

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

INTERFERÊNCIAS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO
DE CORRENTE ALTERNADA EM TUBULAÇÕES METÁLICAS

JOÃO VARELA EDUARDO

Campina Grande

ABRIL - 1993

INTERFERÊNCIAS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO
DE CORRENTE ALTERNADA EM TUBULAÇÕES METÁLICAS

JOÃO VARELA EDUARDO

INTERFERÊNCIAS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO
DE CORRENTE ALTERNADA EM TUBULAÇÕES METÁLICAS

Dissertação apresentada ao Curso de MESTRADO
EM ENGENHARIA ELÉTRICA da Universidade
Federal da Paraíba, em cumprimento às
exigências para a obtenção do Grau de Mestre.

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PROCESSAMENTO DA ENERGIA

JOSÉ RAFAEL DACONTI

Orientador

SREERAMULU RAGHURAM NAIDU

Orientador

Campina Grande

ABRIL - 1993



E24i Eduardo, João Varela.
Interferências de linhas de transmissão de corrente alternada em tubulações metálicas / João Varela Eduardo. - Campina Grande, 1993.
151 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 1993.
"Orientação : Prof. Dr. Sreeramulu Raghuram Naidu, Prof. M.Sc. José Rafael Daconti".
Referências.

1. Transmissão de Energia Elétrica. 2. Corrente Alternada - Tubulações Metálicas. 3. Transmissão de Energia - Interferências. 4. Dissertação - Engenharia Elétrica. I. Naidu, Sreeramulu Raghuram. II. Daconti, José Rafael. III. Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande (PB). IV. Título

CDU 621.315:621.3.025(043)

INTERFERENCIAS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO DE
CORRENTE ALTERNADA EM TUBULACÕES METÁLICAS

JOÃO VARELA EDUARDO

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 20.04.1993



SREERAMULU RAGHURAM NAIDU, Ph.D., UFPB
Orientador



JOSE RAFAEL DACONTI, Mestre, CHESF
Orientador

DRUMOND XAVIER CAVALCANTI LIMA, Dr., UFPB
Componente da Banca



JOSE PISSOLATO FILHO, Dr. Ing., UNICAMP
Componente da Banca

CAMPINA GRANDE - PB
ABRIL - 1993

À minha esposa Eliane
Aos meus filhos Laerte e Pedro
Aos meus pais Laerte e Idelaudir

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer :

Aos Orientadores desta Dissertação, Eng^o José Rafael Daconti e Prof^o Dr. Sreeramuhu Raghuram Naidu, pela confiança que depositaram em mim.

À CHESF, pela oportunidade que me propiciou em fazer o Curso de Mestrado em Engenharia Elétrica da UFPB, no período de março à dezembro de 1988.

A todos os meus familiares e amigos que de alguma forma tenham me auxiliado na elaboração deste trabalho.

Ao meu pai, Laerte Eduardo e minha mãe Idelauzir V. Eduardo, que desde o início de minha vida escolar têm sido meus maiores incentivadores.

RESUMO

Neste trabalho são analisadas as influências elétricas causadas pelas linhas de transmissão de corrente alternada em tubulações metálicas.

No capítulo 2 são apresentadas as equações necessárias ao cálculo dos parâmetros elétricos das tubulações metálicas.

No capítulo 3 é feita uma abordagem qualitativa dos fenômenos responsáveis pelo aparecimento das tensões e correntes nas tubulações metálicas paralelas ou transversais às linhas de transmissão.

A metodologia de cálculo utilizada para quantificação dos valores de tensões e correntes induzidas nas tubulações é feita no capítulo 4. A técnica aplicada discretiza o circuito equivalente da tubulação, direcionando a análise para a implementação de um programa computacional que calcula o perfil de tensões na tubulação, no seu revestimento e nas juntas isolantes.

O capítulo 5 apresenta os limites de tolerabilidade e suportabilidade que serão considerados quando das análises das interferências elétricas de LT's em tubulações, no que se refere a pessoas, a própria instalação e seus acessórios.

Algumas aplicações práticas realizadas nas análises de travessias de tubulações com LT's da CHESF, utilizando a técnica descrita, é apresentada no capítulo 6.

Destaca-se no Anexo A.2, a apresentação do programa computacional desenvolvido baseado na metodologia do capítulo 4, o qual auxilia as análises de interferências de linhas de transmissão de corrente alternada em tubulações metálicas.

SUMÁRIO

Pág.

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

CAPÍTULO 2 - PARÂMETROS ELÉTRICOS DAS TUBULAÇÕES METÁLICAS

2.1 - IMPEDÂNCIA LINEAR DA TUBULAÇÃO	17
2.2 - ADMITÂNCIA LINEAR DA TUBULAÇÃO PARA TERRA	18
2.3 - CONSTANTE DE PROPAGAÇÃO DA TUBULAÇÃO	20
2.4 - IMPEDÂNCIA CARACTERÍSTICA DA TUBULAÇÃO	20

CAPÍTULO 3 - INTERFERÊNCIAS ELÉTRICAS ENTRE LT'S E TUBULAÇÕES METÁLICAS

3.1 - ACOPLAMENTO RESISTIVO	21
3.1.1 - Conceitos Básicos	21
3.1.2 - Eletrodo Puntual num Solo Homogêneo	23
3.1.3 - Condutor Linear num Solo Homogêneo	24
3.2 - ACOPLAMENTO ELETROMAGNÉTICO	27
3.2.1 - Acoplamento Capacitivo	32
3.2.2 - Acoplamento Indutivo	33
3.3 - INTERFERÊNCIAS ELÉTRICAS A SEREM CONSIDERADAS .	35

CAPÍTULO 4 - METODOLOGIA COMPUTACIONAL PARA O CÁLCULO DOS ACOPLAMENTOS

4.1 - ACOPLAMENTO RESISTIVO	37
4.1.1 - Cálculo do Potencial Induzido em um Ponto Qualquer do Solo por um Eletrodo Segmentado	37
4.1.2 - Cálculo das Resistências Próprias e Mútuas ..	40
4.1.3 - Cálculo do Perfil de Tensão Induzida em Tubulações Metálicas - Acoplamento Resistivo	49

4.2 - ACOPLAMENTO INDUTIVO	53
4.2.1 - Cálculo do Campo Elétrico Longitudinal Induzido em um Ponto Qualquer do Espaço	53
4.2.2 - Cálculo do Perfil de Tensão Induzida em Tubulações Metálicas - Acoplamento Indutivo	58
4.3 - CÁLCULO DO PERFIL DE TENSÃO RESULTANTE DA ASSOCIAÇÃO DOS EFEITOS DOS ACOPLAMENTOS RESISTIVO E INDUTIVO	61
4.4 - CÁLCULO DAS TENSÕES E CORRENTES EM ACESSÓRIOS E PESSOAS - ACOPLAMENTOS RESISTIVO E INDUTIVO ...	62
4.4.1 - Corrente de Contato	62
4.4.2 - Tensão nos Acessórios da Tubulação	63
4.5 - EFEITO DOS RAMAIS DE TUBULAÇÃO E ATERRAMENTOS NO PERFIL DE TENSÃO - ACOPLAMENTOS RESISTIVO E INDUTIVO	63
4.6 - ACOPLAMENTO CAPACITIVO	63
4.6.1 - Cálculo da Corrente de Contato de um Segmento ΔL da Tubulação Sujeito ao Acoplamento Capacitivo	64
4.6.2 - Cálculo da Corrente de Contato e Tensão na Tubulação - Acoplamento Capacitivo	67
4.6.3 - Cálculo das Correntes de Contato Transitórias - Acoplamento Capacitivo	69

CAPÍTULO 5 - CRITÉRIOS DE SEGURANÇA / MEIOS DE MITIGAÇÃO APLICÁVEIS

5.1 - TOLERABILIDADE DO CORPO HUMANO A CHOQUES ELÉTRICOS	72
5.2 - SUPORTABILIDADE DO METAL DA TUBULAÇÃO E DO SEU REVESTIMENTO	75
5.3 - SUPORTABILIDADE DA PROTEÇÃO CATÓDICA	76
5.4 - SUPORTABILIDADE DAS JUNTAS ISOLANTES	78

5.5 - MEIOS DE MITIGAÇÃO APLICÁVEIS	78
---	----

CAPÍTULO 6 - APLICAÇÕES PRÁTICAS

6.1 - ANÁLISE DAS INTERFERÊNCIAS ELÉTRICAS DAS LT'S JCR - DOW - Ø4N3 E Ø4N4 SOBRE O GASODUTO DE HIDROGÊNIO DA WHITE MARTINS	81
6.1.1 - Características Técnicas das Instalações	81
6.1.2 - Efeitos Elétricos a Serem Considerados	82
6.1.3 - Conclusões / Recomendações	100
6.2 - ANÁLISE DAS INTERFERÊNCIAS ELÉTRICAS DAS LT'S CMD- CTG-Ø4M5/Ø4M6, CMD-MTT-Ø4M7, CMD-PTU-Ø4M8 E CTG-CTU- Ø2J5/Ø2J6 SOBRE A DUTOVIA DA COPENE	101
6.2.1 - Características Técnicas das Instalações	101
6.2.2 - Efeitos Elétricos a Serem Consideradas	110
6.2.3 - Conclusões / Recomendações	113

CAPÍTULO 7 - CONCLUSÕES

ANEXOS

A.1 - SOLUÇÃO DO CIRCUITO EQUIVALENTE MULTI-PI DE UMA TUBULAÇÃO METÁLICA	116
A.2 - PROGRAMA PARA DETERMINAÇÃO DAS INTERFERÊNCIAS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO DE CORRENTE ALTERNADA EM TUBULAÇÕES METÁLICAS ..	120
A.3 - RECOMENDAÇÕES PARA PROJETO, ESTOCAGEM, INSTALAÇÃO E MANUTENÇÃO DE TUBULAÇÕES PRÓXIMAS ÀS LINHAS	139
A.4 - CARACTERÍSTICAS TÍPICAS DE TUBULAÇÕES	142
A.5 - METODOLOGIA DO CÁLCULO DA DISTRIBUIÇÃO DE CORRENTES DE CURTO- CIRCUITO ENTRE CABOS PARA-RAIOS E TERRA NAS LINHAS DE TRANSMISSÃO	143
BIBLIOGRAFIA	149

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
2.1 - Circuito equivalente de uma tubulação enterrada	19
3.1 - Eletrodo puntual dissipando corrente num solo homogêneo	23
3.2 - Eletrodo linear l_g formado por n eletrodos puntuais	24
3.3 - Geometria de uma LT monofásica sobre um solo perfeito	28
3.4 - Definição dos parâmetros das equações (3.16), (3.17) e (3.18)	29
3.5 - Exemplo do problema da indução	29
3.6 - Circuito equivalente usado para determinar o circuito de Thevenin para o exemplo da figura 3.5	30
3.7 - Circuito equivalente usado para determinar V_o e V_L	31
4.1 - Segmento enterrado num solo homogêneo	41
4.2 - Representação de dois segmentos quaisquer	43
4.3 - Representação de dois segmentos paralelos	45
4.4 - Localização dos segmentos e das imagens em relação ao nível do solo (N.S) e a interface (H) para um solo extratificado em 2 camadas	49
4.5 - Circuito equivalente de um segmento ΔL de tubulação metálica enterrada	50
4.6 - Circuito equivalente multi- π de um trecho de tubulação metálica enterrada	51
4.7 - Circuito equivalente multi- π e um trecho de tubulação metálica aérea	52
4.8 - Corte transversal do corredor de LT's com uma tubulação	53
4.9 - Circuito equivalente de um segmento ΔL de tubulação metálica	59
4.10- Circuito equivalente multi- π de um trecho de tubulação metálica enterrada	60
4.11- Circuito equivalente multi- π de um trecho de tubulação.....	61
4.12- Capacitâncias parciais do sistema linha-tubulação	64
4.13- Circuito equivalente capacitivo do sistema linha-tubulação .	70

5.1 - Circuito equivalente da proteção catódica-acoplamento resistivo	77
5.2 - Circuito equivalente da proteção catódica-acoplamento indutivo	77
6.1 - Desenho esquemático da posição relativa entre as LT's JCR-DOW-04N3/04N4 e a tubulação da WHITE MARTINS	83
6.2 - Esquema de contrapeso considerado para uma resistência de pé-de-torre de 15 ohms	84
6.3 - Esquema da malha de aterramento da SE DOW	84
6.4 - Esquema de circulação de correntes numa LT por ocasião de um curto-circuito fase-terra	88
6.5 - Perfil de tensão ao longo da tubulação em regime de curto-circuito	89
6.6 - Circuito de proteção catódica ligado à tubulação no ponto A. 92	
6.7 - Circuito equivalente aos pontos de purga	92
6.8 - Perfil de tensão ao longo da tubulação em regime permanente. 99	
6.9 - Desenho esquemático da posição relativa entre as LT's CMD-CTG-04M5/04M6, CMD-MTT-04M7, CTG-CTU-02J5/02J6, CMD-PTU-04M8 e a Dutovia da COPENE	104
6.10- Esquema de contrapeso das estruturas 16, 17, 18, 19 e 20 da LT CMD-CTG-04M5 (450 ohms.m; 20 ohms)	105
6.11- Esquema de contrapeso das estruturas 5/2, 5/3, 6/1, 6/2 e 6/3 da LT CMD-MTT-04M7 (450 ohms.m, 20 ohms)	105
6.12- Esquema de contrapeso das estruturas 18, 19, 20, 21 e 22 da LT CMD-CTG-04M6 (450 ohms.m; 20 ohms)	106
6.13- Esquema de contrapeso das estruturas 18/2, 18/3, 18/4, 19/1 e 19/2 da LT CTG-CTU-02J5/02J6 (450 ohms.m; 20 ohms)	106
6.14- Esquema de contrapeso das estruturas 5/2, 5/3, 5/4, 6/1, 6/2 e 6/3 da LT CMD-PTU-04M8 (450 ohms.m; 20 ohms)	107
6.15- Perfil de tensão no revestimento da tubulação de 14" (acoplamento resistivo + indutivo em consequência de um curto-circuito na estrutura 20 da LT CMD-CTG-04M6, resistência da proteção catódica igual a 10 ohms)	112
A.5.1- Elemento série de um quadripolo	143
A.5.2- Elemento paralelo de um quadripolo	143

A.5.3-	Circulação de correntes de curto-circuito devido a contribuição da SE1	144
A.5.4-	Circulação de correntes de curto-circuito devido a contribuição da SE2	144
A.5.5-	Circuito equivalente de um curto-circuito numa LT	145
A.5.6-	Curto-circuito na fase A de uma LT	146

LISTA DE TABELAS

Pág.

3.1 - Análises a serem efetuadas para levantamento das interferências elétricas de uma LT em tubulações próximas ...	36
5.1 - Duração média de uma falta fase-terra	74
6.1 - Correntes de curto-circuito nos condutores e pára-raios equivalente	86
6.2 - Correntes injetadas no solo	86
6.3 - Ocorrências de curto-circuito na SE DOW e estruturas 26, 27 e 28	87
6.4 - Tensão no retificador da proteção catódica e nos fios de interligação em regime de curto-circuito	93
6.5 - Máxima tensão no revestimento isolante e tensão nas válvulas de manobra dos pontos de purga em regime de curto-circuito	94
6.6 - Fatores de desequilíbrio, correntes de sequência e correntes de fase	97
6.7 - Tensão nas válvulas de manobra e correntes através do corpo de um trabalhador em regime permanente	98
6.8 - Limites de corrente de curto-circuito utilizados na análise .	108
6.9 - Correntes de curto-circuito consideradas na estrutura em curto e nas duas outras adjacentes a ela (situação crítica)	108
6.10- Localização da tensão máxima no revestimento da tubulação devido ao acoplamento resistivo, supondo a resistência de terra da proteção catódica 10, 100 e 100 ohms (tubo de 14 pol.)	109
6.11- Localização da tensão máxima no revestimento da tubulação devido ao acoplamento resistivo supondo a resistência de terra da proteção catódica 10, 100 e 1000 ohms (tubo de 14 pol.)	110

LISTA DE ABREVIATURAS

- NBR - Norma Técnica Brasileira
- CHESF - Companhia Hidro Elétrica do São Francisco
- LT - Linha de transmissão
- SE - Subestação
- JCR-DOW-04N3 - LT que interliga as SE's Jacaranga e DOW, energizada em 230 kV cujo código de operação é 04N3.
- JCR-DOW-04N4 - Idem, cujo código de operação é 04N4.
- CMD-CTG-04M5 - LT que interliga as SE's Camaçari e Cotegipe, energizada em 230kV cujo código de operação é 04M5.
- CMD-CTG-04M6 - Idem, cujo código de operação é 04M6.
- CMD-MTT-04M7 - LT que interliga as SE's Camaçari e Matatu, energizada em 230kV cujo código de operação é 04M7.
- CTG-CTU-02J5 - LT que interliga as SE's Cotegipe e Catu, energizada em 69 kV, cujo código de operação é 02J5.
- CTG-CTU-02J6 - Idem, cujo código de operação é 02J6.
- CMD-PTU-04M8 - LT que interliga as SE's Camaçari e Pituaçu, energizada em 230kV cujo código de operação é 04M8.

CAPITULO 1

1. - INTRODUÇÃO

A NBR - 5422/1985, "Projeto de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica - Procedimentos", descreve como seus objetivos, garantir níveis mínimos de segurança para as linhas de transmissão e limitar perturbações em instalações próximas. No item 11, no que se refere a travessia de tubulações, esta Norma preconiza:

item 11.1.5 -

" Nas travessias sobre tubulações metálicas de grande porte, na falta de cálculo específico para análise do cruzamento, recomenda-se localizar os suportes da linha o mais afastado possível da tubulação observando-se o ângulo mínimo definido em 11.2.1. "

item 11.1.5.1 -

" No caso de análise de cruzamento, o cálculo deve ser executado para os limites de influência eletromagnética da linha, na condição mais desfavorável de falta, recomendando-se que a soma algébrica da tensão induzida na tubulação por acoplamento magnético com a elevação do potencial do solo por dispersão de corrente, em qualquer ponto da tubulação, seja inferior à tensão de perfuração de sua camada protetora ".

Do exposto na Norma, verifica-se a preocupação do Comitê Brasileiro de Eletricidade - COBEI, da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, com as possíveis consequências de uma falta na linha de transmissão próxima a uma tubulação. Contudo, existem ainda dois aspectos que os técnicos responsáveis pela manutenção destas instalações devem investigar, quando da aprovação de aproximações ou travessias entre as linhas de transmissão e as tubulações, que são: níveis de tensões induzidas que possam perfurar o metal da tubulação e ainda, níveis de tensões induzidas que possam causar choques elétricos em trabalhadores de manutenção e/ou terceiros, que entrem em contato eventual com estas tubulações.

De uma forma genérica pode-se afirmar que qualquer objeto metálico, localizado próximo de uma linha de transmissão, fica sujeito aos acoplamentos resistivo, indutivo e capacitivo, onde podem ser geradas tensões e correntes induzidas que produzem o mesmo efeito perigoso na tubulação, como se esta estivesse ligada diretamente a uma fonte de tensão convencional. Daí a necessidade de se calcular, ainda na fase de anteprojeto, quais as tensões resultantes na tubulação com o objetivo de se tomar medidas preventivas para redução de níveis de tensões induzidas, protegendo a própria instalação e as pessoas que entrem em contato com ela.

A análise das travessias feitas até então na CHESF, utilizava um processo parcialmente informatizado onde alguns elementos básicos, tais como: a corrente injetada nas malhas de aterramento das estruturas em caso de curto-circuito, os parâmetros da tubulação, os potenciais gerados ao longo do traçado, o campo elétrico longitudinal, dentre outros, eram obtidos com programas computacionais isolados e o efeito resultante era calculado por método manual.

Como contribuição ao estudo das interferências das linhas de transmissão sobre tubulações, particularmente em referência ao trabalho "Estudo das Influências Causadas por Linhas de Transmissão de Energia Elétrica AC Sobre Tubulações Metálicas Próximas" [1], ressalta-se o desenvolvimento de um programa computacional, com o qual é possível se fazer simulações tanto em regime permanente quanto em curto-circuito. Em regime permanente, podem ser simulados corredores com várias linhas de transmissão (máximo de 100 cabos) e serem considerados os desequilíbrios de correntes e tensões. Em curto-circuito, as malhas de terra das estruturas podem ser detalhadas, o que permite analisar os benefícios da adoção de contrapesos assimétricos. A modelagem do circuito equivalente divide a tubulação em trechos, onde as admitâncias de ligação com os trechos adjacentes previstas, permitem a determinação das tensões resultantes nas juntas isolantes; nos terminais de cada trecho já referido, são previstas admitâncias para a terra que tem o objetivo de simular o toque de pessoas ou a existência de aterramentos concentrados; a presença de ramais de tubulação, circuitos de proteção catódica e aterramentos distribuídos podem ser simulados a partir do circuito equivalente de Thevenin, os quais são previstos no início de cada trecho já mencionado.

CAPÍTULO 2

2. - PARÂMETROS ELÉTRICOS DAS TUBULAÇÕES METÁLICAS

No presente estudo, as tubulações metálicas são modeladas por um circuito elétrico semelhante a uma linha de transmissão monofásica, o qual tem uma impedância série e uma admitância paralela distribuídas ao longo de sua extensão. A apresentação das equações utilizadas no cálculo dos parâmetros deste circuito é o objetivo deste capítulo.

2.1 - IMPEDÂNCIA SÉRIE Z DE UMA TUBULAÇÃO

De acordo com as referências [1] e [2], a impedância série Z em ohms/m é dada pelas seguintes equações:

a) Tubulações Aéreas:

$$Z = Z_i + \frac{w \mu_0}{8} + j \frac{w \mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{3,7 \sqrt{\frac{\rho}{w \mu_0}}}{D} \right) \quad (2.1)$$

b) Tubulações Enterradas:

$$Z = Z_i + \frac{w \mu_0}{8} + j \frac{w \mu_0}{2\pi} \ln \left[\frac{1,85}{a' \sqrt{\gamma^2 + j w \mu_0 \left(\frac{1}{\rho} + j w \epsilon \right)}} \right] \quad (2.2)$$

Onde:

$$Z_i = \frac{\sqrt{\rho_p \cdot \mu_p \cdot w/2}}{\pi D} \left[\frac{\sinh(t_n) + \sin(t_n)}{\cosh(t_n) - \cos(t_n)} + j \frac{\sinh(t_n) - \sin(t_n)}{\cosh(t_n) - \cos(t_n)} \right]$$

$$t_n = \frac{2t \sqrt{\rho_p \cdot \mu_p \cdot w/2}}{\rho_p}$$

$$t = 0,132 \times \left(\frac{D}{0,0254} \right)^{0,421} \times 0,0254$$

$$a' = \sqrt{a^2 + 4h^2}$$

Sendo:

- Z_i - impedância interna da tubulação (ohms/m)
- ρ - resistividade elétrica do solo (ohms.m)
- D - diâmetro médio da tubulação (m)
- a' - raio equivalente da tubulação (m)
- γ - constante de propagação da tubulação (m⁻¹)
- ε - permissividade elétrica do solo (F/m)
- ρ_p - resistividade elétrica do metal da tubulação (ohms.m)
- μ_p - permeabilidade magnética do metal da tubulação (H/m)
- t - espessura da tubulação (m)
- a - raio médio da tubulação (m)
- h - profundidade média de enterramento da tubulação (m)
- ω - 2πf (rad/s)
- μ₀ - 4π × 10⁻⁷ (H/m)

2.2 - ADMITÂNCIA PARALELA Y DE UMA TUBULAÇÃO

De acordo com as mesmas referências do item anterior, a admitância paralela Y em mhos/m é dada pelas seguintes equações:

a) Tubulações Aéreas:

$$Y = j\omega \frac{2\pi\epsilon_0}{\text{Ln} \left(\frac{h + \sqrt{h^2 - a^2}}{a} \right)} \quad (2.3)$$

para h > 2a, pode-se considerar

$$Y = j\omega \frac{2\pi\epsilon_0}{\text{Ln} \left(\frac{2h}{a} \right)} \quad (2.4)$$

b) Tubulações Enterradas:

$$Y_{TV} = G + j\omega C \quad (2.5)$$

Onde:

$$G = \frac{D}{\rho_{rev} \cdot \delta_{rev}} = \frac{1}{R_f}$$

$$C = \frac{\epsilon_{rev} \cdot \pi \cdot D}{\delta_{rev}}$$

$$Y_{TR} = \frac{\pi \left(\frac{1}{\rho} + j\omega \epsilon \right)}{\ln \left(\frac{1,12}{\gamma a'} \right)} \quad (2.6)$$

$$Y = \frac{1}{\frac{1}{Y_{TV}} + \frac{1}{Y_{TR}}} \quad (2.7)$$

Sendo:

- Y_{TV} - admitância da tubulação para a terra imediatamente vizinha (mhos/m)
- Y_{TR} - admitância entre a terra imediatamente vizinha à tubulação e um terra remoto (mhos/m).
- ρ - resistividade do solo (ohms.m)
- ϵ - permissividade do solo (F/m)
- a' - raio equivalente da tubulação (m), definido no item 2.1
- γ - constante de propagação (m^{-1})
- G - condutância linear da tubulação para a terra (mhos/m)
- R_f - resistência de fuga linear da tubulação para a terra (ohms.m)
- ρ_{rev} - resistividade do material do revestimento (ohms.m)
- δ_{rev} - espessura do revestimento (m)
- ϵ_{rev} - permissividade do material do revestimento (F/m)

A admitância total para a terra de uma tubulação enterrada é composta por duas parcelas: uma admitância para a terra imediatamente vizinha a tubulação Y_{TV} e uma admitância para um terra remoto Y_{TR} . O circuito equivalente é apresentado na figura 2.1.

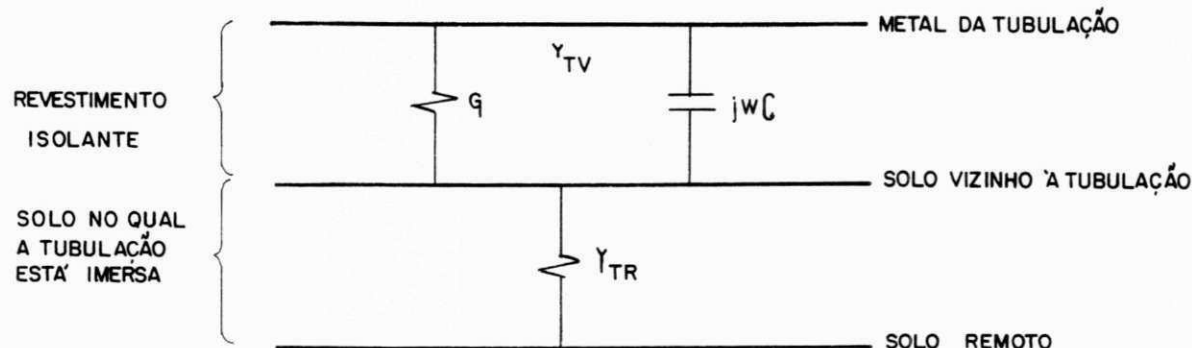


Figura 2.1
Circuito equivalente de uma tubulação enterrada

2.3 - CONSTANTE DE PROPAGAÇÃO DE UMA TUBULAÇÃO

A constante de propagação é dada pela seguinte expressão:

$$\gamma = \sqrt{Z \cdot Y} = \alpha + j\beta \quad (\text{m}^{-1}) \quad (2.8)$$

Sendo:

- Z - impedância linear da tubulação (ohms/m)
- Y - admitância linear da tubulação (mhos/m)

Para tubulações aéreas o cálculo da constante de propagação é feita substituindo-se diretamente os valores de Z e Y das equações (2.1) e (2.3) na equação (2.8).

No caso das tubulações enterradas, Z e Y dependem da constante de propagação. Então o cálculo deste parâmetro é feito resolvendo-se a seguinte equação transcendental:

$$\gamma^2 - \frac{1}{Y} = Z$$

ou,

$$\gamma^2 \left[\frac{1}{Y_{TV}} + \frac{L_n \left(\frac{1,12}{\gamma a'} \right)}{\pi \left(\frac{1}{\rho} + j\omega \epsilon \right)} \right] = Z_i + \frac{w \cdot \mu_0}{8} + j \frac{w \mu_0}{2\pi} L_n \left[\frac{1,85}{a \sqrt{\gamma^2 + j\omega \mu_0 \left(\frac{1}{\rho} + j\omega \epsilon \right)}} \right] \quad (2.9)$$

2.4 - IMPEDÂNCIA CARACTERÍSTICAS DE UMA TUBULAÇÃO

A impedância característica é dada pela seguinte equação:

$$Z_c = \sqrt{\frac{Z}{Y}} \quad (2.10)$$

Sendo:

- Z - impedância linear da tubulação (ohms/m)
- Y - admitância linear da tubulação para a terra (mhos/m)

O cálculo de Z_c , tanto para tubulações aéreas ou enterradas, é feito por substituição direta dos valores de Z e Y na equação (2.10).

CAPÍTULO 3

3. - INTERFERÊNCIAS ELÉTRICAS ENTRE LT's E TUBULAÇÕES METÁLICAS

A existência de tubulações construídas ou projetadas paralelas ou transversais às linhas de transmissão é fato bastante comum nos sistemas elétricos.

Devido a proximidade entre estas instalações, eletricamente tudo se passa como se existisse um condutor metálico (tubulação) imerso no campo eletromagnético consequente da corrente e tensão da linha de transmissão, tanto em regime permanente como em condição de curto-circuito. Nesta última condição anormal de operação, verifica-se que, além das consequências da interferência causadas pelo campo eletromagnético da LT, haverá também interferência causada pela transferência de potencial, em virtude da injeção de corrente no solo através da malha de aterramento da linha.

Nos itens que se seguem, será feita uma análise qualitativa dos fenômenos que interagem para o aparecimento das tensões e correntes nas tubulações metálicas paralelas ou transversais às linhas de transmissão.

3.1 - ACOPLAMENTO RESISTIVO

O principal objetivo da análise de um sistema de aterramento é calcular o desempenho esperado dos eletrodos de terra que formam o projeto básico da malha. O desempenho básico de uma malha de aterramento é medido por:

- (i) Impedância de terra ou resistência da malha;
- (ii) Tensões de toque e passo.

No caso deste estudo, o objetivo é determinar o potencial elétrico causado pela injeção da corrente elétrica na ocasião de faltas fase-terra, ao longo do traçado da tubulação e, a partir daí, determinar a diferença de potencial resultante no revestimento da tubulação, entre a tubulação e o solo e nas juntas isolantes.

3.1.1 - Conceitos Básicos

O cálculo do desempenho de uma malha depende basicamente de:

- (i) Forma, tamanho e arrumação dos eletrodos;
- (ii) Características do solo, como a resistividade;

(iii) Natureza do curto-circuito (amplitude, frequência, forma de onda, etc...)

O solo é representado por um meio semi-infinito, isotrópico uniforme ou estratificado, caracterizado por sua condutividade (ou resistividade). A condução de corrente no solo é determinada pelas leis do eletromagnetismo aplicadas aos metais. A extensão dos eletrodos é muito pequena comparada com a penetração da corrente de 60 Hz no solo. Da mesma forma, o tempo de propagação pode ser desprezado e o desempenho dos eletrodos durante um curto-circuito pode ser determinado usando técnicas de análise de campos eletromagnéticos estacionários.

A corrente e o gradiente de potencial no solo produzido em resposta a força eletromotriz imposta, deve satisfazer a equação básica do eletromagnetismo e às várias condições de contorno impostas ao meio e aos eletrodos. As equações definem as relações básicas entre o gradiente de potencial, a densidade de corrente e a intensidade de campo elétrico.

O gradiente de potencial em algum ponto $P(x,y,z)$ é dado pela equação (3.1):

$$\nabla\phi = i \frac{\partial\phi}{\partial x} + j \frac{\partial\phi}{\partial y} + k \frac{\partial\phi}{\partial z} \quad (3.1)$$

Onde:

ϕ - potencial no ponto P;
 i, j, k - vetores unitários nas direções x, y, z

A intensidade de campo elétrico, definida como um vetor na direção oposta do gradiente de potencial, é dado na equação (3.2):

$$E = -\nabla\phi \quad (3.2)$$

A densidade de corrente elétrica J , definida como um vetor na mesma direção do fluxo de corrente (normal a superfície equipotencial), é dado pela equação (3.3):

$$J = \sigma E \quad (3.3)$$

Estas equações básicas são usadas em todos os métodos de análise. Um eletrodo infinitamente pequeno, considerado um eletrodo puntual, é usado para ilustrar a aplicação destas equações, já que este eletrodo pode ser considerado como um elemento básico de algum tipo de arranjo de aterramento.

3.1.2 - Eletrodo Puntual Num Solo Homogêneo

Considerando-se que a fonte de corrente S da figura 3.1 é um eletrodo puntual, dissipando uma corrente I num solo homogêneo de resistividade ρ . Aplicando-se o método das imagens, a imagem do eletrodo puntual dissipará uma corrente $I' = I$. A densidade de corrente no ponto P devido a corrente dissipada pelo eletrodo S e sua imagem S' , será dada pela equação (3.4):

$$J = \frac{I}{4\pi} \left[\frac{1}{r^2} \mathbf{r} + \frac{1}{r'^2} \mathbf{r}' \right] \quad (3.4)$$

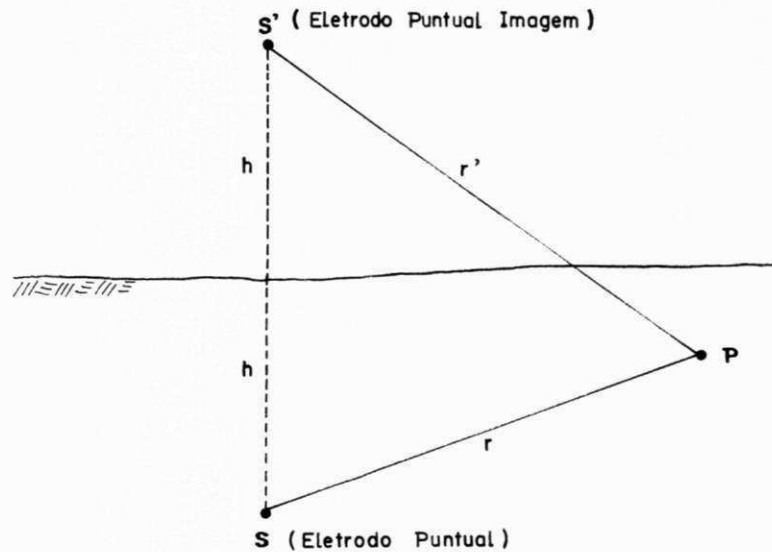


Figura 3.1
Eletrodo puntual dissipando corrente num solo homogêneo

Onde:

- r - distância entre o ponto P e o eletrodo puntual.
- r' - distância entre o ponto P e o eletrodo puntual imagem;
- \mathbf{r}, \mathbf{r}' - vetores unitários nas direções radiais

A intensidade de campo elétrico é dada pela equação (3.5):

$$E = \rho J = \frac{\rho I}{4\pi} \left[\frac{1}{r^2} \mathbf{r} + \frac{1}{r'^2} \mathbf{r}' \right] \quad (3.5)$$

Portanto, o potencial no ponto P , definido como a integral do campo elétrico entre o ponto P e um ponto no infinito remoto, é dado pela equação (3.6):

$$V_p = \int_r^{\infty} E \cdot dr$$

$$V_p = \frac{\rho I}{4\pi} \left[\frac{1}{r} + \frac{1}{r'} \right] \quad (3.6)$$

3.1.3 - Condutor Linear Num Solo Homôgeneo

A figura 3.2 mostra um eletrodo linear l_s de comprimento L_s e raio a_s dissipando uma corrente I num solo homogêneo de resistividade ρ . Este eletrodo linear pode ser considerado uma sucessão de eletrodos pontuais justapostos, que dissipam correntes no solo. O potencial V_p induzido num ponto P devido a corrente I dissipada no solo pelo eletrodo linear l_s e sua imagem l_s' é dado pela Equação 3.7 [3].

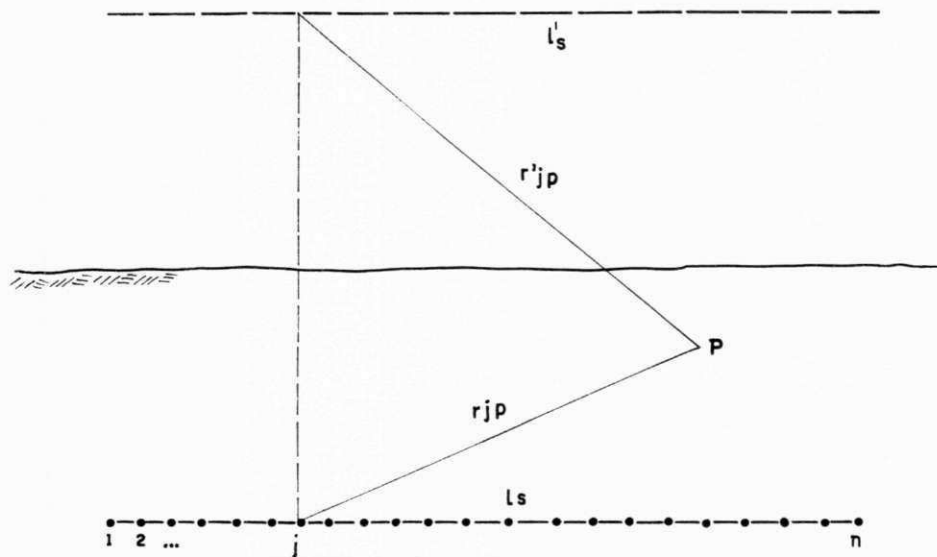


Figura 3.2
Eletrodo linear l_s formado por n eletrodos pontuais

$$V_p = \frac{\rho}{4\pi} \sum_{j=1}^n \left[\frac{I_j}{r_{jP}} + \frac{I'_j}{r'_{jP}} \right] \quad (3.7)$$

$$I = \sum_{j=1}^n I_j \quad (3.8)$$

Onde:

- I_j - corrente dissipada no solo pelas fontes de correntes pontuais j ($j = 1, 2, \dots, n$) e suas imagens;
- r_{jp} - distância entre o eletrodo puntual j e o ponto P ;
- r'_{jp} - distância entre a imagem do eletrodo puntual j e o ponto P .

Se a densidade de corrente de dispersão sobre a superfície total do eletrodo é considerada uniforme e que cada fonte puntual de corrente é um elemento linear de comprimento Δx , a equação (3.7) pode ser escrita da seguinte forma [3]:

$$V_P = \frac{\rho \cdot I \cdot \Delta x}{4 \pi L_s} \sum_{j=1}^n \left[\frac{1}{r_{jp}} + \frac{1}{r'_{jp}} \right] \quad (3.9)$$

Integrando-se (3.9) vem [3]:

$$V_P = \frac{\rho}{4 \pi} \int_0^{L_s} \left[\frac{1}{r_{jp}} + \frac{1}{r'_{jp}} \right] \frac{di(x)}{dx} dx \quad (3.10)$$

Onde, $i(x)$ representa a distribuição da densidade de corrente de dispersão ao longo do comprimento do eletrodo. Se a densidade de corrente de dispersão é constante, a equação (3.10) pode ser escrita como [3]:

$$V_P = \frac{\rho I}{4 \pi L_s} \int_0^{L_s} \left[\frac{1}{r} + \frac{1}{r'} \right] dx \quad (3.11)$$

A precisão do resultado obtido aplicando-se o somatório, dependerá do número de pequenos segmentos nos quais o eletrodo é subdividido. A integração não tem este problema.

O potencial na superfície de um eletrodo metálico sem perdas deve ser constante. Como é difícil determinar a distribuição linear da densidade de corrente de dispersão a qual satisfaz esta condição de contorno, o método do potencial médio é usado para determinar uma razoável aproximação do potencial na superfície do condutor.

Seja $V(x_s, a_s)$ o potencial obtido em algum ponto $P(x_s, a_s)$ da superfície do eletrodo l_s e considerando-se uma densidade linear de corrente de dispersão, o potencial médio V_{sm} é dado pela seguinte expressão [3]:

$$V_{sm} = \frac{1}{L_s} \int_0^{L_s} V(x_s, a_s) dx_s \quad (3.12)$$

A resistência de terra R_t de um eletrodo linear l_s é definida como a razão entre a tensão na superfície do eletrodo e a corrente que é dispersada para a terra, dada pela seguinte equação [3]:

$$R_t = \frac{V_{sm}}{I} \quad (3.13)$$

Considerando-se um ponto $P(x_k, a_k)$ sobre a superfície de outro eletrodo linear l_k de comprimento L_k e raio a_k , o potencial $V(x_k, a_k)$ induzido neste ponto devido a corrente I dissipada pelo eletrodo linear l_s pode ser determinado usando-se a equação (3.9) ou (3.11). Entretanto, este potencial $V(x_k, a_k)$ também variará ao longo do comprimento do condutor l_k . O potencial médio induzido no eletrodo linear l_k devido a corrente I dissipada do condutor l_s é dado pela seguinte equação [3]:

$$V_{km} = \frac{1}{L_k} \int_0^{L_k} V(x_k, a_k) dx_k \quad (3.14)$$

Então, a resistência mútua $R_{k,s}$ entre os eletrodos l_k e l_s , definida como a tensão produzida no condutor l_k devido a corrente dissipada no condutor l_s , é dada por [3]:

$$R_{k,s} = \frac{V_{km}}{I} \quad (3.15)$$

3.2 - ACOPLAMENTO ELETROMAGNÉTICO

Nas áreas de distribuição e transmissão, é comum separar o acoplamento eletromagnético em acoplamento capacitivo e acoplamento indutivo. O acoplamento capacitivo descreve o efeito da porção do campo eletromagnético que é devido a carga ou a tensão e capacitância. O acoplamento indutivo descreve o efeito da porção do campo eletromagnético que pode ser atribuído ao fluxo de corrente na linha e indutância. Esta separação tem sido muito conveniente para muitas aplicações em engenharia de potência.

É importante mencionar que os acoplamentos capacitivo e indutivo podem ser superpostos. Contudo, na maioria dos problemas relacionados com as interferências de linhas de transmissão em tubulações, o efeito de um dos acoplamentos, capacitivo ou indutivo, predomina. Nestes casos, o efeito do acoplamento menos significante pode ser ignorado, o que simplifica a análise.

Uma fonte de campo de eletromagnético é mostrada na figura 3.3. Trata-se de uma linha de transmissão monofásica com retorno pelo solo. Por simplicidade, o solo é considerado ter condutividade perfeita. Para distâncias da linha que sejam eletricamente curtas ($R_s \ll \lambda$, onde λ é o comprimento de onda no vácuo de aproximadamente 3000 km em 60 Hz), os campos elétricos e magnéticos estacionários são [5]:

$$E_{ut} = \frac{V_s(Z)}{2d_s} \left(\left[\frac{x}{(R_s)^2} - \frac{x}{(R'_s)^2} \right] i + \left[\frac{(y-d_s)}{(R_s)^2} - \frac{(y+d_s)}{(R'_s)^2} \right] j \right) \quad (3.16)$$

$\ln\left(\frac{a_s}{a_s}\right)$

é o campo elétrico transversal à linha de transmissão no ponto P(x,j);

$$H_{ut} = \frac{I_s(Z)}{2\pi} \left(\left[\frac{(y-d_s)}{(R_s)^2} - \frac{(y+d_s)}{(R'_s)^2} \right] i - \left[\frac{x}{(R_s)^2} - \frac{x}{(R'_s)^2} \right] j \right) \quad (3.17)$$

é o campo magnético estacionário no ponto P(x,y);

$$E_{uz} = \frac{-C_m}{C_w} \frac{\partial V_s}{\partial Z} + j\omega L_m I_s(Z) = 0 \quad (3.18)$$

é o campo elétrico estacionário axial ou longitudinal;

$$H_{uz} = 0$$

é o campo magnético estacionário axial ou longitudinal.

Onde:

- $V_g(Z)$ - tensão da LT que varia ao longo da mesma;
- $I_g(Z)$ - corrente da LT que varia ao longo da mesma;
- C_w , C_m e L_m - são as capacitâncias próprias e mútuas e a indutância mútua por unidade de comprimento (ver item 4).

O subscrito u indica que os campos não sofrem influência de outras fontes de campo.

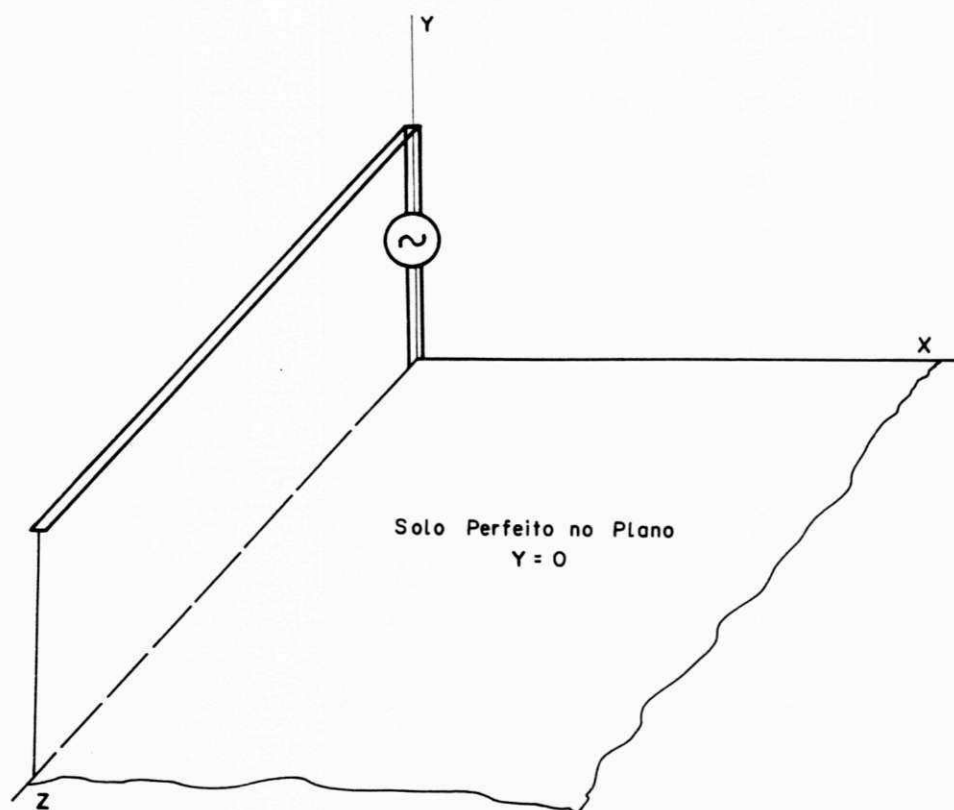


Figura 3.3
Geometria de uma LT monofásica sobre um solo perfeito

A figura 3.4 mostra as definições de a_g , d_g , R_g e R'_g . Uma forma explícita é dada para E_{uz} na equação (3.18), campo que embora seja zero, é dado nesta forma que será útil no desenvolvimento desta parte do trabalho. Observa-se que, como a variação transversal destes campos no espaço é a mesma dos campos elétricos e magnéticos estáticos, eles são chamados de campos "quase-estáticos". De fato, está é a razão porque o "campo elétrico transversal" é chamado de "campo eletrostático".

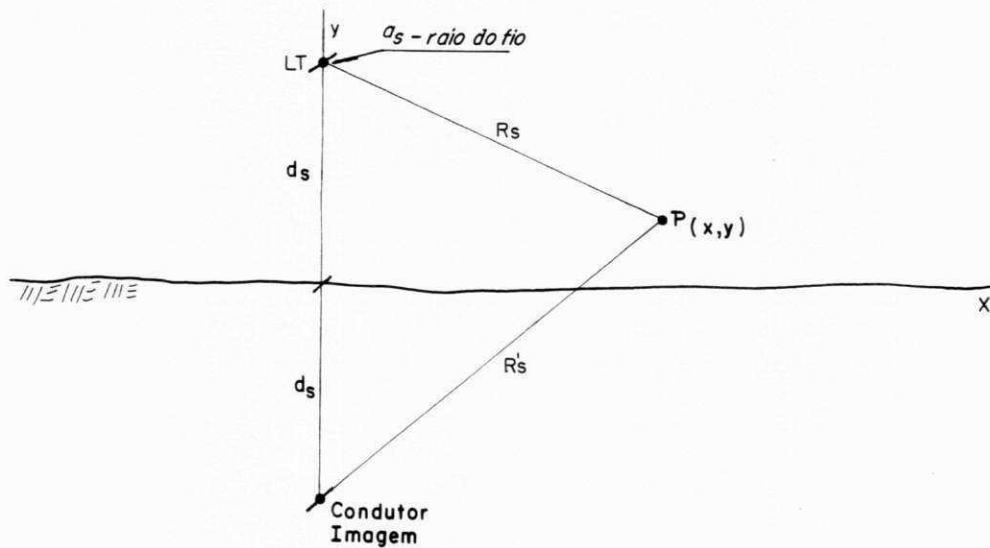


Figura 3.4
Definição dos parâmetros das equações (3.16), (3.17) e (3.18)

A figura 3.5 mostra um fio metálico colocado no campo eletromagnético da linha já mencionada. Os terminais do fio são conectados ao solo por duas impedâncias Z_0 e Z_L que, junto com o retorno pelo solo, formam um caminho fechado que é paralelo a linha monofásica. Para simplificar, o comprimento L do fio é eletricamente curto. O efeito do campo eletromagnético agora pode ser calculado.

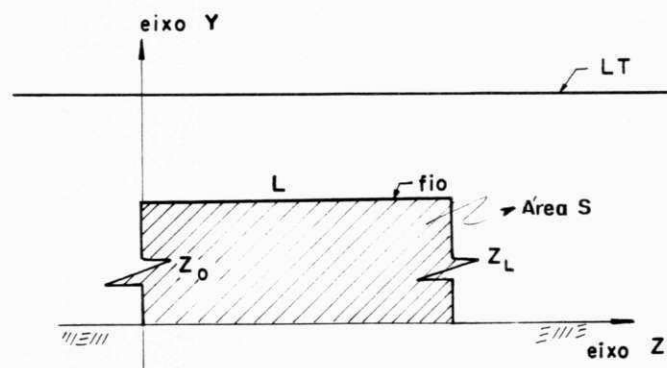


Figura 3.5
Exemplo do problema da indução

Este problema pode ser abordado, abrindo-se o circuito exatamente acima de Z_L , como mostrado na figura 3.6, e determinando-se o circuito equivalente de Thevenin do sistema nestes terminais (5 e 1). O circuito aberto de tensão nos terminais pode ser encontrado através do uso da Lei de Faraday:

$$\oint_C \mathbf{E}_p \cdot d\mathbf{l} = - \frac{\partial}{\partial t} \int_S \mathbf{B}_p \cdot d\mathbf{s}$$

$$\oint_C \mathbf{E}_p \cdot d\mathbf{l} = - j\omega \int_S \mathbf{B}_p \cdot d\mathbf{s} = - j\omega \mu_0 \int_S \mathbf{H}_p \cdot d\mathbf{s} \quad (3.19)$$

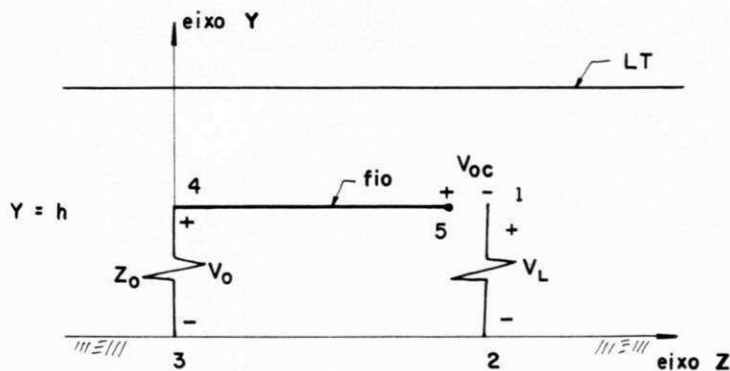


Figura 3.6
Circuito equivalente usado para determinar o circuito de Thevenin para o exemplo da figura 3.5.

Onde S é a superfície da área do caminho como mostra a figura 3.5 e C é o contorno do caminho. O subscrito p indica que os campos são perturbados ou alterados pela presença do fio.

O lado esquerdo da equação (3.19) representa a soma das quedas de tensão em redor do caminho. Então (3.19) pode ser escrita como:

$$-V_o + V_{45} + V_{oc} + V_L + V_{23} = - j\omega \mu_0 \int_S \mathbf{H}_p \cdot d\mathbf{s} \quad (3.20)$$

Onde, por exemplo:

$$V_o = - \int_3^4 \mathbf{E}_p \cdot d\mathbf{l}$$

Para fios com pequenas alturas elétricas, V_O é a queda de tensão entre os pontos 3 e 4 da figura 3.6, e V_L é a queda de tensão entre os pontos 1 e 2. V_{45} é a queda de tensão ao longo do fio, que pode ser desprezada, e V_{23} é também zero para um solo perfeito. Então, a equação torna-se:

$$-V_O + V_{OC} + V_L = -j \omega \mu_0 \int_S H_p \cdot ds \quad (3.21)$$

Desde que, a superfície S representa a superfície do caminho fechado, a integral representa o fluxo magnético total que passa através do caminho. Note que, para fios de comprimento L pequeno no circuito aberto, a corrente induzida é muito pequena comparada com a corrente de carga, se o circuito estiver em aberto. Desta forma, o campo magnético usado para calcular a integral em (3.21) é simplesmente o campo magnético de uma linha como dado pela equação (3.17). Então, pode-se assumir que $H_p = H_U$, ou seja, pode-se desprezar o efeito da presença do fio.

Contudo, para o campo elétrico, não se pode desprezar a presença do fio, porque as cargas induzidas nele em aberto, contribuem significativamente para o campo elétrico total. Assim, $E_p \neq E_U$ para as equações (3.19), (3.16) e (3.18). O cálculo das tensões V_O e V_L pode ser feito com a utilização do circuito da figura 3.7. De acordo com o modelo, se $C_m \ll C_w$, então [5]:

$$V_O \approx \frac{j\omega C_m L Z_0}{1 + j\omega C_w L Z_0} V_S(Z) \quad (3.22)$$

Onde:

- C_m - capacitância por unidade de comprimento entre a linha e o fio;
- C_w - capacitância por unidade de comprimento entre o fio e o solo

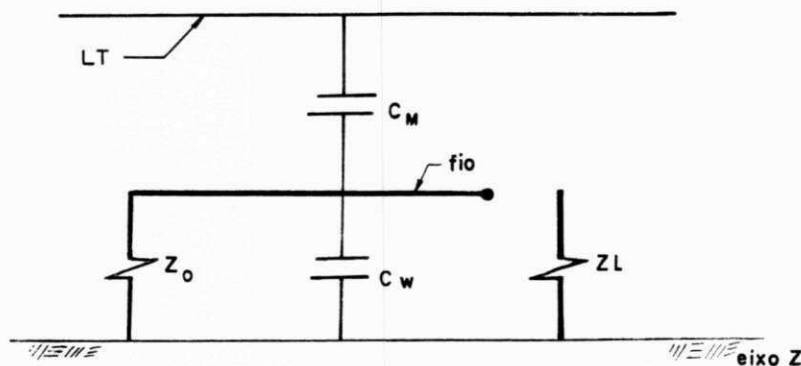


Figura 3.7
Circuito equivalente usado para determinar V_O e V_L

A tensão V_L é desprezível sob condições de circuito aberto, já que a capacitância entre a linha e Z_L é muito pequena comparada a capacitância entre a linha e Z_0 , mais o fio ligado a ele. Desta forma, pode-se escrever [5]:

$$V_{oc} \approx \frac{j\omega C_m L Z_0}{1 + j\omega C_w L Z_0} V_s(Z) - j\omega \mu_0 \int_S H_p \cdot ds \quad (3.23)$$

A impedância de Thevenin do sistema, medidos entre os terminais 1 e 5 do circuito considerado, é:

$$Z_{th} = \frac{Z_0 + Z_L + j\omega C_w L Z_0 Z_L}{1 + j\omega C_w L Z_0} \quad (3.24)$$

Se o circuito aberto é curto-circuitado, como na figura 3.5, então a tensão através de Z_L é:

$$V_L = Z_L \cdot I_L \quad (3.25)$$

Observa-se que I_L é idêntica a corrente de curto-circuito que flui através dos terminais. Portanto, a tensão induzida é [5]:

$$V_L = \frac{Z_L + j\omega C_w L Z_0 Z_L}{Z_0 + Z_L + j\omega C_w L Z_0 Z_L} \left[\frac{j\omega C_m L Z_0}{1 + j\omega C_w L Z_0} V_s(Z) - j\omega \mu_0 \int_S H_p \cdot ds \right] \quad (3.26)$$

O primeiro termo da equação (3.26) representa o "acoplamento capacitivo" ou "acoplamento do campo elétrico". É um efeito de tensão, desde que, é proporcional a tensão da LT. O segundo termo representa o "acoplamento indutivo" ou "acoplamento do campo magnético". É um efeito de corrente, desde que, de acordo com a equação (3.17), o campo magnético é proporcional a corrente da LT. Estes dois efeitos podem efetivamente ser superpostos para determinadas situações.

3.2.1 - Acoplamento Capacitivo

O segmento 4-5 da figura 3.6, pode representar um fio de cerca, um veículo, uma tubulação, etc. Z_0 pode representar a impedância de fuga entre o objeto e a terra, enquanto Z_L representa a impedância de uma pessoa tocando o objeto.

Da equação (3.26), se [5]:

$$\frac{j\omega C_m L Z_0}{1 + j\omega C_w L Z_0} V_S(Z) \gg j\omega \mu_0 \int_S H_p \cdot ds \quad (3.27)$$

então, o acoplamento indutivo é pequeno, comparado com o acoplamento capacitivo. Assim, a tensão no objeto antes da pessoa tocá-lo é [5]:

$$V_{oc} \approx \frac{j\omega C_m L Z_0}{1 + j\omega C_w L Z_0} V_S(Z) \quad (3.28)$$

A corrente através de uma pessoa tocando o objeto (corrente de contato), é:

$$I_L = \frac{V_{oc}}{Z_{th}^c} = \frac{1 + j\omega C_w L Z_0}{Z_0 + Z_L + j\omega C_w L Z_0 Z_L} \left[\frac{j\omega C_m L Z_0}{1 + j\omega C_w L Z_0} V_S(Z) \right] \quad (3.29)$$

Onde Z_{th}^c , é a impedância equivalente de Thevenin para o acoplamento capacitivo e é a combinação paralela de $C_w L$ e Z_0 , mais Z_L .

Se o objeto é isolado do solo ($Z_0 = \infty$), a combinação paralela de impedância é $1/j\omega C_w L$, e é muito maior que Z_L (1000 ohms). Assim, a corrente de contato não é apreciavelmente influenciada por Z_L e esta corrente pode ser aproximada pela corrente de curto-circuito do objeto ($Z_L = 0$).

3.2.2 - Acoplamento Indutivo

Se existe um pequeno aterramento do objeto no campo eletromagnético (Z_0 é pequeno), o acoplamento indutivo predomina. A tensão de circuito aberto é [5]:

$$V_{oc} = -j\omega \mu_0 \int_S H_p \cdot ds \quad (3.30)$$

Desde que a corrente induzida no circuito aberto (que é eletricamente curto) é muito pequena comparada com a corrente da linha [5],

$$\oint_C \mathbf{E}_u \cdot d\mathbf{l} = -j\omega \mu_0 \int_S \mathbf{H}_p \cdot d\mathbf{s} \quad (3.31)$$

De acordo com a figura 3.6,

$$\oint_C \mathbf{E}_u \cdot d\mathbf{l} = \int_0^h E_{uy}(Z=0) dy - \int_0^h E_{uy}(Z=L) dy + \int_0^L E_{uz}(y=h) dz \quad (3.32)$$

Resolvendo, vem:

$$\oint_C \mathbf{E}_u \cdot d\mathbf{l} = \frac{C_m}{C_w} \frac{\partial V_s}{\partial Z} \cdot L + \left[-\frac{C_m}{C_w} \frac{\partial V_s}{\partial Z} + j\omega L_m I_s \right] \cdot L \quad (3.33)$$

Por fim:

$$\oint_C \mathbf{E}_u \cdot d\mathbf{l} = -j\omega \mu_0 \int_S \mathbf{H}_p \cdot d\mathbf{s} = j\omega L_m I_s(Z) L \quad (3.34)$$

A passagem da equação (3.32) para a (3.33) pode ser calculada pela substituição da equação (3.16) nas integrais ao longo dos caminhos verticais da equação (3.32), pelo uso da definição de C_m/C_w [5], e a seguinte aproximação:

$$\frac{\partial V_s}{\partial Z} = \frac{V_s(L) - V_s(0)}{L} \quad (L \ll \lambda)$$

O termo $j\omega L_m I_s(Z)$ é um campo elétrico equivalente longitudinal que está explicitamente relacionado ao fluxo magnético variando através da superfície S , limitada pelo fio e com retorno pelo solo. Assim, quando o acoplamento magnético domina, V_{oc} (tensão no fio antes de uma pessoa tocá-lo) é igual ao campo elétrico longitudinal (E_0) vezes o comprimento do fio (L). Isto pode ser escrito como:

$$V_{oc} = E_0 \cdot L = j\omega L_m I_s(Z) L \quad (3.35)$$

Ressalta-se que o resultado da equação (3.35) é válido somente para objetos eletricamente curtos.

Para se determinar a corrente através de uma pessoa tocando o fio, deve-se encontrar a impedância equivalente de Thevenin para o acoplamento indutivo (Z_{th}^i):

$$Z_{th}^i = Z_o \parallel \frac{1}{j\omega C_w L} + Z_L + Z_w \cong Z_o + Z_L + Z_w$$

Onde Z_w é a impedância série do fio, que neste caso deve ser considerada, pois pode ter o mesmo módulo de Z_o . Daí:

$$I_L = \frac{V_{oc}}{Z_{th}^i} \cong \frac{1}{Z_o + Z_L + Z_w} [-j\omega L_m I_s(Z) L]$$

3.3 - INTERFERÊNCIAS ELÉTRICAS A SEREM CONSIDERADAS

Quando uma tubulação metálica está construída próxima a uma linha de transmissão, os acoplamentos resistivo, indutivo e capacitivo provocam o aparecimento de tensões e correntes na tubulação, as quais devem ser controladas com o objetivo de evitar choques em pessoas ou danificação na própria tubulação.

Conforme discutido nos itens 3.1 e 3.2, dependendo da configuração física da tubulação (aérea ou enterrada), pode-se ter situações em que apenas um ou, no máximo, dois acoplamentos se fazem sentir. Outro aspecto que influencia o nível da interferência LT - tubulação, é a condição de operação da linha de transmissão: em regime permanente ou em regime de curto-circuito.

Estando a linha operando em regime permanente, deve-se analisar:

- Se a tubulação ou um trecho da tubulação é aérea e isolada do solo, o acoplamento capacitivo predomina; se é aérea e aterrada, o acoplamento indutivo predomina;
- Se a tubulação ou um trecho da tubulação é enterrada, o acoplamento indutivo predomina (a resistência de fuga da tubulação já é suficiente para aterrar a tubulação e minimizar o acoplamento capacitivo);
- Em qualquer situação não existe o acoplamento resistivo, porque não há injeção de corrente no solo.

Se ocorrer um curto-circuito na linha de transmissão, é necessário se analisar:

- Para uma tubulação ou trecho de tubulação enterrada ou aérea aterrada, os acoplamentos resistivo e indutivo;

- Para tubulação aérea isolada, o acoplamento capacitivo, que predomina sobre o acoplamento indutivo, não precisa ser analisado.

De acordo com as considerações feitas, pode-se esboçar a tabela 3.1 que resume as análises que necessitam ser feitas para o levantamento das interferências elétricas de uma LT em tubulações próximas.

Características da Tubulação	Riscos a Verificar	Grandezas a Calcular	Acoplamento Responsável	Condição Operativa do Sistema Elétrico
Aérea isolada do Solo	Choque Elétrico	Energia das Descargas Capacitivas Corrente de choque	Capacitivo	Regime Permanente
Aérea	Danificação de Juntas Isolantes	Solicitação Elétrica Aplicada às Juntas Isolantes.	Indutivo e Resistivo	Curto-Circuito
Aérea aterrada	Choque Elétrico	Corrente de Choque ou Tensão de Toque	Indutivo e Resistivo	Curto-circuito Regime Permanente (correntes desequilibradas)
Enterrada	Danificação da Tubulação e do seu Revestimento	Solicitação Elétrica Aplicada ao Revestimento	Indutivo e Resistivo	Curto-circuito
Enterrada	Danificação de Juntas Isolantes e Sist. Prot. Catódica	Solicitação Elétrica Aplicada a Estes Dispositivos	Indutivo e Resistivo	Curto-circuito

Tabela 3.1

Análises a serem efetuadas para levantamento das interferências elétricas de uma LT em tubulações próximas

CAPÍTULO 4

4. - METODOLOGIA PARA O CÁLCULO DOS ACOPLAMENTOS

A seguir, é apresentada a metodologia de cálculo utilizada na determinação das tensões induzidas devido aos acoplamentos resistivo, indutivo e capacitivo.

4.1 - ACOPLAMENTO RESISTIVO

Ocorrendo uma falta fase-terra numa estrutura de uma linha, haverá injeção de corrente no solo através de todas as malhas de terra das estruturas da linha, cujo valor é tipicamente maior no ponto de falta, diminui nas estruturas sucessivas em direção a ambos os terminais da linha e finalmente, aumenta nas estruturas próximas às SE's.

Desta forma, o potencial criado em um ponto qualquer do solo, próximo a uma linha de transmissão, será igual ao somatório dos potenciais criados no referido ponto devido a injeção de corrente no solo, feita por cada uma das estruturas da linha. Para efeitos práticos, é suficiente se considerar apenas os potenciais criados pelas estruturas mais próximas ao ponto de cruzamento com a tubulação.

4.1.1. - Cálculo do Potencial Induzido em um Ponto Qualquer do Solo por um Eletrodo Segmentado.

Um sistema de eletrodos quaisquer, composto de condutores lineares, pode ser subdividido num número razoavelmente pequeno de segmentos. Já que o solo é considerado um meio linear e o potencial é uma grandeza escalar, o potencial induzido em qualquer ponto do solo ou da superfície do eletrodo será a soma dos potenciais provocados pela associação individual das correntes de cada elemento que forma o eletrodo. A densidade de corrente de dispersão para o solo pode ser considerada constante sobre cada segmento e pode variar de um segmento para outro, com a finalidade de satisfazer as condições de contorno de que o potencial na superfície do condutor deve ser constante.

A corrente total I dissipada por uma malha de comprimento total L , pode ser dividida entre os n segmentos retos j ($j=1, 2, \dots, n$) de comprimento $l_j \ll L$. Portanto, as seguintes relações são válidas:

$$L = \sum_{j=1}^n l_j \quad (4.1)$$

$$I = \sum_{j=1}^n I_j \quad (4.2)$$

$$i = \frac{I}{L} \quad (4.3)$$

$$i_j = i \cdot S_j \quad (4.4)$$

$$i_j = \frac{I_j}{l_j} \quad (4.5)$$

$$L = \sum_{j=1}^n S_j \cdot l_j \quad (4.6)$$

Onde,

I_j - corrente de dispersão do segmento "j";

i - densidade linear média de corrente;

i_j - densidade linear real de dispersão do segmento "j";

S_j - fator de distribuição da densidade de corrente de dispersão do segmento "j".

Para um eletrodo dividido em n segmentos, pode-se escrever as seguintes equações [3]:

$$V_p = \sum_{j=1}^n G(P, C_j) \cdot I_j \quad (4.7)$$

Onde,

V_p - potencial induzido no ponto P ;

I_j - corrente dissipada no centro geométrico C_j do segmento j ;

$G(P, C_j)$ - valor médio da função de Green [3], que pode ser vista como o potencial induzido no ponto P pelo fluxo de corrente unitária saindo do eletrodo no ponto C_j .

Para um ponto P localizado na superfície do segmento i , a função $G(P, C_j)$ representa a resistência mútua $R_{i,j}$ entre os segmentos i e j , definido como:

$$R_{i,j} = \frac{V_i(I_j)}{I_j} \quad ; \quad I_i = 0, \quad i \neq j \quad (4.8)$$

Se o ponto P se localiza na superfície do próprio segmento j , a função $G(P, C_j)$ representa a resistência própria definida como:

$$R_{j,j} = \frac{V_j(I_j)}{I_j} \quad (4.9)$$

Assim, a equação (4.7) também pode ser escrita como:

$$V_i = \sum_{j=1}^n R_{i,j} \cdot I_j, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4.10)$$

Considerando que o potencial $V_{i,j}$ é induzido no centro do segmento devido a corrente de dispersão média I_j dissipada pelo segmento j , equação (4.7), de acordo com o Método de Dawalibi-Mukhedkar [19], pode-se escrever:

$$V_i = \sum_{j=1}^n V_{i,j} \cdot S_j, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4.11)$$

Como a tensão induzida em cada segmento de eletrodo pode ser expressa por uma equação, n equações simultâneas podem ser escritas para um eletrodo dividido em n segmentos. Expressando estas equações na forma matricial, vem [3]:

$$[V] = [R] \cdot [I] \quad (4.12)$$

Onde,

$$[V] = [V_1, V_2, \dots, V_n]^T$$

$$[I] = [I_1, I_2, \dots, I_n]^T$$

e

$$[R] = (R_{i,j}) - \text{matriz de resistências}$$

Considerando que todos os segmentos são partes de um mesmo eletrodo e desprezando a diferença de potencial que aparece entre os segmentos, pode-se assumir que o potencial em todos os segmentos são iguais ao potencial do eletrodo original V_g , com respeito a um ponto remoto do solo. Portanto,

$$V_i = V_g, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4.13)$$

Assim,

$$[I] = V_g \cdot [R]^{-1} \quad (4.14)$$

O potencial original do eletrodo de terra é:

$$V_g = R_g \cdot I \quad (4.15)$$

Para a determinação de R_g , resistência da malha de terra, calculam-se as correntes I_j dos segmentos associados a tensão unitária $V_g=1$, pela solução da equação (4.14), a resistência de aterramento da malha é então:

$$R_g = \left[\sum_{j=1}^n I_j \right]^{-1} \quad (4.16)$$

O desempenho dos parâmetros da malha de aterramento, como tensões de toque, passo e transferência, são determinados pela distribuição de potencial e resistência de aterramento dos eletrodos. O potencial produzido em algum ponto $P(x,y,z)$ do solo é dado por:

$$V(x,y,z) = \sum_{j=1}^n V_j(x,y,z), \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (4.17)$$

Onde,

$V_j(x,y,z)$ - é o potencial produzido no ponto $P(x,y,z)$ pela corrente I_j dissipada no solo pelo segmento linear j do eletrodo de terra.

4.1.2 - Cálculo das Resistências Próprias e Mútuas

A solução da equação (4.14) só é possível após a determinação da matriz de resistências $[R]$ que é função da forma, tamanho, arrumação dos eletrodos e características do solo. Nesta parte do trabalho, apresentam-se as equações que foram utilizadas para o cálculo das resistências próprias e mútuas que compõem a matriz de resistências $[R]$.

4.1.2.1 - Potencial Induzido de um Ponto Qualquer do Solo por um Condutor Linear Enterrado.

Considere-se um condutor linear de comprimento L_s localizado entre os pontos $A(x_1, y_1, z_1)$ e $B(x_2, y_2, z_2)$, dissipando uma corrente I num solo homogêneo de resistividade elétrica ρ , como mostrado na figura 4.1.

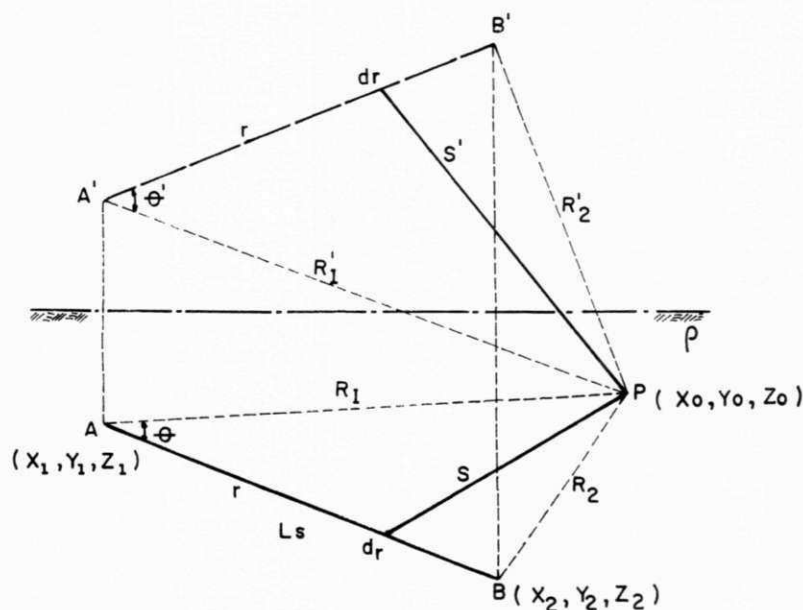


Figura 4.1
Segmento enterrado num solo homogêneo

A corrente dissipada pelo condutor e sua imagem, induz no ponto $P(x_0, y_0, z_0)$ do solo, um potencial [4]:

$$V_P = \frac{\rho I}{4 \pi L_s} \left[\int_0^{L_s} \frac{dr}{S} + \int_0^{L_s} \frac{dr}{S'} \right] \quad (4.18)$$

Onde,

$$S = (r^2 + R_1^2 - 2rR_1 \cos \theta)^{1/2} \quad (4.18a)$$

$$S' = (r^2 + R_1'^2 - 2rR_1' \cos \theta')^{1/2} \quad (4.18b)$$

$$\cos \theta = \frac{R_1^2 + L_s^2 - R_2^2}{2 L_s R_1} ; \quad \cos \theta' = \frac{R_1'^2 + L_s^2 - R_2'^2}{2 L_s R_1'}$$

$$R_2 = [(R_1^2 + L_s^2 - 2R_1 L_s \cos \theta)^{1/2}]$$

$$R_1 = [(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 + (z_1 - z_0)^2]^{1/2}$$

$$R_2 = [(x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2 + (z_2 - z_0)^2]^{1/2}$$

$$R_1' = [(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 + (z_1 + z_0)^2]^{1/2}$$

$$R_2' = [(x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2 + (z_2 + z_0)^2]^{1/2}$$

Substituído-se as equações (4.18a) e (4.18b) em (4.18) e integrando-se, encontra-se o potencial induzido no ponto $P(x_0, y_0, z_0)$ [4].

$$V_p = \frac{I \rho}{4 \pi L_s} \left(\ln \left[\frac{L_s - R_1 \cos \theta + (R_1^2 + L_s^2 - 2L_s R_1 \cos \theta)^{1/2}}{R_1 (1 - \cos \theta)} \right] \right. \\ \left. + \ln \left[\frac{L_s - R_1' \cos \theta' + (R_1'^2 + L_s^2 - 2L_s R_1' \cos \theta')^{1/2}}{R_1' (1 - \cos \theta')} \right] \right) \quad (4.19)$$

4.1.2.2 - Resistência Mútua Entre Dois Condutores Que Formam um Ângulo Qualquer.

No caso do ponto P se localizar na superfície de um condutor K de comprimento L_k , o potencial médio induzido no condutor K por uma corrente unitária dissipada por outro condutor S de comprimento L_s , pode ser expresso como [4]:

$$V_{s,k} = \frac{\rho}{4 \pi L_s} \left(\frac{1}{L_k} \int_0^{L_k} \ln \left[\frac{L_s - R_1 \cos \theta + (R_1^2 + L_s^2 - 2R_1 L_s \cos \theta)^{1/2}}{R_1 (1 - \cos \theta)} \right] dp \right. \\ \left. + \frac{1}{L_k} \int_0^{L_k} \ln \left[\frac{L_s - R_1' \cos \theta' + (R_1'^2 + L_s^2 - 2R_1' L_s \cos \theta')^{1/2}}{R_1' (1 - \cos \theta')} \right] dp \right) \quad (4.20)$$

$$R_{s,k} = \frac{\rho}{4\pi L_s L_k} [M + M_1] \quad (4.20a)$$

$R_{s,k}$, é definido como a resistência mútua entre os condutores S e K.

Considera-se que os condutores S e K tem comprimentos L_s e L_k , que estão enterrados num solo homogêneo de resistividade ρ , como mostrado na figura 4.2, e que o condutor S dissipa uma corrente unitária para o solo.

Da figura 4.2, tem-se:

$$R_1 = (p^2 + a^2 + 2ap \cos \lambda)^{1/2}$$

$$R_2 = (p^2 + b^2 - 2 b p \cos \alpha)^{1/2}$$

$$R_1 \cos \theta = a \cos \beta + p \cos \lambda$$

$$b \cos \alpha = L_s \cos \lambda - a \cos \lambda$$

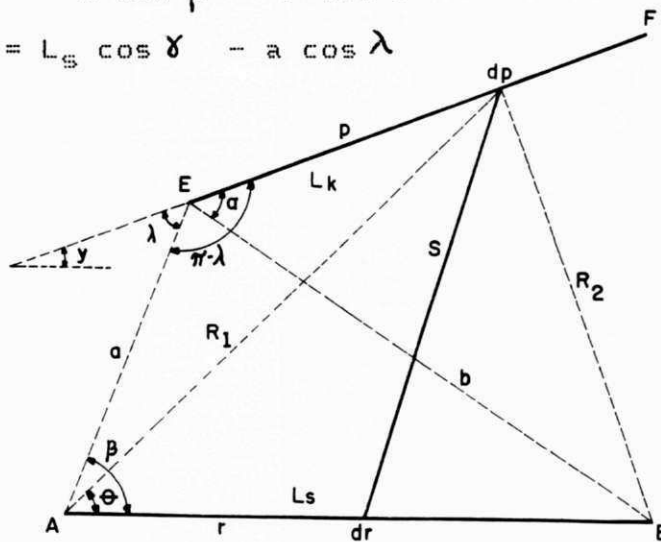


Figura 4.2
Representação de dois segmentos quaisquer

Então,

$$M = \int_0^{L_k} L_n \left[\frac{L_s - R_1 \cos \theta + R_2}{R_1 (1 - \cos \theta)} \right] dp \quad (4.20b)$$

Resolvendo-se e simplificando-se a equação (4.20b), encontra-se:

$$\begin{aligned}
M = & (L_s - x + \frac{y \cos \gamma}{\sin \gamma}) \operatorname{Ln} \left[\frac{BF + L_k + y \sin \gamma - (L_s - x) \cos \gamma}{BE + y \sin \gamma - (L_s - x) \cos \gamma} \right] - \\
& - \left(\frac{y \cos \gamma}{\sin \gamma} - x \right) \operatorname{Ln} \left[\frac{AF + L_k + y \sin \gamma + x \cos \gamma}{AE + y \sin \gamma + x \cos \gamma} \right] + \\
& + \left(\frac{y}{\sin \gamma} + L_k \right) \operatorname{Ln} \left[\frac{BF + L_s - (x + L_k \cos \gamma)}{AF - (x + L_k \cos \gamma)} \right] - \\
& - \frac{y}{\sin \gamma} \operatorname{Ln} \left[\frac{BE + L_s - x}{AE - x} \right] + \frac{2Z}{\sin \gamma} U
\end{aligned}$$

Onde:

$$U = 0,$$

se

$$Z = 0, \text{ ou}$$

$$\begin{aligned}
U = & \tan^{-1} \left[\frac{(BF + L_k + L_s - x) \tan(\gamma/2) + y}{Z} \right] - \\
& - \tan^{-1} \left[\frac{(BE + L_s - x) \tan(\gamma/2) + y}{Z} \right] - \\
& - \tan^{-1} \left[\frac{(AF + L_k - x) \tan(\gamma/2) + y}{Z} \right] + \\
& + \tan^{-1} \left[\frac{(AE - x) \tan(\gamma/2) + y}{Z} \right] \quad (4.21)
\end{aligned}$$

para algum $Z \neq 0$

sendo,

AE, BE, AF, BF - módulos dos segmentos

$$x = a \cos \beta$$

$$y = (a \cos \lambda - a \cos \beta \cos \gamma) / \sin \gamma$$

$$a \cos \lambda = x \cos \gamma + y \sin \gamma$$

$$Z = (a^2 - x^2 - y^2)^{1/2}$$

O valor de M_i pode ser determinado usando a equação (4.21), desde que sejam consideradas as distâncias a , b , R_1 e R_2 referidas entre o condutor K e a imagem do condutor S.

No caso dos segmentos S e K serem perpendiculares, a resistência mútua pode ser calculada com a utilização da equação (4.21), fazendo-se $\gamma = 90^\circ$.

4.1.2.3 - Resistência Mútua Entre Dois Condutores Paralelos

Considere-se dois condutores paralelos S e K mostrados na figura 4.3, quando o condutor S dissipa uma corrente unitária para o solo.

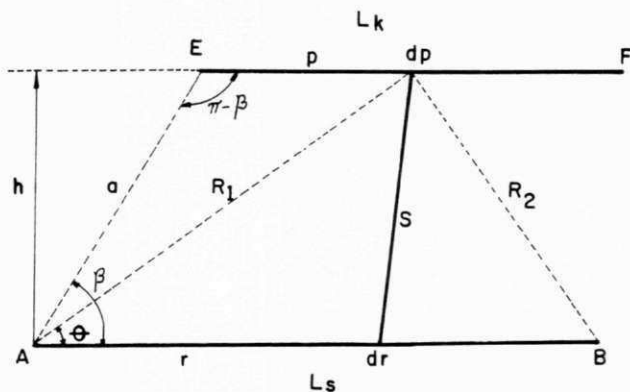


Figura 4.3
Representação de dois segmentos paralelos

Da geometria da figura 4.3, vem [4]:

$$R_1 \cos \theta = a \cos \beta + p$$

$$R_1 = (a^2 + p^2 + 2ap \cos \beta)^{1/2}$$

Então,

$$M = \int_0^{L_k} \ln \left(\frac{p + a \cos \beta + [(p + a \cos \beta)^2 + a^2 \sin^2 \beta]^{1/2}}{p + a \cos \beta - L_s + [(p + a \cos \beta - L_s)^2 + a^2 \sin^2 \beta]^{1/2}} \right) dp \quad (4.22)$$

Resolvendo-se e simplificando-se a equação (4.22), encontra-se:

$$\begin{aligned} M = & L_s \ln \left(\frac{[(x + L_k - L_s)^2 + h^2]^{1/2} + x + L_k - L_s}{[(x - L_s)^2 + h^2]^{1/2} + x - L_s} \right) + \\ & + (x + L_k) \ln \left(\frac{[(x + L_k - L_s)^2 + h^2]^{1/2} - (x + L_k - L_s)}{[(x + L_k)^2 + h^2]^{1/2} - (x + L_k)} \right) - \\ & - x \ln \left(\frac{[(x - L_s)^2 + h^2]^{1/2} - (x - L_s)}{(x^2 + h^2)^{1/2} - x} \right) + \\ & + [(x + L_k - L_s)^2 + h^2]^{1/2} - [(x - L_s)^2 + h^2]^{1/2} - \\ & - [(x + L_k)^2 + h^2]^{1/2} + [x^2 + h^2]^{1/2} \quad (4.23) \end{aligned}$$

Onde:

$$x = a \cos \beta$$

$$h = a \sin \beta \quad (h > a'); \quad a' = \text{raio do condutor}$$

Para a determinação de M_i (efeito da imagem do condutor S), considera-se as distâncias apropriadas para h , a , R_1 e R_2 .

4.1.2.4 - Resistência Própria de um Segmento

A resistência própria de um segmento qualquer pode ser tratada como um caso especial de dois segmentos paralelos [4]. Portanto:

$$L_s = L_k = L$$

$$x = 0$$

$$h = a'$$

sendo:

a' - raio do condutor

logo,

$$M = 2L \left(\ln \left[\frac{(L^2 + a'^2)^{1/2} + L}{a'} \right] - \frac{(L^2 + a'^2)^{1/2} - a'}{L} \right) \quad (4.24)$$

e

$$M_i = 2L \left(\ln \left[\frac{(L^2 + h^2)^{1/2} + L}{h} \right] - \frac{(L^2 + h^2)^{1/2} - h}{L} \right) \quad (4.25)$$

4.1.2.5 - Resistências Próprias e Mútuas para Solo Estratificado em duas Camadas.

Se o solo é constituído de duas camadas, a camada superior com resistividade ρ_1 e espessura H e a camada inferior com resistividade ρ_2 e espessura infinita, existe um número infinito de imagens as quais geram valores de resistência mútua M_i que decrescem em amplitude. No desenvolvimento computacional, em vez de chamar a sub-rotina para cálculo da resistência mútua duas vezes, é necessário chamá-la várias vezes, com o crescimento dos valores de Z , até que a magnitude dos incrementos M devido as imagens sejam bastante pequenas que possam ser desprezadas [3].

O fator de reflexão é dado por:

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (4.26)$$

No presente trabalho, tendo em vista a pequena

No presente trabalho, tendo em vista a pequena profundidade em que os eletrodos das malhas de terra são normalmente enterrados (eletrodos horizontais), será considerado apenas o caso em que ambos os segmentos estejam na camada superior e a análise é baseada na referência [3]. Tomando Z positivo na direção para dentro do solo e considerando os segmentos horizontais i e j localizados nas profundidades Z_i e Z_j abaixo da superfície, respectivamente, e ambos na camada superior do solo. Se o segmento j dispersa I_j ampéres, o segmento i verá não somente o segmento j na coordenada Z_j , mas também uma imagem refletida, em relação a superfície do solo, na coordenada $-Z_j$. Esta imagem também aparecerá dispersando I_j ampéres. A distância vertical destas duas fontes do segmento i são $Z_j - Z_i$ e $Z_j + Z_i$.

O segmento j e a sua imagem serão ambos refletidos no interface entre as duas camadas, aparecendo como segmentos injetando correntes de $K \cdot I_j$ ampéres. Estas reflexões estão nas coordenadas $2H - Z_j$ e $2H + Z_j$, respectivamente. Estas duas últimas imagens referidas, serão refletidas com igual intensidade pelo topo da superfície do solo, aparecendo nas coordenadas $-2H + Z_j$ e $-2H - Z_j$, respectivamente. A distância vertical destas quatro últimas imagens referidas ao segmento i são $2H - Z_j - Z_i$, $2H + Z_j - Z_i$, $2H - Z_j + Z_i$ e $2H + Z_j + Z_i$. A continuação deste processo leva a seguinte equação, para resistência mútua do segmento j como visto pelo segmento i , isto é, a tensão produzida no segmento i por ampére de dispersão do segmento j .

$$R_m = \frac{\rho}{4\pi L_1 L_2} \left(\sum_{n=0}^{\infty} K^n [M(2nH + Z_j + Z_i) + M(2nH + Z_j - Z_i)] + \sum_{n=1}^{\infty} K^n [M(2nH - Z_j + Z_i) + M(2nH - Z_j - Z_i)] \right) \quad (4.27)$$

Onde, $M(Z)$ é a função de Z definida previamente, M é, naturalmente, também uma função de x e y , do comprimento dos segmentos e do ângulo θ .

Num solo homogêneo $K = 0$. Todos os termos acima são desprezados, exceto para $n = 0$. Assim, a equação (4.27) se reduz a:

$$R_m = \frac{\rho}{4\pi L_1 L_2} [M(Z_i + Z_j) + M(Z_i - Z_j)] \quad (4.28)$$

A equação (4.28) é a resistência mútua de dois segmentos adicionada a resistência mútua entre um segmento e a imagem do outro.

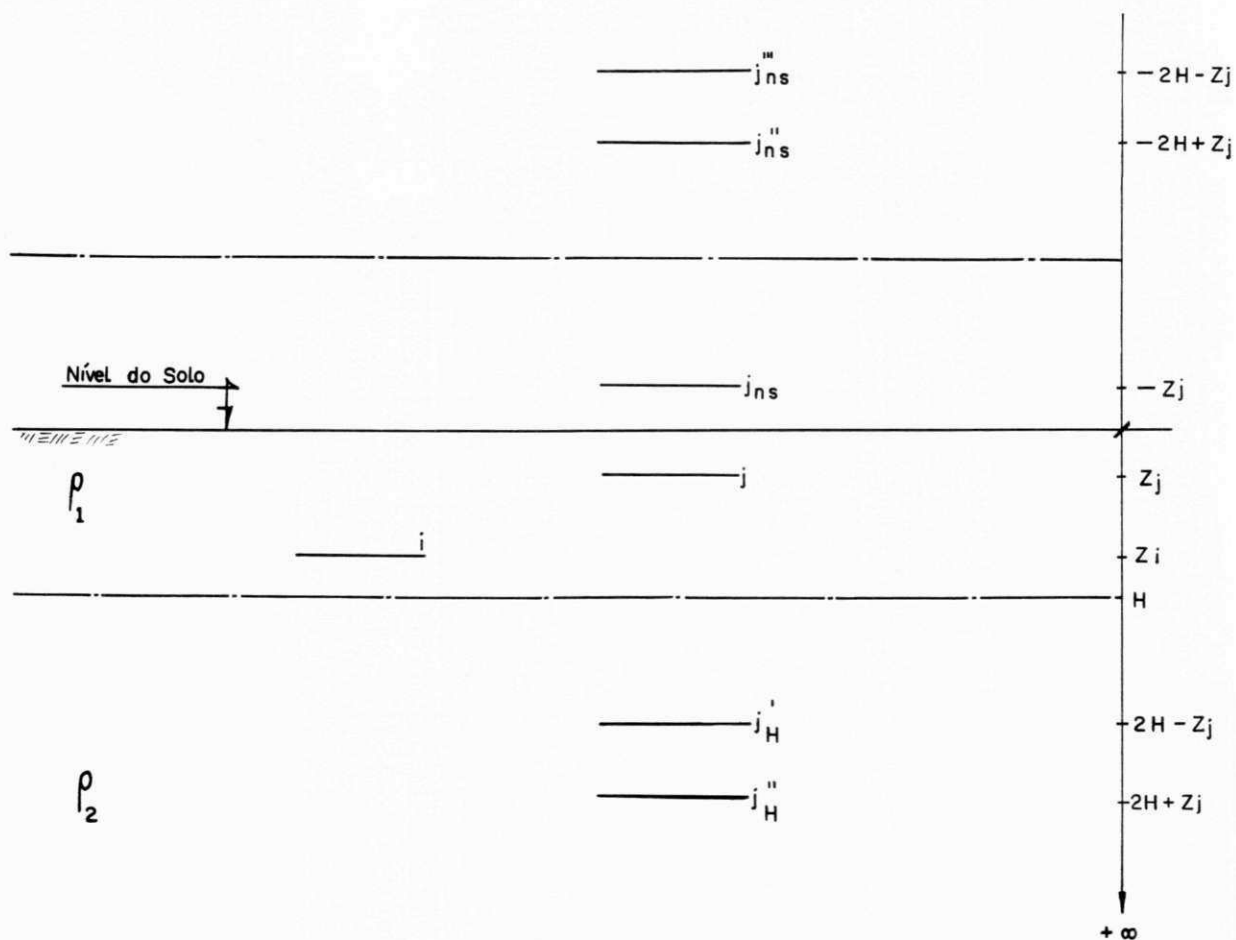


Figura 4.4
Localização dos segmentos e das imagens em relação ao nível do solo (N.S) e a interface (H) para um solo extratificado em 2 camadas.

4.1.3 - Cálculo do Perfil de Tensão Induzida em Tubulações Metálicas - Acoplamento Resistivo.

A técnica de cálculo do perfil de tensão induzida em tubulações metálicas localizadas próximas às linhas de transmissão, devido ao acoplamento resistivo, será o método desacoplado, ou seja, o levantamento dos potenciais ao longo do traçado desta instalação, é feito sem se considerar a presença do objeto. Desta forma, divide-se a tubulação metálica em "n" segmentos de comprimento ΔL . Calcula-se o potencial no solo, próximo do traçado da tubulação, o qual será considerado constante em cada comprimento ΔL .

4.1.3.1 - Tubulação Metálica Enterrada

O circuito equivalente, para um segmento de comprimento ΔL , de uma tubulação metálica enterrada é apresentado na figura 4.5, onde se pode verificar que a fonte de tensão "U" representa a elevação de potencial devido a injeção de corrente no solo.

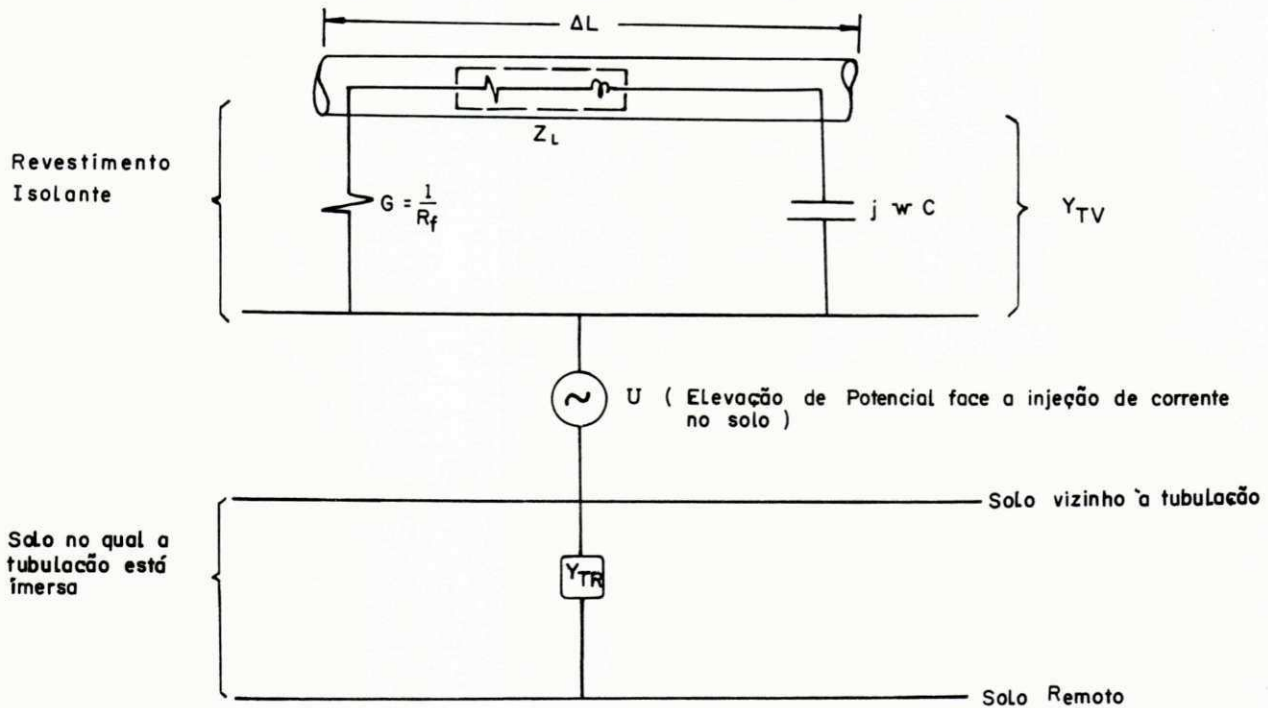


Figura 4.5

Circuito equivalente de um segmento ΔL de tubulação metálica enterrada

De acordo com o capítulo 2, são os seguintes os parâmetros apresentados na figura 4.5:

- Z_L - impedância linear da tubulação (ohms/m);
- Y_{TV} - admitância da tubulação para a terra imediatamente vizinha (mhos/m);
- Y_{TR} - admitância entre a terra imediatamente vizinha a tubulação e um terra remoto (mhos/m);
- U - elevação de potencial devido a injeção de corrente no solo (V);
- G - condutância linear da tubulação para a terra (mhos/m);
- C - capacitância linear da tubulação para a terra (F/m).

O circuito equivalente de um comprimento de tubulação metálica qualquer, enterrada e próxima a uma linha de transmissão na qual ocorre um curto-circuito, em alguma estrutura próxima, pode ser representado pelo seu circuito equivalente multi-pi onde cada circuito tem uma extensão ΔL , conforme apresentado na figura 4.6 a seguir.

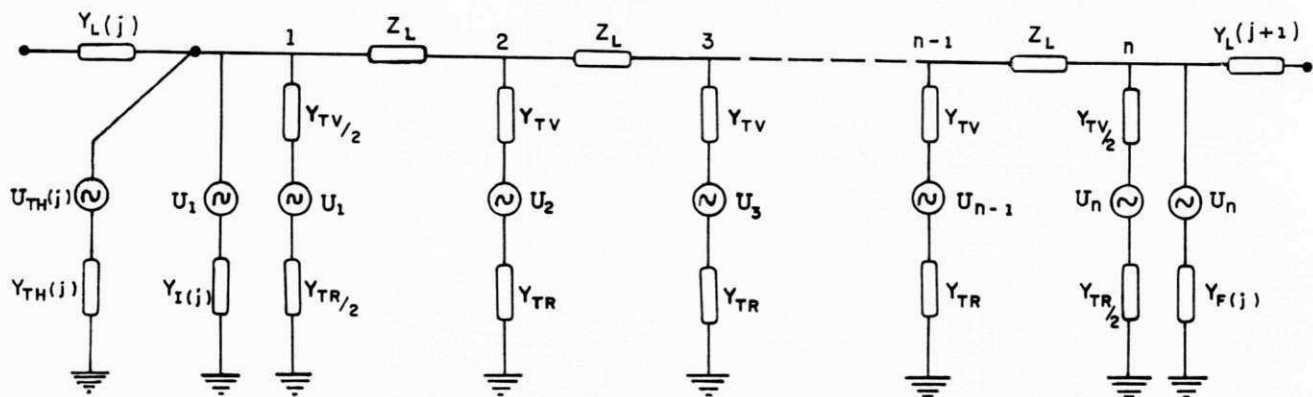


Figura 4.6
Circuito equivalente multi-pi de um trecho de tubulação metálica enterrada.

Onde,

U_i - elevação de potencial nas proximidades do i -ésimo segmento de comprimento ΔL de tubulação devido ao acoplamento resistivo (V);

$Y_L(j), Y_L(j+1)$ - admitâncias de ligação do trecho 'j' aos trechos adjacentes, que podem assumir entre outros, os seguintes valores (mhos):

$Y_L = 1/Z_c$ - o trecho adjacente tem extensão infinita;

$Y_L = 0$ - não existe ligação com outro trecho;

$Y_L = \infty$ - existe ligação com o trecho adjacente;

$Y_I(I), Y_F(j)$ - admitâncias para a terra, no início e no fim do trecho, que podem simular os pontos de aterramento ou o toque de uma pessoa na tubulação (mhos);

$U_{TH}(j), Y_{TH}(j)$ - circuito equivalente de Thevenin, localizado no início do trecho "j", que pode simular ramais de tubulação existentes (V, mhos);

A determinação da tensão em todos os pontos do circuito da figura 4.6, recai num sistema de equações complexas tridiagonal, onde todos os elementos são nulos, exceto a diagonal principal e os elementos situados abaixo e acima desta. Um método de solução deste sistema é apresentado no Anexo A.1, e representa o perfil de tensão ao longo da tubulação metálica.

4.1.3.2 - Tubulação Metálica Aérea

No caso de um comprimento de tubulação metálica aérea qualquer, o circuito equivalente é:

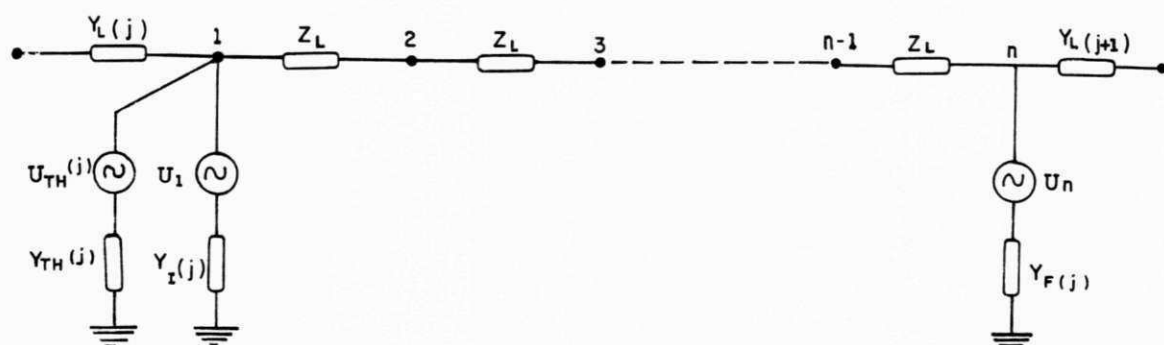


Figura 4.7
Circuito equivalente multi-pi de um trecho de tubulação metálica aérea

Onde,

U_1, U_n - potenciais a serem transferidos no início a fim do trecho de tubulação pelas admitâncias de aterramento (V);

$Y_I(j), Y_F(j)$ - admitâncias para a terra, no início e no fim do trecho, que podem simular os pontos de aterramento ou o toque de uma pessoa na tubulação (mhos);

$Y_L(j), Y_L(j+1)$ - admitância de ligação do trecho "j" aos trechos adjacentes (mhos).

$U_{TH}(j), Y_{TH}(j)$ - circuito equivalente de Thevenin localizado no início do trecho, que pode simular ramais de tubulação existentes (V, mhos).

No circuito da figura 4.7, verifica-se não haver transferência de potencial do solo para o objeto metálico, a não ser pelos pontos de aterramento, já que as admitâncias Y_{TV} e Y_{TP} são muito pequenas, comparadas com os valores das admitâncias de aterramento Y_I e Y_F .

A solução do circuito equivalente multi-pi de uma tubulação aérea, também recai num circuito cuja solução é apresentada no Anexo A.1, e representa o perfil de tensão ao longo desta instalação.

4.2 ACOPLAMENTO INDUTIVO

O acoplamento indutivo entre uma ou várias linhas e uma tubulação metálica situada nas proximidades, deve ser considerado tanto em curto-circuito como em regime permanente, sendo este último mais intensamente perceptível quando existe desequilíbrio nas correntes de fase das linhas de transmissão.

4.2.1 - Cálculo do Campo Elétrico Longitudinal Induzido em um Ponto Qualquer do Espaço.

Um sistema de condutores quaisquer transportando uma corrente elétrica, composto de condutores retilíneos e paralelos ao solo e entre si, é uma fonte de campo eletromagnético. Conforme descrito no capítulo 3, sob certas condições o acoplamento do campo magnético predomina e o campo elétrico longitudinal está explicitamente relacionado ao fluxo magnético, o qual pode ser utilizado para se calcular o acoplamento indutivo.

Na figura 4.8, apresenta-se um desenho esquemático em corte de um corredor de LT's, no qual existe uma tubulação metálica (comprimento do objeto tem que ser muito menor que o comprimento da onda de 60 Hz). Desde que não haja variação na disposição dos condutores de fase e cabos pára-raios, o campo elétrico longitudinal, numa posição fixa em x e y, é constante ao longo do eixo Z.

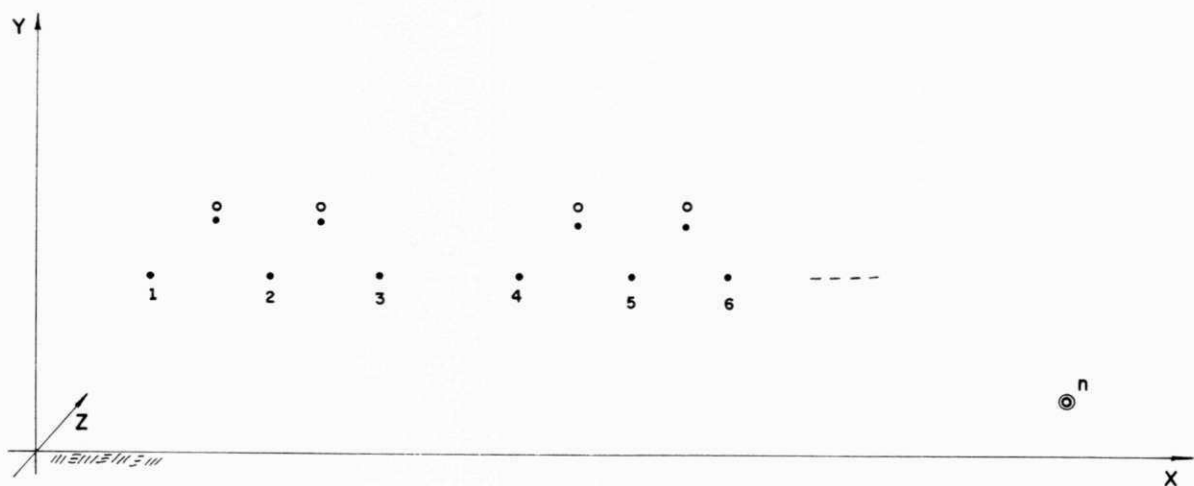


Figura 4.8
Corte transversal do corredor de LT's com uma tubulação

1,2,...,(n-1) - condutores de fase
n - tubulação metálica
o - cabos pára-raios

Em regime permanente, nos cabos pára-raios isolados e seccionados não circulam correntes induzidas e, neste caso, eles são desconsiderados. Em regime de curto-circuito, sempre haverá circulação de correntes nos cabos pára-raios, os quais não podem ser desprezados, quer sejam aterrados ou isolados e seccionados.

Tipicamente, a corrente circulante numa tubulação metálica pode ser considerada desprezível, em comparação com a corrente de fase nos cabos das LT's. A matriz que relaciona as quantidades referenciadas é:

$$\begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \vdots \\ \Delta V_{n-1} \\ E_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{1,1} & Z_{1,2} & \dots & Z_{1,n} \\ Z_{2,1} & Z_{2,2} & \dots & Z_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{n-1,1} & Z_{n-1,2} & \dots & Z_{n-1,n} \\ Z_{n,1} & Z_{n,2} & \dots & Z_{n,n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_{n-1} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.29)$$

Onde:

- ΔV_i - queda de tensão ao longo do cabo "i" (V/km);
- I_i - corrente no cabo "i" (A);
- $Z_{i,j}$ - elementos da matriz [Z] para os cabos físicos (ohms/km);
- E_0 - campo elétrico longitudinal na posição da tubulação metálica (V/km).

O valor do campo elétrico longitudinal E_0 , deve ser determinado para duas situações de operação diferentes: em curto-circuito, onde a corrente nos cabos pára-raios multi-aterrados tem uma componente induzida e outra de condução que retorna às subestações terminais; e em regime permanente, onde as correntes nos pára-raios se deve exclusivamente a indução.

Em curto-circuito monofásico, o campo elétrico longitudinal é bem mais intenso em virtude do desequilíbrio de fase e, também, pela elevada corrente de falta.

Em regime permanente, o campo elétrico longitudinal é menor que no caso anterior, mas deve ser considerado, principalmente, para o caso de haver desequilíbrio de fases ou muitas linhas de transmissão no mesmo corredor.

Nos itens 4.2.1.1 e 4.2.1.2, dá-se detalhes do cálculo do campo elétrico para os casos citados.

a) Elementos da Diagonal

$$Z_{i,i} = R + 0,059 + j 0,064 \ln \left(\frac{85\sqrt{RHO}}{GMR} \right) \text{ ohms/km} \quad (4.31)$$

b) Elementos Fora da Diagonal

$$Z_{i,j} = 0,059 + j 0,064 \ln \left(\frac{85\sqrt{RHO}}{D_{i,j}} \right) \text{ ohms/km} \quad (4.32)$$

Onde,

- R - resistência linear do condutor (ohms/km);
- RHO - resistividade do solo (ohms.m);
- GMR - raio médio geométrico (m);
- $D_{i,j}$ - distância entre o cabo "i" e o cabo "j".

4.2.1.2 - Cálculo do Campo Elétrico Longitudinal em Curto-Circuito.

Tipicamente, ocorrendo um curto-circuito numa linha de transmissão, aproximadamente 10% da corrente de falta é injetada na malha da estrutura defeituosa e 90% transita pelos cabos pára-raios nos vãos adjacentes à falta, sendo 45% para cada lado. A corrente nos cabos pára-raios varia de vão para vão em virtude da injeção de corrente nas diversas estruturas adjacentes à estrutura em falta. Desta forma, o campo elétrico longitudinal varia de vão para vão, já que, embora a corrente de falta na fase defeituosa seja constante, a corrente nos cabos pára-raios varia a cada vão em virtude da corrente que é injetada no solo, nas estruturas sucessivas.

No Anexo A.5, encontra-se detalhada uma metodologia para o cálculo da distribuição da corrente de curto-circuito entre cabos pára-raios e terra nas LT's.

O cálculo do campo elétrico longitudinal para situações que envolvem curto-circuito é feito desprezando-se as correntes das fases sãs e das outras linhas do corredor.

Desta forma, o campo elétrico longitudinal pode ser calculado da seguinte equação matricial:

$$E_o = [Z_{n,i} \quad Z_{n,v} \quad Z_{n,w}] \begin{bmatrix} I_{cc} \\ I_{ccv} \\ I_{ccw} \end{bmatrix} \quad (4.33)$$

Onde,

- E_0 - campo elétrico longitudinal (V/km);
- I_{cc} - corrente de curto-circuito na fase defeituosa (A);
- $Z_{n,i}$ - impedância mútua entre o objeto metálico e fase defeituosa (ohms/km);
- $Z_{n,v}, Z_{n,w}$ - impedância mútua entre a tubulação e os cabos pára-raios v e w (ohms/km);
- I_{ccv}, I_{ccw} - correntes de curto-circuito nos cabos pára-raios ' v ' e ' w ' (A).

4.2.1.3 - Cálculo das Correntes nos Cabos Pára-Raios Multi-aterrados.

No estudo de interferências, a corrente nos cabos pára-raios multi-aterrados em regime permanente devem também ser conhecidas, pois as correntes de sequência zero nas fases retornam, em parte, através dos cabos pára-raios. Esta corrente cancela parte da tensão induzida em tubulações metálicas situadas nas proximidades, atuando assim como um meio de mitigação para indução magnética.

Para um corredor de linhas com " m " condutores/subcondutores e " l " pára-raios, a matriz impedância dos condutores físicos podem ser expressa como a seguir [8]:

$$\begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \vdots \\ \Delta V_m \\ \Delta V_{m+1} \\ \vdots \\ \Delta V_{m+l} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{1,1} & Z_{1,2} & \dots & Z_{1,m} & \dots & Z_{1,m+1} & \dots & Z_{1,m+l} \\ Z_{2,1} & Z_{2,2} & \dots & Z_{2,m} & \dots & Z_{2,m+1} & \dots & Z_{2,m+l} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Z_{m,1} & Z_{m,2} & \dots & Z_{m,m} & \dots & Z_{m,m+1} & \dots & Z_{m,m+l} \\ Z_{m+1,1} & Z_{m+1,2} & \dots & Z_{m+1,m} & \dots & Z_{m+1,m+1} & \dots & Z_{m+1,m+l} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Z_{m+l,1} & Z_{m+l,2} & \dots & Z_{m+l,m} & \dots & Z_{m+l,m+1} & \dots & Z_{m+l,m+l} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_m \\ I_{m+1} \\ \vdots \\ I_{m+l} \end{bmatrix} \quad (4.34)$$

Onde,

- $\Delta V_1, \dots, \Delta V_m$ - queda de tensão ao longo dos condutores (V/km);
- $Z_{i,j}$ - elementos da matriz [Z] (ohms/km);
- I_1, \dots, I_m - correntes nos condutores/subcondutores (A);
- I_{m+1}, \dots, I_{m+l} - correntes nos cabos pára-raios (A);

$\Delta V_{m+1}, \dots, \Delta V_{m+1}$ - queda de tensão ao longo dos cabos pára-raios (V/km).

Como os cabos pára-raios são multi-aterrados, tem-se que:

$$\begin{aligned} \Delta V_{m+1} &= 0 \\ &\vdots \\ \Delta V_{m+1} &= 0 \end{aligned} \quad (4.35)$$

Esta consideração é correta, desde que os cabos pára-raios são aterrados em distâncias menores que o comprimento de onda. Isto não deixa o potencial do cabo no meio do vão se tornar diferente de zero e, em frequências industriais, esta hipótese é sempre válida.

Reescrevendo-se a matriz anterior na forma particionada, tem-se:

$$\begin{bmatrix} [\Delta V_f] \\ [0] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [Z_{ff}] & [Z_{fp}] \\ [Z_{pf}] & [Z_{pp}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I_f] \\ [I_p] \end{bmatrix} \quad (4.36)$$

$[Z_{ff}]$ - submatriz de todos os condutores/subcondutores de fase;

$[Z_{pp}]$ - submatriz de todos os cabos pára-raios;

$[Z_{pf}]$, $[Z_{fp}]$ - submatriz mútua dos condutores/subcondutores com os pára-raios.

$[\Delta V_f]$ - submatriz da queda de tensão nos condutores/subcondutores;

$[I_f]$ - submatriz da corrente em todos os condutores/subcondutores;

$[I_p]$ - submatriz da corrente nos cabos pára-raios.

Daí, consegue-se as correntes nos cabos pára-raios, a partir da equação matricial a seguir:

$$[I_p] = - [Z_{pp}]^{-1} \cdot [Z_{pf}] \cdot [I_f] \quad (A) \quad (4.37)$$

4.2.2 - Cálculo do Perfil de Tensão Induzida em Tubulações Metálicas - Acoplamento Indutivo.

Conforme discutido no capítulo 3, a corrente induzida

numa tubulação metálica aterrada em dois pontos, é muito pequena comparada com a corrente da linha e seu efeito no campo elétrico longitudinal pode ser desprezado. A tubulação metálica pode ser dividida em "n" segmentos de comprimento ΔL , de tal forma que o campo elétrico longitudinal E_0 fique aproximadamente constante ao longo de cada um deles. Evidentemente pode haver variação no valor deste campo de um ΔL para outro, conforme seu posicionamento em relação ao eixo das LT's.

4.2.2.1 - Tubulação Metálica Enterrada

O circuito equivalente, para um segmento de comprimento ΔL de uma tubulação metálica enterrada, é apresentado na figura 4.9, onde se pode verificar que a fonte de tensão U representa a indução devido ao acoplamento eletromagnético e é o produto do campo E_0 pelo comprimento ΔL .

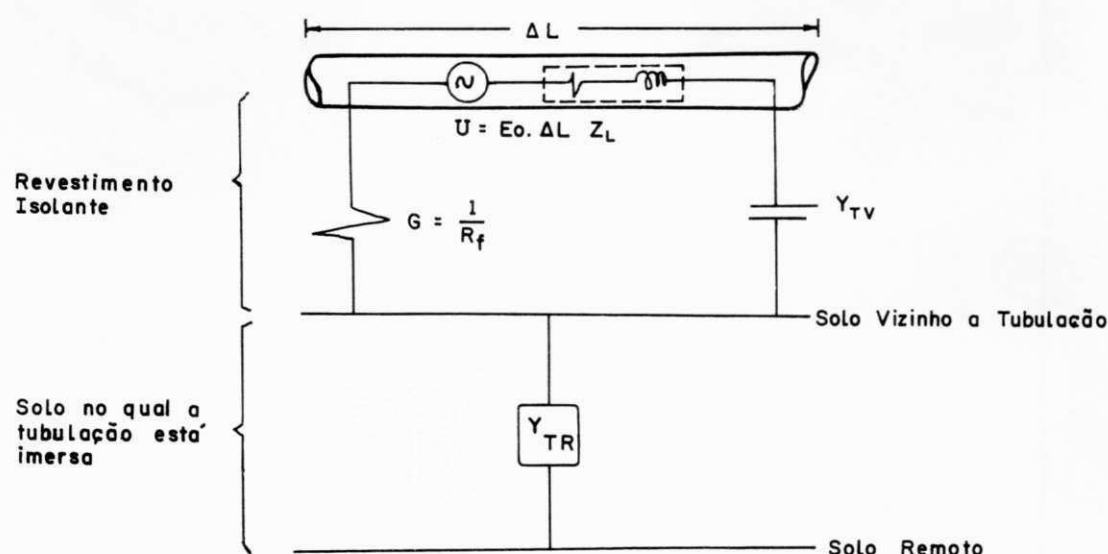


Figura 4.9
Circuito equivalente de um segmento ΔL
de tubulação metálica enterrada

Onde,

Z_L - impedância linear da tubulação (ohms/m);

Y_{TV} - admitância da tubulação para a terra imediatamente vizinha (mhos/m);

Y_{TR} - admitância entre a terra imediatamente vizinha à tubulação e um terra remoto (mhos/m);

U - tensão induzida no comprimento de tubulação ΔL devido ao acoplamento indutivo (V/m);

- G - condutância linear da tubulação para a terra (ohms/m);
 C - capacitância linear da tubulação para a terra (F/m).

O circuito equivalente de um comprimento de tubulação metálica qualquer, enterrada e próxima a um corredor de linhas de transmissão é apresentado na figura 4.10.

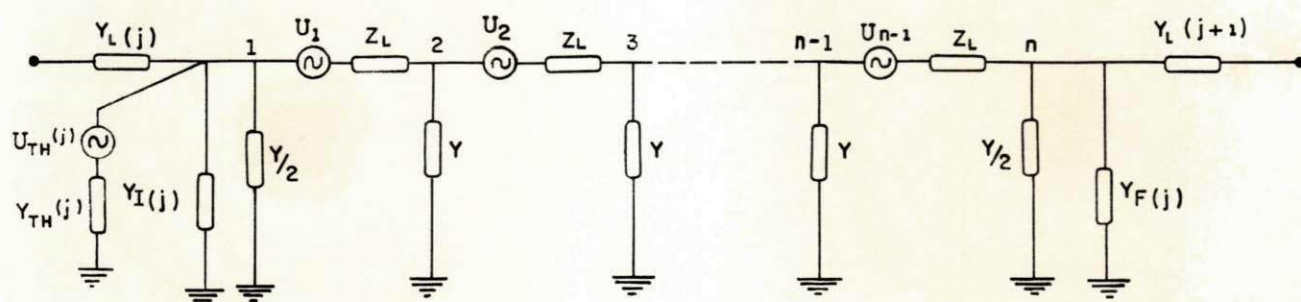


Figura 4.10
 Circuito equivalente multi-pi de um trecho de tubulação metálica enterrada.

Onde,

- Y - admitância equivalente da combinação de Y_{TV} , Y_{TR} (mhos/m);
 Z_L - impedância linear da tubulação (ohms/m);
 U_i - tensão induzida no i -ésimo segmento de comprimento ΔL devido ao acoplamento indutivo;
 $Y_L(j)$, $Y_L(j+1)$ - admitância de ligação do trecho "j" aos trechos adjacentes, que pode assumir os seguintes valores (mhos):
 $Y_L = 1/Z_C$, o trecho adjacente tem extensão infinita;
 $Y_L = 0$, não existe ligação com o outro trecho;
 $Y_L = \infty$, existe ligação.
 $Y_I(j)$, $Y_F(j)$ - admitâncias para a terra, no início e no fim do trecho, que podem simular os pontos de aterramento ou o toque de uma pessoa na tubulação (mhos);
 $U_{TH}(j)$, $Y_{TH}(j)$ - circuito equivalente de Thevenin localizado no início do trecho "j", que pode simular os ramais de tubulação existentes (V, mhos).

4.2.2.2 - Tubulação Metálica Aérea

Em se tratando de uma tubulação metálica aérea qualquer, o circuito equivalente é mostrado na figura 4.11.

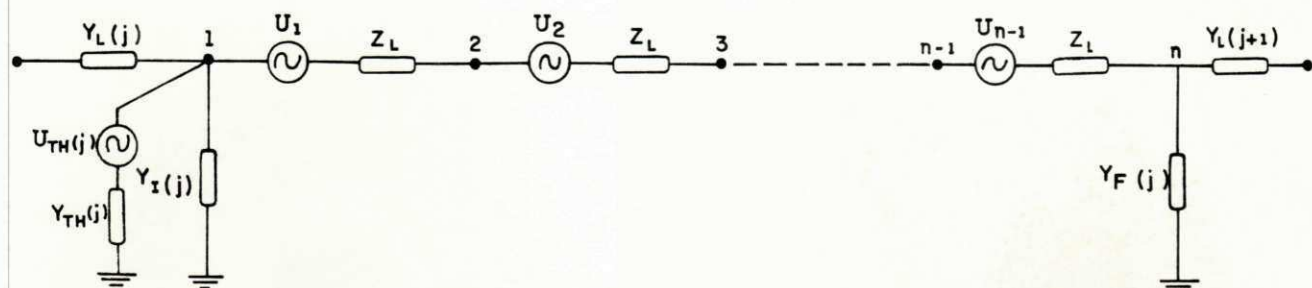


Figura 4.11
Circuito equivalente multi-pi de um trecho
de tubulação metálica aérea.

A determinação da tensão em todos os pontos de uma tubulação metálica aérea ou enterrada, sujeita ao acoplamento indutivo, recai no sistema de equações complexas tridiagonal já mencionado no item 4.1.3, cuja solução é apresentada no Anexo A.1, e representa o perfil de tensão ao longo da tubulação.

4.3 - CÁLCULO DO PERFIL DE TENSÃO RESULTANTE DA ASSOCIAÇÃO DOS ACOPLAMENTOS RESISTIVOS E INDUTIVOS.

Em regime permanente, o efeito do acoplamento resistivo pode, para efeitos práticos, ser considerado desprezível. Daí, nesta condição, o perfil de tensão ao longo da tubulação é devido unicamente ao acoplamento indutivo calculado no item 4.2.

Em regime de curto-circuito, os efeitos dos acoplamentos resistivos e indutivos devem ser considerados no cálculo do perfil da tensão ao longo da tubulação. Na solução de um caso qualquer de interferência entre LT/tubulação, pode-se determinar o perfil de tensão devido ao acoplamento resistivo e, em seguida, devido ao acoplamento indutivo. Para se determinar o perfil de tensão devido a associação dos dois efeitos, pode-se aplicar uma propriedade dos circuitos lineares, frequentemente chamada de Teorema da Superposição, que é enunciado como segue: "A resposta a várias fontes independentes é a soma das respostas a cada fonte independente, com as fontes independentes restantes em repouso (fontes de correntes em aberto, e fontes de tensão em curto-circuito)". Assim, a soma dos perfis de tensão devido a cada um dos acoplamentos é o perfil de tensão resultante ao longo da tubulação.

4.4. - CÁLCULO DAS TENSÕES E CORRENTES EM ACESSÓRIOS E PESSOAS - ACOPLAMENTOS RESISTIVO E INDUTIVO.

Em virtude da tensão induzida na tubulação, juntas isolantes, revestimentos e circuitos de proteção catódica, podem ficar sujeitos a tensões superiores aos seus limites de suportabilidade (vide capítulo 5). Trabalhadores em contato com válvulas de manobras, ou terceiros que entrem em contato com a tubulação, podem ficar expostos a choques elétricos. Neste sub-ítem, será abordado uma metodologia extremamente simples para o levantamento destes valores.

4.4.1 - Corrente de Contato

A simulação do toque de uma pessoa numa tubulação pode ser feito através das admitâncias Y_I ou Y_F , que interligam a tubulação à terra. Uma vez determinada a tensão no ponto escolhido, a corrente de contato pode ser calculada das expressões a seguir [18]:

$$I_k = Y_{eq} V_t \quad (4.38)$$

$$Y_{eq} = \frac{1}{(R_c + 0,5 R_k)} = \frac{1}{(R_c + 1,5 \rho_s)}$$

$$R_k \cong 3\rho_s$$

Onde,

I_k - corrente de contato que circula através do corpo de uma pessoa que esteja em contato com a tubulação (A);

V_t - tensão na tubulação, no ponto de contato com a admitância Y_{eq} do corpo humano e da resistência R_c de contato pé-solo (V);

R_c - resistência elétrica do corpo humano (recomenda-se 1000 ohms) [18];

R_k - resistência de contato entre o pé descalço e o solo (ohms);

ρ_s - resistividade da camada superficial do solo local (ohms.m).

4.4.2 - Tensão nos Acessórios da Tubulação

A tensão no revestimento das tubulações metálicas enterradas, no regime de curto-circuito, pode ser facilmente determinada, tendo-se o perfil de tensão ao longo da tubulação e o perfil de tensão no solo, nas proximidades desta. A equação abaixo, expressa o valor da tensão no revestimento:

$$V_{rev} = V_{tub} - V_{solo}$$

Onde,

V_{rev} - tensão no revestimento (V);
 V_{tub} - tensão na tubulação (V);
 V_{solo} - elevação de potencial no solo nas proximidades da tubulação (V).

A tensão nas juntas isolantes é facilmente determinada pela diferença entre a tensão nos pontos adjacentes a ela.

A análise referente a tensão nos circuitos de proteção catódica será detalhada no item 5.3 adiante.

4.5 - EFEITO DOS RAMAIS DE TUBULAÇÃO E ATERRAMENTOS NO PERFIL DE TENSÃO - ACOPLAMENTOS RESISTIVO E INDUTIVO.

É muito comum numa tubulação, a existência de ramais de tubulação, pontos de purga (ramais para coleta de condensado e posterior tratamento), e pontos de aterramento concentrados ou distribuídos, ligados a ela das mais variadas formas. Com o objetivo de simplificar a análise e aliviar o esforço computacional, pode-se substituir estes elementos pelos seus equivalentes de Thevenin. Para isso, calcula-se a tensão de circuito aberto e admitância para a terra de cada um destes elementos isoladamente e, em seguida, considera-se todo o circuito da tubulação substituindo-se os elementos pelos seus respectivos circuitos equivalentes de Thevenin (vide capítulo 6).

4.6 - ACOPLAMENTO CAPACITIVO

O acoplamento capacitivo entre uma linha de transmissão e uma tubulação situada nas proximidades, deve ser estudado em regime permanente e quando esta última instalação estiver isolada do solo, já que qualquer aterramento na tubulação, elimina os efeitos decorrentes do acoplamento capacitivo. Observa-se ainda que o efeito deste acoplamento se torna maior quando há desequilíbrio de tensão na linha, em módulo ou fase.

4.6.1 - Cálculo da Corrente de Contato de um Segmento ΔL da Tubulação Sujeito ao Acoplamento Capacitivo.

Os efeitos decorrentes do acoplamento capacitivo, podem ser bastantes significativos para as tubulações metálicas isoladas do solo e são resultantes do campo elétrico transversal, associado à tensão de operação da linha de transmissão.

Na figura 4.12, apresentam-se as capacitâncias parciais de um sistema linha-tubulação.

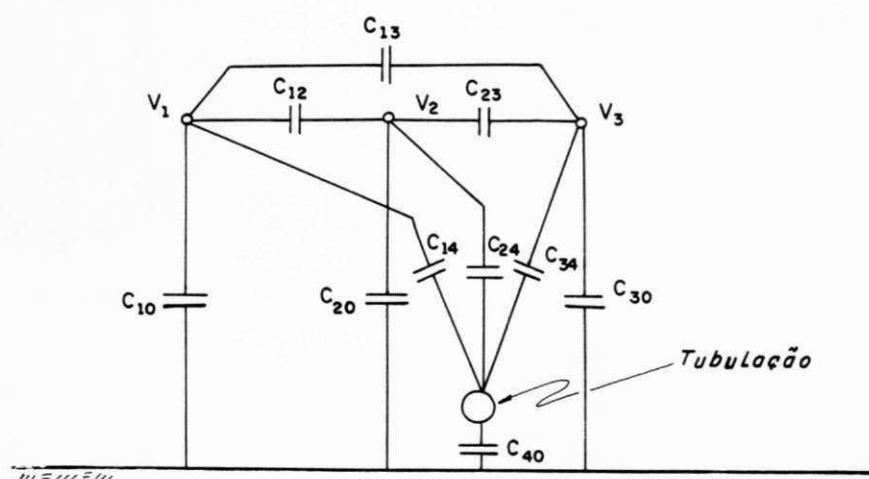


Figura 4.12
Capacitâncias parciais do sistema linha-tubulação

Onde,

- V_1, V_2, V_3 - tensões eficazes fase-neutro (V);
- C_{12}, C_{13}, C_{23} - capacitâncias parciais mútuas entre as fases da LT (F/km);
- C_{14}, C_{24}, C_{34} - capacitâncias parciais mútuas entre os cabos da LT e a tubulação (F/km);
- C_{10}, C_{20}, C_{30} - capacitâncias parciais mútuas entre as fases da LT e o solo (F/km);
- C_{40} - capacitância parcial mútua entre tubulação e o solo (F/km).

No estudo do acoplamento capacitivo, será desconsiderada a presença dos cabos pára-raios, o que reduz o esforço computacional na determinação da matriz das capacitâncias, causando um mínimo de erro (cerca de apenas 2%), para geometrias usuais de torres de LT's.

A equação matricial que relaciona as tensões e correntes presentes nas linhas de transmissão com "m" condutores/sub-condutores e aquelas presentes em uma tubulação é [8]:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_m \\ I_t \end{bmatrix} = j\omega \begin{bmatrix} C_{11} & -C_{12} & \dots & -C_{1m} & -C_{1t} \\ -C_{21} & C_{22} & \dots & -C_{2m} & -C_{2t} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ -C_{m1} & -C_{m2} & \dots & C_{mm} & -C_{mt} \\ -C_{t1} & -C_{t2} & \dots & -C_{tm} & C_{tt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_m \\ V_t \end{bmatrix} \quad (4.38)$$

Onde,

I_1, I_2, \dots, I_m - corrente de deslocamento total que flui de cada condutor para a terra, para os outros condutores e para a tubulação (A/km);

I_t - corrente de deslocamento total que flui de um segmento ΔL da tubulação para a terra e para os demais condutores (A/km);

V_1, V_2, \dots, V_m - tensões fase-terra nos condutores (V);

V_t - tensão para a terra, na tubulação (V);

$C_{11}, C_{22}, \dots, C_{mm}, C_{tt}$ - capacitância própria dos condutores e da

$$\text{tubulação } (C_{11} = \sum_{\substack{i=0 \\ i \neq 1}}^t C_{1i}) \text{ (F/km)}.$$

Sendo o segmento ΔL de tubulação, curto-circuitado por uma admitância $Y_H \ll j\omega (C_{1t} + C_{2t} + \dots + C_{mt})$, onde Y_H pode ser a admitância do corpo humano, a corrente de deslocamento da tubulação circula quase que totalmente por Y_H e a tensão no segmento ΔL de tubulação V_t é muito próxima de zero. Daí, consegue-se o valor de $I_t^{\Delta L}$, que nesta situação é a corrente de contato no segmento ΔL de tubulação:

$$V_t = 0$$

$$I_t^{\Delta L} = -j\omega \Delta L (C_{t1} \cdot V_1 + C_{t2} \cdot V_2 + \dots + C_{tm} \cdot V_m) \quad (4.39)$$

4.6.1.1. - Cálculo da Matriz de Capacitâncias

Para um sistema de "m" condutores e uma tubulação, a determinação da matriz de capacitâncias paralela [C] é feita a partir da inversão da matriz dos coeficientes de potencial de Maxwell [P]. Assim, pode-se escrever [8]:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_m \\ V_t \end{bmatrix} = \frac{1}{j\omega} \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1m} & P_{1t} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2m} & P_{2t} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ P_{m1} & P_{m2} & \dots & P_{mm} & P_{mt} \\ P_{t1} & P_{t2} & \dots & P_{tm} & P_{tt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_m \\ I_t \end{bmatrix} \quad \text{ou } [V] = \frac{1}{j\omega} [P] [I] \quad (4.40)$$

Onde,

- I_j - corrente de deslocamento (A/km);
- V_j - tensão fase-terra de condutor "i" (V);
- P_{ik} - coeficientes de potencial de Maxwell (km/F)

Os elementos da matriz dos coeficientes de potencial de Maxwell [P], são computados da geometria da torre e do raio dos condutores. Os elementos da diagonal são [8]:

$$P_{ij} = 18 \times 10^6 \text{ Ln} \left(\frac{2h_j}{r_j} \right) \text{ em km/F} \quad (4.41)$$

Os elementos fora da diagonal são [8]:

$$P_{ik} = P_{ki} = 18 \times 10^6 \text{ Ln} \left(\frac{S_{ik}}{s_{ik}} \right) \text{ em km/F} \quad (4.42)$$

Onde,

- r_j - raio do condutor "i" (m);
- h_j - altura do condutor "i" (m);
- S_{ik} - distância do condutor "i" a imagem de "k" (m);
- s_{ik} - distância do condutor "i" ao "k" (m).

Das equações 4.38 e 4.40, pode-se escrever a seguinte relação matricial:

$$[C] = [P]^{-1} \quad (4.43)$$

A matriz de capacitâncias $[C]$ está na forma nodal. Cada elemento da diagonal principal C_{ij} é a soma de todas as capacitâncias por unidade de comprimento, entre o condutor "i" e todos os outros condutores e a terra. Os elementos fora da diagonal C_{ik} e C_{ki} , são iguais a capacitância, por unidade de comprimento, entre os condutores "i" e "k", com o sinal negativo.

4.6.2 - Cálculo da Corrente de Contato e Tensão na Tubulação - Acoplamento Capacitivo.

Para a determinação da corrente de contato de um trecho de tubulação composta de "n" segmentos ΔL , sujeita ao acoplamento capacitivo, não é necessário se calcular, para cada novo posicionamento do segmento ΔL (distância tubulação - LT), toda a matriz dos coeficientes de potencial $[P]$ e invertê-la, para se determinar a matriz $[C]$. De acordo com a equação (4.39), para o cálculo da corrente de contato $I_c^{\Delta L}$ de cada segmento ΔL , é necessário se determinar apenas a última linha da matriz de capacitâncias $[C]$ do sistema LT - tubulação.

A matriz dos coeficientes de potencial $[P]$, pode ser subdividida da seguinte forma:

$$[P] = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1n} & P_{1t} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2n} & P_{2t} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ P_{n1} & P_{n2} & \dots & P_{nn} & P_{nt} \\ P_{t1} & P_{t2} & \dots & P_{tn} & P_{tt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} & & & & \\ & [P_{\text{cond-cond}}] & & & [P_{\text{cond-tub}}] \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ [P_{\text{tub-cond}}] & & & & [P_{\text{tub-tub}}] \end{bmatrix} \quad (4.44)$$

$[P_{\text{cond-cond}}]$ - submatriz dos coeficientes de potencial dos condutores;

$[P_{\text{cond-tub}}]$ - submatriz dos coeficientes de potencial mútuos condutores/tubulação;

$[P_{\text{tub-cond}}]$ - submatriz dos coeficientes de potencial mútuos tubulação/condutores;

$[P_{\text{tub-tub}}]$ - submatriz dos coeficientes de potencial da tubulação.

A submatriz $[P_{\text{cond-cond}}]$, é constante para uma mesma configuração de linha de transmissão. As submatrizes $[P_{\text{cond-tub}}]$ e $[P_{\text{tub-cond}}]$ variam com a variação da posição do segmento ΔL da tubulação. Desta forma, no processo de cálculo do acoplamento capacitivo, calcula-se a matriz $[P_{\text{cond-cond}}]$ apenas uma vez e a matriz $[P_{\text{tub-cond}}]$ tantas vezes quanto variar a posição relativa do segmento ΔL à linha de transmissão.

Como já mencionado, para o cálculo da corrente de contato, é necessário se conhecer apenas a última linha da matriz de capacitâncias $[C]$. Visando a minimização do esforço computacional, não é necessário se inverter toda da matriz dos coeficientes de potencial para se obter a última linha de matriz capacitâncias desejada. Pode-se utilizar uma técnica simplificadora, que obtém uma coluna qualquer da matriz de capacitâncias $[C]$, por inversão parcial de $[P]$ [9]. De acordo com esta técnica, pode-se escrever:

$$[P] \begin{bmatrix} C_{1t} \\ C_{2t} \\ \vdots \\ C_{mt} \\ C_{tt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.45)$$

Onde,

$[P]$ - matriz dos coeficientes de potencial;

$$\begin{bmatrix} C_{1t} \\ C_{2t} \\ \vdots \\ C_{mt} \\ C_{tt} \end{bmatrix}^T = [C_{1t} \ C_{2t} \ \dots \ C_{tt}] - \text{última linha da matriz de capacitâncias } [C]$$

$[0 \ 0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 1]^T$ - vetor de transformação que indica qual a coluna da matriz $[C]$ que se quer obter.

A solução do sistema (4.45) é simples e pode ser obtida através da eliminação de Gauss-Jordan.

Uma vez obtida a última linha da matriz capacitâncias $[C]$, o cálculo da corrente de contato de cada segmento ΔL pode ser feito utilizando equação (4.39). A corrente total de contato no trecho

de tubulação é o somatório das correntes de contato de cada segmento ΔL .

Logo,

$$I_t = \sum_{i=1}^n I_{ti} \Delta L \quad (4.46)$$

Onde,

I_t - corrente total de contato na tubulação (A);

$I_{ti} \Delta L$ - corrente de contato nos i - segmentos ΔL da tubulação (A);

n - número de segmentos ΔL que compõem a tubulação.

A tensão em aberto, induzida na tubulação é dada pela seguinte expressão:

$$V_{oc} = \frac{I_t}{j\omega \sum_{i=1}^n C_{tt}(i)} \quad (4.47)$$

Onde,

I_t - corrente total de contato na tubulação da equação (4.46) (A);

$C_{tt}^{(i)}$ - capacitância própria de cada segmento ΔL da tubulação (F/km);

V_{oc} - tensão em aberto da tubulação (V).

4.6.3 - Cálculo das Correntes de Contato Transitórias

Algumas considerações teóricas acerca das correntes de descargas transitórias serão feitas adiante, no item 5.1.1.3. Aqui, serão apresentadas algumas equações extremamente simples que possibilitarão calcular a energia associada a estas descargas.

O sistema linha-tubulação da figura 4.12 está simplificadamente apresentado no circuito da figura 4.13.

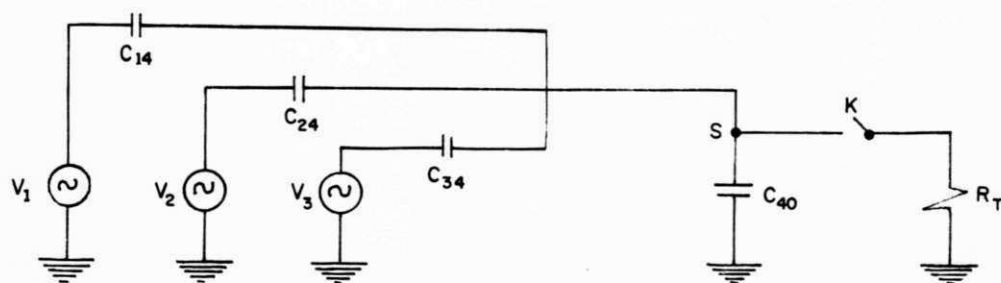


Figura 4.13
Circuito equivalente capacitivo do sistema linha-tubulação

O fechamento da chave K simula o toque de uma pessoa, com resistência total R_t , na tubulação. No regime permanente quase toda corrente passa por R_t , desde que $R_t \ll 1/\omega C_{40}$, e a tensão na tubulação (ponto S) é bem próxima de zero. No regime transitório, a capacitância C_{40} e a resistência R_t formarão um circuito RC com constante de tempo $\tau = R_t \cdot C_{40}$ ($\tau \ll 1/4$ ciclo de 60 Hz) e, neste caso, pode-se estudar o circuito RC já mencionado, separadamente. A capacitância C_{40} descarregará sua energia através da resistência R_t . A severidade da corrente, que é uma exponencial decrescente, pode ser avaliada pela energia máxima que está armazenada na capacitância C_{40} , antes do fechamento da chave K (toque da pessoa).

Esta energia é dada pela seguinte expressão:

$$E = \frac{1}{2} C_{40} \cdot V_p^2 \quad (4.48)$$

Onde,

E - energia armazenada em C_{40} (J/m);

C_{40} - capacitância tubulação-solo (F/m);

V_p - pico da tensão de circuito aberto na tubulação (V);

($V_p = 1,41 \cdot V_0$; V_0 - tensão de circuito aberto na tubulação).

O valor da energia E armazenada em C_{40} depende do comprimento do trecho de tubulação isolado. O máximo comprimento do trecho de tubulação isolado que armazena uma determinada quantidade de energia pré-estabelecida $E_{m\acute{a}x}$, cujos níveis sejam aceitáveis, é:

$$L_{\text{máx}} = \frac{2 E_{\text{máx}}}{C_{40} \cdot v_p^2}$$

Onde,

$L_{\text{máx}}$ - máximo comprimento do trecho de tubulação isolado que armazena um valor de energia pré-estabelecida (m);

$E_{\text{máx}}$ - valor de energia pré-estabelecido (J).

CAPÍTULO 5

5. - CRITÉRIOS DE SEGURANÇA / MEIOS DE MITIGAÇÃO APLICÁVEIS

O levantamento das interferências elétricas de LT's em tubulações, constituem-se no cálculo das tensões elétricas resultantes dos diversos acoplamentos para:

a) Tubulações Aéreas:

- Calcular as tensões elétricas nas juntas isolantes instaladas na tubulação, com o objetivo de evitar valores superiores a suportabilidade da junta;

- Calcular o perfil de tensão tubulação-solo, com o objetivo de evitar choques elétricos em terceiros, que eventualmente entrem em contato com a tubulação ou válvulas de manobras nela existentes.

b) Tubulações Enterradas

- Calcular as tensões elétricas nas juntas isolantes instaladas na tubulação, com o objetivo de evitar valores superiores a suportabilidade da junta;

- Calcular o perfil da tensão no revestimento anti-corrosivo (isolante), com o objetivo de evitar valores superiores aos suportáveis por esta camada ou pela própria tubulação;

- Cálculo da tensão (tubulação-solo) nos locais onde existem válvulas de manobras que não estejam isoladas, visando evitar choques em trabalhadores encarregados da operação da instalação ou em terceiros;

- Cálculo da tensão resultante nos circuitos de proteção catódica com o objetivo de evitar o aparecimento de tensões superiores as suportáveis pelos fios de ligação, retificadores e anodos pertencentes a estes dispositivos de proteção.

Neste capítulo, serão apresentados alguns limites máximos de tensões e correntes que serão considerados como critérios de segurança na análise dos cruzamentos/aproximações de tubulações com as linhas de transmissão do sistema CHESF. Além disto, serão mostradas alguns meios de mitigação que podem ser aplicados para reduzir as interferências provocadas pelas linhas de transmissão.

5.1 - TOLERABILIDADE DO CORPO HUMANO A CHOQUES ELÉTRICOS

Para se avaliar o perigo de eletrocução de pessoas é necessário se conhecer qual o acoplamento que predomina na tubulação em estudo. Assim, se os acoplamentos resistivo e indutivo predominam (caso de curto-circuito) ou, se o apenas o indutivo (caso de regime

permanente), é necessário se conhecer quais os limites de corrente suportáveis pelo o corpo humano e qual o valor de resistência do corpo que deve ser considerado nos cálculos. Predominando o acoplamento capacitivo (caso de regime permanente), o valor da corrente de toque suportável neste caso, independe do valor da resistência do corpo humano (vide ítem 3.2.1).

5.1.1 - Correntes Toleráveis Pelo Corpo Humano

A tolerabilidade do corpo humano a choques elétricos depende fundamentalmente do tempo em que a corrente é imposta a uma determinada pessoa. Em função disto, as correntes suportáveis pelo corpo humano são classificadas da seguinte forma: correntes de contato permanente, correntes de contato temporária e correntes de contato transitórias.

5.1.1.1 - Correntes de Contato Permanente

São consequentes das interferências das LT's quando em regime permanente. Desta maneira, os limites de corrente suportáveis pelo corpo humano são definidos considerando-se que elas podem durar um tempo extremamente longo.

As correntes de contato permanente são classificadas de acordo com o grau de severidade que elas produzem no corpo humano. A seguir, apresenta-se os diversos níveis destas correntes, definidas através de levantamento de distribuições probabilísticas resultantes de experiências de laboratório em pessoas ou animais (dependendo do nível) [10]. O valor de corrente no qual o indivíduo sente um ligeiro formigamento, está em torno de 1mA, e denomina-se limiar de percepção. Correntes com valores entre 1 e 6 mA se denominam de correntes de choque secundário e é o nível máximo de corrente que sendo submetido a uma pessoa, permite a ela não perder o controle muscular. Nas curvas de distribuições probabilísticas de corrente de choque secundário, levantados para 134 homens e 28 mulheres [10], foram encontrados os valores de 6mA e 9mA, que tem probabilidade de 99,5% de serem suportados por homens e mulheres, respectivamente. Conservativamente, é considerado o valor de 5mA a 60 Hz, com probabilidade de 99,5% de ser suportado, como o valor máximo admissível para a população em geral, inclusive crianças [11]. Correntes com magnitude acima de 6mA são consideradas correntes de choque primário e causam danos fisiológicos diretos, tais como: a fibrilação ventricular, que é uma ação desordenada da principal cavidade do coração (ventrículo), resultando na imediata parada da circulação do sangue, e, uma vez ocorrida, praticamente nunca cessa espontaneamente; parada respiratória; asfixia.

5.1.1.2 - Correntes de Contato Temporárias

São consequentes das interferências quando ocorrem curto-circuitos nas LT's. Três fatores determinam a suportabilidade do corpo humano em regime temporário: a amplitude da corrente, o peso da pessoa que leva o choque e o tempo de duração do mesmo.

Dos estudos estatísticos de Dalziel, resultou a equação da eletrocução, válida para tempos entre 8ms e 5s [10]:

$$i = \frac{k}{\sqrt{t}} \quad (5.1)$$

Onde,

i - é o nível de corrente correspondente a uma probabilidade de vibração ventricular (mA);

t - tempo de duração da corrente (s);

k - constante experimental

Para experiências em uma grande variedade de animais [10], k foi avaliado em 165 para uma probabilidade de fibrilação de 0,005 (99,5% de não fibrilação).

No que se refere ao tempo de duração da falta, adota-se na CHESF, tempos médios que são função da tensão da linha de transmissão e estão explicitados na tabela 5.1.

Tensão da LT (kV)	500	230	138	69
Duração da falta (s)	0,100	0,500	0,800	1,000

Tabela 5.1
Duração média de uma falta fase-terra

5.1.1.3 - Correntes de Contato Transitórias

São consequentes das interferências das LT's em regime permanente e de um acoplamento capacitivo que pode submeter uma tubulação ou um objeto metálico a tensões típicas de 1 a 3kV. A aproximação entre uma pessoa e uma tubulação com diferentes potenciais,

pode resultar num centelhamento, se a rigidez dielétrica do ar for excedida. A corrente resultante deste centelhamento é a corrente de contato transitória que, apesar de não acarretar perigo à vida humana, causa incômodo e possibilidade indireta de acidentes, em decorrência de ações nervosas ou reflexos dos indivíduos, além de constituir uma importante fonte de stress.

Na determinação de corrente de contato transitória tolerável, foram estabelecidas dois níveis [16]:

- Choque de sensação moderada, correspondente a energia compreendida entre 0,14 mJ e 0,30 mJ;
- Choque de sensação dolorosa, correspondentes a valores de correntes associados a energia acima de 0,30 mJ.

5.2. - SUPORTABILIDADE DO METAL DA TUBULAÇÃO E DO SEU REVESTIMENTO

As tubulações metálicas enterradas são revestidas com um material à base de alcatrão de hulha (que possui baixa estabilidade térmica), ou à base de polietileno (que possui alta estabilidade térmica) para protegê-las da corrosão eletroquímica. Neste caso, o acoplamento capacitivo não é sentido, uma vez que a resistência de fuga linear da tubulação para a terra R_f é suficiente para tornar o primeiro termo da equação (3.26), que representa o acoplamento capacitivo, desprezível em relação ao segundo termo, que representa o acoplamento indutivo. No que se refere ao acoplamento resistivo, parte do potencial do solo gerado em função de um curto-circuito numa estrutura próxima é transferido para a tubulação. Portanto, em regime permanente haverá uma tensão induzida pelo acoplamento indutivo, uma vez que se pode considerar desprezível os efeitos do acoplamento resistivo (caso desequilibrado).

Em curto-circuito, haverá tensão induzida pelo acoplamento indutivo e pelo acoplamento resistivo, podendo acarretar potenciais bem mais severos na tubulação, submetendo o revestimento anti-corrosivo desta instalação a uma diferença de potencial que pode gerar um arco elétrico que perfure-o. Este arco elétrico, ao liberar calor, pode causar danos à tubulação metálica, podendo inclusive perfurá-la [1].

Ressalta-se que, mesmo não havendo perfuração da tubulação, a simples deterioração do revestimento anti-corrosivo poderá trazer futuros problemas ao duto metálico.

Resultados de ensaios de curta-duração realizados pela Eletricité de France [12], em tubulações de aço (espessura = 5mm), com revestimentos de alcatrão de hulha (espessura = 4mm), indicam que:

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

5.3. - SUPORTABILIDADE DO SISTEMA DE PROTEÇÃO CATÓDICA

O processo corrosivo de uma tubulação metálica enterrada se caracteriza sempre pelo aparecimento de áreas anódicas (corrosão) e catódicas na superfície do material metálico, com o conseqüente fluxo de corrente elétrica no sentido convencional, das áreas anódicas para as catódicas através do eletrólito e com retorno pelo metal da tubulação. Para obtenção de proteção catódica, deve-se colocar um metal (cama de anodos) imerso no solo (eletrólito), ligado por fios isolados à tubulação e criar um fluxo de corrente elétrica contínua, que cede elétrons ao metal da tubulação, protegendo-a. Esta corrente pode ser obtida por:

- diferença de potenciais entre os metais da tubulação e o da cama de anodos (proteção catódica galvânica);
- inserção de uma força eletromotriz (proteção catódica por corrente impressa).

A proteção catódica das tubulações enterradas está sujeita a acoplamentos resistivos e indutivos. O circuito da proteção catódica é equivalente a um fio isolado, aterrado numa extremidade pela cama de anodos e tendo na outra a tubulação, que pode ser substituída por um circuito equivalente de Thevenin, conforme esquematizado nas figuras 5.1 e 5.2, para o acoplamento resistivo e indutivo, respectivamente.

Conforme pode ser verificado, o trecho de fio de interligação entre a tubulação e os anodos sofrem o efeito do acoplamento indutivo e os anodos podem ficar sujeitos a transferência de potencial do solo para o sistema de proteção catódica.

Em regime permanente, dependendo da distância e posição relativa entre os circuitos, pode-se registrar tensões induzidas elevadas, a ponto de danificar retificadores ou por em risco de choques elétricos trabalhadores responsáveis pela manutenção do sistema de proteção catódica.

Em regime de curto-circuito, além do acoplamento indutivo que está mais intensamente presente, registra-se o acoplamento resistivo. Daí a necessidade de se efetuar uma análise detalhada do perigo de danificação dos retificadores e do revestimento dos fios de

interligação e choques em trabalhadores.

Ressalta-se que os valores de tensão a partir dos quais podem haver danificação de isolamentos e retificadores, dependem das características particulares de cada sistema de proteção catódica e devem ser informados pelos projetistas ou fabricantes destes.

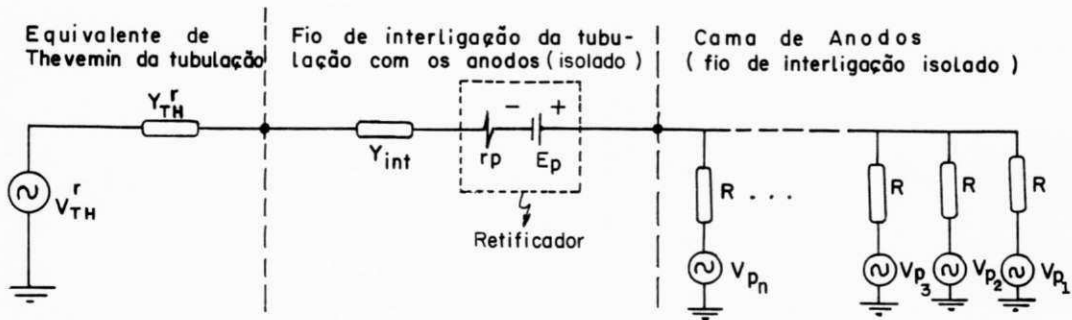


Figura 5.1

Circuito equivalente da proteção catódica - Acoplamento Resistivo

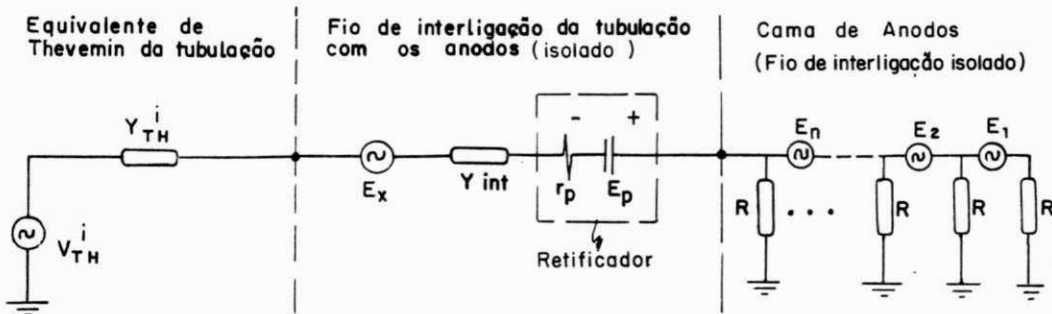


Figura 5.2

Circuito equivalente da proteção catódica - Acoplamento Indutivo

Legenda,

V_{TH}^r, Y_{TH}^r - circuito equivalente de Thevenin da tubulação no ponto de interligação com a proteção catódica, devido ao acoplamento resistivo (V, mhos);

- V_{TH}^i, Y_{TH}^i - idem para o acoplamento indutivo (V, mhos);
- Y_{int} - admitância do fio de interligação da tubulação com a cama de anodos (mhos/m);
- E_p, r_p - tensão e resistência interna do retificador (caso de proteção catódica por corrente impressa) (V, ohms);
- V_p - elevação do potencial no ponto de aterramento dos anodos (v);
- E_n, \dots, E_1 - tensão induzida, face ao acoplamento indutivo, nos fios de interligação da cama de anos (V/m);
- R - resistência de aterramento dos anodos (ohms);
- E_x - tensão induzida, face ao acoplamento indutivo, no fio de interligação da tubulação com os anodos (V/m).

5.4. - SUPORTABILIDADE DAS JUNTAS ISOLANTES

Juntas isolantes são usadas nas tubulações para separar eletricamente, secções do duto do terminal da instalação e dos sistemas de bombeamento. Elas também são usadas para dividir a tubulação em secções, fazendo com que as falhas nos dispositivos de proteção catódica fiquem confinadas apenas numa secção. Estas secções podem ter vários quilômetros.

Alguma vez, as juntas isolantes podem ficar submetidas a diferenças de potencial entre suas extremidades, suficientemente perigosas para danificá-las, ou mesmo, perfurá-las. Isto pode ocorrer tanto em regime permanente, quanto em curto-circuito.

A suportabilidade da junta isolante, varia conforme as características particulares de cada junta, conforme o fabricante, projeto específico e material utilizado. Além disto, o valor de suportabilidade é função da solicitação de tensão imposta à junta: se em regime permanente ou em curto-circuito.

Em alguns projetos são usados descarregadores, aplicados entre as extremidades das juntas isolantes, cuja suportabilidade dielétrica seja inferior à da junta e que funcionam como pára-raios, absorvendo a energia das sobretensões ocasionais da tubulação.

5.5. - MEIOS DE MITIGAÇÃO APLICÁVEIS

Podem ser obtidas reduções nos níveis de interferências, calculados ou medidos, aplicando-se alguns meios de mitigação na linha de transmissão ou na tubulação.

Pode-se, por exemplo, atuar na linha de transmissão, promovendo:

- Alteração da sequência de fases das linhas de circuito duplo, contribuindo assim para reduzir os efeitos decorrentes do acoplamento capacitivo;
- Aumento da corrente desmagnetizante circulante nos cabos pára-raios, com redução da corrente injetada no solo pelas torres da linha. Isto contribuirá para reduzir os efeitos decorrentes dos acoplamentos indutivo e resistivo. Para isto, deve-se instalar cabos pára-raios em linhas que não os possuam, substituir cabos pára-raios existentes por outros de maior secção ou condutividade (elevando o fator de blindagem da linha), e utilizar resistências de aterramento diferenciadas em torres de interesse;
- Disposição assimétrica dos fios contrapeso constituintes dos arranjos de aterramento das torres mais próximas à tubulação. Isto contribuirá para aliviar os efeitos decorrentes do acoplamento resistivo;
- Aumento da quantidade de isoladores das cadeias daquelas estruturas mais próximas ao cruzamento com a tubulação. Isto, aumenta o nível de isolamento destas estruturas, reduzindo o risco da ocorrência de faltas fase-terra nestes pontos mais críticos.

Pode-se, também, atuar na tubulação metálica através de:

- Aterramento da tubulação, o que é sempre benéfico sob o aspecto do acoplamento capacitivo, porém, pode não ser eficaz sob o aspecto do acoplamento indutivo, podendo ainda ser perigoso sob o aspecto do acoplamento resistivo. Além disto, há aspectos de corrosão da tubulação que precisam ser avaliados, bem como, aspectos de custo elevado quando do aterramento via anodos de magnésio;
- Secionamento da tubulação via juntas isolantes, o que é geralmente benéfico sob o aspecto dos acoplamentos capacitivo, indutivo e resistivo, porém, pode ser ineficaz quando o fluído transportado pela tubulação é condutor de eletricidade. Além disto, os pontos de instalação das juntas podem vir a se tornar, ao longo do tempo, pontos de vazamento. O aspecto de custo também deve ser avaliado;
- Aumento da espessura do revestimento anti-corrosivo isolante das tubulações aéreas. Isto poderá aliviar as correntes de choque às quais pessoas possam vir a ficar submetidas;
- Instalação de cabos de blindagem próximos à tubulação, o que será tanto mais benéfico quanto mais condutivos sejam estes cabos e quanto maiores forem as correntes desmagnetizantes circulantes nos mesmos;
- Recobrimento do solo vizinho a uma tubulação aérea, com uma camada de brita colocada de tal forma que alguém, para tocar a tubulação,

tenha que estar sobre esta referida camada. Isto, aumentará a tolerabilidade das pessoas às tensões de toque na tubulação;

- Isolamento físico da tubulação, tornando-a inacessível ao público. Isto, pode ser feito através de galerias de cimento, muros, avisos de perigo, cercas, etc. Vale ressaltar, que isto não reduz as interferências, porém, evita problemas;
- Enterramento da tubulação, o que fará desaparecer os riscos de choques elétricos, exceto nos pontos de afloramento da instalação.

CAPÍTULO 6

6. - APLICAÇÕES PRÁTICAS

A seguir, serão apresentadas duas aplicações práticas da metodologia desenvolvida. A primeira se refere a análise das interferências elétricas das LT's JCR-DOW-04N3 e 04N4 sobre o gasoduto de hidrogênio da WHITE MARTINS. A segunda, analisa o cruzamento de uma dutovia da COPENE, a qual se compõe de várias tubulações para transporte de gases e líquidos que cruzam as linhas CMD-CTG-04M5/04M6, CMD-MTT-04M7, CMD-PTU-04M8 e CTG-CTU-02J5/02J6.

6.1. - ANÁLISE DAS INTERFERÊNCIAS ELÉTRICAS DAS LT'S JCR-DOW-04N3 E 04N4 SOBRE O GASODUTO DE HIDROGÊNIO DA WHITE MARTINS.

O projeto de implantação de uma tubulação, para transporte de hidrogênio ligando a planta C da DOW QUÍMICA, com a unidade da WHITE MARTINS, que cruza a faixa das LT's JCR-DOW-04N3 e 04N4, entre as estruturas 26 e 27, necessita ser analisado com o objetivo de se verificar a viabilidade deste projeto, no que tange as interferências eletromagnéticas que as linhas venham causar sobre o gasoduto, tanto regime permanente como, e principalmente, em condições de curto-circuito para a terra na SE DOW, e nas estruturas 28, 27 e 26.

6.1.1. - Características Técnicas das Instalações

A seguir são apresentadas as características técnicas das instalações em estudo. Na figura 6.1, apresenta-se um desenho esquemático da posição relativa das LT's e do gasoduto.

6.1.1.1. - Gasoduto

De acordo com memorial descritivo fornecido pela WHITE MARTINS, as características técnicas da tubulação são as seguintes:

- a) Extensão - 1500m
- b) Material - aço carbono
- c) Diâmetro Nominal - 6 polegadas = 0,1524 m
- d) Profundidade - 0,90 a 1,5m (aproximado para 1,2m)
- e) Revestimento - epoxi poliamida (espessura: 4mm)

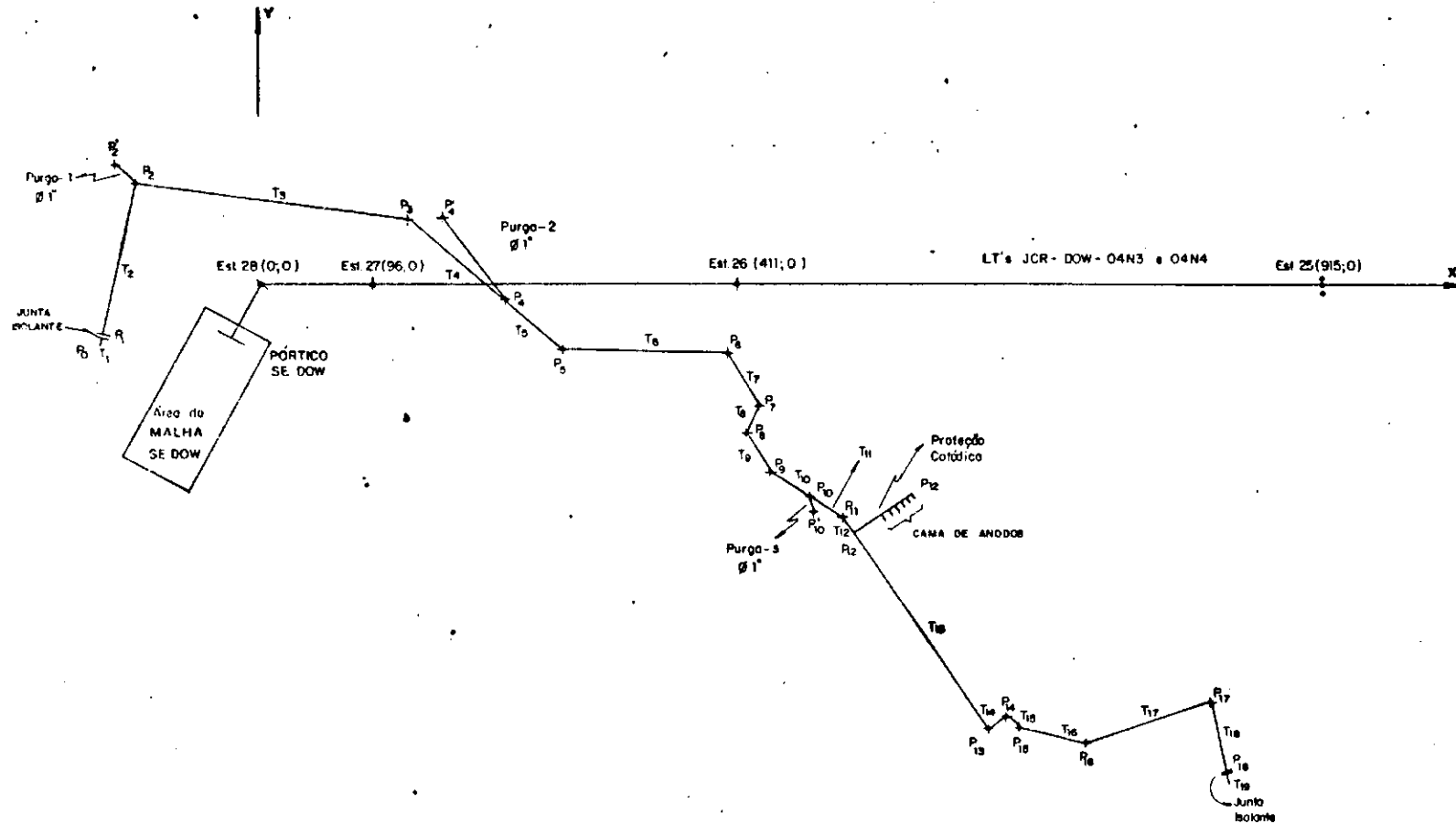
- f) Resistividade - do solo: $100 \text{ ohms} \times \text{m}$
 - do revestimento: $2,5 \times 10^6 \text{ ohms} \times \text{m}$
 - dos tubos: $0,20 \times 10^{-6} \text{ ohms} \times \text{m}$
- g) Fluido transportado - hidrogênio
- h) Diâmetro das linhas de dreno (purga) - 1 polegada = $0,0254 \text{ m}$
- i) Juntas isolantes - instaladas nas extremidades da tubulação
- j) Planta de localização - vide figura 6.1

6.1.1.2 - Linhas de Transmissão

- a) LT's - JCR-DOW-04N3 e JCR-DOW-04N4
- b) Estruturas de cruzamento - 26 e 27 (circuito duplo vertical)
- c) Corrente máxima noturna em regime permanente - 745A
- d) Corrente de curto-circuito considerada (valores máximos para o sistema CHESF/horizonte 2010):
 - SE JCR : 50 kA
 - SE DOW : 22 kA
- e) Esquema de contrapeso das estruturas - vide figura 6.2
- f) Cabo condutor - 636 MCM GROSBEAK 26/7
- g) Cabo pára-raios - ALUMOWELD 3 nº 7 AWG
- h) Esquema da malha de terra da SE DOW : vide figura 6.3
- i) Extensão : 8 km

6.1.2 - Efeitos Elétricos a Serem Considerados

No caso em análise, verifica-se que a tubulação é enterrada em toda a sua extensão. Esta situação elimina o acoplamento capacitivo e é suficiente se analisar os acoplamentos resistivo e indutivo em situação de curto-circuito monofásico e em situação de regime permanente.



PONTOS	COORDENADAS	
	X	Y
P ₁	-136	-43
P ₂	-110	89
P ₃	125	58
P ₄	210	-10
P ₅	260	-58
P ₆	402	-61
P ₇	430	-105
P ₈	421	-128
P ₉	441	-165
P ₁₀	474	-185
P ₁₁	503	-204
P ₁₂	512	-217
P ₁₃	630	-388
P ₁₄	645	-378
P ₁₅	658	-387
P ₁₆	716	-399
P ₁₇	822	-364
P ₁₈	836	-426
P ₁₉	-127	104
P ₂₀	156	59
P ₁₀	478	-200
P ₁₂	562	-184

T_n - Trecho de tubulação
P_n - Pontos de tubulação

MODIFICAÇÕES

LEVANTADO	_____
PROJETADO	_____
DESENHADO	AS. FALCÃO
VERIFICADO	_____
VISTO	_____
APROVADO	M. FONTAN

CIA. HIDRO ELÉTRICA DO SÃO FRANCISCO	
FIGURA 6.1 - DESENHO ESQUEMÁTICO DA POSIÇÃO RELATIVA ENTRE AS LT's JCR-DOW-04N3/04N4 e a TUBULAÇÃO DA WHITE MARTINS -	
ESCALA 1:400	DORL Recife 25.02.92
DO-92 2 005	

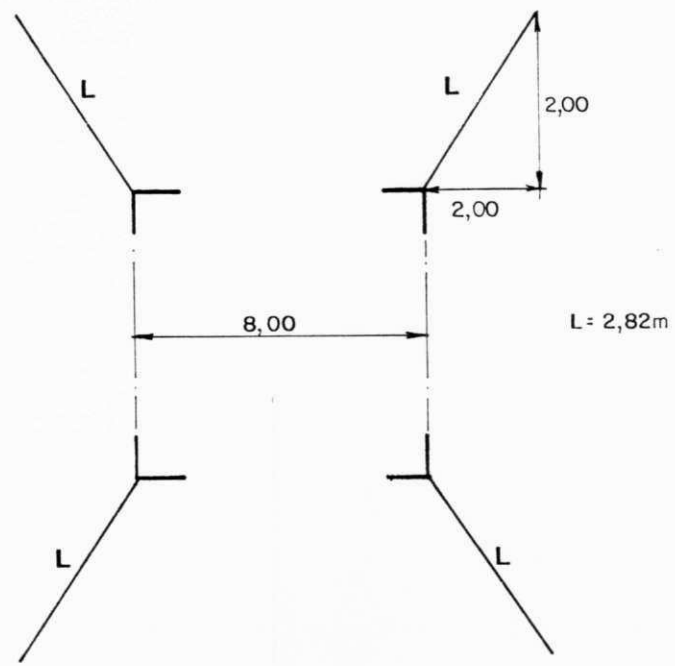


Figura 6.2
Esquema de contrapeso considerado para uma resistência de pé-de-torre de 15 ohms.

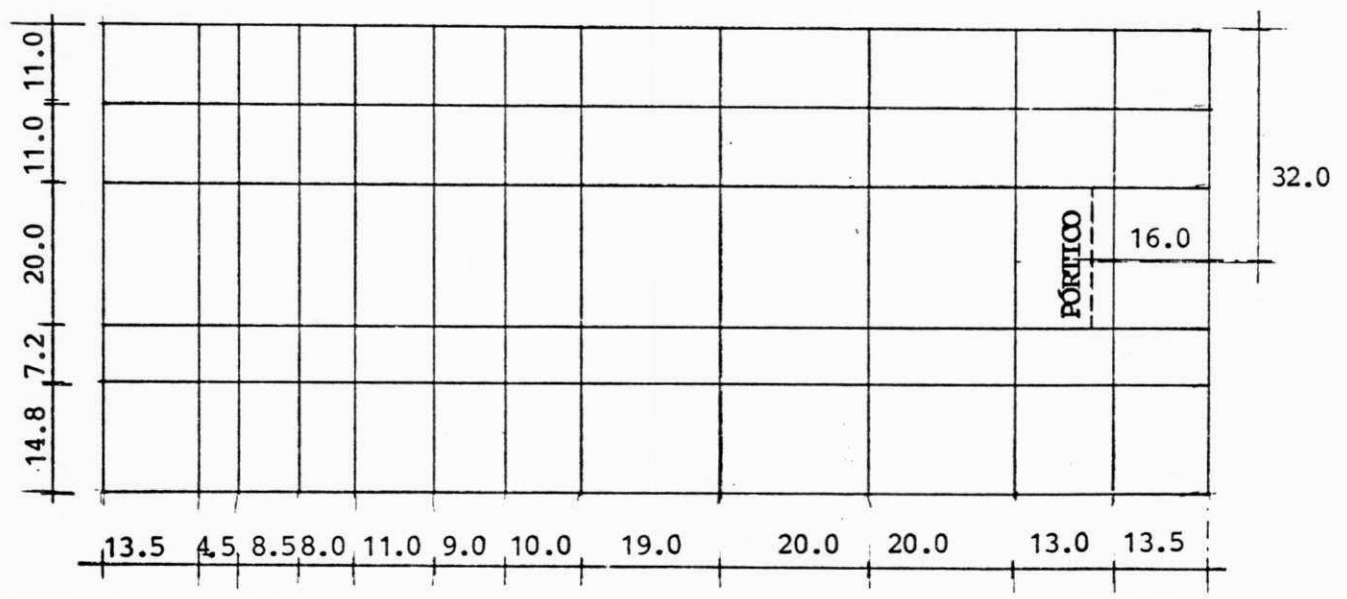


Figura 6.3
Esquema da malha de aterramento de SE DOW

6.1.2.1 - Situação de Curto-Circuito

Conforme pode ser constatado pelo desenho esquemático da figura 6.1, a tubulação está implantada numa área muito próxima à linha de transmissão e à subestação, e sofre forte influência elétrica desta última, principalmente devido ao acoplamento resistivo. Assim, serão estudadas as seguintes situações de curto-circuito:

- Curto-circuito na barra da SE DOW;
- Curto-circuito na estrutura 28 da linha;
- Curto-circuito na estrutura 27 da linha;
- Curto-circuito na estrutura 26 da linha.

Com o objetivo de se determinar, qual das situações citadas anteriormente é a mais crítica, no que se refere às tensões induzidas na tubulação, para cada uma delas será determinada:

- a) A tensão elétrica máxima na camada isolante ao longo da tubulação;
- b) A tensão elétrica nas juntas isolantes localizadas nos terminais da tubulação (pontos P1 e P18).

Para o caso mais crítico, serão estudados:

- a) A tensão elétrica na proteção catódica instalada na tubulação;
- b) O perfil de tensão elétrica na camada isolante ao longo da tubulação;
- c) A tensão tubulação-solo nas válvulas de manobra localizadas nas extremidades das linhas de dreno, e que pode vir a causar eletrocução de trabalhadores em contato com elas no momento de uma falta na LT.

A figura 6.4, apresenta o esquema de circulação de correntes durante a ocorrência de um curto-circuito monofásico numa estrutura qualquer de uma linha de transmissão. A determinação das correntes referenciadas foram obtidas com a utilização do programa LTDIVCOR [7], e seus valores estão resumidos nas tabelas 6.1 e 6.2 a seguir:

Local do Defeito	Contribuição SE's		Corrente nos Pára-Raios (vão frente) (kA)			
	DOW	JCR	EST.28	EST.27	EST.26	EST. 25
SE DOW	22,0 \angle -82°	2,8 \angle -121°	12,0 \angle -87°	10,5 \angle -89°	19,2 \angle -91°	17,9 \angle -93°
EST.28	20,6 \angle -77°	2,8 \angle -121°	20,4 \angle -79°	1,6 \angle -111°	11,5 \angle -110°	11,3 \angle -110°
EST.27	20,1 \angle -77°	2,8 \angle -121°	20,3 \angle -79°	20,3 \angle -79°	11,8 \angle -110°	11,6 \angle -110°
EST.26	19,9 \angle -77°	2,8 \angle -121°	17,9 \angle -80°	18,0 \angle -80°	18,1 \angle -80°	13,6 \angle -91°

Tabela 6.1
Correntes de curto-circuito nos condutores e pára-raios equivalente (calculados com auxílio do programa LTDIVCOR [7], considerando $R_{se} = 3$ ohms e $R_{est} = 20$ ohms).

Local do Defeito	Correntes Injetadas no Solo nas Malhas (kA)				
	SE DOW	EST.28	EST.27	EST.26	EST.25
SE DOW	10,36 \angle -76°	11,50 \angle -76°	11,43 \angle -77°	11,23 \angle -79°	11,06 \angle -81°
EST.28	11,04 \angle -140°	10,82 \angle -167°	10,18 \angle -115°	10,15 \angle -118°	10,13 \angle -119°
EST.27	10,69 \angle -155°	10,19 \angle -139°	10,26 \angle -107°	10,22 \angle -108°	10,17 \angle -114°
EST.26	12,39 \angle 125°	10,07 \angle -133°	10,18 \angle -111°	10,56 \angle -78°	10,43 \angle -81°

Tabela 6.2
Correntes injetadas no solo (calculadas com auxílio do programa LTDIVCOR [7], considerando $R_{se} = 3$ ohms e $R_{est} = 20$ ohms).

Determinação da Ocorrência mais Crítica

Com os valores de correntes das tabelas 6.1 e 6.2 e das

características básicas da tubulação e das linhas de transmissão, foram simuladas as situações de curto-circuito fase-terra enumeradas anteriormente, com o auxílio do programa INTERLT desenvolvido (vide Anexo A.2). Na tabela 6.3, estão resumidos os valores da tensão máxima no revestimento e a tensão nas juntas isolantes para a localização do curto-circuito na SE e nas três estruturas mais próximas à tubulação. Para obtenção destes valores, os trechos de purga 1, 2, 3 e o circuito de proteção catódica foram substituídos pelos seus equivalentes de Thevenin. Dentre os casos examinados, a situação mais crítica, como já era esperado, é a ocorrência do curto-circuito na SE DOW (vide tabela 6.3), onde a tensão máxima no revestimento é 2,065 kV e a tensão nas juntas isolantes localizadas nos pontos P_1 e P_{18} é 0,911 e 0,474 kV, respectivamente.

Local do Curto- Circuito	Tensão Máxima Revestimento Localização (x,y)	Tensão Juntas Isolantes (kV)	
		kV	P_1^* P_{18}^{**}
SE DOW	(-136; -43)	2,065	0,911 0,474
EST.28	(10; 73)	0,229	0,125 0,119
EST.27	(86; 63)	0,145	0,081 0,093
EST.26	(-136; -43)	0,390	0,147 0,120

Tabela 6.3
Ocorrências de curto-circuito na SE DOW e estruturas 26, 27 e 28

* junta isolante terminal localizada no ponto P_1 (vide figura 6.1)
** junta isolante terminal localizada no ponto P_{18} (vide figura 6.1)

Estudo da Ocorrência Mais Crítica

O perfil de tensão no revestimento ao longo da tubulação é apresentado na figura 6.5. Como pode ser observado, a tensão máxima no revestimento ao longo do traçado da tubulação é da ordem de 2,065 kV, bem inferior aos 5kV de suportabilidade para o revestimento considerado [12].

A tensão elétrica máxima nas juntas é 0,911 kV, e ocorre naquela localizada no ponto P_1 . Este valor é bem inferior a suportabilidade nominal de 2,0 kV deste tipo de junta.

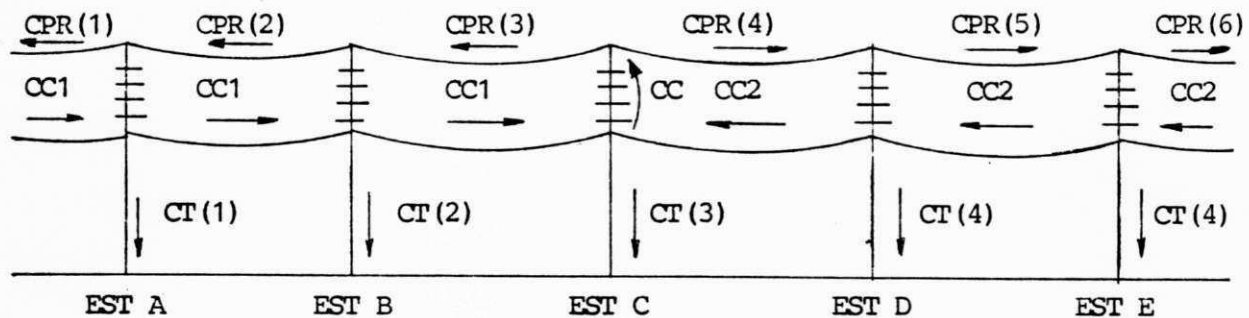


Figura 6.4
Esquema de circulação de correntes numa LT por ocasião de um curto-circuito fase-terra.

- CT - corrente injetada no solo pela estrutura
- CPR - corrente no pára-raios equivalente
- CC1 - contribuição da SE 1 para a corrente de curto
- CC2 - contribuição da SE 2 para a corrente de curto
- CC - corrente total de curto

PERFIL DE TENSÃO REVESTIMENTO

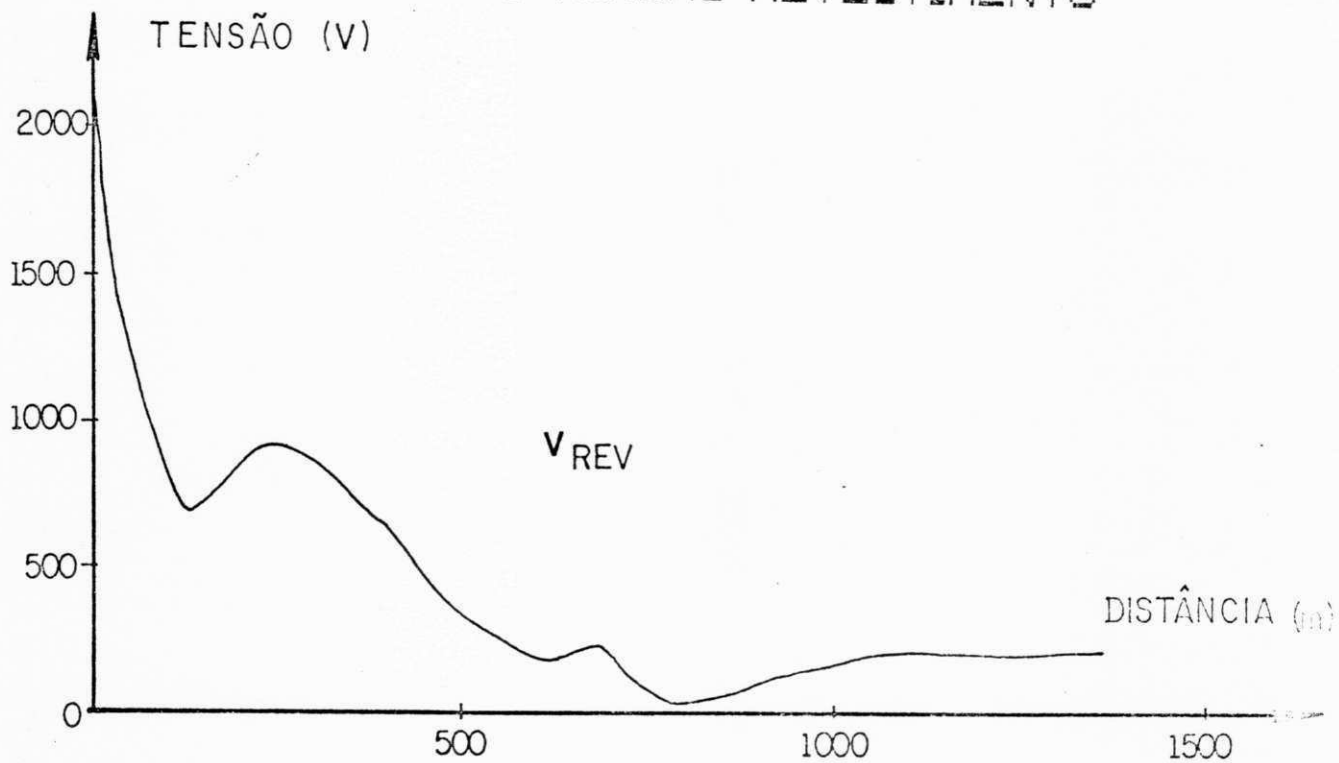


Figura 6.5 — PERFIL DE TENSÃO AO LONGO DA TUBULAÇÃO EM REGIME DE CURTO-CIRCUITO.

O circuito de proteção catódica está esquematicamente apresentado na figura 6.6, onde se pode observar a resistência interna R_i , localizada no ponto B, que representa a fonte de alimentação (resistência interna do retificador), já que se trata de proteção catódica por corrente impressa. As resistências R_j (i variando de 1 a 6), representam a cama de anodos com eletrodos distanciados de 6m.

Os trechos de tubulação à esquerda (antes da proteção catódica), e à direita (após a proteção catódica) são substituídos por seus equivalentes de Thevenin, e estão representados pelos elementos $V^{e_{TH}}$, $Y^{e_{TH}}$, $V^{d_{TH}}$, $Y^{d_{TH}}$, respectivamente, tensão e admitância de Thevenin. De acordo com o "Memorial de Projeto Executivo da Proteção Catódica", projeto nº 10177-H₂-Aratu, fornecido pela WHITE MARTINS S.A, são apresentadas algumas características básicas do circuito de proteção catódica da figura 6.6:

a) Coordenadas dos Pontos (no sistema de coordenadas apresentado na figura 6.1)

Ponto	Abcissa (m)	Ordenada (m)
A	512	-217
B	524	-208
C	537	-200
D	542	-197
E	547	-194
F	552	-191
G	557	-187
H	562	-184

b) Cama de Anodos

- Anodos : De Fe - Si - Cr instalados verticalmente em enchimento de coque metalúrgico, a uma profundidade de 3m, dispostos em fileira perpendicular ao eixo da tubulação, com espaçamento de 6m entre anodos.

- Dimensões dos anodos : 1200 mm de comprimento
75 mm de diâmetro

Observação :

O primeiro anodo da fileira, ficará a 30m do gasoduto.

- Cabos de interligação : nº 4 AWG, tipo THV (R = 0,8879 E-03 ohms/m à 40° C), classe 600 V, próprio para ser enterrado no solo, mas ficarão instalados em tubo de PVC de 1 1/2".

c) Retificador

- Alimentação : trifásica 440V, 60Hz;
- Saída : 100 V, 30 A;
- Cabos de interligação : nº 4 AWG tipo THV

d) Cálculo da Resistência dos Anodos

De [14], tem-se que,

$$R_a = \frac{0,0052 \rho}{L} \left(2,3 \log \frac{8L}{d} - 1 \right)$$

Onde,

R_a - resistência de um anodo vertical (ohms);

ρ - resistividade do solo (ohms.cm)

L - comprimento do anodo (pés)

d - diâmetro do anodo (pés)

No caso em análise:

$$\begin{aligned} \rho &= 100 \text{ ohms.m} = 10.000 \text{ ohms.cm} \\ L &= 1,2\text{m} = 3,94 \text{ pés} \\ d &= 0,075\text{m} = 0,246 \text{ pés} \end{aligned}$$

Aplicando-se os valores acima, obtém-se:

$$R_a = 52,56 \text{ ohms}$$

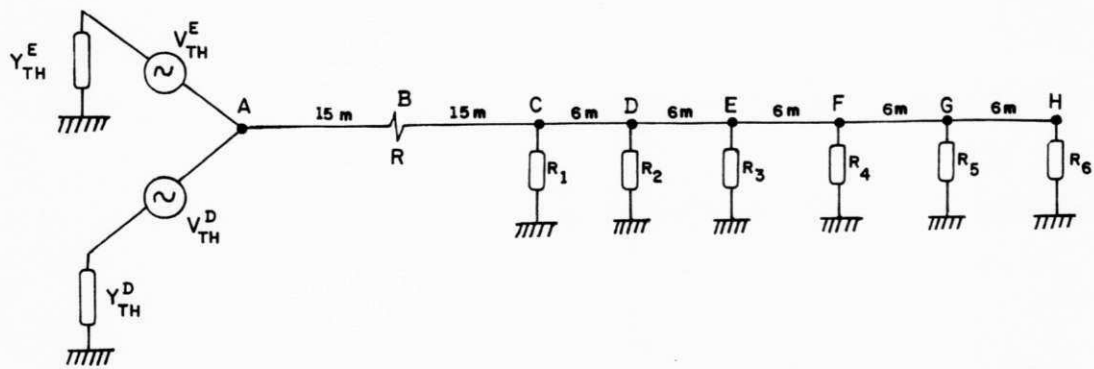


Figura 6.6
Circuito de proteção catódica ligado à tubulação no ponto A

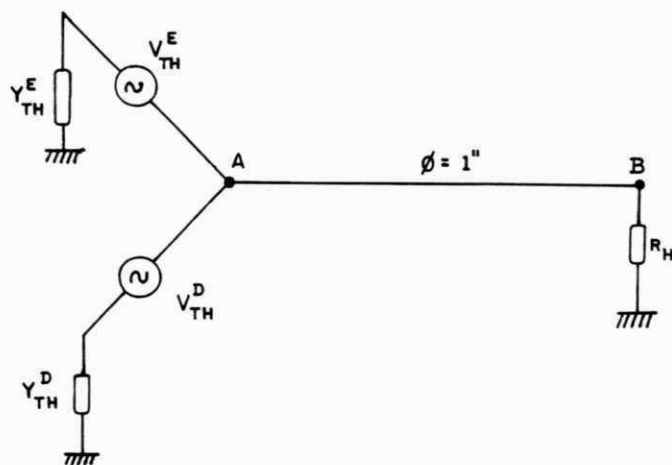


Figura 6.7
Circuito equivalente aos pontos de purga

Em razão de não ter sido fornecido, pelo projetista, o valor da resistência interna R da fonte de alimentação (vide figura 6.6), determinou-se esta tensão para 4 (quatro) valores de R, os quais se encontram resumidos na tabela 6.4, como também, a máxima tensão nos fios de interligação do circuito de proteção catódica.

Resistência Interna do Retificador (ohms)	Tensão no Retificador (V)	Tensão Máxima nos Fios de Interligação (V)
2	85,5 94,6 ⁰	163,5 107.6 ⁰
5	191,9 94,6 ⁰	233,7 106.2 ⁰
7	252,5 94,6 ⁰	273,8 105,7 ⁰
10	327,6 94,5 ⁰	323,3 105.3 ⁰

Tabela 6.4
Tensão no retificador da proteção catódica e nos fios de interligação em regime de curto-circuito.

De acordo com a tabela 6.4, as tensões que serão induzidas no retificador, no caso da ocorrência de curto-circuito na SE DOW, é relativamente baixa. Deve-se consultar o fabricante para se verificar qual o valor da tensão máxima suportada pelo retificador durante 0,5 s (tempo de duração da falta). Por outro lado, observa-se que a tensão máxima nos fios de interligação do circuito de proteção catódica é 323V, abaixo da suportabilidade do cabo utilizado (com tensão mantida), o que garante seu perfeito desempenho.

Para se estudar as tensões nas válvulas de manobra localizadas nos pontos de purga e a corrente através do corpo de um trabalhador em contato com esta, esquematizou-se o circuito da figura 6.7, que modela toda a situação de campo. Os elementos V_{TH}^e , Y_{TH}^e , V_{TH}^d e Y_{TH}^d representam as tensões e admitâncias de Thevenin dos trechos das tubulações à esquerda e à direita dos pontos de purga, respectivamente. O trecho de tubulação A-B de 1 polegada, é representado pelo segmento correspondente. R_h é a resistência do corpo do trabalhador em contato com a válvula de manobra. O objetivo é calcular a tensão no ponto B, a qual representa a tensão a que ficará submetida o corpo de um trabalhador que esteja em contato com a válvula de manobra, no momento de um curto-circuito na SE DOW. Na tabela 6.5, estão resumidos os valores da tensão nas válvulas de manobra e da tensão no revestimento isolante para cada um dos pontos de purga. No que se refere às tensões no revestimento, pode-se observar que estão abaixo dos valores de suportabilidade de 5kV para estes acessórios.

Entretanto, para se avaliar o efeito das tensões resultantes nas válvulas de manobra, é necessário se calcular a tensão máxima suportável pelo corpo humano, o que pode ser conseguido com o equacionamento a seguir:

Pontos de Purga	Máxima Tensão no Revestimento (kV)	Tensão nas Válvulas de Manobras (V)
1	0.616	554
2	0.531	531
3	0.654	654

Tabela 6.5

Máxima tensão no revestimento isolante e tensão nas válvulas de manobra dos pontos de purga em regime de curto-circuito.

$$V_{\text{toque}} = (R_h + 0,5 R_c) \cdot I_k = (R_h + 1,5 \rho_s) \frac{0,116}{\sqrt{t}}$$

$$R_c = 3 \rho_s \quad \rho_s = 2 \rho$$

Onde,

V_{toque} - tensão máxima suportável pelo corpo humano (V);

$R_h = 1000$ ohms - resistência do corpo humano;

$I_k = \frac{0,116}{\sqrt{t}}$ A - corrente máxima suportável pelo corpo humano;

$t = 0,5$ s - tempo de eliminação do curto-circuito em 230kV;

ρ_s - resistividade da camada superficial do solo (ohms.m);

ρ - resistividade do solo (ohms.m);

R_c - resistência de contato entre o pé descalço e o solo (ohms).

Com os valores especificados de R_h , I_k , P_s e t , encontra-se que a máxima tensão suportável é de 213,3 volts, inferior a tensão em qualquer uma das três válvulas de manobra. Desta forma, deverão ser recomendadas algumas medidas preventivas com o objetivo de se evitar eletrocução de trabalhadores, quando em contato com as válvulas de manobras dos pontos de purga.

6.1.2.2 - Situação de Regime Permanente

A situação de regime permanente deve ser estudada considerando-se a situação mais crítica de desequilíbrio. Desta forma, admitindo-se que as tensões nas barras das SE's Jacaracanga e Dow, estejam equilibradas, as linhas JCR-DOW-04N3 e 04N4 terão correntes desequilibradas, já que não são linhas transpostas. A determinação dos fatores de desequilíbrio para as correntes de sequência zero " m_0 " e sequência positiva " m_2 ", são [15]:

- Para a LT JCR-DOW-04N3:

$$m_0 = \frac{i_0}{i_1} = \frac{Y_{01} + Y_{01'}}{Y_{11} + Y_{11'}}$$

$$m_2 = \frac{i_2}{i_1} = \frac{Y_{21} + Y_{21'}}{Y_{11} + Y_{11'}}$$

- Para a LT JCR-DOW-04N4:

$$m_0' = \frac{i_0'}{i_1'} = \frac{Y_{0'1} + Y_{0'1'}}{Y_{1'1} + Y_{1'1'}}$$

$$m_2' = \frac{i_2'}{i_1'} = \frac{Y_{2'1} + Y_{2'1'}}{Y_{1'1} + Y_{1'1'}}$$

Onde,

$Y_{01}, Y_{01}', Y_{0'1}, Y_{0'1}'$ - admitâncias mútuas intersequenciais (sequência zero com positiva);

$Y_{11}, Y_{1'1}, Y_{11}', Y_{1'1}'$ - admitâncias próprias e mútuas intersequenciais (sequência positiva com positiva).

$Y_{21}, Y_{21}', Y_{2'1}, Y_{2'1}'$ - admitâncias mútuas intersequenciais (sequência negativa com positiva);

m_0, m_0' - fatores de desequilíbrio de corrente de sequência zero para as LT's JCR-DOW-04N3 e 04N4, respectivamente;

m_2, m_2' - fatores de desequilíbrio de corrente de sequência negativa para as LT's JCR-DOW-04N3 e 04N4, respectivamente;

$i_0, i_1, i_2, i_0', i_1', i_2'$ - correntes de sequência das LT's JCR-DOW-04N3 e 04N4, respectivamente.

Na tabela 6.6 a seguir, estão explicitadas os fatores de desequilíbrio, as correntes de sequência e as correntes nas fases das linhas de transmissão em estudo. Conforme se pode observar, mesmo que a carga na SE DOW esteja equilibrada, as correntes nas linhas de transmissão não estarão, já que se trata de dois circuitos não transpostos.

Parâmetros	Linhas de Transmissão	
	JCR-DOW-04N3	JCR-DOW-04N4
m_0	0,04553 - 90,10°	0,04855 96,99°
m_2	0,05026 11,02°	0,05130 8,00°
i_0 (A)	33,91 - 90,10°	36,16 96,99°
i_1 (A)	745 0°	745 0°
i_2 (A)	37,44 11,02°	38,22 8,00°
i_A (A)	782,13 - 1,96°	779,54 3,03°
i_B (A)	762,44 - 121,39°	704,12 -124,65°
i_C (A)	692,57 123,74°	754,92 121,21°

Tabela 6.6

Fatores de desequilíbrio, correntes de sequência e correntes de fase

Tendo em vista a configuração da tubulação e considerando-se os trechos T_1 e T_{19} isolados, é necessário se determinar (regime permanente):

- O perfil de tensão elétrica na camada isolante ao longo da tubulação;
- A tensão elétrica nas juntas isolantes localizadas nos terminais da tubulação (ponto P_1 e P_{18});
- A tensão tubulação-solo nas válvulas de manobras localizadas nas extremidades das linhas de dreno e que podem vir a causar eletrocução de trabalhadores em simples operação de manobra e em qualquer instante;
- A tensão elétrica na proteção catódica instalada na tubulação.

As verificações dos itens a, b e d, têm como objetivo proteger a tubulação e seus acessórios; já a investigação do item c, visa garantir proteção contra choques elétricos em pessoas devido a correntes de contato permanente.

O perfil de tensão induzida na tubulação, quando as linhas operam em regime permanente é apresentado na figura 6.8. Como já era esperado, o nível de tensão é extremamente baixo, sendo a máxima tensão no revestimento da ordem 4,9 V para um ponto localizado no início da tubulação.

A tensão máxima elétrica nas juntas isolantes é de 4,9 V e ocorre naquela localizada no ponto P₁.

A tensão no retificador do circuito de proteção catódica é inferior a 1 volt.

A tabela 6.7 resume os valores da tensão nas válvulas de manobra, bem como, da corrente resultante no corpo de trabalhadores em contato com estes dispositivos:

Pontos de Purga	Tensão na Válvula Manobra (V)	Corrente no Corpo de um Trabalhador (mA)
01	4,6	3,5
02	2,9	2,2
03	0,7	0,5

Tabela 6.7
Tensão nas válvulas de manobra e corrente através do corpo de um trabalhador em regime permanente.

Para determinação da corrente no corpo do trabalhador, considerou-se:

- Resistência do corpo humano : $R_h = 1000$ ohms;
- Resistividade da camada superficial do solo : $\rho_s = 2\rho$, sendo a resistividade do solo, e igual 100 ohms.m;
- Resistência total : $R_t = R_h + 0,5 R_c$, com $R_c = 3 \rho_s$
- Corrente no corpo do trabalhador : $I = V_v/R_t$

PERFIL DE TENSÃO (Regime Permanente)

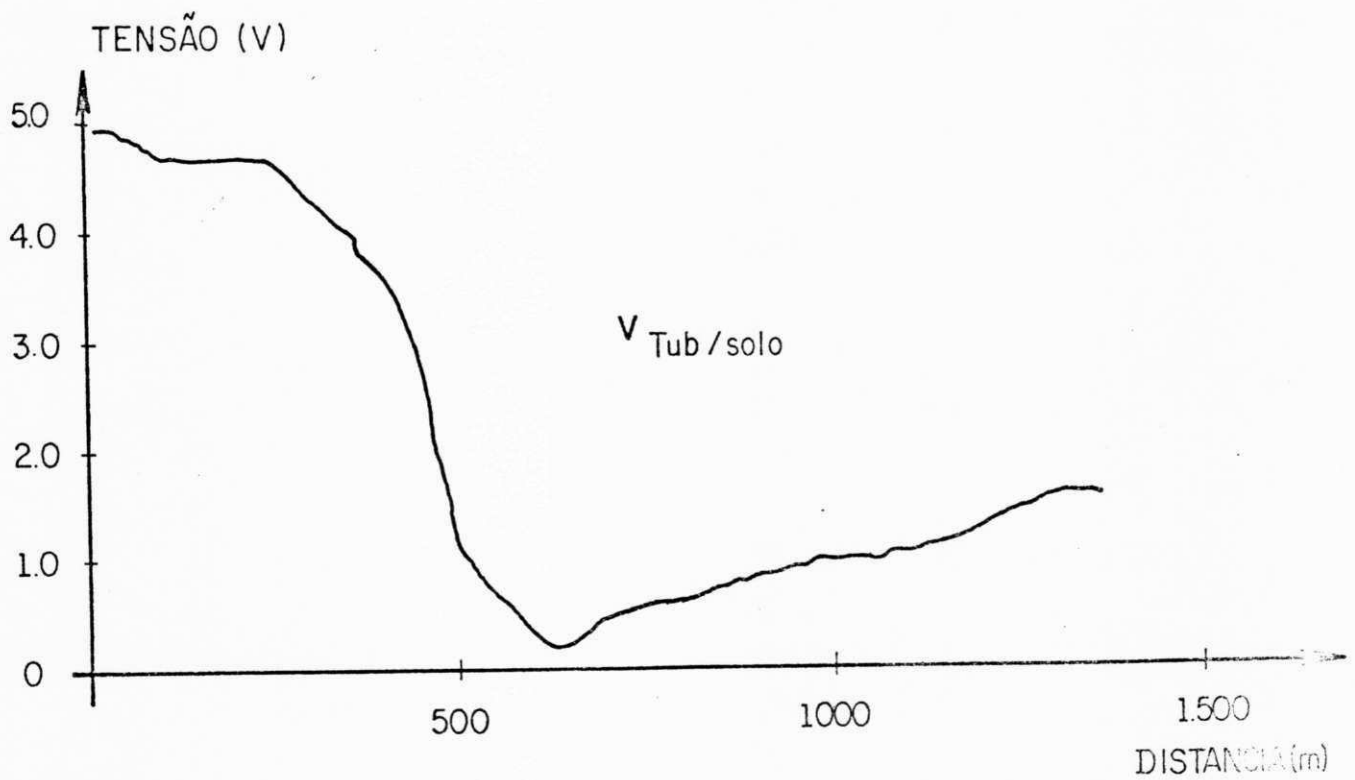


Figura 6.8 - PERFIL DE TENSÃO AO LONGO DA TUBULAÇÃO EM REGIME PERMANENTE.

De acordo com o item 5.1.1.1, o valor máximo admissível para a população em geral, inclusive crianças é 5mA. Logo, os valores de corrente através do corpo de trabalhadores em regime permanente, estão dentro dos limites de segurança toleráveis.

6.1.3 - Conclusões/Recomendações

Do exposto, verifica-se que os níveis de tensões induzidas na tubulação, em regime de curto-circuito, estão dentro dos limites de suportabilidade do revestimento e juntas isolantes. No que se refere a tensão resultante no retificador do circuito de proteção catódica, deve-se consultar o fabricante para se obter a suportabilidade deste equipamento e, caso necessário, se instalar pára-raios/supressores de tensão. Para proteção de trabalhadores, que estejam em contato com as válvulas de manobra, no momento em que ocorrer um curto-circuito, é indispensável se revestir a área em redor destes dispositivos com uma camada de brita com 20cm de espessura e 1,5m de diâmetro. Com esta providência a tensão de suportabilidade do sistema corpo humano/camada de brita cresce para:

$$V'_{\text{toque}} = (1000 + 1,5 \times 3000) \times 0,116 / \sqrt{0,5}$$

$$\rho_s = 3000 \text{ ohms.m (resistividade superficial da camada de brita)}$$

$$V'_{\text{toque}} = 902,2 \text{ volts}$$

Este valor de 902,2 volts é superior a máxima tensão "válvula de manobra - solo" de 654 volts que pode ocorrer nestes dispositivos instalados nos pontos de purga (vide tabela 6.5).

Em regime permanente, os níveis de tensão na tubulação são extremamente baixos por se tratar de uma tubulação enterrada, que apesar de ser revestida, a sua extensão já lhe propicia um bom aterramento. A única preocupação existente, era com os possíveis choques em trabalhadores que entrem em contato com as válvulas de manobra, mas conforme já foi verificado, os níveis suportáveis são inferiores aos níveis resultantes e não representam riscos de eletrocução.

Ressalta-se que as interferências elétricas em estudo, foram analisadas na fase de ante-projeto da instalação, onde foi possível se fazer até alteração no traçado da tubulação, com o objetivo de se reduzir os acoplamentos existentes. Isto só foi possível, graças a conscientização para o problema das interferências entre LT's e tubulações, existentes nos técnicos e responsáveis pela WHITE MARTINS, que informaram todos os dados solicitados e aceitaram todas as recomendações feitas pela CHESF.

6.2 - ANÁLISE DAS INTERFERÊNCIAS ELÉTRICAS DAS LT'S CMD-CTG-04M5/04M6, CMD-MTT-04M7, CMD-PTU-04M8 E CTG-CTU-02J5/02J6 SOBRE A DUTOVIA DA COPENE.

A construção da dutovia da COPENE, composta de sete tubulações para transporte de líquidos e gases diversos, cruza a faixa de servidão das LT's CMD-CTG-04M5/04M6, CMD-MTT-04M7, CMD-PTU-04M8 e CTG-CTU-02J5/02J6. Face aos perigos que situações de operação em condições de anormalidade podem ocasionar a estas novas instalações, necessário se faz uma análise detalhada das interferências elétricas ocasionadas pelas LT's visando verificar os riscos de acidentes em terceiros e/ou às próprias tubulações.

6.2.1. - Características Técnicas das Instalações

A seguir são apresentadas as características técnicas das instalações em estudo. Na figura 6.9, apresenta-se um desenho esquemático da posição relativa das LT's e da dutovia.

6.2.1.1. - Dutovia

Compõe-se de sete tubulações que correm paralelas entre si. Tem as seguintes características:

a) Material - aço carbono

b) Diâmetros : 1 x 14" (p/ NAFTA) = 0,3556 m

1 x 3" (p/ METANOL) = 0,0762 m

3 x 4" (p/ Cq, MTBE e BUTADIENO) = 0,1016 m

2 x 6" (p/ PROPENO e ETENO) = 0,1524 m

c) Profundidade de enterramento - 1m

d) Revestimento :

- para 14" - polietileno (espessura: 5×10^{-3} m)

- para os demais - esmalte asfáltico (espessura : 5×10^{-3} m)

e) Resistividade:

- do solo: 450 ohms x m (medições feitas pela CHESF)
- do revestimento: $2,5 \times 10^7$ ohms x m (polietileno)
 $2,5 \times 10^6$ ohms x m (esmalte asfáltico)
- dos tubos: $0,20 \times 10^{-6}$ ohms x m

Observa-se, em conformidade com a figura 6.9, que são apresentados os detalhes construtivos da tubulação apenas nas proximidades do cruzamento da dutovia com as LT's. Maiores informações tais como, extensão total, traçado da tubulação, localização física dos seccionamentos (juntas isolantes), aterramentos e válvulas da manobra, não foram fornecidos à CHESF.

6.2.1.2 - Linhas de Transmissão

Na tabela 6.8, registram-se as correntes de curto-circuito fase-terra limites para o sistema CHESF, consideradas nos cálculos dos acoplamentos indutivo e resistivo.

A seguir, são dadas algumas características básicas das LT's em foco. Ressalta-se que os esquemas de contrapesos considerados aos cálculos do acoplamento resistivo, não são os que realmente se encontram no campo, porém, devem estar bem próximos da configuração real, pois, foram dimensionados para a resistividade real do solo de 450 ohms x m e resistência de pé-de-torre de 20 ohms.

- LT CMD-CTG-04M5

- a) Circuito simples horizontal
- b) Cabo condutor: 2 x 636 MCM GROSBEAK 26/7
- c) Cabo pára-raios: ALUMOWELD 3 nº 7 AWG
- d) Configuração dos contrapesos: vide figura 6.10
- e) Cruzamento c/dutovia: entre est. 18 e 19

- LT CMD-MTT-04M7

- a) Circuito simples horizontal
- b) Cabo condutor: 1 x 636 MCM GROSBEAK 26/7
- c) Cabo pára-raios: aço 3/8 HS 7 fios

- d) Configuração dos contrapesos: vide figura 6.11
- e) Cruzamento c/dutovia: entre est. 5/3 e 6/1

- LT CMD-CTG-04M6

- a) Circuito simples horizontal
- b) Cabo condutor: 1 x 636 MCM GROSBEAK 26/7
- c) Cabo pára-raios: aço 3/8" HS 7 fios (inexistentes nos vãos próximos ao cruzamento).
- d) Configuração dos contrapesos: vide figura 6.12
- e) Cruzamento c/dutovia: entre est. 20 e 21

- LT CTG-CTU-02J5/02J6

- a) Circuito duplo vertical
- b) Cabo condutor: 1 x 397.5 MCM IBIS 26/7
- c) Cabo pára-raios: será reinstalado cabo de aço 3/8 HS 7 fios
- d) Configuração dos contrapesos: vide figura 6.13
- e) Cruzamento c/dutovia: entre est. 18/3 e 18/4

- LT CMD-PTU-04M8 / (circuito futuro)

- a) Circuito duplo com apenas um circuito lançado
- b) Cabo condutor: 2 x 636 MCM GROSBEAK 26/7
- c) Cabo pára-raios: 176.9 MCM DOTTEREL
- d) Configuração dos contrapesos: vide figura 6.14
- e) Cruzamento com dutovia: entre est. 5/4 e 6/1

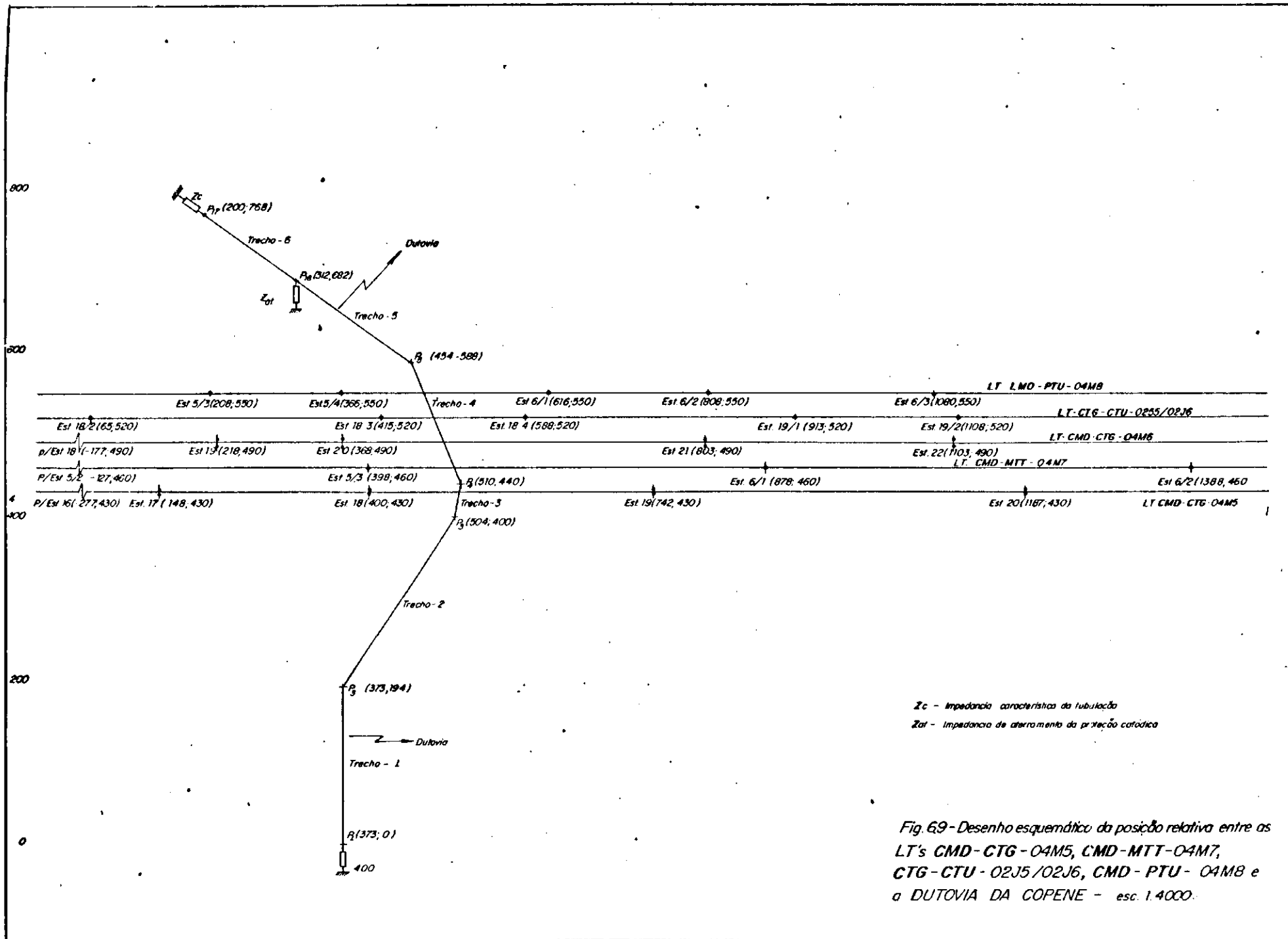


Fig. 69- Desenho esquemático da posição relativa entre as LT's CMD-CTG-04M5, CMD-MTT-04M7, CTG-CTU-02J5/02J6, CMD-PTU-04M8 e a DUTOVIA DA COPENE - esc. 1.4000.

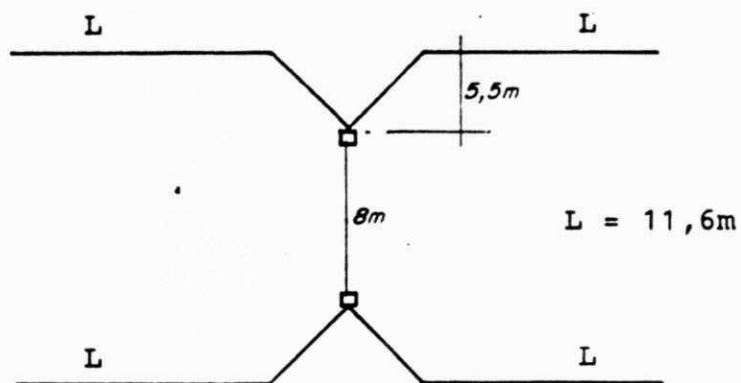


Figura 6.10
Esquema de contrapeso das estruturas 16, 17, 18, 19 e 20
da LT CMD-CTG-04M5 (450 ohms.m; 20 ohms)

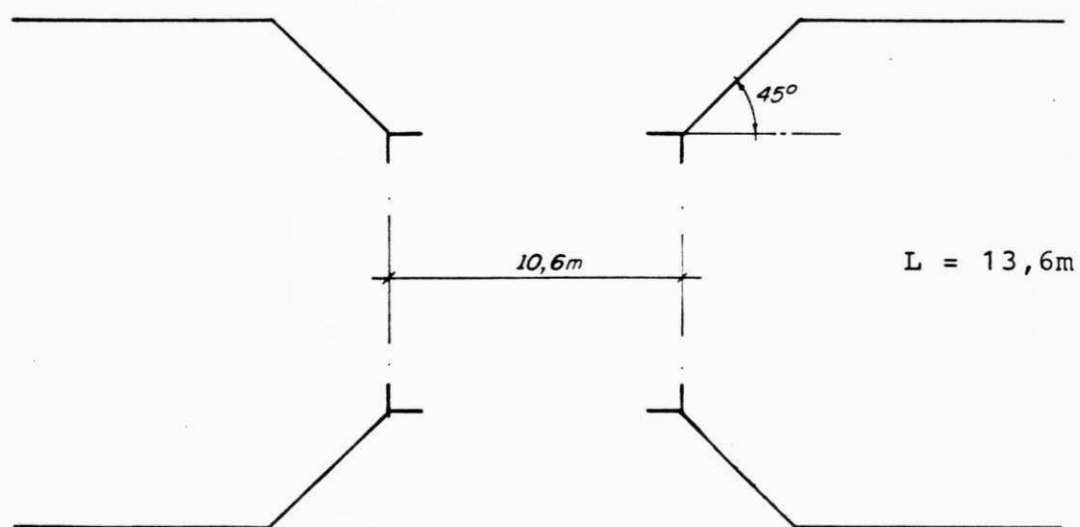


Figura 6.11
Esquema de contrapeso das estruturas 5/2, 5/3, 6/1, 6/2 e 6/3
da LT CMD-MTT-04M7 (450 ohms.m; 20 ohms)

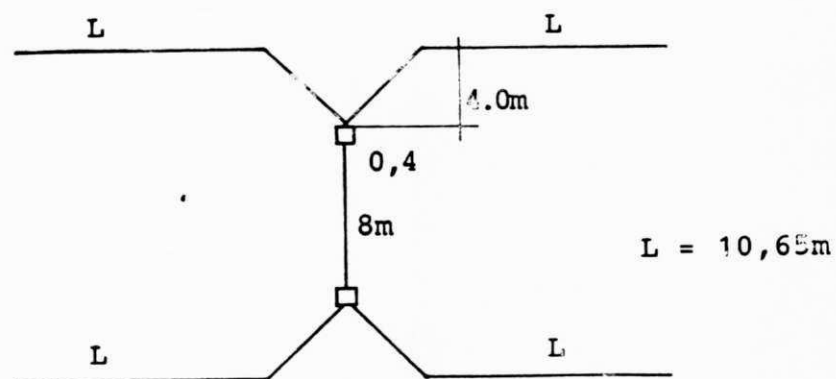


Figura 6.12
Esquema de contrapeso das estruturas 18, 19, 20, 21 e 22
da LT CMD-CTG-04M6 (450 ohms.m; 20 ohms)

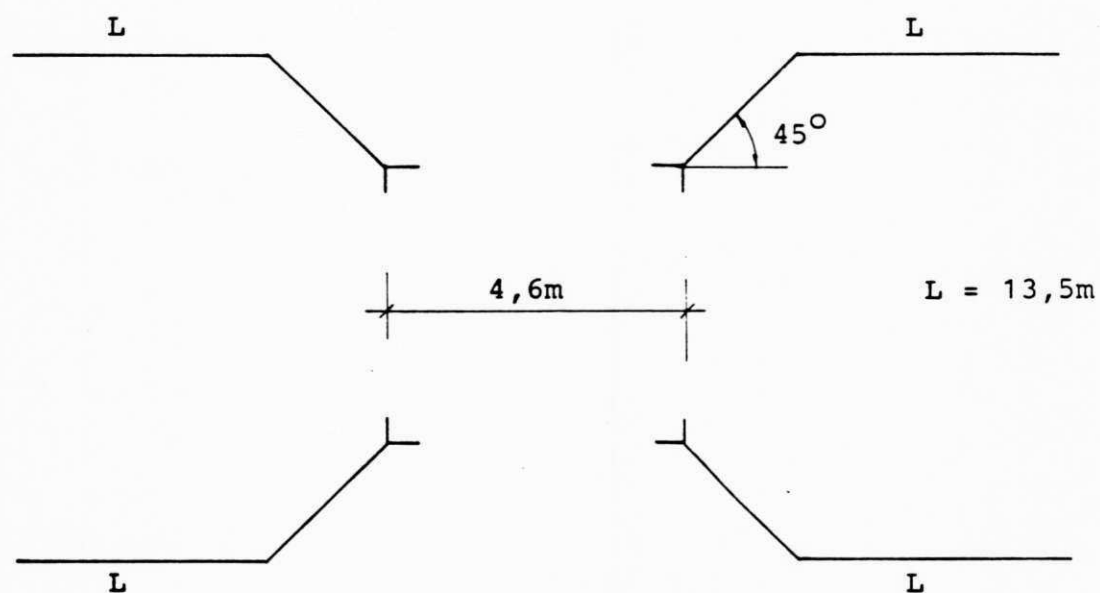


Figura 6.13
Esquema de contrapeso das estruturas 18/2, 18/3, 18/4, 19/1 e
19/2 da LT CTG-CTU-02J5/02J6 (450 ohms.m; 20 ohms)

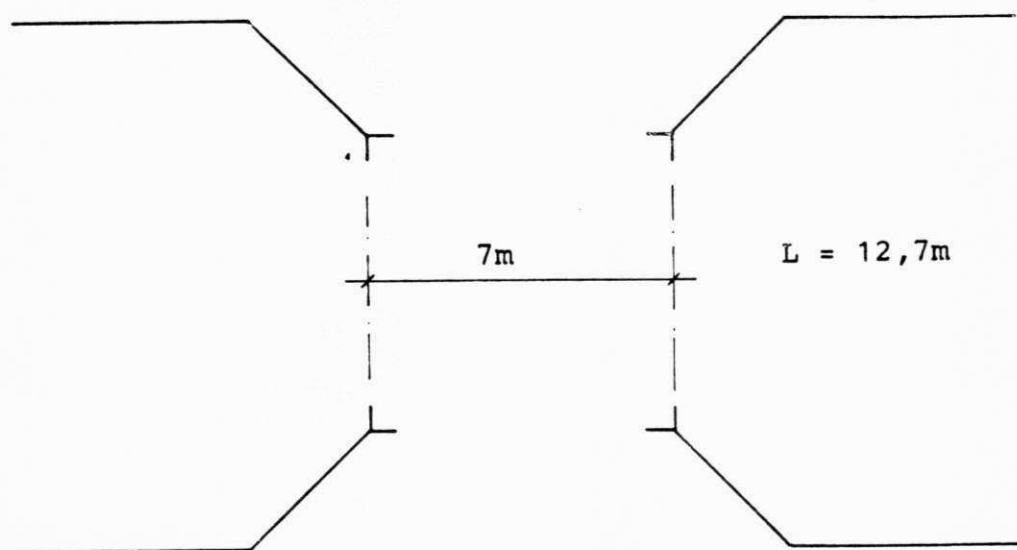


Figura 6.14
Esquema de contrapeso das estruturas 5/2, 5/3, 5/4, 6/1, 6/2 e 6/3
da LT CMD-PTU-04M8 (450 ohms.m; 20 ohms)

SE	Tensão (kV)	Corrente (kA)
Camaçari	230	50 -87,1 ⁰
Cotegipe	230	50 -84,5 ⁰
Matatu	230	50 -83,2 ⁰
Pituaçu	230	50 -85,0 ⁰
Cotegipe	69	10,3 -87,8 ⁰
Catu	69	3,6 -84,1 ⁰

Tabela 6.8
Limites de corrente de curto-circuito utilizados na análise

LT	2ª ANTES		1ª ANTES		EST. EM CURTO		1ª DEPOIS		2ª DEPOIS	
	EST.	CC	EST.	CC	EST.	CC	EST.	CC	EST.	CC
CMD-CTG-04M5	16	1700	17	1800	18	1915	19	1800	20	1700
CMD-MTT-04M7	15/1	1700	15/2	1800	15/3	1939	6/1	1800	6/2	1700
CMD-CTG-04M6	18	1800	19	1900	20	2013	21	1900	22	1800
CTG-CTU-02J5/ 02J6	--	--	18/2	400	18/3	441	18/4	400	19/1	350
CMD-PTU-04M8	15/2	350	5/3	400	5/4	497	6/1	400	6/2	350

Tabela 6.9

Correntes de curto-circuito consideradas na estrutura em curto e nas duas outras adjacentes a ela (situação crítica).

CC - Corrente de Curto-Circuito na Estrutura

Curto-Circuito na LT	Resistência de Terra da Prote- ção Catódica (ohms)	Localização		Tensão Máxima Revestimento (V)	Tensão Proteção Catódica (V)
		X	Y		
CMD-CTG-04M5	10	489	378	2488	1458
	100	489	378	2469	1439
	1000	489	378	2467	1437
CMD-MTT-04M7	10	490	492	2194	1264
	100	490	492	2178	1249
	1000	490	492	2176	1247
CMD-CTG-04M6 (Após inst. P-R)	10	476	529	2539	1932
	100	476	529	2520	1912
	1000	476	529	2520	1909
CMD-CTU-02J5/ 02J6 (Após inst. P-R)	10	475	534	929	399
	100	475	534	924	394
	1000	475	534	923	393
CMD-PTU-04M8	10	419	613	799	581
	100	419	613	794	575
	1000	419	613	793	575

Tabela 6.10

Localização da tensão máxima no revestimento da tubulação devido ao acoplamento resistivo, supondo a resistência de terra da proteção catódica 10, 100 e 1000 ohms (tubo de 14 pol.).

Curto-Circuito na LT	Resistência de Terra da Prote- ção Catódica (ohms)	Localização		Tensão Máxima Revestimento (V)	Tensão Proteção Catódica (V)
		X	Y		
CMD-CTG-04M5	10	489	378	2435	1405
	100	489	378	2409	1379
	1000	489	378	2405	1376
CMD-MTT-04M7	10	490	492	2151	1220
	100	490	492	2129	1199
	1000	490	492	2126	1196
CMD-CTG-04M6 (Após inst. P-R)	10	476	529	2484	1876
	100	476	529	2457	1849
	1000	476	529	2453	1845
CMD-CTU-02J5/ 02J6 (Após inst. P-R)	10	475	534	915	385
	100	475	534	908	378
	1000	475	534	908	377
CMD-PTU-04M8	10	419	613	785	566
	100	419	613	778	559
	1000	419	613	777	558

Tabela 6.11

Localização da tensão máxima no revestimento da tubulação devido ao acoplamento resistivo supondo a resistência de terra da proteção catódica 10, 100 e 1000 ohms (tubo de 4 pol.).

6.2.2 - Efeitos Elétricos a Serem Considerados

No caso em análise, verifica-se que a tubulação é enterrada em toda a extensão do cruzamento. Esta configuração elimina o acoplamento capacitivo, e é suficiente se analisar os acoplamentos resistivo e indutivo em situações de curto-circuito. Em condição de regime permanente torna-se desnecessário maiores análises, já que o trecho de paralelismo praticamente inexistente e o efeito de curto-circuito predomina.

De acordo com a figura 6.9, verifica-se que as situações de anormalidade na operação das LT's onde haverão maiores solitações de tensão elétrica na tubulação, face a proximidade estrutura/tubulação, são:

- Ocorrência de curto-circuito na estrutura 18 da LT CMD-CTG-04M5;
- idem para a estrutura 5/3 da LT CMD-MTT-04M7;
- idem para a estrutura 20 da LT CMD-CTG-04M6;
- idem para a estrutura 18/3 da LT CTG-CTU-02J5/02J6;
- Idem para a estrutura 5/4 da LT CMD-PTU-04M8.

Conforme pode ser verificado na figura 6.9, o ângulo de cruzamento das LT's com a tubovia, é superior a 70° (trechos 1, 2, 3 e 4), o que diminui sensivelmente o acoplamento indutivo.

Desta forma, o efeito predominante será o acoplamento resistivo, o qual terá sua influência analisada para cada um das situações de anormalidade já relacionadas. Os valores das correntes injetadas no solo, na estrutura de cruzamento mais próxima da dutovia e nas duas outras adjacentes a ela, estão especificados na tabela 6.9.

Nas tabelas 6.10 e 6.11, apresenta-se a localização da tensão máxima no revestimento das tubulações de 4 e 14 polegadas de diâmetro, para cada uma das situações de anormalidades já mencionadas, considerando-se apenas o acoplamento resistivo. Registra-se ainda, a tensão na proteção catódica, admitindo-se resistências de aterramento deste dispositivo de 10, 100 e 1000 ohms. Conforme pode ser verificado, o valor desta tensão praticamente independe do valor de aterramento da proteção catódica.

De posse destes dados, selecionou-se o caso mais crítico de tensão no revestimento, que é curto-circuito na estrutura 20 da LT CMD-CTG-04M6, para um estudo conjunto de acoplamento resistivo e indutivo. Ressalta-se que, as tensões provenientes dos acoplamentos resistivo e indutivo foram calculados considerando a LT CMD-CTG-04M6 com cabo pára-raios.

6.2.2.1 - Curto-Circuito na LT CMD-CTG-04M6

Na figura 6.15, encontra-se o gráfico do perfil de tensão no revestimento da tubulação de 14 polegadas, proveniente de um curto-circuito na estrutura 20 da LT CMD-CTG-04M6 (com cabo pára-raios), considerando-se que a resistência de aterramento da proteção catódica seja 10 ohms (situação mais crítica). Neste gráfico, está considerado o efeito conjunto dos dois acoplamentos, resistivo e indutivo.

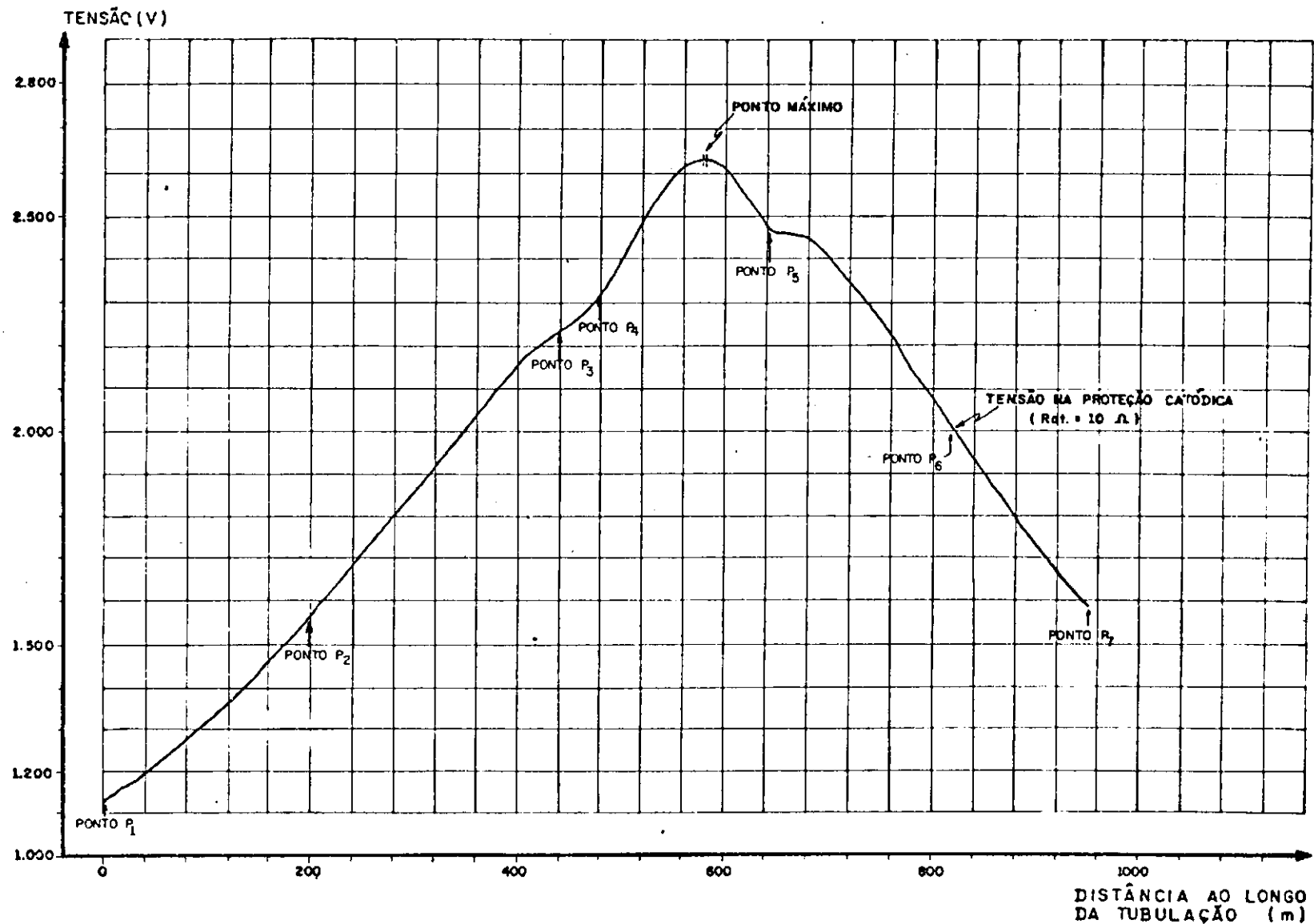


Figura 6.15 - PERFIL DE TENSÃO NO REVESTIMENTO DA TUBULAÇÃO DE 14" (ACOPLAMENTO RESISTIVO + INDUTIVO EM CONSEQUÊNCIA DE UM CURTO-CIRCUITO NA EST. 20 DA LT. CMD-CTG - 04M6 , RESIST. DE ATERRAMENTO DA PROTEÇÃO CATÓDICA GUAL A 10Ω).

6.2.3 - Conclusões / Recomendações

O traçado proposto para implantação da dutovia é viável, desde que atende as principais recomendações de projeto para minimizar os efeitos elétricos das linhas de transmissão. Contudo, ressalta-se algumas medidas de segurança da maior importância:

- Instalação de juntas isolantes nos terminais das tubulações em todas as áreas onde possa haver contato de pessoas;
- Investigar se a proteção catódica a ser instalada suporta a solicitação de tensão prevista, ou seja, 1932 V durante 0,5s. Caso negativo, afastar este dispositivo para uma posição mais adequada, de acordo com o perfil de tensão da figura 6.15.

Todas as conclusões foram baseadas no estudo da interferência na tubulação de 14 polegadas, em consequência de um curto-circuito na estrutura 20 da LT CMD-CTG-04M6, caso mais crítico de anormalidade que pode ocorrer. Conforme pode ser verificado, a máxima solicitação de tensão no revestimento é 2,63 kV, valor inferior aos 5kV preconizados nas normas e padronizações internacionais [12], como a tensão máxima suportável pelo revestimento das tubulações.

Das simulações realizadas, verificou-se ser indispensável a instalação de cabo pára-raios nas LT's CMD-CTG-04M6 e CTG-CTU-02J5 e 02J6; caso contrário, os valores de corrente de curto-circuito injetados no solo pela estrutura defeituosa provocará tensões na camada isolante superiores aos permitidos em normas e especificações, expondo a tubulação ao perigo da oxidação precoce nas proximidades do cruzamento e também, a ruptura das juntas isolantes, pondo em perigo vidas humanas e/ou todo o esquema de proteção catódica.

CAPÍTULO 7

7. - CONCLUSÕES

O presente trabalho apresenta uma metodologia de cálculo dos efeitos dos diversos acoplamentos entre LT's e tubulações metálicas, onde foi aplicada uma técnica que discretiza o circuito equivalente de uma tubulação, direcionando a análise para a implementação de um programa computacional que calcula o perfil de tensão ao longo destas instalações.

Ressalta-se que a metodologia apresentada neste trabalho, pode também ser aplicada, com algumas variações, na análise de interferências entre linhas de transmissão e:

- Linhas de telecomunicações (telefone, telégrafo, sinalização, comando, etc);
- Ferrovias;
- Objetos metálicos fixos e móveis (cercas metálicas, veículos, etc);
- Outras linhas de transmissão, sub-transmissão ou distribuição de energia elétrica.

Uma vez que os acoplamentos indutivo e resistivo são função das correntes circulantes na linha de transmissão e das correntes injetadas no solo, respectivamente, independentemente da tensão de operação da mesma, seus efeitos podem ser muitos severos, até para linhas de distribuição, como por exemplo, linhas de 69 kV.

A realização de medições de campo, poderá contribuir bastante para aferir os modelos teóricos que vêm sendo empregados, tanto no que se refere a quantificação das tensões resultantes devido aos diversos acoplamentos estudados, quanto ao levantamento dos valores de suportabilidade de alguns acessórios utilizados em tubulações enterradas.

É extremamente importante que se promovam encontros técnicos, para a divulgação de trabalhos sobre interferências entre linhas de transmissão e objetos metálicos junto às empresas concessionárias/proprietárias, projetistas e construtores de tubulação, linhas, ferrovias, etc, no sentido de conscientizá-los para os problemas decorrentes dos efeitos destas interferências, os quais expõem a integridade física de pessoas e instalações.

A contribuição deste trabalho ao estudo das interferências de linhas de transmissão em tubulações metálicas, conforme já mencionado, foi o desenvolvimento de uma metodologia de cálculo e implantação de um programa computacional para a simulação de tensões induzidas nas tubulações e seus acessórios.

Como sugestões para estudos futuros sobre o assunto, registram-se:

- no que se refere ao acoplamento resistivo, adotar uma metodologia que considere a presença da tubulação no cálculo dos potenciais ao longo do seu traçado, ou seja, que se adote o método de cálculo acoplado [20].
- na determinação do acoplamento indutivo para tubulações enterradas, adotar uma metodologia que determine o campo elétrico longitudinal induzido na tubulação considerando-se a presença do solo, transformando as equações integrais resultantes nesta situação particular, em séries polinomiais menos complexas [20] [21].

ANEXO A.1 - SOLUÇÃO DO CIRCUITO EQUIVALENTE MULTI-PI DE UMA TUBULAÇÃO METÁLICA.

A análise das tensões dos nós dos circuitos multi- π 's apresentados no capítulo 4, reduz-se a solução do sistema de equações lineares complexas apresentado abaixo:

$$\begin{array}{cccccccc|ccc}
 B_1 & C_1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & S_1 & R_1 \\
 A_2 & B_2 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & S_2 & R_2 \\
 0 & A_3 & B_3 & C_3 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & S_3 & R_3 \\
 0 & 0 & A_4 & B_4 & C_4 & \dots & 0 & 0 & 0 & S_4 & R_4 \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & A_{n-1} & B_{n-1} & C_{n-1} & S_{n-1} & R_{n-1} \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & A_n & B_n & S_n & R_n
 \end{array}$$

Onde,

$A_2, A_3, \dots, A_n, C_1, C_2, \dots, C_{n-1}$ - admitâncias de transferência entre dois nós;

B_1, B_2, \dots, B_n - admitâncias de entrada de um nó;

S_1, S_2, \dots, S_n - vetor das tensões de barras;

R_1, R_2, \dots, R_n - vetor das correntes injetadas.

Fazendo:

$$\begin{array}{lll}
 A_2 = a_2 + j d_2 & B_1 = b_1 + j e_1 & C_1 = c_1 + j f_1 \\
 A_3 = a_3 + j d_3 & B_2 = b_2 + j e_2 & C_2 = c_2 + j f_2 \\
 \dots & \dots & \dots \\
 \vdots & \vdots & \vdots \\
 \dots & \dots & \dots \\
 A_{2n} = a_{2n} + j d_{2n} & B_{2n} = b_{2n} + j e_{2n} & C_{2n-1} = c_{2n-1} + j f_{2n-1}
 \end{array}$$

$$\begin{array}{ll}
 S_1 = s_1 + j s_{n+1} & R_1 = r_1 + j r_{n+1} \\
 S_2 = s_2 + j s_{n+2} & R_2 = r_2 + j r_{n+2} \\
 \vdots & \vdots \\
 \vdots & \vdots \\
 S_n = s_n + j s_{2n} & R_n = r_n + j r_{2n}
 \end{array}$$

Desmembrando o sistema complexo, consegue-se o seguinte sistema real [17]:

$$\begin{array}{cccccccccccc|cc}
 b_1 & c_1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & e_1 & f_1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & s_1 & r_1 \\
 a_2 & b_2 & c_2 & \dots & 0 & 0 & 0 & d_2 & e_2 & f_2 & \dots & 0 & 0 & 0 & s_2 & r_2 \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 0 & 0 & 0 & \dots & a_{n-1} & b_{n-1} & c_{n-1} & 0 & 0 & 0 & \dots & d_{n-1} & e_{n-1} & f_{n-1} & s_{n-1} & r_{n-1} \\
 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & a_n & b_n & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & d_n & e_n & s_n & r_n \\
 & & & & & & & & & & & & & & & = \\
 e_{n+1} & f_{n+1} & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & b_{n+1} & c_{n+1} & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & s_{n+1} & r_{n+1} \\
 d_{n+2} & e_{n+2} & f_{n+2} & \dots & 0 & 0 & 0 & a_{n+2} & b_{n+2} & c_{n+2} & \dots & 0 & 0 & 0 & s_{n+2} & r_{n+2} \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 0 & 0 & 0 & \dots & d_{2n-1} & e_{2n-1} & f_{2n-1} & 0 & 0 & 0 & \dots & a_{2n-1} & b_{2n-1} & c_{2n-1} & s_{2n-1} & r_{2n-1} \\
 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & d_{2n} & e_{2n} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & a_{2n} & b_{2n} & s_{2n} & r_{2n}
 \end{array}$$

A arrumação do sistema na forma apresentada é de extrema utilidade, pois, permite armazenar e trabalhar com ele nesta forma. Este procedimento, permite uma economia substancial de memória, sem o qual, seria impossível a solução do sistema, pois, seria impossível armazená-la. Para um circuito de 1000m, por exemplo, tem-se que reservar $4 \times 2 \times 1000 = 8000$ espaços de memória. Se fosse utilizado um sistema convencional, teríamos $2000 \times 2000 = 4 \times 10^6$ espaços de memória!

Para a solução do sistema real, são feitas as seguintes transformações básicas de matrizes [17]:

- 1º- Tornar $b_1 = 1$ e zerar a_2, e_{n+1} e d_{n+2} ;
- 2º- Tornar $b_{n+1}=1$ e em seguida, zerar a_{n+2}, d_2 e e_1 ;
- 3º- Tornar $b_2=1$ e zerar a_3, e_{n+2} e d_{n+3} ;
- 4º- Tornar $b_{n+2}=1$ e zerar a_{n+3}, d_3 e e_2 ;
- 5º- Prosseguir nesta eliminação até se chegar na $2n$ -ésima linha da matriz, tornar o elemento $b_{2n}=1$ e zerar e_n .

Ao fim destas operações, todos os a_j, d_j, e_j estarão zerados, os b_j iguais a 1, e a matriz equivalente com a seguinte forma:

$$\begin{array}{cccccccccccc|c|c}
 1 & c'_1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & f'_1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & s_1 & r'_1 \\
 0 & 1 & c'_2 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & f'_2 & \dots & 0 & 0 & 0 & s_2 & r'_2 \\
 \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\
 \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\
 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & c'_{n-1} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & f'_{n-1} & s_{n-1} & r'_{n-1} \\
 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & s_n & r'_n \\
 0 & f'_{n+1} & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 1 & c'_{n+1} & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & s_{n+1} & r'_{n+1} \\
 0 & 0 & f'_{n+2} & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & c'_{n+2} & \dots & 0 & 0 & 0 & s_{n+2} & r'_{n+2} \\
 \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\
 \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\
 \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\
 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & f_{2n-1} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & c'_{2n+1} & s_{2n-1} & r'_{2n-1} \\
 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 1 & s_{2n} & r'_{2n}
 \end{array}$$

A solução do sistema fica agora fácil de se obter. Pela substituição de trás para frente alternada, aplicada a equação $2n$, depois a n , em seguida a $2n-1$, a $n-1$, ...

Assim,

$$1 \cdot s_{2n} = r_{2n}$$

$$1 \cdot s_n = r'_n$$

$$f'_{2n-1} \cdot s_{n+1} \cdot s_{2n-1} + c'_{2n+1} \cdot s_{2n} = r'_{2n-1}$$

$$1 \cdot s_{n-1} + c'_{n-1} \cdot s_n + f'_{n-1} \cdot s_{2n} = r'_{n-1}$$

⋮

$$f'_{n+1} \cdot s_2 + 1 \cdot s_n + c'_{n+1} \cdot s_{n+1} = r'_{n+1}$$

$$1 \cdot s_1 + c'_1 \cdot s_2 + f'_1 \cdot s_{n+2} = r'_1$$

ANEXO A.2 - PROGRAMA PARA DETERMINAÇÃO DAS INTERFERÊNCIAS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO DE CORRENTE ALTERNADA EM TUBULAÇÕES METÁLICAS.

A.2.1 - Título do Programa - INTERLT

A.2.2 - Objetivo do Programa

O programa tem como objetivo, a determinação do perfil de tensão nas tubulações metálicas sujeitas a interferências com linhas de transmissão. A partir deste resultado, são determinados:

- A tensão elétrica nas juntas isolantes localizadas na tubulação;
- O perfil de tensão elétrica no revestimento isolante ao longo de tubulações enterradas;
- A tensão elétrica nas válvulas de manobra e a corrente imposta ao corpo de um trabalhador quando em contato com estes acessórios;
- A corrente elétrica imposta ao corpo de uma pessoa, quando em contato com tubulações aéreas;
- A tensão elétrica nas proteções catódicas.

A.2.3 - Metodologia Utilizada pelo Programa

O programa desenvolvido utiliza a metodologia descrita no capítulo 4 deste trabalho.

A.2.4 - Organização dos Dados de Entrada

Para execução de um caso, é necessário se dispor das correntes nos condutores e cabos pára-raios, configuração das malhas de terra das estruturas dos circuitos, das características das tubulações e da posição relativa entre o corredor de LT's e a tubulação. A seguir, detalha-se cada tipo de cartão de dados com o significado e o formato dos campos:

1º Cartão - Comentários

Descrição do Campo	Colunas	Formato
- Título do estudo o qual será impresso em todas as folhas do relatório de saída.	1-80	20 A4

2º Cartão - Controle de Impressão e Definição do Caso que será Estudado.

Descrição do Campo	Colunas	Formato
- Emissão do perfil de tensão devido ao acoplamento resistivo. Se igual a: 0 - não emite 1 - emite	1-1	I1
- Idem para o acoplamento indutivo	2-2	I1
- Incremento a ser considerado para a saída do perfil de tensão.	3-4	I2
- Caso estudado. Se igual a: 0 - regime permanente 1 - regime de curto-circuito	5-5	I1
- Saída do circuito equivalente de Thevenin no início de cada trecho. Se igual a: 0 - não emite 1 - emite	6-6	I1
- Extensão do segmento de circuito pi a ser considerado.	8-13	F6.1

39 Cartão - Localização das Estruturas da LT em Falta com as Correntes Injetadas no Solo.

Descrição do Campo	Colunas	Formato
- Abscissa da estrutura (m).	1-5	F5.1
- Ordenada da estrutura (m).	6-10	F5.1
- Módulo da corrente injetada no solo pela estrutura (A).	11-16	F6.0
- Ângulo da corrente injetada no solo pela estrutura (G).	17-22	F6.1
- Resistividade do solo no local da estrutura (ohms.m).	41-46	F6.0
- Raio dos eletrodos da malha da estrutura (m).	47-53	F7.5
- Número da estrutura.	54-61	A8

Observações -

- a) As coordenadas da estrutura são em relação ao sistema geral X,Y,Z.
- b) No regime permanente as coordenadas da estrutura representam a orientação para a origem do eixo 'x', nos cartões de características da LT paralela (campo 23-28 do 109 cartão).
- c) Deixar cartão em branco após a última estrutura.

49 Cartão - Configuração das Malhas das Estruturas

Descrição do Campo	Colunas	Formato
- Abscissa inicial do eletrodo (m)	4-10	F7.2
- Ordenada inicial do eletrodo (m)	11-17	F7.2
- Profundidade inicial do eletrodo (m).	18-24	F7.2
- Abscissa final do eletrodo (m)	25-31	F7.2
- Ordenada final do eletrodo (m)	32-38	F7.2
- Profundidade final do eletrodo (m)	39-45	F7.2
- Raio do eletrodo se for diferente do especificado no campo 47-53 do 39 cartão (m).	46-52	F7.5

Observações -

- Aç coordenadas dos eletrodos são em relação aos sistemas (X', Y', Z') , com origem no centro de cada estrutura.
- Para encerrar cada estrutura, fazer o campo 4-10 igual a 9999.99.
- Deixar um cartão em branco após o cartão de encerramento da última estrutura.

59 Cartão - Correntes de Curto-Circuito

Descrição do Campo	Colunas	Formato
- Corrente no condutor à esquerda da estrutura (parte real) (A).	1-8	F8.0
- Idem (parte imaginária) (A).	9-16	F8.0
- Corrente no pára-raios 'v', à esquerda da estrutura (parte real) (A).	17-24	F8.0
- Idem (parte imaginária) (A).	25-32	F8.0
- Corrente no pára-raios 'w', à esquerda da estrutura (parte real) (A).	33-40	F8.0
- Idem (parte imaginária) (A).	41-48	F8.0

Observações -

- a) Desde que a análise se restringe a N estruturas, ($N < 21$) deverão ser preenchidos (n+1) cartões de correntes de curto-circuito.
- b) Quando se tratar da análise em regime de permanente, pode-se deixar (n+1) cartões em branco.

69 Cartão - Traçado e Características da Tubulação

Descrição do Campo	Colunas	Formato
- Abscissa inicial do trecho de tubulação (m).	1-7	F7.2
- Ordenada inicial do trecho de tubulação (m).	8-14	F7.2
- Profundidade inicial do trecho de tubulação. (m)	15-21	F7.2
- Abscissa final do trecho de tubulação (m)	22-28	F7.2
- Ordenada final do trecho de tubulação (m)	29-35	F7.2
- Profundidade final do trecho da tubulação (m)	36-42	F7.2
- Resistividade da tubulação (ohms.m)	43-52	E10.3
- Permeabilidade magnética relativa da tubulação (adimensional).	53-59	F7.1
- Se tubulação : área - 1 : enterrada - 0	60-60	I1
- Se tubulação : nua - 1 : revestida - 0	61-61	I1
- Altura ou profundidade do eixo central da tubulação (m).	62-66	F5.2
- Se tubulação/condutor : maciço - 1 : tubular - 0	67-67	I1
- Se a espessura T da tubulação: lida - 1 calculada - 0	68-68	I1

Observação -

- a) As coordenadas da tubulação são em relação ao sistema geral (X, Y, Z).

79 Cartão - Continuação

Descrição do Campo	Colunas	Formato
- Espessura da tubulação (m).	1-10	F10.6
- Resistividade média do solo no trecho (ohms.m).	11-16	F6.0
- Diâmetro da tubulação (m).	17-22	F6.3
- Resistividade do revestimento externo anti-corrosivo da tubulação.	23-32	E10.3
- Espessura do revestimento externo anti-corrosivo da tubulação (m).	33-42	E10.3
- Permissividade dielétrica relativa do revestimento externo anti-corrosivo (adimensional).	43-52	F10.3
- Admitância para a terra no início do trecho (parte real) (mhos).	53-56	F4.3
- Idem (parte imaginária) (mhos).	57-60	F4.3
- Admitância para a terra no fim do trecho (parte real) (mhos).	61-64	F4.3
- Idem (parte imaginária) (mhos).	65-68	F4.3
- Admitância de ligação com o trecho de tubulação anterior (parte real) (mhos).	69-74	F6.3
Pode assumir:		
a) 0000. - não existe ligação ($Y_L = 0$)		
b) 9999. - existe ligação ($Y_L = \text{infinito}$)		
c) 1111. - trecho ligado à tubulação longa ($Y_L = 1/Z_C$)		
d) Outro valor que represente a ligação com o trecho anterior.		
- Idem (parte imaginária). Só poderá ser diferente de zero para a opção 'd' (mhos).	75-80	F6.3

Observações -

- a) A tubulação deverá ser dividida em trechos retilíneos de, no máximo, 500m. Quando mudar alguma de suas características elétricas ou a resistividade do solo, isto pode ser simulado se considerando outro trecho, onde estas características são inseridas.
- b) Para terminar, fazer o campo 43-52 igual a $9.99 \text{ E}+03$.
- c) Se, de um trecho para outro, mudar apenas a direção da tubulação fazer campo 43-52 igual a $0.00 \text{ E}+00$.

89 Cartão - Fontes Equivalentes de Thevenin que Substituirão Ramais de Tubulação e/ou Circuito de Proteção Catódica.

Descrição do Campo	Colunas	Formato
- Se igual a: 0 - equivalente em regime permanente. 1 - equivalente em regime de curto-circuito	1-1	I1
- Início do trecho onde está ligado o equivalente de Thevenin.	2-3	I2
- Módulo da tensão de Thevenin para o acoplamento resistivo (V).	4-13	E10.4
- Idem para o ângulo (G).	14-19	F6.1
- Módulo da tensão de Thevenin para o acoplamento indutivo (V).	20-29	E10.4
- Idem para o ângulo (G).	30-35	F6.1
- Admitância de Thevenin (parte real) (mhos).	36-45	E10.4
- Idem (parte imaginária) (mhos).	46-55	E10.4

Observação -

- a) Deixar um cartão em branco após o último cartão. Caso não haja nenhum equivalente de Thevenin, deixar um cartão em branco.

99 Cartão - Comentários

Descrição do Campo	Colunas	Formato
Título para o estudo em regime permanente.	1-80	20A4

100 Cartão - Características das LT's Paralelas/Transversais

Descrição do Campo	Colunas	Formato
- Número da fase. Se pára-raio, fazer igual a zero.	1-3	I3
- Resistência do cabo (ohms/km).	4-9	F6.4
- Raio médio geométrico do condutor (m).	10-16	F7.5
- Diâmetro do cabo (m).	17-22	F6.4
- Distância horizontal. A origem do eixo 'x' deve estar em conformidade com o campo 1-5 do 30º cartão (m).	23-28	F6.1
- Altura do cabo na torre (m).	29-33	F5.1
- Altura do cabo no meio do vão (m). Se campos 29-33 e 34-38 forem iguais, este valor é tomado como altura média.	34-38	F5.1
- Número de subcondutores do feixe.	47-48	I2
- Módulo da corrente no subcondutor/condutor (A) em regime permanente.	49-58	E10.4
- Ângulo da corrente no subcondutor/condutor (G) em regime permanente.	59-64	F6.1
- Módulo de tensão de fase (kV).	65-74	E10.4
- Ângulo da tensão de fase (G).	75-80	F6.1

Observações -

- a) Se regime de curto-circuito, colocar apenas o circuito em falta. Será considerado o condutor nº 1 em curto-circuito.

- b) Os condutores geminados devem entrar um a um, e as correntes informadas em regime permanente, serão os valores de cada sub-condutor;
- c) Ordenação dos condutores e pára-raios:
 - Condutores do circuito 1
 - Condutores do circuito 2
 - *****
 - Condutores do circuito N
 - Pára-raios do circuito 1
 - Pára-raios do circuito 2
 - *****
 - Pára-raios do circuito N
- d) Deixar cartão em branco para encerrar a entrada de dados.

A.2.5 - Limitações do Programa

- a) - Número máximo de trechos de tubulação : 20
- b) - Extensão máxima de cada trecho de tubulação : 500m
- c) - Número máximo de eletrodos da malha de cada estrutura : 50
- d) - Número máximo de condutores de LT's paralelas na análise em regime permanente: 100 cabos (subcondutores + pára-raios).
- e) - Número máximo de estruturas : 20
- f) - extensão máxima de tubulação : $20 \times 500 \text{ m} = 10 \text{ km}$

A.2.6 - Relatório de Saída do Programa

Faz parte do Relatório de Saída, as seguintes listagens:

- a) - Características Elétricas e Físicas da Instalação:
 - Apresenta, para conferência visual, os dados de entrada referentes à tubulação.
- b) - Parâmetros Elétricos da Tubulação
- c) - Admitâncias de Aterramento e de Ligação para Outros Trechos:
 - Informa-se qual a configuração do circuito equivalente da tubulação, mostrando a localização das admitâncias de aterramento e de ligação para outros trechos.

d) - Perfil de Potenciais - Acoplamento Resistivo:

Caso solicitado, informa o potencial no solo, na tubulação e a tensão na camada isolante, em regime de curto-circuito devido ao acoplamento resistivo, para todos os pontos da tubulação.

e) - Perfil de Potenciais - Acoplamento Indutivo:

Caso solicitado, informa o campo elétrico longitudinal, o potencial na tubulação e a tensão na camada isolante, em regime permanente ou curto-circuito, devido ao acoplamento indutivo, para todos os pontos da tubulação.

f) - Tensões e Correntes Induzidas na Tubulação - Acoplamento Capacitivo:

Em regime permanente, informa a tensão na tubulação, corrente de contato, a energia de descarga capacitiva, e o seccionamento para energia de 14 mJ, devido ao acoplamento capacitivo.

g) - Configuração dos Cabos das Linhas:

Em regime permanente, informa as características do corredor de linhas próximas à tubulação.

h) - Dados Referentes às Correntes e Tensões em Regime Permanente:

Em regime permanente, informa as tensões e correntes nas linhas, utilizadas como entrada, e as correntes induzidas nos cabos pára-raios multi-aterrados calculados pelo programa.

i) - Perfil de Tensão ao Longo da Tubulação:

Fornece, com o incremento de distância progressiva solicitado, o potencial na tubulação, a tensão na camada isolante e a tensão tubulação-solo devido aos efeitos dos acoplamentos resistivo e indutivo juntos.

j) - Tensão Elétrica nas Juntas Isolantes:

Fornece o valor das tensões elétricas resultantes nas juntas isolantes existentes na tubulação.

l) - Dados da Malha de Aterramento da Estrutura:

Informa a configuração da malha de aterramento das estruturas, com sua respectiva resistência de aterramento. Informa também, a corrente injetada na malha em curto-circuito e outros dados de entrada para conferência visual.

A.2.7 - Caso Exemplo

Anexo, são apresentadas as listagens fornecidas pelo programa, como resultado da análise das interferências elétricas entre as LT's JCR-DOW-04N3 e 04N4, com a tubulação da WHITE MARTINS, apresentada no trabalho como uma aplicação prática.

A.2.8 - Fluxograma

O fluxograma do programa computacional desenvolvido é apresentado adiante, o qual está modulado da seguinte forma:

a) - Programa Principal (INTERLT) :

Lê os dados de entrada e consiste alguns deles. Identifica qual o acoplamento que predomina para todos os trechos da tubulação e organiza a chamada das sub-rotinas, com o objetivo de atender as solicitações feitas de acordo com os dados de entrada, emitindo os relatórios de saída.

b) - Sub-rotina DIMALH :

Calcula o potencial no solo ao longo de todo traçado da tubulação. Utiliza as seguintes sub-rotinas como apoio:

- Sub-rotina RMUTUA - calcula a resistência mútua entre dois eletrodos não paralelos da malha da estrutura, utilizando as equações (4.20a) e (4.21);

- Sub-rotina RMPAR - calcula a resistência mútua entre dois eletrodos paralelos da malha da estrutura, utilizando as equações (4.20a) e (4.23);

- Sub-rotina RESIS - calcula a resistência própria de um eletrodo da malha da estrutura, utilizando as equações (4.20a), (4.24) e (4.25);

- Sub-rotina ELGAJO - soluciona equações lineares pelo método de eliminação de Gauss-Jordan;

- Sub-rotina TETOPA - Secciona a tubulação em incrementos de comprimento ΔL e determina o potencial no solo, ao longo do seu traçado, com o auxílio da equação (4.19).

c) - Sub-rotina PARCND:

Calcula os parâmetros elétricos de todos os trechos da tubulação.

Calcula os parâmetros elétricos de todos os trechos da tubulação. Utiliza a seguinte sub-rotina como apoio:

- Sub-rotina NRAPH - Obtém a solução da equação transcendental (2.9) utilizando o algoritmo de Newton/Raphson.

d) - Sub-rotina PITUB -

Formação da matriz tridiagonal e da matriz dos termos independentes cuja solução é o perfil de potencial na tubulação. Para solução deste sistema complexo é chamada a sub-rotina TRIGA, conforme especificado no Anexo A.1;

e) - Sub-rotina EPRIMO -

Prepara a chamada da sub-rotina EZERO para a o cálculo do campo elétrico longitudinal em cada segmento ΔL de tubulação, conforme equações (4.30) ou (4.33);

f) - Sub-rotina ELETRS -

Prepara a chamada da sub-rotina EZERO para o cálculo da corrente de contato de cada segmento, conforme equação (4.39);

g) - Sub-rotina ZTHEV -

Calcula a admitância equivalente de Thevenin localizada em cada tramo com continuidade elétrica.

A.2.9 - Recomendações para Análise de um Caso Real

A seguir é apresentado um roteiro com os principais passos a serem dados, no sentido de se concretizar a análise de um caso real.

1º Passo - Obtenção dos seguintes dados relativos à travessia, às características das tubulações e linhas de transmissão.

- Planta do local da travessia na escala mínima 1:2500, contendo:

- a) identificação da linha de transmissão e da tubulação em projeto;
- b) posicionamento e numeração de todas as estruturas próximas ao cruzamento;
- c) ângulo de travessia;
- d) limites da faixa de domínio atravessada.

- Diagrama simplificado do traçado da tubulação cujas distâncias perpendiculares linha/tubulação sejam inferiores a $100\sqrt{\rho}$, contendo:

- a) traçado da linha com a identificação das estruturas;
- b) extensão dos trechos com as distâncias perpendiculares à linha;
- c) localização dos pontos de aterramento, seccionamento e das válvulas de manobra;
- d) localização das estações de recebimento e medição;
- e) localização e extensão dos trechos aéreos e enterrados.

- Perfil da travessia ao longo da tubulação projetada, com escala horizontal mínima 1:2500 e vertical 1:500 onde devem estar indicadas:

- a) as cotas dos condutores da linha de transmissão e da tubulação projetada, no local da travessia;
- b) a temperatura ambiente, data e hora em que foram levantadas as cotas dos condutores da linha da CHESF;
- c) a distância do ponto de cruzamento à estrutura da linha da CHESF mais próxima ao cruzamento.

- Esquema do aterramento utilizado ou malha de terra a ser construída e os valores das resistências de aterramento projetadas.

- Tensão de ruptura à frequência industrial (1 segundo) e detalhes construtivos dos dispositivos de seccionamento (juntas isolantes).

- Características construtivas da tubulação, contendo:

- a) tipo do material construtivo da tubulação;
- b) tipo de revestimento utilizado (espessura, material, etc.);
- c) dimensões da secção reta e espessura das paredes da tubulação;
- d) material a ser transportado pela tubulação.

- Proteção catódica com a solução que será adotada, posição das camas de anodos e bitola dos fios de interligação.

- Características construtivas das linhas de transmissão, contendo:

- a) extensão dos vãos das estruturas próximas ao cruzamento;
- b) corrente de curto-circuito, no horizonte limite, das subestações interligadas pelas LT's;
- c) tipo e bitola dos cabos condutores, pára-raios e contrapesos;
- d) configuração dos contrapesos das estruturas;
- e) configuração dos condutores e pára-raios de cada LT;
- f) tipo das estruturas das LT's.

2º Passo - Elaboração de um diagrama simplificado apresentando a posição relativa das LT's e da tubulação.

3º Passo - Determinação das correntes injetadas no solo, das que circulam nos cabos pára-raios e nos condutores, quando da ocorrência de faltas nas estruturas adjacentes ao cruzamento. (pode ser utilizado programa da referência [7]).

4º Passo - Determinação do circuito equivalente de Thevenin dos ramais de tubulação (linhas de dreno, por exemplo), e dos circuitos de proteção catódica. Quando da montagem do modelo geral da tubulação, substituir estes ramais e circuitos de proteção catódica pelo seus equivalentes de Thevenin.

5º Passo - Montagem do arquivo de entrada de dados e processamento do programa INTERLT, para obtenção dos relatórios de saída especificados em A.2.6.

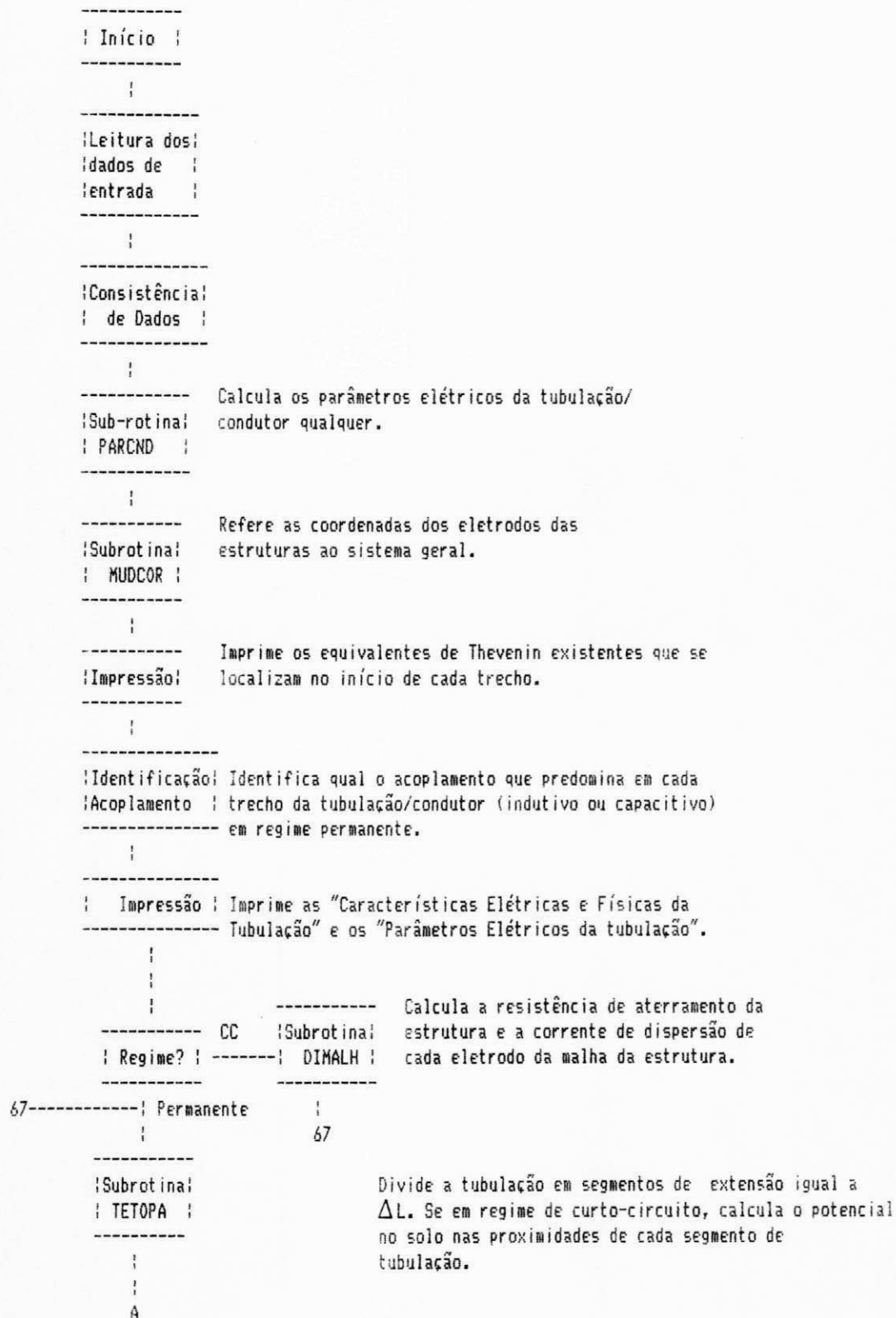
6º Passo - Para processamento das tensões resultantes em regime permanente, deve-se fazer a determinação das correntes de regime permanente, considerando-se os desequilíbrios provocados pelas LT's não transpostas [15]. Em seguida, executar o 4º e 5º passos.

A.2.10 - Conclusão

O modelo computacional apresentado neste anexo, introduz uma ferramenta computacional para a análise das tensões induzidas em tubulações metálicas ou outra instalação metálica qualquer, cujo circuito possa ser modelado por circuitos PI's em série, tais como: cercas limítrofes de área, ferrovias, linhas de comunicação, linhas de distribuição e outras linhas de transmissão.

Verifica-se existir uma grande versatilidade do programa nas análises referentes às tensões nas juntas isolantes (modeladas, fazendo-se a admitância série de ligação de dois trechos de tubulação igual a infinito - não existe continuidade elétrica), às tensões em cima de pessoas tocando a instalação (modeladas fazendo-se a admitância de aterramento no início ou no fim de cada trecho de tubulação igual a admitância do corpo humano), e aos efeitos dos aterramentos das tubulações que utilizam eletrodos horizontais, os quais sofrem também, induções que devem ser modeladas como equivalentes de Thevenin (fonte de tensão em série com uma admitância) e não como uma admitância concentrada de valor igual ao inverso da impedância de aterramento.

Fluxograma do Programa INTERLT



B 	
----- !Processamento! ----- 	Calcula a tensão induzida em aberto, a corrente de toque e a energia de descarga para o acoplamento capacitivo.
----- !Impressão! ----- 	Imprime, por trechos, o perfil de tensão devido ao acoplamento indutivo ou resultado do acoplamento capacitivo.
----- !Processamento! ----- 	Calcula perfil de tensão resultante da associação dos acoplamentos resistivo e indutivo em regime de curto-circuito.
----- !Impressão! ----- 	Imprime resultados calculados no último processamento
----- !Processamento! ----- 	Calcula as tensões nas juntas isolantes existentes
----- !Impressão! -----	Imprime resultados calculados no último processamento e caso tenha sido solicitado, imprime os equivalentes de Thevenin.

Observações -

- a) - Segmento de tubulação - extensão de comprimento ΔL metros de tubulação onde pode ser considerado constantes o campo elétrico longitudinal, o potencial no solo devido a injeção de correntes no solo e as capacitâncias parciais entre os cabos da LT e a tubulação.
- b) - Trecho de Tubulação - extensão retilinea de tubulação que tem parâmetros elétricos constantes, formados por circuitos multi-pi idênticos, podendo haver nas extremidades, admitâncias concentradas para a terra, ou no início, circuitos equivalentes de Thevenin.
- c) - Tramo de tubulação - extensão de tubulação sem descontinuidade elétrica.

ANEXO A.3 - RECOMENDAÇÕES PARA PROJETO, ESTOCAGEM, INSTALAÇÃO E MANUTENÇÃO DE TUBULAÇÕES PRÓXIMAS ÀS LINHAS LI.

A.3.1 - Recomendações para Projeto

As aproximações e os cruzamentos devem ser feitos preferencialmente em locais tanto mais distantes quanto seja possível das subestações terminais da linha de transmissão, buscando-se assim, locais de baixo nível de curto-circuito.

Deve-se procurar fazer o cruzamento no ponto médio do vão de travessia, para que o eixo da tubulação fique bastante distante das torres deste vão. Deve-se, também, dispor os fios contrapesos dos arranjos de aterramento das torres de modo a se distanciarem ao máximo da tubulação (arranjos de aterramento assimétrico).

Os cruzamentos devem ser feitos com ângulos tanto mais próximos quanto possível de 90° , respeitando-se um valor mínimo de 60° , visando-se reduzir os efeitos decorrentes do acoplamento indutivo.

No caso de paralelismos, deve-se minimizar a sua extensão, devendo a tubulação ficar situada o mais distante possível da linha de transmissão. A partir de uma distância igual a $100\sqrt{V_p}$, os efeitos decorrentes do acoplamento indutivo podem ser desprezados [1].

Caso seja possível, optar pelo trajeto da tubulação via solos de baixa resistividade. Entretanto, é necessário avaliar os aspectos referentes a corrosão.

Sempre que possível, enterrar a tubulação visando reduzir os riscos de choques elétricos em pessoas.

Ao utilizar tubulações enterradas, 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. Note-se, contudo, que em função da temperatura do fluido a ser transportado, pode-se necessitar de um revestimento cuja estabilidade térmica seja mais alta, o que favoreceria a opção pelo uso dos revestimentos plásticos.

Deve-se procurar evitar pontos de aterramento na tubulação, principalmente nas proximidades das torres das linhas de transmissão.

Deve-se procurar reduzir o número de juntas isolantes convencionais (destinadas a proteção catódica) e especiais (destinadas a suportar tensões elevadas) ao mínimo possível, uma vez que as mesmas poderão facilitar futuros vazamentos na tubulação.

Deverão ser previstas juntas isolantes em ambos os flanges das válvulas de manobra quando as mesmas forem aéreas.

Uma tubulação que adentre uma subestação ou usina elétrica de alta tensão deverá ser seccionada via junta isolante ao adentrá-la, devendo-se realizar estudos sobre a viabilidade de aterrál-la, quando aérea, à malha de terra de subestação ou usina.

A instalação da tubulação próxima a outra já existente poderá trazer benefícios sob o aspecto de proporcionar-se blindagem eletromagnética mútua entre ambas.

Deve-se utilizar, sempre que possível, cabos pára-raios nas linhas de transmissão, os quais além de melhorar o desempenho da linha à descargas atmosféricas, serão benéficos sob o aspecto de reduzir os efeitos decorrentes dos acoplamentos indutivo e resisitivo.

A.3.2 - Recomendações para Estocagem

As tubulações devem, preferencialmente, ser estocadas longe das linhas de transmissão. Caso sejam estocadas próximas às linhas, deverão ser dispostas perpendicularmente ao eixo destas e situadas nos meios dos vãos da linha. Cada tubulação deverá ser aterrada em um único ponto.

A.3.3 - Recomendações para Instalação e Manutenção

Antes de iniciar e após concluir cada jornada de trabalho, deve ser feita comunicação entre as empresas proprietárias da linha e da tubulação, visando-se garantir o bloqueio do religador automático da linha durante os trabalhos de instalação da tubulação.

Os trabalhos de instalação e manutenção devem ser interrompidos sob condições atmosféricas adversas (relâmpagos, trovoadas, ventos fortes, etc).

Os trabalhos de instalação devem ser supervisionados por pessoal treinado, de forma a evitar uma aproximação perigosa entre cabos fase da linha de transmissão e máquinas que estejam operando sob os condutores.

É aconselhável o uso de luvas e botas isolantes por todo o pessoal envolvido com a instalação e a manutenção da tubulação, ou que opere dispositivo conectados à mesma.

Qualquer pessoa que não esteja sobre máquinas de construção móveis (guindaste, etc), não deverá tocá-las se elas estiverem sob os condutores da linha de transmissão, mantendo-se tão distantes quanto possível das mesmas.

É absolutamente essencial que os operadores do maquinário de construção e o restante do pessoal sejam repetidamente instruídos por seus supervisores quanto ao procedimento a ser seguido em caso de contacto accidental da máquina com os condutores da linha de transmissão. Ou seja:

- Sob nenhuma circunstância, deve-se tocar objetos metálicos que estejam em contacto com partes energizadas da linha de transmissão ou objetos que tenham se tornado energizados por contato com estas;
- O operador de uma máquina que acidentalmente faça contato com condutores da linha de transmissão deve permanecer em seu posto e não sair da máquina. Esta deve abandonar a área de perigo utilizando-se de seu próprio motor, ou então, o operador deve esperar até que a empresa proprietária da linha tenha confirmado o desligamento desta. O operador só deve abandonar a máquina após se assegurar que ela não está energizada, devendo saltar da mesma de uma só vez, precavendo-se para não tocar o solo e a máquina simultaneamente.

ANEXO - A.4 - CARACTERÍSTICAS TÍPICAS DE TUBULAÇÕES [16]

Estas informações poderão ser úteis para subsidiar uma análise quando não se dispuser dos valores reais. Assim:

- A espessura do aço da tubulação costuma variar de 5 a 15mm, sendo função do diâmetro da tubulação, o qual costuma variar de 0,25 a 1,50m;
- A resistividade do aço da tubulação varia tipicamente de 0,15 a 0,20 $\times 10^{-6}$ ohms . m.
- A permeabilidade magnética do aço da tubulação normalmente varia de 200 μ_0 a 300 μ_0 .
- Os revestimentos normalmente utilizados costumam ter espessura variável de 3 a 7mm, podendo ser betuminosos (coal - tar) ou plásticos (polietileno).
- Tanto para revestimentos betuminosos quanto plásticos, pode-se considerar que a sua permissividade elétrica vale 5 ϵ_0 .
- Pode-se considerar como 2.5×10^6 ohms.m e 2.5×10^7 ohms.m as resistividades elétricas respectivas dos revestimentos betuminosos e plásticos.

**ANEXO A.5 - METODOLOGIA DE CÁLCULO DA DISTRIBUIÇÃO DE
CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO ENTRE CABOS PÁRA-RAIOS
E TERRA NAS LINHAS DE TRANSMISSÃO [7].**

A.5.1 - Metodologia de Cálculo Utilizada

São montados os quadripolos correspondentes a cada elemento do lado 1 e do lado 2 da torre em curto, do seguinte modo:

a) - Elemento série (simula o cabo pára-raios equivalente de um vão):

Quadripolo corresponde:

$$\begin{aligned} A &= D = 1 \\ B &= Z_s \\ C &= 0 \end{aligned}$$

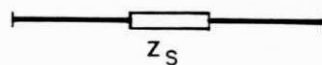


Figura A.5.1

Elemento série de um quadripolo

b) - Elemento paralelo (simula resistência de aterramento de uma torre):

Quadripolo corresponde:

$$\begin{aligned} A &= D = 1 \\ B &= 0 \\ C &= 1/Z_p \end{aligned}$$



Figura A.5.2

Elemento paralelo de um quadripolo

A seguir, através de associação de quadripolos, obtém-se os quadripolos equivalentes do lado 1 e do lado 2.

Em seguida, são calculadas as correntes totais para cada lado e para a terra, devidas à contribuição da subestação 1 (CC1) e devidas à contribuição da subestação 2 (CC2), conforme figuras A.5.3 e A.5.4

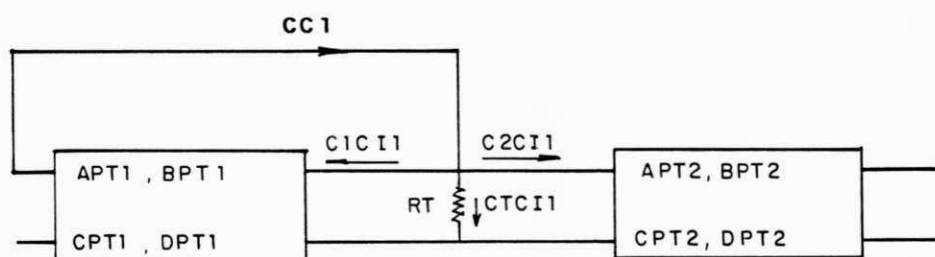


Figura A.5.3

Circulação de correntes de curto-circuito devido a contribuição da SE1.

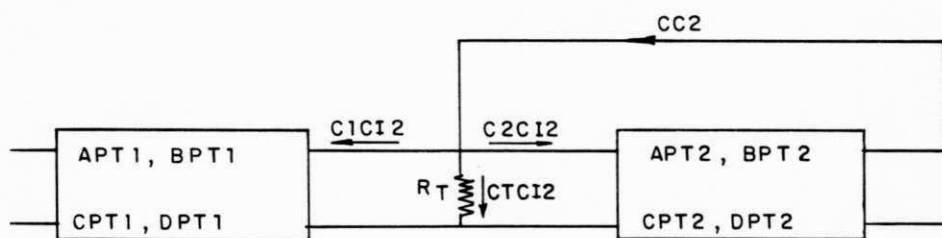


Figura A.5.4

Circulação de correntes de curto-circuito devido a contribuição da SE2.

Após isto, os quadripolos são novamente desmembrados e a partir das correntes totais de cada lado, calculam-se as contribuições de corrente para a terra em cada torre e nas SE's terminais.

O cálculo das contribuições devidas à impedância mútua entre condutor e pára-raios, é feito substituindo-se as tensões induzidas nos cabos pára-raios em cada vão, por fontes de tensão equivalentes, assim:

$$\begin{aligned} E1 &= ZM.CC1 \\ E2 &= ZM.CC2 \\ EE1 &= ZMD1.CC1 \\ EE2 &= ZMD2.CC2 \end{aligned}$$

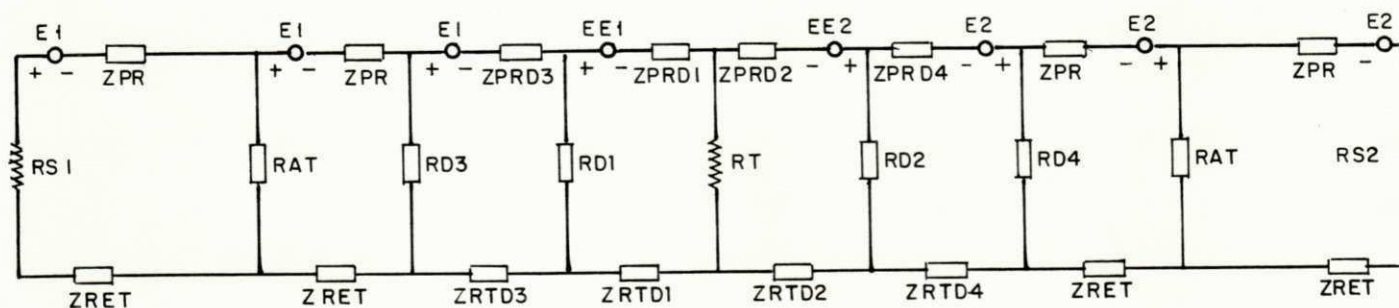


Figura A.5.5

Circuito equivalente de um curto-circuito numa LT

Analogamente, são calculadas as correntes totais para cada lado e para a terra, devidas às fontes de tensão; em seguida, os quadripolos são desmembrados, sendo calculadas as parcelas de contribuição para a terra em cada torre e nas SE's terminais.

O resultado final é obtido através da soma, para cada elemento, de todas as correntes devidas aos efeitos simultâneos de condução e de indução.

A.5.2 - 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, 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:

$$[Z] = [R] + j\omega [L]$$

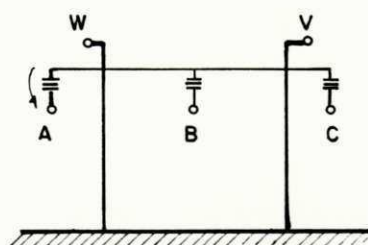


Figura A.5.6

Curto-circuito na fase A de uma LT

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:

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_W \\ V_V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{AA} & Z_{AW} & Z_{AV} \\ Z_{WA} & Z_{WW} & Z_{WV} \\ Z_{VA} & Z_{VW} & Z_{VV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_W \\ I_V \end{bmatrix}$$

A partir daí, constrói-se a equação matricial que representa o cabo pára-raios equivalente.

Assim,

a) Sendo $V_w = V_v$, faz-se

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_w \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{AA} & Z_{AW} & Z_{AV} \\ Z_{WA} & Z_{WW} & Z_{WV} \\ (Z_{VA}-Z_{WA}) & (Z_{VW}-Z_{WW}) & (Z_{VV}-Z_{WP}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_w \\ I_v \end{bmatrix}$$

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.

BIBLIOGRAFIA

- [1] DACONTI, J. Rafael. Estudo das Influências Causadas por Linhas de Transmissão de Energia Elétrica AC Sobre Tubulações Metálicas Próximas. Tese de Mestrado. Escola Federal de Engenharia de Itajubá, 1986.
- [2] DABKOWSKI e TAFLOVE. Mutual Design Considerations for Overhead AC Transmission Line and Gas Transmission Pipelines. EPRI, 1978.
- [3] LOELOEIAAN, M., NAGAR, R.P., VELAZQUEZ, R., MUKHEDKAR, D., e GERVAIS, Y.. Review of Analytical Methods for Calculating the Performance of Large Grounding Electrodes - Part I: Theoretical Considerations. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Los Angeles, Pas 104 (11): 3124-3133, nov, 1985.
- [4] LOELOEIAAN, M., VELAZQUEZ, R. e MUKHEDKAR, D.. Review of Analytical Methods for Calculating the Performance of Large Grounding Electrodes - Part II: Numerical Results. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Los Angeles, Pas 104 (11): 3134-3140, nov, 1985.
- [5] JAFFA, K. C. e OLSEN, R.G.. Eletromagnetic Coupling from Power Lines and Magnetic Field Safety Analysis. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Los Angeles, Pas 103 (12): 3595-3607, dez, 1984.
- [6] FUCHS, R. Dario. Transmissão de Energia Elétrica - Linhas Aéreas. Itajubá, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1977, 588 p.
- [7] DACONTI, J. Rafael. Distribuição de Correntes de Curto-Circuito entre Cabos Pára-Raios e Terra nas LT's - Metodologia de Cálculo e Programa Computacional. CHESF. Diretoria de Engenharia, Recife, 1987.
- [8] CHASTON, A.N., LAFOREST, J.J. e RAMIREZ, A.R.. Transmission Line Reference Book 345 kV and Above. New York, Electric Power Research Institute, 1975, 393 p.
- [9] RAMOS, D. Soares e DIAS, E. Mário. Sistemas Elétricos de Potência - Regime Permanente. Rio de Janeiro, Editora Guanabara Dois S.A, 1982, Volume 2, 224 p.

- [10] IEEE Working Group. Electrostatic Effects of Overhead Transmission Lines. Parte I - Hazards and Effects. **IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems**. Los Angeles, Pas 91 (2): 422-426, mar/abr, 1972.
- [11] BANKS, Robert S. e VINH, T.. An Assessment of the 5 mA 60 Hz Contact Current Safety Level. **IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems**. Los Angeles, Pas 103 (12): 3608-3614, dez, 1984.
- [12] FAVEZ, B. e GOUGEVIL, J.C.. Contribution a L'Étude des Problmes Posés par la Proximité de Lignes Électriques Aériennes et de Conduites Métalliques Enterrées. **Electricité de France**. 1966.
- [13] MAXWELL, J.C.. **A Treatise on Electricity and Magnetism**. 3ª edição. S. L. Clarendon Press, 1973.
- [14] GENTIL, Vicente. **Corrosão**. Rio de Janeiro, Editora Guanabara Dois S.A., 1982, 453 p.
- [15] HESSE, M. Harry. Circulating Currents in Paralleled Untransposed Multicircuit Lines: II - Methods for Estimating Current Unbalance. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**. Los Angeles, Pas 85(7): 812-821, jul, 1966.
- [16] DACONTI, J. Rafael, FERRO, F.D., EDUARDO, J. Varela, MELO, M.C. e RÉGIS, O.. **Interferências de LT's 230 kV e 500 kV sobre Tubulações Metálicas - Experiência da CHESF**. X SNTPEE. Curitiba, 1989.
- [17] BARROSO, L.C., BARROSO, M.A, CAMPOS, F.F., CARVALHO, M.B. e MAIA, M.L.. **Cálculo Numérico**. São Paulo, Editora Harbra Ltda, 1987, 367 p.
- [18] ANSI. **IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding (Std 80-1986)**, New York, 1986. (Revisão da IEEE Std 80-1976).
- [19] DAWALIBI, F. e MUKHEDKAR, D.. Multi Step Analysis of Interconnected Grounding Electrodes. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**. Los Angeles, Pas 95(1): 113-119, jan/fev, 1976.
- [20] DAWALIBI, F. e SOUTHEY, R.D.. Analysis of Electrical Interference from Power Lines to Gas Pipelines - Part I : Computation Methods. **IEEE Transactions on Power Delivery**. Los Angeles, Vol. 4(3): 1840-1846, jul, 1989.

- [21] C.C.I.T.T - International Telegraph and Telephone Consultative Committee. Concerning the Protection of Telecommunication Lines Against Harmful Effects from Electricity Lines, Geneva, 1963.
- [22] DAWALIBI, F. e BAISHIKI, R.S.. Power Frequency Performance of Transmission Line Structure Grounds. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Los Angeles, Pas 103(6): 1295-1303, Jun, 1984.
- [23] DAWALIBI, F. e MUKHEDKAR, D.. Optimum Design of Substation Grounding in a Two Layer Earth Structure - Part I : Analytical Study. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Los Angeles, Pas 94(2):252-261, mar/abr, 1975.
- [24] DAWALIBI, F. e MUKHEDKAR, D.. Optimum Design of Substation Grounding in a Two Layer Earth Structure - Part II : Comparison Between Theoretical and Experimental Results. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Los Angeles, Pas 94(2): 262-272, mar/abr, 1975.
- [25] DAWALIBI, F. e MUKHEDKAR, D.. Resistence Calculation of Interconnected Grounding Electrodes. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Los Angeles, Pas 96(1):59-65, jan/fev, 1977.
- [26] KOZSTALUK, R., MUKHEDKAR, D. e GERVAIS, Y.. Field Measurements of Touch and Step Voltages. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Los Angeles, Pas 103(11):3286-3294, nov, 1984.

EQUIVALENTE DE THEVENIN LIGADOS NO INICIO DE CADA TRECHO

TRECHO TUBULACAO	T E N S A O T H E V E N I N		A C O P .		A D M I T A N C I A D E T H E V E N I N	
	ACOP. RESISTIVO MODULO(V)	ANGULO(G)	ACOP. INDUTIVO MODULO(V)	ANGULO(G)	P . R E A L	P . I M A G .
3	0.1228E+04	-76.2	0.0000E+00	0.0	0.1752E-03	0.7290E-05
5	0.1086E+04	-76.6	0.3579E+02	175.8	0.6928E-03	0.2880E-04
11	0.5236E+03	-77.0	0.1203E+01	-21.1	0.1194E-03	0.4971E-05
13	0.3119E+03	-77.1	0.2149E+02	-22.4	0.7240E-01	-.3784E-03

CARACTERISTICAS ELETRICAS E FISICAS DA INSTALACAO

TRECHO	RESISTIVIDADE COND/TUBUL. (OHMM)	PERMEABILIDADE REL. COND/TUB.	DIAMETRO COND/TUB. (M)	RESISTIVIDADE REVESTIMENTO (OHMM)	ESPESSURA REVESTIM. (M)	PERMISSIVIDADE REL. COND/TUB.	RESISTIVIDADE DO SOLO (OHMM)	ALT/PROFUND. COND/TUBUL. (M)
1	0.2000E-06	300.0	0.1524	0.2500E+07	0.4000E-02	5.000	100.0	0.70
2	0.2000E-06	300.0	0.1524	0.2500E+07	0.4000E-02	5.000	100.0	1.20
3	0.2000E-06	300.0	0.1524	0.2500E+07	0.4000E-02	5.000	100.0	1.20
4	0.2000E-06	300.0	0.1524	0.2500E+07	0.4000E-02	5.000	100.0	1.20
5	0.2000E-06	300.0	0.1524	0.2500E+07	0.4000E-02	5.000	100.0	1.20
6	0.2000E-06	300.0	0.1524	0.2500E+07	0.4000E-02	5.000	100.0	1.20
7	0.2000E-06	300.0	0.1524	0.2500E+07	0.4000E-02	5.000	100.0	1.20
8	0.2000E-06	300.0	0.1524	0.2500E+07	0.4000E-02	5.000	100.0	1.20
9	0.2000E-06	300.0	0.1524	0.2500E+07	0.4000E-02	5.000	100.0	1.20
10	0.2000E-06	300.0	0.1524	0.2500E+07	0.4000E-02	5.000	100.0	1.20
11	0.2000E-06	300.0	0.1524	0.2500E+07	0.4000E-02	5.000	100.0	1.20
12	0.2000E-06	300.0	0.1524	0.2500E+07	0.4000E-02	5.000	100.0	1.20
13	0.2000E-06	300.0	0.1524	0.2500E+07	0.4000E-02	5.000	100.0	1.20
14	0.2000E-06	300.0	0.1524	0.2500E+07	0.4000E-02	5.000	100.0	1.20
15	0.2000E-06	300.0	0.1524	0.2500E+07	0.4000E-02	5.000	100.0	1.20
16	0.2000E-06	300.0	0.1524	0.2500E+07	0.4000E-02	5.000	100.0	1.20
17	0.2000E-06	300.0	0.1524	0.2500E+07	0.4000E-02	5.000	100.0	1.20
18	0.2000E-06	300.0	0.1524	0.2500E+07	0.4000E-02	5.000	100.0	1.20
19	0.2000E-06	300.0	0.1524	0.2500E+07	0.4000E-02	5.000	100.0	0.70

CARACTERISTICAS DO TRECHO - 15	
TUBULACAO OU CONDUTOR	ENTERRADO REVESTIDO TUBULAR
ESPESSURA CALCULADA E IGUAL A	0.007129 (M)
CARACTERISTICAS DO TRECHO - 16	
TUBULACAO OU CONDUTOR	ENTERRADO REVESTIDO TUBULAR
ESPESSURA CALCULADA E IGUAL A	0.007129 (M)
CARACTERISTICAS DO TRECHO - 17	
TUBULACAO OU CONDUTOR	ENTERRADO REVESTIDO TUBULAR
ESPESSURA CALCULADA E IGUAL A	0.007129 (M)
CARACTERISTICAS DO TRECHO - 18	
TUBULACAO OU CONDUTOR	ENTERRADO REVESTIDO TUBULAR
ESPESSURA CALCULADA E IGUAL A	0.007129 (M)
CARACTERISTICAS DO TRECHO - 19	
TUBULACAO OU CONDUTOR	AEREO REVESTIDO TUBULAR
ESPESSURA CALCULADA E IGUAL A	0.007129 (M)

PARAMETROS ELETRICOS DO CONDUTOR / TUBULACAO

TRECHO TUBULACAO	IMPEDANCIA LINEAR(OHMS/M) REAL	IMPEDANCIA LINEAR(OHMS/M) IMAG	ADM. LINEAR P/ TERRA(MHOS/M) REAL	ADM. LINEAR P/ TERRA(MHOS/M) IMAG	CONST. PROPAGACAO(1/M) REAL	CONST. PROPAGACAO(1/M) IMAG	IMP. CARACTERISTICA(OHMS) REAL	IMP. CARACTERISTICA(OHMS) IMAG
1	0.3082E-03	0.9516E-03J	0.0000E+00	0.7209E-08J	0.4189E-06	0.2652E-05J	0.3679E+03	-.5810E+02J
2	0.3673E-03	0.6911E-03J	0.4732E-04	0.1949E-05J	0.1629E-03	0.1025E-03J	0.3527E+01	0.2022E+01J
3	0.3673E-03	0.6911E-03J	0.4732E-04	0.1949E-05J	0.1629E-03	0.1025E-03J	0.3527E+01	0.2022E+01J
4	0.3673E-03	0.6911E-03J	0.4732E-04	0.1949E-05J	0.1629E-03	0.1025E-03J	0.3527E+01	0.2022E+01J
5	0.3673E-03	0.6911E-03J	0.4732E-04	0.1949E-05J	0.1629E-03	0.1025E-03J	0.3527E+01	0.2022E+01J
6	0.3673E-03	0.6911E-03J	0.4732E-04	0.1949E-05J	0.1629E-03	0.1025E-03J	0.3527E+01	0.2022E+01J
7	0.3673E-03	0.6911E-03J	0.4732E-04	0.1949E-05J	0.1629E-03	0.1025E-03J	0.3527E+01	0.2022E+01J
8	0.3673E-03	0.6911E-03J	0.4732E-04	0.1949E-05J	0.1629E-03	0.1025E-03J	0.3527E+01	0.2022E+01J
9	0.3673E-03	0.6911E-03J	0.4732E-04	0.1949E-05J	0.1629E-03	0.1025E-03J	0.3527E+01	0.2022E+01J
10	0.3673E-03	0.6911E-03J	0.4732E-04	0.1949E-05J	0.1629E-03	0.1025E-03J	0.3527E+01	0.2022E+01J
11	0.3673E-03	0.6911E-03J	0.4732E-04	0.1949E-05J	0.1629E-03	0.1025E-03J	0.3527E+01	0.2022E+01J
12	0.3673E-03	0.6911E-03J	0.4732E-04	0.1949E-05J	0.1629E-03	0.1025E-03J	0.3527E+01	0.2022E+01J
13	0.3673E-03	0.6911E-03J	0.4732E-04	0.1949E-05J	0.1629E-03	0.1025E-03J	0.3527E+01	0.2022E+01J
14	0.3673E-03	0.6911E-03J	0.4732E-04	0.1949E-05J	0.1629E-03	0.1025E-03J	0.3527E+01	0.2022E+01J
15	0.3673E-03	0.6911E-03J	0.4732E-04	0.1949E-05J	0.1629E-03	0.1025E-03J	0.3527E+01	0.2022E+01J
16	0.3673E-03	0.6911E-03J	0.4732E-04	0.1949E-05J	0.1629E-03	0.1025E-03J	0.3527E+01	0.2022E+01J
17	0.3673E-03	0.6911E-03J	0.4732E-04	0.1949E-05J	0.1629E-03	0.1025E-03J	0.3527E+01	0.2022E+01J
18	0.3673E-03	0.6911E-03J	0.4732E-04	0.1949E-05J	0.1629E-03	0.1025E-03J	0.3527E+01	0.2022E+01J
19	0.3082E-03	0.9516E-03J	0.0000E+00	0.7209E-08J	0.4189E-06	0.2652E-05J	0.3679E+03	-.5810E+02J

DADOS REFERENTES A CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO

CONTRIBUICAO DA EXTREMIDADE 1 - 1500. 2413. J
 CONTRIBUICAO DA EXTREMIDADE 2 - 1500. 2413. J

ESTRUTURA N. - SE DOW

CORRENTE INJETADA NO SOLO - 2524. -10050. J
 CORRENTE NO PARA-RAIOS V EM DIRECAO A EXTREMIDADE 1 - 0. 0. J
 CORRENTE NO PARA-RAIOS W EM DIRECAO A EXTREMIDADE 1 - 0. 0. J
 CORRENTE NO PARA-RAIOS V EM DIRECAO A EXTREMIDADE 2 - 222. -6010. J
 CORRENTE NO PARA-RAIOS W EM DIRECAO A EXTREMIDADE 2 - 222. -6010. J

ESTRUTURA N. - 00000028

CORRENTE INJETADA NO SOLO - 351. -1460. J
 CORRENTE NO PARA-RAIOS V EM DIRECAO A EXTREMIDADE 1 - 222. -6010. J
 CORRENTE NO PARA-RAIOS W EM DIRECAO A EXTREMIDADE 1 - 222. -6010. J
 CORRENTE NO PARA-RAIOS V EM DIRECAO A EXTREMIDADE 2 - 46. -5279. J
 CORRENTE NO PARA-RAIOS W EM DIRECAO A EXTREMIDADE 2 - 46. -5279. J

ESTRUTURA N. - 00000027

CORRENTE INJETADA NO SOLO - 323. -1397. J
 CORRENTE NO PARA-RAIOS V EM DIRECAO A EXTREMIDADE 1 - 46. -5279. J
 CORRENTE NO PARA-RAIOS W EM DIRECAO A EXTREMIDADE 1 - 46. -5279. J
 CORRENTE NO PARA-RAIOS V EM DIRECAO A EXTREMIDADE 2 - -114. -4580. J
 CORRENTE NO PARA-RAIOS W EM DIRECAO A EXTREMIDADE 2 - -114. -4580. J

ESTRUTURA N. - 00000026

CORRENTE INJETADA NO SOLO - 231. -1212. J
 CORRENTE NO PARA-RAIOS V EM DIRECAO A EXTREMIDADE 1 - -114. -4580. J
 CORRENTE NO PARA-RAIOS W EM DIRECAO A EXTREMIDADE 1 - -114. -4580. J
 CORRENTE NO PARA-RAIOS V EM DIRECAO A EXTREMIDADE 2 - -230. -3973. J
 CORRENTE NO PARA-RAIOS W EM DIRECAO A EXTREMIDADE 2 - -230. -3973. J

ESTRUTURA N. - 00000025

CORRENTE INJETADA NO SOLO - 159. -1050. J
 CORRENTE NO PARA-RAIOS V EM DIRECAO A EXTREMIDADE 1 - -230. -3973. J
 CORRENTE NO PARA-RAIOS W EM DIRECAO A EXTREMIDADE 1 - -230. -3973. J
 CORRENTE NO PARA-RAIOS V EM DIRECAO A EXTREMIDADE 2 - -309. -3448. J
 CORRENTE NO PARA-RAIOS W EM DIRECAO A EXTREMIDADE 2 - -309. -3448. J

REGIME DE CURTO-CIRCUITO
 MAXIMA TENSÃO ELETTRICA OBSERVADA NA CAMADA ISOLANTE
 (ACOPLAMENTO INDUTIVO)

C O R D E N A D A S			T R E C H O	V A L O R D A T E N S A O	
XI	YI	ZI		MODULO(V)	FASE(G)
-127.	3.	-1.	2	0.5637E+03	-11.0

REGIME DE CURTO-CIRCUITO
 PERFIL DE TENSÃO AO LONGO DA TUBULACAO

COORDENADAS XI YI ZI	DISTANCIA TUBULACAO	TRECHO	POTENCIAL MODULO(V)	NA TUBULACAO FASE(G)	TENSÃO CAMADA MODULO(V)	ISOLANTE FASE(G)	TENSÃO TUBULACAO-SOLO MODULO(V)	FASE(G)		
372.	-60.	-1.	660.	6	0.6116E+03	-74.4	0.2085E+03	-86.2	0.2085E+03	-86.2
382.	-61.	-1.	670.	6	0.6067E+03	-75.4	0.2189E+03	-83.2	0.2189E+03	-83.2
392.	-61.	-1.	680.	6	0.6021E+03	-76.4	0.2273E+03	-80.5	0.2273E+03	-80.5
402.	-61.	-1.	690.	6	0.5977E+03	-77.4	0.2309E+03	-77.9	0.2309E+03	-77.9
407.	-69.	-1.	700.	7	0.5953E+03	-77.9	0.1909E+03	-76.0	0.1909E+03	-76.0
413.	-78.	-1.	710.	7	0.5931E+03	-78.4	0.1570E+03	-73.5	0.1570E+03	-73.5
418.	-86.	-1.	720.	7	0.5912E+03	-78.9	0.1281E+03	-70.4	0.1281E+03	-70.4
423.	-95.	-1.	730.	7	0.5894E+03	-79.3	0.1038E+03	-66.1	0.1038E+03	-66.1
429.	-103.	-1.	740.	7	0.5875E+03	-79.7	0.8364E+02	-60.1	0.8364E+02	-60.1
427.	-112.	-1.	750.	8	0.5880E+03	-79.6	0.6918E+02	-57.0	0.6918E+02	-57.0
423.	-122.	-1.	760.	8	0.5890E+03	-79.3	0.5735E+02	-54.6	0.5735E+02	-54.6
423.	-132.	-1.	770.	9	0.5890E+03	-79.3	0.4568E+02	-47.9	0.4568E+02	-47.9
428.	-140.	-1.	780.	9	0.5873E+03	-79.6	0.3654E+02	-32.5	0.3654E+02	-32.5
432.	-149.	-1.	790.	9	0.5856E+03	-79.9	0.3180E+02	-11.9	0.3180E+02	-11.9
437.	-158.	-1.	800.	9	0.5840E+03	-80.2	0.3199E+02	9.9	0.3199E+02	9.9
443.	-166.	-1.	810.	10	0.5821E+03	-80.5	0.3643E+02	27.1	0.3643E+02	27.1
451.	-171.	-1.	820.	10	0.5793E+03	-81.0	0.4400E+02	36.9	0.4400E+02	36.9
460.	-176.	-1.	830.	10	0.5765E+03	-81.5	0.5215E+02	43.3	0.5215E+02	43.3
468.	-182.	-1.	840.	10	0.5738E+03	-82.0	0.6045E+02	47.6	0.6045E+02	47.6
477.	-187.	-1.	850.	11	0.5711E+03	-82.5	0.6903E+02	51.1	0.6903E+02	51.1
486.	-193.	-1.	860.	11	0.5685E+03	-83.0	0.7703E+02	53.3	0.7703E+02	53.3
494.	-198.	-1.	870.	11	0.5660E+03	-83.5	0.8477E+02	54.9	0.8477E+02	54.9
502.	-204.	-1.	880.	11	0.5634E+03	-83.9	0.9220E+02	56.1	0.9220E+02	56.1
509.	-212.	-1.	890.	12	0.5617E+03	-84.2	0.9926E+02	57.9	0.9926E+02	57.9
515.	-221.	-1.	900.	13	0.5600E+03	-84.5	0.1061E+03	59.5	0.1061E+03	59.5
521.	-229.	-1.	910.	13	0.5583E+03	-84.8	0.1122E+03	60.6	0.1122E+03	60.6
526.	-238.	-1.	920.	13	0.5567E+03	-85.1	0.1181E+03	61.5	0.1181E+03	61.5
532.	-246.	-1.	930.	13	0.5551E+03	-85.4	0.1237E+03	62.2	0.1237E+03	62.2
538.	-254.	-1.	940.	13	0.5535E+03	-85.7	0.1291E+03	62.9	0.1291E+03	62.9
543.	-262.	-1.	950.	13	0.5518E+03	-85.9	0.1343E+03	63.4	0.1343E+03	63.4
549.	-270.	-1.	960.	13	0.5502E+03	-86.2	0.1393E+03	63.9	0.1393E+03	63.9
555.	-279.	-1.	970.	13	0.5486E+03	-86.5	0.1441E+03	64.3	0.1441E+03	64.3
560.	-287.	-1.	980.	13	0.5476E+03	-86.7	0.1491E+03	64.8	0.1491E+03	64.8

REGIME DE CURTO-CIRCUITO
 PERFIL DE TENSÃO AO LONGO DA TUBULACAO

COORDENADAS XI YI ZI	DISTANCIA TUBULACAO	TRECHO	POTENCIAL MODULO(V)	NA TUBULACAO FASE(G)	TENSÃO CAMADA MODULO(V)	ISOLANTE FASE(G)	TENSÃO TUBULACAO-SOLO MODULO(V)	FASE(G)		
566.	-295.	-1.	990.	13	0.5485E+03	-86.8	0.1553E+03	66.0	0.1553E+03	66.0
572.	-303.	-1.	1000.	13	0.5495E+03	-86.9	0.1614E+03	67.0	0.1614E+03	67.0
577.	-312.	-1.	1010.	13	0.5505E+03	-87.1	0.1674E+03	68.0	0.1674E+03	68.0
583.	-320.	-1.	1020.	13	0.5515E+03	-87.2	0.1733E+03	68.8	0.1733E+03	68.8
589.	-328.	-1.	1030.	13	0.5525E+03	-87.3	0.1791E+03	69.6	0.1791E+03	69.6
594.	-336.	-1.	1040.	13	0.5535E+03	-87.4	0.1848E+03	70.3	0.1848E+03	70.3
600.	-345.	-1.	1050.	13	0.5545E+03	-87.5	0.1904E+03	70.9	0.1904E+03	70.9
606.	-353.	-1.	1060.	13	0.5555E+03	-87.6	0.1960E+03	71.5	0.1960E+03	71.5
611.	-361.	-1.	1070.	13	0.5565E+03	-87.7	0.2015E+03	72.1	0.2015E+03	72.1
617.	-369.	-1.	1080.	13	0.5575E+03	-87.8	0.2068E+03	72.6	0.2068E+03	72.6
623.	-377.	-1.	1090.	13	0.5585E+03	-87.9	0.2121E+03	73.0	0.2121E+03	73.0
628.	-386.	-1.	1100.	13	0.5595E+03	-88.1	0.2168E+03	73.2	0.2168E+03	73.2
637.	-384.	-1.	1110.	14	0.5543E+03	-88.4	0.2153E+03	72.4	0.2153E+03	72.4
645.	-378.	-1.	1120.	14	0.5471E+03	-88.9	0.2109E+03	70.8	0.2109E+03	70.8
653.	-384.	-1.	1130.	15	0.5455E+03	-89.1	0.2141E+03	70.7	0.2141E+03	70.7
663.	-388.	-1.	1140.	16	0.5426E+03	-89.5	0.2161E+03	70.3	0.2161E+03	70.3
673.	-390.	-1.	1150.	16	0.5385E+03	-89.9	0.2165E+03	69.5	0.2165E+03	69.5
682.	-392.	-1.	1160.	16	0.5343E+03	-90.3	0.2169E+03	68.7	0.2169E+03	68.7
692.	-394.	-1.	1170.	16	0.5302E+03	-90.7	0.2172E+03	68.0	0.2172E+03	68.0
702.	-396.	-1.	1180.	16	0.5260E+03	-91.1	0.2175E+03	67.2	0.2175E+03	67.2
712.	-398.	-1.	1190.	16	0.5219E+03	-91.5	0.2178E+03	66.4	0.2178E+03	66.4
722.	-397.	-1.	1200.	17	0.5164E+03	-91.9	0.2162E+03	65.3	0.2162E+03	65.3
731.	-394.	-1.	1210.	17	0.5099E+03	-92.4	0.2134E+03	63.9	0.2134E+03	63.9
741.	-391.	-1.	1220.	17	0.5035E+03	-92.9	0.2106E+03	62.4	0.2106E+03	62.4
750.	-388.	-1.	1230.	17	0.4971E+03	-93.4	0.2080E+03	60.9	0.2080E+03	60.9
760.	-385.	-1.	1240.	17	0.4923E+03	-93.8	0.2067E+03	59.7	0.2067E+03	59.7
769.	-381.	-1.	1250.	17	0.4900E+03	-94.2	0.2074E+03	58.9	0.2074E+03	58.9
779.	-378.	-1.	1260.	17	0.4877E+03	-94.6	0.2081E+03	58.1	0.2081E+03	58.1
788.	-375.	-1.	1270.	17	0.4854E+03	-95.1	0.2088E+03	57.3	0.2088E+03	57.3
798.	-372.	-1.	1280.	17	0.4831E+03	-95.5	0.2096E+03	56.5	0.2096E+03	56.5
807.	-369.	-1.	1290.	17	0.4809E+03	-95.9	0.2104E+03	55.7	0.2104E+03	55.7
817.	-366.	-1.	1300.	17	0.4787E+03	-96.3	0.2113E+03	54.9	0.2113E+03	54.9
823.	-369.	-1.	1310.	18	0.4773E+03	-96.6	0.2128E+03	54.7	0.2128E+03	54.7

REGIME DE CURTO-CIRCUITO
TENSOES ELETRICAS NAS JUNTAS ISOLANTES

COORDENADAS			TRECHOS LIGADOS		TENSAO NA JUNTA	
XI	VI	ZI			MODULO(V)	FASE(G)
-136.	-43.	1.	TRECHO- 1	AO TRECHO- 2	0.9118E+03	133.9
836.	-424.	-1.	TRECHO-18	AO TRECHO-19	0.4744E+03	-97.1