



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ESTUDO SOBRE A INTERFERÊNCIA ELETROMAGNÉTICA DE
LINHAS DE TRANSMISSÃO DE CORRENTE ALTERNADA EM
TUBULAÇÕES METÁLICAS.**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO
POR

Hugo Queiroz de Santana

Orientador: Luiz Henrique Alves de Medeiros

RECIFE, Agosto / 2014

Catálogo na fonte
Bibliotecária Maria Luiza de Moura Ferreira, CRB-4 / 1469

S232e

Santana, Hugo Queiroz de.

Estudo sobre a interferência eletromagnética de linhas de transmissão de corrente alternada em tubulações metálicas / Hugo Queiroz de Santana. - Recife: O Autor, 2014.

55 folhas + anexos; il., tabs.

Orientador: Luiz Henrique Alves de Medeiros.

TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco.

CTG. Departamento de Engenharia Elétrica, 2014.

Inclui Referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. Linha de transmissão. 3. Tubulações metálicas. 4. Compatibilidade eletromagnética. 5. Sistemas de potência. 6. Eletromagnetismo aplicado. I. Medeiros, Luiz Henrique Alves de (Orientador). II. Título.

621.3 CDD (22. ed.)

UFPE/BCTG/2014-226

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo analisar os efeitos da interferência eletromagnética causada por linhas de transmissão em tubulações metálicas próximas, bem como desenvolver funções no software MATLAB que auxiliem no cálculo destes efeitos, a abordagem se baseia nas equações de Carson para circuitos com retorno pela terra.

Palavras-chave: Linhas de Transmissão, Tubulações Metálicas, Compatibilidade Eletromagnética, Sistemas de Potência, Eletromagnetismo Aplicado.

ABSTRACT

This work aims to analyze the effects of the electromagnetic interference caused by nearby transmission lines on metallic pipelines and to develop functions on the software MATLAB. The approach is based on Carson's equations to circuits with earth return.

Keywords: Transmission Lines, Metallic Pipelines, Electromagnetic Compatibility, Power Systems, Applied Electromagnetics.

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço à minha família, em especial a minha mãe que teve a enorme paciência e força de vontade para me dar uma boa educação, mesmo em condições extremamente adversas. Sem ela, eu nada teria conseguido.

Agradeço ao meu tio Renato Queiroz de Albuquerque por ter sido o pai que eu nunca tive.

Agradeço ao meu orientador Luiz Henrique Alves de Medeiros pelas boas ideias sobre o tema, pela compreensão e paciência. Sem ele este trabalho não teria sido possível.

Agradeço à minha namorada Ana Gabriela Modesto Braga pelo companheirismo, apoio, atenção e ajuda desde o tempo que a conheci, sem ela este trabalho não teria sido entregue.

Agradeço à minha sogra Ana Maria Modesto pelo apoio e ajuda nesses anos, sem ela teria sido muito mais difícil acumular o pouco de conhecimento que eu tenho.

Agradeço ao meu amigo Alexandro Aleixo pelas conversas instigantes sobre o tema e pelo seu bom humor que sempre alegria a todos ao redor. Sem ele, eu não teria conhecido este tema e não teria tido o prazer de trabalhar nele.

Agradeço aos meus amigos Ayrlw Maynyson, Marcelo Tavares, Calebe Herrman, Guilherme Varela, Robson Câmara, Edmar André, João Pedro, Raí Azevedo, Alexandro Xavier, Rodolfo Leite, Eduardo Carvalho, Antônio Barros, José Carlos, Joel e tanto outros que proporcionam alegria aos meus dias.

Agradeço ao professor Methodio Varejão Godoy pela sua boa vontade em ajudar.

Por fim, agradeço a todos que contribuíram de alguma forma, direta ou indireta para este trabalho.

Muitas pessoas contribuíram para que este trabalho fosse entregue, isso só me faz lembrar de que nós, mortais, nada somos sem pessoas que nos apoiem de alguma forma.

Sumário

1	INTRODUÇÃO	3
1.1	Motivação	3
1.2	Objetivos	4
1.3	Organização do Texto	4
2	MODELAGEM DO PROBLEMA	5
2.1	Premissas sobre o Sistema de Potência	5
2.2	Premissas sobre o meio ambiente	6
2.3	Modelagem da Tubulação	6
3	ACOPLAMENTOS	7
3.1	Acoplamento Eletromagnético	7
3.1.1	Acoplamento Capacitivo	13
3.1.2	Acoplamento Indutivo	13
3.2	Acoplamento Resistivo	15
3.3	ACOPLAMENTOS A SEREM CONSIDERADOS	19
4	CÁLCULO DE PARÂMETROS DE TUBULAÇÕES	21
4.1	Impedância Linear	21
4.2	Admitância Linear	23
4.3	Constante de propagação	25
4.4	Impedância Característica	26
4.5	Método Aproximado para o Cálculo de Parâmetros de Tubulações Enterradas	26
5	PROCEDIMENTOS DE CÁLCULO PARA OS ACOPLAMENTOS	27
5.1	Acoplamento Indutivo	27
5.1.1	Impedância Mútua	27
5.1.2	Efeito dos Cabos Para-raios	29
5.1.3	Trechos Não-Paralelos e Cruzamentos	30
5.1.4	Procedimento Geral para Cálculo da Tensão induzida	31
5.1.5	Equações para Tensões e Correntes na Tubulação	31
5.2	Acoplamento Capacitivo	32

5.2.1	Cálculo da Matriz de Capacitâncias	32
5.2.2	Cálculo das Correntes de Contato	34
6	RISCOS A CONSIDERAR	35
6.1	Choque Elétrico	35
6.2	Perfuração da Tubulação e de seu Revestimento	36
6.3	Danificação das Juntas Isolantes	36
6.4	Riscos ao Sistema de Proteção Catódica.	37
7	EXEMPLOS DE APLICAÇÃO	38
7.1	Exemplo 1 - Acoplamento Capacitivo	38
7.2	Exemplo 2 - Acoplamento Indutivo	40
7.2.1	Primeiro Caso - A Tubulação se Estende por alguns Kilometros após o Trecho Paralelo sem Aterramento	41
7.2.2	Segundo Caso - A tubulação se estende após uma seção e termina em outra sem aterramento	43
7.2.3	Terceiro Caso - A tubulação se estende após uma seção e termina em outra sem aterramento	45
8	CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	47
A	PARÂMETROS TÍPICOS DE TUBULAÇÕES	48
B	ROTINAS DESENVOLVIDAS EM MATLAB	49

Lista de Figuras

3.1	Linha de transmissão monofásica	7
3.2	Fio metálico na vizinhança de uma linha de transmissão. Fonte:Olsen & Jaffa(1984)	9
3.3	Circuito usado para a obtenção do equivalente de Thévenin Fonte:[9]	10
3.4	Circuito usado para a determinação das parcelas de V_o e V_L devidas ao campo elétrico Fonte: [9]	11
3.5	Eletrodo pontual enterrado num solo homogêneo de resistividade ρ	16
3.6	Condutor linear imerso em solo uniforme	17
4.1	Seção transversal de uma tubulação enterrada, em amarelo, o revestimento da tubulação, em cinza o aço.	22
4.2	Elemento diferencial do circuito tubulação-terra.	24
5.1	Circuito equivalente para uma tubulação metálica paralela à uma LT.	28
5.2	Variação da impedância mútua com a distância em vermelho para a frequência de 60 Hz e em azul para 50Hz.	29
5.3	Distribuição de correntes no caso de um curto monofásico.	30
5.4	Processo para transformação de trechos oblíquos em equivalentes paralelos. . .	30
5.5	Capacitâncias do sistema LT - Tubulação	32
5.6	Ciruito equivalente de Thévenin visto dos terminais da Tubulação	34
7.1	Geometria do Exemplo 1,Fonte[2]	39
7.2	Geometria da Torre.	40
7.3	Geometria do Caso 1 Fonte:[2]	41
7.4	Perfil de Tensão ao longo da Tubulação - Caso 1.	42
7.5	Perfil de Corrente ao longo da Tubulação - Caso 1.	42
7.6	Valores Simulados e obtidos de [15]	43
7.7	Geometria do segundo caso Fonte:[2]	43
7.8	Perfil de tensão para o segundo caso	44
7.9	Comparação dos Valores Simulados com os Obtidos de [15]	44
7.10	Geometria do terceiro caso Fonte:[15]	45
7.11	Perfil de Tensão na tubulação para o terceiro caso	45
7.12	Perfil de corrente na tubulação para o terceiro caso	46
7.13	Comparação entre os valores simulados e obtidos de [15]	46

B.1	Primeira parte do código da Função "Acopla_Capac"	49
B.2	Segunda parte do código da Função "Acopla_Capac"	50
B.3	Código da função "imp_mutua"	51
B.4	Primeira parte do código da função Tubaprox	52
B.5	Segunda parte do código da função Tubaprox	52
B.6	Primeira parte do código da função Tensão Induzida	53
B.7	Segunda parte do código da função Tensão Induzida	53

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

O custo crescente do espaço [1], a crescente demanda por energia, bem como as exigências relativas ao meio ambiente fazem com que seja cada vez mais comum o compartilhamento de corredores por linhas de transmissão e tubulações metálicas tais como oleodutos, gasodutos etc., esta proximidade faz com que haja interferência eletromagnética da linha de transmissão na tubulação através de acoplamentos condutivos, indutivos e capacitivos.

Esta interferência deve ser analisada, pois a influência da linha de transmissão pode causar na tubulação [2]:

- Aumento do potencial em relação a terra remota;
- Perfuração do revestimento da tubulação;
- Danos aos equipamentos conectados à tubulação.

O aumento de potencial em relação à terra remota faz com que a tensão de passo e a tensão de toque aumentem, podendo, assim, acarretar risco de choque elétrico em pessoas e animais como é o caso também em cercas metálicas próximas a linhas de transmissão. Já a perfuração metálica do revestimento da tubulação pode acelerar o processo de corrosão e desta forma levar à falha da tubulação.

No cenário particular de pernambuco, a Companhia Pernambucana de Gás – Copergás noticia investimentos da ordem de 350 milhões em gasodutos [3], bem como a ampliação da malha de gás natural para residências [4].

1.2 Objetivos

Este trabalho objetiva analisar a influência eletromagnética entre linhas de transmissão aéreas e tubulações metálicas enterradas, existem algumas abordagens para o problema, como por exemplo, estudos através de elementos finitos[5], e teoria de circuitos [6], sendo esta última a que segue este trabalho com o objetivo de simular em MATLAB casos de interferências eletromagnéticas em tubulações causadas por linhas de transmissão - LT.

1.3 Organização do Texto

O texto está organizado em oito capítulos. Iniciamos apresentando uma introdução ao tema e os objetivos do trabalho. No capítulo seguinte, são apresentadas as premissas que são utilizadas na resolução dos problemas. O capítulo três faz uma discussão dos três tipos de acoplamentos e determina que acoplamento deve ser considerado de acordo com a situação. O quarto capítulo apresenta métodos para o cálculo de parâmetros elétricos de tubulações, que são utilizados no cálculo do perfil de tensão na tubulação. O quinto capítulo apresenta procedimentos para o cálculo dos efeitos dos acoplamentos. Alguns dos riscos oriundos dos acoplamentos são apresentados no sexto capítulo. Em seguida são apresentados os exemplos de cálculo de acoplamentos. Por fim, no oitavo capítulo, são tecidas as conclusões e recomendações para trabalhos futuros. Ao final do trabalho, são apresentadas, na forma de anexo, alguns parâmetros típicos para estudo de tubulações, que podem ser usados caso não se disponha de dados reais, bem como algumas funções desenvolvidas em MATLAB que servem para auxiliar no cálculo de acoplamentos.

Existem alguns tópicos que são discutidos no texto porém não são implementados, como o efeito dos cabos para-raios, o acoplamento resistivo e os riscos a se considerar estes tópicos foram colocados com o objetivo de mostrar ao leitor aspectos do problema que devem ser levados em conta e de motivar trabalhos futuros. Alguns tópicos não foram implementados devido ao tempo que se dispõe para trabalhos de graduação e ficam como sugestão para trabalhos futuros.

Capítulo 2

MODELAGEM DO PROBLEMA

Serão apresentadas neste capítulo, as premissas que serão feitas na determinação das tensões e correntes induzidas na tubulação, bem como na modelagem de cada componente do sistema de potência e também da própria tubulação.

2.1 Premissas sobre o Sistema de Potência

A primeira premissa a se adotar é a de que os campos elétrico e magnético criados pela tubulação são muito menores do que os campos elétrico e magnético criados pela linha de transmissão. Assim, a tubulação exerce um efeito desprezível nas correntes e tensões presentes na linha de transmissão.

A segunda premissa a ser adotada é a de que os cabos da linha de transmissão são condutores horizontais, sendo o comprimento destes tal que os efeitos de pontas podem ser desprezados. Esta premissa permite em algumas abordagens [artigo de elementos finitos] tratar o problema em duas dimensões. A flecha é levada em conta representando-se o cabo pela sua altura média h , que é dada pela seguinte relação [7]:

$$h = h_{max} - \frac{2}{3}f \quad (2.1)$$

Onde :

h_{max} é altura do condutor no pé do isolador (m).

f é a flecha do condutor.

2.2 Premissas sobre o meio ambiente

O solo é homogêneo e modelado como sendo um volume infinito, limitado por um plano horizontal, com resistividade ρ , permissividade ε e permeabilidade magnética igual a do vácuo, além disso, o solo é considerado como condutor, de forma que as correntes de deslocamento podem ser desprezadas.

O ar é modelado como um dielétrico homogêneo e sem perdas, com permeabilidade magnética e permissividade elétrica iguais a do vácuo.

2.3 Modelagem da Tubulação

No que tange ao acoplamento indutivo, a tubulação é modelada como uma linha de transmissão monofásica com retorno pela terra [8]. No caso dos acoplamentos resistivo e capacitivo, a modelagem apresenta algumas diferenças devido a por exemplo, o perfil de tensão criado pelo acoplamento capacitivo não depender do comprimento do trecho no qual a linha de transmissão é paralela à tubulação.

O cálculo de parâmetros da tubulação é tratado no capítulo quatro, ao passo que a modelagem da tubulação é feita no capítulo cinco.

Capítulo 3

ACOPLAMENTOS

Este capítulo faz uma apresentação dos acoplamentos presentes entre uma linha de transmissão e uma tubulação metálica situada nas suas proximidades. Mostra-se que dependendo das características da tubulação e do estado de operação da linha que existem acoplamentos que predominam sobre outros. Desta forma, evita-se a análise desnecessária de acoplamentos que tenham pouca ou nenhuma influência na situação em estudo.

3.1 Acoplamento Eletromagnético

Na análise de problemas de eletromagnetismo em sistemas elétricos, é comum dividir o acoplamento em duas partes, uma devida ao campo elétrico, denominada acoplamento capacitivo, e outra, devida ao campo magnético, denominada acoplamento indutivo. Esta seção estabelece relações entre os acoplamentos mencionados, de forma que se possa determinar os acoplamentos a se considerar de acordo com a situação de interesse. Seguimos a abordagem presente em [9]. A figura 3.1 mostra uma linha monofásica com retorno pelo solo, onde o solo é tratado como um condutor perfeito.

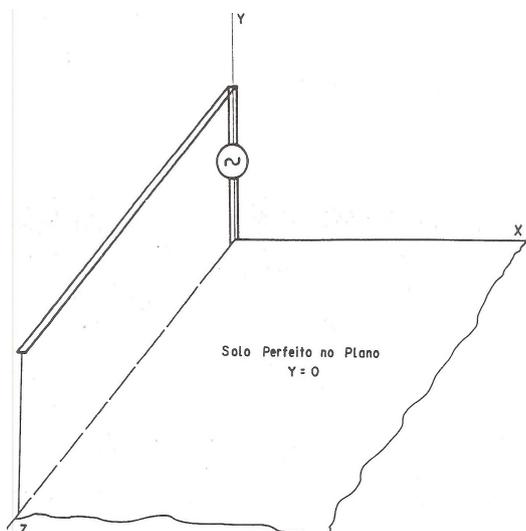


Figura 3.1: Linha de transmissão monofásica

Caso a distância para a linha seja eletricamente curta ($R_S \ll \lambda$), sendo λ o comprimento de onda eletromagnética no espaço livre (que em 60Hz vale aproximadamente 5.000Km) as equações dos campos elétrico e magnético num ponto arbitrário de coordenadas (x,y) são:

$$\vec{E}_{ut} = \frac{V_S(z)}{\ln\left(\frac{2d_S}{a_S}\right)} \left\{ \left[\frac{x}{R_S^2} - \frac{x}{R_S'^2} \right] \hat{x} + \left[\frac{(y-d_S)}{R_S^2} - \frac{(y+d_S)}{R_S'^2} \right] \hat{y} \right\} \quad (3.1)$$

Onde:

\vec{E}_{ut} - campo elétrico transversal gerado pela linha de transmissão. (V/m)

R_S - distância entre o condutor da linha de transmissão e o ponto (x,y) (m)

R_S' - distância entre o condutor imagem e o ponto (x,y) (m)

a_S - diâmetro do condutor da linha de transmissão (m).

d_S - altura do condutor da linha de transmissão (m).

$V_S(z)$ - Tensão ao longo da linha (V)

$I_S(z)$ - Corrente ao longo da linha (A)

Tem-se que campo magnético transversal é dado por:

$$\vec{H}_{ut} = \frac{I_S(z)}{2\pi} \left\{ \left[\frac{(y-d_S)}{R_S^2} - \frac{(y+d_S)}{R_S'^2} \right] \hat{x} - \left[\frac{x}{R_S^2} - \frac{x}{R_S'^2} \right] \hat{y} \right\} \quad (3.2)$$

Ao passo que o campo elétrico longitudinal \vec{E}_{uz} é dado por:

$$\vec{E}_{uz} = \frac{-C_M}{C_W} \frac{\partial V_S}{\partial z} + j\omega L_M I_S(z) = 0 \quad (3.3)$$

Já o campo magnético longitudinal \vec{H}_{uz} é:

$$\vec{H}_{uz} = 0 \quad (3.4)$$

O parâmetro C_M representa a capacitância mútua por unidade de comprimento entre a linha de transmissão e um condutor fino paralelo a linha e que passa no ponto (x,y), segundo [9] as equações (3.1) a (3.5) são válidas mesmo que não exista um condutor real na figura. C_M é dado por:

$$C_M = \frac{2\pi\epsilon_0 \ln(R_S'/R_S)}{\ln(2y/a_w) \ln(2d_S/a_S) - \ln^2(R_S'/R_S)} \quad (3.5)$$

onde a_w é o raio do fio. Já o parâmetro L_M representa a indutância mútua por unidade de comprimento entre a linha e o fio em questão, e é dado por:

$$L_M = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln(R'_S/R_S) \quad (3.6)$$

Por fim, o parâmetro C_W representa a capacitância própria do fio por unidade de comprimento na presença da linha de transmissão, e é dada por:

$$C_W = \frac{2\pi\epsilon_0 \ln(2d_S/a_s)}{\ln(2y/a_w) \ln(2d_S/a_S) - \ln^2(R'_S/R_S)} \quad (3.7)$$

Note-se que C_M/C_W independe do raio do fio.

Será analisado inicialmente o caso em que o fio está realmente presente na vizinhança de uma linha de transmissão, conforme mostra a figura 3.2. O fio pode representar uma cerca, um veículo e, em nosso caso de interesse, uma tubulação metálica no ar.

As impedâncias Z_0 e Z_L junto com a terra formam um circuito fechado, possibilitando, assim, a circulação de corrente, o parâmetro Z_L pode representar, por exemplo, uma pessoa ou ainda a impedância de um ponto de aterramento da tubulação, o mesmo raciocínio vale para a impedância Z_0 .

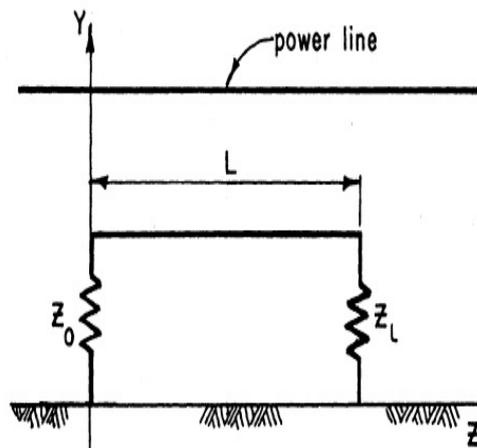


Figura 3.2: Fio metálico na vizinhança de uma linha de transmissão. Fonte:Olsen & Jaffa(1984)

Agora será calculada a tensão induzida pelo acoplamento eletromagnético, onde assumimos que o comprimento L mostrado na figura 3.2. é muito menor que o comprimento elétrico no espaço livre. Para realizar o cálculo, abre-se o circuito conforme mostrado na figura 3.3 e determina-se o equivalente de Thévenin entre os terminais 5 e 1.

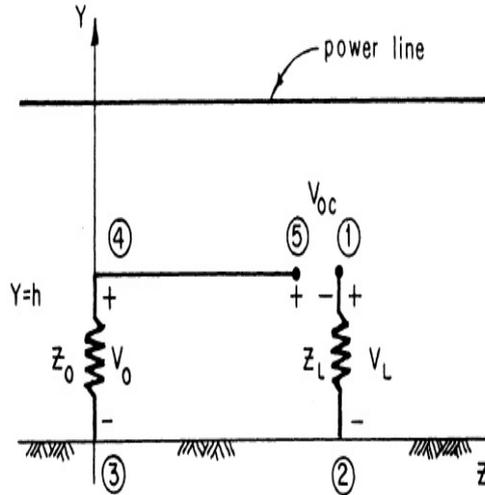


Figura 3.3: Circuito usado para a obtenção do equivalente de Thévenin Fonte:[9]

A partir da lei de Faraday:

$$\oint_C \vec{E}_P \cdot d\vec{l} = -j\omega \oint_S \vec{H}_P \cdot d\vec{S} = -j\omega\mu_0 \oint_S \vec{H}_P \cdot d\vec{S} \quad (3.8)$$

onde C é o caminho formado pelo fio, impedâncias Z_0 e Z_L e a terra e S é área delimitada pelo mesmo e H_P e E_P são os campos elétricos e magnéticos num ponto P arbitrário . O lado direito da equação acima representa a soma das quedas de tensão ao longo do caminho, assim a equação (3.8) pode ser escrita como:

$$-V_o + V_{45} + V_{oc} + V_L + V_{23} = -j\omega\mu_0 \oint_S \vec{H}_P \cdot d\vec{S} \quad (3.9)$$

onde por exemplo:

$$V_o = - \int_3^4 \vec{E}_P \cdot d\vec{l} \quad (3.10)$$

Em nosso caso, V_{45} é a queda de tensão ao longo do fio, que é desprezível visto que o fio é um bom condutor, outrossim, pelo fato da terra ter condutividade infinita, a queda de tensão entre os pontos 2 e 3 V_{23} é desprezível.

Desta forma a equação (3.9) pode ser escrita como:

$$-V_o + V_{oc} + V_L = -j\omega\mu_0 \oint_S \vec{H}_P \cdot d\vec{S} \quad (3.11)$$

A integral no segundo membro da equação acima representa o fluxo total enlaçado pelo caminho. Se $L \ll \lambda$ o campo magnético que deve ser usado para o cálculo da integral é dado apenas pelo campo magnético que é gerado pela linha que é dado pela equação (3.2).

Para o cálculo do campo elétrico, não se pode desprezar a presença do fio, visto que as cargas induzidas nele contribuem significativamente para o campo total. Assim, para o cálculo do campo elétrico, precisa-se levar em conta a capacitância entre o fio e a linha de transmissão C_M e a capacitância própria do fio C_W , o que resulta no modelo mostrado na figura 3.4. Poderia se calcular o campo elétrico diretamente e depois calcular V_o e V_L , porém, como o objetivo é ganhar uma melhor compreensão dos fenômenos envolvidos, a abordagem utilizada é suficiente.

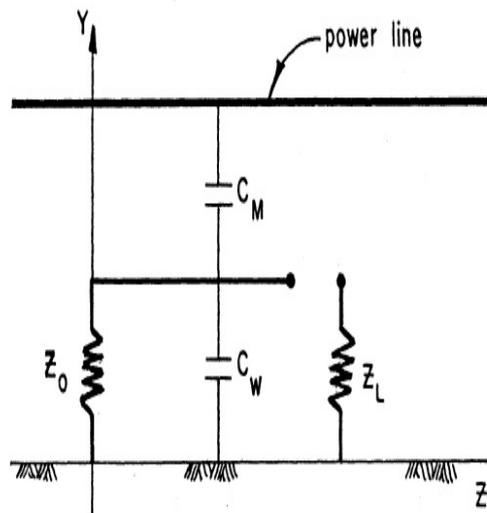


Figura 3.4: Circuito usado para a determinação das parcelas de V_o e V_L devidas ao campo elétrico Fonte: [9]

Se $C_M \ll C_W$ então:

$$V_o \approx \frac{j\omega C_M L Z_o}{1 + j\omega C_W L Z_o} \quad (3.12)$$

Como a capacitância entre a linha de transmissão e Z_L é muito menor que a capacitância entre a linha e Z_o junto com o fio ligado a ela, despreza-se a queda de tensão em Z_L .

Desta forma:

$$V_{oc} \approx \frac{j\omega C_M L Z_o}{1 + j\omega C_W L Z_o} V_s(z) - j\omega \mu_0 \oint_S \vec{H}_P \cdot d\vec{S} \quad (3.13)$$

Como o efeito do fio na linha de transmissão é desprezível, ou seja, as cargas induzidas no fio não afetam as cargas e correntes da linha, temos $C_M \ll C_W$, assim, a impedância de Thévenin Z_{Th} vista dos terminais 5 e 1 é dada por:

$$Z_{Th} = \frac{Z_o + Z_L + j\omega C_W L Z_o Z_L}{1 + j\omega C_W L Z_o} \quad (3.14)$$

Caso se curto-circuite os terminais 1 e 5 na figura 3.3 a tensão em Z_L será:

$$V_L = Z_L I_L \quad (3.15)$$

com:

$$I_L = \frac{V_{oc}}{Z_{Th}} \quad (3.16)$$

Percebe-se que a corrente I_L é igual a corrente de curto-circuito através dos terminais 1 e 5, desta forma a tensão induzida em V_L é:

$$V_L = \frac{Z_L + j\omega C_W L Z_o Z_L}{Z_o + Z_L + j\omega C_W L Z_o Z_L} \left[\frac{j\omega C_M L Z_o}{1 + j\omega C_W L Z_o} V_s(z) - j\omega \mu_0 \oint_S \vec{H}_P \cdot d\vec{S} \right] \quad (3.17)$$

O primeiro termo entre colchetes da equação acima representa o acoplamento capacitivo e é considerado um efeito de tensão, visto que é proporcional à tensão na linha. O segundo termo representa o acoplamento indutivo e é considerado um efeito de corrente, visto que é proporcional à corrente que circula pela linha. Estes dois efeitos podem ser superpostos nas situações em que valerem as premissas mencionadas.

3.1.1 Acoplamento Capacitivo

Caso na equação 3.17 tenha-se:

$$\frac{j\omega C_M L Z_o}{1 + j\omega C_W L Z_o} \gg j\omega\mu_0 \oint_S \vec{H}_P \cdot d\vec{S} \quad (3.18)$$

Então o acoplamento capacitivo predomina, o que é o caso de tubulações aéreas isoladas. Caso uma pessoa representada por Z_L toque a tubulação representada pelo fio, a corrente I_L que circulará pela pessoa será de:

$$I_L = \frac{V_{oc}}{Z_{Th}} = \frac{1 + j\omega C_W L Z_o}{Z_o + Z_L + j\omega C_W L Z_o Z_L} \left[\frac{j\omega C_M L Z_o}{1 + j\omega C_W L Z_o} V_s(z) \right] \quad (3.19)$$

A impedância Z_o pode representar a resistência de fuga da tubulação se a tubulação é isolada do solo ($Z_o \rightarrow \infty$). A combinação paralela de $C_W L$ e Z_o é muito maior que Z_L , desta forma, a corrente de choque não será significativamente influenciada por Z_L .

3.1.2 Acoplamento Indutivo

Se existe pelo menos um ponto no qual o fio está aterrado, seja $Z_o \rightarrow \infty$, então o acoplamento indutivo pode predominar sobre o acoplamento capacitivo. Desta forma:

$$V_{oc} \approx -j\omega\mu_0 \oint_S \vec{H}_P \cdot d\vec{S} \quad (3.20)$$

Novamente, como o comprimento do fio é muito menor que o comprimento de onda no espaço livre, o campo magnético que é enlaçado no circuito da figura 3.3. é dado apenas pelo campo magnético gerado pela linha de transmissão dado pela equação (3.2). Desta forma, segundo a Lei de Faraday:

$$\oint_C \vec{E}_P \cdot d\vec{l} = -j\omega\mu_0 \oint_S \vec{H}_P \cdot d\vec{S} \quad (3.21)$$

Na equação acima, o campo elétrico é afetado pela presença do fio, porém, percebe-se que ao aplicar a Lei de Faraday no mesmo contorno, mas sem a presença do fio, tem-se:

$$\oint_C \vec{E}_P \cdot d\vec{l} = -j\omega\mu_0 \oint_S \vec{H}_P \cdot d\vec{S} = \oint_C \vec{E}_u \cdot d\vec{S} \quad (3.22)$$

Novamente E_u representa o campo elétrico sem a presença da linha. Embora os campos elétricos E_P e E_u sejam diferentes, a integral ao longo do contorno fornece o mesmo resultado. Assim, o campo E_u pode ser usado no cálculo da integral de linha acima. Este resultado se deve ao fato de que a baixa impedância Z_o escoas as cargas eletrostáticas presentes no fio para a terra [6].

Integrando (3.22) tem-se:

$$\oint_C \vec{E}_u \cdot d\vec{l} = \int_0^h E_{uy}(Z=0)dy - \int_0^h E_{uy}(Z=L)dy + \int_0^L E_{uz}(y=h)dz \quad (3.23)$$

que fornece:

$$\oint_C \vec{E}_u \cdot d\vec{l} = \frac{C_M}{C_W} \frac{\partial V_S}{\partial z} \cdot L \left[-\frac{C_M}{C_W} \frac{\partial V_S}{\partial z} + j\omega l_m I_S \right] = j\omega l_m I_S(z)L \quad (3.24)$$

A passagem de (3.23) para (3.24) é feita baseada que na nossa premissa de que o comprimento do fio L é muito menor que o comprimento de onda no espaço livre. Desta forma:

$$\frac{\partial V_S}{\partial z} = \frac{V_S(L) - V_S(0)}{L} \quad (3.25)$$

Logo:

$$\oint_C \vec{E}_u \cdot d\vec{l} = j\omega l_m I_S(z)L = -j\omega\mu_0 \oint_S \vec{H}_P \cdot d\vec{S} \quad (3.26)$$

O termo $j\omega l_m I_S(z)$ representa a diferença de potencial por unidade de comprimento gerada no circuito devido ao acoplamento magnético. Assim, a tensão V_{oc} será:

$$V_{oc} = j\omega l_m I_S(z)L \quad (3.27)$$

Novamente, este resultado vale apenas caso o fio seja eletricamente curto. Caso a indutância mútua seja calculada usando-se as equações de Carson [10] os efeitos do solo não-ideal serão levados em conta na equação (3.27). Mais adiante neste trabalho, voltaremos a discutir formas de se calcular a impedância mútua. A corrente que percorrerá uma pessoa caso esta

toque o fio, pode ser calculada utilizando-se os circuitos presentes nas figuras 3.3 e 3.4. Sem perda de generalidade, supomos que o fio está aterrado por uma impedância Z_o , ao passo que a impedância do corpo humano está representada por Z_L . Desta forma, tem-se a impedância de Thévenin do circuito magnético Z_{th}^m :

$$Z_{th}^m = (Z_o \parallel \frac{1}{j\omega C_W L} + Z_L + Z_W) \quad (3.28)$$

Onde Z_W é a impedância do fio que deve ser considerada pois pode ter um valor próximo de Z_o . Visto que $Z_o \ll \frac{1}{j\omega C_W}$ a tem-se:

$$Z_{th}^m \approx Z_o + Z_L + Z_W \quad (3.29)$$

e a tensão de Thévenin é dada por (3.27). Desta forma, a corrente I_L que passará pela pessoa será:

$$I_L = \frac{V_{th}}{Z_{th}} = \frac{-j\omega l_m I_S(z)L}{Z_o + Z_L + Z_W} \quad (3.30)$$

Embora a discussão tenha sido feita considerando-se uma linha monofásica, sua utilidade reside no fato de que em regime de curto-circuito monofásico apenas a corrente na fase defeituosa é considerada [6], [2], desta forma a modelagem fornece uma compreensão sobre os fenômenos dominantes.

3.2 Acoplamento Resistivo

A injeção de corrente no solo provoca o aumento do potencial deste em relação à terra remota. Este aumento de potencial pode acarretar tensões de passo e toque acima dos níveis tolerados pelo corpo humano colocando em risco a vida das pessoas. Outrossim, pode ocorrer transferência de potencial do solo para a tubulação, provocando, assim, danos às juntas isolantes da tubulação ou mesmo a equipamentos conectados a ela. Em regime permanente, se a linha de transmissão não tem cabos para-raios aterrados, o acoplamento resistivo é desprezível. Nesta seção serão apresentados alguns fatores e termos que influenciam o acoplamento resistivo.

A densidade de corrente no solo, bem como o potencial causado devido à injeção desta, devem satisfazer as equações do eletromagnetismo, como também suas condições de contorno, na abordagem de sistemas de aterramento, o uso da teoria das imagens é comum, pois esta proporciona uma forma relativamente fácil de se determinar o potencial V ao longo do solo, que, no nosso caso, serve, dentre outras coisas, para determinar o potencial transferido para a tubulação devido ao acoplamento resistivo.

O gradiente de potencial é definido como:

$$\nabla V = \frac{\partial V}{\partial x} \hat{i} + \frac{\partial V}{\partial y} \hat{j} + \frac{\partial V}{\partial z} \hat{k} \quad (3.31)$$

Ao passo que o vetor campo elétrico \vec{E} é definido tal que:

$$\vec{E} = -\nabla V \quad (3.32)$$

A densidade de corrente elétrica é definida como uma quantidade vetorial na direção do fluxo de corrente e é dada pela equação:

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (3.33)$$

Onde σ é a condutividade do meio.

Por fim, conforme [11], defini-se eletrodo pontual como um eletrodo pequeno o suficiente para que suas dimensões não tenham influências significativas nos problemas em questão. Considere a figura 3.5 que mostra um eletrodo pontual inserido num solo homogêneo com resistividade ρ a uma distância h abaixo do solo e sua imagem a uma distância h acima do solo, a densidade de corrente no ponto P devido ao condutor e sua imagem é dada por:

$$\vec{J} = \frac{I}{4\pi} \left[\frac{1}{r^2} \hat{r} + \frac{1}{r'^2} \hat{r}' \right] \quad (3.34)$$

Onde r e r' representam a distância do eletrodo e da sua imagem até o ponto p, respectivamente e \hat{r} e \hat{r}' representam vetores unitários na direção de r e r' para o ponto p.

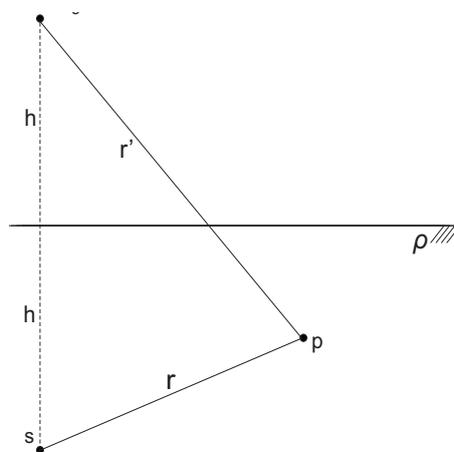


Figura 3.5: Eletrodo pontual enterrado num solo homogêneo de resistividade ρ .

Assim o campo elétrico no ponto p é dado por:

$$\vec{E} = \rho \vec{J} = \frac{\rho I}{4\pi} \left[\frac{1}{r^2} \hat{r} + \frac{1}{r'^2} \hat{r}' \right] \quad (3.35)$$

O potencial V_p no ponto p representa o trabalho para trazer uma carga unitária do infinito até o ponto p e é dado por:

$$V_p = \int_r^\infty \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (3.36)$$

Integrando (3.36) vem:

$$V_p = \frac{I\rho}{4\pi} \left[\frac{1}{r} + \frac{1}{r'} \right] \quad (3.37)$$

Embora este resultado seja para um eletrodo pontual, ele é utilizado no cálculo dos efeitos de eletrodos maiores, visto que em um solo homogêneo um eletrodo maior pode ser subdividido em vários eletrodos menores suficientemente pequenos para que suas dimensões não sejam significativas.

Considere agora a figura 3.6., em que temos um condutor linear l_s dividido em n segmentos como eletrodo, este caso é comum em linhas de transmissão onde o aterramento é feito através de contrapesos, na figura o eletrodo eletrodo está imerso em um solo uniforme de resistividade ρ .

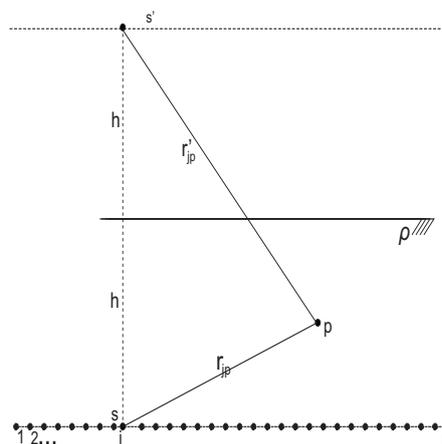


Figura 3.6: Condutor linear imerso em solo uniforme

Modelando-se o solo como um meio linear, o potencial no ponto p pode ser obtido dividindo-se o condutor em n partes pequenas o suficiente para que suas dimensões não influenciem no problema e tratando cada segmento j ($j=1,2,\dots,n$) como um eletrodo pontual e, por fim, aplica-se o princípio da superposição. Desta forma, tem-se as equações:

$$V_p = \frac{\rho}{4\pi} \sum_{j=1}^n \left[\frac{I_j}{r_{jp}} + \frac{I'_j}{r'_{jp}} \right] \quad (3.38)$$

$$I = \sum_{j=1}^n I_j \quad (3.39)$$

Supondo uma densidade linear de corrente de dispersão sobre a superfície do condutor e considerando que cada ponto tem comprimento Δx , tem-se:

$$V_p = \frac{\rho I \Delta x}{4\pi L_s} \sum_{j=1}^n \left[\frac{1}{r_{jp}} + \frac{1}{r'_{jp}} \right] \quad (3.40)$$

No limite em que $n \rightarrow \infty$, $\Delta x \rightarrow 0$, assim:

$$V_p = \frac{\rho I}{4\pi} \int_0^{L_s} \left[\frac{1}{r_{jp}} + \frac{1}{r'_{jp}} \right] \frac{di(x)}{dx} dx \quad (3.41)$$

Onde $i(x)$ representa a distribuição de corrente de dispersão ao longo da superfície do condutor. Assumindo-se uma densidade de corrente de dispersão constante, tem-se:

$$V_p = \frac{\rho I}{4\pi L_s} \int_0^{L_s} \left[\frac{1}{r} + \frac{1}{r'} \right] dx \quad (3.42)$$

A precisão dos resultados obtidos com a soma depende do número de segmentos que se usa para modelar o condutor linear, ao passo que quando se usa a integral esta limitação não existe. Apesar disto, o cálculo utilizando a soma pode ser implementado computacionalmente.

Sabe-se que o potencial em um condutor ideal deve ser constante, porém pode ser difícil encontrar uma função para a densidade de corrente de dispersão que satisfaça esta condição de contorno. Desta forma, pode-se usar o método do potencial médio para se determinar um valor razoável para o potencial na superfície do condutor.

Se $V(x_s, a_s)$ é o potencial obtido num ponto (x_s, a_s) da superfície do condutor assumindo uma densidade de corrente de dispersão constante, então o potencial médio no condutor V_{med} é dado por:

$$V_{med} = \frac{1}{L_s} \int_0^{L_s} V(x_s, a_s) dx_s \quad (3.43)$$

Define-se a resistência de aterramento do condutor como sendo:

$$R_g = \frac{V_{med}}{I} \quad (3.44)$$

Considerando-se um ponto (x_k, a_k) na superfície de outro condutor l_k linear de comprimento L_k e raio a_k , o potencial $V(x_k, a_k)$ induzido neste ponto devido à corrente I dissipada pelo condutor l_s pode ser determinado usando-se a equação (3.40) ou (3.42). Porém, o potencial na superfície do condutor l_k também é variável ao longo da sua superfície, por isso, toma-se o potencial médio na superfície do condutor l_k para satisfazer esta condição de contorno. Desta forma, o potencial médio na superfície do condutor l_k denotado por V_{kmed} é dado por:

$$V_{kmed} = \frac{1}{L_k} \int_0^{L_k} V(x_k, a_k) dx_k \quad (3.45)$$

Define-se a resistência mútua entre dois condutores l_s e l_k denotada por $R_{k,s}$ como sendo a razão da tensão produzida no condutor l_k quando o condutor l_s dissipa uma corrente unitária. Desta forma, tem-se:

$$R_{k,s} = \frac{V_{kmed}}{I} \quad (3.46)$$

3.3 ACOPLAMENTOS A SEREM CONSIDERADOS

Vimos nas seções anteriores que dependendo da geometria da tubulação um tipo de acoplamento pode predominar sobre o outro, além disso a condição de operação da linha de transmissão pode determinar o(s) acoplamento(s) dominante(s). Em regime permanente, se a tubulação é aérea e isolada do solo, o acoplamento capacitivo predomina. Se existe um ou mais pontos de aterramento, o acoplamento indutivo predomina. O acoplamento capacitivo é função da tensão de operação da linha, como foi mostrado para o caso da linha monofásica na subseção 3.1.1. O caso para a linha trifásica será mostrado no capítulo 5.

Se a tubulação ou uma parte dela for aterrada, o acoplamento indutivo predomina, já que o solo funciona como uma superfície equipotencial anulando o acoplamento capacitivo, bem como a resistência de fuga da tubulação é suficiente para aterrará-la. Normalmente, o acoplamento indutivo é pequeno devido ao fato das correntes estarem defasadas de 120 graus entre si, ficando a indução residual fruto das distâncias entre cada fase e a tubulação que são ligeiramente diferentes.

Em condições de operações equilibradas, o acoplamento resistivo é desprezível, pois a corrente injetada no solo pelos cabos para-raios não é suficiente para causar transferências de potencial significativas para a tubulação.

Caso ocorra um curto-circuito e a tubulação seja enterrada ou aérea aterrada, os acoplamentos resistivo e indutivo devem ser analisados, visto que a corrente injetada no solo pode ser suficiente para causar transferências significativas de potencial, bem como será visto mais adiante, a corrente de sequência zero pode produzir um acoplamento magnético significativo.

Caso ocorra um curto-circuito e a tubulação seja aérea e isolada, apenas o acoplamento capacitivo necessita ser examinado.

Tabela 3.1: Análises a serem efetuadas de acordo com as características da tubulação e regime de operação da linha.

Tipo de tubulação	Riscos a considerar	Grandezas a calcular	Acoplamentos Presentes	Condição do Sistema Elétrico
Aérea Isolada	Choque elétrico	Corrente de Choque	Capacitivo	Regime Permanente
Aérea	Danificação de Juntas Isolantes	Tensões nas Juntas Isolantes	Indutivo e Resistivo	Curto-circuito
Aérea Aterrada	Choque Elétrico	Tensão de Toque	Indutivo e Resistivo	Curto-circuito e Regime Permanente (Correntes Desequilibradas)
Enterrada	Choque Elétrico	Tensão de Toque	Indutivo e Resistivo	Curto-circuito e Regime Permanente (Correntes Desequilibradas)
Enterrada	Danificação da Tubulação e do seu Revestimento	Tensão Aplicada no Revestimento	Indutivo e Resistivo	Curto-circuito
Enterrada	Danificação das Juntas Isolantes e Sistema de Proteção Catódica	Tensão Aplicada Nestes Dispositivos	Indutivo e Resistivo	Curto-circuito

A tabela 3.1 sumariza os resultados obtidos nesta seção.

Capítulo 4

CÁLCULO DE PARÂMETROS DE TUBULAÇÕES

Na determinação do perfil de tensões na tubulação é necessário o conhecimento dos seguintes parâmetros da mesma:

- Impedância Linear, Z ;
- Admitância Linear, Y ;
- Impedância Característica da Tubulação Z_c ;
- Constante de Propagação γ .

São apresentados neste capítulos métodos usados na determinação destes parâmetros.

4.1 Impedância Linear

Segundo [2], a impedância linear de uma tubulação enterrada é dada por:

$$Z = Z_i + \frac{\mu_0 \omega}{8} + j \frac{\mu_0 \omega}{2\pi} \ln \left(\frac{1,85}{a' \sqrt{\gamma^2 + j\omega\mu_0 \left(\frac{1}{\rho} + j\omega\varepsilon \right)}} \right) \quad (4.1)$$

e para tubulações aéreas:

$$Z = Z_i + \frac{\omega\mu_0}{8} + j \frac{\omega\mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{3,7 \sqrt{\rho\omega^{-1}\mu_0^{-1}}}{D} \right) (\Omega/m) \quad (4.2)$$

Onde:

Z_i - impedância interna da tubulação (ohms/m);

ρ - resistividade do solo (ohms/m);

D - diâmetro da tubulação (m);

a' - raio equivalente da tubulação para tubulações enterradas $a' = \sqrt{a^2 + 4h^2}$ (m);

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

ε - permissividade elétrica do solo (F/m);

ρ_t - resistividade elétrica do metal da tubulação;

μ_t - permeabilidade elétrica da tubulação;

δ_c - espessura do revestimento da tubulação;

a - raio médio tubulação;

h - profundidade média da tubulação;

ω - frequência angular da rede elétrica;

μ_0 - permeabilidade magnética do vácuo no espaço livre.

O termo Z_i representa a impedância interna do condutor com retorno pelo solo, diversas expressões são usadas na literatura [6], [8], a depender da precisão desejada. No nosso caso tratamos Z_i como a soma de dois termos, um termo R_T que é a resistência da tubulação e é dado por:

$$R_T = \frac{\rho_t}{\pi(a_1^2 - a_2^2)} \quad (4.3)$$

com a_1 e a_2 sendo os raios externo e interno da tubulação, respectivamente, conforme mostra a figura 4.1.

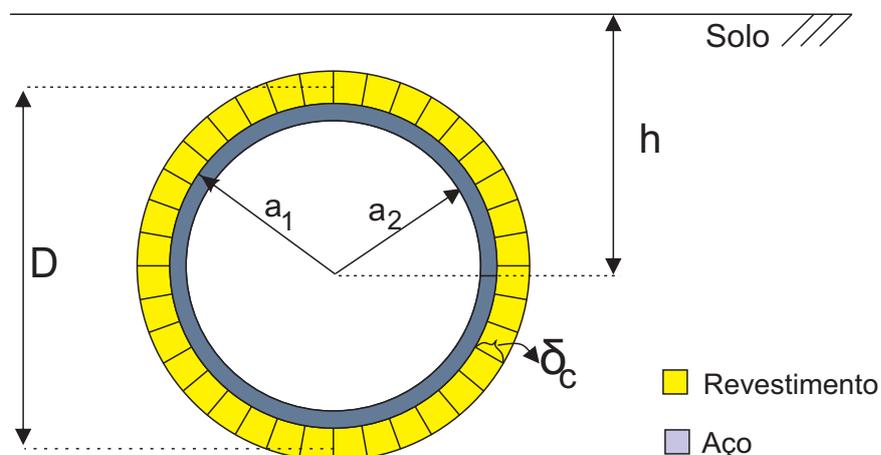


Figura 4.1: Seção transversal de uma tubulação enterrada, em amarelo, o revestimento da tubulação, em cinza o aço.

Onde h é a profundidade média da tubulação, D é o diâmetro médio e δ_c é a espessura do revestimento e a_1 e a_2 são os raios externos e internos da tubulação. A segunda parcela é devida ao efeito skin e é dada por:

$$Z_{skin} = \frac{\sqrt{\rho \mu_t \omega}}{\pi D \sqrt{2}} (1 + j) \quad (4.4)$$

onde Z_{skin} é parcela da impedância interna devido ao efeito pelicular, assim:

$$Z_i = R_T + Z_{skin} \quad (4.5)$$

Tipicamente [6][2] despreza-se a parcela de Z_i devido a resistência da tubulação e por esta ser muito menor que a parcela devida ao efeito pelicular. Note que o cálculo da impedância por unidade de comprimento da tubulação depende da constante de propagação γ , embora existam métodos aproximados para a determinação da constante de propagação, para o cálculo preciso da mesma deve-se resolver a equação transcendental mostrada na seção 4.3 deste capítulo, quando não se deseja resolver a equação transcendental, pode-se aproximar a impedância da tubulação enterrada pela expressão abaixo usada no caso da tubulação aérea.

4.2 Admitância Linear

A admitância linear é a parcela responsável pelas correntes de fuga para a terra da tubulação e sofre grande influência do revestimento da tubulação, visto que a admitância de fuga para a terra é muito maior que a admitância do revestimento [2].

O caminho da corrente de fuga para a terra consiste basicamente em duas etapas (assumindo um solo homogêneo): a primeira consiste no caminho entre a parte metálica da tubulação e a terra vizinha a ela; e a segunda, entre a terra vizinha e a terra remota.

Para o cálculo da condutância por unidade de comprimento, vê-se que o caminho a ser percorrido pela corrente de fuga é igual a espessura do revestimento da tubulação δ_c e a área da seção transversal é igual ao comprimento de uma circunferência com raio a , assim temos:

$$G = \frac{1}{\frac{\rho_c \delta_c}{2\pi a}} = \frac{\pi D}{\rho_c \delta_c} \quad (4.6)$$

onde G é a condutância da tubulação e ρ_c é a resistividade do material do revestimento.

Percebe-se também, que a tubulação e o solo são dois meios condutores, e o revestimento

é um meio dielétrico, sendo assim, temos uma capacitância entre a parte metálica da tubulação e a terra vizinha. Como a capacitância é proporcional à área da seção transversal que a corrente deve percorrer e a permissividade do dielétrico, ao passo que é inversamente proporcional ao tamanho do caminho a percorrer. Da geometria da figura 4.2., temos:

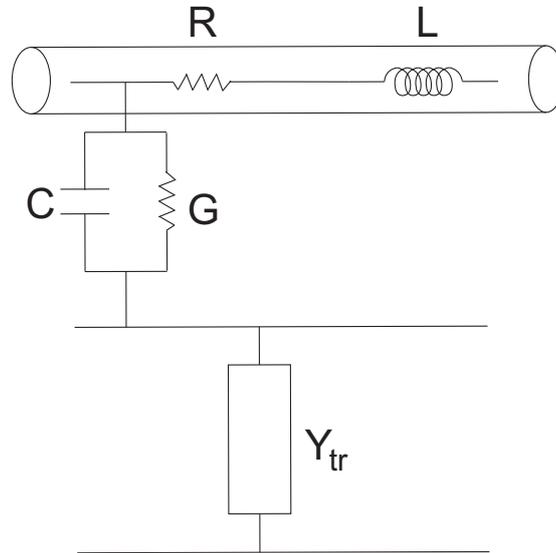


Figura 4.2: Elemento diferencial do circuito tubulação-terra.

$$C = \frac{\epsilon_c 2\pi a}{\delta_c} = \frac{\epsilon_c \pi D}{\delta_c} \quad (4.7)$$

Assim a admitância para a terra vizinha denominada de Y_{tv} é dada por:

$$Y_{tv} = G + j\omega C = \frac{\pi D}{\rho_c \delta_c} + j\omega \frac{\epsilon_c \pi D}{\delta_c} \quad (4.8)$$

Porém, existe a segunda parte do caminho a ser percorrido pela corrente de fuga oriunda da tubulação, que é o caminho da terra vizinha para a terra remota, como pode ser visto na figura 4.2. Esta depende fundamentalmente das características elétricas do solo. De [10], sabe-se que a admitância para a terra remota Y_{tr} é dada por:

$$Y_{tr} = \frac{\pi \left(\frac{1}{\rho} + j\omega \epsilon \right)}{\ln \left(\frac{1.12}{\gamma a'} \right)} \quad (4.9)$$

Da figura 4.2 vemos que as duas admitâncias estão em série, assim admitância equivalente Y é obtida pela associação de Y_{tv} com Y_{tr} e é dada por:

$$Y = \frac{Y_{tv} Y_{tr}}{Y_{tv} + Y_{tr}} \quad (4.10)$$

O fato de Y_{tr} depender da constante de propagação faz com que necessite-se resolver a equação transcendental mostrada na seção seguinte para o cálculo da admitância, geralmente para tubulações revestidas [2] $Y_{tr} \gg Y_{tv}$ assim $Y \approx Y_{tv}$. Para tubulações aéreas tem-se:

$$Y = j\omega \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \left[\frac{h_p + \sqrt{h_p^2 + a^2}}{a} \right]} \quad (4.11)$$

Onde h_p é a altura da tubulação com respeito ao solo.

4.3 Constante de propagação

A constante de propagação γ é dada por:

$$\gamma = \sqrt{ZY} \quad (4.12)$$

Conforme mencionado nas seções anteriores, tanto a impedância quanto a admitância da tubulação depende da constante de propagação, assim para o cálculo de ambos os parâmetros necessitamos do conhecimento da mesma. O cálculo da constante de propagação é feito resolvendo-se a seguinte equação transcendental:

$$\gamma^2 \frac{1}{Y} = Z \quad (4.13)$$

substituindo as equações 4.1, 4.5, 4.8, 4.9 e 4.10 em 4.12 vem:

$$\gamma^2 \left[\frac{1}{Y_{tv}} + \frac{\ln \left(\frac{1,12}{\gamma a'} \right)}{\pi \left(\frac{1}{\rho} + j\omega\epsilon \right)} \right] = Z_i + \frac{\omega\mu_0}{8} + j \frac{\mu_0\omega}{2\pi} \ln \left(\frac{1,85}{a' \sqrt{\gamma^2 + j\omega\mu_0 \left(\frac{1}{\rho} + j\omega\epsilon \right)}} \right) \quad (4.14)$$

Resolvendo-se a equação acima pode-se facilmente calcular os outros parâmetros da tubulação.

4.4 Impedância Característica

De posse da impedância por unidade de comprimento e da admitância, pode-se calcular a impedância característica Z_c através da equação:

$$Z_c = \sqrt{\frac{Z}{Y}} \quad (4.15)$$

4.5 Método Aproximado para o Cálculo de Parâmetros de Tubulações Enterradas

Como mencionado anteriormente caso não se deseje resolver a equação transcendental a equação (4.2) pode ser usada no lugar da equação (4.1) fornecendo uma boa aproximação (Cigré,1995) e desprezar o termo da admitância para a terra remota ficando a admitância da tubulação representada apenas pela equação (4.8).

Capítulo 5

PROCEDIMENTOS DE CÁLCULO PARA OS ACOPLAMENTOS

Neste capítulo são apresentados procedimentos para o cálculo das tensões e correntes resultantes dos acoplamentos presentes, bem como de outros aspectos de interesse como por exemplo, a corrente de curto-circuito que atravessa uma pessoa que toque uma tubulação aérea.

5.1 Acoplamento Indutivo

O objetivo de análise do acoplamento indutivo é determinar o perfil de tensão na tubulação que este causa, e de posse do conhecimento deste perfil, prover medidas de segurança para pessoas e objetos em contato com a tubulação.

5.1.1 Impedância Mútua

Para se determinar os efeitos do acoplamento indutivo, faz-se necessário determinar a tensão induzida por unidade de comprimento na tubulação. A figura 5.1 mostra uma tubulação paralela a uma linha de transmissão e um elemento diferencial de seu circuito equivalente, vê-se que existe um campo elétrico induzido por unidade de comprimento E na tubulação, que é dado por [2]:

$$E = -Z_m I \quad (5.1)$$

Onde I é a corrente na fase da linha e Z_m é impedância mútua por unidade de comprimento entre dois condutores m e n .

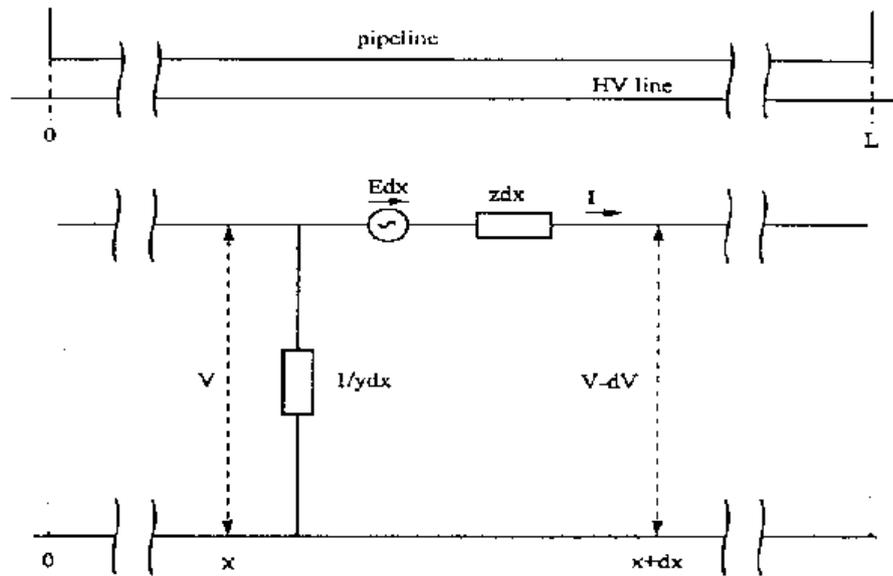


Figura 5.1: Circuito equivalente para uma tubulação metálica paralela à uma LT.

A impedância mútua é dada por [2]:

$$Z_m = \frac{\omega\mu_0}{8} + j\frac{\omega\mu_0}{2\pi} \ln \left[\frac{1,85\sqrt{\frac{\rho\mu_0}{\omega}}}{D_{mn}} \right] \quad (5.2)$$

Onde:

ω é a frequência angular da rede (rad/s)

D_{mn} é a distância geométrica entre os dois condutores (m)

ρ é a resistividade do solo (Ohms.m)

Estas expressões valem para trechos nos quais a tubulação é paralela a linha de transmissão, trechos perpendiculares e oblíquos serão tratados mais adiante. Note-se que as expressões deste item são válidas também para os cabos para-raios.

A impedância mútua diminui com a distância, a figura 5.2 mostra a variação da impedância mútua para um solo com resistividade de $100 \Omega \cdot m$ para as frequências de 50 e 60 Hz, note-se que a partir de certa distância, a impedância mútua decai bruscamente, anulando desta forma o acoplamento indutivo, logo, faz-se necessário determinar a máxima distância que se deve levar em conta na análise das interferências do acoplamento indutivo.

Para 60Hz a equação 5.2 se torna:

$$Z_m = 59,2 \times 10^{-6} + j75,4 \times 10^{-6} \ln \left[\frac{85,2\sqrt{\rho}}{D_{mn}} \right] \quad (5.3)$$

Vê-se que para uma distância $D_{mn} = 85,2\sqrt{\rho}$ o termo imaginário se torna 0, tornando o

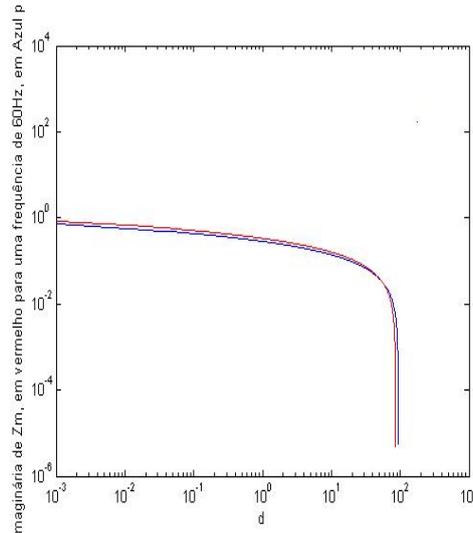


Figura 5.2: Variação da impedância mútua com a distância em vermelho para a frequência de 60 Hz e em azul para 50Hz.

acoplamento indutivo pouco significativo [6], desta forma a maior distância D_{max} a ser considerada é dada por:

$$D_{max} = 85,2\sqrt{\rho} \quad (5.4)$$

Algumas referências [2] usam $D_{max} = 200\sqrt{\rho}$ para se obter segurança adicional.

5.1.2 Efeito dos Cabos Para-raios

A figura 5.3. mostra a distribuição de correntes nos para-raios de uma LT durante um curto monofásico. Note-se que as correntes supridas pelas subestações I_{se1} e I_{se2} têm sentidos opostos às correntes que circulam nos cabos para-raios I_{pr1} e I_{pr2} . Desta forma, durante o curto-circuito monofásico, os cabos para-raios têm um efeito de cancelar a tensão induzida pela corrente de fase na tubulação. Logo, durante o curto-circuito pode-se escrever:

$$E = Z_{tf}I_f - Z_{tpr}I_{pr} \quad (5.5)$$

Onde:

Z_{tf} é a impedância mútua entre a tubulação e a fase defeituosa(Ω)

Z_{tpr} é a impedância mútua entre a tubulação e o cabo para-raios (Ω)

I_f é a corrente na fase defeituosa (A)

I_{pr} é a corrente no cabo para-raios (A)

Embora durante o curto-circuito o efeito dos cabos para-raios seja benéfico, em regime permanente eles aumentam a tensão induzida na tubulação. Isso se deve ao fato de que em regime permanente a corrente tem o mesmo sentido da corrente de fase.

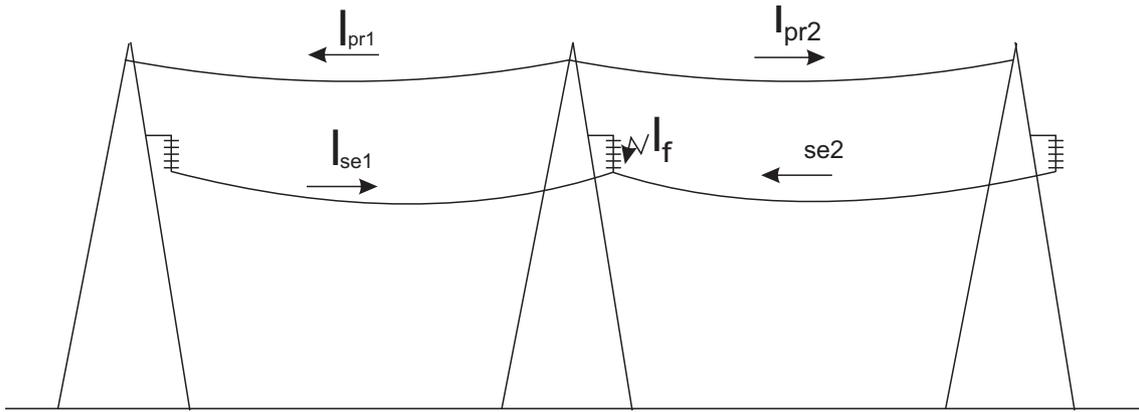


Figura 5.3: Distribuição de correntes no caso de um curto monofásico.

5.1.3 Trechos Não-Paralelos e Cruzamentos

As equações mostradas anteriormente valem para trechos em que a tubulação é paralela à LT. Quando se tem um trecho oblíquo entre a tubulação e a LT, para a aplicação das equações anteriores, torna-se necessário reduzir o trecho oblíquo a segmentos paralelos equivalentes. A figura 5.4. mostra esse processo.

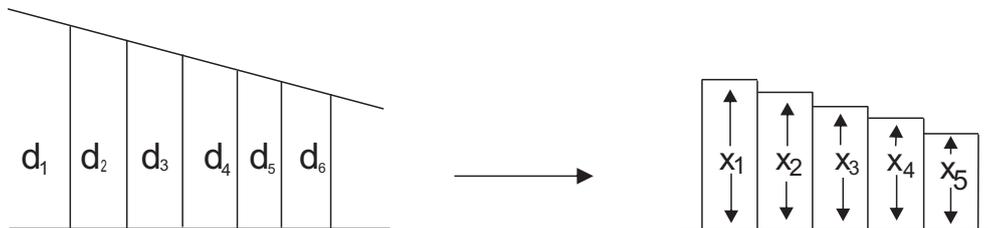


Figura 5.4: Processo para transformação de trechos oblíquos em equivalentes paralelos.

As distâncias na figura 5.4 seguem as relações:

$$x_k = \sqrt{d_k \cdot d_{k+1}} \quad (5.6)$$

e

$$1/3 \leq \frac{d_k}{d_{k+1}} \leq 3 \quad (5.7)$$

Trechos perpendiculares não sofrem interferência devido ao acoplamento indutivo pois não há tensão induzida.

5.1.4 Procedimento Geral para Cálculo da Tensão induzida

Será considerada inicialmente uma linha de transmissão com n-1 condutores em paralelo com um condutor t (no nosso caso, a tubulação). Sabe-se que a queda de potencial por unidade de comprimento pode ser expressa como:

$$\begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ \Delta V_{n-1} \\ E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \dots & \dots & \dots & Z_{1n} \\ Z_{21} & Z_{22} & \dots & \dots & \dots & Z_{2n} \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\ Z_{(n-1)1} & Z_{(n-1)2} & \dots & \dots & \dots & Z_{(n-1)n} \\ Z_{t1} & Z_{t2} & \dots & \dots & \dots & Z_{tt} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ I_{n-1} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

Onde:

ΔV_i é a queda de tensão por unidade de comprimento no condutor i (V/m)

I_i é a corrente no condutor i (A)

E é a tensão induzida na tubulação por unidade de comprimento (V/m)

Z_{ii} é a impedância própria por unidade de comprimento do condutor (Ω/m)

Z_{ij} é a impedância mútua por unidade de comprimento entre o condutor i e o condutor j (Ω/m)

Como deseja-se calcular o campo elétrico induzido pela LT, a corrente da tubulação na equação (5.8) foi tomada como zero, de posse da corrente de carga na LT e utilizando-se a equação (5.1), pode-se determinar a tensão induzida E na tubulação.

Em caso de curto circuito no condutor k, costuma-se desprezar a corrente de carga nas fases sãs, visto que a corrente de curto-circuito usualmente é muito maior que a corrente de carga. Isto equivale a tomar as correntes na equação (5.8) como sendo nulas, à exceção da corrente no condutor k.

5.1.5 Equações para Tensões e Correntes na Tubulação

Conforme mencionado no capítulo 2 a tubulação é modelada como uma linha de transmissão longa. A figura 5.1 mostra um elemento diferencial do circuito da tubulação, sendo assim, pode-se escrever:

$$\frac{dV(x)}{dx} + zI(x) - Edx = 0 \quad (5.9)$$

$$\frac{dI(x)}{dx} = yV(x) \quad (5.10)$$

Onde:

z é a Impedância Linear da Tubulação. (Ω)

y é a Admitância shunt da tubulação. (Ω^{-1})

E é o campo induzido por unidade de comprimento na tubulação. (V/m)

$V(x)$ é tensão num ponto arbitrário x na tubulação. (V)

$I(x)$ é a corrente num ponto arbitrário x na tubulação. (A)

5.2 Acoplamento Capacitivo

A figura 5.5. mostra a seção transversal de um sistema composto de uma linha de transmissão e uma tubulação aérea, o objetivo da análise do acoplamento capacitivo é determinar a corrente de choque elétrico à qual uma pessoa estará sujeita caso toque a tubulação.

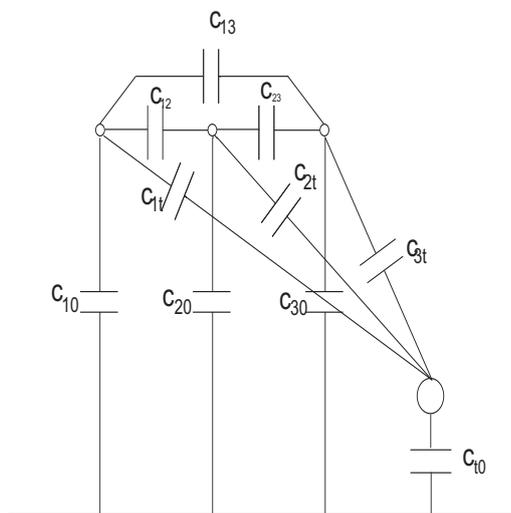


Figura 5.5: Capacitâncias do sistema LT - Tubulação

5.2.1 Cálculo da Matriz de Capacitâncias

O cálculo da matriz de capacitâncias pode ser feito a partir da inversão da matriz dos coeficientes de potenciais de Maxwell P que relaciona a tensões fase-terra dos condutores com as correntes de deslocamento, sabe-se que:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_{n-1} \\ V_t \end{bmatrix} = \frac{1}{j\omega} \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \cdots & \cdots & P_{1(n-1)} & P_{1t} \\ P_{21} & P_{22} & \cdots & \cdots & P_{2(n-1)} & P_{2t} \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\ P_{(n-1)1} & P_{(n-1)2} & \cdots & \cdots & P_{(n-1)(n-1)} & P_{(n-1)t} \\ P_{t1} & P_{t2} & \cdots & \cdots & P_{t(n-1)} & P_{tt} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_{n-1} \\ I_t \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

Onde:

V_i é a tensão fase-terra no condutor i (V)

I_i é a corrente de deslocamento no condutor i (A)

P_{ij} são os coeficientes de potencial de Maxwell (m/F)

O elementos da matriz de potencial são obtidos da geometria da torre, e são dados por:

$$P_{ii} = 13 \times 10^9 \ln \left(\frac{2h_i}{r_i} \right) (m/F) \quad (5.12)$$

e

$$P_{ij} = 18 \times 10^9 \ln \left(\frac{S_{ij}}{s_{ij}} \right) (m/F) \quad (5.13)$$

Invertendo-se a matriz de Potenciais tem-se:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ I_{n-1} \\ I_t \end{bmatrix} = j\omega \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & \cdots & \cdots & C_{1(n-1)} & C_{1t} \\ C_{21} & C_{22} & \cdots & \cdots & C_{2(n-1)} & C_{2t} \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\ C_{(n-1)1} & C_{(n-1)2} & \cdots & \cdots & C_{(n-1)(n-1)} & C_{(n-1)t} \\ C_{t1} & C_{t2} & \cdots & \cdots & C_{t(n-1)} & C_{tt} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ V_{n-1} \\ V_t \end{bmatrix} \quad (5.14)$$

Os coeficientes da matriz de capacitâncias podem ser obtidos com as relações:

$$C_{ii} = c_{i0} + \sum_{j=1, j \neq i}^n c_{ij} \quad (5.15)$$

e:

$$C_{ij} = -c_{ij} \quad (5.16)$$

Onde:

c_{i0} é a capacitância por unidade de comprimento do condutor i para a terra (V/m)

c_{ij} é a capacitância por unidade de comprimento entre os condutores i e j .

5.2.2 Cálculo das Correntes de Contato

Para o cálculo das correntes de contato, considera-se o equivalente de Thévenin visto pela tubulação do sistema mostrado na figura 5.5. Este circuito equivalente é mostrado na figura 5.6. Pode-se ver que a impedância de Thévenin Z_{th} do circuito consiste na associação em paralelo de todas as impedâncias. Desta forma, tem-se::

$$Z_{th} = \frac{1}{j\omega C_{tt}} = \frac{1}{j\omega(C_{t1} + C_{t2} + \dots + C_{t(n-1)} + C_{t0})} \quad (5.17)$$

A tensão de Thévenin é dada por V_t quando $I_t = 0$ desta forma para a última linha de (5.12):

$$0 = j\omega (C_{t1}V_1 + C_{t2}V_2 + \dots + C_{t(n-1)}V_{n-1}) + j\omega C_{tt}V_t \quad (5.18)$$

Rearranjando-se os termos e notando-se que $j\omega C_{tt} = \frac{1}{Z_{th}}$ vem:

$$V_t = V_{th} = Z_{th}j\omega (C_{t1}V_1 + C_{t2}V_2 + \dots + C_{t(n-1)}V_{n-1}) \quad (5.19)$$

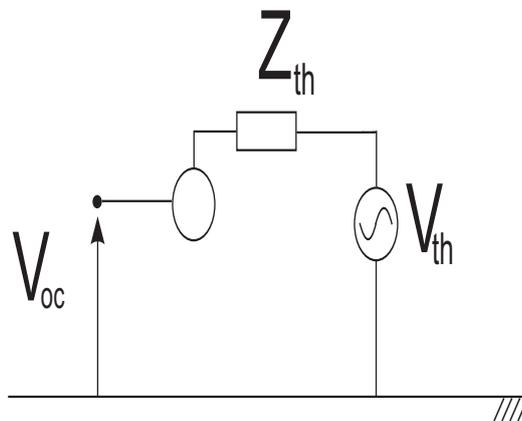


Figura 5.6: Circuito equivalente de Thévenin visto dos terminais da Tubulação

Caso um trecho da tubulação de comprimento L seja curto circuitado por uma pessoa com resistência $R_{ch} \ll Z_{th}$ então $V_t \approx 0$, logo a corrente I_{sc} através da pessoa será:

$$I_{sc} = \frac{V_{th}}{Z_{th}} = j\omega (C_{t1}V_1 + C_{t2}V_2 + \dots + C_{t(n-1)}V_{n-1}) L \quad (5.20)$$

A corrente de curto-circuito total é dada pela soma das correntes em cada trecho.

Capítulo 6

RISCOS A CONSIDERAR

6.1 Choque Elétrico

Choques elétricos podem ocorrer caso uma pessoa entre em contato com uma tubulação situada nas proximidades de uma LT. Os efeitos da passagem de corrente elétrica pelo corpo humano foram objetos de vários estudos, sendo o de Dalziel [12] um dos mais conhecidos.

O grau de suportabilidade do corpo humano à corrente elétrica é função da duração do choque elétrico. No que tange a este estudo, as correntes podem ser classificadas de acordo com sua duração em correntes de contato permanentes, temporárias e transitórias.

O limiar de percepção de corrente está em torno de 1mA, valor com que se tem a sensação de formigamento. Este valor é conhecido como limiar de percepção. Entre 1mA e 6mA de corrente de choque, tem-se as chamadas correntes de choque secundário [14], sendo 6mA o valor limite para que uma pessoa não perca o controle muscular. De 6 a 14 mA, tem-se a faixa de tetanização para mulheres, com média de 10mA para a sua ocorrência [13]. Nos homens esta faixa está entre 9 e 23mA. Se a tetanização envolver os pulmões, ocorre parada respiratória.

Fibrilação cardíaca é o movimento desordenado do coração, de forma que o mesmo não consegue bombear o sangue para o corpo. Desta forma, a pressão arterial cai a zero e ocorre conjuntamente à parada respiratória. A corrente limite I_{choque} para que não ocorra fibrilação é dada pela equação:

$$I_{choque} = \frac{0,116}{\sqrt{t_{choque}}}(A) \quad (6.1)$$

Onde t_{choque} é o tempo de duração do choque elétrico em segundos e $0,03s \leq t_{choque} \leq 3s$.

6.2 Perfuração da Tubulação e de seu Revestimento

Tubulações enterradas são dotadas de revestimento para proteger da corrosão eletroquímica. Este revestimento pode ser a base de alcatrão de hulha (com baixa estabilidade térmica) ou de polietileno (alta estabilidade térmica), conforme mencionado no capítulo 3. Por ser a tubulação enterrada, o acoplamento capacitivo não precisa ser levado em conta. Durante um curto-circuito em uma LT nas vizinhanças de uma tubulação, os acoplamentos resistivo e indutivo podem submeter o revestimento da tubulação a grandes diferenças de potencial em relação ao solo remoto. Esta diferença de potencial pode causar um arco elétrico que perfure o revestimento e, ao liberar grande quantidade de calor, pode causar sérios danos, e, inclusive, perfurar a tubulação. Note-se que mesmo não ocorrendo perfuração da tubulação, o simples dano ao revestimento poderá causar problemas futuros (Daconti, 1986). Ensaios de curta duração realizados em tubulações de aço (espessura = 5mm) com revestimento a base de alcatrão de hulha (espessura = 4mm) mostram que:

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

Desta forma, como critério de proteção, devemos ter que o máximo de tensão que deve aparecer no revestimento da tubulação em regime de curto-circuito deve ser de 5kV.

6.3 Danificação das Juntas Isolantes

Conforme apresentado, o efeito dos acoplamentos capacitivo e indutivo são proporcionais ao comprimento da tubulação, em razão disto, existem projetos em que são colocadas juntas isolantes na tubulação a fim de seccioná-la eletricamente, obtendo-se, com isso, menores efeitos devido a estes acoplamentos. Costuma-se também seccionar a tubulação através de juntas isolantes quando se deseja provê-la de proteção catódica.

Assim, as juntas podem ser submetidas a diferenças de potencial em suas extremidades suficientes para danificá-las ou perfurá-las. Este fenômeno pode ocorrer durante um curto-circuito ou mesmo em regime permanente. As características de suportabilidade das juntas variam de acordo com as características de cada uma delas (fabricante, material utilizado, produto específico, etc.). Como meio de mitigação, podem ser usados, entre as juntas isolantes, descarregadores que têm suportabilidade dielétrica inferior a da junta, de forma que, quando a

tensão atinge um certo valor, ocorre a descarga através deles, permanecendo a junta intacta. Os descarregadores devem suportar a energia da descarga sem se danificar.

Como critérios de proteção temos:

- A suportabilidade dielétrica das juntas isolantes devem ser compatíveis com a máxima tensão a que possam ficar submetidas em regime de curto-circuito.
- As juntas isolantes devem ser providas de descarregadores que aliviem a tensão sobre elas.

6.4 Riscos ao Sistema de Proteção Catódica.

A corrosão de uma tubulação metálica ocorre devido ao aparecimento de áreas anódicas e catódicas na superfície do material metálico, criando-se, assim, um fluxo de corrente das áreas anódicas para as áreas catódicas. Como meio de proteção, pode-se colocar um metal imerso no solo, conectado por fios à tubulação e criar um fluxo de corrente que ceda elétrons à tubulação. Este tipo de proteção é conhecido como proteção catódica.

Por estar conectado eletricamente à tubulação, o sistema de proteção catódica está sujeito aos acoplamentos resistivo e indutivo, podendo estes causarem danos ao sistema de proteção, bem como a trabalhadores que nele operem.

Note-se que o valor da suportabilidade dielétrica da tubulação depende das suas características de fabricação (Eduardo, 1993), sendo assim, devem ser informados pelo fabricante, a fim de se adotar critérios de proteção.

Capítulo 7

EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

Como meio de validação do estudo neste capítulo resolve-se alguns dos casos presentes em [2] e [15], a resolução é feita através de programas e funções implementadas em MATLAB.

7.1 Exemplo 1 - Acoplamento Capacitivo

Resolve-se aqui o exemplo de cálculo do acoplamento capacitivo retirado de [cigre]a figura 7.1 mostra a seção transversal de uma linha de transmissão paralela a uma tubulação metálica são dados:

- Tensão de Operação da Linha: 400kV.
- Frequência da Rede: 50Hz.
- Distância horizontal média entre os condutores: 10m
- Altura média dos condutores: 15m.
- Diâmetro da tubulação:0,6m.
- Material da Tubulação: Aço com espessura de 4mm².
- Altura média acima do solo: 1m.
- A tubulação é paralela em todo o trecho de 4Km de extensão e dista 40m do eixo da LT.

Despreza-se os cabos para-raios presentes visto que o erro introduzido devido a esta aproximação é menor que dois por cento.

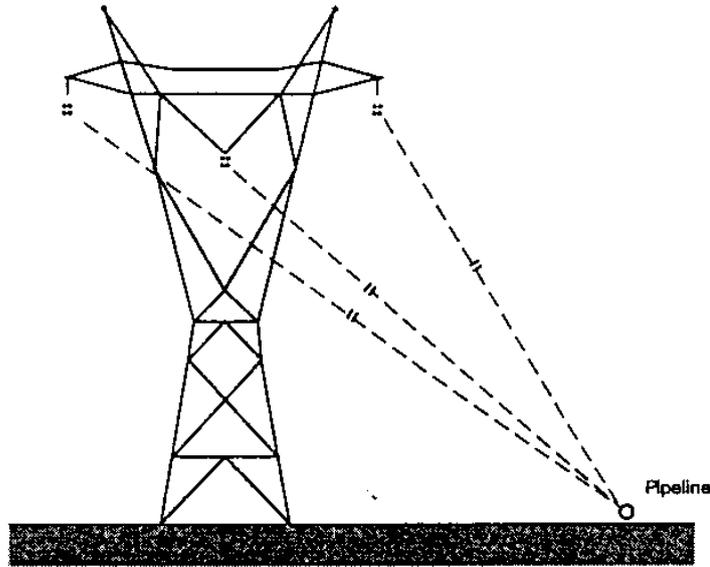


Figura 7.1: Geometria do Exemplo 1, Fonte[2]

Resolução:

Sem perda de generalidade e visto que a referência não informa a posição de cada fase, admite-se que as fases a, b e c estejam a direita, no centro e a esquerda na figura 7.1 respectivamente.

Utilizando a função desenvolvida matrizcap obtêm-se a matriz de capacitâncias C abaixo.

$$[C] = 1 \times 10^{-10} \begin{bmatrix} 0.0764 & -0.0111 & -0.0043 & -0.0010 \\ -0.0111 & 0.0778 & -0.0111 & -0.0005 \\ -0.0043 & -0.0111 & 0.0764 & -0.0003 \\ -0.0010 & -0.0005 & -0.0003 & 0.2931 \end{bmatrix} F/m \quad (7.1)$$

Esta matriz junto com o comprimento do trecho de exposição da tubulação serve de entrada para a função desenvolvida Acopla_Capac que calcula a corrente de curto-circuito na tubulação i_{sc} e a Tensão de Contato V_{oc} , assim obtêm-se:

$$I_{sc} = 0.0301mA$$

$$V_{oc} = 818.4V$$

Os valores obtidos em [2] foram:

$$I_{sc} = 0.0300mA$$

$$V_{oc} = 800V$$

Os erros relativos para a corrente de curto-circuito e para a tensão de contato são 0.3% e 2.2 % respectivamente.

7.2 Exemplo 2 - Acoplamento Indutivo

Aqui é analisado o acoplamento indutivo, serão simulados em MATLAB os casos apresentados em [15]. Que consiste em uma linha de transmissão de 345kV em paralelo com uma tubulação metálica, dados sobre a geometria da torre são mostrados na figura 7.2 retirada de [15].

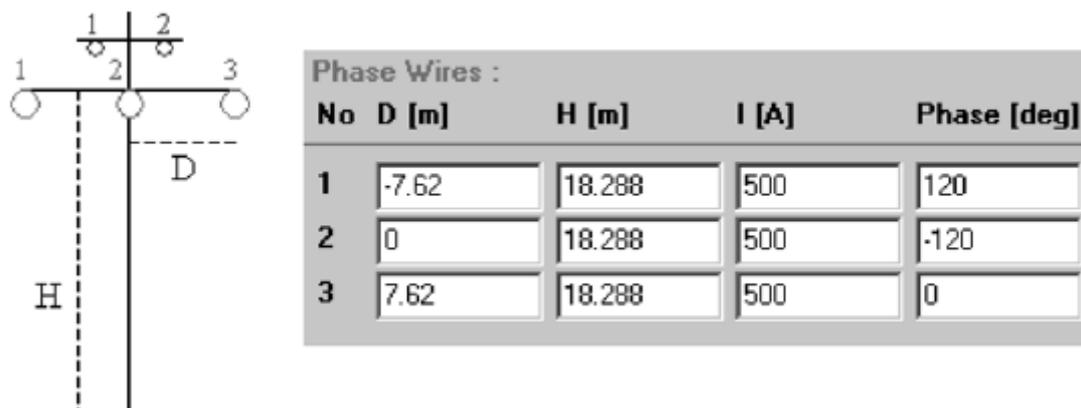


Figura 7.2: Geometria da Torre.

Dados sobre a tubulação:

- Diâmetro: 0.5m
- Profundidade Média: 5m.
- Comprimento do trecho de Exposição: 10Km.
- Distância ao Eixo da LT: 25m.
- Resistividade do Aço: $1.7 \times 10^{-7} \Omega \cdot m$
- Resistividade do Revestimento: $2.5 \times 10^6 \Omega \cdot m$
- Espessura do Revestimento: 4mm.
- Permissividade Relativa do Revestimento: 3.

O solo tem uma resistividade $\rho = 100 \Omega \cdot m$ e o efeito dos cabos para-raios será desprezado por se tratar de uma situação de regime permanente.

Resolução:

Por conformidade com a referência citada, usamos o método aproximado para o cálculo de parâmetros da tubulação, usando a função Tubaprox obtêm-se:



Figura 7.3: Geometria do Caso 1 Fonte:[2]

$$\begin{aligned}
 Z &= 0.1132 + 0.5805j \, \Omega \\
 Y &= 1.5708 \times 10^{-4} + 5.4597 \times 10^{-6}j \\
 Z_c &= 1.5184 + 1.2072j \\
 \gamma &= 0.2319 + 0.1979j \, Km^{-1}
 \end{aligned}$$

A tensão induzida por unidade de comprimento foi calculada utilizando-se a rotina desenvolvida "TenIND" apresentada no anexo dois, a tensão induzida por unidade de comprimento calculada para os três casos foi a mesma, visto que temos a mesma distância para a linha, obteve-se então o valor:

$$E = 8.7489V/Km \tag{7.2}$$

7.2.1 Primeiro Caso - A Tubulação se Estende por alguns Kilometros após o Trecho Paralelo sem Aterramento

A figura 7.3 mostra a geometria do caso a ser estudado, a solução para este caso é dada por:

$$V(x) = \frac{E}{2\gamma} (e^{-\gamma(L-x)} - e^{-\gamma x}) \tag{7.3}$$

$$I(x) = \frac{E}{2z} (2 - e^{-\gamma(L-x)} - e^{-\gamma x}) \tag{7.4}$$

Que com os dados indicados obtêm-se o perfil de Tensão mostrado na figura 7.4:

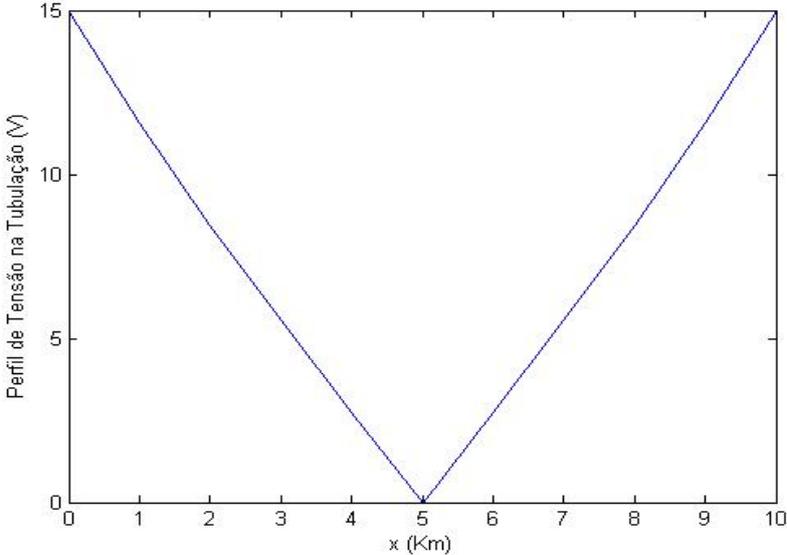


Figura 7.4: Perfil de Tensão ao longo da Tubulação - Caso 1.

O perfil de corrente é mostrado na figura 7.5.

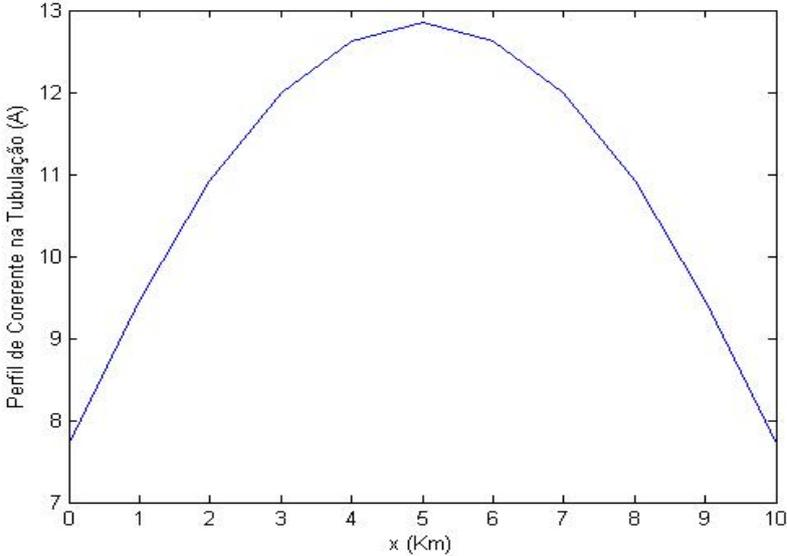


Figura 7.5: Perfil de Corrente ao longo da Tubulação - Caso 1.

A figura 7.6 mostra uma tabela com os valores simulados e com os valores obtidos por [15].

Posição (Km)	V(x)	V(x) (Bortels)	Erro Relativo Percentual	I(x)	I(x) (Bortels)	Erro Relativo Percentual
0	14,9638	14,6694	2,0069	7,7138	7,6826	0,4061
1	11,5378	11,4663	0,6236	9,4580	9,4269	0,3299
2	8,4438	8,3743	0,8299	10,9211	10,8822	0,3575
3	5,5451	5,4911	0,9834	11,9877	11,9397	0,4020
4	2,7505	2,7212	1,0767	12,6302	12,5758	0,4326
5	0,0000	0	0,0000	12,8444	12,7876	0,4442
6	2,7505	2,7212	1,0767	12,6302	12,5758	0,4326
7	5,5451	5,4911	0,9834	11,9877	11,9397	0,4020
8	8,4438	8,4438	0,0000	10,9211	10,8822	0,3575
9	11,5378	11,4663	0,6236	9,4580	9,4269	0,3299
10	14,9638	14,6694	2,0069	7,7138	7,6826	0,4061

Figura 7.6: Valores Simulados e obtidos de [15]

7.2.2 Segundo Caso - A tubulação se estende após uma seção e termina em outra sem aterramento

A figura 7.7 mostra a geometria do segundo, onde a tubulação se estende na extremidade A do trecho paralelo e termina em outra não-aterrada (extremidade B), o perfil de tensão é dado por:

$$V(x) = \frac{E}{2\gamma} [e^{\gamma x} (2e^{-\gamma L} - e^{-2\gamma L}) - e^{-\gamma x}] \quad (7.5)$$

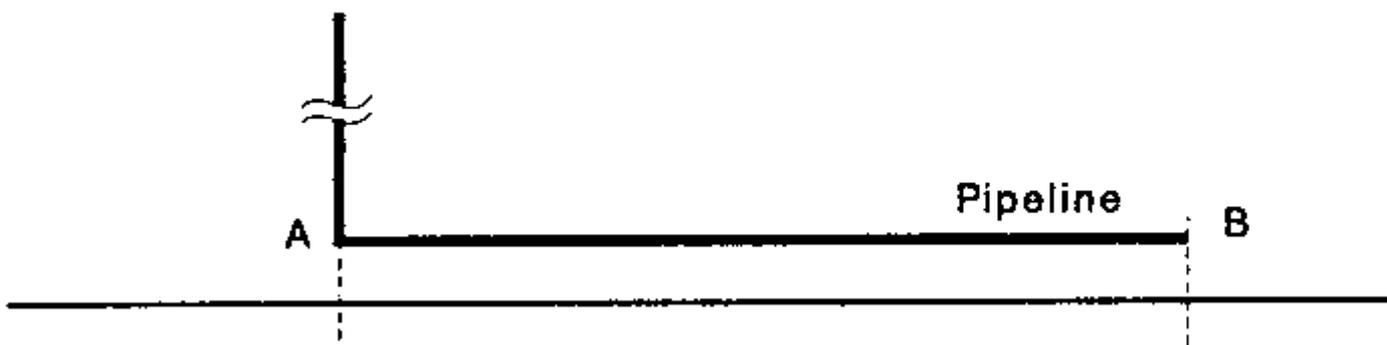


Figura 7.7: Geometria do segundo caso Fonte:[2]

A figura 7.8 mostra o perfil de tensão para o caso em estudo, ao passo que a figura 7.9 mostra uma comparação entre os valores simulados e os da referência [15].

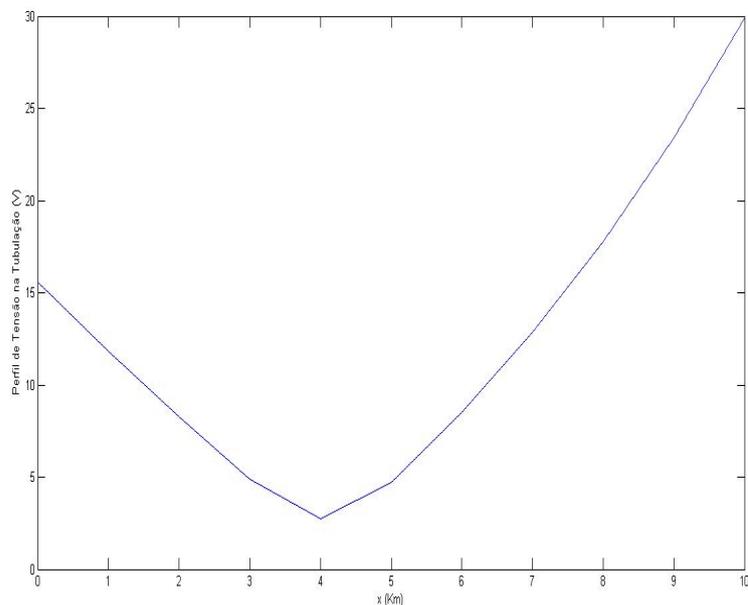


Figura 7.8: Perfil de tensão para o segundo caso

Posição (Km)	V(x)	V(x) (Bortels)	Erro Relativo Percentual
0	15,6068	15,5022	0,67474294
1	11,8330	11,7168	0,991738359
2	8,2532	8,1443	1,337131491
3	4,8922	4,8016	1,886871043
4	2,7648	2,6909	2,746293062
5	4,6927	4,6279	1,400203116
6	8,4897	8,3975	1,097945817
7	12,8785	12,7574	0,949252983
8	17,7953	17,655	0,794675729
9	23,3906	23,2502	0,603865773
10	29,9276	29,8138	0,381702433

Figura 7.9: Comparação dos Valores Simulados com os Obtidos de [15]

7.2.3 Terceiro Caso - A tubulação se estende após uma seção e termina em outra sem aterramento

A figura 7.10 mostra a geometria do terceiro caso, onde a tubulação é aterrada na extremidade A e segue a partir do trecho não paralelo (extremidade B).



Figura 7.10: Geometria do terceiro caso Fonte:[15]

Os perfis de tensão e corrente na tubulação são dados por[15]:

$$V(x) = \frac{E}{2\gamma} (e^{\gamma(L-x)} - e^{-\gamma(L-x)}) e^{-\gamma L} \quad (7.6)$$

$$I(x) = \frac{E}{2z} [2 - (e^{\gamma(L-x)} + e^{-\gamma(L-x)}) e^{-\gamma L}] \quad (7.7)$$

Os perfis de tensão e corrente são mostrados nas figuras 7.11 e 7.12 como a tubulação está aterrada o potencial sai de zero no ponto A e cresce exponencialmente até o ponto B.

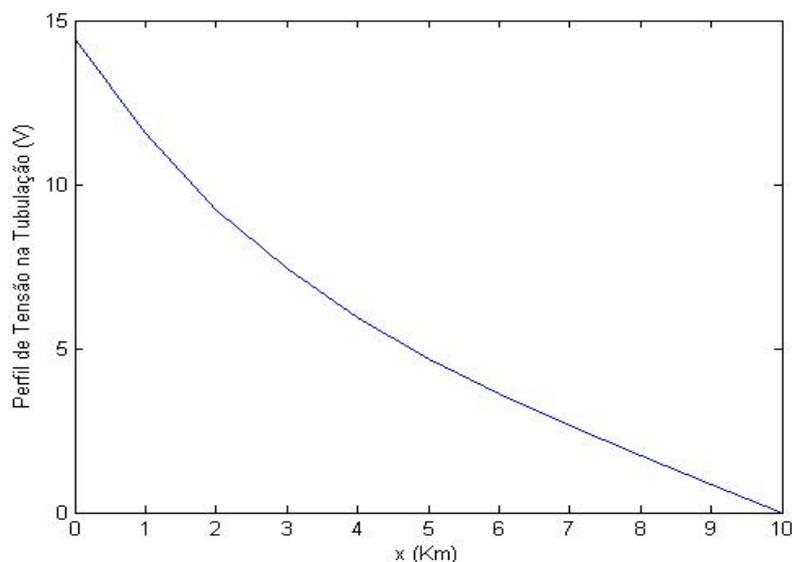


Figura 7.11: Perfil de Tensão na tubulação para o terceiro caso

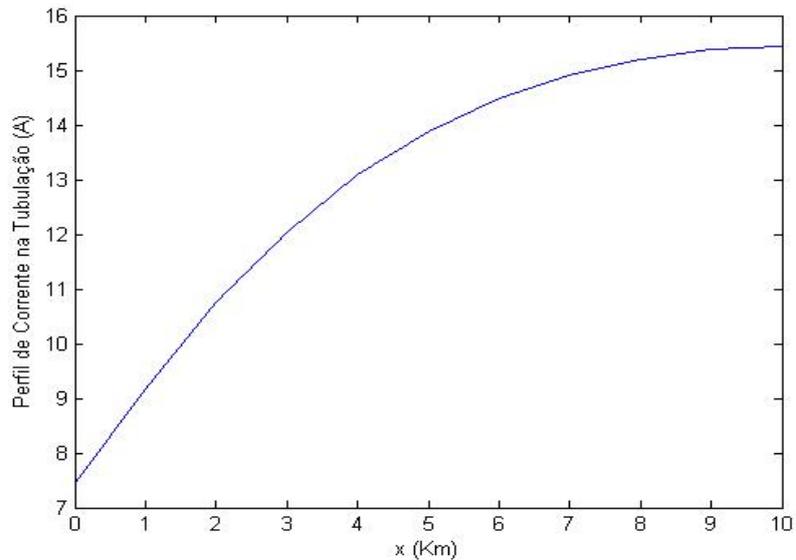


Figura 7.12: Perfil de corrente na tubulação para o terceiro caso

Já a figura 7.13 mostra uma comparação entre os valores simulados e os valores de [15] o maior

Posição (Km)	V(x)	V(x) (Bortels)	Erro Relativo Percentual	I(x)	I(x) (Bortels)	Erro Relativo Percentual
0	14,4426	14,4306	0,083156626	7,4452	7,4371	0,108913421
1	11,5374	11,5014	0,313005373	9,1812	9,1774	0,041406063
2	9,2430	9,1912	0,563582557	10,7474	10,7379	0,088471675
3	7,4149	7,3536	0,833605309	12,0475	12,0285	0,157958183
4	5,9316	5,8666	1,107967136	13,0836	13,0543	0,224447117
5	4,6927	4,6286	1,384867995	13,8849	13,846	0,280947566
6	3,6183	3,5101	3,082533261	14,4859	14,4386	0,327594088
7	2,6480	2,6001	1,842236837	14,9181	14,8642	0,362616219
8	1,7390	1,7049	2,000117309	15,2077	15,1489	0,388146994
9	0,8626	0,8449	2,094922476	15,3736	15,312	0,402298851
10	0,0000	0	0	15,4277	15,36	0,440755208

Figura 7.13: Comparação entre os valores simulados e obtidos de [15]

Para os três casos simulados vê-se uma boa concordância entre os valores simulados e os de [15], confirmando assim a acurácia do método desenvolvido, vê-se ainda que existe um crescimento exponencial da tensão ao longo da tubulação, este crescimento deve ser limitado para não colocar em risco a segurança das pessoas, uma possível solução seria aterrar a tubulação em pontos estratégicos.

Capítulo 8

CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho consistiu em desenvolver rotinas computacionais que auxiliassem no cálculo do perfil de tensão ao longo da tubulação, a fim de evitar danos a pessoas, equipamentos e também da própria tubulação. Os resultados de simulação mostraram boa concordância com as referências [2] e [15] de forma a validar o estudo.

O estudo das interferências eletromagnéticas em tubulações é vasto e este trabalho de forma alguma conseguiria cobrir todo o tema, sendo assim, existem várias sugestões para trabalhos futuros, como por exemplo, abordagem a base de elementos finitos, estudo do efeito do solo não-homogêneo nos acoplamentos, estudo quantitativo dos meios mitigação, simulações no programa ATP/EMTP dentre outras.

Por fim o autor gostaria de agradecer novamente a todos que de alguma forma contribuíram para este trabalho.

Anexo A

PARÂMETROS TÍPICOS DE TUBULAÇÕES

Este Anexo visa fornecer parâmetros de tubulações que podem ser usados caso não se disponha de dados reais, têm-se então:

- A espessura do aço da tubulação pode variar de 5 a 15 mm a depender do diâmetro da tubulação, este pode variar de 250 a 1500mm.
- A resistividade do aço da tubulação pode variar de 0,15 a $0,2 \times 10^{-6} \Omega \cdot m$, neste trabalho adota-se $0,17 \times 10^{-6} \Omega \cdot m$
- A permeabilidade magnética do aço da tubulação varia de 200 a $300\mu_0$ sendo $300\mu_0$ o valor adotado neste trabalho.
- Os revestimentos costumam ter espessura variando de 3 a 7mm, podendo ser betuminosos ou plásticos.
- Tanto para os revestimentos betuminosos quanto para os revestimentos plásticos pode-se adotar uma permissividade elétrica de $5\epsilon_0$.
- A resistividade do revestimento podem variar de $2,5 \times 10^6$ a $2,5 \times 10^7 \Omega \cdot m$.
- Pode-se adotar para a permissividade do solo um valor de $3\epsilon_0$

Anexo B

ROTINAS DESENVOLVIDAS EM MATLAB

Este Capítulo apresenta as rotinas desenvolvidas para auxiliar o cálculo dos efeitos resultantes da interferência eletromagnética em tubulações.

Conforme comentado no código da própria função "Acopla_Capac" mostrado nas figuras B.1 e B.2 a função calcula a Tensão de contato e a Corrente de curto-circuito na tubulação, para um trecho paralelo a LT.

```
%% Tensão de Toque e Corrente de Curto-circuito %%
|
%Esta função recebe como entrada a matriz de capacitâncias de um sistema
%com n-1 condutores e uma tubulação metálica, um vetor V com as tensões de
%fase, a frequência f do sistema, e o comprimento do trecho paralelo.
%Como saída são calculadas a tensão de contato V_oc e a corrente de
%curto-circuito na tubulação I_sc

function [V_oc I_sc] = Acopla_Capac(Cap,V,f,L)

%Constantes do Programa

w=2*pi*f;
j=sqrt(-1);

%Toma-se a ordem da matriz para saber qual linha deve-se usar para

n=length(Cap);
%Inicia-se o valor das Tensões de passo e Corrente de Curto-Circuito como
%sendo zero, durante o laço for este valor será modificado
V_oc=0;
I_sc=0;

%A expressão para a impedância de Thévenin é dado pela equação 5.17

Zth=1/(j*w*Cap(n,n));
```

Figura B.1: Primeira parte do código da Função "Acopla_Capac"

```

%Este laço "for" calcula a corrente de curto-circuito na tubulação
%que é dada pela soma na equação 5.20, onde em cada passo é adicionado
%um termo da equação.

for i=1:(n-1)
    I_sc=I_sc+j*w*Cap(n,i)*V(i,1)*L;
end

%De posse da corrente de curto-circuito calcula-se a tensão de contato na
%tubulação pela equação 5.19

V_oc=Zth*I_sc/L;

%Como a fase é pouco importante, retorna-se o módulo da tensão de contato
%e corrente de curto-circuito.

I_sc=abs(I_sc);
V_oc=abs(V_oc);

```

Figura B.2: Segunda parte do código da Função "Acopla_Capac"

Conforme Comentado no código da própria função apresentado na figura abaixo, a função "imp_mutua" calcula a impedância mútua entre dois condutores este código é mostrado na figura B.3.

As figuras B.4 e B.5 mostram o código da função "Tubaprox" que calcula, usando o método aproximado da seção 4.5 os parâmetros da tubulação.

O código da função "TEN_IND" é mostrado nas figuras B.6 e B.7, esta função calcula o campo elétrico induzido por metro na tubulação, ela faz uso da função "imp_mutua" apresentada anteriormente, as informações sobre as entradas necessárias são mostradas no código da função.

```

%Este função calcula a impedância mútua entre
%circuitos com retorno pela terra e condutores
%com retorno pela terra.

function [Zm]=impmutua(f,p,d)

%Parametros necessários
% f= frequência do sistema
% p= resistividade do solo
% met= método de cálculo
%d=distância entre os condutores

j=sqrt(-1);
u0=4*pi*10^-7; %permeabilidade magnética do vácuo
w=2*pi*f;

% Variável auxiliar
alfa=sqrt(w*u0/p);

%Existem diferentes expressões para o cálculo da impedância mútua

%Vamos começar com a expressão de Carson-Clem
%Esta expressão é válida apenas para distâncias tais que:
% d<90*sqrt(p/f) usa-se a equação 5.2 do texto

    Zm=u0*w/8+j*u0*f*log(1.85/(alfa*d));

end

```

Figura B.3: Código da função "imp_mutua"

```
%Esta função calcula os parâmetros impedância linear Z, Admitância  
%paralela Y, constante de propagação y, e impedância característica Zc.
```

```
%Parâmetros de Entrada (SI)
```

```
%f - frequência elétrica do sistema  
%D - Diâmetro Médio da tubulação  
%pc - Resistividade elétrica do revestimento da tubulação  
%dc - Espessura do revestimento da tubulação  
%p - resistividade do solo  
%ur- permeabilidade magnética do aço da tubulação  
%pp - resistividade elétrica do aço da tubulação.  
%ec - permissividade elétrica do revestimento da tubulação.
```

```
function [Z Y y Zc] = Tubaprox(f,D,pc,dc,p,ur,pp,ec)
```

```
e0=8.851*10^-12;  
u0=4*pi*10^-7;  
w=2*pi*f;  
j=sqrt(-1);  
ec=ec*e0;
```

```
%Expressão aproximada para a impedância interna do condutor despreza-se a  
%resistividade da tubulação na equação 4.5
```

```
Zint=sqrt(pp*ur*u0*w)/(pi*D*sqrt(2))*(1+j);
```

```
%Calcula-se então a expressão para aproximada para tubulações aéreas  
%usando-se a equação 4.2
```

```
Z=Zint+w*u0/8+j*w*u0/(2*pi)*log(3.7*sqrt(p/(w*u0))/D);
```

Figura B.4: Primeira parte do código da função Tubaprox

```
%Calcula-se a admitancia paralela usando-se a expressão 4.8
```

```
Y=(pi*D/(pc*dc))+j*w*((ec*pi*D)/dc);
```

```
% A constante de propagação é calculada usando-se a expressão 4.12
```

```
y=sqrt(Z*Y);
```

```
%E a impedância característica é dada pela equação 4.15
```

```
Zc=sqrt(Z/Y);
```

```
end
```

Figura B.5: Segunda parte do código da função Tubaprox

%Esta função calcula o campo elétrico induzido numa tubulação
 %recebe como parâmetros de entrada:
 %Matriz com as distâncias horizontais entre os condutores, sendo que as
 %distancias da tubulação até os condutores deve ser colocada na última
 %linha.
 %vetor linha h com as alturas dos condutores, sendo que a altura da
 %tubulação deve ser colocada na última coluna do vetor.
 %f é a frequência do sistema
 %I é um vetor coluna com as correntes nos condutores sendo que a última
 %entrada corresponde a corrente na tubulação deve ser ajustada para zero
 %p é a resistividade do solo.

```

function E = TenIND(Xij,h,f,I,p)
%Dados iniciais

% Através deste comando determina-se o número de condutores da matriz

Ncondutores=length(Xij);

%Cria-se então a matriz que será usada para armazenar as distâncias entre
%os condutores note-se que esta matriz deverá ter a mesma ordem da matriz
%de distâncias horizontais

Dists=zeros(Ncondutores);

%Analogamente cria-se a matriz de impedâncias mútuas inicialmente com o
%valor zero, esta matriz é a matriz de impedâncias mútuas na equação 5.8

Imp=zeros(Ncondutores);
  
```

Figura B.6: Primeira parte do código da função Tensão Induzida

```

%Este laço calcula a distância entre cada par de condutores e armazena na
%matriz Dists definida anteriormente.
for k=1:Ncondutores
  for l=1:Ncondutores;

    Dists(k,l)=sqrt(Xij(k,l)^2+(h(k)-h(l))^2); %note-se que quando k=l
                                                %a distância vale o RMG

    if (k==l)
      Dists(k,k)=0;
    end
  end

  %De posse da matriz de distâncias calcula-se a matriz de de impedâncias mútuas usando-se este laço
  for k=1:Ncondutores
    for l=1:Ncondutores
      Imp(k,l)=impmutua(f,p,Dists(k,l),1); %função que calcula a impedância mútua entre dois condutores.
      if (k==l)
        Imp(k,k)=0;
      end
    end
  end

  %Por fim calcula-se a tensão induzida através da equação 5.8

  E=Imp*I;
  E=E(length(Xij),1);
end
  
```

Figura B.7: Segunda parte do código da função Tensão Induzida

Referências Bibliográficas

- [1] Correia, D.M.. Interferência de Linhas Transmissão sobre Tubulações por Acoplamentos Indutivo e Condutivo. Recife, 1993,313p.(Mestrado - Universidade Federal de Pernambuco)
- [2] CIGRÉ, Guide on the Influence of High Voltage AC Power Systems on Metallic Pipelines. Paris:CIGRÉ,1995
- [3] Grupo investirá R\$ 350 mi em gasodutos em PE. 28/01/2014. Disponível em: <<http://www.copergas.com.br/index.php/2014/01/grupo-investirar-350-mi-em-gasodutos-em-pe/>> Acesso em 24/03/2014 às 11:14 h.
- [4] Copergás amplia malha de gás natural canalizado em residências. 24/01/2014. Disponível em: <<http://www.copergas.com.br/index.php/2014/01/copergas-amplia-malha-de-gas-natural-canalizado-em-residencias/>> Acesso em 24/03/2014 às 11:14 h.
- [5] Micu, D.D et al. Interfstud eletromagnetic interference software: an Acurate Evaluation of Current Distribution in soil and underground pipelines. IEEE Conferece Publications, 2012.
- [6] Daconti, J.R.,Estudo das Interferências causadas por Linhas de Transmissão de Energia Elétrica em Corrente Alternada sobre Tubulações Metálicas Próximas. Itajubá, 1986. 335p.(Mestrado - Escola Federal de Enegenharia de Itajubá)
- [7] Zanetta, L.C.. Fundamentos de Sistemas Elétricos de Potência. Primeira Edição. São Paulo, José Roberto Marinho, Livraria da Física, 2006.
- [8] Dabkowski, J. & Taflove, A. Mutual Design Considerations for Overhead Transmission Lines and Gas Pipelines. EPRI, 1978. Volume 1.
- [9] Olsen, R. G. & Jaffa, K.C. Electromagnetic Coupling from Power Lines and Magnetic Field Safety Analysis. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol. PAS-103, No. 12, 1984.
- [10] Sunde, E.D. Earth Conduction Effects in Transmission Systems, Dover Publications Inc., Nova Iorque, 1949

- [11] Nagar, H.P. et al. Review of Analytical Methods for Calculating the Performance of Large Grounding Electrodes Part I: Theoretical Considerations. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, No. 11, 1985
- [12] Dalziel, C.F. Effects of Electric Shock on Man, IRE Transactions on Medical Electronics, Volume PGME-5, 1956
- [13] Godoy, M. V. Aterramento - Notas de Aula. Recife, 2014
- [14] Eduardo, J.V. Interferências de Linhas de Transmissão de Corrente Alternada em Tubulações Metálicas. Campina Grande, 1993. 151p. (Mes)
- [15] Bortels, L. et Al.. A General Applicable Model for AC Predictive and Mitigation Techniques for Pipeline Networks Influenced by HV Power Lines. IEEE Transactions on Power Delivery, vol 21: 210-217 Janeiro 2006