revestimentos dotados de baixa resistência de fuga em tubulações enterradas

Sabe-se que uma redução na resistência de fuga do revestimento anti-corrosivo de uma tubulação enterrada implica em um aumento de sua admitância transversal Y_{TV} , levando a um aumento da admitância linear Y e da constante da propagação γ definidas no capítulo 3. Pode-se constatar, através do item 4.7, que as tensões elétricas que se propagam através da tubulação tornam-se mais amortecidas à medida que γ cresce.

Assim, tubulações cujos revestimentos, tenham baixa resistência de fuga apresentam menores níveis de perturbações elétricas.

4.11.7. Presença de corpos metálicos que propiciam blindagem à tubulação contra os fenômenos provocados pela LT

Embora não tenha sido avaliado quantitativamente neste trabalho, sabe-se que outras tubulações próximas e paralelas à tubulação sob análise propiciam efeitos de blindagem nesta contra influências devidas à Linha de Transmissão. O mesmo ocorre com fios(nus ou revestidos) instalados paralelamente e próximos a tubulações enterradas.

4.11.8. Corrente de curto-circuito e resistividade do solo

A corrente de curto-circuito monofásica é menor à medida que aumenta a distância do ponto de curto-circuito às subestações terminais da LT.

À medida que o valor da resistividade do solo cresce, também aumentam a indução eletromagnética e os efeitos associados à injeção de corrente no solo.

4.12. RECOMENDAÇÕES PARA PROJETO, INSTALAÇÃO E MANUTENÇÃO/OPERAÇÃO DE TUBULAÇÕES PRÓXIMAS A LINHAS DE TRANSMISSÃO

4.12.1. Diretrizes para a escolha da rota da tubulação

- As aproximações e os cruzamentos devem ser feitos preferencialmente em locais os mais distantes possíveis das SE's terminais da LT (baixo nível de curto-circuito) e cuja resistividade do solo seja baixa.
- Deve-se procurar fazer os cruzamentos nos pontos médios dos vãos de travessias, para que o eixo da tubulação fique o mais distante possível das torres deste vão.
- Os cruzamentos devem ser feitos com ângulos os mais próximos possíveis de 90° respeitando um valor mínimo de 60° .
- Nos casos de paralelismo deve-se minimizar a sua extensão devendo as tubulações ficarem à maior distância possível das LT's, sendo que a partir de uma distância igual a $85.2\sqrt{\rho}$ a Indução Eletromagnética pode ser considerada desprezível.

4.12.2. Sobre as características da tubulação

- Sempre que possível, deve-se instalar as tubulações enterradas no solo ao invés de aéreas. Isto reduz as possibilidades de choques elétricos em pessoas.
- Deve-se dar preferência aos revestimentos anti-corrosivos constituídos por material betuminoso ao invés de material plástico (polietileno), uma vez que aqueles propiciam o surgimento de solicitações elétricas mais amenas.
- Deve-se procurar evitar pontos de aterramento na tubu

lação principalmente nas proximidades de torres de LT's, devido à possibilidade de transferência de potencial do solo para a tubulação. No caso do aterramento ser imprescindível, deve-se tomar precauções quanto à corrosão da tubulação.

- Deve-se procurar evitar o uso de juntas isolantes uma vez que as mesmas podem facilitar o surgimento de vazamentos na tubulação.

4.12.3. Sobre meios para mitigação dos efeitos provocados pela linha de transmissão

É recomendável que:

- A LT possua cabos pára-raios aterrados e conectados às malhas de terra das subestações terminais.
- Os fios contrapeso das torres pertencentes aos vãos de cruzamento sejam posicionados de modo a distanciarem-se ao máximo da tubulação (arranjos de aterramento assimétricos).
- Seja analisada a possibilidade de aumentar as resistências de aterramento das torres pertencentes ao vão de cruzamento visando diminuir a injeção de corrente no solo naquele vão.
- Seja analisada a possibilidade de instalar a tubulação próxima a outra já existente para que haja um efeito de blindagem eletromagnética.
- Seja analisada, também, a possibilidade de instalar um condutor nu enterrado próximo à tubulação para proporcionar efeito de blindagem.
- O tempo de atuação da proteção da LT seja o menor possível.

4.12.4. Cuidados na fase de instalação da tubulação

- Deve-se atentar para o perigo de contato entre lanças de guindastes e cabos fase da LT.
- Os trechos que se encontram sob influência da LT devem ser separados eletricamente dos trechos não influenciados pela mesma visando eliminar a propagação de efeitos perigosos.

4.12.5. Cuidados durante a manutenção/operação da tubulação

- Deve-se evitar serviços de manutenção e operação que envolvam contato humano com a tubulação em períodos de más condições atmosféricas (temporais, trovoadas, etc).
- Devem ser utilizadas luvas e botas isolantes por pessoal que opere dispositivo ligado à tubulação.

4.13. CONCLUSÕES

Neste capítulo foram enfocados os principais aspectos que devem ser levados em conta na análise de aproximações/cruzamentos entre linhas de transmissão de energia elétrica em corrente alternada e tubulações metálicas.

Do exposto conclui-se que, a depender das características da aproximação/cruzamento entre linha de transmissão e tubulação, há diferentes fenômenos e riscos a considerar, os quais devem ser cuidadosamente analisados uma vez que podem ocasionar situações perigosas a pessoas, tubulação e dispositivos conectados a esta.

Os principais méritos deste capítulo são: Analisar cada um dos fenômenos e riscos que podem ocorrer quando da aproximação/cruzamento entre linha de transmissão e tubulação metálica, estabelecendo critérios para a segurança de pessoas, da tubulação e de dispositivos conectados a esta; Sugerir um procedimento para análise de casos de aproximação/cruzamento, o qual resume através de uma simples tabela, em função das características da tubulação, os riscos a considerar, os fenômenos a calcular e as condições operativas da linha de transmissão nas quais os mesmos devem ser calculados; Apresentar os principais aspectos que devem ser considerados na busca de meios para a mitigação dos efeitos, bem como propor recomendações para projeto, instalação e manutenção/operação da tubulação, os quais quando seguidos poderão evitar situações problemáticas.

CAPÍTULO 5 - EJEMPLOS NUMÉRICOS

5.1. INTRODUÇÃO

Apresenta-se inicialmente um exemplo didático através do qual é demonstrada uma aplicação da metodologia de cálculo da Indução Eletrostática. A seguir é apresentado outro exemplo didático no qual são demonstradas aplicações das metodologias de cálculo da Indução Eletromagnética e dos Efeitos Associados à Injeção de Corrente no Solo. Faz-se, então, referência a um caso real já analisado pela Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF) utilizando-se destas metodologias.

5.2. EXEMPLO DIDÁTICO Nº 1

Na figura seguinte, considere-se que a tubulação é AÉREA, NUA, totalmente isolada do solo e seccionada por juntas isolantes nos pontos C e E.

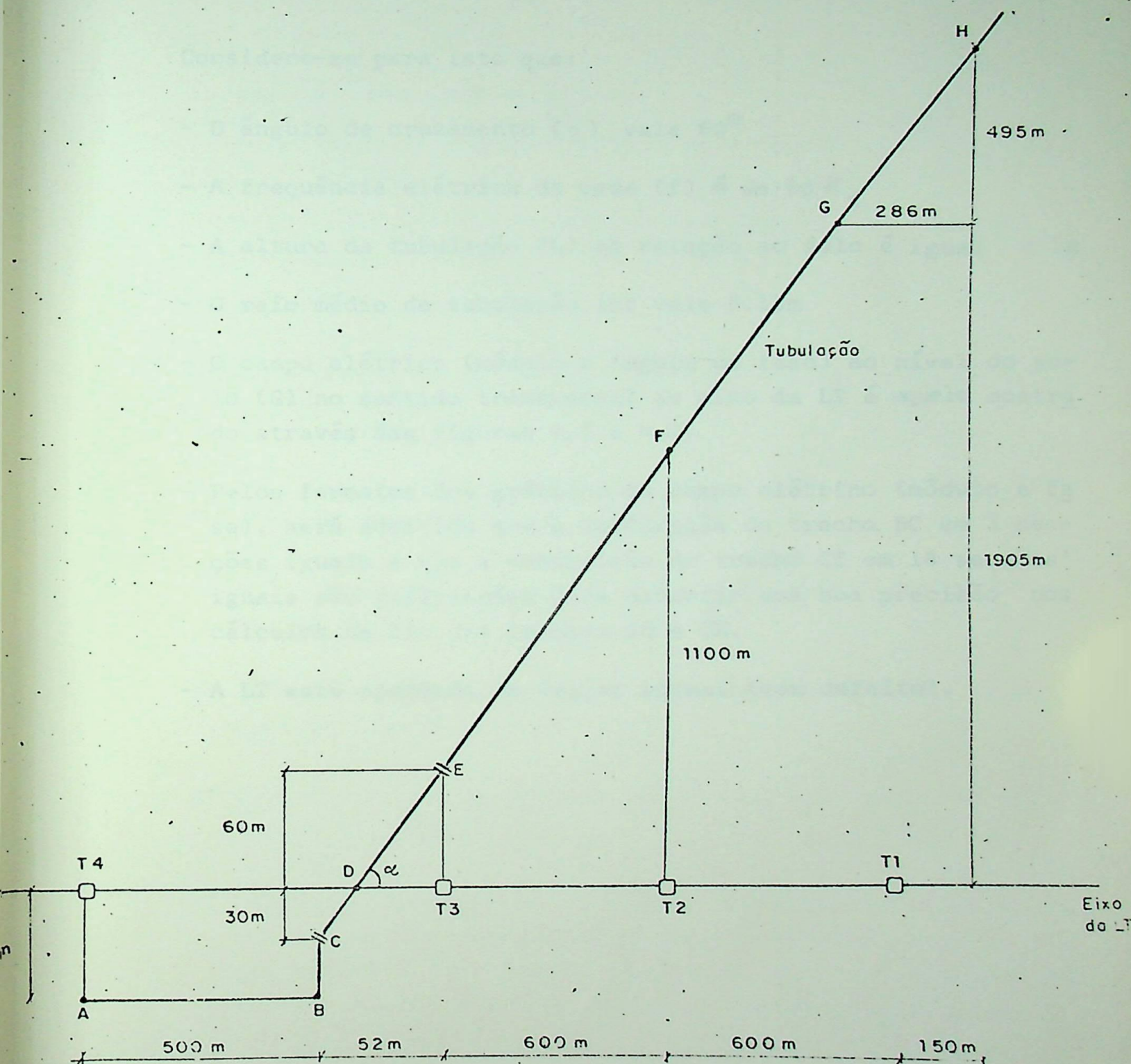


Figura 5.1

Através da tabela 4.8, verifica-se a necessidade de calcular a Indução Eletrostática na Tubulação para que seja possível avaliar o risco de choque elétrico em pessoas.

Considere-se para isto que:

- O ângulo de cruzamento (α) vale 60°
- A frequência elétrica da rede (f) é de 60 Hz
- A altura da tubulação (h) em relação ao solo é igual a 1m
- O raio médio da tubulação (r) vale 0.15m
- O campo elétrico (módulo e ângulo de fase) ao nível do solo (G) no sentido transversal ao eixo da LT é aquele mostrado através das figuras 4.2 e 4.3.
- Pelos formatos dos gráficos do campo elétrico (módulo e fase), será admitido que a subdivisão do trecho BC em 3 seções iguais e que a subdivisão do trecho CE em 18 seções iguais são suficientes para garantir uma boa precisão nos cálculos de Isc dos trechos BC e CE.
- A LT está operando em regime normal (sem defeito).

5.2.1. Cálculo da Indução Eletrostática

Pede-se :

- a) Calcular a capacitância linear própria da tubulação para a terra.
- b) Se o trecho AC for curto-circuitado para a terra em qual quer de seus pontos, pede-se:
 - b.1) Calcular a contribuição devida ao trecho AB para a $I_{sc}(AC)$.
 - b.2) Calcular a contribuição devida ao trecho BC para a $I_{sc}(AC)$.
 - b.3) Calcular a $I_{sc}(AC)$.
- c) Se o trecho AC permanecer isolado do solo calcular o va lor de $V_{oc}(AC)$.
- d) Se o trecho CE for curto-circuitado para a terra em qual quer de seus pontos calcular a $I_{sc}(CE)$.
- e) Se o trecho CE permanecer isolado do solo calcular o va lor de $V_{oc}(CE)$.
- f) Se o trecho EH for curto-circuitado para a terra em qual quer de seus pontos calcular a $I_{sc}(EH)$.
- g) Se o trecho EH permanecer isolado do solo calcular o va lor de $V_{oc}(EH)$.
- h) Calcular as correntes de choque de regime permanente às quais ficariam submetidas pessoas que tocassem a tubula ção metálica (totalmente isolada do solo e seccionada em trechos AC, CE e EH) em qualquer ponto de cada trecho.

SOLUÇÃO:

a) Cálculo da capacitancia linear da tubulação para a terra

$$C = \left[\frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2h}{r} \right]^{-1}$$

assim:

$$C = \left[\frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2 \times 1}{0.15} \right]^{-1} = 21.47 \times 10^{-12} \text{ F/m}$$

b) Trecho AC curto-circuitado para a terra em qualquer ponto.

b.1) Contribuição para I_{sc} (AC) devida apenas ao trecho AB.

Pelas figuras 4.2 e 4.3, vê-se que:

$$G(60\text{m do eixo da LT}) = 0.2 \angle 40^\circ \text{ kV/m}$$

$$\text{como: } L_{AB} = 500\text{m}$$

tem-se:

$$\begin{aligned} I_{sc}(AB) &= j \, 377 \times (0.2 \times 10^3 \angle 40^\circ) \times 1.0 \times (21.47 \times 10^{-12}) \times 500 \\ &= 0.81 \angle 130^\circ \text{ mA} \end{aligned}$$

b.2) Contribuição para I_{sc} (AC) devida apenas ao trecho BC.

Subdividindo-se o trecho BC em 3 secções iguais, tem-se:

TRECHO	SECCÃO	DISTÂNCIAS EIXO LT ÀS EXTREMIDADES DE CADA SECCÃO (m)	DISTÂNCIA DO EIXO DA LT AO PONTO MÉDIO DA SECCÃO (m)	G (V/m)	COMPRIMENTO DA SECCÃO (m)	$I_{sc}=j\omega GhCL$ (A)
BC	1	30/40	35.0	$0.3 \times 10^3 \underline{20^\circ}$	10.0	$24.3 \times 10^{-6} \cdot 110^\circ$
	2	40/50	45.0	$0.2 \times 10^3 \underline{30^\circ}$	10.0	$16.2 \times 10^{-6} \cdot 120^\circ$
	3	50/60	55.0	$0.2 \times 10^3 \underline{40^\circ}$	10.0	$16.2 \times 10^{-6} \cdot 130^\circ$

$$I_{sc}(BC) = \Sigma I_{sc} = 0.06 \underline{118^\circ} \text{mA}$$

Tabela 5.1

b.3) Cálculo de $I_{sc}(AC)$.

$$I_{sc}(AC) = I_{sc}(AB) + I_{sc}(BC) = 0.81 \angle 130^\circ + 0.06 \angle 118^\circ$$

$$I_{sc}(AC) = 0.87 \angle 129^\circ \text{ mA}$$

c) Cálculo de $V_{oc}(AC)$.

$$\text{como: } I_{sc} = j\omega G_h C_L = j\omega V_{oc} C_L$$

$$\text{tem-se que: } V_{oc} = \frac{I_{sc}}{j\omega C_L}$$

Assim:

$$V_{oc}(AC) = \frac{I_{sc}(AC)}{j\omega \cdot C \cdot L(AC)}$$

$$V_{oc}(AC) = \frac{0.87 \times 10^{-3} \angle 129^\circ}{j \times 377 \times 21.47 \times 10^{-12} \times (500 + 30)} = 202.80 \angle 39^\circ$$

$$\therefore V_{oc}(AC) = 202.80 \angle 39^\circ \text{ V}$$

d) Cálculo de Isc (CE)

Subdividindo-se o trecho CE em 18 secções iguais, tem-se:

SUB-TRECHO	SECCÃO	DISTÂNCIAS EIXO LT ÀS EXTREMIDADES DE CADA SECCÃO (m)	DISTÂNCIA DO EIXO DA LT AO PONTO MÉDIO DA SECCÃO (m)	G (V/m)	COMPRIMENTO DA SECCÃO (m)	Isc = $j\omega G h_{CL}$ (A)
CD	1	0/5	2,5	$6,0 \times 10^3$ 47°	5,77	$0,28 \times 10^{-3}$ 137°
	2	5/10	7,5	$3,7 \times 10^3$ -5°		$0,17 \times 10^{-3}$ 85°
	3	10/15	12,5	$3,8 \times 10^3$ -32°		$0,18 \times 10^{-3}$ 58°
	4	15/20	17,5	$3,2 \times 10^3$ -32°		$0,15 \times 10^{-3}$ 58°
	5	20/25	22,5	$1,8 \times 10^3$ -12°		$0,08 \times 10^{-3}$ 78°
	6	25/30	27,5	$1,0 \times 10^3$ 7°		$0,05 \times 10^{-3}$ 97°
DE	1'	0/5	2,5	$6,0 \times 10^3$ 47°	5,77	$0,28 \times 10^{-3}$ 137°
	2'	5/10	7,5	$3,7 \times 10^3$ -5°		$0,17 \times 10^{-3}$ 85°
	3'	10/15	12,5	$3,8 \times 10^3$ -32°		$0,18 \times 10^{-3}$ 58°
	4'	15/20	17,5	$3,2 \times 10^3$ -32°		$0,15 \times 10^{-3}$ 58°
	5'	20/25	22,5	$1,8 \times 10^3$ -12°		$0,08 \times 10^{-3}$ 78°
	6'	25/30	27,5	$1,0 \times 10^3$ 7°		$0,05 \times 10^{-3}$ 97°
	7'	30/35	32,5	$0,4 \times 10^3$ 15°		$0,02 \times 10^{-3}$ 105°
	8'	35/40	37,5	$0,2 \times 10^3$ 22°		$0,01 \times 10^{-3}$ 112°
	9'	40/45	42,5	$0,2 \times 10^3$ 30°		$0,01 \times 10^{-3}$ 120°
	10'	45/50	47,5	$0,2 \times 10^3$ 37°		$0,01 \times 10^{-3}$ 127°
	11'	50/55	52,5	$0,2 \times 10^3$ 40°		$0,01 \times 10^{-3}$ 130°
	12'	55/60	57,5	$0,2 \times 10^3$ 40°		$0,01 \times 10^{-3}$ 130°

Tabela 5.2

$I_{sc}(CE) = 1:60 \quad | \quad 92^\circ \quad mA$

e) Cálculo de $V_{OC}(CE)$.

$$V_{OC}(CE) = \frac{I_{sc}(CE)}{j\omega.C.L(CE)}$$

Assim:

$$V_{OC}(CE) = \frac{1.60 \times 10^{-3} \angle 92^\circ}{j \ 377 \times 21.47 \times 10^{-12} \times (52 / \cos 60^\circ)} = 1900.70 \angle 2^\circ$$

$$V_{OC}(CE) = 1900.70 \angle 2^\circ \text{ V}$$

f) Cálculo de $I_{sc}(EH)$.

Devido ao módulo do campo elétrico ser muito pequeno, se rá considerado que a $I_{sc}(EH)$ é desprezível.

$$I_{sc}(EH) = 0$$

g) Cálculo de $V_{OC}(EH)$.

$$\text{como: } V_{OC}(EH) = \frac{I_{sc}(EH)}{j\omega.C.L(EH)}$$

$$\text{e como: } I_{sc}(EH) = 0$$

$$\text{então: } V_{OC}(EH) = 0 \text{ V}$$

h) Cálculo das correntes de choque de regime permanente.

Será considerado, para fins de maior segurança, que estas correntes de choque são iguais a $I_{sc}(AC)$, $I_{sc}(CE)$ e $I_{sc}(EH)$.

Assim:

$$I_k(AC) = 0.87 \sqrt{192^0} \text{ mA}$$

$$I_k(CE) = 1.60 \sqrt{92^0} \text{ mA}$$

$$I_k(EH) = 0 \text{ mA}$$

Entretanto, isto não ocorre pois o cálculo de I_{sc} pressupõe que a resistência de aterramento vale $R = 0$ e sendo o aterramento feito através do corpo da pessoa, tem-se $R > 0$.

Portanto as correntes de choque serão menores que $I_{sc}(AC)$, $I_{sc}(CE)$ e $I_{sc}(EH)$.

5.2.2. Avaliação dos riscos

Uma vez que em nenhum dos trechos I_{sc} superou o critério dos 5 mA, pode-se concluir que não há risco de choque elétrico em pessoas.

5.3. EXEMPLO DIDÁTICO Nº 2

Na figura seguinte, considere-se que a tubulação é ENTERRADA e REVESTIDA no trecho CE, o qual é seccionado por juntas isolantes, sendo AÉREA e NUA em todos os demais trechos e aterrada nos pontos A, F e H.

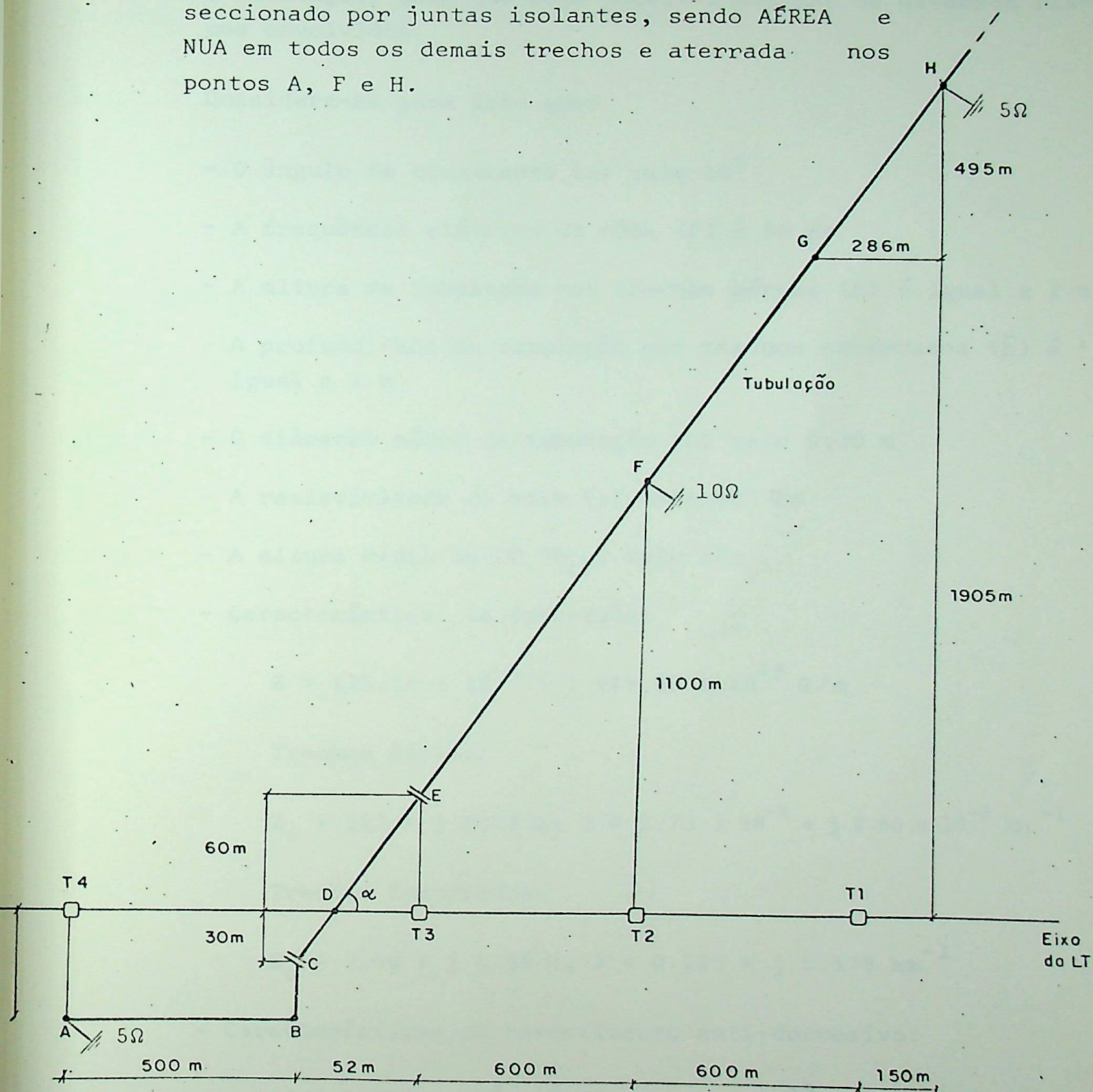


Figura 5.2

Através da tabela 4.8, verifica-se a necessidade de calcular tanto a Indução Eletromagnética na Tubulação quanto a Injeção de Corrente no Solo com seus Efeitos Associados (Elevação do Potencial do Solo e Transferência de Potencial do Solo para a Tubulação) para que seja possível avaliar os diversos riscos envolvidos..

Considere-se para isto que:

- O ângulo de cruzamento (α) vale 60°
- A frequência elétrica da rede (f) é 60 Hz
- A altura da tubulação nos trechos aéreos (h) é igual a 1 m
- A profundidade da tubulação nos trechos enterrados ($\bar{h}$) é igual a 1 m
- O diâmetro médio da tubulação (D) vale 0.30 m
- A resistividade do solo (ρ) vale $500 \Omega m$
- A altura média da LT (h_{LT}) vale 10m
- Características da tubulação:

$$Z = 175.84 \times 10^{-6} + j 828.93 \times 10^{-6} \Omega / m$$

Trechos Aéreos:

$$Z_c = 322 - j 33.8 \Omega; \gamma = 2.73 \times 10^{-4} + j 2.60 \times 10^{-3} km^{-1}$$

Trechos Enterrados:

$$Z_c = 2.40 + j 1.88 \Omega; \gamma = 0.213 + j 0.179 km^{-1}$$

- Características do revestimento anti-corrosivo:

$$rf = 0.929 \times 10^4 \Omega m^2; \delta_{rev} = 4 \times 10^{-3} m$$

- Ocorre um curto-circuito monofásico na torre T1 da LT ao qual estão associadas as correntes ilustradas na figura 5.3 a seguir.

Correntes fornecidas pelas subestações terminais da LT:

$$I_{fA} = 30 \angle 0^\circ \text{ kA}$$

$$I_{fB} = 10 \angle 0^\circ \text{ kA}$$

Correntes circulantes nos cabos pára-raios da LT:

$$I_{PRA1} = 24 \angle 0^\circ \text{ kA}$$

$$I_{PRA2} = 22 \angle 0^\circ \text{ kA}$$

$$I_{PRA3} = 21 \angle 0^\circ \text{ kA}$$

$$I_{PRA4} = 20.5 \angle 0^\circ \text{ kA}$$

$$I_{PRB1} = 9.5 \angle 0^\circ \text{ kA}$$

Correntes injetadas no solo pelas torres:

T_1, T_2, T_3 e T_4 :

$$I_1 = I_{fA} + I_{fB} - I_{PRA1} - I_{PRB1} = 6500 \angle 0^\circ \text{ A}$$

$$I_2 = I_{PRA1} - I_{PRA2} = 2000 \angle 0^\circ \text{ A}$$

$$I_3 = I_{PRA2} - I_{PRA3} = 1000 \angle 0^\circ \text{ A}$$

$$I_4 = I_{PRA3} - I_{PRA4} = 500 \angle 0^\circ \text{ A}$$

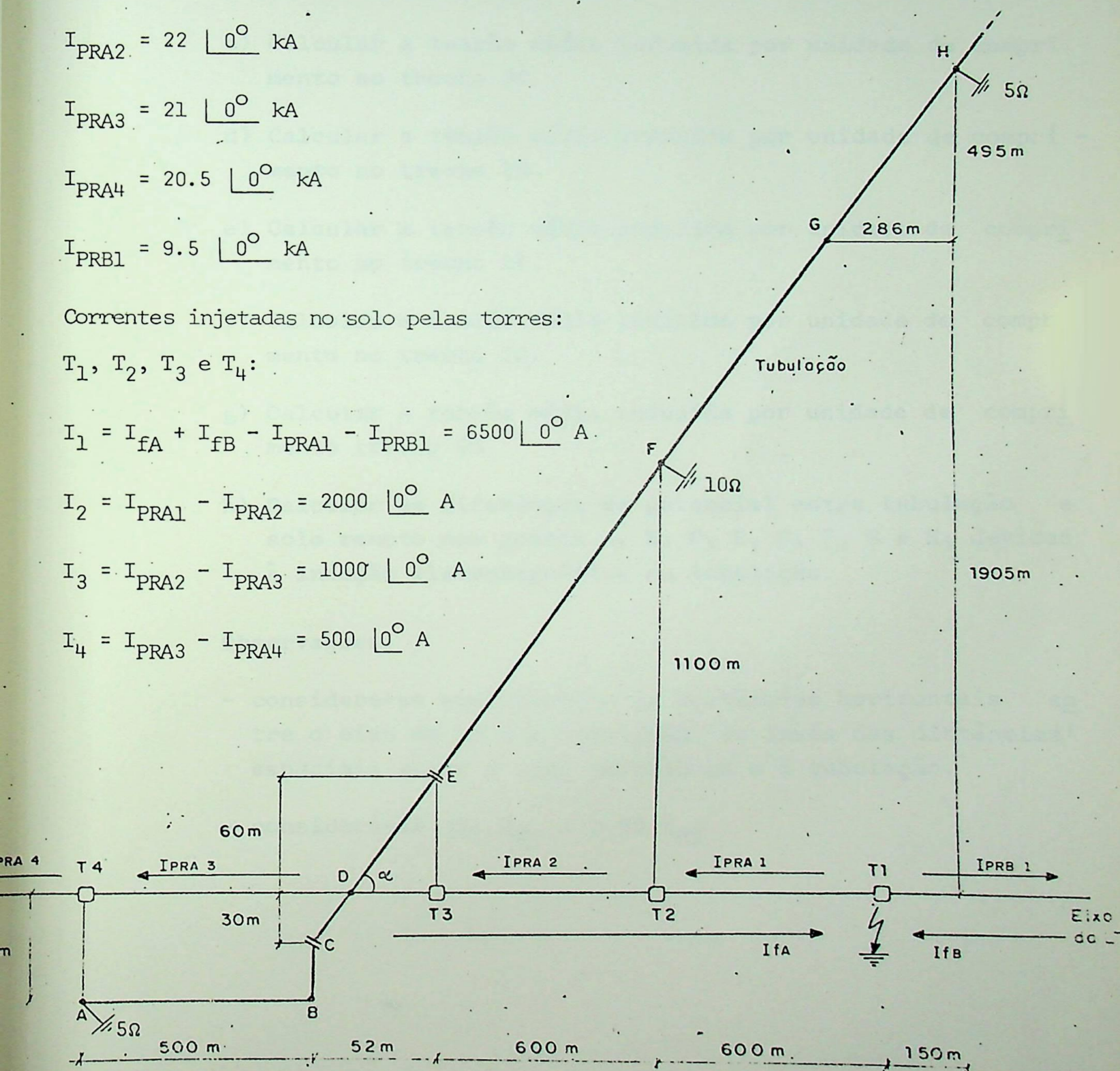


Figura 5.3

5.3.1. Cálculo da Indução Eletromagnética

Pede-se:

- a) Calcular a distância máxima entre eixos de paralelismo a considerar.
- b) Calcular a tensão média induzida por unidade de comprimento no trecho AB.
- c) Calcular a tensão média induzida por unidade de comprimento no trecho BC.
- d) Calcular a tensão média induzida por unidade de comprimento no trecho CE.
- e) Calcular a tensão média induzida por unidade de comprimento no trecho EF.
- f) Calcular a tensão média induzida por unidade de comprimento no trecho FG.
- g) Calcular a tensão média induzida por unidade de comprimento trecho GH
- h) Calcular as diferenças de potencial entre tubulação e solo remoto nos pontos A, B, C, D, E, F, G e H, devidas à indução eletromagnética na tubulação.

Observações:

- considere-se nos cálculos as distâncias horizontais entre o eixo da LT e a tubulação, ao invés das distâncias espaciais entre a fase defeituosa e a tubulação.
- considere-se que $Z_{PT} = 0.90 Z_{CT}$

SOLUÇÃO:

- a) A distância máxima entre eixos de paralelismo a considerar vale:

$$D_{\max} = 85.2 \sqrt{500} = 1905 \text{ m}$$

- b) A tensão média induzida por unidade de comprimento no trecho AB (E_{0AB}) pode ser calculada através da expressão:

$$E_{0AB} = Z_{CT} I_{fA} - Z_{PT} I_{PRA3}$$

onde:

$$\begin{aligned} Z_{CT} &= 59.2 \times 10^{-6} + j75.4 \times 10^{-6} \ln \frac{85.2 \sqrt{500}}{60} \\ &= 59.2 \times 10^{-6} + j260.7 \times 10^{-6} \Omega/\text{m} \end{aligned}$$

$$Z_{PT} = 0.9 Z_{CT} = 53.3 \times 10^{-6} + j234.6 \times 10^{-6} \Omega/\text{m}$$

$$I_{fA} = 30000 \angle 0^\circ \text{ A}$$

$$I_{PRA3} = 21000 \angle 0^\circ \text{ A}$$

Logo:

$$E_{0AB} = 2.97 \angle 77.2^\circ \text{ V/m}$$

- c) A tensão média induzida por unidade de comprimento no trecho BC (E_{0BC}) é igual a zero devido ao perpendicularismo entre LT e tubulação. Logo:

$$E_{0BC} = 0$$

- d) A tensão média induzida por unidade de comprimento no trecho CE (E_{0CE}) pode ser obtida de uma forma razoavelmente precisa, através do procedimento exposto no item 4.4.4.

Inicialmente, divide-se o trecho CE em dois subtrechos (CD e DE) e cada um destes subtrechos é dividido em várias secções conforme a tabela seguinte:

SUBTRECHO	SECÇÃO	DISTÂNCIAS DA LT ÀS EXTREMIDADES DE CADA SECÇÃO (m)	DISTÂNCIA MÉDIA (m)
CD	1	0/10	5.0*
	2	10/30	17.3
DE	1'	0/10	5.0*
	2'	10/30	17.3
	3'	30/60	42.4

Tabela 5.3

* Apenas na primeira secção foi tomada a média aritmética ao invés da média geométrica.

Note-se que: $h_{LT} = 10m$

$$\frac{1}{3} \leq \frac{d_i}{d_{i+1}} \leq 3$$

Calculam-se, a seguir, as tensões induzidas em cada secção conforme a tabela abaixo:

SECÇÃO	Distâncias extremas(m)	Distância média(m)	Z_{CT} (Ω/m)	I_{FA} (A)	Z_{PT} (Ω/m)	I_{PRA3} (A)	E_i (V/m)	Li (m)	E_{iLi} (V)
1	0/10	5.0	4.51×10^{-4} <u>82.47°</u>		4.07×10^{-4} <u>82.47°</u>		4.98 <u>82.47°</u>	5.77	28.7 <u>82.47°</u>
2	10/30	17.3	3.59×10^{-4} <u>80.52°</u>		3.23×10^{-4} <u>80.52°</u>		3.99 <u>80.52°</u>	11.55	46.1 <u>80.52°</u>
1'	0/10	5.0	4.51×10^{-4} <u>82.47°</u>	30000 <u>0°</u>	4.07×10^{-4} <u>82.47°</u>	21000 <u>0°</u>	4.98 <u>82.47°</u>	5.77	28.7 <u>82.47°</u>
2'	10/30	17.3	3.59×10^{-4} <u>80.52°</u>		3.23×10^{-4} <u>80.52°</u>		3.99 <u>80.52°</u>	11.55	46.1 <u>80.52°</u>
3'	30/60	42.4	2.93×10^{-4} <u>78.34°</u>		2.64×10^{-4} <u>78.34°</u>		3.24 <u>78.34°</u>	17.32	56.1 <u>78.34°</u>

Tabela 5.4

Note-se que: $Li = \frac{d_{i+1} - d_i}{tg \alpha}$

$$\underbrace{5.96}_{\Sigma Li} \underbrace{205.6 | 80.47^\circ}_{\Sigma E_{iLi}}$$

$$E_i = Z_{CT} I_{FA} - Z_{PT} I_{PRA3}$$

Finalmente, tem-se que:

$$E_{0CE} = \frac{\sum E_i L_i}{L_i} = \frac{205.6 \text{ } \underline{80.47^\circ}}{51.96} = 3.96 \text{ } \underline{80.47^\circ} \text{ V/m}$$

e) A tensão média induzida por unidade de comprimento no trecho EF (E_{0EF}) também pode ser obtida através do procedimento do item 4.4.4. Assim:

TRECHO	SECÇÃO	Distâncias extremas (m)	Distância média (m)
EF	1	60/180	103.9
	2	180/540	311.8
	3	540/1100	770.7

Tabela 5.5

Note-se que: $\frac{1}{3} \leq \frac{d_i}{d_{i+1}} \leq 3$

Finalmente, tem-se que:

$$E_{0EF} = \frac{\sum E_i L_i}{L_i} = \frac{757.4 \text{ } \underline{61.38^\circ}}{600.45} = 1.26 \text{ } \underline{61.38^\circ} \text{ V/m}$$

SEÇÃO	Distâncias extremas (m)	Distância média (m)	Z_{CT} (Ω/m)	I_{fA} (A)	Z_{PT} (Ω/m)	I_{PRA2} (A)	E_i (V/m)	L_i (m)	$EiLi$ (V)
1	60/180	103.9	2.27×10^{-4} <u>74.890</u>		2.04×10^{-4} <u>74.890</u>		2.32 <u>74.890</u>	69.28	160.9 <u>74.890</u>
2	180/540	311.8	1.46×10^{-4} <u>66.170</u>	30000 <u>00</u>	1.31×10^{-4} <u>66.170</u>	22000 <u>00</u>	1.50 <u>66.170</u>	207.85	311.4 <u>66.170</u>
3	540/1100	770.7	0.90×10^{-4} <u>49.060</u>		0.81×10^{-4} <u>49.060</u>		0.92 <u>49.060</u>	323.32	297.5 <u>49.060</u>

Tabela 5.6

$$\underbrace{600.45 \quad 757.4 \quad 61.380}_{\Sigma Li} \quad \Sigma EiLi$$

Note-se que: $L_i = \frac{d_{i+1} - d_i}{tg \alpha}$

$$E_i = Z_{CT} I_{fA} - Z_{PT} I_{PRA2}$$

f) A tensão média induzida por unidade de comprimento no trecho FG (E_{0FG}) pode ser obtida ainda através do procedimento do item 4.4.4. Assim:

TRECHO	SECÇÃO	DISTÂNCIAS EXTREMAS(m)	DISTÂNCIA MÉDIA(m)
FG	ÚNICA	1100/1905**	1447.6

Tabela 5.7

** Este é o valor de distância máxima de paralelismo a considerar

$$D_{\max} \leq 85.2 \sqrt{\rho}$$

$$\text{Note-se que: } \frac{1}{3} \leq \frac{d_i}{d_{i+1}} \leq 3$$

$$\text{Então: } Z_{CT} = 0.62 \times 10^{-4} \angle 19.28^\circ \quad \Omega/\text{m}$$

$$I_{fA} = 30\,000 \angle 0^\circ \text{ A}$$

$$Z_{pT} = 0.56 \times 10^{-4} \angle 19.28^\circ \quad \Omega/\text{m}$$

$$I_{PRA1} = 24\,000 \angle 0^\circ \text{ A}$$

$$\text{Como: } L_i = \frac{d_{i+1} - d_i}{\text{tg } \alpha}$$

$$\text{e: } E_i = Z_{CT} I_{fA} - Z_{PT} I_{PRA1}$$

$$\text{logo: } E_i = 0.52 \cdot 19.28^0 \text{ V/m}$$

$$\text{portanto: } E_{0FG} = \frac{\sum E_i L_i}{\sum L_i} = \frac{0.52 \cdot 19.28^0 \times 464.77}{464.77}$$

$$E_{0FG} = 0.52 \cdot 19.28^0 \text{ V/m}$$

g) A tensão média induzida por unidade de comprimento no trecho GH (E_{0GH}) será considerada igual a zero devido a este trecho encontrar-se a uma distância superior a $D_{\max} = 1905\text{m}$.

h) Cálculo da diferença de potencial entre tubulação e solo remoto nos pontos A, B, C, D, E, F, G e H.

Esta questão necessita ser subdividida em outras cinco que são:

h.1) Cálculo das impedâncias para a terra vistas de cada ponto da tubulação.

h.2) Análise do 1º tramo de tubulação.

h.3) Análise do 2º tramo de tubulação.

h.4) Análise do 3º tramo de tubulação.

h.5) Sumário dos resultados obtidos.

Desta forma:

h.1). Impedâncias para a terra vistas de cada ponto da tubulação.

Sabe-se que os pontos A, F e H são aterrados através de resistências de aterramento cujos valores são respectivamente 5, 10 e 5 Ω .

Com base na metodologia exposta no item 4.7.1 do capítulo 4 pode-se montar a tabela abaixo:

		IMPEDÂNCIA EQUIVALENTE VISTA (Ω)		Impedância Equivalente no ponto (Ω). $Z_{eq} = 1 / (\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2})$
		À ESQUERDA (Z_1)	À DIREITA (Z_2)	
1º t r a m o	A	5 $\angle 0^\circ$	∞	5 $\angle 0^\circ$
	B	5.10 $\angle 4.65^\circ$	∞	5.10 $\angle 4.65^\circ$
	C _e	5.11 $\angle 4.92^\circ$	∞	5.11 $\angle 4.92^\circ$
2º t r a m o	C _d	∞	106.07 $\angle -1.45^\circ$	106.07 $\angle -1.45^\circ$
	D	302.43 $\angle 0.86^\circ$	155.52 $\angle 0.83^\circ$	102.71 $\angle 0.84^\circ$
	E _e	106.07 $\angle -1.45^\circ$	∞	106.07 $\angle -1.45^\circ$
3º t r a m o	E _d	∞	3.71 $\angle 7.18^\circ$	3.71 $\angle 7.18^\circ$
	F _e	∞	3.50 $\angle 8.64^\circ$	3.50 $\angle 8.64^\circ$
	F _d	10 $\angle 0^\circ$	5.34 $\angle 13.49^\circ$	3.50 $\angle 8.64^\circ$
	G	10.19 $\angle 4.34^\circ$	5.05 $\angle 5.38^\circ$	3.38 $\angle 5.05^\circ$
	H _e	10.34 $\angle 6.91^\circ$	4.93 $\angle -0.09^\circ$	3.34 $\angle 2.15^\circ$

Tabela 5.8

Observe-se que nos pontos C, E, F e H há respectivamente duas juntas isolantes e dois pontos ' de aterramento. Por isto, tornou-se necessário subdividir estes pontos nos pontos C_e , C_d , E_e , E_d , F_e , F_d , H_e e H_d .

A coluna da direita da tabela anterior pode ser útil quando da determinação do valor da resis - tência de aterramento a aplicar eficazmente, reduzindo a tensão tubulação-solo, em um ponto ' qualquer da tubulação. Vide equação V.10 do Anexo V.

h.2) Análise do 1º tramo de tubulação

Sabe-se que:

$$Z = 175.84 \times 10^{-6} + j \, 828.93 \times 10^{-6} \, \Omega/m$$

Sabe-se também que:

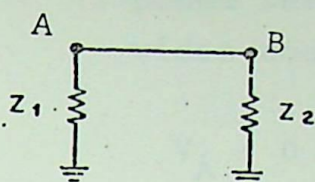
$$E_{0AB} = 2.97 \, \underline{77.2^\circ} \, V/m$$

$$E_{0BC} = 0 \, V/m$$

$$L_{AB} = 500m$$

$$L_{BC} = 30m$$

- As tensões nos pontos A e B devidas à indução eletromagnética no trecho AB valem (conforme ' metodologia do item 4.7.2.1):



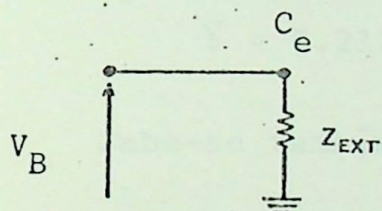
$$V_A = 0$$

$$V_B = 1485 \angle 77.2^\circ \text{ V}$$

$$\text{sendo: } Z_1 = 5 \angle 0^\circ \Omega$$

$$Z_2 = \infty$$

- A tensão no ponto C_e devido à influência do trecho AB vale (conforme metodologia do item 4.7.2.2):



$$V_{C_e} = 1485 \angle 77.2^\circ \text{ V}$$

$$\text{sendo: } Z_{EXT} = \infty$$

- As tensões nos pontos B e C_e devidas à indução eletromagnética no trecho BC, bem como a tensão no ponto A devida à influência do trecho BC, são nulas devido a $E_{0BC} = 0$.

- As diferenças de potencial entre tubulação e solo remoto nos pontos A, B e C_e deste tramo' podem ser obtidos superpondo-se os efeitos devidos aos trechos AB e BC. Assim.

$$V_A = 0 + 0 = 0 \quad V$$

$$V_B = 1485 \underline{77.2^0} + 0 = 1485 \underline{77.2^0} \quad V$$

$$V_{C_e} = 1485 \underline{77.2^0} + 0 = 1485 \underline{77.2^0} \quad V$$

h.3) Análise do 2º tramo de tubulação

Como este tramo é enterrado tem-se:

$$Z_c = 2.40 + j 1.88 \, \Omega$$

$$\gamma = 0.213 + j 0.179 \, \text{km}^{-1}$$

Sabe-se também que:

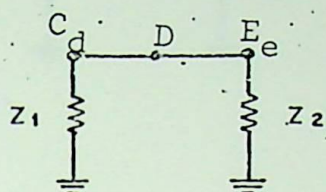
$$E_{0CD} = E_{0DE} = E_{0CE} = 3.96 \underline{80.47^0}$$

$$L_{CD} = 34.64 \, \text{m}$$

$$L_{CE} = 103.92 \, \text{m}$$

Como a indução eletromagnética é constante ao longo de todo o tramo, este será analisado como sendo um único trecho CE no qual serão calculadas as tensões nos pontos C_d, D e E_e, devidas à indução eletromagnética no próprio trecho CE.

Assim, conforme item 4.7.2.1, as diferenças de potencial entre tubulação e solo remoto nos pontos C_d , D e E_e valem:



$$V_{C_d} = -201.64 \angle 0.62^\circ \text{ V}$$

$$V_D = -72.02 \angle 3.04^\circ \text{ V}$$

$$V_{E_e} = 201.64 \angle 0.62^\circ \text{ V}$$

$$\text{sendo: } Z_1 = \infty$$

$$Z_2 = \infty$$

h.4) Análise do 3º tramo de tubulação

Sabe-se que:

$$Z = 175.84 \times 10^{-6} + j 828.93 \times 10^{-6} \Omega/\text{m}$$

Sabe-se também que:

$$E_{OEF} = 1.26 \angle 61.38^\circ \text{ V/m}$$

$$E_{OFG} = 0.52 \angle 19.28^\circ \text{ V/m}$$

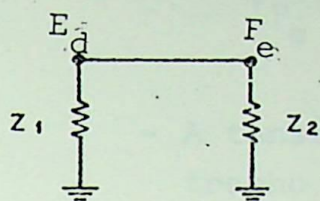
$$E_{OGH} = 0 \text{ V/m}$$

$$L_{EF} = 1200.89 \text{ m}$$

$$L_{FG} = 929.53 \text{ m}$$

$$L_{GH} = 571.58 \text{ m}$$

- As tensões nos pontos E_d e F_e devidas à indução eletromagnética no trecho EF valem (conforme metodologia do item 4.7.2.1):



$$V_{E_d} = -1513.12 \angle 61.38^\circ \text{ V}$$

$$V_{F_e} = 0$$

sendo: $Z_1 = \infty$

$$Z_2 = 3.50 \angle 8.64^\circ \Omega$$

- A tensão no ponto F_d devido à influência do trecho EF vale:

$$V_{F_d} = V_{F_e} = 0$$

- As tensões nos pontos G e H_e devidas à influência do trecho EF valem (item 4.7.2.2):

como: $V_{F_d} = 0$

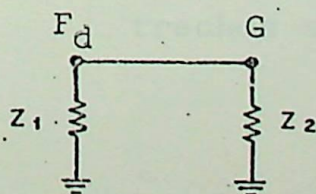
então: $V_G = 0$

$$V_{H_e} = 0$$

- As tensões nos pontos F_d e G devidas à indução eletromagnética no trecho FG valem (item 4.7.2.1):

$$V_{F_d} = -317.12 \angle 4.04^\circ$$

$$V_G = 160.15 \angle 9.42^\circ$$



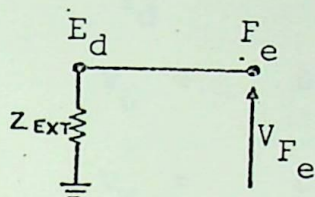
Sendo: $Z_1 = 10 \angle 0^\circ \Omega$

$$Z_2 = 5.05 \angle 5.38^\circ \Omega$$

- A tensão no ponto F_e devida à influência do trecho FG vale:

$$V_{F_e} = V_{F_d} = -317.12 \angle 4.04^\circ \text{ V}$$

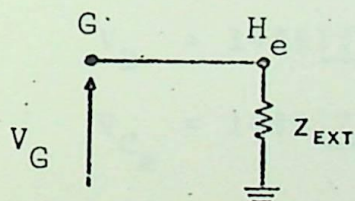
- A tensão no ponto E_d devida à influência do trecho FG vale (item 4.7.2.2):



$$V_{E_d} = -317.12 \angle 4.04^\circ \text{ V}$$

Sendo: $Z_{EXT} = \infty$

- A tensão no ponto H_e devida à influência do trecho FG vale (item 4.7.2.2):



$$V_{H_e} = 156.28 \angle 4.04^\circ \text{ V}$$

Sendo: $Z_{EXT} = 4.93 \angle -0.09^\circ \Omega$

- As tensões provocadas pela indução eletromagnética do trecho GH nele próprio e nos demais trechos são nulas uma vez que $E_{0GH} = 0$.

- As diferenças de potencial entre tubulação e solo remoto nos pontos E_d , F_e , F_d , G e H_e , podem ser obtidas superpondo-se os efeitos dos trechos EF, FG e GH. Assim:

$$V_{E_d} = -1513.12 \underline{61.38^0} - 317.12 \underline{4.04^0} + 0 = -1705.28 \underline{52.37^0} V$$

$$V_{F_e} = 0 - 317.12 \underline{4.04^0} + 0 = -317.12 \underline{4.04^0} V$$

$$V_{F_d} = 0 - 317.12 \underline{4.04^0} + 0 = -317.12 \underline{4.04^0} V$$

$$V_G = 0 + 160.15 \underline{9.92^0} + 0 = 160.15 \underline{9.42^0} V$$

$$V_{H_e} = 0 + 156.28 \underline{4.04^0} + 0 = 156.28 \underline{4.04^0} V$$

h.5) Sumário dos resultados obtidos:

1º tramo:

$$V_A = 0 \quad V$$

$$V_B = 1485 \underline{77.2^0} \quad V$$

$$V_{C_e} = 1485 \underline{77.2^0} \quad V$$

2º tramo

$$V_{C_d} = -201.64 \underline{0.62^0} \quad V$$

$$V_D = -72.02 \underline{3.04^0} \quad V$$

$$V_{E_e} = 201.64 \underline{0.62^0} \quad V$$

3º tramo

$$V_{E_d} = -1705.28 \mid \underline{52.37^0} \quad V$$

$$V_{F_e} = - 317.12 \mid \underline{4.04^0} \quad V$$

$$V_{F_d} = - 317.12 \mid \underline{4.04^0} \quad V$$

$$V_G = 160.15 \mid \underline{9.42^0} \quad V$$

$$V_{H_e} = 156.28 \mid \underline{9.04^0} \quad V$$

5.3.2. Cálculo de Elevação do Potencial do Solo e da Transferência de Potencial do Solo para a Tubulação.

Pede-se:

- a) Calcular os potenciais criados no solo, em relação a uma terra remota, nos pontos A, B, C, D, E, F, G e H, devidos às injeções de corrente no solo.
- b) Calcular os potenciais criados na tubulação, em relação a uma terra remota, nos pontos A, B, C, D, E, F, G e H devidos às transferências de potenciais do solo para a tubulação através dos pontos A, F e H.
- c) Calcular as diferenças de potencial tubulação-solo nos pontos A, B, C, D, E, F, G e H computando os efeitos simultâneos de ELEVAÇÃO DE POTENCIAL DO SOLO E TRANSFERÊNCIA DE POTENCIAL DO SOLO PARA A TUBULAÇÃO, os quais são subtrativos entre si.

Observações:

- Denomine-se

X_{ij} - distância da torre i ao ponto j (m)

V_{ij} - potencial criado no ponto j devido à corrente injetada no solo através da torre i (V).

- Considere-se que todos os pontos da tubulação encontram-se a distâncias das torres cujos $X_{ij} \geq 3L$.

SOLUÇÃO:

a) Potenciais no solo nos pontos A, B, C, D, E, F, G e H.

Ponto de injeção de corrente	Corrente Ii Injetada no solo (A)	Xij (m)		$V_{ij} = \frac{\rho \cdot I_i}{2\pi \cdot X_{ij}} \quad (V)$	
Torre T1	6500 $\underline{10^\circ}$	X1A	1753.0	V 1A	295.1 $\underline{10^\circ}$
		X1B	1253.4	V 1B	412.7 $\underline{10^\circ}$
		X1C	1252.4	V 1C	413.0 $\underline{10^\circ}$
		X1D	1234.7	V 1D	418.9 $\underline{10^\circ}$
		X1E	1201.5	V 1E	430.5 $\underline{10^\circ}$
		X1F	1253.0	V 1F	412.8 $\underline{10^\circ}$
		X1G	1108.4	V 1G	466.7 $\underline{10^\circ}$
		X1H	1910.9	V 1H	270.7 $\underline{10^\circ}$
Torre T2	2000 $\underline{10^\circ}$	X2A	1153.6	V 2A	138.0 $\underline{10^\circ}$
		X2B	654.8	V 2B	243.1 $\underline{10^\circ}$
		X2C	652.7	V 2C	243.8 $\underline{10^\circ}$
		X2D	634.7	V 2D	250.8 $\underline{10^\circ}$
		X2E	603.0	V 2E	263.9 $\underline{10^\circ}$
		X2F	1100.0	V 2F	144.7 $\underline{10^\circ}$
		X2G	1193.9	V 2G	133.3 $\underline{10^\circ}$
		X2H	2047.3	V 2H	77.7 $\underline{10^\circ}$
Torre T3	1000 $\underline{10^\circ}$	X3A	553.3	V 3A	143.8 $\underline{10^\circ}$
		X3B	79.4	V 3B	1002.3 $\underline{10^\circ}$
		X3C	60.0	V 3C	1326.3 $\underline{10^\circ}$
		X3D	34.7	V 3D	2293.4 $\underline{10^\circ}$
		X3E	60.0	V 3E	1326.3 $\underline{10^\circ}$
		X3F	1253.0	V 3F	63.5 $\underline{10^\circ}$
		X3G	1530.4	V 3G	52.0 $\underline{10^\circ}$
		X3H	2334.9	V 3H	34.1 $\underline{10^\circ}$

Tabela 5.9

Ponto de injeção de corrente	Corrente Ii Injetada no solo (A)	Xij (m)		$V_{ij} = \frac{\rho \cdot I_i}{2\pi \cdot X_{ij}}$ (V)	
Torre T4	500 $\underline{10^\circ}$	X4A	60.0	V 4A	663.2 $\underline{0^\circ}$
		X4B	503.6	V 4B	79.0 $\underline{10^\circ}$
		X4C	500.9	V 4C	79.4 $\underline{10^\circ}$
		X4D	517.3	V 4D	76.9 $\underline{10^\circ}$
		X4E	555.3	V 4E	71.7 $\underline{10^\circ}$
		X4F	1592.8	V 4F	25.0 $\underline{10^\circ}$
		X4G	1954.9	V 4G	20.4 $\underline{10^\circ}$
		X4H	2692.0	V 4H	14.8 $\underline{10^\circ}$

Tabela 5.9 (Continuação)

Logo, os potenciais no solo são:

$$V_A = V_{1A} + V_{2A} + V_{3A} + V_{4A} = 1240.1 \underline{10^\circ} \text{ V}$$

$$V_B = V_{1B} + V_{2B} + V_{3B} + V_{4B} = 1737.1 \underline{10^\circ} \text{ V}$$

$$V_C = V_{1C} + V_{2C} + V_{3C} + V_{4C} = 2062.5 \underline{10^\circ} \text{ V}$$

$$V_D = V_{1D} + V_{2D} + V_{3D} + V_{4D} = 3040.0 \underline{10^\circ} \text{ V}$$

$$V_E = V_{1E} + V_{2E} + V_{3E} + V_{4E} = 2092.4 \underline{10^\circ} \text{ V}$$

$$V_F = V_{1F} + V_{2F} + V_{3F} + V_{4F} = 646.0 \underline{10^\circ} \text{ V}$$

$$V_G = V_{1G} + V_{2G} + V_{3G} + V_{4G} = 672.4 \underline{10^\circ} \text{ V}$$

$$V_H = V_{1H} + V_{2H} + V_{3H} + V_{4H} = 397.3 \underline{10^\circ} \text{ V}$$

- b) Potenciais na tubulação nos pontos A, B, C, D, E, F, G e H.

Sendo a tubulação aterrada nos pontos A, F e H, os potenciais do solo nestes pontos transferem-se integralmente para a tubulação. Assim:

$$V_A = 1240.1 \angle 0^\circ \text{ V}$$

$$V_F = V_{F_e} = V_{F_d} = 646.0 \angle 0^\circ \text{ V}$$

$$V_H = V_{H_e} = 397.3 \angle 0^\circ \text{ V}$$

Este item será subdividido em outros cinco que são:

- b.1) Cálculo das impedâncias para a terra vistas de cada ponto da tubulação.
- b.2) Análise do 1º tramo de tubulação.
- b.3) Análise do 2º tramo de tubulação.
- b.4) Análise do 3º tramo de tubulação.
- b.5) Sumário dos resultados obtidos.

Assim:

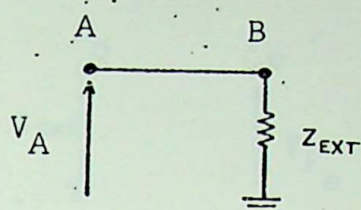
- b.1) Impedâncias para a terra vistas de cada ponto da tubulação.

As impedâncias vistas à esquerda e à direita de cada ponto são as mesmas apresentadas no item 5.3.1. (questão h.1).

- b.2) Análise do 1º tramo

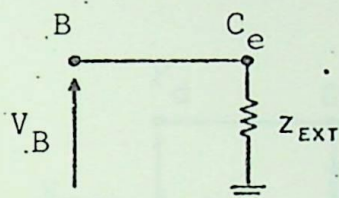
As tensões nos pontos B e C_e devidas à propagação do potencial transferido do solo para o ponto A

valem (item 4.7.2.2):



$$V_B = 1240.1 \angle 0^\circ \text{ V}$$

sendo: $Z_{EXT} = \infty$



$$V_{C_e} = 1240.1 \angle 0^\circ \text{ V}$$

sendo: $Z_{EXT} = \infty$

b.3) Análise do 2º tramo

Não há potenciais transferidos do solo para o 2º tramo pois não há pontos de aterramento no mesmo. Assim:

$$V_{C_d} = 0$$

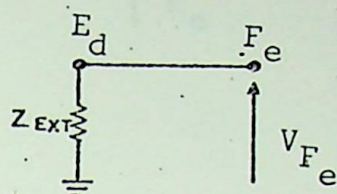
$$V_D = 0$$

$$V_{E_e} = 0$$

b.4) Análise do 3º tramo

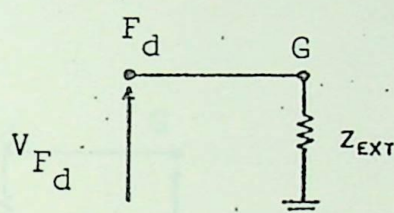
O potencial transferido do solo para o ponto F pro paga-se ao longo do 3º tramo criando os seguintes

potenciais nos pontos E_d , G e H_e (item 4.7.2.2):



$$V_{E_d} = 646.0 \angle 0^\circ \text{ V}$$

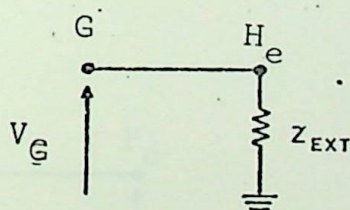
$$\text{sendo: } Z_{EXT} = \infty$$



$$V_G = 611.13 \angle -8.10^\circ \text{ V}$$

$$\text{sendo: } Z_{EXT} = 5.05 \angle 5.38^\circ \Omega$$

$$L_{FG} = 929.53 \text{ m}$$

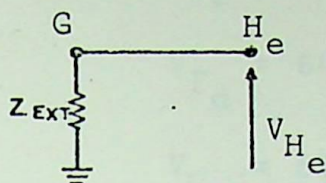


$$V_{H_e} = 596.36 \angle -13.48^\circ \text{ V}$$

$$\text{sendo: } Z_{EXT} = 4.93 \angle -0.09^\circ \Omega$$

$$L_{GH} = 571.58 \text{ m}$$

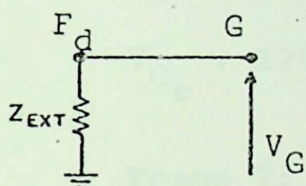
O potencial transferido do solo para o ponto H pro paga-se ao longo do 3º tramo criando os seguintes potenciais nos pontos G, F_d , F_e , E_d (item 4.7.2.2):



$$V_G = 391.67 \angle -2.58^\circ \text{ V}$$

$$\text{sendo: } Z_{EXT} = 10.19 \angle 4.34^\circ \Omega$$

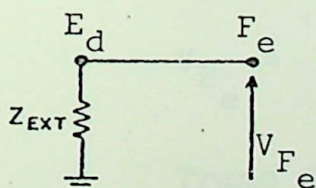
$$L_{GH} = 571.58 \text{ m}$$



$$V_{F_d} = V_{F_e} = 384.27 \angle -6.91^\circ \text{ V}$$

$$\text{sendo: } Z_{EXT} = 10 \angle 0^\circ \Omega$$

$$L_{FG} = 929.53 \text{ m}$$



$$V_{E_d} = 384.27 \angle -6.91^\circ \text{ V}$$

$$\text{sendo: } Z_{EXT} = \infty$$

A superposição dos efeitos leva a:

$$V_{E_d} = 646.0 \angle 0^\circ + 384.27 \angle -6.91^\circ = 1028.52 \angle -2.58^\circ \text{ V}$$

$$V_{F_e} = 646.0 \angle 0^\circ + 384.27 \angle -6.91^\circ = 1028.52 \angle -2.58^\circ \text{ V}$$

$$V_{F_d} = 646.0 \angle 0^\circ + 384.27 \angle -6.91^\circ = 1028.52 \angle -2.58^\circ \text{ V}$$

$$V_G = 611.13 \angle -8.10^\circ + 391.67 \angle -2.58^\circ = 1001.69 \angle -5.94^\circ \text{ V}$$

$$V_{H_e} = 596.36 \angle -13.48^\circ + 397.3 \angle 0^\circ = 987.07 \angle -8.10^\circ \text{ V}$$

b.5) Sumário dos resultados obtidos

Tramo 1:

$$V_A = 1240.1 \angle 0^\circ \text{ V}$$

$$V_B = 1240.1 \angle 0^\circ \text{ V}$$

$$V_{C_e} = 1240.1 \angle 0^\circ \text{ V}$$

Tramo 2:

$$V_{C_d} = 0$$

$$V_D = 0$$

$$V_{E_e} = 0$$

Tramo 3:

$$V_{E_d} = 1028.52 \angle -2.58^\circ \text{ V}$$

$$V_{F_e} = 1028.52 \angle -2.58^\circ \text{ V}$$

$$V_{F_d} = 1028.52 \angle -2.58^\circ \text{ V}$$

$$V_G = 1001.69 \angle -5.94^\circ \text{ V}$$

$$V_{H_e} = 987.07 \angle -8.10^\circ \text{ V}$$

c) Cálculo das diferenças de potencial tubulação-solo nos pontos A, B, C, D, E, F, G e H devidas aos efeitos conjuntos e subtrativos da ELEVAÇÃO DE POTENCIAL DO SOLO e da TRANSFERÊNCIA DE POTENCIAL DO SOLO PARA A TUBULAÇÃO.

A diferença de potencial tubulação-solo em cada ponto será igual à diferença entre os resultados finais obtidos nos itens "b.5" e "a" deste item 5.3.2. Assim:

$$V_A = 1240.1 \text{ } \underline{0^{\circ}} - 1240.1 \text{ } \underline{0^{\circ}} = 0 \quad \text{V}$$

$$V_B = 1240.1 \text{ } \underline{0^{\circ}} - 1737.1 \text{ } \underline{0^{\circ}} = -497.0 \text{ } \underline{0^{\circ}} \quad \text{V}$$

$$V_{C_e} = 1240.1 \text{ } \underline{0^{\circ}} - 2062.5 \text{ } \underline{0^{\circ}} = -822.5 \text{ } \underline{0^{\circ}} \quad \text{V}$$

$$V_{C_d} = 0 - 2062.5 \text{ } \underline{0^{\circ}} = -2062.5 \text{ } \underline{0^{\circ}} \quad \text{V}$$

$$V_D = 0 - 3040.0 \text{ } \underline{0^{\circ}} = -3040.0 \text{ } \underline{0^{\circ}} \quad \text{V}$$

$$V_{E_e} = 0 - 2092.4 \text{ } \underline{0^{\circ}} = -2092.4 \text{ } \underline{0^{\circ}} \quad \text{V}$$

$$V_{E_d} = 1028.52 \text{ } \underline{-2.58^{\circ}} - 2092.4 \text{ } \underline{0^{\circ}} = -1065.93 \text{ } \underline{2.49^{\circ}} \quad \text{V}$$

$$V_{F_e} = 1028.52 \text{ } \underline{-2.58^{\circ}} - 646.0 \text{ } \underline{0^{\circ}} = 384.27 \text{ } \underline{-6.92^{\circ}} \quad \text{V}$$

$$V_{F_d} = 1028.52 \text{ } \underline{-2.58^{\circ}} - 646.0 \text{ } \underline{0^{\circ}} = 384.27 \text{ } \underline{-6.92^{\circ}} \quad \text{V}$$

$$V_G = 1001.69 \text{ } \underline{-5.94^{\circ}} - 672.4 \text{ } \underline{0^{\circ}} = 340.09 \text{ } \underline{-17.75^{\circ}} \quad \text{V}$$

$$V_{H_e} = 987.07 \text{ } \underline{-8.10^{\circ}} - 397.3 \text{ } \underline{0^{\circ}} = 596.37 \text{ } \underline{-13.48^{\circ}} \quad \text{V}$$

5.3.3. Superposição dos fenômenos e avaliação dos riscos

Pede-se::

- a) Calcular o perfil da tensão tubulação - solo ao longo de toda a tubulação considerando a atuação conjunta de todos os fenômenos envolvidos.
- b) Avaliar os riscos envolvidos face aos critérios adotados.

SOLUÇÃO:

- a) Cálculo do perfil da tensão tubulação-solo ao longo da tubulação.

O perfil final das tensões tubulação - solo pode ser obtido superpondo-se os resultados obtidos nos itens 5.3.1 (questão h.5) e 5.3.2 (questão c).

$$V_A = 0 + 0 = 0 \quad V$$

$$V_B = 1485 \underline{77.2^\circ} - 497.0 \underline{0^\circ} = 1457.81 \underline{-83.38^\circ} \quad V$$

$$V_{C_e} = 1485 \underline{77.2^\circ} - 822.5 \underline{0^\circ} = 1529.88 \underline{-71.18^\circ} \quad V$$

$$V_{C_d} = -201.64 \underline{0.62^\circ} - 2062.5 \underline{0^\circ} = -2264.13 \underline{-0.06^\circ} \quad V$$

$$V_D = -72.02 \underline{3.04^\circ} - 3040.0 \underline{0^\circ} = -3111.92 \underline{0.07^\circ} \quad V$$

$$V_{E_e} = 201.64 \underline{0.62^\circ} - 2092.4 \underline{0^\circ} = -1890.77 \underline{-0.07^\circ} \quad V$$

$$V_{E_d} = -1705.28 \underline{52.37^\circ} - 1065.93 \underline{2.49^\circ} = -2528.05 \underline{33.54^\circ} \quad V$$

$$V_{F_e} = -317.12 \underline{4.04^\circ} + 384.27 \underline{-6.92^\circ} = 94.63 \underline{-46.50^\circ} \quad V$$

$$V_{F_d} = -317.12 \underline{4.04^\circ} + 384.27 \underline{-6.92^\circ} = 94.63 \underline{-46.50^\circ} \quad V$$

$$V_G = 160.15 \underline{9.42^\circ} + 340.09 \underline{-17.75^\circ} = 488.08 \underline{-9.13^\circ} \quad V$$

$$V_{H_e} = 156.28 \underline{4.04^\circ} + 596.37 \underline{-13.48^\circ} = 746.88 \underline{-0.17^\circ} \quad V$$

Note-se que, poderiam ser obtidas as diferenças de potencial tubulação-solo para outros pontos além dos calculados, através das equações apresentadas no item 4.7.2

b) Análise dos riscos considerados face aos critérios adotados.

Conforme a tabela 4.8 torna-se necessário analisar neste exemplo:

- Risco de choque em pessoas

- Risco de danificação da tubulação e do seu revestimento.
- Risco de danificação de juntas isolantes.
- Risco de danificação de sistemas de proteção catódica.

Assim:

b.1) Risco de choque em pessoas.

Através do Anexo VI, tem-se que a máxima tensão de toque permitida vale

$$V_t = (R_c + \frac{3 \rho_s}{2}) I_K$$

para: $R_c = 1000 \ \Omega$

$\rho_s = \rho = 500 \ \Omega m$

$I_K = 164 \times 10^{-3} \text{ A}$ (critério adotado no item 4.9.1).

tem-se

$V_t = 287 \text{ V}$

Assim, é recomendável que nos trechos AC e EH (aéreos e nus) a máxima diferença de potencial entre tubulação e solo não ultrapasse 287 V

Pelos resultados da questão "a" deste item 5.3.3 conclui-se que apenas nos pontos A e F da tubulação não há perigo de choque elétrico. Torna-se, assim, necessário lançar mão dos meios expostos no item 4.11.

b.2) Risco de danificação da tubulação e do seu revestimento.

Conforme foi exposto no item 4.9, a máxima diferença de potencial entre tubulação e solo no trecho CE (enterrado e revestido) da tubulação não deve ultrapassar 5kV.

Pelos resultados da questão "a" conclui-se que não há riscos de danificação da tubulação e do seu revestimento.

b.3) Risco de danificação de juntas isolantes

Deve-se verificar se as juntas aplicadas nos pontos C e E são compatíveis com as seguintes diferenças de potencial entre seus bornes:

$$\Delta V_C = |V_{C_e} - V_{C_d}| = 2285.85 \text{ V}$$

$$\Delta V_E = |V_{E_e} - V_{E_d}| = 4234.12 \text{ V}$$

Caso estas juntas isolantes não sejam compatíveis, pode-se lançar mão dos meios de mitigação descritos no item 4.11.

b.4) Risco de danificação de sistemas de proteção catódica

Caso houvesse algum sistema de proteção catódica deveria-se verificar a compatibilidade do mesmo com as diferenças de potencial presentes. Havendo incompatibilidade poder-se-ia lançar mão dos meios de mitigação descritos no item 4.11.

5.4. Análise de um caso real

A metodologia exposta no capítulo 4 e exemplificada neste capítulo já foi aplicada pela Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF) na análise de um caso real de aproximação entre linhas de transmissão 230 kV e uma tubulação de transporte de ácido sulfúrico (56).

CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES

No capítulo 2 foi focado o importante e difícil problema da determinação da resistividade elétrica do solo.

Do exposto pode-se concluir que: O tema abordado é bastante complexo, e uma melhor modelagem do solo pode ser obtida à medida que seja maior a sensibilidade do engenheiro para o problema em questão; A resistividade medida na configuração Wenner só pode ser considerada como o valor médio de resistividade do solo para uma profundidade numericamente igual à separação entre eletrodos, em caso de solos homogêneos; Só há sentido falar-se sobre resistividade aparente de um solo, desde que associe-se à mesma uma determinada configuração de eletrodos e um certo espaçamento entre os mesmos; Não há uma identidade entre o ponto de inflexão de uma curva de profundidade ($\rho_a \times a$) e a profundidade onde inicia uma nova camada de solo, embora ambos geralmente sejam próximos; Para uma região geográfica, pode ser necessário adotar diferentes valores de resistividade do solo em função do tipo de análise que se pretende efetuar.

Os principais méritos deste capítulo são: sugerir metodologia simples que possibilita a determinação do valor da resistividade equivalente do solo a ser utilizado no cálculo dos acoplamentos indutivos e que fornece subsídios para a escolha do valor da resistividade equivalente a ser utilizado no cálculo dos acoplamentos resistivos; e definir o tipo de resistividade de solo que deve ser considerado em função da análise a ser realizada.

No capítulo 3 foi focado o cálculo dos parâmetros elétricos de tubulações metálicas.

Do exposto pode-se concluir que: O cálculo preciso destes parâmetros elétricos exige a solução de equações transcendentais, as quais necessitam ser resolvidas por processos iterativos, sendo possível estimar valores iniciais para estes parâmetros através de métodos não iterativos; Tubulações cujo revestimento tenha baixa resistência de fuga apresentam parâmetros elétricos muito sensíveis à resistividade do solo e vice-versa.

Os principais méritos deste capítulo são: Apresentar uma metodologia para o cálculo preciso dos parâmetros elétricos das tubulações metálicas, a qual tem sido pouco divulgada; E sugerir um método não iterativo bastante simples através do qual é possível obter-se boas estimativas para inicializar o processo iterativo já citado.

No Capítulo 4 foram enfocados os principais aspectos que devem ser levados em conta na análise de aproximações/cruzamentos entre linhas de transmissão de energia elétrica em corrente alternada e tubulações metálicas.

Do exposto conclui-se que, a depender das características da aproximação/cruzamento entre linha de transmissão e tubulação, há diferentes fenômenos e riscos a considerar, os quais devem ser cuidadosamente analisados uma vez que podem ocasionar situações perigosas a pessoas, tubulação e dispositivos conectados a esta.

Os principais méritos deste capítulo são: Analisar cada um dos fenômenos e riscos que podem ocorrer quando da aproximação/cruzamento entre linha de transmissão e tubulação metálica, estabelecendo critérios para a segurança de pessoas, da tubulação e de dispositivos conectados a esta; Sugerir um procedimento para análise de casos de aproximação/cruzamento, o qual resume através de uma simples tabela, em função das características da tubulação, os riscos a considerar, os fenômenos a calcular e as condições operativas da linha de transmissão nas quais os mesmos devem ser calculados; Apresentar os principais aspectos que devem ser considerados na busca de meios para a mitigação dos efeitos, bem como propor recomendações para o projeto, instalação e manutenção/operação da tubulação, os quais quando seguidos poderão evitar situações problemáticas.

No capítulo 5 foram apresentados dois exemplos didáticos que esclarecem a aplicação das metodologias de cálculo dos diversos fenômenos elétricos abordados no capítulo 4. É feita

também, referência a um caso real já analisado pela Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF) utilizando-se destas metodologias.

No Anexo I são apresentados alguns valores típicos de características de tubulações, os quais poderão ser utilizados em caso de dificuldade na obtenção de valores exatos para a tubulação sob estudo.

No Anexo II é apresentado um programa computacional para o cálculo dos parâmetros elétricos das tubulações metálicas, o qual foi desenvolvido com base na teoria exposta no capítulo 3.

No Anexo III é apresentada uma metodologia para cálculo da distribuição da corrente de curto-circuito entre cabos pára-raios e terra em uma linha de transmissão.

No Anexo IV é apresentado um programa computacional para o cálculo da distribuição da corrente de curto-circuito entre cabos pára-raios e terra, o qual foi desenvolvido com base na metodologia exposta no Anexo III.

No Anexo V é analisada a influência da presença de pontos de aterramento na tubulação metálica frente aos diversos fenômenos e riscos envolvidos.

No Anexo VI são apresentados os conceitos de tensão de toque e tensão de passo.

No Anexo VII é apresentada a metodologia para determinação das características elétricas do cabo pára-raios equivalente de uma linha de transmissão.

Vale ressaltar que os programas computacionais desenvolvidos constituem-se em importantes ferramentas de trabalho ainda pouco divulgadas no setor elétrico nacional.

Sugerem-se como propostas para continuação deste trabalho:

- Efetuar medições em campo visando confirmar a validade dos cálculos teóricos;

- Executar uma análise de sensibilidade generalizada visando propôr um método de cálculo alternativo simplificado;
- Avaliar a eficácia de vários tipos de blindagem que poderiam ser utilizadas como meios de mitigação;
- Analisar a influência da condutividade dos fluídos transportados nos resultados deste trabalho;
- Avaliar a parcela de potencial do solo que é transferida para o metal da tubulação enterrada revestida, através do seu revestimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) - ELECTRICITÉ DE FRANCE - Direction de Études et Recherches: Publicação nº HM.61-3-MG/RV/GB, Janeiro de 1967.
- (2) - FAVEZ et GOUGEUIL - Contribution a L'étude des problèmes posés par la proximité de lignes électriques aériennes et de conduites métalliques enterrées, CIGRÉ, Junho de 1966.
- (3) - B.JACQUET - Problèmes d'influence des lignes électriques sur des canalisations métalliques enterrées, CIGRÉ, Junho de 1980.
- (4) - POHL - Influence des lignes aériennes a haute tension sur les conduites tubulaires gainées, CIGRÉ, 1966.
- (5) - KOHLMAYER - Effects of high-voltage systems on pipelines - Measures and technical rules, CIGRÉ, Junho de 1977.
- (6) - KOUTEYNIKOFF - Interim report on replies to "Questionnaire on regulations limiting the interference coupled into metallic pipelines by H.V. Electrical Systems", CIGRÉ, Junho de 1981.
- (7) - SOBRAL and MEDEIROS - Interference among overhead transmission lines and pipelines - A new approach, CIGRÉ, 1983.
- (8) - FEIST - Zone of influence of earth potential rise, CIGRÉ, Revista ELECTRA nº 60.
- (9) - DUBANTON et GRAND - Influence of the location of the fault on the screening effect of earth wires, CIGRÉ, Outubro de 1974.
- (10) - SHERBUNDY and SEBO - Voltages induced by AC transmission lines on underground pipelines, CIGRÉ, Janeiro de 1977.

- (11)- BORUCKI and SZUKALSKI - Influence of earth fault current in overhead AC transmission lines on underground conductors , CIGRÉ, Junho de 1981.
- (12)- DABKOWSKY and TAFLOVE - Mutual design considerations for overhead AC transmission lines and gas transmission pipelines, EPRI, 1978.
- (13)- FRAZIER - Power line induced AC potential on natural-gas pipelines for complex rights-of-way configurations, EPRI, 1983.
- (14)- BÖCKER and OEDING - Induktionsspannungen an Pipelines in Trassen von Hochspannungsleitungen, ELEKTRIZITÄTSWIRTSCHAFT, 1966.
- (15)- PEABODY and VERHIEL - The effects of high-voltage AC transmission lines on buried pipelines, IEEE Transactions on Industry, Maio/Junho 1971.
- (16)- JAFFA and STEWART - Magnetic field induction from overhead transmission and distribution power lines on buried irrigation pipelines, IEEE Transactions on PAS, Março 1981.
- (17)- TAFLOVE, GENGE and DABKOWSKY - Mitigation of buried pipeline voltages due to 60 Hz AC inductive coupling (PART 1; PART 2), IEEE Transactions on PAS, Setembro/Outubro 1979.
- (18)- MONASA/THEMAG/PTEL - Sistema de transmissão de Itaipu - Critérios de projeto das linhas de transmissão, Março de 1978.
- (19)- THEMAG - Estudo da interferência de LT's da CHESF no acidoduto da Caraíba Metais, Julho de 1983.
- (20)- CHESF - Estudo das aproximações e cruzamentos entre LT's e tubulações metálicas - Aplicação ao projeto acidoduto da Caraíba Metais, concluído em setembro de 1983.

- (21)- ELETROSUL/THEMAG - Estudo do cruzamento da LT 500kV Areia-Curitiba com o poliduto Araucária - Paranaguá.
- (22)- FURNAS - Metodologia de cálculo das tensões induzidas em oleodutos nas travessias com linhas de transmissão.
- (23)- LIGHT/PTEL - Influência da linha de transmissão 500kV Adrianópolis - Grajaú sobre o oleoduto REDUC - Angra dos Reis, Novembro de 1974.
- (24)- CESP/THEMAG - Estudo dos efeitos elétricos em tubulações de óleo ou gás enterradas próximas a linhas de transmissão, Novembro de 1973.
- (25)- CEEE - Análise e determinação de tensões induzidas por li - nhas de transmissão de energia elétrica em oleodutos enter - rados, Junho de 1982.
- (26)- FURNAS - Cálculo referente à travessia da linha de transmi^s são Tijuco Preto - Itabera 750 kV sobre oleodutos e gasodu - tos da PETROBRÁS, Outubro de 1980.
- (27)- PETROBRÁS - Note technique relative à l'influence des lignes haute tension 500 kV Cachoeira Paulista - Adrianópolis sur le pipeline OSVOL, Dezembro de 1971.
- (28)- PETROBRÁS - Estudo das influências das linhas de alta tensão sobre os oleodutos Barueri - Utinga.
- (29)- PESONEN, KATTELOS, ALATALO et GRAND - Élévation du potentiel de terre et lignes de télécommunications, CIGRÉ, 1970.
- (30)- POMPONI/SOLBIATI - Induzione elettromagnetica provocata dalle linee elettriche sullè linee di telecomunicazioni, Julho de 1975.
- (31)- CCITT - Guide for the application in à simple case of the directives, 1974.

- (32) - FEIST - Zone of influence of earth potential rise for use at CCITT, CIGRÉ, Abril de 1981.
- (33) - FEIST - Draft of chapters 5.3 and 5.4 of the New CCITT Directives, CIGRÉ, Junho de 1983.
- (34) - PETTERSSON/JANCKE - The influence of high voltage power lines on telecommunication and low voltage installations due to induction or other remote effects, SWEDISH STATE POWER BOARD, 1956.
- (35) - CCITT - Directives concerning the protection of telecommunication lines against harmful effects from electricity lines, 1965.
- (36) - CHESF - Seccionamento e aterramento de cercas: cruzamento de LT's CHESF sobre poço artesiano, 1984.
- (37) - CHESF - Seccionamento/aterramento de cêrcas: Projeto Lama Preta, 1984.
- (38) - EPRI - Transmission Line reference book 345 kV and above - 2nd edition, 1982.
- (39) - ARGUS MOREIRA - Eletromagnetismo, ALMEIDA ALVES EDITORA, 1971.
- (40) - RENATO NUNES - Notas de aula relativas à disciplina linhas de transmissão, EFEI, 1981.
- (41) - UHLIG - Corrosion Handbook, JOHN WILLEY AND SONS, 1948.
- (42) - STEVENSON - Elementos de análise de sistemas de potência, Mc GRAW-HILL DO BRASIL, 1975.
- (43) - FUCHS - Transmissão de energia elétrica, LIVROS TÉCNICOS E CIENTÍFICOS EDITORA, 1979.

- (44) - DISIENO/MARCHENKO/VASSELL - General equations for fault currents in transmission line ground wires, IEEE Transactions on PAS, Novembro/Dezembro de 1970.
- (45) - REGINA GIBSON - Cálculo de distribuição de corrente entre cabos pára-raios e terra de LT's durante faltas fase-terra, 5º SNPTEE, 1979.
- (46) - TAGG - Earth resistances, PITMAN PUBLISHING CORPORATION.
- (47) - SUNDE - Earth conduction effects in transmission systems, DOVER PUBLICATIONS, 1968.
- (48) - LEON - Sistemas de aterramento, ÉRICO DO BRASIL, 1982.
- (49) - IEEE - Tutorial course: The electrostatic and electromagnetic effects of AC transmission lines, 1979.
- (50) - IEEE - Electrostatic effects of overhead transmission lines (PART 1 and PART 2), 1971.
- (51) - DALZIEL - Electric shock hazard, IEEE Spectrum, 1972.
- (52) - IEEE - Guide for safety in AC substation grounding (IEEE-80), 1976.
- (53) - WESTINGHOUSE - Electrical transmission and distribution reference book, 1950.
- (54) - DWIGHT - Calculation of resistances to ground, AIEE Transactions, Dezembro de 1936.
- (55) - SCHWARZ - Analytical expressions for the resistance of grounding systems, AIEE Transactions, Agosto de 1954.
- (56) - DACONTI/CAMPONÊS DO BRASIL - Experience of CHESF concerning interferences between EHV transmission lines and pipelines, CIGRÉ, Session 1986.

A N E X O I

VALORES TÍPICOS DE CARACTERÍSTICAS DE TUBULAÇÕES

Este Anexo objetiva fornecer alguns valores típicos de características de tubulações e dos seus revestimentos. Podem ser utilizados como uma primeira aproximação em caso de não se dispor das características reais de uma tubulação que necessite ser analisada.

Assim (01)(02)(03)(04)(12)(20)(21)(41):

- a) O diâmetro da tubulação (D) costuma variar de 250mm a 800mm atingindo em alguns casos 1500mm.
- b) A espessura do aço da tubulação (t) costuma variar de 5 a 15mm, sendo proporcional ao diâmetro de tubulação.
- c) A resistividade do aço da tubulação (ρ_T) costuma variar de $0.15 \times 10^{-6} \Omega m$ a $0.20 \times 10^{-6} \Omega m$.
- d) A permeabilidade magnética do aço da tubulação (μ_T) costuma variar de $50\mu_0$ a $1000\mu_0$, sendo mais comuns os valores de $200\mu_0$ a $300\mu_0$.
- e) A resistência linear da tubulação (R) costuma variar de $0.050 \Omega/km$ a $0.200 \Omega/km$.
- f) A indutância linear da tubulação (L) costuma variar de 1.3 mH/km a 2 mH/km .
- g) Os revestimentos normalmente utilizados costumam ter espessura (δ_{rev}) variando de 3 a 7mm, sendo 4mm o valor mais comum.
- h) Os revestimentos normalmente utilizados visam a proteção anti-corrosiva e costumam pertencer a um dos seguintes grupos:
 - 1º Grupo: - fibra de vidro + betume
 - fibra de vidro + breu de hulha (COAL-TAR)
 - juta
 - 2º Grupo: - polietileno
 - PVC

Nos E.E.U.U, 50% das tubulações de aço são revestidas contra a corrosão, sendo que 80% destas são revestidas com material do 1º Grupo⁽⁴¹⁾. Os materiais do 1º Grupo têm estabilidade térmica inferior aos do 2º Grupo.

i) Tanto para os revestimentos do 1º Grupo quanto para os do 2º, pode-se considerar que a permissividade elétrica (ϵ_{rev}) é igual a $5\epsilon_0$.

j) Como valores típicos de resistividades de revestimentos (ρ_{rev}) é usual considerar:

- Revestimentos do 1º Grupo

$$\rho_{rev} = 10^6 \Omega.m - \text{revestimento defeituoso}$$

$$\rho_{rev} = 2.5 \times 10^6 \Omega.m - \text{revestimento razoável}$$

$$\rho_{rev} = 7.6 \times 10^6 \text{ a } 10^7 \Omega.m - \text{revestimento bom}$$

- Revestimentos do 2º Grupo

$$\rho_{rev} = 2.5 \times 10^7 \Omega.m - \text{revestimento razoável}$$

Assim quando $\delta_{rev} = 4mm$, tem-se:

- 1º Grupo:

$$\rho_{rev} \cdot \delta_{rev} = 0.4 \times 10^4 \Omega.m^2 - \text{defeituoso}$$

$$\rho_{rev} \cdot \delta_{rev} = 10^4 \Omega.m^2 - \text{razoável}$$

$$\rho_{rev} \cdot \delta_{rev} = 3 \times 10^4 \text{ a } 4 \times 10^4 \Omega.m^2 - \text{bom}$$

- 2º Grupo:

$$\rho_{rev} \cdot \delta_{rev} = 10^5 \Omega.m^2 - \text{razoável}$$

k) O produto $\rho_{rev} \cdot \delta_{rev}$ é denominado resistência específica do revestimento, é expresso em $\Omega.m^2$ e é representado por r_f .

- l) A condutância linear da tubulação para a terra (G) é aproximadamente ZERO nas tubulações AÉREAS. Nas tubulações ENTERRADAS necessita ser calculada.
- m) A resistência específica do revestimento da tubulação ($r_f = \rho_{rev} \cdot \delta_{rev}$) e a resistência de fuga linear da tubulação ($R_f = 1/G$) tendem a diminuir seus valores com a idade do revestimento.
- n) A capacitância linear da tubulação para a terra (C) é muíto pequena comparada com a condutância G de modo que pode ser desprezada nas tubulações ENTERRADAS. Nas tubulações AÉREAS necessita ser calculada.
- o) Observe-se que:
- $$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$$
- $$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$$
- $$\omega = 2\pi f = 2\pi \times 60 = 377 \text{ rad/s}$$
- p) Pode-se adotar para a permissividade do solo um valor típico de $\epsilon = 3\epsilon_0$.

PROYECTO DE LEY DE FOMENTO DEL TURISMO

ARTICULO 1.º DE FOMENTO DEL TURISMO

OBJETIVO DEL PROGRAMA

El presente programa tiene por objeto:

OBJETIVO

El presente programa tiene por objeto:

El presente programa tiene por objeto:

El presente programa tiene por objeto:

El presente programa tiene por objeto:

ANEXO II

El presente programa tiene por objeto:

El presente programa tiene por objeto:

El presente programa tiene por objeto:

El presente programa tiene por objeto:

El presente programa tiene por objeto:

El presente programa tiene por objeto:

El presente programa tiene por objeto:

El presente programa tiene por objeto:

El presente programa tiene por objeto:

El presente programa tiene por objeto:

El presente programa tiene por objeto:

El presente programa tiene por objeto:

El presente programa tiene por objeto:

El presente programa tiene por objeto:

El presente programa tiene por objeto:

El presente programa tiene por objeto:

El presente programa tiene por objeto:

El presente programa tiene por objeto:

El presente programa tiene por objeto:

PROGRAMA PARA O CÁLCULO DOS PARÂMETROS
Z, Y, γ , Z_c DE TUBULAÇÕES METÁLICAS

(MANUAL DO USUÁRIO)

II.1) Título do Programa

LDPARTUB

II.2) Objetivos do Programa

O programa visa calcular os parâmetros elétricos Z, Y, γ e Z_c de tubulações metálicas quaisquer (nuas ou revestidas, podendo ser enterradas ou aéreas).

II.3) Metodologia Utilizada pelo Programa

O programa utiliza a metodologia descrita no item 3.2. do capítulo 3 deste trabalho. Nos casos de tubulações enterradas (nuas ou revestidas), é obtida uma estimativa inicial para γ através do método não iterativo aproximado (item 3.3 do capítulo 3) a qual é utilizada como estimativa inicial para solução das equações transcendentais pelo método iterativo. Está sendo utilizado um algoritmo do tipo Newton-Raphson, o qual para ter convergência garantida precisa ter uma boa estimativa inicial. As tabelas apresentadas no item 3.3 do capítulo 3 mostram que os valores obtidos para γ podem ser uma boa estimativa inicial.

II.4) Limitações do Programa

Na versão atual, o programa pode simular em um único caso:

- até 10 resistividades diferentes de solo
- até 20 diâmetros diferentes de tubulações
- até 05 tipos diferentes de revestimento

Deve-se atentar para estes limites quando da preparação dos dados de entrada do programa.

Desejando-se futuramente alterar estes limites, são suficientes pequenas alterações no programa fonte (declarações DIMENSION).

II.5) Preparação dos dados de entrada do programa

No caso da tubulação ser ENTERRADA E REVESTIDA, o deck de dados deve ser formado OBRIGATORIAMENTE por 7 tipos de cartões (1º ao 7º cartões descritos a seguir) mais 1 cartão de FINALIZAÇÃO.

Nos demais casos, o deck de dados deve ser formado OBRIGATORIAMENTE por apenas 5 tipos de cartão (1º ao 5º cartões descritos a seguir) mais 1 cartão de FINALIZAÇÃO.

Desejando-se processar um único caso, o deck de dados será formado por 1 conjunto de cartões OBRIGATÓRIOS mais 1 cartão de FINALIZAÇÃO.

Desejando-se processar N casos de uma única vez, o deck de dados será formado por N conjuntos de cartões OBRIGATÓRIOS mais 1 único cartão de FINALIZAÇÃO no final do deck.

A seguir são descritos os cartões suprarreferidos.

1º Cartão

DESCRIÇÃO DO CAMPO	COLUNAS	FORMATO
Título do estudo.	1 - 80	20 A4

2º Cartão

DESCRIÇÃO DO CAMPO	COLUNAS	FORMATO
Resistividade do metal da tubulação (ROT), (ohm.m).	1 - 10	E 10.3
Permeabilidade magnética relativa do metal da tubulação (XMIRT), (adimensional).	11 - 20	F 10.3

3º Cartão

DESCRIÇÃO DO CAMPO	COLUNAS	FORMATO
Chave 1 - Igual a 1 para tubulação AÉREA; Igual a zero para tubulação ENTERRADA.	1 - 10	I 10
Chave 2 - Igual a 1 para tubulação NUA; Igual a zero para tubulação REVESTIDA.	11 - 20	I 10
Altura (ou profundidade) em relação ao solo do eixo central da tubulação (HPROF), (m).	21 - 30	F 10.3

4º Cartão

DESCRIÇÃO DO CAMPO	COLUNAS	FORMATO
Valor inicial da Resistividade do solo (ROSOLI), (ohm.m).	1 - 10	F 10.3
Valor final da Resistividade do solo (ROSOLF), (ohm.m).	11 - 20	F 10.3
Incremento para variação da Resistividade do solo (DROSOL), (ohm.m).	21 - 30	F 10.3

5º Cartão

DESCRIÇÃO DO CAMPO	COLUNAS	FORMATO
Valor inicial do Diâmetro Médio da Tubulação (DIAMI), (m).	1 - 10	F 10.3
Valor final do Diâmetro Medio da Tubulação (DIAMF), (m).	11 - 20	F 10.3
Incremento para variação do Diâmetro Médio da Tubulação (DDIAM), (m).	21 - 30	F 10.3

Observação:

- a) Quando for desejada apenas 1 Resistividade de solo:
ROSOLI = ROSOLF e DROSOL = 0.
- b) Quando for desejado apenas 1 Diâmetro de Tubulação:
DIAMI = DIAMF e DDIAM = 0.
- c) O programa considera que a permissividade do solo vale sempre $3\epsilon_0$.

6º Cartão

DESCRIÇÃO DO CAMPO	COLUNAS	FORMATO
Número de tipos diferentes de <u>re</u> vestimento de tubulação que serão analisados (NUMREV).	1 - 10	I 10

7º Cartão

Devem ser fornecidos tantos cartões deste tipo quanto seja o valor de NUMREV.

DESCRIÇÃO DO CAMPO	COLUNAS	FORMATO
Resistividade do revestimento externo anti-corrosivo da tubulação (ROREV), (ohm.m).	1 - 10	E 10.3
Espessura do revestimento externo anti-corrosivo da tubulação (DLTREV), (m).	11 - 20	E 10.3
Permissividade dielétrica relativa do revestimento externo anti-corrosivo da tubulação (EPSRREV), (adi - mensional).	21 - 30	F 10.3

Observação:

Cartões do 6º e 7º tipos só devem fazer parte do deck de dados quando a tubulação for ENTERRADA E REVESTIDA (KEY1 = 0 e KEY2 = 0).

Cartões de FINALIZAÇÃO

DESCRIÇÃO DO CAMPO	COLUNAS	FORMATO
Coloca-se o número 9999.	1 - 4	A 4

II.6) Saídas do Programa

Inicialmente são impressos todos os dados lidos. Após isto, são impressos (para cada combinação de resistividade do solo e tipo de revestimento) os valores de Z , Y , γ e Z_c para diversos diâmetros de tubulação.

II.7) Casos Testes Processados

Caso 1

Resistividade da tubulação: $\rho_T = 1.7 \times 10^{-7} \Omega m$

Permeabilidade magnética relativa da tubulação: $\mu_T = 300 \mu_0$

Tubulação aérea

Altura da tubulação em relação ao solo: $h = 1m$

Resistividades do solo: 20 e 2000 Ωm

Diâmetro da tubulação variando de 0.1 a 1.2 m com incremento de 0.1 m.

Caso 2

Resistividade da tubulação : $\rho_T = 1.7 \times 10^{-7} \Omega m$

Permeabilidade magnética relativa da tubulação: $\mu_T = 300 \mu_0$

Tubulação enterrada NUA

Profundidade de enterramento da tubulação: $\bar{h} = 1 m$.

Resistividades do solo: 20 e 2000 Ωm

Diâmetro da tubulação variando de 0.1 e 1.2 m com incremento de 0.1 m.

Caso 3

Resistividade da tubulação: $\rho_T = 1.7 \times 10^{-7} \Omega m$

Permeabilidade magnética relativa da tubulação: $\mu_T = 300 \mu_0$

Tubulação enterrada revestida

Profundidade de enterramento da tubulação: $\bar{h} = 1m$

Resistividades do solo: 20 e 2000 Ωm

Diâmetro da tubulação variando de 0.1 a 1.2m com incremento de 0.1 m.

Características do Revestimento:

$$\rho_{rev} = 0.2323 \times 10^7 \Omega m$$

$$\delta_{rev} = 0.4 \times 10^{-2} m$$

$$\epsilon_{rev} = 5$$

$$\therefore r_f = \rho_{rev} \cdot \delta_{rev} = 9290 \Omega m^2$$

II.8) Resultados Obtidos

Os resultados obtidos para os casos processados são apresentados a seguir.

Caso 1

TUBULACAO AFREA NUA

RESISTIVIDADE DA TUBULACAO = 0.170E-06 OHM.M
PERMEABILIDADE RELATIVA DA TUBULACAO = 300.000

KEY1= 1 KEY2= 1 HPROF= 1.00 M

RESISTIVIDADE INICIAL DO SOLO = 20.000 OHM.M
RESISTIVIDADE FINAL DO SOLO = 2000.000 OHM.M

INCREMENTO PARA VARIACAO DA RESISTIVIDADE DO SOLO = 1980.000 OHM.M

DIAMETRO INICIAL DA TUBULACAO = 0.100 M

DIAMETRO FINAL DA TUBULACAO = 1.200 M

INCREMENTO PARA VARIACAO DO DIAMETRO DA TUBULACAO = 0.100 M

DIAMETRO (M)	IMPEDANCIA LINEAR - Z (OHMS/M)		ADMITANCIA LINEAR PARA A TERRA - Y (MHOS/M)	
	REAL	IMAG	REAL	IMAG
0.100	0.409E-03	0.102E-02	0.000E+00	0.568E-08
0.200	0.234E-03	0.796E-03	0.000E+00	0.700E-08
0.300	0.176E-03	0.708E-03	0.000E+00	0.809E-08
0.400	0.147E-03	0.657E-03	0.000E+00	0.910E-08
0.500	0.129E-03	0.622E-03	0.000E+00	0.101E-07
0.600	0.118E-03	0.597E-03	0.000E+00	0.111E-07
0.700	0.109E-03	0.577E-03	0.000E+00	0.120E-07
0.800	0.103E-03	0.561E-03	0.000E+00	0.130E-07
0.900	0.981E-04	0.547E-03	0.000E+00	0.141E-07
1.000	0.942E-04	0.535E-03	0.000E+00	0.151E-07
1.100	0.910E-04	0.525E-03	0.000E+00	0.162E-07
1.200	0.884E-04	0.516E-03	0.000E+00	0.174E-07

	REAL	IMAG	REAL	IMAG
0.100	0.473E-06	0.246E-05	0.432E+03	-0.832E+02
0.200	0.343E-06	0.239E-05	0.341E+03	-0.491E+02
0.300	0.295E-06	0.241E-05	0.298E+03	-0.365E+02
0.400	0.271E-06	0.246E-05	0.270E+03	-0.298E+02
0.500	0.259E-06	0.252E-05	0.250E+03	-0.257E+02
0.600	0.252E-06	0.258E-05	0.234E+03	-0.223E+02
0.700	0.248E-06	0.265E-05	0.220E+03	-0.206E+02
0.800	0.247E-06	0.271E-05	0.208E+03	-0.190E+02
0.900	0.248E-06	0.278E-05	0.198E+03	-0.176E+02
1.000	0.249E-06	0.286E-05	0.189E+03	-0.165E+02
1.100	0.252E-06	0.293E-05	0.180E+03	-0.155E+02
1.200	0.256E-06	0.301E-05	0.173E+03	-0.147E+02

DIAMETRO (M)	IMPEDANCIA LINEAR - Z (OHMS/M)		ADMITANCIA LINEAR PARA A TERRA - Y (MHOS/M)	
	REAL	IMAG	REAL	IMAG
0.100	0.409E-03	0.120E-02	0.000E+00	0.568E-08
0.200	0.234E-03	0.970E-03	0.000E+00	0.700E-08
0.300	0.176E-03	0.881E-03	0.000E+00	0.809E-08
0.400	0.147E-03	0.830E-03	0.000E+00	0.910E-08
0.500	0.129E-03	0.796E-03	0.000E+00	0.101E-07
0.600	0.118E-03	0.771E-03	0.000E+00	0.111E-07
0.700	0.109E-03	0.751E-03	0.000E+00	0.120E-07
0.800	0.103E-03	0.734E-03	0.000E+00	0.130E-07
0.900	0.981E-04	0.721E-03	0.000E+00	0.141E-07
1.000	0.942E-04	0.709E-03	0.000E+00	0.151E-07
1.100	0.910E-04	0.698E-03	0.000E+00	0.162E-07
1.200	0.884E-04	0.689E-03	0.000E+00	0.174E-07

DIAMETRO (M)	CONSTANTE DE PROPAGACAO - GAMA (1/M)		IMPEDANCIA CARACTERISTICA - ZC (OHMS)	
	REAL	IMAG	REAL	IMAG
0.100	0.439E-06	0.265E-05	0.465E+03	-0.773E+02
0.200	0.312E-06	0.262E-05	0.375E+03	-0.446E+02
0.300	0.265E-06	0.268E-05	0.332E+03	-0.328E+02
0.400	0.242E-06	0.276E-05	0.303E+03	-0.266E+02
0.500	0.229E-06	0.284E-05	0.282E+03	-0.227E+02
0.600	0.223E-06	0.293E-05	0.265E+03	-0.201E+02
0.700	0.218E-06	0.301E-05	0.250E+03	-0.191E+02
0.800	0.216E-06	0.310E-05	0.238E+03	-0.166E+02
0.900	0.216E-06	0.319E-05	0.227E+03	-0.154E+02
1.000	0.217E-06	0.328E-05	0.217E+03	-0.144E+02
1.100	0.219E-06	0.337E-05	0.208E+03	-0.135E+02
1.200	0.222E-06	0.347E-05	0.199E+03	-0.127E+02

Caso 2

TUBULACAO ENTERRADA NUA

RESISTIVIDADE DA TUBULACAO = 0.1705-06 OHM.M
PERMEABILIDADE RELATIVA DA TUBULACAO = 300.000

KEY1= 0 KEY2= 1 HPROF= 1.00 M

RESISTIVIDADE INICIAL DO SOLO = 20.000 OHM.M
RESISTIVIDADE FINAL DO SOLO = 2000.000 OHM.M
INCREMENTO PARA VARIACAO DA RESISTIVIDADE DO SOLO = 1980.000 OHM.M

DIAMETRO INICIAL DA TUBULACAO = 0.100 M
DIAMETRO FINAL DA TUBULACAO = 1.200 M
INCREMENTO PARA VARIACAO DO DIAMETRO DA TUBULACAO = 0.100 M

RESISTIVIDADE DO REVESTIMENTO = 0.00005+00 OHM.M

ESPESURA DO REVESTIMENTO = 0.0005+00 M

PERMISSIVIDADE RELATIVA DO REVESTIMENTO = 0.000

DIAMETRO (M)	IMPEACANCIA LINEAR - Z (OHMS/M)		ADMITANCIA LINEAR PARA A TERRA - Y (MHMS/M)	
	REAL	IMAG	REAL	IMAG
0.100	0.457E-03	0.775E-03	0.240E-01	-0.001E-03
0.200	0.285E-03	0.616E-03	0.328E-01	-0.000E-03
0.300	0.228E-03	0.550E-03	0.324E-01	-0.000E-03
0.400	0.200E-03	0.521E-03	0.322E-01	-0.001E-03
0.500	0.183E-03	0.504E-03	0.321E-01	-0.000E-03
0.600	0.171E-03	0.493E-03	0.320E-01	-0.000E-03
0.700	0.163E-03	0.484E-03	0.319E-01	-0.000E-03
0.800	0.157E-03	0.478E-03	0.319E-01	-0.000E-03
0.900	0.152E-03	0.473E-03	0.319E-01	-0.001E-03
1.000	0.149E-03	0.469E-03	0.319E-01	-0.000E-03
1.100	0.145E-03	0.465E-03	0.319E-01	-0.000E-03
1.200	0.143E-03	0.462E-03	0.319E-01	-0.000E-03

	REAL	IMAG	REAL	IMAG
0.100	0.483E-02	0.270E-02	0.140E+00	0.819E-01
0.200	0.398E-02	0.248E-02	0.120E+00	0.776E-01
0.300	0.368E-02	0.240E-02	0.112E+00	0.763E-01
0.400	0.352E-02	0.237E-02	0.108E+00	0.757E-01
0.500	0.342E-02	0.235E-02	0.105E+00	0.753E-01
0.600	0.335E-02	0.233E-02	0.103E+00	0.750E-01
0.700	0.330E-02	0.233E-02	0.102E+00	0.748E-01
0.800	0.327E-02	0.232E-02	0.101E+00	0.746E-01
0.900	0.324E-02	0.231E-02	0.100E+00	0.745E-01
1.000	0.322E-02	0.231E-02	0.994E-01	0.743E-01
1.100	0.320E-02	0.230E-02	0.988E-01	0.742E-01
1.200	0.319E-02	0.230E-02	0.983E-01	0.740E-01

DIÂMETRO (M)	CONSTANTE DE PROPAGACAO - GAMA (1/M)		IMPEDANCIA CARACTERISTICA - ZC (OHMS)	
	REAL	IMAG	REAL	IMAG
0.100	0.411E-03	0.258E-03	0.185E+01	0.116E+01
0.200	0.350E-03	0.244E-03	0.160E+01	0.112E+01
0.300	0.328E-03	0.240E-03	0.151E+01	0.110E+01
0.400	0.317E-03	0.238E-03	0.146E+01	0.110E+01
0.500	0.310E-03	0.237E-03	0.143E+01	0.110E+01
0.600	0.305E-03	0.236E-03	0.141E+01	0.109E+01
0.700	0.302E-03	0.236E-03	0.140E+01	0.109E+01
0.800	0.300E-03	0.235E-03	0.139E+01	0.109E+01
0.900	0.298E-03	0.235E-03	0.138E+01	0.109E+01
1.000	0.296E-03	0.235E-03	0.137E+01	0.109E+01
1.100	0.295E-03	0.235E-03	0.136E+01	0.109E+01
1.200	0.294E-03	0.235E-03	0.136E+01	0.108E+01

Caso 3

TUBULACAO ENTERRADA REVESTIDA

RESISTIVIDADE DA TUBULACAO = 0.170E-06 OHM.M
 PERMEABILIDADE RELATIVA DA TUBULACAO = 300.000

KEY1= 0 KEY2= 0 HPROF= 1.00 M

RESISTIVIDADE INICIAL DO SOLO = 20.000 OHM.M
 RESISTIVIDADE FINAL DO SOLO = 2000.000 OHM.M
 INCREMENTO PARA VARIACAO DA RESISTIVIDADE DO SOLO = 1980.000 OHM.M

DIAMETRO INICIAL DA TUBULACAO = 0.100 M
 DIAMETRO FINAL DA TUBULACAO = 1.200 M
 INCREMENTO PARA VARIACAO DO DIAMETRO DA TUBULACAO = 0.100 M

NUMERO DE TIPOS DIFERENTES DE REVESTIMENTO = 1

RESISTIVIDADE DO REVESTIMENTO TIPO 1 = 0.232E+07 OHM.M
 ESPESURA DO REVESTIMENTO TIPO 1 = 0.00E-02 M
 PERMISSIVIDADE RELATIVA DO REVESTIMENTO TIPO 1 = 5.000

RESISTIVIDADE DO REVESTIMENTO = 0.2323E+07 OHM.M

ESPESURA DO REVESTIMENTO = 0.430E-02 M

PERMISSIVIDADE RELATIVA DO REVESTIMENTO = 5.0000

DIAMETRO (M)	IMPEDANCIA LINEAR - Z (OHMS/M)		ADMITANCIA LINEAR PARA A TESSA - Y (MHMS/M)	
	REAL	IMAG	REAL	IMAG
0.100	0.468E-03	0.805E-03	0.238E-04	0.131E-05
0.200	0.293E-03	0.620E-03	0.674E-04	0.765E-05
0.300	0.235E-03	0.571E-03	0.101E-03	0.780E-05
0.400	0.206E-03	0.542E-03	0.134E-03	0.616E-05
0.500	0.188E-03	0.524E-03	0.169E-03	0.643E-05
0.600	0.177E-03	0.512E-03	0.201E-03	0.760E-05
0.700	0.168E-03	0.504E-03	0.234E-03	0.864E-05
0.800	0.162E-03	0.497E-03	0.267E-03	0.102E-04
0.900	0.157E-03	0.492E-03	0.300E-03	0.114E-04
1.000	0.153E-03	0.487E-03	0.333E-03	0.126E-04
1.100	0.150E-03	0.484E-03	0.366E-03	0.130E-04
1.200	0.148E-03	0.480E-03	0.398E-03	0.151E-04

DIAMETRO (M)	CONSTANTE DE PROPAGACAO - GAMA (1/M)	REAL	IMAG	IMPEDANCIA CARACTERISTICA - ZC (OHMS)	REAL	IMAG
0.100	0.152E-03	0.914E-04	0.460E+01	0.253E+01		
0.200	0.180E-03	0.120E-03	0.274E+01	0.167E+01		
0.300	0.205E-03	0.143E-03	0.208E+01	0.134E+01		
0.400	0.227E-03	0.163E-03	0.173E+01	0.115E+01		
0.500	0.247E-03	0.181E-03	0.151E+01	0.102E+01		
0.600	0.265E-03	0.197E-03	0.135E+01	0.927E+00		
0.700	0.282E-03	0.211E-03	0.124E+01	0.856E+00		
0.800	0.298E-03	0.225E-03	0.115E+01	0.800E+00		
0.900	0.314E-03	0.238E-03	0.107E+01	0.753E+00		
1.000	0.328E-03	0.250E-03	0.101E+01	0.713E+00		
1.100	0.342E-03	0.262E-03	0.960E+00	0.680E+00		
1.200	0.355E-03	0.273E-03	0.915E+00	0.650E+00		

RESISTIVIDADE DO REVESTIMENTO = 0.2323E+07 OHM.M

ESPESURA DO REVESTIMENTO = 0.400E-02 M

PERMISSIVIDADE RELATIVA DO REVESTIMENTO = 5.000

DIAMETRO (M)	IMPEDANCIA LINEAR - Z (OHMS/M)	ADMITANCIA LINEAR PARA A TERRA - Y (MHO/S)
	REAL	IMAG
0.100	0.467E-03	0.974E-03
0.200	0.292E-03	0.757E-03
0.300	0.233E-03	0.738E-03
0.400	0.204E-03	0.707E-03
0.500	0.186E-03	0.689E-03
0.600	0.175E-03	0.676E-03
0.700	0.166E-03	0.667E-03
0.800	0.160E-03	0.660E-03
0.900	0.155E-03	0.654E-03
1.000	0.151E-03	0.650E-03
1.100	0.148E-03	0.646E-03
1.200	0.145E-03	0.642E-03

	REAL	IM/C	REAL	IMAG
0.100	0.148E-03	0.965E-04	0.523E+01	0.318E+01
0.200	0.168E-03	0.121E-03	0.339E+01	0.230E+01
0.300	0.183E-03	0.137E-03	0.276E+01	0.197E+01
0.400	0.194E-03	0.149E-03	0.243E+01	0.173E+01
0.500	0.202E-03	0.158E-03	0.222E+01	0.166E+01
0.600	0.210E-03	0.166E-03	0.208E+01	0.158E+01
0.700	0.216E-03	0.172E-03	0.198E+01	0.152E+01
0.800	0.221E-03	0.176E-03	0.190E+01	0.147E+01
0.900	0.225E-03	0.181E-03	0.184E+01	0.143E+01
1.000	0.229E-03	0.184E-03	0.179E+01	0.140E+01
1.100	0.232E-03	0.187E-03	0.175E+01	0.137E+01
1.200	0.235E-03	0.190E-03	0.171E+01	0.135E+01

II.9) Comparação com Resultados Obtidos Através de outras Fontes

A seguir são apresentadas algumas tabelas comparativas entre os resultados obtidos com o programa LDPARTUB e resultados obtidos através de outras fontes.

São apresentados os parâmetros γ e Z_c para três valores de diâmetros de tubulação: 0.10, 0.60 e 1.20m.

Para tubulações aéreas foi feita a comparação entre os resultados obtidos através do programa LDPARTUB e os resultados obtidos através do programa EMTP, bastante conhecido no setor elétrico nacional. As tubulações aéreas nuas terão os mesmos parâmetros das tubulações aéreas revestidas.

As tabelas II.1 e II.2 são relativas às tubulações aéreas para resistividades de solo iguais a 20 e 2000 Ωm .

Para tubulações enterradas foi feita a comparação entre os resultados obtidos com o programa LDPARTUB e as curvas do EPRI⁽¹²⁾.

As tabelas II.3 e II.4 são relativas às tubulações enterradas nuas para resistividades de solo iguais a 20 e 2000 Ωm .

As tabelas II.5 e II.6 são relativas às tubulações enterradas revestidas para resistividades de solo iguais a 20 e 2000 Ωm .

Observa-se uma boa convergência entre os resultados.

Tubulação Aérea

Resistividade do Solo: 20 ohm.m

		$\gamma(m^{-1}) \times 10^{-3}$		Z_C (ohms)	
		Real	Imag.	Real	Imag.
D = 0.10m	LDPARTUB	473	2460	432	-83.2
	EMTP	470	2500	427	-81.5
D = 0.60m	LDPARTUB	252	2580	234	-22.8
	EMTP	250	2600	233	-22.5
D = 1.20m	LDPARTUB	256	3010	173	-14.7
	EMTP	260	3000	172	-14.5

Tabela II.1

Tubulação Aérea

Resistividade do Solo: 2000 ohm.m

		$\gamma(m^{-1}) \times 10^{-3}$		Z_C (ohms)	
		Real	Imag.	Real	Imag.
D = 0.10m	LDPARTUB	439	2650	465	-77.3
	EMTP	430	2700	463	-75.1
D = 0.60m	LDPARTUB	222	2930	265	-20.1
	EMTP	220	2900	264	-20.0
D = 1.20m	LDPARTUB	222	3470	199	-12.7
	EMTP	220	3500	198	-12.6

Tabela II.2

Tubulação Enterrada Nua

Resistividade do Solo: 20 ohm.m

		$\gamma (m^{-1}) \times 10^{-3}$		Z_C (ohms)	
		Real	Imag.	Real	Imag.
D = 0.10m	LDPARTUB	4.83	2.70	0.140	0.082
	EPRI	4.8	3.2	0.140	0.072
D = 0.60m	LDPARTUB	3.35	2.33	0.103	0.075
	EPRI	3.0	2.6	0.097	0.067
D = 1.20m	LDPARTUB	3.19	2.30	0.098	0.074
	EPRI	2.8	2.6	0.095	0.066

Tabela II.3

Tubulação Enterrada Nua

Resistividade do Solo: 2000 ohm.m

		$\gamma (m^{-1}) \times 10^{-3}$		Z_C (ohms)	
		Real	Imag.	Real	Imag.
D = 0.10m	LDPARTUB	0.41	0.26	1.85	1.16
	EPRI	0.40	0.28	1.9	1.2
D = 0.60m	LDPARTUB	0.31	0.24	1.41	1.09
	EPRI	0.28	0.25	1.4	1.1
D = 1.20m	LDPARTUB	0.29	0.24	1.36	1.08
	EPRI	0.26	0.25	1.3	1.1

Tabela II.4

Tubulação Enterrada Revestida ($r_f = 9290 \, \Omega \, m^2$)

Resistividade do Solo: 20 ohm.m

		$\gamma (m^{-1}) \times 10^{-3}$		Z_C (ohms)	
		Real	Imag.	Real	Imag.
D = 0.10m	LDPARTUB	0.152	0.091	4.60	2.53
	EPRI	0.15	0.09	4.60	2.50
D = 0.60m	LDPARTUB	0.265	0.197	1.35	0.93
	EPRI	0.27	0.20	1.30	0.90
D = 1.20m	LDPARTUB	0.355	0.273	0.92	0.65
	EPRI	0.35	0.27	0.80	0.63

Tabela II.5

Tubulação Enterrada Revestida ($r_f = 9290 \, \Omega \, m^2$)

Resistividade do Solo: 2000 ohm.m

		$\gamma (m^{-1}) \times 10^{-3}$		Z_C (ohms)	
		Real	Imag.	Real	Imag.
D = 0.10m	LDPARTUB	0.148	0.097	5.23	3.18
	EPRI	0.14	0.10	4.8	3.1
D = 0.60m	LDPARTUB	0.210	0.166	2.08	1.58
	EPRI	0.19	0.17	2.0	1.6
D = 1.20m	LDPARTUB	0.235	0.190	1.71	1.35
	EPRI	0.20	0.19	1.7	1.4

Tabela II.6

II.10) Análise dos Resultados Obtidos

O programa computacional desenvolvido é de fácil utilização e a análise de resultados obtidos através do mesmo revela que:

- Para uma tubulação que possua alguns trechos aéreos e outros enterrados, Z_c será maior nos trechos aéreos que nos trechos enterrados. Por outro lado γ será maior nos trechos enterrados que nos trechos aéreos.
- Nas tubulações aéreas, tanto Z_c quanto γ são diretamente proporcionais à resistividade do solo.
- Nas tubulações enterradas e revestidas, quanto menor for o valor da resistência específica do revestimento (r_f), mais sensíveis serão γ e Z_c à resistividade do solo.
- Nas tubulações enterradas, Z_c é diretamente proporcional e γ é inversamente proporcional à resistividade do solo.

II.11) Listagem do Programa Fonte

Os resultados apresentados no item II.8 foram obtidos através do programa fonte cuja listagem é mostrada a seguir.

FILE0 LDPARTUB FORTRAN A VM/SP 3.1 *** CHESF ***

```

    DIMENSION ROSOL(10),DIAM(20),ROREV(5),DLTREV(5),EPSREV(5),
    .RTB(10,20)
    DIMENSION TIT(20),EPSRRV(5)
    DIMENSION RR1(20,5),RI1(20,5),R2(10),R3(20),RR4(20),RI4(20),
    .R6(20),R7(10),R10(10,20,5),R11(20)
    COMPLEX ZA(10,20),YA(20),ZE(10,20,5),YE(10,20,5),ZAMAA(10,20),
    .ZCA(10,20),SAMAE(10,20,5),ZCE(10,20,5)
    DATA FIM/4H9999/

C
C
C
    LEITURA E IMPRESSAO DOS DADOS DE ENTRADA
    E DEFINICAO/INICIALIZACAO DE ALGUMAS VARIAVEIS

11 READ(5,1)(TIT(I),I=1,20)
1  FORMAT(20A4)
   IF(TIT(1).EQ.FIM)GO TO 5000
   WRITE(6,2)(TIT(I),I=1,20)
2  FORMAT('1',3(/),5X,20A4)
   READ(5,10)ROT,XMIRT
10  FORMAT(E10.3,F10.3)
   WRITE(6,15)ROT,XMIRT
15  FORMAT('0',5X,'RESISTIVIDADE DA TUBULACAO = ',E10.3,' OHM.M',/,
    .6X,'PERMEABILIDADE RELATIVA DA TUBULACAO = ',F10.3)
   PI =3.1416
   XMIO=4*PI*1E-7
   EPS0=8.85E-12
   XMIT=XMIRT*XMIO
   W =377.

C
C
   RS=((W*XMIO)/(2*PI))

   READ(5,20)KEY1,KEY2,HPROF
20  FORMAT(2I10,F10.3)
   WRITE(6,25)KEY1,KEY2,HPROF
25  FORMAT('0',5X,'KEY1=',I2,5X,'KEY2=',I2,5X,'HPROF=',F5.2,' M')
   READ(5,70)ROSOLI,ROSOLF,DROSOL
70  FORMAT(3F10.3)
   WRITE(6,75)ROSOLI,ROSOLF,DROSOL
75  FORMAT('0',5X,'RESISTIVIDADE INICIAL DO SOLO = ',F10.3,' OHM.M',
    ./,6X,'RESISTIVIDADE FINAL DO SOLO = ',F10.3,' OHM.M',/,
    .6X,'INCREMENTO PARA VARIACAO DA RESISTIVIDADE DO SOLO = ',
    .F10.3,' OHM.M')
   M=ROSOLF-ROSOLI
   IF(M.GT.-0.1.AND.M.LT.0.1)M=0
   IF(M.NE.0)GO TO 77
   ROSOL(1)=ROSOLI
   NUMSOL=1
   GO TO 79
77  K=((ROSOLF-ROSOLI)/DROSOL+0.1)+1
   NUMSOL=K
   DO 78 J=1,K,1
78  ROSOL(J)=ROSOLI+(J-1)*DROSOL
79  CONTINUE
   READ(5,80)DIAMI,DIAMF,DDIAM
80  FORMAT(3F10.3)
   WRITE(6,81)DIAMI,DIAMF,DDIAM
81  FORMAT('0',5X,'DIAMETRO INICIAL DA TUBULACAO = ',F10.3,' M',
    ./,6X,'DIAMETRO FINAL DA TUBULACAO = ',F10.3,' M',/,
    .6X,'INCREMENTO PARA VARIACAO DO DIAMETRO DA TUBULACAO = ',
    .F10.3,' M')
   M=DIAMF-DIAMI
   IF(M.GT.-0.1.AND.M.LT.0.1)M=0
   IF(M.NE.0)GO TO 82
   DIAM(1)=DIAMI
   NUMDIA=1
   GO TO 84
82  K=((DIAMF-DIAMI)/DDIAM+0.1)+1
   NUMDIA=K
   DO 83 J=1,K,1
83  DIAM(J)=DIAMI+(J-1)*DDIAM
84  CONTINUE
   NUMREV=1
   ROREV(1)=0.
   DLTREV(1)=0.
   EPSRRV(1)=0.
   IF(KEY1.EQ.1)GO TO 29
   DO 28 K=1,NUMDIA
   DO 29 N=1,NUMREV
   RR1(K,N)=0.
28  RI1(K,N)=0.
29  CONTINUE

```



```

      IF(KEY1.NE.0.OR.KEY2.NE.0)GO TO 60
      READ(5,30)NUMREV
30  FORMAT(I10)
      WRITE(6,35)NUMREV
35  FORMAT('0',8X,'NUMERO DE TIPOS DIFERENTES DE REVESTIMENTO = ',I10)
      DO 50 L=1,NUMREV
      READ(5,40)ROREV(L),DLTREV(L),EPSRRV(L)
40  FORMAT(2E10.3,F10.3)
      EPSREV(L)=EPSRRV(L)*EPS0
      WRITE(6,45)L,ROREV(L),L,DLTREV(L),L,EPSRRV(L)
45  FORMAT('0',5X,'RESISTIVIDADE DO REVESTIMENTO TIPO ',I2,' = ',
      .E10.3,' OHM.M',/,6X,'ESPESSURA DO REVESTIMENTO TIPO ',I2,' = ',
      .E10.3,' M',/,6X,'PERMISSIVIDADE RELATIVA DO REVESTIMENTO TIPO ',
      .I2,' = ',F10.3)
50  CONTINUE
      DO 52 K=1,NUMDIA
      DO 52 N=1,NUMREV
      G1=(PI*DIAM(K))/(ROREV(N)*DLTREV(N))
      WC1=(W*PI*DIAM(K)*EPSREV(N))/DLTREV(N)
      RR1(K,N)=REAL(1./CMPLX(G1,WC1))
52  RI1(K,N)=AIMAG(1./CMPLX(G1,WC1))
60  CONTINUE

C
C  CALCULO DA IMPEDANCIA LINEAR DA TUBULACAO AEREA
C
      DO 200 L =1,NUMSOL
C
      R2(L)=ROSOL(L)/PI
      R7(L)=W*XMI0/ROSOL(L)
C
      DO 200 K =1,NUMDIA
      SK= SQRT(ROT*XMIT*W/2.)/(PI*DIAM(K))
      R =SK+(W*XMI0)/8.
      WL =SK+((W*XMI0)/(2*PI)) * ALOG((3.7/DIAM(K))*SQRT(ROSOL(L)/(W*XMI
      .0)))
      ZA(L,K)=CMPLX(R,WL)
C
      R3(K)=1.12/SQRT((DIAM(K)/2.)**2+4*(HPRCF**2))
      RR4(K)=(W*XMI0)/8.+(SQRT(ROT*XMIT*W/2.)/(PI*DIAM(K)))
      R14(K)=(W*XMI0)/8.+(SQRT(RCT*XMIT*W/2.)/(PI*DIAM(K)))
      R6(K)=1.85/SQRT((DIAM(K)/2.)**2+4*(HPRCF**2))
      R11(K)=R14(K)+R5*ALOG(R6(K))
C
200  CONTINUE
      IF(KEY1.EQ.0)GO TO 310
C
C  CALCULO DA ADMITANCIA LINEAR DA TUBULACAO AEREA NUA
C
      H=HPRCF
      DO 300 K =1,NUMDIA
      WC= (W*2.*PI*EPS0)/ ALOG(2.*H/(DIAM(K)/2.))
      YA(K)=CMPLX(0.,WC)
300  CONTINUE
      GO TO 420
310  CONTINUE
      IF(KEY2.EQ.0)GO TO 360
C
C  CALC.APROX. DA ADMITANCIA LINEAR DA TUBULACAO ENTERRADA NUA
C
      PROF=HPRCF
      XLENGH =1000.
      DO 350 L=1,NUMSOL
      DO 350 N=1,NUMREV
      DO 350 K=1,NUMDIA
      DENOM=SQRT(2.*DIAM(K)*PROF)
      RTB(L,K)=(ROSOL(L)/PI)*(ALOG(2.*XLENGH/DENOM)-1)
      YE(L,K,N)=1/RTB(L,K)
350  CONTINUE
      GO TO 405
360  CONTINUE
C
C  CALC.APROX. DA ADMITANCIA LINEAR DA TUBULACAO ENTERRADA REVESTIDA
C
      PROF=HPRCF
      XLENGH=1000.
      DO 400 L=1,NUMSOL
      DO 400 N =1,NUMREV
      DO 400 K =1,NUMDIA
      DENOM=SQRT(2.*(DIAM(K)+2.*DLTREV(N))*PROF)
      VAR11=(ALOG(2.*XLENGH/DENOM)-1)

```


FILE0 LDPARTUB FORTRAN A VM/SP 3.1 *** CHESF ***

```

      RTB(L,K)=(ROSOL(L)/PI)*VAR11
      G=(PI*DIAM(K))/(FOREV(N)*DLTREV(N))
      WC=(W*PI*DIAM(K)*EPSREV(N))/DLTREV(N)
      YE(L,K,N)=1./((1./CMPLX(G,WC))+RTB(L,K))
400  CONTINUE
405  CONTINUE
420  CONTINUE

C
C  CALCULO DAS CONSTANTES DE PROPAGACAO E DAS IMPEDANCIAS
C  CARACTERISTICAS
C
      IF(KEY1.EQ.0)GO TO 501
      DO 500 L=1,NUMSOL
      WRITE(6,1280)ROSOL(L)
1280  FORMAT('1',2(/),5X,'RESISTIVIDADE DO SOLO = ',F5.0,' OHM.M')
      WRITE(6,1182)
1182  FORMAT('0',//,8X,'DIAMETRO (M)',14X,
    . 'IMPEDANCIA LINEAR - Z (OHMS/M)',14X,
    . 'ADMITANCIA LINEAR PARA A TERRA - Y (MHOS/M)')
      WRITE(6,1284)
1284  FORMAT('0',/,11X,2(24X,'REAL',20X,'IMAG'))
      DO 450 K=1,NUMDIA
      WRITE(6,1300)DIAM(K),ZA(L,K),YA(K)
1300  FORMAT('0',///,10X,F5.3,4(17X,E9.3))
      450  CONTINUE
      WRITE(6,1282)
1282  FORMAT('1',//,8X,'DIAMETRO (M)',11X,
    . 'CONSTANTE DE PROPAGACAO - GAMA (1/M)',14X,
    . 'IMPEDANCIA CARACTERISTICA - ZC (OHMS)')
      WRITE(6,1284)
      DO 500 K=1,NUMDIA
      GAMAA(L,K)=CSQRT(ZA(L,K)*YA(K))
      ZCA(L,K)=CSQRT(ZA(L,K)/YA(K))
      WRITE(6,1300)DIAM(K),GAMAA(L,K),ZCA(L,K)
      500  CONTINUE
      GO TO 4900
501  CONTINUE
      DO 600 L=1,NUMSOL
      DO 600 N=1,NUMREV
      DO 600 K=1,NUMDIA
      GAMAE(L,K,N)=CSQRT(ZA(L,K)*YE(L,K,N))
      R10(L,K,N)=RR1(K,N)+R2(L)*ALOG(R3(K))
      A1=REAL(GAMAE(L,K,N))
      B1=IMAG(GAMAE(L,K,N))
      CALL NRAPH(A1,B1,R11(K,N),R2(L),RR4(K),R5,R7(L),R10(L,K,N),
    . R11(K),A2,B2,YR,YI,ZR,ZI,ZCR,ZCI)
      ZE(L,K,N)=CMPLX(ZR,ZI)
      YE(L,K,N)=CMPLX(YR,YI)
      GAMAE(L,K,N)=CMPLX(A2,B2)
      ZCE(L,K,N)=CMPLX(ZCR,ZCI)
      600  CONTINUE
      DO 610 L=1,NUMSOL
      DO 610 N=1,NUMREV
      WRITE(6,1280)ROSOL(L)
      WRITE(6,1285)FOREV(N),DLTREV(N),EPSRRV(N)
1285  FORMAT('0',///,1X,'RESISTIVIDADE DO REVESTIMENTO = ',E10.4,' OHM.M'
    . '//,1X,'ESPESSURA DO REVESTIMENTO = ',E9.3,' M',//,
    . 1X,'PERMISSIVIDADE RELATIVA DO REVESTIMENTO = ',F10.3)
      WRITE(6,1182)
      WRITE(6,1284)
      DO 605 K=1,NUMDIA
      WRITE(6,1300)DIAM(K),ZE(L,K,N),YE(L,K,N)
      605  CONTINUE
      WRITE(6,1282)
      WRITE(6,1284)
      DO 610 K=1,NUMDIA
      WRITE(6,1300)DIAM(K),GAMAE(L,K,N),ZCE(L,K,N)
      610  CONTINUE
4900  CONTINUE
      GO TO 11
5000  STOP
      END
      SUBROUTINE NRAPH(A1,B1,R11,R2,RR4,R5,R7,R10,R11,A2,B2,YR,YI,
    . ZR,ZI,ZCR,ZCI)
      COMPLEX Y,Z,ZC
C  DEFINICAO DAS PRINCIPAIS FUNCOES E SUAS DERIVADAS PARCIAIS
      U(A,B)=C*E-D*F-RR4-(R5/2)*ATAN(G/C)
      V(A,B)=D*F+C*F-R11+(R5/2)*ALOG(SQRT(C**2+G**2))
      DUA(A,B)=A*H+E*2*A-D*P*(-B/A**2)-F*2*B-(R5/2)*Q*(2*B/C-
    . G*2*A/C**2)
      DUB(A,B)=B*H+E*(-2*B)-D*P*(1/A)-F*2*A-(R5/2)*Q*(2*A/C+
    . G*2*B/C**2)

```


FILE0 LDPARTUB FORTRAN A VM/SP 3.1 *** CHESF ***

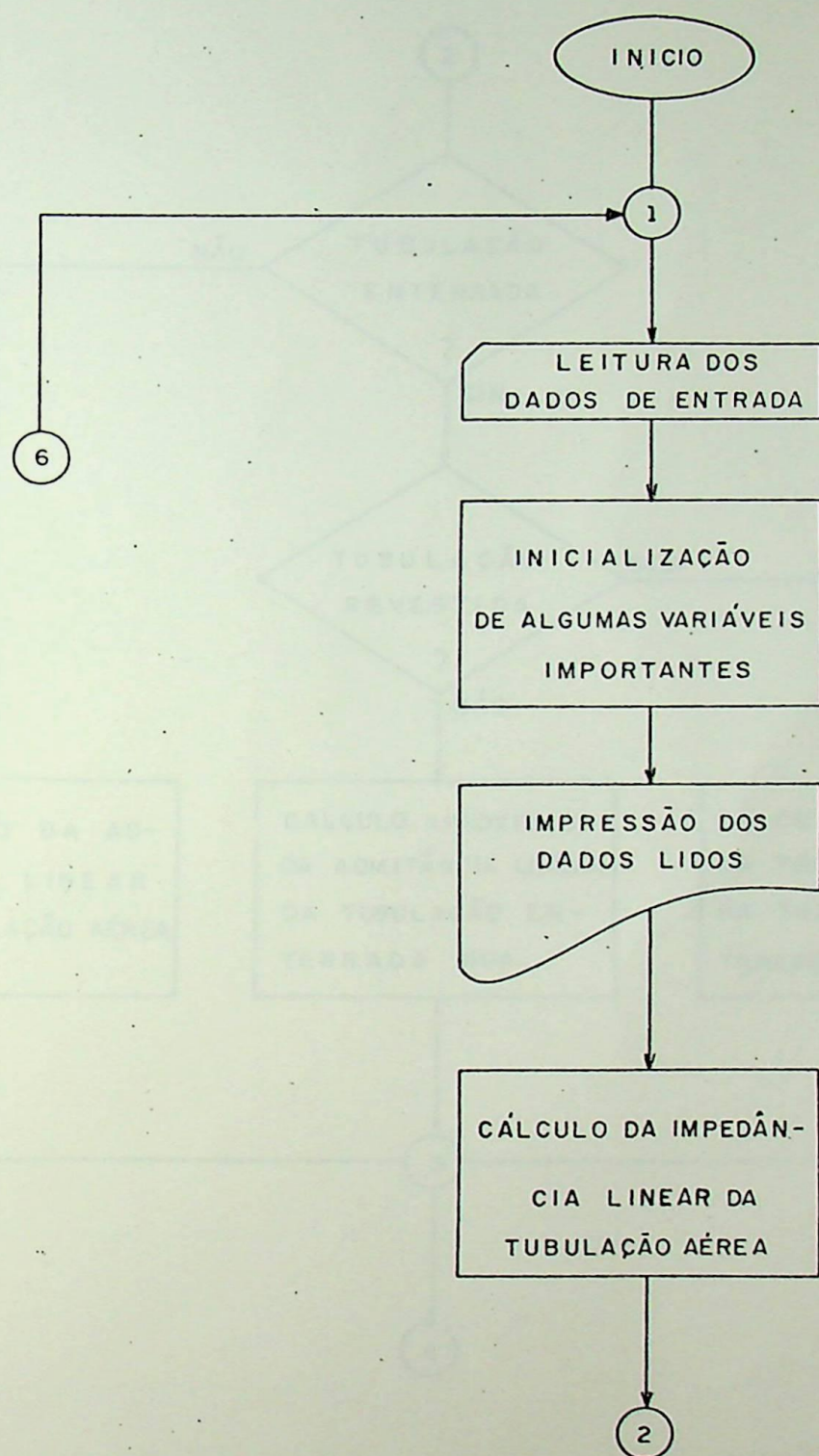
```

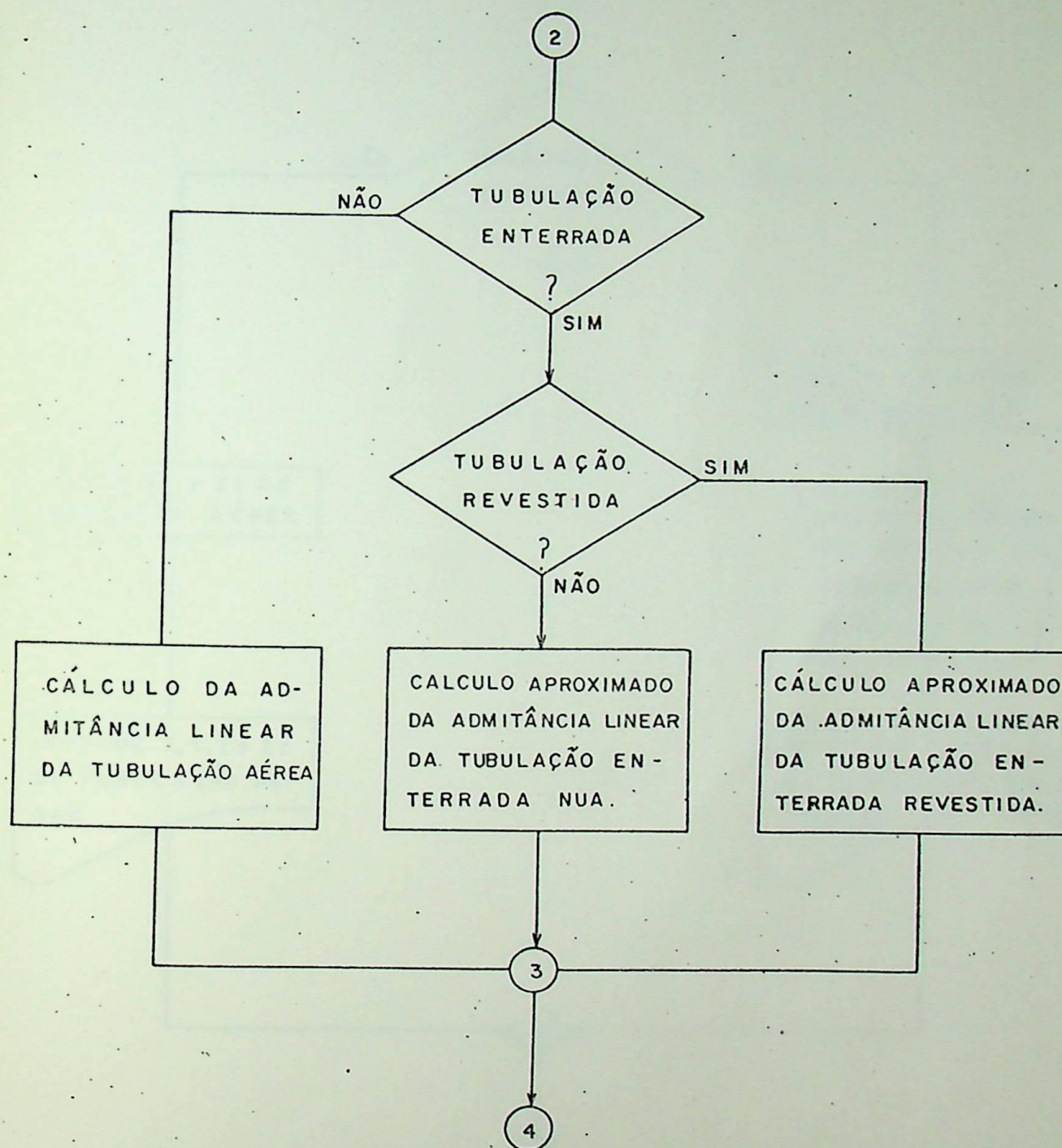
C      DEFINICAO DA TOLERANCIA, NUMERO MAXIMO DE ITERACOES E ESTIM. INICIAL
C      P/GAMA
      TOL=1.E-6
      LIMIT=10

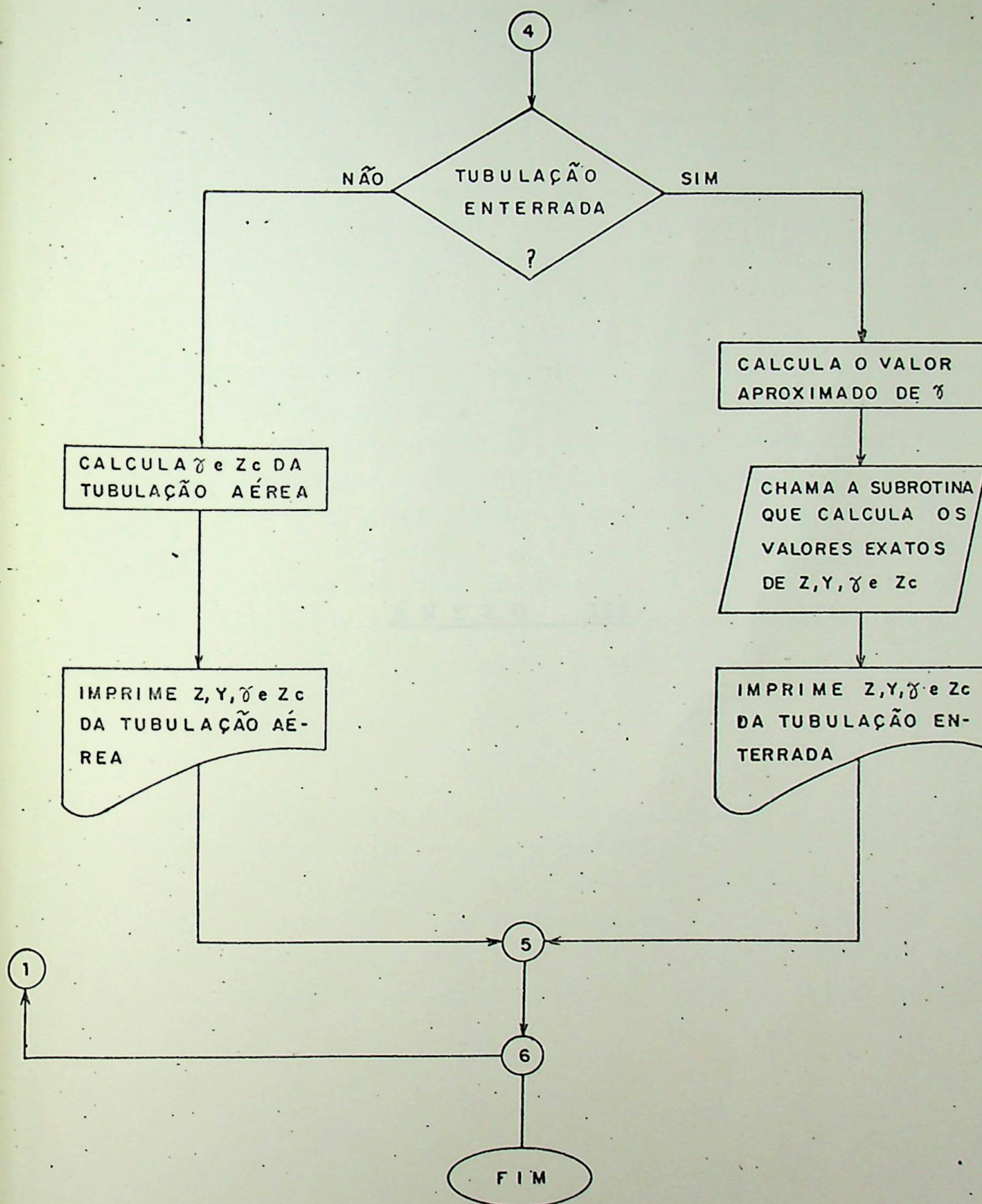
C      INICIO DAS ITERACOES
      N=0
C      ACRESCIMO DAS ITERACOES
30    N=N+1
C      DEFINICAO DE OUTRAS FUNCOES
      A=A1
      B=B1
      C=A**2-B**2
      D=2*A*B
      E=R10-R2*ALOG(SQRT(A**2+B**2))
      F=R11+ATAN(B/A)
      G=2*A*B+R7
      H=-(A**2-B**2)*R2/(A**2+B**2)
      P=1/(1+(H/A)**2)
      Q=1/(1+((2*A*B+R7)/(A**2-B**2))**2)
35    DENOM=DUA(A,B)**2+DUB(A,B)**2
      A1=A+(V(A,B)*DUB(A,B)-U(A,B)*DUA(A,B))/DENOM
      B1=B-(V(A,B)*DUA(A,B)+U(A,B)*DUB(A,B))/DENOM
C      TESTE PARA VERIFICAR A PRECISAO
      IF(ABS(U(A1,B1))-TOL)1,1,20
      1 CONTINUE
      IF(ABS(V(A1,B1))-TOL)2,2,20
      2 CONTINUE
C      VALORES FINAIS DE GAMA, Y, Z E ZC
      A2=A1
      B2=B1
C      DEFINICAO DE 2 VARIAVEIS AUXILIARES
      T1=R10-R2*ALOG(SQRT(A2**2+B2**2))
      T2=R11+ATAN(B2/A2)
      Y=1./CMPLX(T1,T2)
      YR=REAL(Y)
      YI=AIMAG(Y)
      Z=(CMPLX(A2,B2)**2)/Y
      ZR=REAL(Z)
      ZI=AIMAG(Z)
      ZC=CSQRT(Z/Y)
      ZCR=REAL(ZC)
      ZCI=AIMAG(ZC)
      RETURN
C      TESTE PARA LIMITE DO NUMERO DE ITERACOES
20    IF(N-LIMIT)30,3,3
      3 CONTINUE
      A2=A1
      B2=B1
      WRITE(6,300)N,A2,B2
300   FORMAT('0',BX,'NAO HOUE CONVERGENCIA APOS ',I4,' ITERACOES',/,
.2X,'O ULTIMO VALOR OBTIDO PARA GAMA FOI ',2(5X,E13.7))
      T1=R10-R2*ALOG(SQRT(A2**2+B2**2))
      T2=R11+ATAN(B2/A2)
      Y=1./CMPLX(T1,T2)
      YR=REAL(Y)
      YI=AIMAG(Y)
      Z=CMPLX(A2,B2)**2/Y
      ZR=REAL(Z)
      ZI=AIMAG(Z)
      ZC=CSQRT(Z/Y)
      ZCR=REAL(ZC)
      ZCI=AIMAG(ZC)
      WRITE(6,310)ZCR,ZCI
310   FORMAT('0',2X,'O VALOR CORRESPONDENTE PARA ZC FOI ',2(5X,E13.7))
      RETURN
      END

```


II.12) Fluxograma simplificado do programa







METODOLOGIA PARA OBTENÇÃO DE DADOS DE CONSUMO DE
CIGARETAS EM DIFERENTES CATEGORIAS DE CONSUMIDORES

Este trabalho tem como objetivo principal a obtenção de dados de consumo de cigarros em diferentes categorias de consumidores. Para isso, foram utilizados métodos de amostragem probabilística, com o intuito de garantir a representatividade da amostra. Os dados foram coletados através de questionários aplicados em diferentes locais, como supermercados, farmácias e pontos de venda de cigarros. A análise dos dados foi realizada por meio de técnicas estatísticas, permitindo a identificação de padrões de consumo e a comparação entre diferentes grupos de consumidores.

Os resultados obtidos indicam que o consumo de cigarros varia significativamente entre as diferentes categorias de consumidores. Os dados também revelam que a maioria dos consumidores utiliza cigarros de baixa qualidade, o que pode estar relacionado a fatores econômicos e culturais. Além disso, foi observado que o consumo de cigarros tende a diminuir com o aumento da idade e da escolaridade. Esses resultados são importantes para a elaboração de políticas públicas e campanhas de conscientização sobre os riscos do tabagismo.

A N E X O I I I

Este anexo apresenta os dados brutos coletados durante a pesquisa. Os dados foram organizados em tabelas, facilitando a visualização e a análise dos resultados. Cada tabela contém informações sobre o consumo de cigarros em diferentes categorias de consumidores, incluindo a quantidade consumida, o tipo de cigarro utilizado e o local de aquisição. Os dados são apresentados de forma clara e objetiva, permitindo a identificação de tendências e padrões de consumo.

METODOLOGIA PARA CÁLCULO DA DISTRIBUIÇÃO DE CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO ENTRE CABOS PÁRA-RAIOS E TERRA

Sabe-se que durante um curto-circuito fase-terra em uma linha de transmissão a corrente de falta distribui-se através dos ca bos pára-raios e dos sistemas de aterramento das torres da li nha de transmissão e através das malhas de terra das subesta ções terminais. O conhecimento do modo como esta corrente se distribui é muito importante para o cálculo da indução eletro magnética na tubulação bem como para a determinação dos efe tos associados à injeção de corrente de curto-circuito no so lo.

Este anexo apresenta uma metodologia para cálculo desta dis tribuição de corrente, baseada na teoria dos quadripolós. Es ta metodologia permite calcular, para um curto-circuito em uma determinada torre de linha de transmissão, como se distribui a corrente de curto-circuito nos cabos pára-raios (em cada um dos vãos da linha de transmissão) e no solo (injetada através dos sistemas de aterramento de cada uma das torres e através das malhas de terra das subestações terminais).

III.1) Modelo Elétrico

Este modelo pressupõe que são conhecidos, a priori, o valor da corrente total de curto-circuito no ponto de falta, bem co mo as contribuições a esta corrente devido às duas subestações terminais da linha de transmissão. O cálculo destas correntes pressupostas pode ser feito através de programas computacio nais já amplamente divulgados no setor elétrico nacional.

Um esquema do circuito elétrico representativo do problema está ilustrado na figura III.1, onde:

CC1: Contribuição à corrente de curto-circuito devida à subestação terminal do lado 1.

CC2: Contribuição à corrente de curto-circuito devida à subestação terminal do lado 2.

RS1: Resistência de aterramento da subestação terminal do lado 1, devendo incluir as resistências paralelas de outras linhas de transmissão que chegam na subestação.

RS2: Resistência de aterramento da subestação terminal do lado 2, devendo incluir resistências paralelas de outras linhas de transmissão que chegam na subestação.

RT : Resistência de aterramento da torre em curto-circuito.

De modo a poder variar os parâmetros dos cabos pára-raios e dos aterramentos das torres mais próximas ao local da falta (mais influentes), o modelo permite simular parâmetros diferentes para os quatro vãos e para as quatro torres mais próximas à torre defeituosa. Assim:

RD1, RD3, RD2, RD4: Resistências de aterramento das 4 torres mais próximas à torre em curto-circuito.

ZPRD1, ZPRD3, ZPRD2, ZPRD4: Impedâncias próprias dos cabos pára-raios equivalentes nos 4 vãos mais próximos à torre em curto-circuito.

ZRTD1, ZRTD3, ZRTD2, ZRTD4: Impedâncias de retorno pela terra nos 4 vãos mais próximos à torre em curto-circuito.

ZMD1, ZMD2: Impedâncias mútuas entre cabo pára-raios equivalente e fase em falta nos 2 vãos mais próximos à torre em curto-circuito.

Os parâmetros nos demais vãos e torres da linha de transmissão (menos influentes) deverão ser idênticos entre si, não variando de vão para vão ou de torre para torre. Assim:

RAT: Resistência de aterramento das outras torres da linha de transmissão.

ZPR: Impedância própria do cabo para-raios equivalente nos outros vãos da linha de transmissão.

ZRET: Impedância de retorno pelo solo nos outros vãos da linha de transmissão.

ZM: Impedância mútua entre cabo para-raios equivalente e fase em falta nos outros vãos da linha de transmissão.

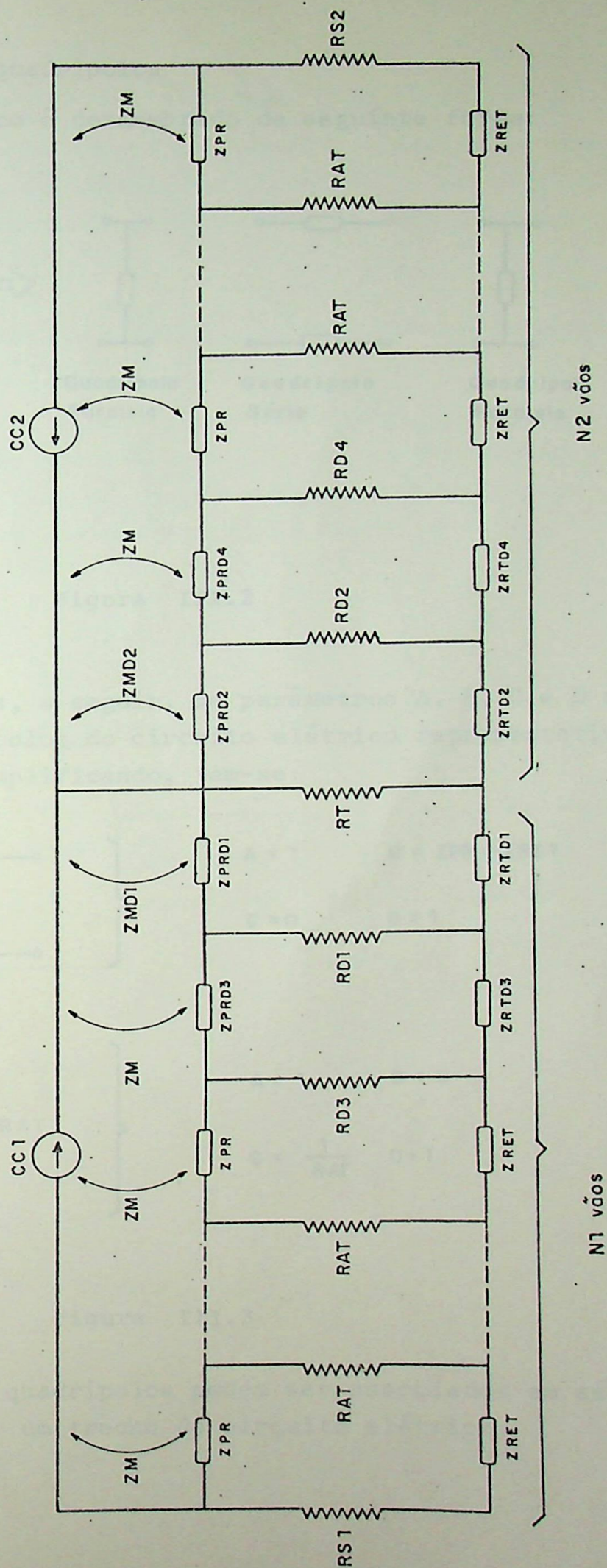


Figura III.1

III.2) Montagem dos quadripolos

Cada vão típico é desmembrado da seguinte forma:

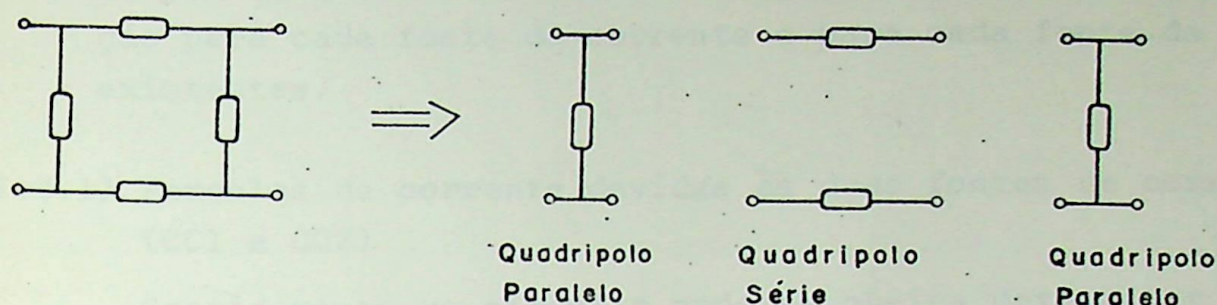


Figura III.2

São calculados, a seguir, os parâmetros A, B, C e D de cada um dos quadripolos do circuito elétrico representativo do problema. Exemplificando, tem-se:

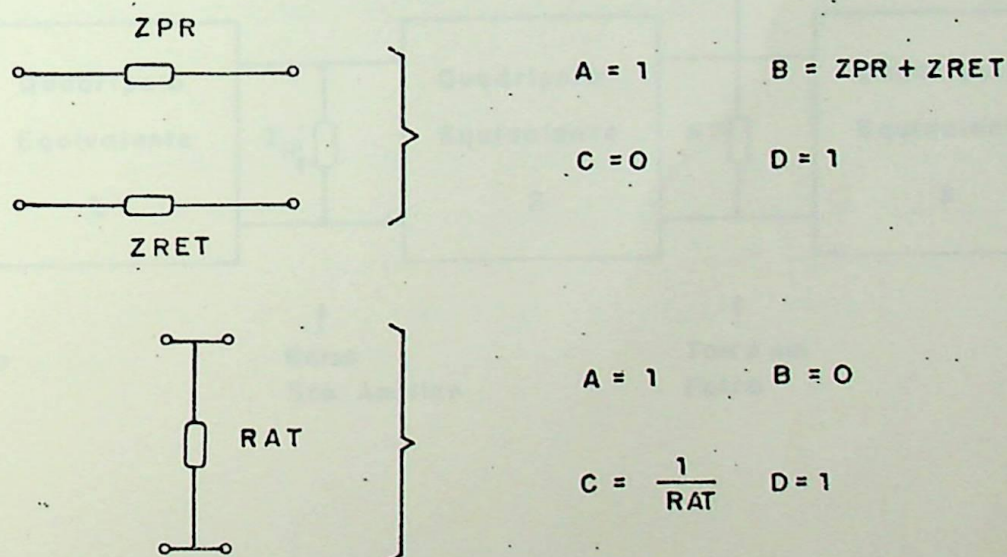


Figura III.3

Vários destes quadripolos podem ser associados em série para representar um trecho do circuito elétrico.

III.3) Determinação das correntes em cada ramo do circuito

As correntes em cada ramo do circuito elétrico representativo do problema são determinadas através do teorema de superposição para cada fonte de corrente e para cada fonte de tensão existentes.

III.3.1) Parcelas de corrente devidas às duas fontes de corrente (CC1 e CC2)

Considere-se um circuito onde se queira determinar a corrente num ramo sob análise. Através de associação de quadripolos, é possível se chegar a um circuito elétrico passivo alimentado por uma das fontes de corrente (CC1).

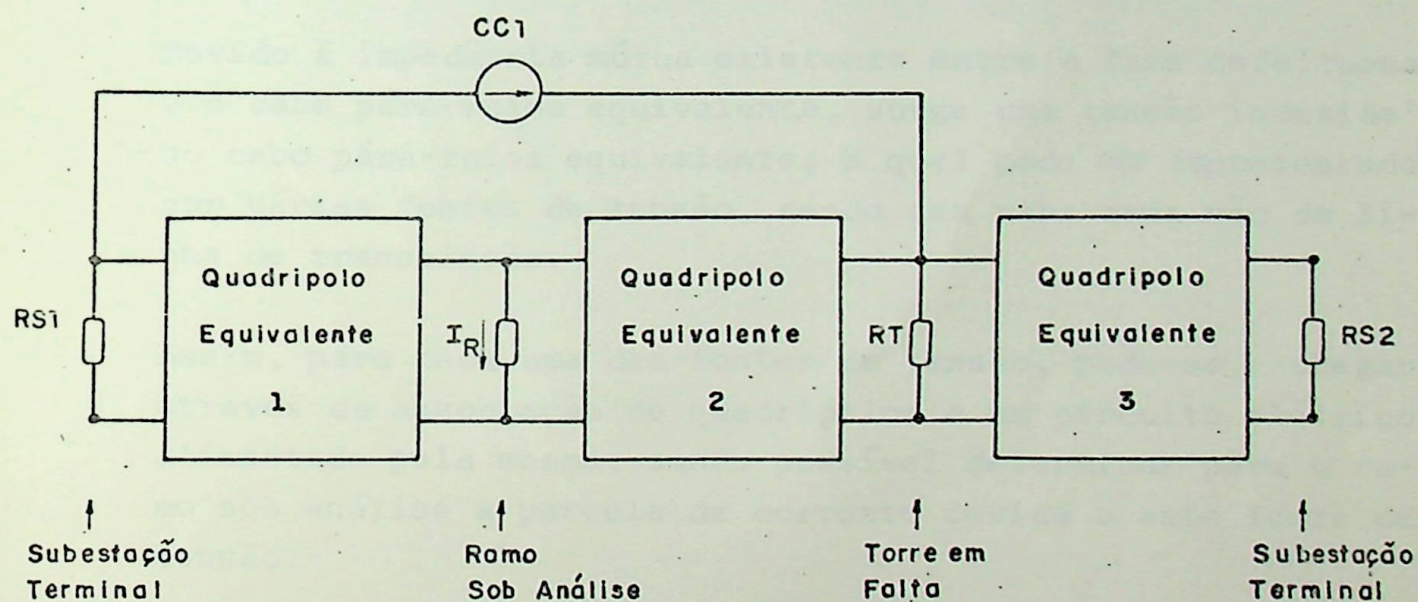


Figura III.4

A resolução deste circuito elétrico permite determinar a parcela de corrente que flui no ramo sob análise.

Este procedimento deve ser repetido para todos os outros ramos do circuito elétrico, obtendo-se as parcelas devidas à fonte CC1.

Através de processo análogo, determina-se, para cada ramo do circuito elétrico, as parcelas de corrente devidas à outra fonte de corrente (CC2) as quais devem ser superpostas às parcelas devidas à primeira fonte.

Esta superposição fornece a corrente total em cada ramo devido às fontes de corrente.

III.3.2) Parcelas de corrente devido às várias fontes de tensão.

Devido à impedância mútua existente entre a fase defeituosa e o cabo pára-raios equivalente, surge uma tensão induzida no cabo pára-raios equivalente, a qual pode ser representada por várias fontes de tensão, sendo uma para cada vão da linha de transmissão.

Assim, para cada uma das fontes de tensão, pode-se chegar através de associação de quadripolos a um circuito elétrico alimentado pela mesma; sendo possível determinar para o ramo sob análise a parcela de corrente devida a esta fonte de tensão.

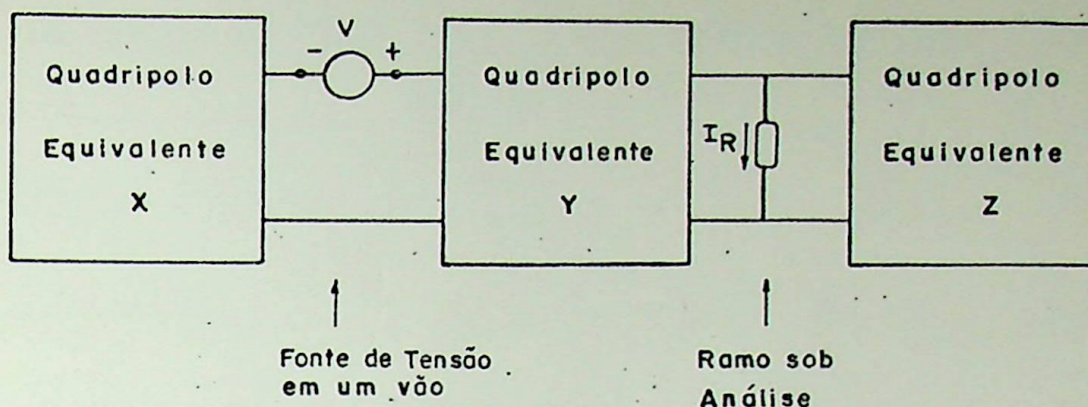


Figura III.5

Este procedimento deve ser repetido para todos os ramos considerando cada uma das fontes de tensão.

A superposição destas parcelas de corrente em cada um dos ramos fornece a corrente total em cada ramo devida às várias fontes de tensão.

III.3.3) Corrente total em cada ramo.

Esta corrente é obtida somando-se para cada um dos ramos a corrente total devida às duas fontes de corrente com a corrente total devida às várias fontes da tensão.

III.3.4) Programa computacional para cálculo da distribuição de corrente de curto-circuito entre cabos pára-raios e terra.

O Anexo IV apresenta o programa computacional desenvolvido em linguagem FORTRAN com base na metodologia apresentada neste anexo III.

IV.1. Título de Programa

INDICADORES

IV.2. Objetivo de Programa

El programa tiene como finalidad contribuir al desarrollo de la investigación en ciencias de la tierra y el espacio, a través de la realización de actividades académicas, científicas y administrativas, que permitan la formación de personal especializado en estas disciplinas.

El programa se desarrollará en el siguiente ámbito:

El programa se desarrollará en el ámbito de las ciencias de la tierra y el espacio, a través de la realización de actividades académicas, científicas y administrativas, que permitan la formación de personal especializado en estas disciplinas.

A N E X O I V

En cada caso se deberá considerar lo siguiente:

1. El programa se desarrollará en el ámbito de las ciencias de la tierra y el espacio, a través de la realización de actividades académicas, científicas y administrativas, que permitan la formación de personal especializado en estas disciplinas.

2. El programa se desarrollará en el ámbito de las ciencias de la tierra y el espacio, a través de la realización de actividades académicas, científicas y administrativas, que permitan la formación de personal especializado en estas disciplinas.

3. El programa se desarrollará en el ámbito de las ciencias de la tierra y el espacio, a través de la realización de actividades académicas, científicas y administrativas, que permitan la formación de personal especializado en estas disciplinas.

PROGRAMA PARA O CÁLCULO DA DISTRIBUIÇÃO DE CORRENTE
DE CURTO-CIRCUITO ENTRE CABOS PARA-RAIOS E A TERRA
(MANUAL DO USUÁRIO)

IV.1) Título do Programa:

LDDIVCOR

IV.2) Objetivo do Programa:

O programa visa calcular como se distribui a corrente de curto-circuito entre os cabos para-raios e a terra, por ocasião da ocorrência de um curto-circuito monofásico em uma torre qualquer de uma LT.

IV.3) Metodologia Utilizada pelo Programa:

O programa desenvolvido utiliza a metodologia descrita no Anexo III deste trabalho.

IV.4) Limitações do Programa:

- Em cada caso processado será simulada uma única LT.
- O curto fase-terra pode ocorrer em uma torre qualquer da LT em estudo, com exceção dos barramentos das SE's terminais.
- No máximo, quatro vãos (dois à esquerda e dois à direita da torre em curto) podem ter suas características físicas detalhadas; os demais vãos terão características físicas similares entre si.
- Na versão atual deve-se ter $N1 \leq 650$ e $N2 \leq 650$ (ver definições de $N1$ e $N2$ no próximo item). Deve-se atentar para estes limites quando da preparação dos dados de entrada do programa. Desejando-se futuramente alterar estes limites, são suficientes pequenas alterações no programa fonte (declarações DIMENSION).

I V.5) Preparação dos dados de entrada do programa

Para cada caso a ser processado SÃO OBRIGATÓRIOS 10 cartões de dados (1º ao 10º cartão descritos nas páginas seguintes).

Note-se que estes 10 cartões devem fazer parte obrigatoriamente do deck de dados, mesmo que alguns destes cartões tenham seus campos deixados em branco (quando a variável de entrada for nula).

Desejando-se processar um único caso, o deck de dados será formado pelos 10 cartões obrigatórios mais 1 cartão de FINALIZAÇÃO.

Desejando-se processar N casos de uma única vez, o deck de dados deve ser formado por $N \times 10$ cartões obrigatórios mais 1 único cartão de finalização no final do deck.

Os cartões que fornecem os dados de entrada são descritos a seguir.

1º cartão

DESCRIÇÃO DO CAMPO	COLUNAS	FORMATO
Título do estudo	1 - 80	20 A4

2º cartão

DESCRIÇÃO DO CAMPO	COLUNAS	FORMATO
Chave 1 - Se igual a 1 imprime todos os quadripolos. Se igual a zero, não imprime.	1 - 5	I 5
Chave 2 - Se igual a 1 imprime os quadripolos equivalentes para os lados 1 e 2. Se igual a zero, não imprime.	6 - 10	I 5
Chave 3 - Se igual a 1 imprime as contribuições totais para o lado 1, lado 2 e para a terra, devido apenas às mútuas. Se igual a zero, não imprime.	11 - 15	I 5
Chave 4 - Se igual a 1 imprime as parcelas de contribuição de corrente para a terra em todas as torres devido apenas às fontes de corrente. Se igual a zero, não imprime.	16 - 20	I 5

3º cartão

DESCRIÇÃO DO CAMPO	COLUNAS	FORMATO
Contribuição à corrente de curto devido à subestação do lado 1 na forma complexa cartesiana(CC1) , (A).	1-20	2 E 10.3
Contribuição à corrente de curto devido à subestação do lado 2 na forma complexa cartesiana(CC2) , (A)	21-40	2 E 10.3

4º cartão

DESCRIÇÃO DO CAMPO	COLUNAS	FORMATO
Resistência de aterramento da <u>su</u> bestação do lado 1 (RS1),devendo incluir resistências paralelas de outras LT's que cheguem na SE, (Ω)	1-10	F 10.3
Resistência de aterramento da <u>su</u> bestação do lado 2 (RS2),devendo incluir resistências paralelas de outras LT's que cheguem na SE. , (Ω).	11-20	F 10.3
Resistência de aterramento da <u>tor</u> re em curto (RT), (Ω).	21-30	F 10.3

5º cartão

DESCRIÇÃO DO CAMPO	COLUNAS	FORMATO
Número de vãos entre a torre em curto e a subestação 1 (N 1)	1 - 5	I 5
Número de vãos entre a torre em curto e a subestação 2 (N 2)	6 - 10	I 5

Observação: Devido ao modelo utilizado, deve-se proceder de forma que:

- a) Se $N1 = 1$: RD1, ZPRD3, ZRTD3 e RD3 devem ser deixados em branco.
- b) Se $N1 = 2$: RD3 deve ser deixado em branco.
- c) Se $N2 = 1$: RD2, ZPRD4, ZRTD4 e RD4 devem ser deixados em branco.
- d) Se $N2 = 2$: RD4 deve ser deixado em branco.

Além disto:

- e) Se $N1 \leq 1$ e $N2 \leq 1$: ZM, ZPR, ZRET e RAT devem ser deixados em branco.
- f) Se $N1 \leq 2$ e $N2 \leq 2$: ZPR, ZRET e RAT devem ser deixados em branco.
- g) Se $N1 \leq 3$ e $N2 \leq 3$: RAT deve ser deixado em branco.

6º cartão

DESCRIÇÃO DO CAMPO	COLUNAS	FORMATO
Impedância do cabo pára-raios no 1º vão mais próximo à torre em curto, do lado 1, na forma complexa cartesiana (ZPRD1), (Ω).	1 - 20	2 E 10.3
Impedância de retorno pela terra no 1º vão mais próximo à torre em curto, do lado 1, na forma complexa cartesiana (ZRTD1), (Ω).	21 - 40	2 E 10.3
Impedância mútua entre cabo condutor e cabo pára-raios no 1º vão mais próximo à torre em curto, do lado 1, na forma complexa cartesiana (ZMD1), (Ω).	41 - 60	2 E 10.3
Resistência de aterramento da 1ª torre mais próxima à torre em curto do lado 1 (RD1), (Ω).	61 - 70	F 10.3

Observação relativa aos cartões 6, 7, 8, 9 e 10:

Quando a LT tiver dois cabos pára-raios, devem ser fornecidas as características físicas do cabo pára-raios equivalente. Vide Anexo VII.

7º cartão

DESCRIÇÃO DO CAMPO	COLUNAS	FORMATO
Impedância do cabo pára-raios no 2º vão mais próximo à torre em curto, do lado 1, na forma complexa cartesiana (ZPRD3), (Ω).	1 - 20	2 E 10.3
Impedância de retorno pela terra no 2º vão mais próximo à torre em curto, do lado 1, na forma complexa cartesiana (ZRTD3), (Ω).	21 - 40	2 E 10.3
Resistência de aterramento da 2ª torre mais próxima à torre em curto, do lado 1 (RD3), (Ω).	61-70	F 10.3

8º cartão

DESCRIÇÃO DO CAMPO	COLUNAS	FORMATO
Impedância do cabo pára-raios no 1º vão mais próximo à torre em curto, do lado 2, na forma complexa cartesiana (ZPRD2), (Ω).	1 - 20	2 E 10.3
Impedância de retorno pela terra no 1º vão mais próximo à torre em curto, do lado 2, na forma complexa cartesiana (ZRTD2), (Ω).	21 - 40	2 E 10.3
Impedância mútua entre cabo condutor e cabo pára-raios no 1º vão mais próximo à torre em curto, do lado 2, na forma complexa cartesiana (ZMD2), (Ω).	41 - 60	2 E 10.3
Resistência de aterramento da 1ª torre mais próxima à torre em curto do lado 2 (RD2), (Ω).	61 - 70	F 10.3

9º cartão

DESCRIÇÃO DO CAMPO	COLUNAS	FORMATO
Impedância do cabo pára-raios no 2º vão mais próximo à torre em curto , do lado 2, na forma complexa cartesiana (ZPRD4), (Ω).	1 - 20	2 E 10.3
Impedância de retorno pela terra no 2º vão mais próximo à torre em curto, do lado 2, na forma complexa cartesiana (ZRTD4), (Ω).	21 - 40	2 E 10.3
Resistência de aterramento da 2ª torre mais próxima à torre em curto do lado 2 (RD4), (Ω).	61-70	F 10.3

10º cartão

DESCRIÇÃO DO CAMPO	COLUNAS	FORMATO
Impedância do cabo pára-raios nos outros vãos da LT na forma complexa cartesiana (ZPR), (Ω).	1 - 20	2 E 10.3
Impedância de retorno pela terra nos outros vãos da LT na forma complexa cartesiana (ZRET), (Ω).	21 - 40	2 E 10.3
Impedância mútua entre cabo condutor e cabo pára-raios nos outros vãos da LT na forma complexa cartesiana (ZM), (Ω).	41 - 60	2 E 10.3
Resistência de aterramento nas outras torres da LT (RAT), (Ω).	61 - 70	F 10.3

Cartão de FINALIZAÇÃO

DESCRIÇÃO DO CAMPO	COLUNAS	FORMATO
Coloca-se o número 9999	1 - 4	A 4

IV.6) Saídas do Programa

Inicialmente, todos os dados lidos são submetidos a uma análise de consistência feita internamente pelo programa.

Em seguida, são impressos os valores das variáveis de entrada tais como serão considerados pelo programa.

Após isto são impressos: os quadripolos situados à esquerda e à direita da torre em curto, as correntes para a terra em todas as torres e nas subestações terminais da LT, e as correntes nos cabos pára-raios em todos os vãos da LT.

IV.7) Casos Testes Processados

Considere-se a figura a seguir onde no vão CD a LT cruza com uma tubulação metálica.

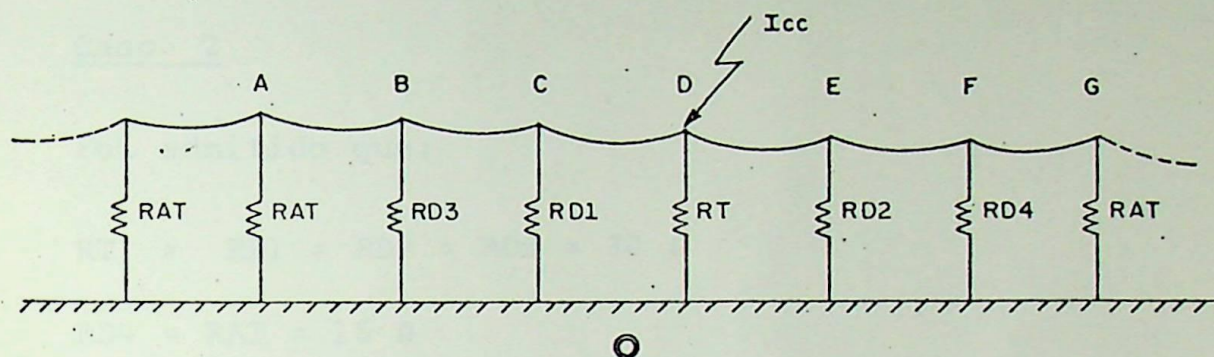


Figura IV.1

Considere-se, ainda, que:

$$RS1 = 1 \, \Omega$$

$$RS2 = 2 \, \Omega$$

$$N1 = 20$$

$$N2 = 30$$

$$CC1 = 30 \, \text{kA}$$

$$CC2 = 20 \, \text{kA}$$

$$ZPRD1 = ZPRD2 = 0.017 + j 0.17 \, \Omega$$

$$ZPRD3 = ZPRD4 = 0.014 + j 0.14 \, \Omega$$

$$ZPR = 0.016 + j 0.16 \, \Omega$$

$$ZRTD1 = ZRTD2 = ZRTD3 = ZRTD4 = ZRET = 0 + j 0 \, \Omega$$

$$ZMD1 = ZMD2 = 0.014 + j 0.11 \, \Omega$$

$$ZM = 0.015 + j 0.12 \, \Omega$$

Caso 1.

Foi admitido que:

$$RT = RD1 = RD2 = RD3 = RD4 = RAT = 15 \, \Omega$$

Caso 2

Foi admitido que:

$$RT = RD1 = RD2 = RD3 = 30 \, \Omega$$

$$RD4 = RAT = 15 \, \Omega$$

Caso 3

Foi admitido que:

$$RT = RD1 = 60 \, \Omega$$

$$RD2 = RD3 = 30 \, \Omega$$

$$RD4 = RAT = 15 \, \Omega$$

IV.8) Resultados Obtidos

Os resultados obtidos para os casos processados são apresentados a seguir.

Caso 1

CASO TESTE 1

CHAVES 1 1 0 0

CC1= 0.100E+05 0.000E+00 A
CC2= 0.200E+05 0.000E+00 A

RS1= 1.000 OHMS RS2= 2.000 OHMS RT= 15.000 OHMS

LOCAL DA TORRE EM DEFEITO
NUMERO DE TORRES A PARTIR DA SUBESTACAO 1 - 2J
NUMERO DE TORRES A PARTIR DA SUBESTACAO 2 - 3J

IMPEDANCIAS E RESISTENCIAS EXPRESSAS EM OHMS

ZPRD1=	0.170E-01	0.170E+00	ZRTD1=	0.000E+00	ZMD1=	0.140E-01	0.110E+00
RD1=	15.000						
ZPRD3=	0.140E-01	0.140E+00	ZRTD3=	0.000E+00			
RD3=	15.000						
ZPRD2=	0.170E-01	0.170E+00	ZRTD2=	0.000E+00	ZMD2=	0.140E-01	0.110E+00
RD2=	15.000						
ZPRD4=	0.140E-01	0.140E+00	ZRTD4=	0.000E+00			
RD4=	15.000						
ZM =	0.150E-01	0.120E+00					
ZPR =	0.160E-01	0.160E+00	ZRET=	0.000E+00	0.000E+00		
RAT=	15.000						

IMPRESSAO QUADRIPILOS LADO 1 (USO 3 QUADRIPILOS NUMERO 1 ENCONTRA-SE VIZINHO A LADO 14 CURTO)

NUM	A		B		C		D	
	REAL	IMAG	REAL	IMAG	REAL	IMAG	REAL	IMAG
1	0.100E+01	0.000E+00	0.170E-01	0.170E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
3	0.100E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.557E-01	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
5	0.100E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.557E-01	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
7	0.100E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
9	0.100E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.557E-01	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
11	0.100E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
13	0.100E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.557E-01	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
15	0.100E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.557E-01	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
17	0.100E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
19	0.100E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.557E-01	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
21	0.100E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.557E-01	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
23	0.100E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.557E-01	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
25	0.100E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
27	0.100E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.557E-01	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
29	0.100E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.557E-01	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
31	0.100E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.557E-01	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
33	0.100E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.607E-01	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
35	0.100E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.557E-01	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
37	0.100E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.557E-01	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
39	0.100E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.607E-01	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00

IMPRESSAO QUADRIPLAS LADJ*2 (DBSU 3 QUADRIPLAS NUMERO 1 ENCONTRO-SE VIZINHO A TORRE 24 CURTO)

NUM	A		B		C		D	
	REAL	IMAG	REAL	IMAG	REAL	IMAG	REAL	IMAG
1	0.103E+01	0.000E+00	0.170E-01	0.170E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.103E+01	0.000E+00
3	0.103E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.657E-01	0.000E+00	0.103E+01	0.000E+00
5	0.103E+01	0.000E+00	0.140E-01	0.140E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.103E+01	0.000E+00
7	0.103E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.657E-01	0.000E+00	0.103E+01	0.000E+00
9	0.103E+01	0.000E+00	0.160E-01	0.160E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.103E+01	0.000E+00
11	0.103E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.657E-01	0.000E+00	0.103E+01	0.000E+00
13	0.103E+01	0.000E+00	0.160E-01	0.160E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.103E+01	0.000E+00
15	0.103E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.657E-01	0.000E+00	0.103E+01	0.000E+00
17	0.103E+01	0.000E+00	0.160E-01	0.160E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.103E+01	0.000E+00
19	0.103E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.657E-01	0.000E+00	0.103E+01	0.000E+00
21	0.103E+01	0.000E+00	0.160E-01	0.160E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.103E+01	0.000E+00
23	0.103E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.657E-01	0.000E+00	0.103E+01	0.000E+00
25	0.103E+01	0.000E+00	0.160E-01	0.160E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.103E+01	0.000E+00
27	0.103E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.657E-01	0.000E+00	0.103E+01	0.000E+00
29	0.103E+01	0.000E+00	0.160E-01	0.160E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.103E+01	0.000E+00
31	0.103E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.657E-01	0.000E+00	0.103E+01	0.000E+00
33	0.103E+01	0.000E+00	0.160E-01	0.160E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.103E+01	0.000E+00
35	0.103E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.657E-01	0.000E+00	0.103E+01	0.000E+00
37	0.103E+01	0.000E+00	0.160E-01	0.160E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.103E+01	0.000E+00
39	0.103E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.657E-01	0.000E+00	0.103E+01	0.000E+00
41	0.103E+01	0.000E+00	0.160E-01	0.160E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.103E+01	0.000E+00
43	0.103E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.657E-01	0.000E+00	0.103E+01	0.000E+00
45	0.103E+01	0.000E+00	0.160E-01	0.160E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.103E+01	0.000E+00
47	0.103E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.657E-01	0.000E+00	0.103E+01	0.000E+00
49	0.103E+01	0.000E+00	0.160E-01	0.160E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.103E+01	0.000E+00
51	0.103E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.657E-01	0.000E+00	0.103E+01	0.000E+00
53	0.103E+01	0.000E+00	0.160E-01	0.160E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.103E+01	0.000E+00
55	0.103E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.657E-01	0.000E+00	0.103E+01	0.000E+00
57	0.103E+01	0.000E+00	0.160E-01	0.160E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.103E+01	0.000E+00
59	0.103E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.657E-01	0.000E+00	0.103E+01	0.000E+00

ABCO EQUIVALENTE LADO 1
 A= -0.150E+01 0.523E+01
 B= -0.201E+01 0.316E+01
 C= 0.170E+01 0.290E+01
 D= 0.510E+00 0.207E+01

ABCO EQUIVALENTE LADO 2
 A= -0.589E+01 0.550E+01
 B= -0.735E+01 0.256E+01
 C= -0.213E+00 0.499E+01
 D= -0.223E+01 0.424E+01

DIVISAO DE CORRENTES RESULTANTES (AMPERES)

	PARA-RAIOS - ADJ 1		PARA-RAIOS - ADJ 2		TERRA	
	REAL	IMAG	REAL	IMAG	REAL	IMAG
PARCELAS DEVIDO CORRENTE ICC1	0.1375892E+05	-0.3574338E+04	0.1524052E+05	0.2252715E+04	0.1000357E+04	0.1321573E+04
PARCELAS DEVIDO CORRENTE ICC2	0.1052205E+03	0.2493945E+03	0.3715134E+04	-0.1039432E+04	0.7527533E+03	0.8100945E+03
PARCELAS DEVIDO MUTUAS LADO 1	0.1225815E+05	0.2354524E+04	-0.1140077E+05	-0.1330003E+04	-0.7773001E+03	-0.9715142E+03
PARCELAS DEVIDO MUTUAS LADO 2	-0.7902215E+04	0.2527895E+02	0.8491730E+04	0.5335733E+03	-0.5895184E+03	-0.6150457E+03
TOTAL POR SUPERPOSICAO	0.2863693E+05	-0.9441099E+03	0.2096666E+05	0.5639933E+04	0.5396405E+03	0.5752079E+03

CORRENTES PARA TERRA NAS DIVERSAS TORRES E NA SE TERMINAL - ADD 1 (AMPERES)

RFA - IMAG

PONTO 1	0.3812455E+03	0.4717208E+03
PONTO 2	0.3716582E+03	0.4493226E+03
PONTO 3	0.3520195E+03	0.3938826E+03
PONTO 4	0.3285548E+03	0.3426179E+03
PONTO 5	0.3017801E+03	0.2932231E+03
PONTO 6	0.2721901E+03	0.2513621E+03
PONTO 7	0.2402032E+03	0.2106729E+03
PONTO 8	0.2062252E+03	0.1727705E+03
PONTO 9	0.1706244E+03	0.1372514E+03
PONTO 10	0.1337415E+03	0.1037003E+03
PONTO 11	0.9349532E+02	0.7158575E+02
PONTO 12	0.5748658E+02	0.4077056E+02
PONTO 13	0.1350450E+02	0.1051110E+02
PONTO 14	-2.046481E+02	-1.953980E+02
PONTO 15	-5.225804E+02	-4.982986E+02
PONTO 16	-9.757767E+02	-8.080511E+02
PONTO 17	-1.351394E+03	-1.129071E+03
PONTO 18	-1.716409E+03	-1.455710E+03
PONTO 19	-2.067620E+03	-1.822221E+03
PONTO 20	-3.602401E+04	-3.304093E+04

PONTO 1 - TORRE VIZINHA A TORRE EM CURTU
 PONTO 20 - SE TERMINAL - ADD 1

CORRENTES PARA TERRA NAS DIVERSAS TORRES E NA SE TERMINAL - LADO 2 (AMPLRES)

	REA-	IMAG
PONTO 1	0.3954879E+03	0.4838285E+03
PONTO 2	0.3932165E+03	0.4519381E+03
PONTO 3	0.3876499E+03	0.3973325E+03
PONTO 4	0.3762588E+03	0.3472453E+03
PONTO 5	0.3615645E+03	0.3016221E+03
PONTO 6	0.3440393E+03	0.2601378E+03
PONTO 7	0.3241046E+03	0.2226006E+03
PONTO 8	0.3021421E+03	0.1807978E+03
PONTO 9	0.2784843E+03	0.1583390E+03
PONTO 10	0.2534420E+03	0.1310607E+03
PONTO 11	0.2272648E+03	0.1066251E+03
PONTO 12	0.2002019E+03	0.0472743E+02
PONTO 13	0.1724435E+03	0.6505566E+02
PONTO 14	0.1441753E+03	0.4729275E+02
PONTO 15	0.1155564E+03	0.3111817E+02
PONTO 16	0.8672877E+02	0.1620938E+02
PONTO 17	0.5782074E+02	0.2243070E+01
PONTO 18	0.2875055E+02	-0.1110407E+02
PONTO 19	0.2299099E+00	-0.2415427E+02
PONTO 20	-0.2023348E+02	-0.3723771E+02
PONTO 21	-0.5632905E+02	-0.5054204E+02
PONTO 22	-0.8304433E+02	-0.6471121E+02
PONTO 23	-0.1095909E+03	-0.7974475E+02
PONTO 24	-0.1372428E+03	-0.9004694E+02
PONTO 25	-0.1626474E+03	-0.1139154E+03
PONTO 26	-0.1870104E+03	-0.1336399E+03
PONTO 27	-0.2101476E+03	-0.1555019E+03
PONTO 28	-0.2318502E+03	-0.1797714E+03
PONTO 29	-0.2518625E+03	-0.2057035E+03
PONTO 30	-0.2024848E+04	-0.1774105E+04

PONTO 1 - TORRE VIZINHA A TORRE EM CURTO
 PONTO 30 - SE TERMINAL LADO 2

CORRENTES NOS DIVERSOS VARS NOS CABOS PARA-RAIOS - LADO 1 (AMPLIFIC)

REAL IMAG

VAN 1	0.2863693E+05	-0.9441899E+03
VAN 2	0.2825568E+05	-0.1415911E+04
VAN 3	0.2788402E+05	-0.1865233E+04
VAN 4	0.2753200E+05	-0.2259115E+04
VAN 5	0.2720345E+05	-0.260174E+04
VAN 6	0.2690166E+05	-0.2095957E+04
VAN 7	0.2655204E+05	-0.3143319E+04
VAN 8	0.2638927E+05	-0.3358992E+04
VAN 9	0.2618304E+05	-0.3531762E+04
VAN 10	0.2601242E+05	-0.3669014E+04
VAN 11	0.2587858E+05	-0.3772715E+04
VAN 12	0.2578278E+05	-0.3844400E+04
VAN 13	0.2572540E+05	-0.3885171E+04
VAN 14	0.2570689E+05	-0.3895602E+04
VAN 15	0.2572736E+05	-0.3875142E+04
VAN 16	0.2578662E+05	-0.3825312E+04
VAN 17	0.2588420E+05	-0.3745307E+04
VAN 18	0.2601934E+05	-0.3632600E+04
VAN 19	0.2619098E+05	-0.3486029E+04
VAN 20	0.2639774E+05	-0.3303807E+04

CORRENTES NOS DIVERSOS VARS DOS CABOS PARA-RAIOS - ADD 2 (AMPERES)

REAL
IMAG

VAN 1	0.2096666F+05	0.3689854E+03
VAN 2	0.2057118E+05	-0.1143432E+03
VAN 3	0.2017596E+05	-0.5667813E+03
VAN 4	0.1978831E+05	-0.9641139E+03
VAN 5	0.1941205E+05	-0.1311399E+04
VAN 6	0.1905049E+05	-0.1613021E+04
VAN 7	0.1870645E+05	-0.1873159E+04
VAN 8	0.1838234E+05	-0.2095760E+04
VAN 9	0.1809020E+05	-0.2284517E+04
VAN 10	0.1780171E+05	-0.2442857E+04
VAN 11	0.1754827E+05	-0.2573919E+04
VAN 12	0.1732100E+05	-0.2680543E+04
VAN 13	0.1712090E+05	-0.2765270E+04
VAN 14	0.1694835E+05	-0.2830325E+04
VAN 15	0.1680419E+05	-0.2877619E+04
VAN 16	0.1668862E+05	-0.2908737E+04
VAN 17	0.1650190E+05	-0.2924845E+04
VAN 18	0.1654407E+05	-0.2927189E+04
VAN 19	0.1651512E+05	-0.2916085E+04
VAN 20	0.1651489E+05	-0.2891931E+04
VAN 21	0.1654313E+05	-0.2854703E+04
VAN 22	0.1659006E+05	-0.2804061E+04
VAN 23	0.1668340E+05	-0.2739350E+04
VAN 24	0.1679436E+05	-0.2659605E+04
VAN 25	0.1693160E+05	-0.2561558E+04
VAN 26	0.1709255E+05	-0.2449643E+04
VAN 27	0.1728126E+05	-0.2316001E+04
VAN 28	0.1749141E+05	-0.2160501E+04
VAN 29	0.1772326E+05	-0.1980733E+04
VAN 30	0.1797514E+05	-0.1774024E+04

NUMERO DE OJADRIPIULOS CALCULADOS
ATE SUFESTACAO 1 - 40
ATE SUFESTACAO 2 - 60

Caso 2

CASO TESTE 2

CHAVES 1 1 0 0

CC1= 0.100E+05 0.000E+00 A
CC2= 0.200E+05 0.000E+00 A

RS1= 1.000 OHMS RS2= 2.000 OHMS RT= 30.000 OHMS

LOCAL DA TORRE EM DEFEITO
NUMERO DE TORRES A PARTIR DA SUJESTACAO 1 - 30
NUMERO DE TORRES A PARTIR DA SUJESTACAO 2 - 30

IMPEDANCIAS E RESISTENCIAS EXPRESSAS EM OHMS

ZPR01=	0.170E-01	0.170E+00	ZRTD1=	0.000E+00	0.000E+00	ZMD1=	0.140E-01	0.110E+00
PD1=	30.000							
ZPRD3=	0.140E-01	0.140E+00	ZRTD3=	0.000E+00	0.000E+00			
RD3=	30.000							
ZPRD2=	0.170E-01	0.170E+00	ZRTD2=	0.000E+00	0.000E+00	ZMD2=	0.140E-01	0.110E+00
RD2=	30.000							
ZPRD4=	0.140E-01	0.140E+00	ZRTD4=	0.000E+00	0.000E+00			
RD4=	15.000							
ZM =	0.150E-01	0.120E+00						
ZPR =	0.140E-01	0.160E+00	ZRET =	0.000E+00	0.000E+00			
RATE =	15.000							

IMPRESSAO QUADRIPOLOS - AGO 1 (CURSO 3 QUADRIPOLOS - NUMERO 1 ENCONTRA-SE VIZINHO A TORRE EM CURTUB)

NUM

NUM	A		B		C		D	
	REAL	IMAG	REAL	IMAG	REAL	IMAG	REAL	IMAG
1	0.100E+01	0.000E+00	0.170E-01	0.170E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
3	0.100E+01	0.000E+00	0.000E-01	0.000E+00	0.300E-01	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
5	0.100E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
7	0.100E+01	0.000E+00	0.100E-01	0.100E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
9	0.100E+01	0.000E+00	0.100E-01	0.100E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
11	0.100E+01	0.000E+00	0.100E-01	0.100E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
13	0.100E+01	0.000E+00	0.100E-01	0.100E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
15	0.100E+01	0.000E+00	0.100E-01	0.100E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
17	0.100E+01	0.000E+00	0.100E-01	0.100E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
19	0.100E+01	0.000E+00	0.100E-01	0.100E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
21	0.100E+01	0.000E+00	0.100E-01	0.100E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
23	0.100E+01	0.000E+00	0.100E-01	0.100E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
25	0.100E+01	0.000E+00	0.100E-01	0.100E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
27	0.100E+01	0.000E+00	0.100E-01	0.100E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
29	0.100E+01	0.000E+00	0.100E-01	0.100E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
31	0.100E+01	0.000E+00	0.100E-01	0.100E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
33	0.100E+01	0.000E+00	0.100E-01	0.100E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
35	0.100E+01	0.000E+00	0.100E-01	0.100E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
37	0.100E+01	0.000E+00	0.100E-01	0.100E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
39	0.100E+01	0.000E+00	0.100E-01	0.100E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00

IMPRESSAO QUADRIPLANO LADO 2 (3350) QUADRIPLANO NUMERO 1 ENCONTRA-SE VIZINHO A TORRE EM CURTID

NUM	A		B		C		D	
	REAL	IMAG	REAL	IMAG	REAL	IMAG	REAL	IMAG
1	0.100E+01	0.000E+00	0.170E-01	0.170E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
3	0.100E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.333E-01	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
5	0.100E+01	0.000E+00	0.140E-01	0.140E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
7	0.100E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
9	0.100E+01	0.000E+00	0.160E-01	0.160E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
11	0.100E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.567E-01	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
13	0.100E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
15	0.100E+01	0.000E+00	0.160E-01	0.160E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
17	0.100E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.657E-01	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
19	0.100E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
21	0.100E+01	0.000E+00	0.160E-01	0.160E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
23	0.100E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
25	0.100E+01	0.000E+00	0.160E-01	0.160E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
27	0.100E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.657E-01	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
29	0.100E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
31	0.100E+01	0.000E+00	0.160E-01	0.160E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
33	0.100E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
35	0.100E+01	0.000E+00	0.160E-01	0.160E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
37	0.100E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.657E-01	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
39	0.100E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
41	0.100E+01	0.000E+00	0.160E-01	0.160E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
43	0.100E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
45	0.100E+01	0.000E+00	0.160E-01	0.160E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
47	0.100E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.657E-01	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
49	0.100E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
51	0.100E+01	0.000E+00	0.160E-01	0.160E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
53	0.100E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
55	0.100E+01	0.000E+00	0.160E-01	0.160E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
57	0.100E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.657E-01	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
59	0.100E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00

ARCD EQUIVALENTE LADO 1
 A= -0.142E+01 0.523E+01
 B= -0.196E+01 0.318E+01
 C= -0.176E+01 0.258E+01
 D= -0.613E+00 0.187E+01

ARCD EQUIVALENTE LADO 2
 A= -0.585E+01 0.553E+01
 B= -0.733E+01 0.260E+01
 C= -0.451E+01 0.480E+01
 D= -0.201E+01 0.414E+01

PARCELAS DEVIDO CORRENTE ICC1
 PARCELAS DEVIDO CORRENTE ICC2
 PARCELAS DEVIDO MUTUAS LADO 1
 PARCELAS DEVIDO MUTUAS LADO 2

TOTAL POR SUPERPOSICAO

DIVISAO DE CORRENTES RESULTANTES (AMPERES)

	PARA-RAIOS - LADO 1		PARA-RAIOS - LADO 2		TERRA	
	REAL		REAL		REAL	
PARCELAS DEVIDO CORRENTE ICC1	0.1382607E+05	-0.3539632E+04	0.1557925E+05	0.2600522E+04	0.4946055E+05	0.7130033E+03
PARCELAS DEVIDO CORRENTE ICC2	0.1054254E+05	0.2330273E+03	0.3074033E+04	-0.7021457E+03	0.3334187E+03	0.4741134E+03
PARCELAS DEVIDO MUTUAS LADO 1	0.1220849E+05	0.2333333E+04	-0.1192227E+05	-0.1733543E+04	-0.3357309E+03	-0.541231E+03
PARCELAS DEVIDO MUTUAS LADO 2	-0.7919041E+04	-0.7297720E+01	0.8216844E+04	0.3555552E+03	-0.2972156E+03	-0.3483054E+03
TOTAL POR SUPERPOSICAO	0.2855745E+05	-0.9200044E+03	0.2114743E+05	0.3001143E+03	0.1950570E+03	0.3198223E+03

CORRENTES PARA TERRA NAS DIVERSAS TORRES E NA SE TERMINAL - LAJO I (AMPÈRES)

REAL IMAG

PONTO 1	0.1876435E+03	0.2630172E+03
PONTO 2	0.1838137E+03	0.2557125E+03
PONTO 3	0.3520559E+03	0.4512478E+03
PONTO 4	0.3320462E+03	0.3953071E+03
PONTO 5	0.3081746E+03	0.3433300E+03
PONTO 6	0.2909691E+03	0.2950066E+03
PONTO 7	0.2509165E+03	0.2499945E+03
PONTO 8	0.2184652E+03	0.2079258E+03
PONTO 9	0.1840295E+03	0.1634095E+03
PONTO 10	0.1479935E+03	0.1310354E+03
PONTO 11	0.1107175E+03	0.9537975E+02
PONTO 12	0.7254260E+02	0.6100737E+02
PONTO 13	0.3374384E+02	0.2747367E+02
PONTO 14	-0.5211393E+01	-0.5670244E+01
PONTO 15	-0.4416174E+02	-0.5667571E+02
PONTO 16	-0.8274495E+02	-0.7259370E+02
PONTO 17	-0.1206410E+03	-0.1072716E+03
PONTO 18	-0.1575229E+03	-0.1433505E+03
PONTO 19	-0.1930431E+03	-0.1312625E+03
PONTO 20	-0.3402535E+04	-0.3321411E+04

PONTO 1 - TORRE VIZINHA A TORRE EM CORTO
 PONTO 20 - SE. TERMINAL LAJO I

CORRENTES PARA TERRA NAS DIVERSAS TORRES E NA SE TERMINAL - LADO 2 (AMPERES)

REAL - IMAG

PONTO 1	0.1958467E+03	0.2730454E+03
PONTO 2	0.3951914E+03	0.5102373E+03
PONTO 3	0.3913110E+03	0.4311642E+03
PONTO 4	0.3810357E+03	0.3957464E+03
PONTO 5	0.3709366E+03	0.3458374E+03
PONTO 6	0.3555345E+03	0.3012552E+03
PONTO 7	0.3372967E+03	0.2557067E+03
PONTO 8	0.3166436E+03	0.2221920E+03
PONTO 9	0.2939676E+03	0.1882141E+03
PONTO 10	0.2695928E+03	0.1575719E+03
PONTO 11	0.2438249E+03	0.1259742E+03
PONTO 12	0.2169310E+03	0.1051143E+03
PONTO 13	0.1871471E+03	0.8208130E+02
PONTO 14	0.1608811E+03	0.5239415E+02
PONTO 15	0.1317252E+03	0.4380756E+02
PONTO 16	0.1024406E+03	0.2671275E+02
PONTO 17	0.7297998E+02	0.1073921E+02
PONTO 18	0.4349286E+02	-0.4444517E+01
PONTO 19	0.1407979E+02	-0.1916911E+02
PONTO 20	-0.1310386E+02	-0.3375507E+02
PONTO 21	-0.4394349E+02	-0.4855579E+02
PONTO 22	-0.7231211E+02	-0.3863111E+02
PONTO 23	-0.1000763E+03	-0.3001985E+02
PONTO 24	-0.1270940E+03	-0.9732450E+02
PONTO 25	-0.1542090E+03	-0.1160880E+03
PONTO 26	-0.1782494E+03	-0.1356105E+03
PONTO 27	-0.2029223E+03	-0.1551793E+03
PONTO 28	-0.2243132E+03	-0.1840730E+03
PONTO 29	-0.2443796E+03	-0.2115550E+03
PONTO 30	-0.1975880E+04	-0.1814069E+04

PONTO 1 - TORRE VIZINHA A TORRE EM CURTO
 PONTO 30 - SE TERMINAL LADO 2

CORRIENTES NOS DIVERSOS VARS NOS CAJOS PARA-RAJDS - -AJD 1 (AMPERES)
REAL IMAG

VAN 1	0.2865745E+05	- .9200044E+03
VAN 2	0.2846991E+05	- .1183022E+04
VAN 3	0.2828500E+05	- .1443734E+04
VAN 4	0.2793394E+05	- .1094982E+04
VAN 5	0.2750190E+05	- .2290289E+04
VAN 6	0.2729372E+05	- .2633619E+04
VAN 7	0.2701275E+05	- .2928025E+04
VAN 8	0.2676193E+05	- .3179020E+04
VAN 9	0.2654336E+05	- .3386545E+04
VAN 10	0.2635934E+05	- .3554955E+04
VAN 11	0.2621134E+05	- .3685991E+04
VAN 12	0.2610062E+05	- .3781370E+04
VAN 13	0.2602808E+05	- .3842379E+04
VAN 14	0.2599429E+05	- .3869851E+04
VAN 15	0.2599995E+05	- .3864101E+04
VAN 16	0.2604366E+05	- .3825303E+04
VAN 17	0.2612641E+05	- .3752712E+04
VAN 18	0.2624705E+05	- .3645440E+04
VAN 19	0.2640457E+05	- .3502090E+04
VAN 20	0.2659761E+05	- .3320827E+04

CORRIENTES VDS DJS CAJOS PARA-RAIOS - ADD 2 (AMPERES)

	REAL	IMAG
VAN 1	0.211473E+05	0.6001143E+03
VAN 2	0.2095158E+05	0.3270688E+03
VAN 3	0.2055639E+05	-0.1031685E+03
VAN 4	0.201650E+05	-0.6343327E+03
VAN 5	0.1978204E+05	-0.1031079E+04
VAN 6	0.1941110E+05	-0.1377917E+04
VAN 7	0.1905557E+05	-0.1679172E+04
VAN 8	0.1871827E+05	-0.1938958E+04
VAN 9	0.1840163E+05	-0.2161151E+04
VAN 10	0.1810766E+05	-0.2349365E+04
VAN 11	0.1783807E+05	-0.2506937E+04
VAN 12	0.1759424E+05	-0.2636910E+04
VAN 13	0.1737731E+05	-0.2742025E+04
VAN 14	0.1718816E+05	-0.2824705E+04
VAN 15	0.1702749E+05	-0.2887060E+04
VAN 16	0.1689575E+05	-0.2930869E+04
VAN 17	0.1679331E+05	-0.2957581E+04
VAN 18	0.1672033E+05	-0.2968320E+04
VAN 19	0.1667685E+05	-0.2963875E+04
VAN 20	0.1666277E+05	-0.2944705E+04
VAN 21	0.1667797E+05	-0.2910942E+04
VAN 22	0.1672142E+05	-0.2862386E+04
VAN 23	0.1679413E+05	-0.2798518E+04
VAN 24	0.1699421E+05	-0.2719499E+04
VAN 25	0.1702130E+05	-0.2621174E+04
VAN 26	0.1717451E+05	-0.2505085E+04
VAN 27	0.1735276E+05	-0.2369475E+04
VAN 28	0.1755478E+05	-0.2209296E+04
VAN 29	0.1777909E+05	-0.2025223E+04
VAN 30	0.1802397E+05	-0.1813667E+04

NUMERO DE CUADRIPOLOS CALCULADOS
 ATE SUBESTACION 1 - 40
 ATE SUBESTACION 2 - 60

Caso 3

CASO TESTE 3

CHAVES 1 1 0 0

CC1= 0.100E+05 0.000E+00 A
CC2= 0.200E+05 0.000E+00 A

RS1= 1.000 OHMS RS2= 2.000 OHMS RT= 60.000 OHMS

LOCAL DA TORRE EM DEFEITO
NUMERO DE TORRES A PARTIR DA SUJESTACAO 1 - 20
NUMERO DE TORRES A PARTIR DA SUJESTACAO 2 - 30

IMPEDANCIAS E RESISTENCIAS EXPRESSAS EM OHMS

ZPRD1= 0.170E-01 0.170E+00 ZRTD1= 0.000E+00 ZMD1= 0.140E-01 0.110E+00

RD1= 60.000

ZPRD3= 0.140E-01 0.140E+00 ZRTD3= 0.000E+00 0.000E+00

RD3= 30.000

ZPRD2= 0.170E-01 0.170E+00 ZRTD2= 0.000E+00 0.000E+00

RD2= 30.000

ZPRD4= 0.140E-01 0.140E+00 ZRTD4= 0.000E+00 0.000E+00

RD4= 15.000

ZM = 0.150E-01 0.120E+00

ZPR = 0.160E-01 0.160E+00 ZRET= 0.000E+00 0.000E+00

RATE= 15.000

IMPRESSAO QUADRIPOLOS LADO 1 (CDSU 3 QUADRIPOLO NUMERO 1 ENCONTRA-SE VIZINHO A TUBO 24 CURTID)

NUM	A		B		C		D	
	REAL	IMAG	REAL	IMAG	REAL	IMAG	REAL	IMAG
1	0.100E+01	0.000E+00	0.170E-01	0.170E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
3	0.100E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.157E-01	0.157E+00	0.100E+01	0.000E+00
5	0.100E+01	0.000E+00	0.140E-01	0.140E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
7	0.100E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.333E-01	0.333E+00	0.100E+01	0.000E+00
9	0.100E+01	0.000E+00	0.160E-01	0.160E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
11	0.100E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.507E-01	0.507E+00	0.100E+01	0.000E+00
13	0.100E+01	0.000E+00	0.100E-01	0.100E+00	0.667E-01	0.667E+00	0.100E+01	0.000E+00
15	0.100E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
17	0.100E+01	0.000E+00	0.160E-01	0.160E+00	0.557E-01	0.557E+00	0.100E+01	0.000E+00
19	0.100E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
21	0.100E+01	0.000E+00	0.160E-01	0.160E+00	0.657E-01	0.657E+00	0.100E+01	0.000E+00
23	0.100E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
25	0.100E+01	0.000E+00	0.160E-01	0.160E+00	0.657E-01	0.657E+00	0.100E+01	0.000E+00
27	0.100E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.657E-01	0.657E+00	0.100E+01	0.000E+00
29	0.100E+01	0.000E+00	0.160E-01	0.160E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
31	0.100E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.657E-01	0.657E+00	0.100E+01	0.000E+00
33	0.100E+01	0.000E+00	0.160E-01	0.160E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
35	0.100E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.657E-01	0.657E+00	0.100E+01	0.000E+00
37	0.100E+01	0.000E+00	0.160E-01	0.160E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
39	0.100E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.657E-01	0.657E+00	0.100E+01	0.000E+00

IMPRESSÃO QUADRIPLINAR LADO 2 (3350) QUADRIPLINAR NÚMERO 1 ENCONTRA-SE VIZINHO A TORRE DA CURTID

NÚM	A		B		C		D	
	REAL	IMAG	REAL	IMAG	REAL	IMAG	REAL	IMAG
1	0.100E+01	0.000E+00	0.170E-01	0.170E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
3	0.100E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.333E-01	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
5	0.100E+01	0.000E+00	0.140E-01	0.140E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
7	0.100E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.657E-01	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
9	0.100E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
11	0.100E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.557E-01	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
13	0.100E+01	0.000E+00	0.160E-01	0.160E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
15	0.100E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.657E-01	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
17	0.100E+01	0.000E+00	0.160E-01	0.160E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
19	0.100E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.557E-01	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
21	0.100E+01	0.000E+00	0.160E-01	0.160E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
23	0.100E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.657E-01	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
25	0.100E+01	0.000E+00	0.160E-01	0.160E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
27	0.100E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.557E-01	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
29	0.100E+01	0.000E+00	0.160E-01	0.160E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
31	0.100E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.657E-01	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
33	0.100E+01	0.000E+00	0.160E-01	0.160E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
35	0.100E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.557E-01	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
37	0.100E+01	0.000E+00	0.160E-01	0.160E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
39	0.100E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.657E-01	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
41	0.100E+01	0.000E+00	0.160E-01	0.160E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
43	0.100E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.557E-01	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
45	0.100E+01	0.000E+00	0.160E-01	0.160E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
47	0.100E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.657E-01	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
49	0.100E+01	0.000E+00	0.160E-01	0.160E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
51	0.100E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.557E-01	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
53	0.100E+01	0.000E+00	0.160E-01	0.160E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
55	0.100E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.657E-01	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
57	0.100E+01	0.000E+00	0.160E-01	0.160E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00
59	0.100E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.557E-01	0.000E+00	0.100E+01	0.000E+00

ARCO EQUIVALENTE LADO 1
 AE -0.141E+01 0.523E+01
 RE -0.105E+01 0.314E+01
 CE 0.178E+01 0.250E+01
 DE 0.640E+00 0.182E+01

ARCO EQUIVALENTE LADO 2
 AE -0.585E+01 0.553E+01
 RE -0.733E+01 0.260E+01
 CE -0.451E-01 0.480E+01
 DE -0.201E+01 0.414E+01

DIVISAO DE CORRENTES RESULTANTES (AMPERES)

	PARA-RAIOS LADO 1		PARA-RAIOS LADO 2		TERRA	
	REAL	IMAG	REAL	IMAG	REAL	IMAG
PARCELAS DEVIDO CORRENTE ICC1	0.1394065E+05	-0.3524437E+04	0.1591434E+05	0.3143355E+04	0.2450007E+03	0.3308704E+03
PARCELAS DEVIDO CORRENTE ICC2	0.1054983E+05	0.2993231E+03	0.9250223E+04	-0.5443395E+03	0.1909450E+03	0.2450115E+03
PARCELAS DEVIDO MUTUAS LADO 1	0.1219780E+05	0.2531830E+04	-0.1200651E+05	-0.2000749E+04	-0.1914747E+03	-0.2811313E+03
PARCELAS DEVIDO MUTUAS LADO 2	-0.7924594E+04	-0.1532545E+02	0.5072793E+04	0.1951555E+03	-0.1481925E+03	-0.1301330E+03
TOTAL POR SUPERPOSICAO	0.2366269E+05	-0.9087551E+03	0.2124005E+05	0.7441433E+03	0.9546126E+02	0.1546116E+03

CORRENTES PARA TERRA NAS DIVERSAS TORRES E NA SE-TERMINAL - ADU 1 (AMPERES)

REA- IMAS

PONTO 1	0.9276532E+02	0.1396575E+03
PONTO 2	0.1323099E+03	0.2644777E+03
PONTO 3	0.3503463E+03	0.4675543E+03
PONTO 4	0.3314588E+03	0.4103083E+03
PONTO 5	0.3045476E+03	0.3571959E+03
PONTO 6	0.2821555E+03	0.3076756E+03
PONTO 7	0.2527825E+03	0.2614928E+03
PONTO 8	0.2208898E+03	0.2132900E+03
PONTO 9	0.1899049E+03	0.1775678E+03
PONTO 10	0.1512240E+03	0.1392331E+03
PONTO 11	0.1142192E+03	0.1025601E+03
PONTO 12	0.7624223E+02	0.6721474E+02
PONTO 13	0.3702561E+02	0.3275445E+02
PONTO 14	-0.1291945E+01	-0.1269597E+01
PONTO 15	-0.4020191E+02	-0.3530865E+02
PONTO 16	-0.7877773E+02	-0.6981418E+02
PONTO 17	-0.1166929E+03	-0.1052342E+03
PONTO 18	-0.1536099E+03	-0.1429115E+03
PONTO 19	-0.1891761E+03	-0.1805784E+03
PONTO 20	-0.3345270E+04	-0.3320337E+04

PONTO 1 - TORRE VIZINHA A TORRE EM CURTO
 PONTO 20 - SE-TERMINAL -ADU 1

CORRENTES PARA TERRA NAS DIVERSAS TORRES E NA SE TERMINAL - LADJ 2 (AMPERES)

REAL IMAG

PONTO 1	0.1944359E+03	0.2817080E+03
PONTO 2	0.3935444E+03	0.5256730E+03
PONTO 3	0.3900210E+03	0.4054442E+03
PONTO 4	0.3835549E+03	0.4105410E+03
PONTO 5	0.3723072E+03	0.3590490E+03
PONTO 6	0.3576143E+03	0.3131714E+03
PONTO 7	0.3399702E+03	0.2730425E+03
PONTO 8	0.3197979E+03	0.2320205E+03
PONTO 9	0.2974920E+03	0.1970732E+03
PONTO 10	0.2734014E+03	0.1655010E+03
PONTO 11	0.2478365E+03	0.1370230E+03
PONTO 12	0.2210751E+03	0.1113343E+03
PONTO 13	0.1933616E+03	0.8812239E+02
PONTO 14	0.1649146E+03	0.6700703E+02
PONTO 15	0.1359278E+03	0.4794237E+02
PONTO 16	0.1065761E+03	0.3011804E+02
PONTO 17	0.7701600E+02	0.1356387E+02
PONTO 18	0.4733462E+02	-0.2154820E+01
PONTO 19	0.1744595E+02	-0.1737034E+02
PONTO 20	-0.1149812E+02	-0.3241390E+02
PONTO 21	-0.4050910E+02	-0.4761479E+02
PONTO 22	-0.6905497E+02	-0.6329845E+02
PONTO 23	-0.9699028E+02	-0.7576625E+02
PONTO 24	-0.1241901E+03	-0.9735370E+02
PONTO 25	-0.1504866E+03	-0.1164297E+03
PONTO 26	-0.1756695E+03	-0.1371950E+03
PONTO 27	-0.1996288E+03	-0.1599807E+03
PONTO 28	-0.2220602E+03	-0.1850665E+03
PONTO 29	-0.2427705E+03	-0.2127181E+03
PONTO 30	-0.1960971E+04	-0.1823397E+04

PONTO 1 - TORRE VIZINHA A TORRE EM CURTO
 PONTO 30 - SE TERMINAL LADJ 2

CORRIENTES NOS DIVERPOS VADS NOS CABUS PARA-RAIOS - ADD 1 (AMPERES)

VAN 1	REAL	0.2866269E+05	-0.9087551E+03
VAN 2	IMAG	0.2856993E+05	-0.1047413E+04
VAN 3		0.2838762E+05	-0.1311890E+04
VAN 4		0.2803727E+05	-0.1779445E+04
VAN 5		0.2770591E+05	-0.2189833E+04
VAN 6		0.2739726E+05	-0.2547029E+04
VAN 7		0.2711511E+05	-0.2854704E+04
VAN 8		0.2686233E+05	-0.3116197E+04
VAN 9		0.2664144E+05	-0.3334483E+04
VAN 10		0.2645453E+05	-0.3512151E+04
VAN 11		0.2630331E+05	-0.3651384E+04
VAN 12		0.2618909E+05	-0.3753944E+04
VAN 13		0.2611285E+05	-0.3821159E+04
VAN 14		0.2607522E+05	-0.3853913E+04
VAN 15		0.2607651E+05	-0.3852644E+04
VAN 16		0.2611671E+05	-0.3817335E+04
VAN 17		0.2619549E+05	-0.3747521E+04
VAN 18		0.2631218E+05	-0.3642287E+04
VAN 19		0.2646579E+05	-0.3500275E+04
VAN 20		0.2665497E+05	-0.3319697E+04

CORRIENTES NOS DIVERSOS VAGS DOS CABOS PARA-RAIOS - ADD 2 (AMPERES)

	REAL	IMAG
VAN 1	0.2124085E+05	0.7441433E+03
VAN 2	0.2104642E+05	0.4623747E+03
VAN 3	0.2065287E+05	-0.6429835E+02
VAN 4	0.2026204E+05	-0.5307425E+03
VAN 5	0.1987849E+05	-0.9416243E+03
VAN 6	0.1950618E+05	-0.1301473E+04
VAN 7	0.1914056E+05	-0.1014645E+04
VAN 8	0.1880859E+05	-0.1085287E+04
VAN 9	0.1848870E+05	-0.2117315E+04
VAN 10	0.1819130E+05	-0.2314389E+04
VAN 11	0.1791790E+05	-0.2479891E+04
VAN 12	0.1767006E+05	-0.2616914E+04
VAN 13	0.1744800E+05	-0.2724246E+04
VAN 14	0.1725563E+05	-0.2816370E+04
VAN 15	0.1709071E+05	-0.2883437E+04
VAN 16	0.1695478E+05	-0.2931280E+04
VAN 17	0.1684821E+05	-0.2961398E+04
VAN 18	0.1677119E+05	-0.2974062E+04
VAN 19	0.1672380E+05	-0.2972807E+04
VAN 20	0.1670505E+05	-0.2955343E+04
VAN 21	0.1671745E+05	-0.2923023E+04
VAN 22	0.1675706E+05	-0.2875409E+04
VAN 23	0.1682701E+05	-0.2812110E+04
VAN 24	0.1692401E+05	-0.2732324E+04
VAN 25	0.1704821E+05	-0.2634930E+04
VAN 26	0.1719870E+05	-0.2518500E+04
VAN 27	0.1737439E+05	-0.2381305E+04
VAN 28	0.1757402E+05	-0.2221325E+04
VAN 29	0.1779609E+05	-0.2036258E+04
VAN 30	0.1903886E+05	-0.1823540E+04

NUMERO DE QUADRIPOLOS CALCULADOS
 ATÉ SUFESTACAO 1 - 40
 ATÉ SUFESTACAO 2 - 60

IV.9) Análise dos resultados obtidos

Foram obtidos, entre outros, os seguintes resultados:

(Vide figura do item IV.7).

CORRENTE INJETADA NO SOLO CASO	TORRE A	TORRE B	TORRE C	TORRE D	TORRE E	TORRE F
1	352.0 + +j393.9	371.7 + +j449.3	381.2 + +j471.7	396.4 + +j 575.2	395.5 + +j 483.8	395.2 + +j 451.9
2	352.1 + +j451.2	183.8 + +j255.7	187.6 + +j 268.0	195.1 + +j 319.9	195.8 + +j 273.0	395.2 + +j 510.2
3	350.3 + +j467.6	182.3 + +j 264.5	92.8 + +j138.7	96.5 + +j 164.6	194.4 + +j 281.8	393.5 + +j 526.7

Tabela IV.1

CORRENTE NO CABO PÁRA-RAIOS CASO	VÃO AB	VÃO BC	VÃO CD	VÃO DE	VÃO EF
1	27884.0 - -j1865.2	28255.7 - -j1415.9	28636.9 - -j 944.2	20966.7 + +j 369.0	20571.2 + -j114.8
2	28286.0 - -j1443.7	28469.8 - -j1188.0	28657.5 - -j 920.0	21147.4 + +j 600.1	20951.6 + +j 327.1
3	28387.6 - -j1311.9	28570.0 - -j1047.4	28662.7 - -j 908.8	21240.9 + +j 744.1	21046.4 + +j 462.4

Tabela IV.2

Os quais convertidos para a forma polar ficam:

CORRENTE INJETADA NO SOLO CASO	TORRE A	TORRE B	TORRE C	TORRE D	TORRE E	TORRE F
1	528,26 48,20°	583,12 50,40°	606,48 51,06°	698,55 55,43°	624,89 50,73°	600,33 48,83°
2	572,32 52,03°	314,90 54,29°	327,14 55,01°	374,70 58,62°	335,96 54,35°	645,36 52,24°
3	584,26 53,16°	321,24 55,42°	166,88 56,21°	190,80 59,62°	342,35 55,40°	657,46 53,24°

Tabela IV.3

CORRENTE NO CABO PARA-RAIOS CASO	VÃO AB	VÃO BC	VÃO CD	VÃO DE	VÃO EF
1	27946,31 -3,83°	28291,15 -2,87°	28652,46 -1,89°	20969,95 1,01°	20571,52 0,32°
2	28332,82 -2,92°	28494,58 -2,39°	28672,26 -1,84°	21155,91 1,63°	20954,15 0,89°
3	28417,90 -2,65°	28589,19 -2,10°	28677,10 -1,82°	21253,93 2,01°	21051,48 1,26°

Tabela IV.4

Notem-se os resultados para as torres B, C, D e E; e para os vãos BC, CD e DE.

Observa-se que, por ocasião dos aumentos das resistências de aterramento das torres mais próximas ao vão de cruzamento, ocorre uma diminuição da corrente injetada no solo e um aumento da corrente nos cabos pára-raios. Estes dois fatos contribuem para aliviar a sollicitação elétrica sobre a tubulação.

Assim, no caso 3 ocorrem as sollicitações elétricas mais suaves sobre a tubulação.

Pode-se concluir que um dimensionamento adequado das resistências de pé de torre para as torres mais próximas ao vão de cruzamento pode levar a um grande alívio das sollicitações elétricas sobre a tubulação.

IV.10) Listagem do programa fonte

Os resultados apresentados no item IV.8 foram obtidos através do programa fonte cuja listagem é mostrada a seguir.

FILED LDDIVCOR FORTAN A VM/SP 3.1 *** CHESF ***

```

C   PROGRAMA DE CALCULO DE DIVISAO DE CORRENTE ENTRE TERRA E
C   CABOS PARA-RAIOS
COMPLEX ZPR,ZRET,ZPRD1,ZRTD1,ZPRD2,ZRTD2,ZM,ZMD1,ZMD2,CC1,CC2,
- C1C11,C1C12,C2C11,C2C12,CTC11,CTC12,C1CT1,C2CT1,C1CT2,C2CT2,
-CTCT1,CTCT2,CKPR,CKPR
COMPLEX ZPRD3,ZRTD3,ZPRD4,ZRTD4
COMPLEX APT1,BPT1,CPT1,DPT1,APT2,BPT2,CPT2,DPT2
COMPLEX A1,B1,C1,D1,A2,B2,C2,D2
COMPLEX ZTS1,ZTR1,YT1,ZTS2,ZTR2,YT2
COMPLEX*16 CT1,CT2
COMPLEX*16 CPR1,CPR2
COMPLEX C1C,C2C,CTC
COMMON /DIC50/ CPR1(650),CPR2(650)
COMMON /DIC1/ ZPR,ZRET,ZPRD1,ZRTD1,ZPRD2,ZRTD2,ZM,ZMD1,ZMD2,
-RS1,RS2,RAT,RD1,RD2,RT,ICH(5),N1,N2,NFC1,NFC2
COMMON /DIC10/ ZPRD3,ZRTD3,ZPRD4,ZRTD4,RD3,RD4
COMMON /DIC2/ A1(1300),B1(1300),C1(1300),D1(1300),
-A2(1300),B2(1300),C2(1300),D2(1300)
COMMON /DIC3/ CC1,CC2,C1C11,C1C12,C2C11,C2C12,CTC11,CTC12,
-C1CT1,C1CT2,C2CT1,C2CT2,CTCT1,CTCT2
COMMON /DIC4/ APT1,BPT1,CPT1,DPT1,APT2,BPT2,CPT2,DPT2
COMMON /DIC5/ ZTS1,ZTR1,YT1,ZTS2,ZTR2,YT2
COMMON /DIC5/ CT1(650),CT2(650)
DIMENSION ALFA(20)
DATA FIM/49999/
C   _FITURA DO TITULO DO ESTUDO
20   READ(5,1000) (ALFA(I),I=1,20)
WRITE(6,2000) (ALFA(I),I=1,20)
1000  FORMAT(20A4)
2000  FORMAT(14I,9(/),2X,20A4)
IF(ALFA(1).EQ.FIM) GO TO 10
C   _FITURA DAS CHAVES
READ(5,1002) (ICH(I),I=1,4)
WRITE(6,2002) (ICH(I),I=1,4)
1002  FORMAT(5I5)
2002  FORMAT(/,10X,'CHAVES',5X,5I5)
C   _FITURA DAS CORRENTES FORNECIDAS PELAS SE'S TERMINAIS
READ(5,1010) CC1,CC2
WRITE(6,2010) CC1,CC2
1010  FORMAT(4F10.3)
2010  FORMAT(/,10X,' CC1=',2E10.3,' A',/,10X,' CC2=',2E10.3,' A')
C   _FITURA DAS RESISTENCIAS DE ATERRAMENTO DAS SE'S TERMINAIS
C   _DA TORRE EM CURTO
READ(5,1050) RS1,RS2,RT
1050  FORMAT(3F10.3)
C   _LEITURA DO LOCAL DE CURTO
READ(5,1060) N1,N2
1060  FORMAT(2I5)
C   _LEITURA DOS PARAMETROS DOS VAOS DETALHADOS
READ(5,1030) ZPRD1,ZRTD1,ZMD1,RD1
READ(5,1031) ZPRD3,ZRTD3,RD3
READ(5,1030) ZPRD2,ZRTD2,ZMD2,RD2
READ(5,1031) ZPRD4,ZRTD4,RD4
C   _LEITURA DOS PARAMETROS DO RESTO DA LINHA
READ(5,1030) ZPR,ZRET,ZM,RAT
1030  FORMAT(6F10.3,F10.3)
1031  FORMAT(4F10.3,20X,F10.3)
N11=N1+1
DO 40 I=1,N11
CT1(I)=CMPLX(0.,0.)
CPR1(I)=CMPLX(0.,0.)
40   CONTINUE
N21=N2+1
DO 45 I=1,N21
CT2(I)=CMPLX(0.,0.)
CPR2(I)=CMPLX(0.,0.)
45   CONTINUE
NFC1=N1
NFC2=N2
C   _IMPRESSAO DOS DADOS LIDOS COM ALGORITMO DE CORRECAO
WRITE(6,2020) RS1,RS2,RT
2020  FORMAT('0',10X,'RS1= ',F10.3,' OHMS',5X,'RS2= ',F10.3,' OHMS',5X,
,'RT= ',F10.3,' OHMS')
WRITE(6,2060) N1,N2
2060  FORMAT('0',/,10X,'LOCAL DA TORRE EM DEFEITO',/,10X,'NUMERO DE TORR
-RS A PARTIR DA SUBESTACAO 1 -',I5,/,10X,'NUMERO DE TORRES A PARTI
-R DA SUBESTACAO 2 -',I5)
IF(N1.EQ.0.OR.N2.EQ.0) GO TO 9
WRITE(6,1931)
1931  FORMAT('0',/,6X,'IMPEDANCIAS E RESISTENCIAS EXPRESSAS EM OHMS')

```



```

      WRITE(6,2031)ZPRD1,ZRTD1,ZMD1
      IF(N1.EQ.1)GO TO 81
      WRITE(6,2041)RD1
      WRITE(6,2033)ZPRD3,ZRTD3
      IF(N1.EQ.2)GO TO 82
      WRITE(6,2043)RD3
      GO TO 80
81  RD1=0
      ZPRD3=CMPLX(0.,0.)
      ZRTD3=CMPLX(0.,0.)
      RD3=0
      GO TO 80
82  RD3=0
80  CONTINUE
      WRITE(6,2032)ZPRD2,ZRTD2,ZMD2
      IF(N2.EQ.1)GO TO 91
      WRITE(6,2042)RD2
      WRITE(6,2034)ZPRD4,ZRTD4
      IF(N2.EQ.2)GO TO 92
      WRITE(6,2044)RD4
      GO TO 90
91  RD2=0
      ZPRD4=CMPLX(0.,0.)
      ZRTD4=CMPLX(0.,0.)
      RD4=0
      GO TO 90
92  RD4=0
90  CONTINUE
      IF(N1.LE.1.AND.N2.LE.1)GO TO 93
      WRITE(6,2036)ZM
      GO TO 94
93  ZM=CMPLX(0.,0.)
      ZPR=CMPLX(0.,0.)
      ZRET=CMPLX(0.,0.)
      RAT=0.
94  CONTINUE
      IF(N1.LE.2.AND.N2.LE.2)GO TO 95
      WRITE(6,2035)ZPR,ZRET
      GO TO 96
95  ZPR=CMPLX(0.,0.)
      ZRET=CMPLX(0.,0.)
      RAT=0.
96  CONTINUE
      IF(N1.LE.3.AND.N2.LE.3)GO TO 97
      WRITE(6,2045)RAT
      GO TO 98
97  RAT=0
98  CONTINUE
2031  FORMAT('0',5X,'ZPRD1= ',2(E10.3,2X),2X,'ZRTD1= ',2(E10.3,2X),
.2X,'ZMD1= ',2(E10.3,2X))
2032  FORMAT('0',5X,'ZPRD2= ',2(E10.3,2X),2X,'ZRTD2= ',2(E10.3,2X),
.2X,'ZMD2= ',2(E10.3,2X))
2033  FORMAT('0',5X,'ZPRD3= ',2(E10.3,2X),2X,'ZRTD3= ',2(E10.3,2X))
2034  FORMAT('0',5X,'ZPRD4= ',2(E10.3,2X),2X,'ZRTD4= ',2(E10.3,2X))
2035  FORMAT('0',5X,'ZPR= ',2(E10.3,2X),2X,'ZRET= ',2(E10.3,2X))
2036  FORMAT('0',5X,'ZM= ',2(E10.3,2X))
2041  FORMAT('0',7X,'RD1= ',F10.3)
2042  FORMAT('0',7X,'RD2= ',F10.3)
2043  FORMAT('0',7X,'RD3= ',F10.3)
2044  FORMAT('0',7X,'RD4= ',F10.3)
2045  FORMAT('0',7X,'RAT= ',F10.3)
C      INICIO DOS CALCULOS
C      MONTAGEM DOS QUADRICULOS
      CALL QJADR
C      CALCULO DAS CONTRIBUICOES POR CORRENTE
      CALL DICJR
C      CALCULO DAS CONTRIBUICOES POR TENSAO
      CALL DITEN
C      CALCULO DOS PARCELAS FINAIS
      C1C=C1C11+C1C12+C1CT1+C1CT2
      C2C=C2C11+C2C12+C2CT1+C2CT2
      CTC=CTC11+CTC12+CTCT1+CTCT2
C      IMPRESSOES DOS RESULTADOS
      WRITE(6,2070)
2070  FORMAT('/',60X,'DIVISAO DE CORRENTES RESULTANTES (AMPERES)',/,43X,
- 'PARA-RATOS -ADD 1',14X,'PARA-RATOS -ADD 2',21X,'TERRA',/,44X,
- 2('REAL',8X,'IMAG',15X),'REAL',8X,'IMAG',/)
      WRITE(6,2080) C1C11,C2C11,CTC11
      WRITE(6,2090) C1C12,C2C12,CTC12
      WRITE(6,3000) C1CT1,C2CT1,CTCT1

```


FILE0 LDDIVCOR FORTRAN A VM/SP 3.1 *** CHESF ***

```

      WRITE(6,3010) C1CT2,C2CT2,CTCT2
      WRITE(6,3020) C1C,C2C,CTC
2080  FORMAT(1X,'PARCELAS DEVIDO CORRENTE ICC1',3(5X,E13.7,2X,E13.7))
2090  FORMAT(1X,'PARCELAS DEVIDO CORRENTE ICC2',3(5X,E13.7,2X,E13.7))
3000  FORMAT(1X,'PARCELAS DEVIDO MUTUAS LADO 1',3(5X,E13.7,2X,E13.7))
3010  FORMAT(1X,'PARCELAS DEVIDO MUTUAS LADO 2',3(5X,E13.7,2X,E13.7))
3020  FORMAT(1X,'TOTAL POR SUPERPOSICAO',7X,3(5X,E13.7,2X,E13.7))
C
C      IMPRESSAO DAS CORRENTES EM TODAS AS TORRES E NAS SE'S TERMINAIS
C
      WRITE(6,3070)
3070  FORMAT('1',3(/),30X,'CORRENTES PARA TERRA NAS DIVERSAS TORRES E NA
1  SE TERMINAL - LADO 1 (AMPERES)',//,27X,'REAL',11X,'IMAG',/)
      DO 60 I=1,N1,3
      N11=N1-1
      I1=I+1
      I2=I+2
      IF(I.EQ.N1) WRITE(6,3075) I,CT1(I)
      IF(I.EQ.N11) WRITE(6,3075) I,CT1(I),I1,CT1(I1)
      IF(I.EQ.N117R,I.EQ.N11) GO TO 60
      WRITE(6,3075) I,CT1(I),I1,CT1(I1),I2,CT1(I2)
3075  FORMAT(1X,3(1X,'PONT0',13,6X,E13.7,4X,E13.7))
      60 CONTINUE
      WRITE(6,3077)N1
3077  FORMAT('0',//,5X,'PONT0 1 - TORRE VIZINHA A TORRE EM CURTO',/,
      5X,'PONT0 ',13,' - SE TERMINAL LADO 1')
C
      WRITE(6,3080)
3080  FORMAT('1',3(/),30X,'CORRENTES PARA TERRA NAS DIVERSAS TORRES E NA
1  SE TERMINAL - LADO 2 (AMPERES)',//,27X,'REAL',11X,'IMAG',/)
      DO 70 I=1,N2,3
      N21=N2-1
      I1=I+1
      I2=I+2
      IF(I.EQ.N2) WRITE(6,3075) I,CT2(I)
      IF(I.EQ.N21) WRITE(6,3075) I,CT2(I),I1,CT2(I1)
      IF(I.EQ.N217R,I.EQ.N21) GO TO 70
      WRITE(6,3075) I,CT2(I),I1,CT2(I1),I2,CT2(I2)
      70 CONTINUE
      WRITE(6,3078)N2
3078  FORMAT('0',//,5X,'PONT0 1 - TORRE VIZINHA A TORRE EM CURTO',/,
      5X,'PONT0 ',13,' - SE TERMINAL LADO 2')
      CPR1(1)=C1C
      DO 1234 LK=2,N1
1234  CPR1(LK)=CPR1(LK-1)-CT1(LK-1)
      WRITE(6,3412)
3412  FORMAT('1',3(/),10X,'CORRENTES NDS DIVERSOS VAOS NDS CABOS PARA-RA
      IOS - LADO 1 (AMPERES)',/,20X,'REAL',10X,'IMAG')
      DO 4321 LK=1,N1
      WRITE(6,3421)LK,CPR1(LK)
3421  FORMAT('0',2X,'VAO',13,6X,E13.7,2X,E13.7)
4321  CONTINUE
      CPR2(1)=C2C
      DO 5678 LK=2,N2
5678  CPR2(LK)=CPR2(LK-1)-CT2(LK-1)
      WRITE(6,5785)
5785  FORMAT('1',3(/),10X,'CORRENTES NDS DIVERSOS VAOS NDS CABOS PARA-RA
      IOS - LADO 2 (AMPERES)',/,20X,'REAL',10X,'IMAG')
      DO 8576 LK=1,N2
      WRITE(6,7865)LK,CPR2(LK)
7865  FORMAT('0',2X,'VAO',13,6X,E13.7,2X,E13.7)
8576  CONTINUE
C      CALCULO FATOR KPR
C      CKPR=CTC/(CC1+CC2)
C      CALL POLAR(PCKPR,CKPR)
C      WRITE(6,3030) PCKPR
C3030  FORMAT(9(/),5X,'FATOR KPR(MODULO E ANGULO)',2E10.3)
      IF(NFC1.EQ.N1.AND.NFC2.EQ.N2) GO TO 20
      WRITE(6,3064) NFC1,NFC2
3064  FORMAT(//,10X,'NUMERO DE QUADRIPOLOS CALCULADOS',/,15X,'ATE SUBES
      TACAO 1 -',15,/,15X,'ATE SUBESTACAO 2 -',15)
      GO TO 20
      9 WRITE(6,3050)
3050  FORMAT(//,20X,'LOCAL IMPROPRIO DE CURTO - O CURTO NAO PODE SER SI
      MULADO NA BARRA DA SE - VERIFIQUE N1 E N2')
      GO TO 20
10. STOP
      END
C      SUBROUTINE POLAR(XP,XC)
C      COMPLEX XP,XC

```


FILE0 LDDIVCAR FORTRAN A VM/SP 3.1 *** CHESF ***

```

C      DATA PI/3.1416/
C      X1=RFAL(XC)
C      X2=AIMAG(XC)
C      XMOD=SQRT(X1**2+X2**2)
C      IF(XMOD.GT.1.E-10) GO TO 10
C      XMOD=0.
C      XANG=0.
C      GO TO 20
C 10  IF(ABS(X1).GT.1.E-10) GO TO 30
C      XANG=0.
C      IF(X2.GT.0.) GO TO 20
C      XANG=-90.
C      GO TO 20
C 30  XANG=ATAN(X1/X2)
C      XANG=180.*XANG/PI
C      IF(X1.GE.0.) GO TO 20
C      XANG=XANG+180.
C 20  XP=CMPLX(XMOD,XANG)
C      RETURN
C      END
C      SUBROUTINE QJADR
C      SUBROTINA DETERMINACAO DE QUADRIPOLOS
C      COMPLEX AS,BS,CS,DS,AP,BP,CP,DP
C      COMPLEX A1,B1,C1,D1,A2,B2,C2,D2
C      COMPLEX ZPR,ZPRD1,ZRTD1,ZPRD2,ZRTD2,ZM,ZMD1,ZMD2,ZRET
C      COMPLEX ZPRD3,ZRTD3,ZPRD4,ZRTD4
C      COMMON /DIC1/ ZPR,ZRET,ZPRD1,ZRTD1,ZPRD2,ZRTD2,ZM,ZMD1,ZMD2,
- RS1,RS2,RAT,RD1,RD2,RT,ICH(5),N1,N2,NFC1,NFC2
C      COMMON /DIC10 /ZPRD3,ZRTD3,ZPRD4,ZRTD4,RD3,RD4
C      COMMON /DIC2/ A1(1300),B1(1300),C1(1300),D1(1300),
- A2(1300),B2(1300),C2(1300),D2(1300)
C      CALCULO ABCD BASICO SERIE
C      AS=CMPLX(1.,0.)
C      BS=ZPR+ZRET
C      CS=CMPLX(0.,0.)
C      DS=CMPLX(1.,0.)
C      IF(N1.LE.3.AND.N2.LE.3)GO TO 95
C      CALCULO ABCD BASICO PARALELO
C      AP=CMPLX(1.,0.)
C      BP=CMPLX(0.,0.)
C      CP=CMPLX(1./RAT,0.)
C      DP=CMPLX(1.,0.)
C 95  CONTINUE
C      CALCULO ABCD FINAIS LADO 1
C      A1(1)=CMPLX(1.,0.)
C      B1(1)=ZPRD1+ZRTD1
C      C1(1)=CMPLX(0.,0.)
C      D1(1)=CMPLX(1.,0.)
C      IF(N1.EQ.1)GO TO 2
C      A1(2)=CMPLX(1.,0.)
C      B1(2)=CMPLX(0.,0.)
C      C1(2)=CMPLX(1./RD1,0.)
C      D1(2)=CMPLX(1.,0.)
C      A1(3)=CMPLX(1.,0.)
C      B1(3)=ZPRD3+ZRTD3
C      C1(3)=CMPLX(0.,0.)
C      D1(3)=CMPLX(1.,0.)
C      IF(N1.EQ.2)GO TO 2
C      A1(4)=CMPLX(1.,0.)
C      B1(4)=CMPLX(0.,0.)
C      C1(4)=CMPLX(1./RD3,0.)
C      D1(4)=CMPLX(1.,0.)
C 2  NN1=2*N1
C      A1(NN1)=CMPLX(1.,0.)
C      B1(NN1)=CMPLX(0.,0.)
C      C1(NN1)=CMPLX(1./RS1,0.)
C      D1(NN1)=CMPLX(1.,0.)
C      CALCULO ABCD FINAIS LADO 2
C      A2(1)=CMPLX(1.,0.)
C      B2(1)=ZPRD2+ZRTD2
C      C2(1)=CMPLX(0.,0.)
C      D2(1)=CMPLX(1.,0.)
C      IF(N2.EQ.1)GO TO 4
C      A2(2)=CMPLX(1.,0.)
C      B2(2)=CMPLX(0.,0.)
C      C2(2)=CMPLX(1./RD2,0.)
C      D2(2)=CMPLX(1.,0.)
C      A2(3)=CMPLX(1.,0.)
C      B2(3)=ZPRD4+ZRTD4
C      C2(3)=CMPLX(0.,0.)

```



```

      D2(3)=CMP_X(1..0.)
      IF(N2.EQ.2)GO TO 4
      A2(4)=CMPLX(1..0.)
      B2(4)=CMPLX(0..0.)
      C2(4)=CMPLX(1./RD4,0.)
      D2(4)=CMPLX(1..0.)
4     NN2=2*N2
      A2(NN2)=CMPLX(1..0.)
      B2(NN2)=CMPLX(0..0.)
      C2(NN2)=CMPLX(1./RS2,0.)
      D2(NN2)=CMPLX(1..0.)
C     MONTAGEM ABCD SERIE PARA LADO 1 E 2
      IF(N1.LE.2)GO TO 11
      NFI=2*N1-1
      DO 10 I=5,NFI,2
        A1(I)=AS
        B1(I)=BS
        C1(I)=CS
10     D1(I)=DS
11     IF(N2.LE.2)GO TO 21
      NFI=2*N2-1
      DO 20 I=5,NFI,2
        A2(I)=AS
        B2(I)=BS
        C2(I)=CS
20     D2(I)=DS
21     CONTINUE
C     MONTAGEM ABCD PARALELO PARA O LADO 1 E 2
      IF(N1.LE.3)GO TO 31
      NFI=2*N1-2
      DO 30 I=5,NFI,2
        A1(I)=AP
        B1(I)=BP
        C1(I)=CP
30     D1(I)=DP
31     IF(N2.LE.3)GO TO 41
      NFI=2*N2-2
      DO 40 I=5,NFI,2
        A2(I)=AP
        B2(I)=BP
        C2(I)=CP
40     D2(I)=DP
41     CONTINUE
C     IMPRESSOES INTERMEDIARIAS DOS ABCD
      IF(ICH(1).EQ.0) GO TO 70
C     IMPRESSAO ABCD LADO 1
      WRITE(6,2000)
2000  FORMAT(1H1,8(/),9X,'IMPRESSAO QUADRIPOLOS LADO 1 (OBSSO O QUADRIPOLO
      .O NUMERO 1 ENCONTRA-SE VIZINHO A TORRE EM CURTO)')
      WRITE(6,2010)
2010  FORMAT(/,4X,'NUM',14X,'A',25X,'B',25X,'C',25X,'D',/,14X,'REAL',
      18X,'IMAG',3(10X,'REAL',8X,'IMAG'),/)
      NF=2*N1
      DO 50 I=1,NF,2
        WRITE(6,2020) I,A1(I),B1(I),C1(I),D1(I),A1(I+1),B1(I+1),C1(I+1),
        -D1(I+1)
2020  FORMAT(4X,14,2X,4(E10.3,2X,E10.3,4X),/,10X,4(E10.3,2X,E10.3,4X))
50     CONTINUE
      WRITE(6,2030)
2030  FORMAT(1H1,8(/),9X,'IMPRESSAO QUADRIPOLOS LADO 2 (OBSSO O QUADRIPOLO
      .O NUMERO 1 ENCONTRA-SE VIZINHO A TORRE EM CURTO)')
      WRITE(6,2010)
      NF=2*N2
      DO 60 I=1,NF,2
        WRITE(6,2020) I,A2(I),B2(I),C2(I),D2(I),A2(I+1),B2(I+1),C2(I+1),
        -D2(I+1)
60     CONTINUE
70     RETURN
      END
SUBROUTINE DICOR
C     SUBROTINA PARA CALCULO DA DIVISAO RESISTIVA DE CORRENTES
      COMPLEX A1,B1,C1,D1,A2,B2,C2,D2
      COMPLEX AP1,BP1,CP1,DP1,AP2,BP2,CP2,DP2,AEQ,BEQ,CEQ,DEQ
      COMPLEX APT1,BPT1,CPT1,DPT1,APT2,BPT2,CPT2,DPT2,AUX1,AUX2,AUX3
      COMPLEX ZPR,ZRET,ZPRO1,ZRTO1,ZPRO2,ZRTO2,ZM,ZMD1,ZMD2,CC1,CC2,
      -C1C11,C1C12,C2C11,C2C12,CTC11,CTC12,C1CT1,C2C11,C1CT2,C2CT2,
      -CTCT1,CTCT2
      COMPLEX ZPRO3,ZRTO3,ZPRO4,ZRTO4
      COMPLEX ZPT1,YPT1,YPIR1,ZPI2,YPI2,ZEQ,JW
      COMPLEX ZTS1,ZTR1,YT1,ZTS2,ZTR2,YI2

```



```

COMPLEX*16 CT1,CT2
COMMON /DIC1/ 7PR,ZRET,ZPRD1,ZRTD1,ZPRD2,ZRTD2,ZM,ZMD1,ZMD2,
-RS1,RS2,RA1,RD1,RD2,RT,ICH(5),N1,N2,NFC1,NFC2
COMMON /DIC10/ ZPRD3,ZRTD3,ZPRD4,ZRTD4,RD3,RD4
COMMON /DIC2/ A1(1300),B1(1300),C1(1300),D1(1300),
-A2(1300),B2(1300),C2(1300),D2(1300)
COMMON /DIC3/ CC1,CC2,C1C11,C1C12,C2C11,C2C12,CTC11,CTC12,
-C1CT1,C1CT2,C2CT1,C2CT2,CTCT1,CTCT2
COMMON /DIC4/ APT1,BPT1,CPT1,DPT1,APT2,BPT2,CPT2,DPT2
COMMON /DIC5/ ZTS1,ZTR1,YT1,ZTS2,ZTR2,YT2
COMMON /DIC6/ CT1(650),CT2(650)

```

```
DATA PREC/0.00005/
```

```
JM=CMPLX(1.,0.)
```

```
AP1=CMPLX(1.,0.)
```

```
BP1=CMPLX(0.,0.)
```

```
CP1=CMPLX(0.,0.)
```

```
DP1=CMPLX(1.,0.)
```

```
AP2=AP1
```

```
BP2=BP1
```

```
CP2=CP1
```

```
DP2=DP1
```

```
C CALCULO ABCD EQUIVALENTE LADO 1 E LADO 2
```

```
NF1=2*N1-1
```

```
DO 10 I=1,NF1
```

```
AF0=AP1*A1(I)+BP1*C1(I)
```

```
BF0=AP1*B1(I)+BP1*D1(I)
```

```
CF0=CP1*A1(I)+DP1*C1(I)
```

```
DF0=CP1*B1(I)+DP1*D1(I)
```

```
AP1=AF0
```

```
BP1=BF0
```

```
CP1=CF0
```

```
DP1=DF0
```

```
IF(1.LE.2) GO TO 10
```

```
COMP=1./CABS(CP1)
```

```
IF(COMP.LE.PREC) GO TO 13
```

```
10 CONTINUE
```

```
13 NFC1=I
```

```
NF2=2*N2-1
```

```
DO 20 I=1,NF2
```

```
AF0=AP2*A2(I)+BP2*C2(I)
```

```
BF0=AP2*B2(I)+BP2*D2(I)
```

```
CF0=CP2*A2(I)+DP2*C2(I)
```

```
DF0=CP2*B2(I)+DP2*D2(I)
```

```
AP2=AF0
```

```
BP2=BF0
```

```
CP2=CF0
```

```
DP2=DF0
```

```
IF(1.LE.2) GO TO 20
```

```
COMP=1./CABS(CP2)
```

```
IF(COMP.LE.PREC) GO TO 23
```

```
20 CONTINUE
```

```
23 NFC2=I
```

```
C CALCULO DE CONTRIBUICOES DEVIDO ICC1
```

```
C QUADRIPOLO LADO 2
```

```
NT2=2*N2
```

```
APT2=AP2*A2(NT2)+BP2*C2(NT2)
```

```
BPT2=AP2*B2(NT2)+BP2*D2(NT2)
```

```
CPT2=CP2*A2(NT2)+DP2*C2(NT2)
```

```
DPT2=CP2*B2(NT2)+DP2*D2(NT2)
```

```
C CALCULO PTS ETS PARA ICC1
```

```
ZPI1=BP1
```

```
YPIS1=(DP1-JM)/BP1
```

```
YPIR1=(AP1-JM)/BP1
```

```
YT2=CPT2
```

```
ZTS2=(APT2-JM)/CPT2
```

```
ZTR2=(DPT2-JM)/CPT2
```

```
ZFQ=UM/(YPIR1+JM/RS1)
```

```
AUX1=PT*(JM/(ZPI1+ZFQ)+YPIS1)
```

```
AUX2=RT/(ZTS2+UM/YT2)
```

```
AUX3=ZFQ/(ZFQ+ZPI1)
```

```
CTC11=CC1*(JM-AUX3)/(UM+AUX1+AUX2)
```

```
C2C11=CTC11*AUX2
```

```
C1C11=CC1-CTC11-C2C11
```

```
C CALCULO DAS CORRENTES NOS DEMAIS RAMOS - DEVIDO ICC1
```

```
C CALL CALCCT(C1C11,C2C11,CTC11,JM,0.0)
```



```

C      CALCULO DE CONTRIBUICOES DEVIDO ICC2
C      QUADRIPOLO LADO 1
      NT1=2*N1
      APT1=A*1*A1(NT1)+BP1*C1(NT1)
      BPT1=A*1*B1(NT1)+BP1*D1(NT1)
      CPT1=C*1*A1(NT1)+DP1*C1(NT1)
      DPT1=C*1*B1(NT1)+DP1*D1(NT1)
C      CALCULO PIS E TS PARA ICC2
      ZPI2=BP2
      YPI2=(DP2-JM)/BP2
      YPIR2=(AP2-JM)/BP2
      YT1=CPT1
      ZTS1=(APT1-JM)/CPT1
      ZTR1=(DPT1-JM)/CPT1
      ZFQ=UM/(YPIR2+UM/RS2)
      AUX1=RT*(UM/(ZPI2+ZFQ)+YPI2)
      AUX2=RT/(ZTS1+UM/YT1)
      AUX3=ZFQ/(ZFQ+ZPI2)
      CTCI2=CC2*(JM-AUX3)/(UM+AUX1+AUX2)
      C1CI2=CTCI2*AUX2
      C2CI2=CC2-CTCI2-C1CI2
C
C      CALCULO DAS CORRENTES NOS DE MAIS RAMOS - DEVIDO ICC2
C      CALL CALCCT(C1CI2,C2CI2,CTCI2,JM,0,0)
C
C      IMPRESSOES INTERMEDIARIAS DOS ABCD EQUIVALENTES
C
      IF(ICH(2).EQ.0) GO TO 30
      WRITE(6,2010) APT1,BPT1,CPT1,DPT1
2010  FORMAT('1',3(/),10X,'ABCD EQUIVALENTE LADO 1',/,10X,'A= ',2E10.3,
-/,10X,'B= ',2E10.3,/,10X,'C= ',2E10.3,/,10X,'D= ',2E10.3)
      WRITE(6,2020) APT2,BPT2,CPT2,DPT2
2020  FORMAT('1',3(/),10X,'ABCD EQUIVALENTE LADO 2',/,10X,'A= ',2E10.3,/,10X,
- 'B= ',2E10.3,/,10X,'C= ',2E10.3,/,10X,'D= ',2E10.3)
C
C      IMPRESSAO INTERMEDIARIA OPCIONAL DAS CORRENTES PARA A TERRA
C      DEVIDAS APENAS AS FONTES DE CORRENTE
C
      30 IF(ICH(4).EQ.0) GO TO 50
      WRITE(6,2030)
2030  FORMAT('1',4X,'CORRENTES PARA A TERRA LADO 1 DEVIDAS APENAS AS FON
- TES DE CORRENTE(ORSOO VAO 1 ENCONTRA-SE VIZINHO A TORRE EM CURTO
- )',/,10X,'VAO',19X,'CORRENTE')
      DO 35 J=1,N1
      WRITE(6,2035) J,CT1(J)
2035  FORMAT('1',26X,13.8X,E13.7,5X,E13.7)
      35 CONTINUE
      WRITE(6,2040)
2040  FORMAT('1',4X,'CORRENTES PARA A TERRA LADO 2 DEVIDAS APENAS AS FON
- TES DE CORRENTE(ORSOO VAO 1 ENCONTRA-SE VIZINHO A TORRE EM CURTO
- )',/,10X,'VAO',19X,'CORRENTE')
      DO 40 J=1,N2
      WRITE(6,2035) J,CT2(J)
      40 CONTINUE
      50 RETURN
      END
C      SUBROUTINE DITEN
C      SUBROTINA PARA CALCULO DA DIVISAO POR MUTUAS
      COMPLEX AUX1,AUX2,AUX3,EE1,EE2,X1,X2,CT,AEQ,BEQ,CEQ,DEQ
      COMPLEX A1,B1,C1,D1,A2,B2,C2,D2
      COMPLEX APT1,BPT1,CPT1,DPT1,APT2,BPT2,CPT2,DPT2
      COMPLEX ZPR,ZRET,ZPRD1,ZRTD1,ZPRD2,ZRTD2,ZM,ZMD1,ZMD2,CC1,CC2,
- C1CI1,C1CI2,C2CI1,C2CI2,CTCI1,CTCI2,C1CT1,C2CT1,C1CT2,C2CT2,
- CTCT1,CTCT2
      COMPLEX ZPRD3,ZRTD3,ZPRD4,ZRTD4
      COMPLEX ZTS1,ZTR1,YT1,ZTS2,ZTR2,YT2
      COMPLEX JM,ZTSN1(650),ZTRN1(650),YT1(650),ZTSN2(650),
- ZTRN2(650),YT2(650),APP,BPP,CCP,DDP,AUX4
      COMPLEX*16 CT1,CT2
      COMMON /DIC1/ ZPR,ZRET,ZPRD1,ZRTD1,ZPRD2,ZRTD2,ZM,ZMD1,ZMD2,
- RS1,RS2,RAT,RD1,RD2,RT,ICH(5),N1,N2,NFC1,NFC2
      COMMON /DIC10/ ZPRD3,ZRTD3,ZPRD4,ZRTD4,RD3,RD4
      COMMON /DIC2/ A1(1300),B1(1300),C1(1300),D1(1300),
- A2(1300),B2(1300),C2(1300),D2(1300)
      COMMON /DIC3/ CC1,CC2,C1CI1,C1CI2,C2CI1,C2CI2,CTCI1,CTCI2,
- C1CT1,C1CT2,C2CT1,C2CT2,C1CT1,CTCT1,CTCT2
      COMMON /DIC4/ APT1,BPT1,CPT1,DPT1,APT2,BPT2,CPT2,DPT2
      COMMON /DIC5/ ZTS1,ZTR1,YT1,ZTS2,ZTR2,YT2
      COMMON /DIC6/ CT1(650),CT2(650)

```


FILE0 LDDIVCOR FORTRAN A VM/SP 3.1 *** CHESF ***

```

DATA PREC/0.00005/
C  INICIO DOS CALCULOS
  JM=CMPLX(1..0.)
  EE1=7MD1*CC1
  EE2=7MD2*CC2
C  CALCULOS PARA OS PRIMEIROS VADS-LADO 1 E 2
  AUX1=UM/(ZTS1+UM/YT1)
  AUX2=UM/(ZTS2+UM/YT2)
  CTCT1=-EE1*AUX1/(JM+RT*(AUX1+AUX2))
  CTCT2=-EE2*AUX2/(JM+RT*(AUX1+AUX2))
  C2CT1=CTCT1*RT*AUX2
  C1CT2=CTCT2*RT*AUX1
  C1CT1=-CTCT1-C2CT1
  C2CT2=-CTCT2-C1CT2
C
  CALL CALCCT(C1CT1,C2CT1,CTCT1,EE1,1,0)
C
  CALL CALCCT(C1CT2,C2CT2,CTCT2,EE2,0,1)
C
C  IMPRESSOES INTERMEDIARIAS
  IF(ICH(3).EQ.0) GO TO 10
  WRITE(6,2000) C1CT1,C2CT1,CTCT1
2000  FORMAT(141,/,/,6X,'IMPRESSOES DAS CONTRIBUICOES POR MUTUAS NO PRIME
  .IRO VAO DO LADO 1(DEVIDAS APENAS AS FONTES DE TENSAO)'
  ./,22X,'C1CT1',27X,'C2CT1',27X,'CTCT1',/,10X,3(E13.7,2X,E13.7,4X))
  10 CONTINUE
C  IMPRESSOES INTERMEDIARIAS
  IF(ICH(3).EQ.0) GO TO 60
  WRITE(6,2020) C1CT2,C2CT2,CTCT2
2020  FORMAT(10,/,/,6X,'IMPRESSOES DAS CONTRIBUICOES POR MUTUAS NO PRIME
  .IRO VAO DO LADO 2 (DEVIDAS APENAS AS FONTES DE TENSAO)'
  ./,22X,'C1CT2',27X,'C2CT2',27X,'CTCT2',/,10X,3(E13.7,2X,E13.7,4X))
  60 CONTINUE
C  CALCULO CONTRIBUICOES LADO 1
C  MONTAGEM DOS TS ACUMULADOS
  AEQ=CMPLX(1..0.)
  BEQ=CMPLX(0..0.)
  CEQ=CMPLX(0..0.)
  DEQ=CMPLX(1..0.)
  DO 11 I=1,N1
  III=2*I
  II=III-1
  DO 12 K=II,III
  APP=AEQ*A1(K)+BEQ*C1(K)
  BPP=AEQ*B1(K)+BEQ*D1(K)
  CPP=CEQ*A1(K)+DEQ*C1(K)
  DPP=CEQ*B1(K)+DEQ*D1(K)
  AEQ=APP
  BEQ=BPP
  CEQ=CPP
  DEQ=DPP
  12 ZTSN2(I)=(APP-UM)/CPP
  ZTRN2(I)=(DPP-UM)/CPP
  YTN2(I)=CPP
  COMP=1./CABS(CPP)
  IF(COMP.LE.PREC) GO TO 13
  11 CONTINUE
  GO TO 15
  13 IFP=1
  IX=IFP+1
  DO 14 I=IX,N1
  ZTSN2(I)=ZTSN2(IFP)
  ZTRN2(I)=ZTRN2(IFP)
  14 YTN2(I)=YTN2(IFP)
  15 CONTINUE
  AEQ=CMPLX(1..0.)
  BEQ=CMPLX(0..0.)
  CEQ=CMPLX(0..0.)
  DEQ=CMPLX(1..0.)
  DO 16 I=1,N1
  III=2*(N1-I+1)
  II=III-1
  DO 17 K=II,III
  <N=III-K+II
  APP=AEQ*A1(<N)+BEQ*C1(<N)
  BPP=AEQ*B1(<N)+BEQ*D1(<N)
  CPP=CEQ*A1(<N)+DEQ*C1(<N)
  DPP=CEQ*B1(<N)+DEQ*D1(<N)
  AEQ=APP

```


FILE0 LDDIVCOR FORTRAN A VM/SP 3.1 *** CHESF ***

```

      BEQ=BPP
      CEQ=CPP
17  DEQ=DPP
      ZTSN1(I)=(APP-JM)/CPP
      ZTRN1(I)=(DPP-UM)/CPP
      YTN1(I)=CPP
      COMP=1./CABS(CPP)
      IF(COMP.LE.PREC) GO TO 18
16  CONTINUE
      GO TO 19
18  IFP=I
      IX=IFP+1
      DO 20 I=IX,N1
      ZTSN1(I)=ZTSN1(IFP)
      ZTRN1(I)=ZTRN1(IFP)
20  YTN1(I)=YTN1(IFP)
19  CONTINUE
      IF(N1.EQ.1)GO TO 2121
      EE1=ZM*CC1
      NF=N1-1
      DO 21 I=1,NF
      J=NF-I+1
      AUX4=ZTRN2(I)+ZTRN1(J)+UM/YTN1(J)
      AUX2=UM/(ZTSN2(I)+AUX4/(UM+YTN2(I)*AUX4))
      AUX1=AUX2/(JM+AUX4*YTN2(I))
      AUX3=RT/(ZTS2+UM/YT2)
      CT=-EE1*AUX1/(UM+AUX3+RT*AUX2)
      X2=CT*AUX3
      X1=-CT-X2
C
      M=I+1
      CALL CALCCT (X1,X2,CT,EE1,M,0)
C
      CTCT1=CTCT1+CT
      C1CT1=C1CT1+X1
      C2CT1=C2CT1+X2
21  CONTINUE
2121 CONTINUE
C
C      CALCULO CONTRIBUCOES LADO 2
C      MONTAGEM DOS TS ACUMULADOS
      AEO=CMPLX(1.,0.)
      BEQ=CMPLX(0.,0.)
      CEQ=CMPLX(0.,0.)
      DEQ=CMPLX(1.,0.)
      DO 61 I=1,N2
      III=2*I
      II=III-1
      DO 62 K=II,III
      APP=AEO*A2(K)+BEQ*C2(K)
      BPP=AEO*B2(K)+BEQ*D2(K)
      CPP=CEQ*A2(K)+DEQ*C2(K)
      DPP=CEQ*B2(K)+DEQ*D2(K)
      AEO=APP
      BEQ=BPP
      CEQ=CPP
      DEQ=DPP
62  CONTINUE
      ZTSN2(I)=(APP-UM)/CPP
      ZTRN2(I)=(DPP-UM)/CPP
      YTN2(I)=CPP
      COMP=1./CABS(CPP)
      IF(COMP.LE.PREC) GO TO 63
61  CONTINUE
      GO TO 65
63  IFP=I
      IX=IFP+1
      DO 64 I=IX,N2
      ZTSN2(I)=ZTSN2(IFP)
      ZTRN2(I)=ZTRN2(IFP)
      YTN2(I)=YTN2(IFP)
64  CONTINUE
65  CONTINUE
      AEO=CMPLX(1.,0.)
      BEQ=CMPLX(0.,0.)
      CEQ=CMPLX(0.,0.)
      DEQ=CMPLX(1.,0.)
      DO 66 I=1,N2
      III=2*(N2-I+1)
      II=III-1

```



```

      DO 67 K=II,III
      KN=III-K+II
      APP=AEQ*42(KN)+BEQ*C2(KN)
      BPP=AEQ*32(KN)+BEQ*D2(KN)
      CPP=CEQ*42(KN)+DEQ*C2(KN)
      DPP=CEQ*32(KN)+DEQ*D2(KN)
      AEQ=APP
      BEQ=BPP
      CEQ=CPP
      DEQ=DPP
67  CONTINUE
      ZTSN1(I)=(APP-UM)/CPP
      ZTRN1(I)=(DPP-UM)/CPP
      YTN1(I)=CPP
      COMP=1./CABS(CPP)
      IF (COMP.LE.PREC) GO TO 68.
66  CONTINUE
      GO TO 69
68  IFP=I
      IX=IFP+1
      DO 70 I=IX,N2
      ZTSN1(I)=ZTSN1(IFP)
      ZTRN1(I)=ZTRN1(IFP)
      YTN1(I)=YTN1(IFP)
70  CONTINUE
69  CONTINUE
      IF (N2.EQ.1) GO TO 7171
      FE2=ZM*CC2
      NF=N2-1
      DO 71 I=1,NF
      J=NF-I+1
      AUX4=ZTRN2(I)+ZTRN1(J)+UM/YTN1(J)
      AUX2=UM/(ZTSN2(I)+AUX4/(UM+YTN2(I)*AJX4))
      AUX1=AJX2/(JM+AUX4*YTN2(I))
      AUX3=RT/(ZTS1+UM/YT1)
      CT=-FE2*AUX1/(UM+AUX3+RT*AUX2)
      X1=CT*AUX3
      X2=-CT-X1
C
      M=I+1
      CALL CALCCT (X1,X2,CT,FE2,0,M)
C
      CTCT2=CTCT2+CT
      C1CT2=C1CT2+X1
      C2CT2=C2CT2+X2
71  CONTINUE
7171 CONTINUE
      RETURN
      END
      SUBROUTINE CALCCT(C1C,C2C,CTC,EE,M1,M2)
C
C  CALCULA AS CORRENTES PARA TERRA EM TODAS AS TORRES E NAS
C  SE'S TERMINAIS
C
      COMPLEX ZPR,ZRET,ZPRD1,ZRTD1,ZPRD2,ZRTD2,ZM,ZMD1,ZMD2
      COMPLEX ZPRD3,ZRTD3,ZPRD4,ZRTD4
      COMPLEX A1,B1,C1,D1,A2,B2,C2,D2
      COMPLEX*16 CT1,CT2
      COMPLEX VT,V1,CC1,V2,CC2,EE
      COMPLEX C1C,C2C,CTC
C
      COMMON /DIC1/ ZPR,ZRET,ZPRD1,ZRTD1,ZPRD2,ZRTD2,ZM,ZMD1,ZMD2,
1      RS1,RS2,RAT,RD1,RD2,RT,ICH(5),N1,N2,NFC1,NFC2
      COMMON /DIC10/ ZPRD3,ZRTD3,ZPRD4,ZRTD4,RD3,RD4
      COMMON /DIC2/ A1(1300),B1(1300),C1(1300),D1(1300),A2(1300),
1      B2(1300),C2(1300),D2(1300)
      COMMON /DIC6/ CT1(650),CT2(650)
C
      VT=CTC*RT
C
C  LADO 1
C
      V1=VT
      CC1=C1C
      MM1=2*M1-1
      NF1=2*N1-1
      DO 30 J=1,NF1
      A=J
      JT=A/2
      AJT=A/2-JT

```



```

V2=D1(J)*V1-B1(J)*CC1
CC2=-C1(J)*V1+A1(J)*CC1
IF(AJT.NE.0.) GO TO 20
IF(J.EQ.2)GO TO 10
IF(J.EQ.4)GO TO 15
CT1(JT)=V2/RAT+CT1(JT)
GO TO 20
10 CT1(JT)=V2/RD1+CT1(JT)
GO TO 20
15 CT1(JT)=V2/RD3+CT1(JT)
20 V1=V2
IF(J.EQ.MM1)V1=V1+EF
CC1=CC2
30 CONTINUE
CT1(N1)=V1/RS1+CT1(N1)

```

C
C
C

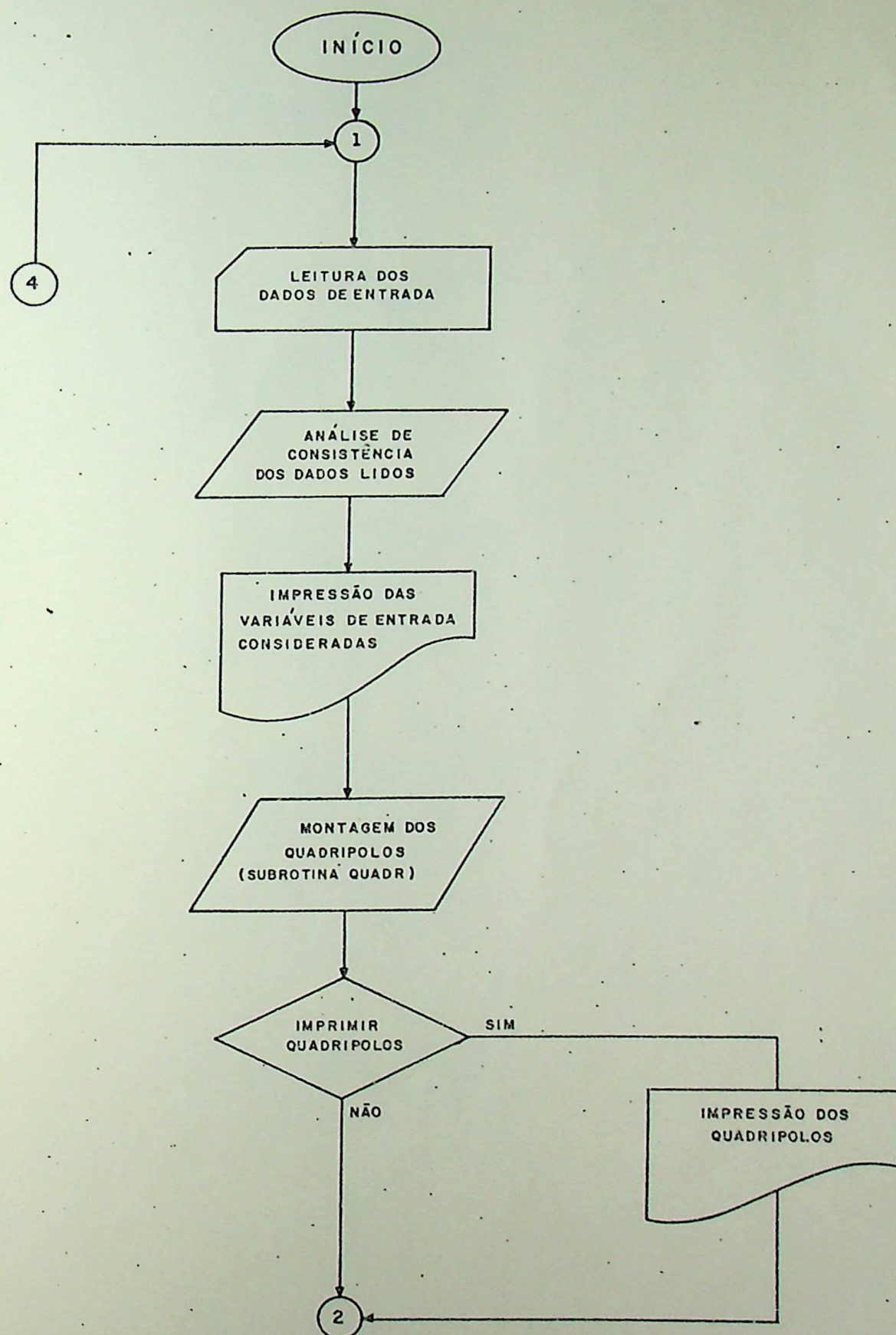
-ADD 2

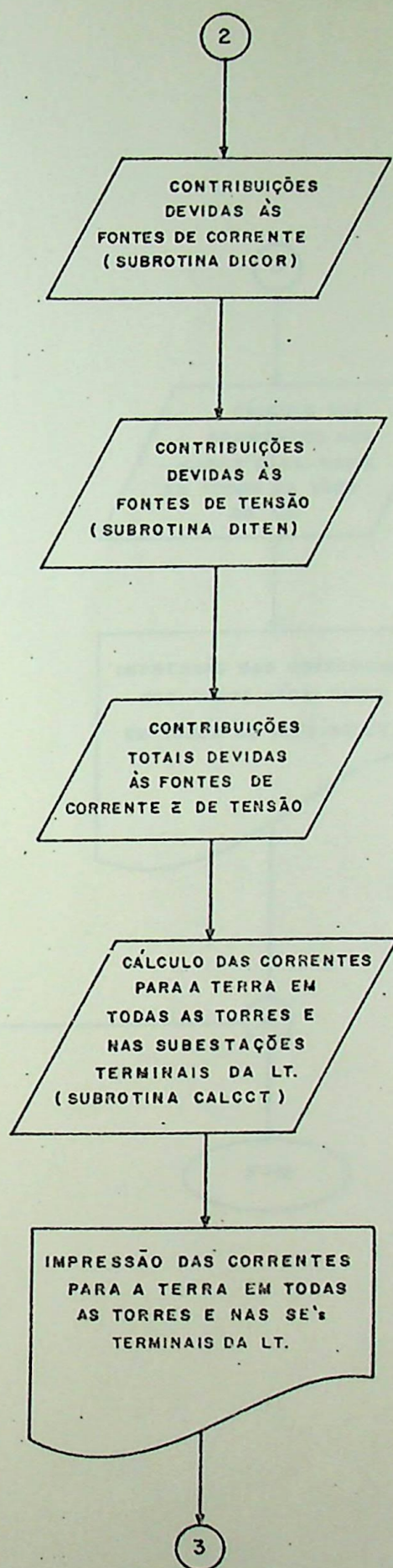
```

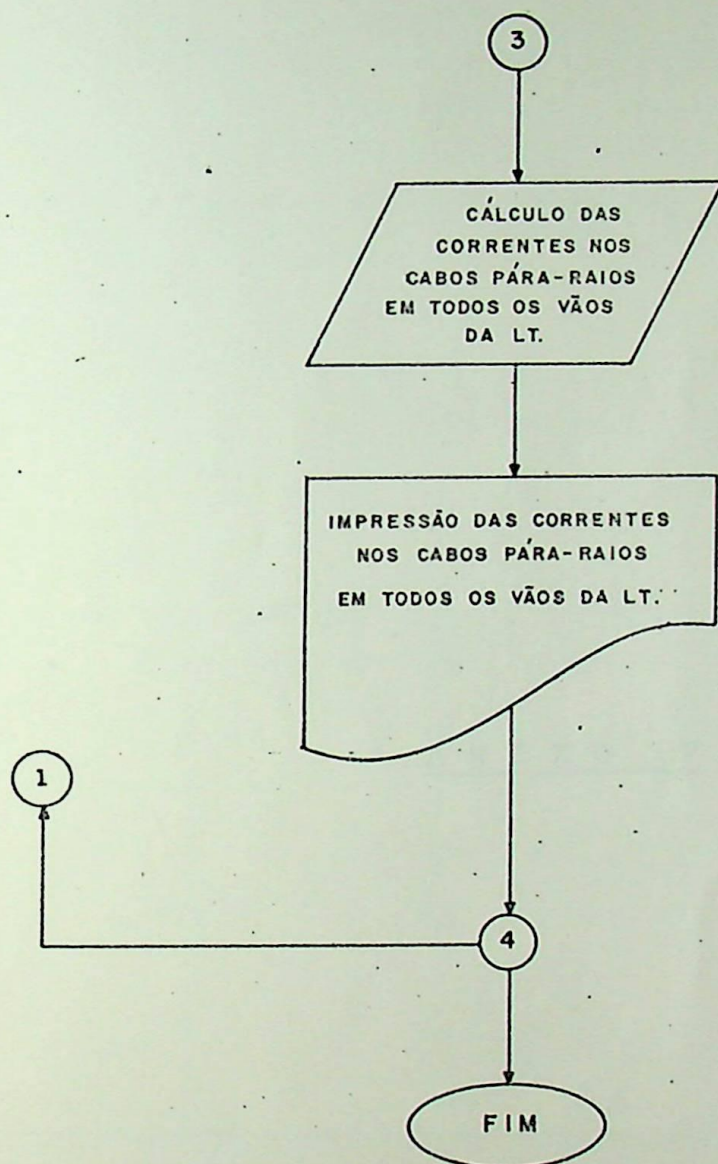
V1=VT
CC1=C2C
MM2=2*MM2-1
NF2=2*NF2-1
DO 60 J=1,NF2
A=J
JT=A/2
AJT=A/2-JT
V2=D2(J)*V1-B2(J)*CC1
CC2=-C2(J)*V1+A2(J)*CC1
IF(AJT.NE.0.) GO TO 50
IF(J.EQ.2)GO TO 40
IF(J.EQ.4)GO TO 45
CT2(JT)=V2/RAT+CT2(JT)
GO TO 50
40 CT2(JT)=V2/RD2+CT2(JT)
GO TO 50
45 CT2(JT)=V2/RD4+CT2(JT)
50 V1=V2
IF(J.EQ.MM2)V1=V1+EF
CC1=CC2
60 CONTINUE
CT2(N2)=V1/RS2+CT2(N2)
RETURN
END

```


IV.11) Fluxograma simplificado do programa







A N E X O . V

INFLUÊNCIA DE PONTOS DE ATERRAMENTO NA TUBULAÇÃO METÁLICA

V.1) Relativamente à Indução Eletrostática na tubulação

Considere-se uma linha de transmissão que esteja operando em regime permanente e próxima a uma tubulação. Observa-se pela figura seguinte os diversos acoplamentos capacitivos existentes entre os cabos condutores da LT, a tubulação e o solo.

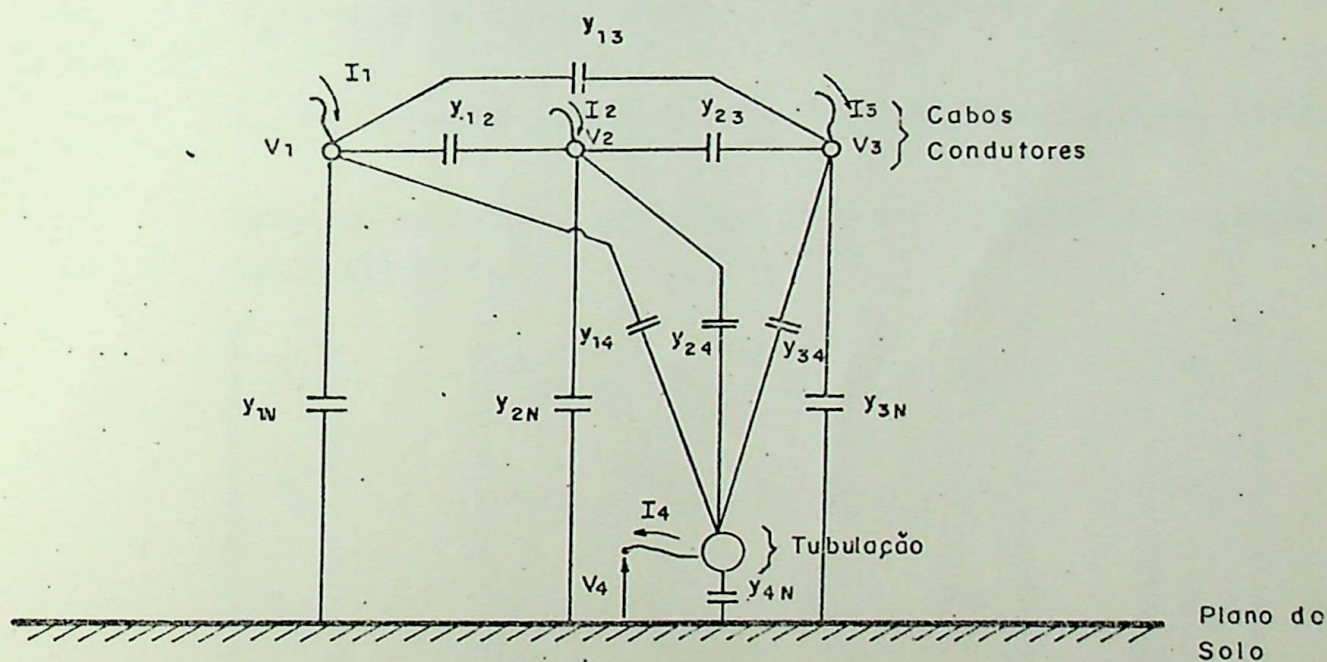


Figura V.1

Nesta figura tem-se:

V_1, V_2, V_3 - tensões eficazes fase-neutro (V)

y_{12}, y_{13}, y_{23} - admitâncias mútuas entre fases da LT ($\mathcal{U}/m$)

y_{14}, y_{24}, y_{34} - admitâncias mútuas entre LT e tubulação ($\mathcal{U}/m$)

y_{1N}, y_{2N}, y_{3N} - admitâncias da LT para terra ($\mathcal{U}/m$)

y_{4N} - admitância da tubulação para a terra ($\mathcal{U}/m$)

I_1, I_2, I_3 - correntes capacitivas associadas à LT (A/m)

V_4 - tensão entre tubulação e solo (V)

I_4 - corrente capacitiva associada à tubulação (A/m)

Este modelo pode ser representado através da equação matricial seguinte:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & Y_{24} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & Y_{34} \\ Y_{41} & Y_{42} & Y_{43} & Y_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. V.1})$$

onde na matriz $[Y]$:

Y_{ii} - soma de todas as admitâncias conectadas ao nó i

Y_{ij} - negativo da admitância que interliga os nós i e j

O circuito equivalente de Thévenin é:

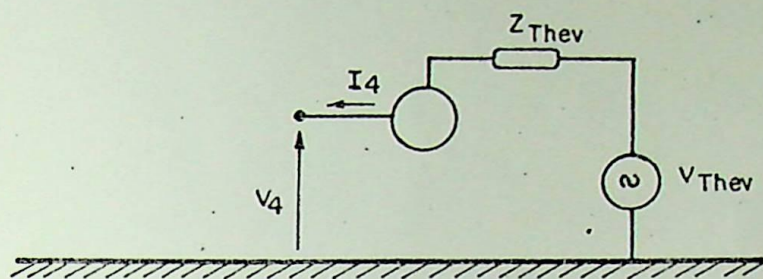


Figura V.2

A equação V.1 pode ser representada simbolicamente por:

$$\begin{bmatrix} \frac{I_A}{I_4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{AA} & Y_{A4} \\ Y_{4A} & Y_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{V_A}{V_4} \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. V.2})$$

Neste circuito equivalente a Impedância da Thévenin é dada por:

$$Z_{\text{Thev}} = \frac{1}{Y_{\text{Thev}}} = \frac{1}{Y_{44}} = \frac{1}{y_{4N} + y_{14} + y_{24} + y_{34}} \quad (\text{Eq. V.3})$$

A Tensão de Thévenin V_{Thev} é igual à tensão V_4 quando $I_4 = 0$ (circuito aberto). Assim:

$$0 = \begin{bmatrix} Y_{4A} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_A \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Y_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{Thev} \end{bmatrix}$$

$$\therefore 0 = \begin{bmatrix} Y_{4A} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_A \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Y_{Thev} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{Thev} \end{bmatrix}$$

$$\therefore \begin{bmatrix} V_{Thev} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} Y_{Thev} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} Y_{4A} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_A \end{bmatrix}$$

$$\therefore \begin{bmatrix} V_{Thev} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} Z_{Thev} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_{4A} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_A \end{bmatrix}$$

$$\therefore \begin{bmatrix} V_{Thev} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} Z_{Thev} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_{41} & Y_{42} & Y_{43} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix}$$

$$\therefore V_{Thev} = Z_{Thev} (y_{41} V_1 + y_{42} V_2 + y_{43} V_3) \quad (\text{Eq. V.4})$$

Assim, para a tubulação não aterrada, tem-se:

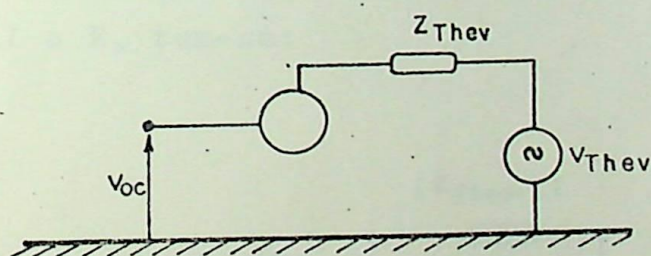


Figura V.3

$$V_{oc} = V_{Thev} = Z_{Thev} (y_{41} V_1 + y_{42} V_2 + y_{43} V_3) \quad (\text{Eq. V.5})$$

sendo:

V_{oc} - tensão de circuito aberto (V)

Se a tubulação for curto-circuitada para a terra, tem-se:

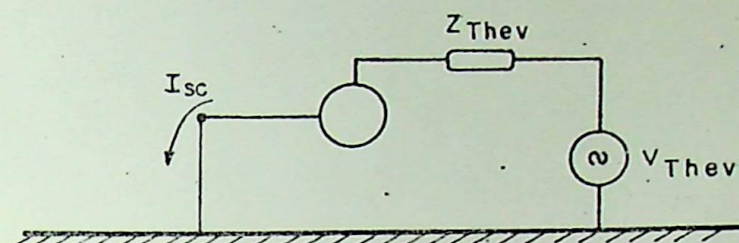


Figura V.4

$$I_{sc} = \frac{V_{Thev}}{Z_{Thev}} = y_{41} V_1 + y_{42} V_2 + y_{43} V_3 \quad (\text{Eq. V.6})$$

sendo:

I_{sc} - corrente de curto-circuito para a terra (A/m)

Se a tubulação for aterrada através de uma resistência de valor igual a R , tem-se:

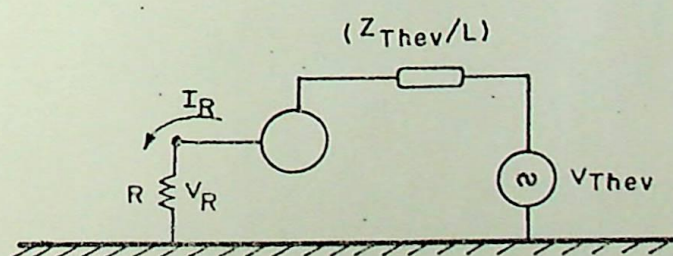


Figura V.5

$$V_R = V_{Thev} \frac{R}{R + (Z_{Thev}/L)} \quad (\text{Eq. V.7})$$

$$I_R = \frac{V_{Thev}}{R + (Z_{Thev}/L)} \quad (\text{Eq. V.8})$$

sendo:

L - comprimento de paralelismo entre LT e tubulação (m)

Como tipicamente $R \ll (Z_{\text{Thev}}/L)$, costuma-se considerar que a presença de um ponto de aterramento qualquer é suficiente para eliminar o efeito eletrostático pois isto proporciona $V_R \ll V_{\text{oc}}$.

Desta forma considera-se desnecessário analisar a Indução Eletrostática para tramos de tubulação que estejam de alguma forma aterrados (Ex: tubulações enterradas nuas ou revestidas, e tubulações aéreas aterradas em qualquer ponto).

V.2) Relativamente à Indução Eletromagnética na tubulação.

1º caso:

Considere-se a tubulação metálica da figura seguinte, a qual é submetida a uma indução eletromagnética e está aterrada nas duas extremidades.

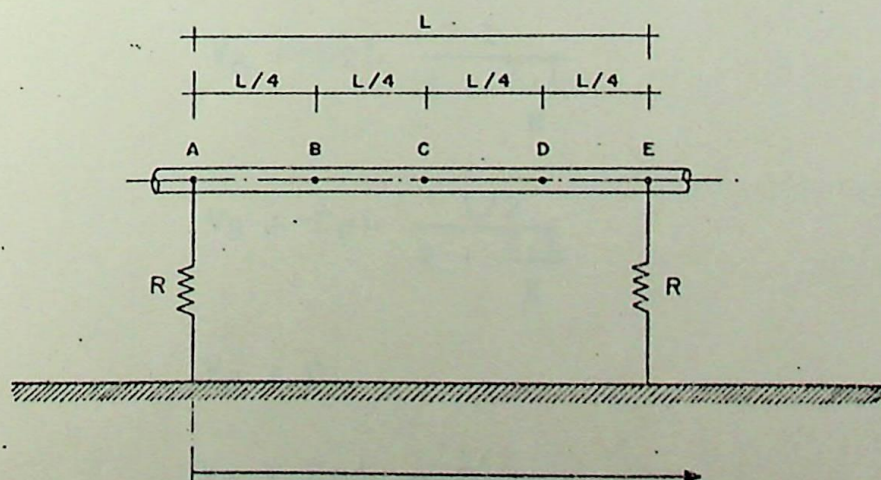


Figura V.6

A tensão elétrica entre tubulação e solo num ponto qual quer ao longo do comprimento da tubulação é dada por:

$$V(x) = - E_0 (L - 2x) \frac{R}{2R + Z \cdot L} \quad \text{volts (Eq. V.9)}$$

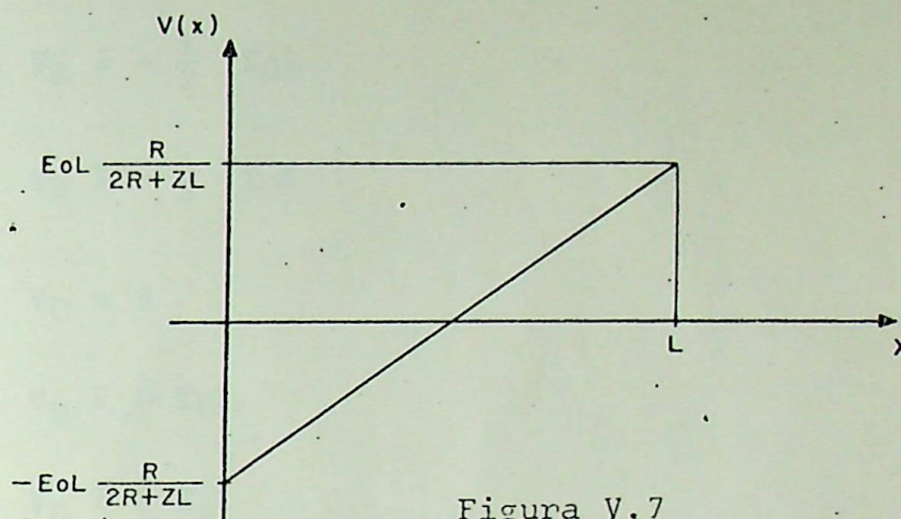


Figura V.7

sendo: E_0 - tensão média induzida eletromagneticamente por unidade de comprimento (V/m)

L - comprimento total da tubulação (m)

R - resistência de aterramento (Ω)

Z - impedância linear própria da tubulação (Ω/m)

x - distância do ponto A ao ponto onde deseja-se calcular a tensão (m)

As tensões elétricas entre tubulação e solo nos pontos A, B, C, D e E resultam em:

$$V_A = -E_0 L \frac{1}{2 + \frac{Z \cdot L}{R}}$$

$$V_B = -E_0 L \frac{1/2}{2 + \frac{Z \cdot L}{R}}$$

$$V_C = 0$$

$$V_D = E_0 L \frac{1/2}{2 + \frac{Z \cdot L}{R}}$$

$$V_E = E_0 L \frac{1}{2 + \frac{Z \cdot L}{R}}$$

como tipicamente:

$$Z \cdot L \ll R$$

$$\text{então: } V_A \approx -\frac{1}{2} E_0 L$$

$$V_B \approx -\frac{1}{4} E_0 L$$

$$V_C = 0$$

$$V_D \approx \frac{1}{4} E_0 L$$

$$V_E \approx \frac{1}{2} E_0 L$$

2º caso:

Considere-se, agora, que a tubulação metálica seja aterrada também nos pontos B, C e D, conforme a figura seguinte:

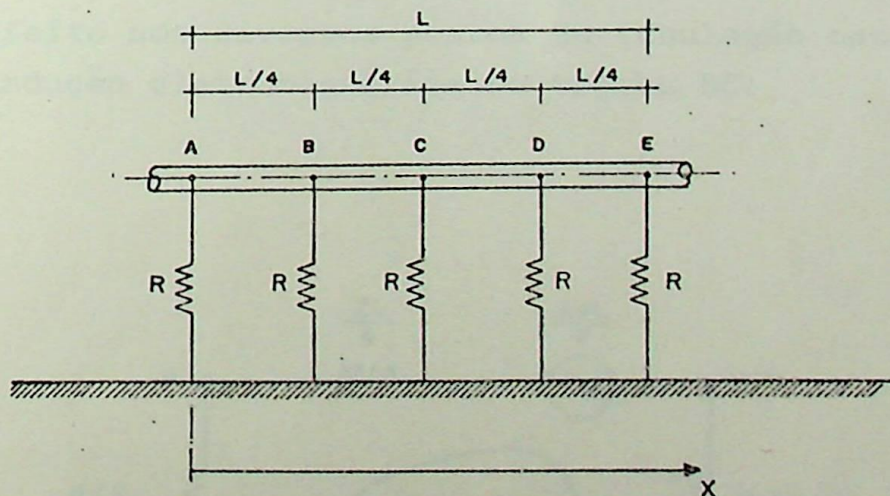


Figura V.8

Aplicando o Teorema da Superposição tem-se:

- efeito nos diversos pontos da tubulação causado pela indução eletromagnética no trecho AB:

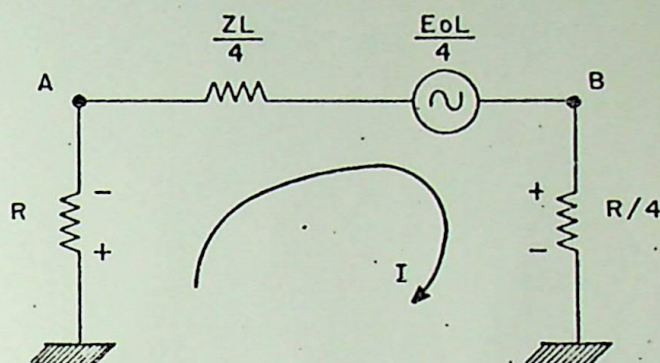


Figura V.9

$$V_A = - \frac{E_0 L}{4} \cdot \frac{R}{\frac{5R}{4} + \frac{Z \cdot L}{4}}$$

$$V_B = V_C = V_D = V_E = \frac{E_0 L}{4} \cdot \frac{R/4}{\frac{5R}{4} + \frac{ZL}{4}}$$

- efeito nos diversos pontos da tubulação causado pela indução eletromagnética no trecho BC:

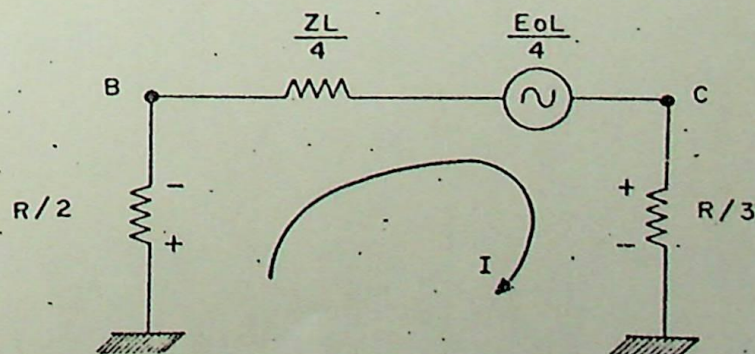


Figura V.10

$$V_A = V_B = -\frac{E_0 L}{4} \frac{\frac{R/2}{\frac{5R}{6} + \frac{Z \cdot L}{4}}}$$

$$V_C = V_D = V_E = \frac{E_0 L}{4} \frac{\frac{R/3}{\frac{5R}{6} + \frac{Z \cdot L}{4}}}$$

- efeito nos diversos pontos da tubulação causado pela indução eletromagnética no trecho CD:

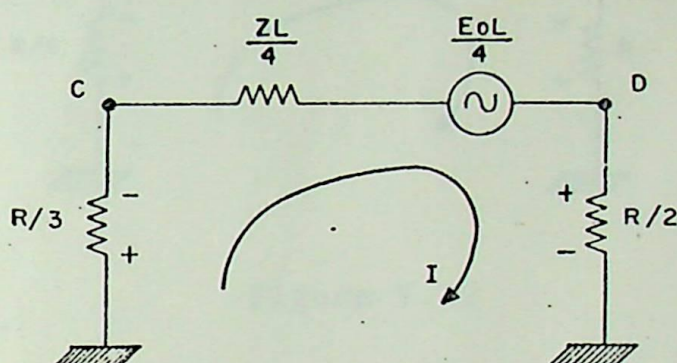


Figura V.11

$$V_A = V_B = V_C = -\frac{E_0 L}{4} \frac{\frac{R/3}{\frac{5R}{6} + \frac{ZL}{4}}}$$

$$V_D = V_E = \frac{E_0 L}{4} \frac{\frac{R/2}{\frac{5R}{6} + \frac{ZL}{4}}}$$

- efeito nos diversos pontos da tubulação causado pela indução eletromagnética no trecho DE:

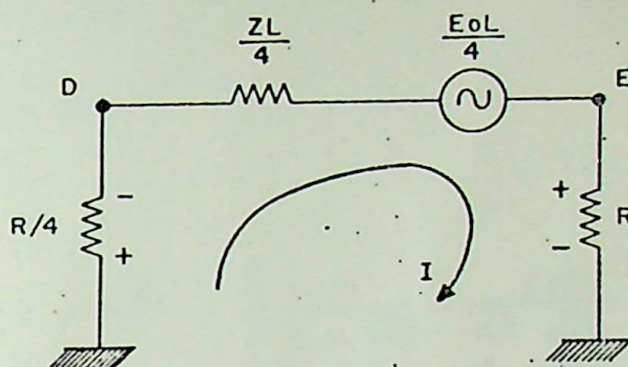


Figura V.12

$$V_A = V_B = V_C = V_D = - \frac{E_0 L}{4} \cdot \frac{R/4}{\frac{5R}{4} + \frac{ZL}{4}}$$

$$V_E = \frac{E_0 L}{4} \cdot \frac{R}{\frac{5R}{4} + \frac{ZL}{4}}$$

Fazendo a superposição dos efeitos tem-se:

$$V_A = \Sigma V_A$$

$$V_B = \Sigma V_B$$

$$V_C = \Sigma V_C$$

$$V_D = \Sigma V_D$$

$$V_E = \Sigma V_E$$

Logo:

$$V_A = - \frac{E_0 L}{4} \left[\frac{5}{5 + \frac{ZL}{R}} + \frac{20/6}{\frac{20}{6} + \frac{ZL}{R}} \right]$$

$$V_B = - \frac{E_0 L}{4} \left[\frac{20/6}{\frac{20}{6} + \frac{ZL}{R}} \right]$$

$$V_C = 0$$

$$V_D = \frac{E_0 L}{4} \left[\frac{20/6}{\frac{20}{6} + \frac{ZL}{R}} \right]$$

$$V_E = \frac{E_0 L}{4} \left[\frac{5}{5 + \frac{ZL}{R}} + \frac{20/6}{\frac{20}{6} + \frac{ZL}{R}} \right]$$

A N E X O . VII

Tipicamente $Z.L \ll R$, assim :

$$V_A \approx - \frac{E_0 L}{2}$$

$$V_B \approx - \frac{E_0 L}{4}$$

$$V_C \approx 0$$

$$V_D \approx \frac{E_0 L}{4}$$

$$V_E \approx \frac{E_0 L}{2}$$

Comparando os valores de V_A , V_B , V_C , V_D e V_E , encontrados no 1º e no 2º caso, observa-se que os aterramentos adicionais são ineficazes.

Conclui-se, daí, que os aterramentos só serão eficazes se $R \ll Z.L$ ou se os pontos de terra forem muito próximos.

3º caso:

Considere-se a tubulação da figura seguinte:

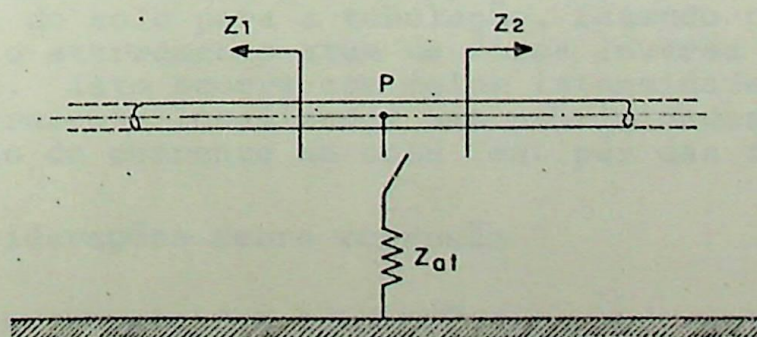


Figura V.13.

onde: Z_1 e Z_2 - são as impedâncias para a terra vistas do ponto P nos sentidos 1 e 2 (ohms)

Z_{at} - Impedância de aterramento (ohms)

A aplicação do Teorema de Thévenin, leva a:

$$V^+ = V^- \frac{Z_{at}}{Z_{at} + \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2}} \quad (\text{Eq. V.10})$$

onde:

V^+ - tensão após o aterramento (volts)

V^- - tensão antes do aterramento (volts)

Conclui-se daí que:

Caso $(Z_1 Z_2)/(Z_1 + Z_2) \ll Z_{at}$, o aterramento será ineficaz pois resulta $V^+ \approx V^-$.

A tabela 5.8 apresentada no item 5.3 possui uma coluna denominada "impedância equivalente no ponto" a qual foi incluída com o objetivo de, ao indicar o valor de $(Z_1 Z_2)/(Z_1 + Z_2)$, dar uma idéia do valor que Z_{at} precisaria ter para que um eventual aterramento feito em qualquer ponto fosse eficaz.

V.3) Relativamente à Transferência de Potencial do solo para a tubulação.

Os pontos de aterramento permitem transferência de potencial do solo para a tubulação, fazendo com que muitas vezes o aterramento atue de forma inversa à da sua finalidade. Isto ocorre com maior intensidade para pontos de aterramento localizados nas proximidades de pontos de injeção de corrente no solo (ex: pés das torres da LT).

V.4) Considerações sobre corrosão

O aterramento das tubulações requer certos cuidados especiais que visam evitar a corrosão das mesmas nos pontos onde houver aterramentos. São muitas vezes utilizados ânodos de magnésio com esta finalidade. Isto torna os aterramentos bastantes caros.

SOBRE AS TENSÕES DE TOQUE E DE PASSO

VI.1) Tensão de Toque (V_t)

É a diferença de potencial que aparece entre um ponto de uma estrutura metálica situado ao alcance da mão de uma pessoa e um ponto no solo situado a 1 metro de distância da base da estrutura considerada, devido à passagem da corrente de falta pela terra (52).

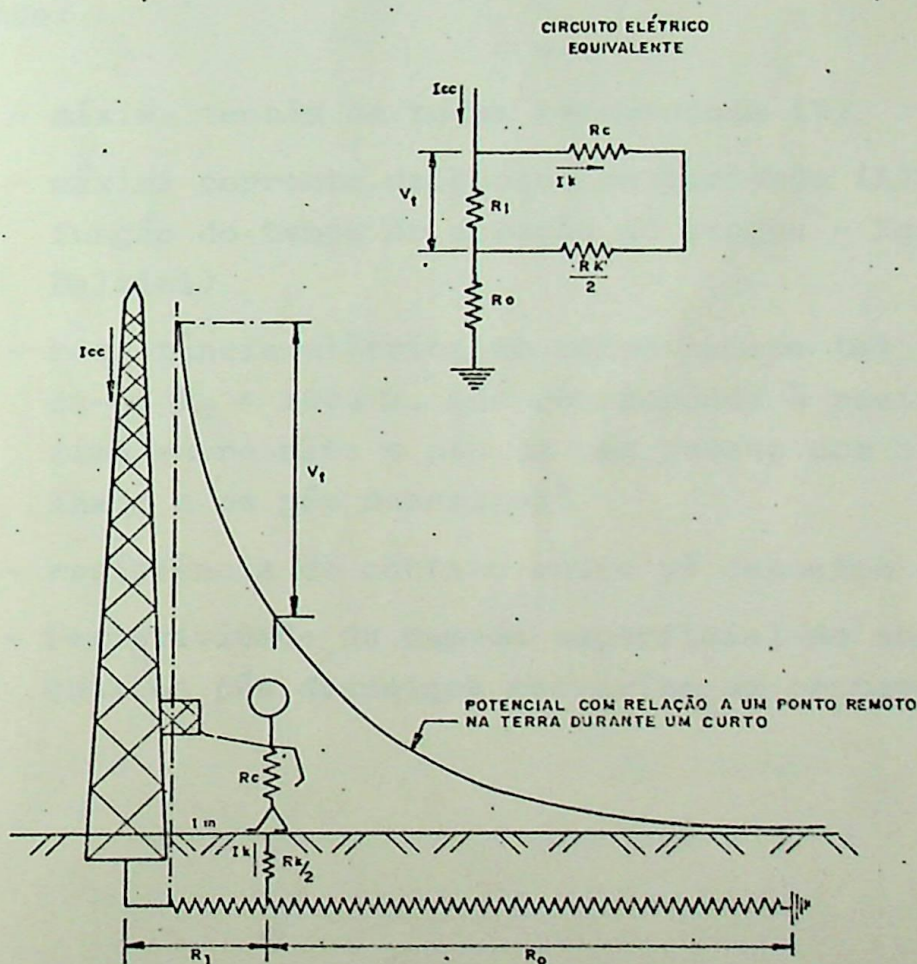


Figura VI.1

Será considerado neste trabalho que a tensão de toque à qual uma pessoa poderá ficar submetida ao entrar em contato com uma tubulação aérea é a diferença de potencial entre tubulação e solo no ponto de contato.

Tem-se que (52):

$$V_t = \left[R_c + \frac{R_k}{2} \right] I_k \quad (\text{Eq. VI.1})$$

$$\therefore V_t = \left[R_c + \frac{3\rho_s}{2} \right] I_k \quad (\text{Eq. VI.2})$$

sendo:

V_t - máxima tensão de toque recomendada (V)

I_k - máxima corrente de choque recomendada (A) (a qual é função do tempo de duração do choque - Equação de Dalziel)

R_c - resistência elétrica do corpo humano (Ω) (recomenda-se $R_c = 1000 \Omega$, que corresponde à resistência mínima entre mãos e pés de uma pessoa com o corpo molhado e os pés descalços)

R_k - resistência de contato entre pé descalço e o solo (Ω)

ρ_s - resistividade da camada superficial do solo com a qual os pés descalços entrariam em contato ($\Omega.m$)

VI.2) Tensão de Passo (V_p)

É a diferença de potencial que aparece entre dois pontos situados no solo distanciados de 1 metro, devido à passagem da corrente de falta pela terra.

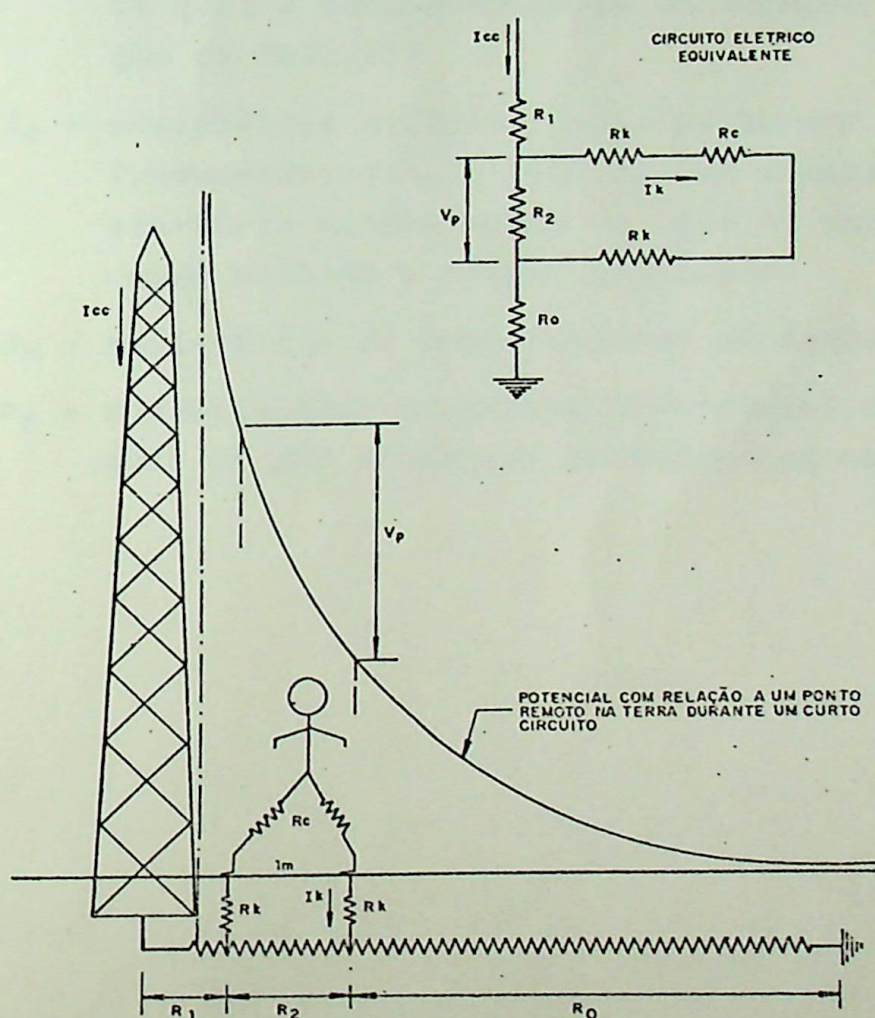


Figura VI.2

Tem-se que (52):

$$V_p = [R_c + 2 R_k] I_k \quad (\text{Eq. VI.3})$$

$$\therefore V_p = [R_c + 2 \times 3\rho_s] I_k \quad (\text{Eq. VI.4})$$

sendo:

V_p - máxima tensão de passo recomendada (V)

I_k - máxima corrente de choque recomendada (A)

(a qual é função do tempo de duração do choque -Equação de Dalziel)

R_c - resistência elétrica do corpo humano (Ω)

(recomenda-se $R_c = 1000 \Omega$, que admitir-se-á ser a resistência mínima entre os pés de uma pessoa com o corpo molhado e os pés descalços)

R_k - resistência de contato entre pé descalço e o solo (Ω)

ρ_s - resistividade da camada superficial do solo com a qual os pés descalços entrariam em contato ($\Omega.m$)

A N E X O VI

DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DO CABO PÁRA-RAIOS EQUIVALENTE

Quando a LT tiver dois ou mais cabos pára-raios, o método apresentado exige que estes cabos pára-raios sejam reduzidos a um único cabo pára-raios equivalente aos originais.

Desta forma, é necessário que, inicialmente, seja montada a matriz de impedância série relativa à fase defeituosa e aos cabos pára-raios por onde se fará o retorno da corrente de curto.

Assim, supondo um curto-circuito na fase A, tem-se:

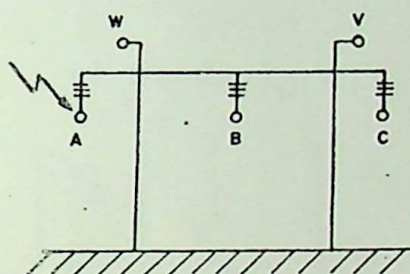


Figura VII.1

$$[Z] = [R] + j\omega [L]$$

Ou seja:

$$\begin{bmatrix} Z_{AA} & Z_{AW} & Z_{AV} \\ Z_{WA} & Z_{WW} & Z_{WV} \\ Z_{VA} & Z_{VW} & Z_{VV} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{AA} & R_{AW} & R_{AV} \\ R_{WA} & R_{WW} & R_{WV} \\ R_{VA} & R_{VW} & R_{VV} \end{bmatrix} + j\omega \begin{bmatrix} L_{AA} & L_{AW} & L_{AV} \\ L_{WA} & L_{WW} & L_{WV} \\ L_{VA} & L_{VW} & L_{VV} \end{bmatrix}$$

Sabe-se que a matriz de quedas de tensão relativa ao conjunto dos cabos analisados considerando apenas o efeito eletromagnético será:

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_W \\ V_V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{AA} & Z_{AW} & Z_{AV} \\ Z_{WA} & Z_{WW} & Z_{WV} \\ Z_{VA} & Z_{VW} & Z_{VV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_W \\ I_V \end{bmatrix}$$

A partir daí, constrói-se a equação matricial que representa o cabo pára-raios equivalente.

Assim:

a) Sendo $V_W = V_V$ faz-se:

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_W \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{AA} & Z_{AW} & Z_{AV} \\ Z_{WA} & Z_{WW} & Z_{WV} \\ (Z_{VA} - Z_{WA}) & (Z_{VW} - Z_{WW}) & (Z_{VV} - Z_{WV}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_W \\ I_V \end{bmatrix}$$

b) Como a corrente no cabo pára-raios equivalente é igual a $(I_W + I_V)$ faz-se:

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_W \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{AA} & Z_{AW} & (Z_{AV} - Z_{AW}) \\ Z_{WA} & Z_{WW} & (Z_{WV} - Z_{WW}) \\ (Z_{VA} - Z_{WA}) & (Z_{VW} - Z_{WW}) & (Z_{VV} - 2Z_{WV} + Z_{WW}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_W + I_V \\ I_V \end{bmatrix}$$

Após isto aplica-se uma Redução de Kron na matriz $[Z]$ de modo a eliminar a 3ª linha e a 3ª coluna da mesma e obtém-se a matriz reduzida $[Z_{red}]$, cujos elementos valem:

$$Z_{red}(1,1) = Z_{AA} - \frac{(Z_{AV} - Z_{AW})(Z_{VA} - Z_{WA})}{(Z_{VV} - 2Z_{WV} + Z_{WW})}$$

$$Z_{red}(1,2) = Z_{AW} - \frac{(Z_{AV} - Z_{AW})(Z_{VW} - Z_{WW})}{(Z_{VV} - 2Z_{WV} + Z_{WW})}$$

$$Z_{red}(2,1) = Z_{WA} - \frac{(Z_{WV} - Z_{WW})(Z_{VA} - Z_{WA})}{(Z_{VV} - 2Z_{WV} + Z_{WW})}$$

$$Z_{red}(2,2) = Z_{WW} - \frac{(Z_{WV} - Z_{WW})(Z_{VW} - Z_{WW})}{(Z_{VV} - 2Z_{WV} + Z_{WW})}$$

Observe-se que o elemento (2,2) da matriz $[Z_{red}]$ representa a impedância própria do cabo pára-raios equivalente aos originais.

Observe-se, ainda, que o elemento (1,2), ou o elemento (2,1), representa a impedância mútua entre a fase defeituosa e o cabo pára-raios equivalente.

Estas informações são necessárias durante a preparação dos dados de entrada do programa computacional desenvolvido (vide item IV.5 do Anexo IV).