



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

EBENEZAIDE DOS SANTOS ALVES

**ANÁLISE DE IMPACTOS ELETROMAGNÉTICOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO
SOBRE TUBULAÇÕES METÁLICAS**

Recife
2019

EBENEZAIDE DOS SANTOS ALVES

**ANÁLISE DE IMPACTOS ELETROMAGNÉTICOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO
SOBRE TUBULAÇÕES METÁLICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito da disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso (EL403).

Orientador: Prof. Dr. José Maurício de Barros Bezerra

Recife

2019

Catálogo na fonte
Bibliotecário Josias Machado , CRB-4 / 1690

A474a Alves, Ebenezaide dos Santos.
Análise dos impactos eletromagnéticos de linhas de transmissão sobre tubulações metálicas / Ebenezaide dos Santos Alvez. – Recife, 2019.
53 folhas, il., figs., tabs.

Orientador: José Maurício de Barros Bezerra.

TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Departamento de Graduação em Engenharia Elétrica, 2019.
Inclui Referências.

1. Engenharia elétrica. 2. Compartilhamento de sistemas. 3. Linhas de transmissão. 4. Tubulação metálica. 5. Acoplamento eletromagnético. I. Bezerra, José Maurício de (orientador). II. Título.

UFPE

621.3 CDD (22. ed.)

BCTG/2019-243

EBENEZAIDE DOS SANTOS ALVES

**ANÁLISE DE IMPACTOS ELETROMAGNÉTICOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO
SOBRE TUBULAÇÕES METÁLICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito da disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso (EL403)

Aprovada em: ____/____/____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José Mauricio de Barros Bezerra (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Zanoni Dueire Lins
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Augusto César Cavalcanti de Oliveira
Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pois sem Ele nada seria possível, por mais um ciclo de formação que se encerra e pelos demais que estão por vir.

Aos meus pais, Antônio e Telma, por todo apoio e dedicação, que são exemplos que moldam meu caráter como pessoa e conseqüentemente como profissional.

Aos amigos que fiz durante a trajetória da graduação na UFPE, em especial aos amigos do DEE, pelo companheirismo e auxílio nos momentos de tensão.

Aos amigos do GPTD, pelo convívio, troca de experiências e auxílio nos projetos de pesquisa e nos da vida.

Aos professores e técnicos do DEE, pelo aprendizado obtido ao longo da minha formação profissional. Em especial ao professor José Mauricio, meu orientador nesse trabalho e também quando fui monitora do LAT.

“Tudo tem o seu tempo determinado, e há tempo para todo propósito debaixo do céu.” (BÍBLIA, Ec 3:1)

RESUMO

O compartilhamento da faixa de passagem de Linhas de Transmissão com sistemas de transporte via tubulações metálicas, como gasodutos, adutoras e oleodutos, é usual, porém trata-se de um projeto que requer estudos especializados. Visto que a coexistência desses sistemas incorpora acoplamentos eletromagnéticos, os quais transferem para as tubulações potenciais que podem causar acidentes com pessoas próximas a região ou operadores da rede do sistema dutoviário.

O estudo apropriado na fase de projeto é primordial para a coexistência dos dois sistemas, com o foco nas tensões induzidas que podem surgir na tubulação metálica aérea. Serão realizadas análises a fim de visualizar o comportamento da tensão induzida na tubulação para diferentes casos de configuração da linha de transmissão aérea. Assim o estudo desses efeitos sobre tubulações metálicas é de extrema importância com o propósito de implementar medidas de mitigação e/ou eliminação, a fim de assegurar a segurança de pessoas contra choques elétricos.

Palavras-chave: Compartilhamento de sistemas. Linhas de transmissão. Tubulação metálica. Acoplamento eletromagnético.

ABSTRACT

It is usual to share the right of way of overhead transmission lines with transport systems by metallic pipelines (gas, petroleum derivatives, water, industrial products, etc), although this project requires specialized studies. Knowing the coexistence between these systems incorporates eletromagnetic coupling, which it generates voltage on pipelines that can make dangeours consequences on people, animals and systems, like people near the region or network operators of the pipeline system.

The correct study about this situation on the project step is essencial for the coexistence of these two systems, what it includes the induced voltages that it can surge on the above ground metallic pipeline. It going to realize analyses with the object to visualize the induced voltage profile by the mettalic pipeline for different cases of overhead lines transmission configurations. Aiming mitigation and elimination techniques, the study effects is extremely important, in order to ensure the safety of people against electric shock.

Keywords: Sharing systems. Overhead transmission lines. Metallic pipelines. Eletromagnetic coupling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Mapa transmissão de energia elétrica no Brasil.	15
Figura 2 -	Mapa dutoviário Brasil.....	16
Figura 3 -	LT e tubulação próximas.....	17
Figura 4 -	Situação de cruzamento entre LT's 230kV e gasoduto.	17
Figura 5 -	Situação de cruzamento entre LT's 230kV, 500kV e gasoduto.	18
Figura 6 -	Situação de paralelismo entre LT 230kV e gasoduto.	18
Figura 7 -	Situação de equivalência entre LT 230kV e gasoduto.....	19
Figura 8 -	Torre de LT estaiada (a) e autoportante (b).	22
Figura 9 -	Configurações da geometria de LT. (a) Vertical. (b) Triangular. (c) Horizontal.....	23
Figura 10 -	Acoplamento indutivo entre LT e tubulação metálica. Visualização em duas dimensões.....	27
Figura 11 -	Acoplamento indutivo entre LT e tubulação metálica. Visualização em três dimensões.....	28
Figura 12 -	Acoplamento capacitivo entre LT e tubulação metálica. Visualização em duas dimensões.....	29
Figura 13 -	Acoplamento capacitivo entre LT e tubulação metálica. Visualização em três dimensões.....	30
Figura 14 -	Acoplamento capacitivo entre LT e tubulação aérea e blindagem eletrostática da tubulação subterrânea.....	30
Figura 15 -	Acoplamento condutivo entre LT e tubulação metálica. Visualização em duas dimensões.....	31
Figura 16 -	Acoplamento condutivo entre LT e tubulação metálica. Visualização em três dimensões.....	32
Figura 17 -	Ilustração do acoplamento indutivo entre linha de transmissão e tubulação aérea.	33
Figura 18 -	LT trifásica com dois cabos guarda paralela a tubulação metálica aérea. Ilustração numa vista frontal.	34
Figura 19 -	Configurações de geometria de LT. (a) Horizontal. (b) Vertical. (c) Delta.	40

Figura 20 -	Gráfico da tensão induzida na tubulação em função variação da posição da tubulação. Situação da LT com dois cabos guarda. LT na disposição horizontal.....	41
Figura 21 -	Gráfico da tensão induzida na tubulação em função variação da posição da tubulação. Situação da LT com um cabo guarda. LT na disposição horizontal.....	42
Figura 22 -	Gráfico da tensão induzida na tubulação em função variação da posição da tubulação. Situação da LT sem cabo guarda. LT na disposição horizontal.....	43
Figura 23 -	Gráfico da tensão induzida na tubulação em função variação da posição da tubulação. Comparativo das situações da LT com dois cabos guarda, LT com um cabo guarda e LT sem cabo guarda. LT na disposição horizontal.....	44
Figura 24 -	Gráfico da tensão induzida na tubulação em função variação da posição da tubulação. Situação da LT na configuração horizontal. LT sem cabo guarda.	45
Figura 25 -	Gráfico da tensão induzida na tubulação em função variação da posição da tubulação. Situação da LT na configuração vertical. LT sem cabo guarda.	46
Figura 26 -	Gráfico da tensão induzida na tubulação em função variação da posição da tubulação. Situação da LT na configuração delta. LT sem cabo guarda.	47
Figura 27 -	Gráfico da tensão induzida na tubulação em função variação da posição da tubulação. Comparativo das configurações de LT: horizontal, vertical e delta.....	48
Figura 28 -	Comparação da aplicabilidade entre o método de Carson e a lei de Faraday.....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Categorias de tensões. Padronização IEC.....	21
Tabela 2 - Classes de tensões. Padronização ABNT.....	21
Tabela 3 - Extensão rede de transmissão no Brasil.	22

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANTT	Agência Nacional de Transportes Terrestres
AT	Alta Tensão
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CEPA	<i>Canadian Energy Pipeline Association</i>
CIGRÉ	<i>Conseil International des Grands Réseaux Électriques</i>
DEE	Departamento de Engenharia Elétrica
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EPL	Empresa de Planejamento e Logística
FEM	Força Eletromotriz
GPTD	Grupo de Pesquisa de Transmissão e Distribuição de Energia
Elétrica	
IEC	<i>Internacional Electrochnical Comission</i>
LAT	Laboratório de Alta Tensão
LT	Linha de Transmissão
MATLAB	<i>MATrix LABoratory</i>
NBR	Norma Brasileira
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
ONTL	Observatório Nacional de Transporte e Logística
PETROBRAS	Petróleo Brasileiro S.A.
SIN	Sistema Interligado Nacional
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
UHE	Usina Hidrelétrica

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	CONTEXTO	14
1.2	OBJETIVO	19
1.3	ORGANIZAÇÃO TEXTUAL.....	20
2	SISTEMAS SOB ESTUDO	21
2.1	LINHAS DE TRANSMISSÃO	21
2.1.1	Classe de tensão	21
2.1.2	Torre de transmissão	22
2.1.3	Componentes da LT	23
2.2	TUBULAÇÕES METÁLICAS	23
2.2.1	Operação	23
2.2.2	Vantagens	24
2.2.3	Materiais utilizados	25
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	26
3.1	PRINCÍPIOS DO ELETROMAGNETISMO	26
3.2	ACOPLAMENTO INDUTIVO.....	27
3.3	ACOPLAMENTO CAPACITIVO	28
3.4	ACOPLAMENTO CONDUTIVO.....	31
4	TENSÃO INDUZIDA DEVIDO AO ACOPLAMENTO INDUTIVO	33
4.1	METODOLOGIA	33
4.2	CRITÉRIOS.....	38
4.3	ESTUDO DE CASO	39
4.3.1	Análise 1	39
4.3.2	Análise 2	39
4.4	RESULTADOS	40
4.4.1	Análise 1	41

4.4.2	Análise 2	44
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	50
5.1	TRABALHOS FUTUROS	51
	REFERÊNCIAS	52

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO

A energia elétrica é um bem essencial à sociedade atual, estando atrelada ao desenvolvimento tecnológico e industrial de uma nação. O chamado Sistema Elétrico de Potência é formado basicamente pelos subsistemas de geração, transmissão e distribuição. Segundo definição do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), o sistema de produção e transmissão de energia elétrica do Brasil é um sistema hidro-termo-eólico de grande porte, com predominância de Usinas Hidrelétricas (UHE's) e com múltiplos proprietários (ONS, 2019a). As UHE's são predominantes devido ao grande potencial hídrico, sendo as maiores usinas localizadas longe dos grandes centros consumidores.

A transmissão é a conexão fundamental entre a geração e o consumo final de energia elétrica, sendo constituída basicamente pelas Linhas de Transmissão (LT's). No Brasil, a extensão das LT's de rede básica (tensão nominal maior ou igual a 230 kV) equivalente a cerca de 3,5 voltas ao redor do planeta Terra (ONS, 2019b), diante das dimensões continentais do território brasileiro, conforme apresentado no mapa da figura 1. A malha de transmissão é um componente essencial do SIN (Sistema Interligado Nacional), permitindo a interconexão dos sistemas, assim integrando os recursos de geração a fim de atender ao mercado com segurança e de forma econômica.

Figura 1 - Mapa transmissão de energia elétrica no Brasil.



Linhas de Transmissão - Existente	
—	230
—	345
—	440
—	500
—	525
—	600
—	765
—	800

Fonte: EPE, 2019.

A distância entre matéria-prima e consumo também é um inconveniente enfrentado no transporte de produtos na forma no gás ou líquido, como água potável, gás natural, derivados de petróleo etc. Cujo transporte ocorre através de tubulações, a chamada malha dutoviária, como apresentado no mapa da figura 2.

Segundo o Observatório Nacional de Transporte e Logística (ONTL) da Empresa de Planejamento e Logística (EPL), a extensão total da malha dutoviária é de cerca de 21 mil km, mais da metade da extensão (54,7%) é utilizada para movimentação de gás; 37,5% para combustíveis e 7,9% para minérios (EPL, 2019a).

Sendo a malha dutoviária composta por tubulações metálicas, devido principalmente às suas propriedades mecânicas.

Figura 2 - Mapa dutoviário Brasil.



Fonte: EPL, 2019b.

O compartilhamento desses dois tipos de transportes no território nacional é algo comum, visto que ambos buscam o desvio de grandes centros urbanos. Como no exemplo apresentado na figura 3.

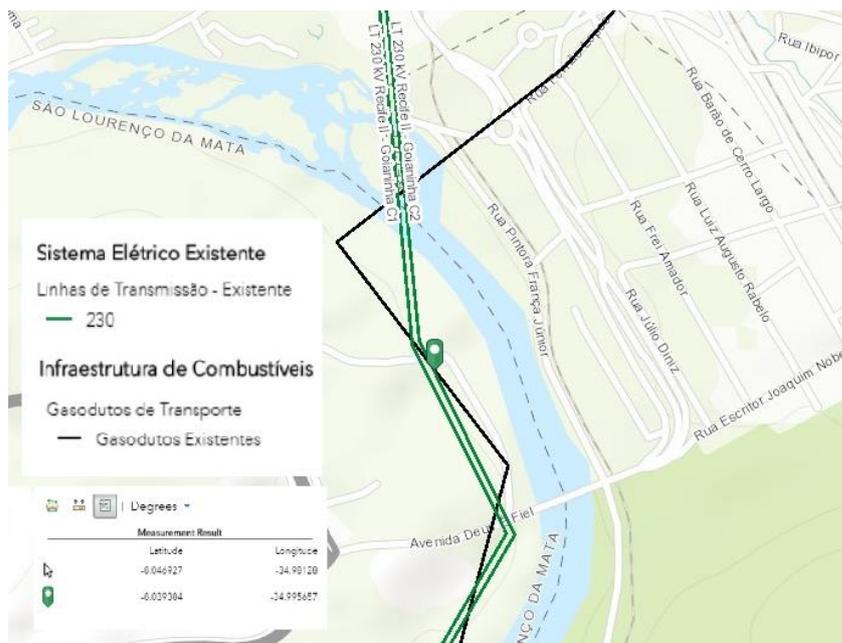
Figura 3 - LT e tubulação próximas.



Fonte: CORROSIONPEDIA, 2019.

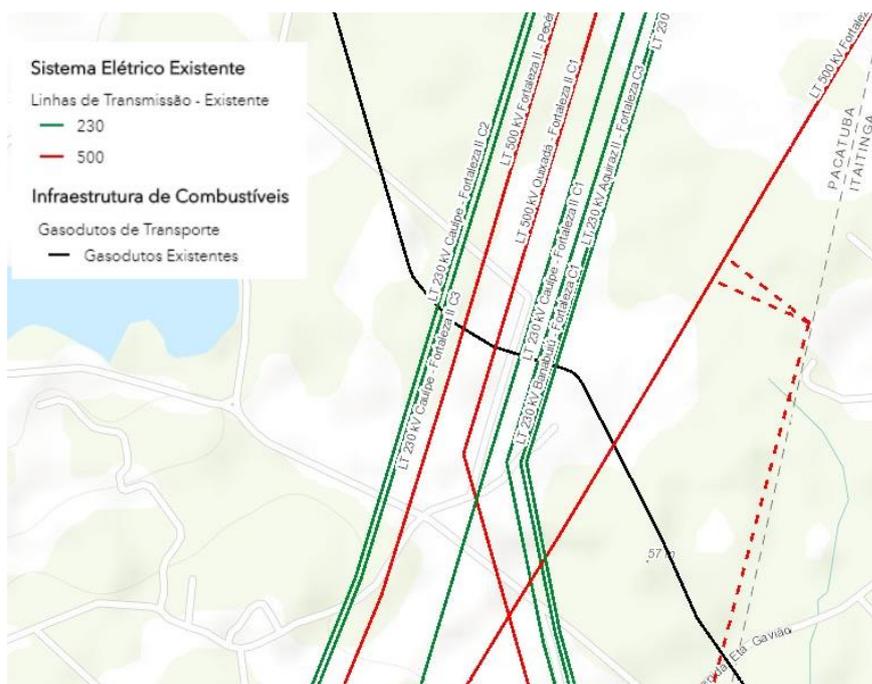
Esse compartilhamento pode ocorrer na forma de cruzamentos, paralelismo ou equivalência. Veja algumas dessas situações apresentadas nas figuras 4, 5, 6 e 7.

Figura 4 - Situação de cruzamento entre LT's 230kV e gasoduto.



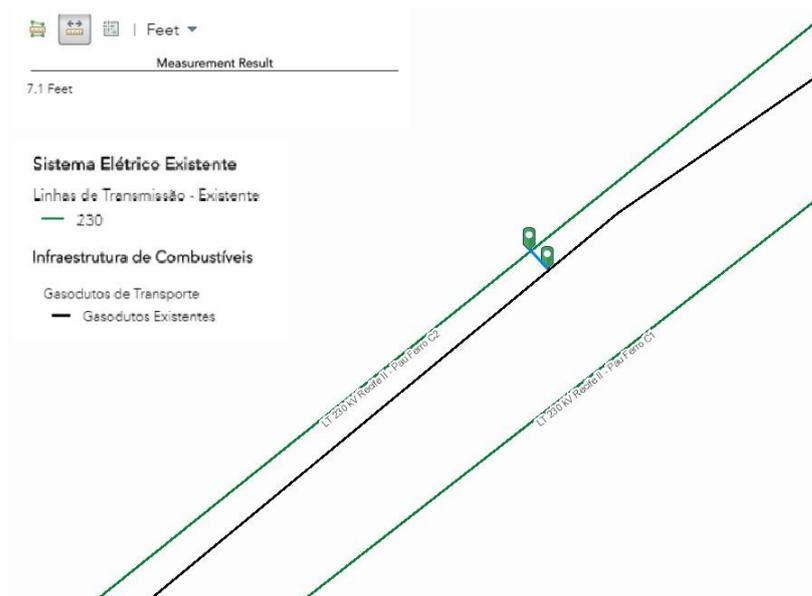
Fonte: EPE, 2019 (Adaptado).

Figura 5 - Situação de cruzamento entre LT's 230kV, 500kV e gasoduto.



Fonte: EPE, 2019 (Adaptado).

Figura 6 - Situação de paralelismo entre LT 230kV e gasoduto.



Fonte: EPE, 2019 (Adaptado).

Figura 7 - Situação de equivalência entre LT 230kV e gasoduto.



Fonte: EPE, 2019 (Adaptado).

1.2 OBJETIVO

O compartilhamento da faixa de passagem entre LT e tubulações metálicas requer um estudo apropriado, visto que o sistema de transporte de energia elétrica involuntariamente acaba por induzir o surgindo de tensões e correntes na tubulação.

Dentre os tipos de acoplamentos que podem existir entre LT e tubulações, esse trabalho terá foco no acoplamento indutivo (ou indução eletromagnética) na situação de paralelismo. E dentre as topologias de tubulação existentes, será feito um estudo do caso de tubulação metálica aérea. Sendo a análise para LT aérea de Corrente Alternada (CA).

Outro ponto importante a se considerar é a condição do sistema elétrico, sendo esse trabalho relativo ao estudo na situação de regime permanente.

Assim, o objeto principal será na análise da tensão induzida na tubulação metálica aérea nas condições já mencionadas. Visto que, a tensão induzida está diretamente atrelada a corrente induzida circulante na tubulação, e consequente a corrente de choque que pode circular nas pessoas da região próxima e nos operadores da rede dutoviária, assim sendo a preocupação final na segurança de pessoas.

1.3 ORGANIZAÇÃO TEXTUAL

O trabalho será dividido nos seguintes capítulos:

- Capítulo 1: capítulo introdutório em que é apresentado o contexto do problema e sua delimitação nesse trabalho;
- Capítulo 2: é feita uma breve descrição a respeito dos sistemas sob estudo;
- Capítulo 3: é feita uma revisão da teoria que envolve princípios do eletromagnetismo e acoplamentos existentes;
- Capítulo 4: desenvolvimento do cálculo da tensão induzida devido ao acoplamento indutivo, incluindo estudo de caso;
- Capítulo 5: Considerações finais a respeito do trabalho, incluindo demais estudos para serem desenvolvidos em trabalhos futuros.

2 SISTEMAS SOB ESTUDO

2.1 LINHAS DE TRANSMISSÃO

2.1.1 Classe de tensão

A classe de tensão das LT's é padronizada a nível internacional e nacional, conforme apresentado nas tabelas 1 e 2, respectivamente.

A tensão pode ser em Corrente Contínua (CC) ou em Corrente Alternada (CA).

Tabela 1 - Categorias de tensões. Padronização IEC.

Altas tensões (AT)	$60\text{kV} < U < 300\text{kV}$
Tensões Extraelevadas (TEE)	$300\text{kV} < U < 800\text{kV}$
Tensões Ultraelevadas (TUE)	$U > 800\text{kV}$

Fonte: FUCHS, 2015.

Tabela 2 - Classes de tensões. Padronização ABNT.

Tensões nominais	Tensões máximas	Categoria
33 ou 34,5 kV	38 kV	Altas tensões
62 ou 69 kV	72,5 kV	
132 ou 138 kV	145 kV	
220 ou 230 kV	242 kV	
330 ou 345 kV	362 kV	Tensões extraelevadas
500 kV	550 kV	
750 kV	800 kV	

Fonte: FUCHS, 2015.

Em que o ONS (2019a) define rede básica como sendo todo nível de tensão maior ou igual a 230kV.

A tabela 3 apresenta dados da extensão da transmissão no Brasil de acordo com o nível de tensão no ano de 2017 e para o horizonte de 2023.

Tabela 3 - Extensão rede de transmissão no Brasil.

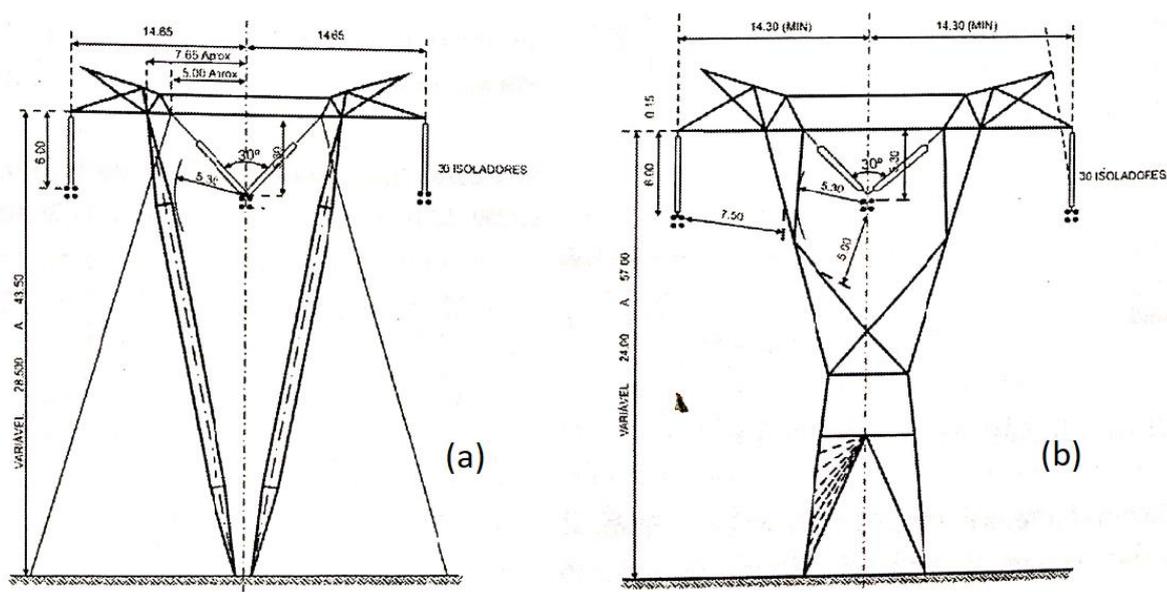
Nível de tensão (kV)		Extensão (km)	
		2017	2023
800	CC	4.600	9.636
750	CA	2.683	2.683
600	CC	12.816	12.816
500	CA	47.750	71.891
440	CA	6.748	6.969
345	CA	10.320	11.492
230	CA	56.471	69.997
Total		141.388	185.484

Fonte: ONS, 2019b (Adaptado).

2.1.2 Torre de transmissão

A torre da LT pode ser estaiada ou autoportante, conforme figura 8.

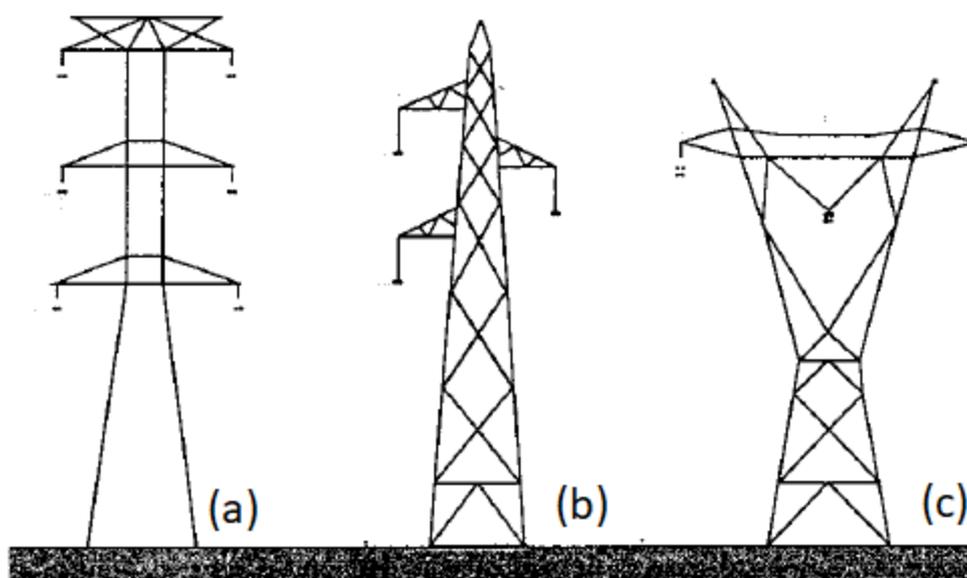
Figura 8 - Torre de LT estaiada (a) e autoportante (b).



Fonte: FUCHS, 2015.

Os condutores de fase podem ser dispostos nas configurações vertical, triangular ou horizontal, conforme apresentado na figura 9.

Figura 9 - Configurações da geometria de LT. (a) Vertical. (b) Triangular. (c) Horizontal.



Fonte: CIGRÉ, 1995.

2.1.3 Componentes da LT

A LT é composta basicamente dos cabos condutores de fase, isoladores, cabos guarda (ou cabos pára-raio), contrapeso e espaçadores. E outras ferragens como, espaçador, amortecedores etc, dependendo das condições de projeto.

2.2 TUBULAÇÕES METÁLICAS

2.2.1 Operação

O sistema dutoviário é utilizado para o transporte de óleo, gás e derivados, biocombustíveis, água, minério, dentre outros produtos.

Segundo a ANTT (2019), pode ser dividido nos seguintes segmentos:

- Oleodutos: transporte de petróleo, óleo combustível, gasolina, diesel, álcool, GLP, querosene e nafta, e outros;
- Gasodutos: transporte de gás natural;

- Minerodutos; transporte de Sal-gema, Minério de ferro e Concentrado Fosfático;
- Aquadutos.

Nesta composição, 54,7% do sistema é relativo a gasodutos (EPL, 2019a). No Brasil a malha de gasodutos estende-se por mais de 9.000 km (PETROBRAS, 2019).

A malha dutoviária, quando comparada ao transporte rodoviário, permite ganhos ambientais expressivos em função de maior flexibilidade, aumento da segurança operacional, redução do número de acidentes e vazamentos e do volume de emissões atmosféricas. (PETROBRAS, 2019)

Segundo a PETROBRAS (2019), há o investimento na melhoria e ampliação da rede de dutos e na confiabilidade desse sistema por meio de iniciativas como o Programa de Integridade Estrutural dos Dutos. Da mesma forma que gerencia riscos potenciais ao meio ambiente relativo a gasodutos, assim como os impactos sobre a biodiversidade.

2.2.2 Vantagens

Segundo MATTOS (2012), o transporte via dutos apresenta as seguintes vantagens em relação aos outros tipos de transporte terrestre (rodoviário e ferroviário):

- Alta confiabilidade, o que se refere a operação contínua. Visto que não afetado por condições climáticas, apresentando elevado grau de automação na supervisão e no gerenciamento;
- Grande economia no transporte, pois quando comparado aos transportes ferroviário e rodoviário. Sendo até 5 vezes mais econômico que o ferroviário e até 20 vezes mais econômico que o rodoviário;
- Baixo consumo de energia, pois quando comparado aos transportes ferroviário e rodoviário, considerando o consumo para o transporte de uma mesma carga por uma mesma distância;
- Baixo impacto ambiental, não apresenta os inconvenientes dos transportes rodoviários e ferroviários como ocupação das vias, poluição do ar, ruído e menor risco de acidentes.

2.2.3 Materiais utilizados

Segundo METALICA (2019):

O aço é um material largamente utilizado em oleodutos, gasodutos, minerodutos, emissários e adutoras. Sua resistência às intempéries e altas pressões possibilita tubulações com milhares de quilômetros. A união mais usual entre os segmentos de tubos de aço é feita por meio de soldas.

As tubulações feitas de concreto armado são também conhecidas como manilhas e geralmente são empregadas em redes de coleta de esgoto, emissários e adutoras em cidades. Os diâmetros são bastante variáveis em função da vazão requerida e sua união é feita com argamassa de cimento.

Os tubos de PVC e PEAD (polietileno de alta densidade) são os mais empregados para a coleta, distribuição e condução de água potável e esgotos, em instalações residenciais, prediais e industriais. Devido à facilidade de aquisição, manuseio e instalação, essas tubulações representaram um grande avanço nas instalações hidráulicas prediais. Sua união é realizada por meio de luvas coladas ou rosqueadas.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 PRINCÍPIOS DO ELETROMAGNETISMO

As equações de Maxwell resumem as leis do eletromagnetismo (SADIKU, 2004), são quatro leis que descrevem o comportamento dos campos elétrico e magnético e se relacionam, considerando as variações no tempo e espaço.

A lei de Gauss estabelece que o fluxo elétrico total Ψ através de qualquer superfície fechada é igual à carga total encerrada por essa superfície (SADIKU, 2004).

A lei de Gauss é descrita pela expressão (1) e forma final apresentada na expressão (2).

$$\Psi = \oint_S D \cdot dS = Q = \int_v \rho_v \cdot dv \quad (1)$$

$$\rho_v = \nabla \cdot D \quad (2)$$

Em que, a expressão (2) descreve que a densidade volumétrica de carga (ρ_v) é igual à divergência da densidade de fluxo elétrico (D). (SADIKU, 2004)

A Lei de Faraday diz que um campo magnético variável no tempo produz uma tensão induzida (denominada força eletromotriz ou, simplesmente FEM) em um circuito fechado, o que causa um fluxo de corrente. (SADIKU, 2004). Faraday descobriu que a FEM induzida, V_{FEM} (V), em qualquer circuito fechado, é igual à taxa de variação no tempo do fluxo magnético enlaçado pelo circuito (SADIKU, 2004).

A lei de Faraday é descrita pela expressão (3).

$$V_{FEM} = -\frac{d\lambda}{dt} = -N \cdot \frac{d\Psi}{dt} \quad (3)$$

Em que, N é o número de espiras do circuito e Ψ é o fluxo em cada espira.

O sinal negativo da equação (3) é relativo ao fato de que a tensão induzida age de tal forma a se opor ao fluxo que a produziu, essa propriedade é conhecida como Lei de Lenz. (SADIKU, 2004).

A lei circuital de Ampère estabelece que a circulação do campo magnético (H) em torno de um caminho fechado é igual à corrente líquida envolvida (I_{env}) pelo caminho. (SADIKU, 2004).

A lei de Ampère é descrita pela expressão (4).

$$\oint H \cdot dl = I_{env} \quad (4)$$

A lei da conservação do fluxo magnético ou lei de Gauss para campos magnetostáticos, a qual estabelece que o fluxo total através de uma superfície fechada em um campo magnético deve ser zero. (SADIKU, 2004)

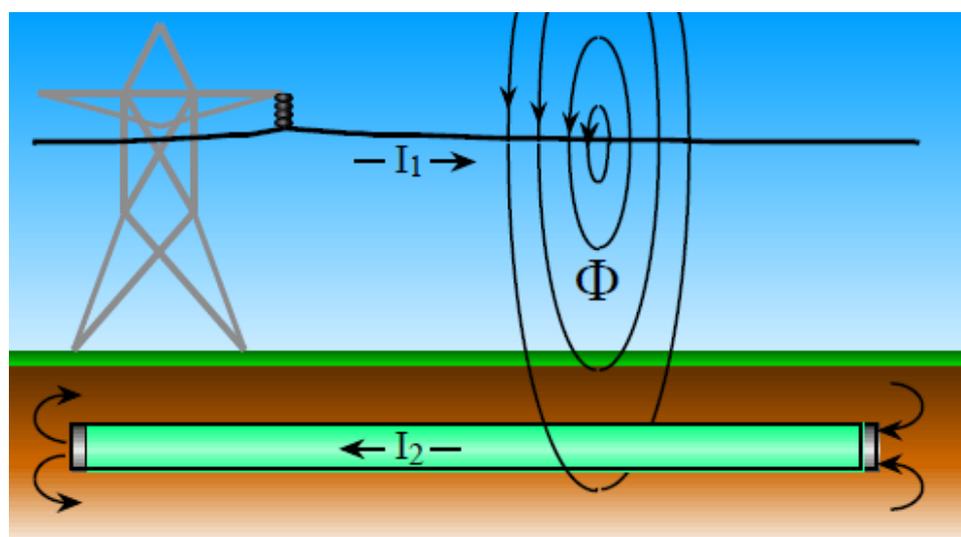
A lei da conservação do fluxo magnético é descrita pela expressão (5).

$$\oint B \cdot dS = 0 \quad (5)$$

3.2 ACOPLAMENTO INDUTIVO

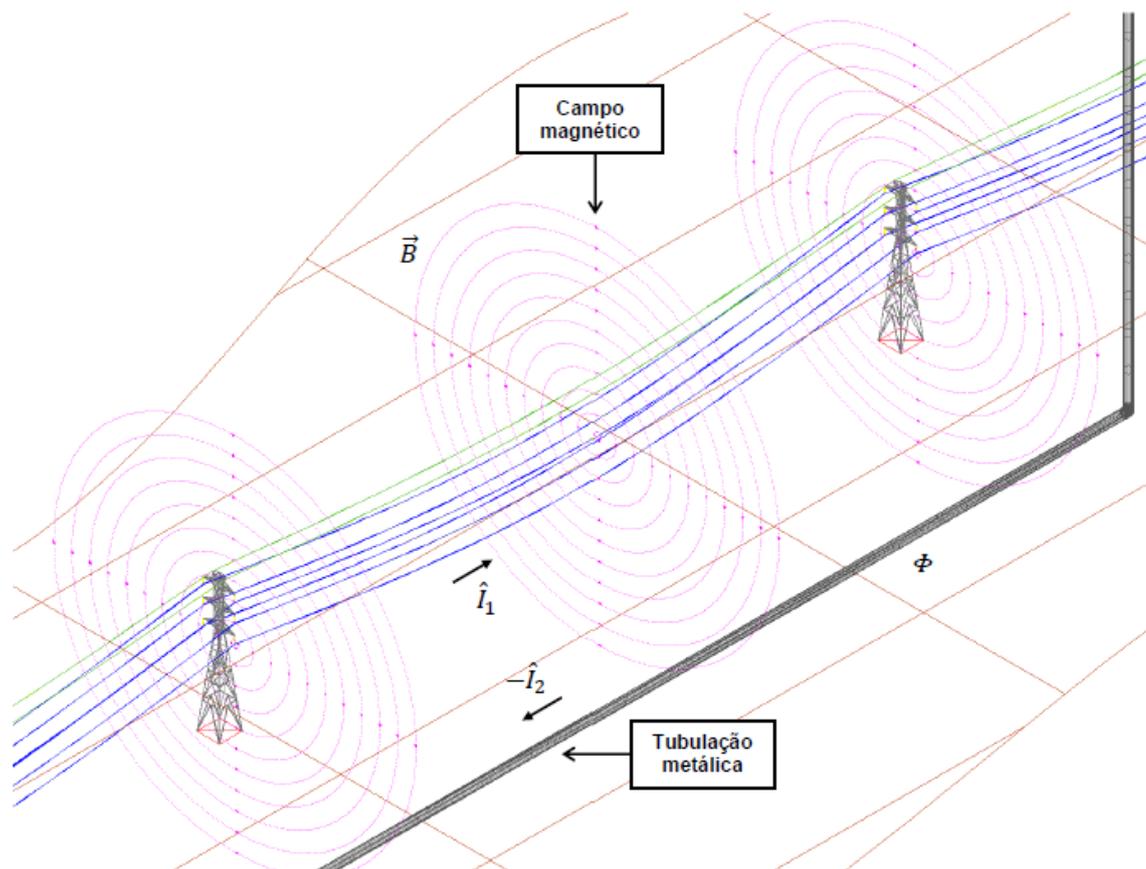
O acoplamento indutivo, ou indução eletromagnética (ou ainda acoplamento magnético), ocorre devido ao campo magnético variante no tempo das correntes dos condutores de uma LT, gerando uma FEM induzida o que ocasiona uma indução de tensão na tubulação e conseqüentemente a circulação de uma corrente na tubulação. Para esse fenômeno ocorrer a tubulação pode ser aérea ou subterrânea, sendo a LT com trecho de paralelismo à tubulação. Em que tal efeito é baseado na lei de Faraday. As figuras 10 e 11 ilustram esse fenômeno.

Figura 10 - Acoplamento indutivo entre LT e tubulação metálica. Visualização em duas dimensões.



Fonte: GUMMOW, 2014.

Figura 11 - Acoplamento indutivo entre LT e tubulação metálica. Visualização em três dimensões.



Fonte: BRITTO, 2017.

Segundo CIGRÉ (1995), conforme citado em BRITTO (2017), o acoplamento indutivo depende das seguintes variáveis:

- Níveis de corrente;
- Distância entre LT e tubulação;
- Comprimento da zona de exposição;
- Resistividade elétrica do solo;
- Características da LT;
- Características da tubulação.

3.3 ACOPLAMENTO CAPACITIVO

O acoplamento capacitivo, ou indução eletrostática (ou ainda acoplamento eletrostático) ocorre devido ao campo elétrico dos condutores da LT, os quais estão em um meio dielétrico (ar atmosférico) e estando a tubulação isolada do solo,

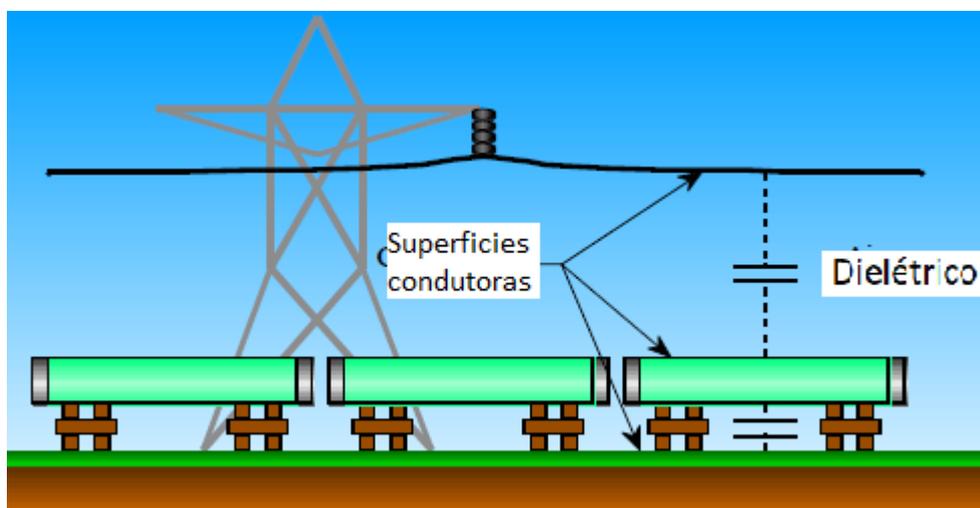
resulta no acúmulo de cargas elétricas na superfície da tubulação metálica, logo dando origem a capacitâncias entre a LT e a tubulação. As figuras 12 e 13 ilustram esse fenômeno.

Esse acoplamento ocorre de forma mais significativa entre LT e tubulação aérea, pois instalações subterrâneas não estão sujeitas a essa devido ao fato de a superfície do solo atuar como um elemento de blindagem eletrostática (BRITTO, 2017), conforme ilustrado na figura 14.

Em relação ao impacto causado pelo acoplamento capacitivo, BRITTO (2017):

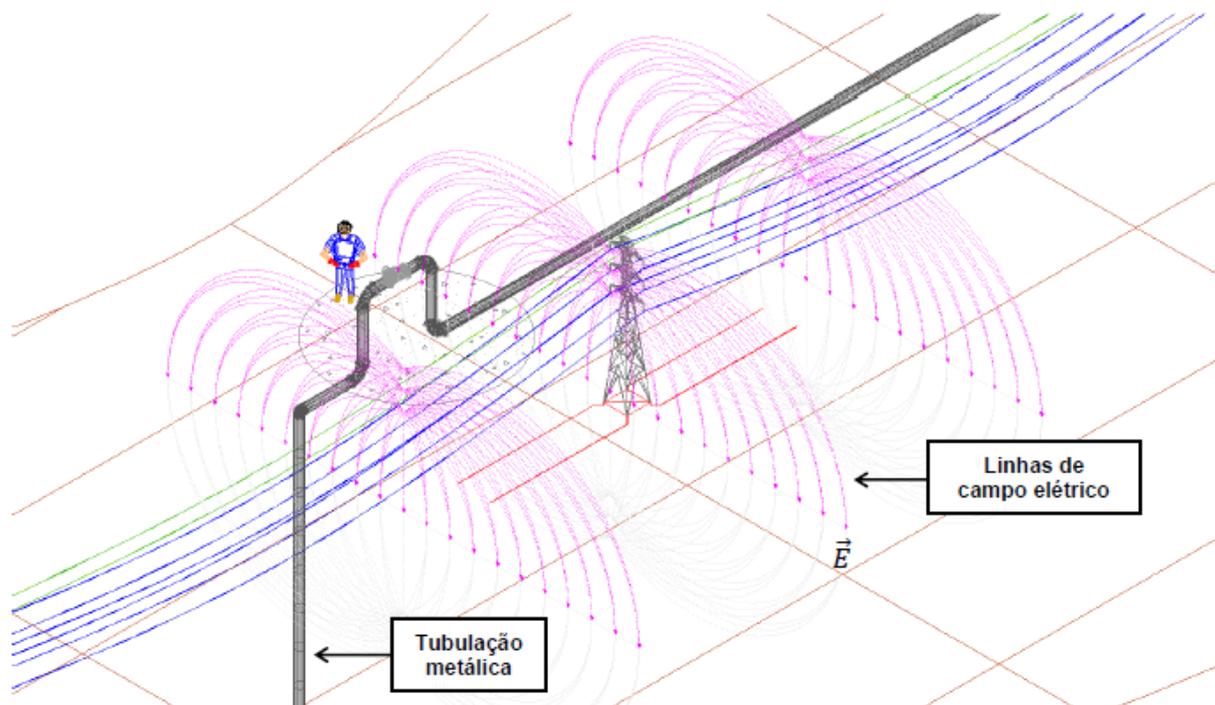
De um modo geral, o acoplamento capacitivo não é causa de tensões de estresse significativas na estrutura interferida, sendo mais preocupantes as correntes de descarga eletrostática no capacitor formado entre a tubulação e a terra, no caso de uma pessoa em contato direto com o metal.

Figura 12 - Acoplamento capacitivo entre LT e tubulação metálica. Visualização em duas dimensões.



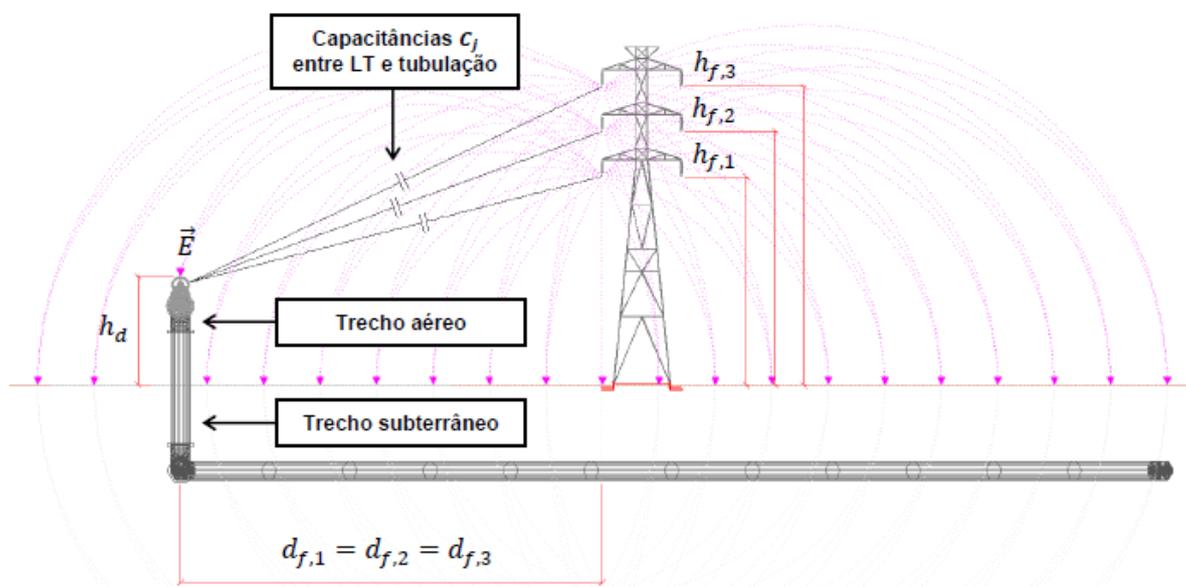
Fonte: GUMMOW, 2014 (Adaptado).

Figura 13 - Acoplamento capacitivo entre LT e tubulação metálica. Visualização em três dimensões.



Fonte: BRITTO, 2017.

Figura 14 - Acoplamento capacitivo entre LT e tubulação aérea e blindagem eletrostática da tubulação subterrânea.



Fonte: BRITTO, 2017.

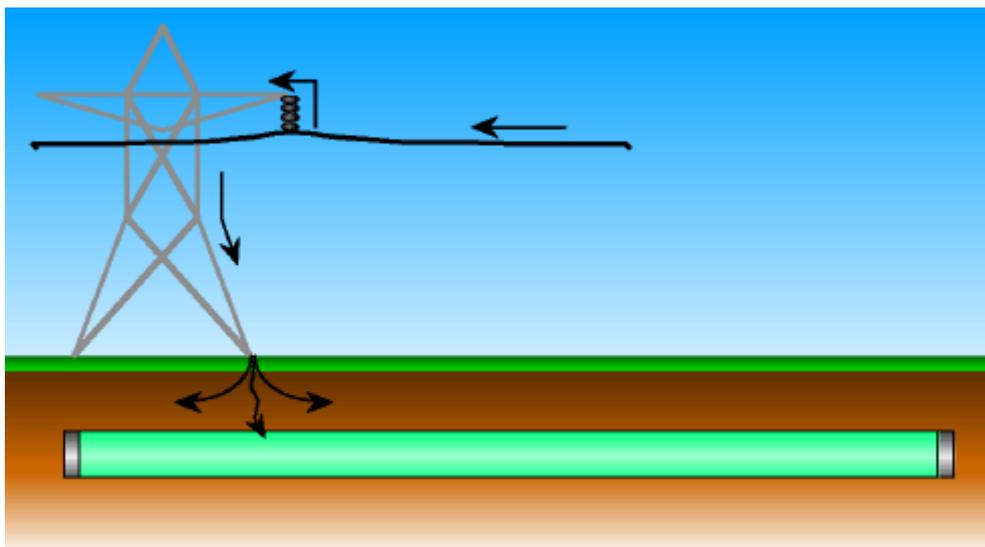
Segundo CIGRÉ (1995), conforme citado em BRITTO (2017), o acoplamento capacitivo depende das seguintes variáveis:

- Tensão na LT;
- Distância entre LT e tubulação;
- Comprimento da exposição;
- Condições de operação da LT.

3.4 ACOPLAMENTO CONDUTIVO

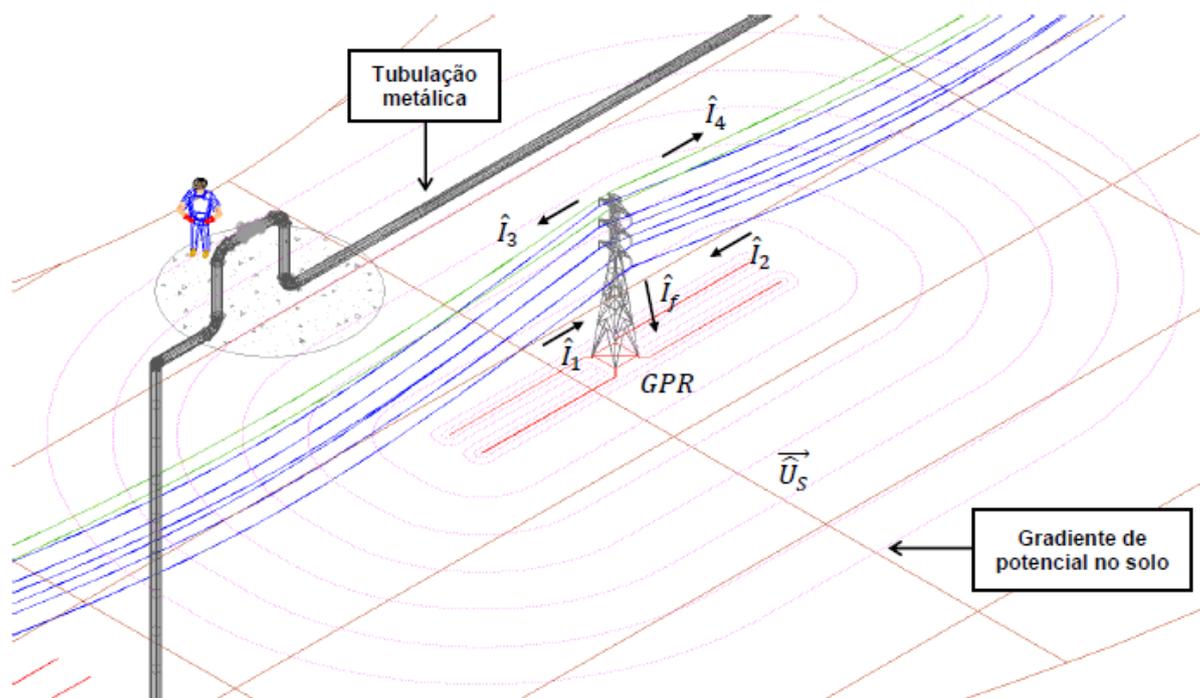
O acoplamento condutivo ou resistivo (ou ainda elevação de potencial do solo) é causado pela circulação de corrente no solo numa situação de curto-circuito, em que a corrente de falta é drenada para o solo por meio do aterramento da LT. Em que o potencial do solo é elevado e distribuído ao redor dos condutores de aterramento na forma de gradientes de potencial. Para esse fenômeno ocorrer a tubulação pode ser aérea ou subterrânea. As figuras 15 e 16 ilustram esse fenômeno.

Figura 15 - Acoplamento condutivo entre LT e tubulação metálica. Visualização em duas dimensões.



Fonte: GUMMOW, 2014.

Figura 16 - Acoplamento condutivo entre LT e tubulação metálica. Visualização em três dimensões.



Fonte: BRITTO, 2017.

Embora não tão comum, o acoplamento condutivo também pode ocorrer em tubulações diretamente conectadas a eletrodos de aterramento de instalações em alta tensão (BRITTO, 2017).

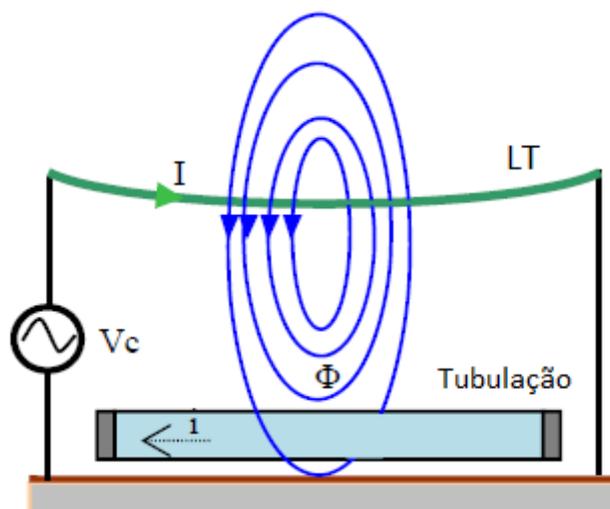
Segundo CIGRÉ (1995), conforme citado em BRITTO (2017), o acoplamento condutivo depende das seguintes variáveis:

- Corrente de curto-circuito;
- Quantidade e tipo de condutores pára-raios;
- Distância entre o eletrodo de aterramento e tubulação;
- Geometria do eletrodo de aterramento;
- Resistividade elétrica e estratificação do solo.

4 TENSÃO INDUZIDA DEVIDO AO ACOPLAMENTO INDUTIVO

O campo magnético da linha de transmissão gera uma tensão induzida na superfície da tubulação metálica, conforme já explicitado no subtópico 2 do capítulo 3. A figura 17 reforça bem essa situação numa vista longitudinal na condição de regime permanente, considerando a LT perfeitamente paralela a tubulação.

Figura 17 - Ilustração do acoplamento indutivo entre linha de transmissão e tubulação aérea.



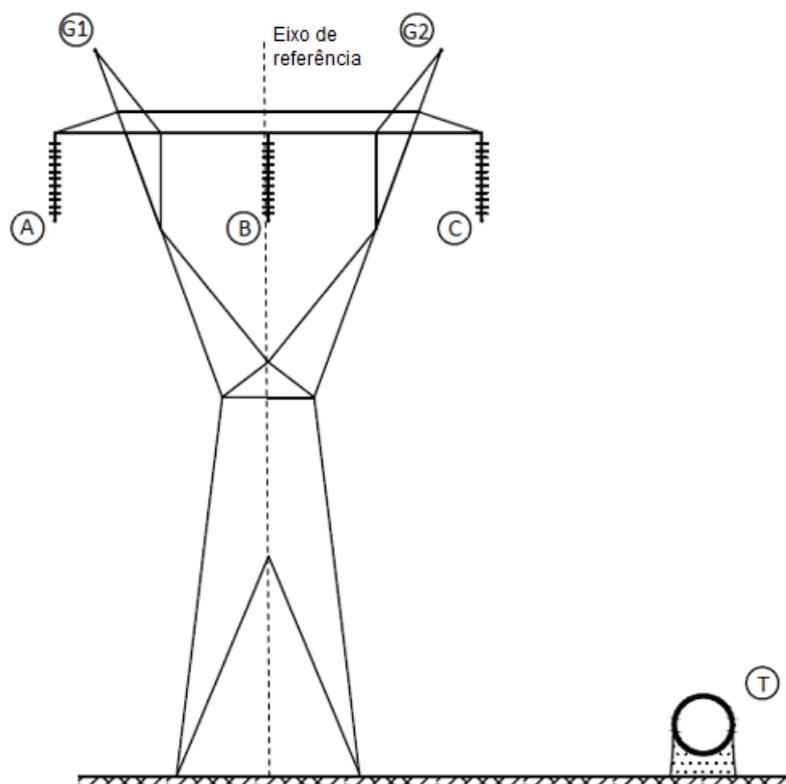
Fonte: DJEKIDEL, 2014 (Adaptado).

A tensão induzida na tubulação é definida a partir da FEM induzida na tubulação. Em que na condição de paralelismo entre a LT aérea CA e a tubulação metálica aérea e com o sistema em regime permanente, a indução pode ser calculada usando conceitos simples do sistema de potência, tal método baseia-se nas impedâncias mútuas entre os elementos envolvidos apresentado por Carson. (DJEKIDEL, 2014)

4.1 METODOLOGIA

A abordagem utilizada em DJEKIDEL (2014) é para um sistema composto por LT trifásica com um cabo guarda paralela a tubulação metálica aérea. Porém nesse trabalho, também irá ser analisada o caso de LT trifásica com dois cabos guardas paralela a tubulação metálica aérea; logo, faz-se necessário o desenvolvimento de equações para essa segunda situação, a qual é ilustrada na figura 18.

Figura 18 - LT trifásica com dois cabos guarda paralela a tubulação metálica aérea. Ilustração numa vista frontal.



Fonte: A Autora, 2019.

Ao longo das deduções seguintes adota-se que: os índices 'A', 'B' e 'C' referem-se aos condutores das fases A, B e C, respectivamente; os índices 'G1' e 'G2' referem-se aos dois cabos guarda; o índice 'T' refere-se à tubulação metálica aérea. Conforme visto na figura 18.

A FEM longitudinal induzida na tubulação (E_T) devido ao sistema elétrico, especificamente devido às correntes das fases A, B e C (I_A , I_B , I_C) e às correntes nos cabos guarda 1 e 2 (I_{G1} , I_{G2}), é descrita pela equação (6).

$$E_T = -I_A \cdot Z_{A,T} - I_B \cdot Z_{B,T} - I_C \cdot Z_{C,T} - I_{G1} \cdot Z_{G1,T} - I_{G2} \cdot Z_{G2,T} \quad (6)$$

Em que, $Z_{A,T}$, $Z_{B,T}$ e $Z_{C,T}$, são as impedâncias mútua de Carson entre as fases A, B, e C, e a tubulação; $Z_{G1,T}$ e $Z_{G2,T}$ são as impedâncias mútua de Carson entre os cabos guarda e a tubulação.

Cabos guarda multiaterrados é a forma tradicional de uso desses casos, a qual permite a circulação de correntes provocadas pela FEM induzida pelo campo

magnético resultante das fases. Como está aterrado em ambas suas extremidades, ambas estão sob o mesmo potencial. (FUCHS, 2015)

Assumindo que os cabos guarda são multiterrados, a queda de tensão no cabo guarda é zero. Assim, a corrente no cabo guarda 1 (I_{G1}) dada pela equação (7).

$$I_{G1} = -\frac{1}{Z_{G1,G1}} \cdot (I_A \cdot Z_{A,G1} + I_B \cdot Z_{B,G1} + I_C \cdot Z_{C,G1} + I_{G2} \cdot Z_{G2,G1}) \quad (7)$$

Em que, $Z_{G1,G1}$ é a impedância própria de Carson do cabo guarda 1; $Z_{A,G1}$, $Z_{B,G1}$ e $Z_{C,G1}$ são as impedâncias mútua de Carson entre as fases A, B, e C, e o cabo guarda 1; $Z_{G2,G1}$ é a impedância mútua de Carson entre os cabos guarda 1 e 2.

Da mesma consideração do cabo guarda 1, obtém-se a corrente no cabo guarda 2 (I_{G2}) apresentada na equação (8).

$$I_{G2} = -\frac{1}{Z_{G2,G2}} \cdot (I_A \cdot Z_{A,G2} + I_B \cdot Z_{B,G2} + I_C \cdot Z_{C,G2} + I_{G1} \cdot Z_{G1,G2}) \quad (8)$$

Em que, $Z_{G2,G2}$ é a impedância própria de Carson do cabo guarda 2; $Z_{A,G2}$, $Z_{B,G2}$ e $Z_{C,G2}$ são as impedâncias mútua de Carson entre as fases A, B, e C, e o cabo guarda 2; $Z_{G1,G2}$ é a impedância mútua de Carson entre os cabos guarda 1 e 2.

A fim de obter as correntes dos cabos guarda em função das correntes das fases, pode-se desenvolver as equações (7) e (8).

Assim, a corrente no cabo guarda 1 (I_{G1}) pode ser descrita como apresentada na equação (9).

$$I_{G1} = \left[\frac{1}{\left(\frac{Z_{G1,G2}^2}{Z_{G2,G2}} - Z_{G1,G1} \right)} \right] \cdot \left[I_A \cdot \left(Z_{A,G1} - Z_{A,G2} \cdot \frac{Z_{G1,G2}}{Z_{G2,G2}} \right) + I_B \cdot \left(Z_{B,G1} - Z_{B,G2} \cdot \frac{Z_{G1,G2}}{Z_{G2,G2}} \right) + I_C \cdot \left(Z_{C,G1} - Z_{C,G2} \cdot \frac{Z_{G1,G2}}{Z_{G2,G2}} \right) \right] \quad (9)$$

A fim de simplificação, é definida a constante k_{G1} pela equação (10).

$$k_{G1} = \frac{1}{\left(\frac{Z_{G1,G2}^2}{Z_{G2,G2}} - Z_{G1,G1} \right)} \quad (10)$$

Logo,

$$I_{G1} = k_{G1} \cdot \left[I_A \cdot \left(Z_{A,G1} - Z_{A,G2} \cdot \frac{Z_{G1,G2}}{Z_{G2,G2}} \right) + I_B \cdot \left(Z_{B,G1} - Z_{B,G2} \cdot \frac{Z_{G1,G2}}{Z_{G2,G2}} \right) + I_C \cdot \left(Z_{C,G1} - Z_{C,G2} \cdot \frac{Z_{G1,G2}}{Z_{G2,G2}} \right) \right] \quad (11)$$

A corrente no cabo guarda 2 (I_{G2}) pode ser descrita como apresentada na equação (12).

$$I_{G2} = \left[\frac{1}{\left(\frac{Z_{G1,G2}^2}{Z_{G1,G1}} - Z_{G2,G2} \right)} \right] \cdot \left[I_A \cdot \left(Z_{A,G2} - Z_{A,G1} \cdot \frac{Z_{G1,G2}}{Z_{G1,G1}} \right) + I_B \cdot \left(Z_{B,G2} - Z_{B,G1} \cdot \frac{Z_{G1,G2}}{Z_{G1,G1}} \right) + I_C \cdot \left(Z_{C,G2} - Z_{C,G1} \cdot \frac{Z_{G1,G2}}{Z_{G1,G1}} \right) \right] \quad (12)$$

A fim de simplificar, é definida a constante k_{G2} pela equação (13).

$$k_{G2} = \frac{1}{\left(\frac{Z_{G1,G2}^2}{Z_{G1,G1}} - Z_{G2,G2} \right)} \quad (13)$$

Logo,

$$I_{G2} = k_{G2} \cdot \left[I_A \cdot \left(Z_{A,G2} - Z_{A,G1} \cdot \frac{Z_{G1,G2}}{Z_{G1,G1}} \right) + I_B \cdot \left(Z_{B,G2} - Z_{B,G1} \cdot \frac{Z_{G1,G2}}{Z_{G1,G1}} \right) + I_C \cdot \left(Z_{C,G2} - Z_{C,G1} \cdot \frac{Z_{G1,G2}}{Z_{G1,G1}} \right) \right] \quad (14)$$

Substituindo as equações (11) e (14) na (6), temos que:

$$E_T = -I_A \cdot \left[Z_{A,T} + Z_{A,G1} \cdot \left(k_{G1} \cdot Z_{G1,T} - k_{G2} \cdot Z_{G2,T} \cdot \frac{Z_{G1,G2}}{Z_{G1,G1}} \right) + Z_{A,G2} \cdot \left(k_{G2} \cdot Z_{G2,T} - k_{G1} \cdot Z_{G1,T} \cdot \frac{Z_{G1,G2}}{Z_{G2,G2}} \right) \right] - I_B \cdot \left[Z_{B,T} + Z_{B,G1} \cdot \left(k_{G1} \cdot Z_{G1,T} - k_{G2} \cdot Z_{G2,T} \cdot \frac{Z_{G1,G2}}{Z_{G1,G1}} \right) + Z_{B,G2} \cdot \left(k_{G2} \cdot Z_{G2,T} - k_{G1} \cdot Z_{G1,T} \cdot \frac{Z_{G1,G2}}{Z_{G2,G2}} \right) \right] - I_C \cdot \left[Z_{C,T} + Z_{C,G1} \cdot \left(k_{G1} \cdot Z_{G1,T} - k_{G2} \cdot Z_{G2,T} \cdot \frac{Z_{G1,G2}}{Z_{G1,G1}} \right) + Z_{C,G2} \cdot \left(k_{G2} \cdot Z_{G2,T} - k_{G1} \cdot Z_{G1,T} \cdot \frac{Z_{G1,G2}}{Z_{G2,G2}} \right) \right] \quad (15)$$

A título de simplificação são definidas as constantes k'_{G1} e k'_{G2} pelas equações (16) e (17), respectivamente.

$$k'_{G1} = k_{G1} \cdot Z_{G1,T} - k_{G2} \cdot Z_{G2,T} \cdot \frac{Z_{G1,G2}}{Z_{G1,G1}} \quad (16)$$

$$k'_{G2} = k_{G2} \cdot Z_{G2,T} - k_{G1} \cdot Z_{G1,T} \cdot \frac{Z_{G1,G2}}{Z_{G2,G2}} \quad (17)$$

Logo, a FEM induzida na tubulação em termos das correntes das fases e das impedâncias do sistema, é apresentada na equação (18).

$$E_T = -I_A \cdot (Z_{A,T} + k'_{G1} \cdot Z_{A,G1} + k'_{G2} \cdot Z_{A,G2}) - I_B \cdot (Z_{B,T} + k'_{G1} \cdot Z_{B,G1} + k'_{G2} \cdot Z_{B,G2}) - I_C \cdot (Z_{C,T} + k'_{G1} \cdot Z_{C,G1} + k'_{G2} \cdot Z_{C,G2}) \quad (18)$$

A impedância mútua de Carson pelo método simplificado (FUCHS, 2015) é definida pela equação (19).

$$Z_{m,n} = \frac{\mu_0 \cdot \omega}{8} + j \cdot \frac{\mu_0 \cdot \omega}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left(\frac{D_e}{D_{m,n}} \right) \quad (19)$$

Para, $m \neq n$. Sendo, $m = A, B, C, G1, G2$ e $n = G1, G2, T$

Em que, μ_0 é a permeabilidade magnética do vácuo ($\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-4} H/km$); ω é a velocidade angular ($\omega = 2 \cdot \pi \cdot f \text{ rad/s}$); $D_{i,j}$ é a distância entre os condutores em metros; D_e é a distância equivalente em metros, a qual é definida pela equação (20).

$$D_e = 658,87 \cdot \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (20)$$

Em que, ρ é a resistividade do solo em $\Omega \cdot m$; f é a frequência do sistema elétrico em Hz.

A impedância própria de Carson pelo método simplificado (FUCHS, 2015) é definida pela equação (21).

$$Z_{m,m} = R_m + \frac{\mu_0 \cdot \omega}{8} + j \cdot \frac{\mu_0 \cdot \omega}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left(\frac{D_e}{r'_m} \right) \quad (21)$$

Sendo, $m = G1, G2$.

Em que, R_m é a resistência em Ω/km ; r'_m é o raio em metros.

A tensão induzida na tubulação V_T é apresentada na equação (22).

$$V_T = E_T \cdot L \quad (22)$$

Em que, L é a comprimento de paralelismo entre a LT e a tubulação.

A corrente de choque (I_{CH}) que atravessa o corpo humano que toca a tubulação é limitada pela impedância total da tubulação Z_T , a resistência de retorno pelo solo R_S e a resistência do corpo humano R_C . (DJEKIDEL, 2014)

A corrente de choque é definida na equação (23).

$$I_{CH} = \frac{V_T}{Z_T + R_S + R_C} \quad (23)$$

A impedância total da tubulação é a impedância da tubulação com retorno pelo solo que considera a parte interna e externa, em que para tubulações aéreas essa impedância é definida na equação (24) (DJEKIDEL, 2014).

$$Z_T = \frac{\sqrt{\rho_T \cdot \mu_T \cdot \omega}}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot \pi \cdot r_T} \cdot (1 + j) + \frac{\omega \cdot \mu_0}{8} + j \cdot \left[\frac{\omega \cdot \mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot \log \left(\frac{3,7 \cdot \sqrt{\rho_T \cdot \mu_0^{-1} \cdot \omega^{-1}}}{2 \cdot r_T} \right) \right] \quad (24)$$

Em que, r_T é o raio da tubulação; μ_T é a permeabilidade relativa da tubulação; ρ_T é a resistividade da tubulação.

O caso de uma LT trifásica com um cabo guarda paralela a tubulação metálica trata-se de um caso particular do desenvolvimento metodológico realizado anteriormente. Em que a FEM longitudinal induzida na tubulação (E_T) devido ao sistema elétrico, especificamente devido às correntes das fases A, B e C (I_A , I_B , I_C) e à corrente no cabo guarda (I_G), é descrita pela equação (25).

$$E_T = -I_A \cdot Z_{A,T} - I_B \cdot Z_{B,T} - I_C \cdot Z_{C,T} - I_G \cdot Z_{G,T} \quad (25)$$

Em que, $Z_{A,T}$, $Z_{B,T}$ e $Z_{C,T}$, são as impedâncias mútua de Carson entre as fases A, B, e C, e a tubulação; $Z_{G,T}$ é a impedância mútua de Carson entre o cabo guarda e a tubulação.

Para a mesma consideração de cabo guarda multiterrado, a corrente no cabo guarda (I_G) dada pela equação (26).

$$I_G = -\frac{1}{Z_{G,G}} \cdot (I_A \cdot Z_{A,G} + I_B \cdot Z_{B,G} + I_C \cdot Z_{C,G}) \quad (26)$$

Em que, $Z_{G,G}$ é a impedância própria de Carson do cabo guarda; $Z_{A,G}$, $Z_{B,G}$ e $Z_{C,G}$ são as impedâncias mútua de Carson entre as fases A, B, e C, e o cabo guarda.

Substituindo (26) em (25), temos que:

$$E_T = -I_A \cdot \left(Z_{A,T} - Z_{A,G} \cdot \frac{Z_{G,T}}{Z_{G,G}} \right) - I_B \cdot \left(Z_{B,T} - Z_{B,G} \cdot \frac{Z_{G,T}}{Z_{G,G}} \right) - I_C \cdot \left(Z_{C,T} - Z_{C,G} \cdot \frac{Z_{G,T}}{Z_{G,G}} \right) \quad (27)$$

4.2 CRITÉRIOS

Segundo CIGRÉ (1995), internacionalmente admite-se uma tensão limite de 50V ou 65V na tubulação metálica, a depender do país, na condição de regime permanente, de tal forma a assegurar segurança das pessoas (DJEKIDEL, 2014).

No Brasil, a NBR 5410 no apêndice relativo à proteção contra choques elétricos admite uma tensão de contato limite de 50V em ambiente seco, 25V em ambiente úmido e 12V dentro da água.

Assim, o critério limite adotado para análise será de 50V.

4.3 ESTUDO DE CASO

Para o estudo de caso serão feitas duas análises, as quais visam estudar o comportamento da tensão induzida na tubulação de acordo com a variação da distância entre a LT e a tubulação para diferentes casos.

4.3.1 Análise 1

Na análise 1, a tensão induzida na tubulação de acordo com a variação da distância entre LT e tubulação será estudada nos seguintes casos de LT:

- LT com dois cabos guarda;
- LT com um cabo guarda;
- LT sem cabo guarda.

Para a análise 1, a LT com cabos de fase alinhados horizontalmente e distanciados de 7,6 metros entre si, altura de 12 metros em relação ao solo. Cabo(s) guarda com altura de 20 metros em relação ao solo. Na situação de LT com dois cabos guarda alinhados horizontalmente e distanciados de 6 metros em relação ao eixo central. Tubulação com altura de 1 metro em relação ao solo, raio de 0,3 metros, e distância horizontal irá variar ao longo do estudo.

Resistividade do solo $\rho = 300 \Omega.m$, frequência do sistema $f=60\text{Hz}$. Comprimento de paralelismo entre LT e tubulação será de 4 km. Admitindo uma corrente nominal do sistema de 500 A e balanceadas.

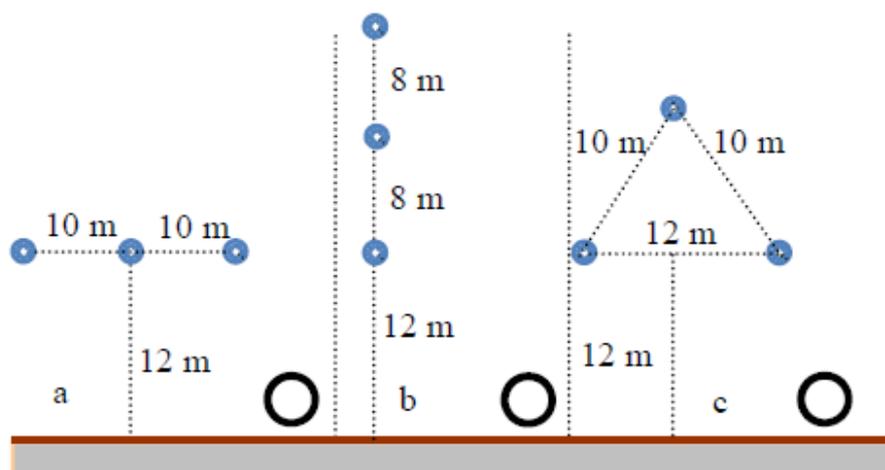
4.3.2 Análise 2

Na análise 2, a tensão induzida na tubulação de acordo com a variação da distância entre LT e tubulação será estudada nos seguintes casos de LT:

- LT disposição horizontal;
- LT disposição vertical;
- LT disposição triangular/delta.

Para a análise 2 foi considerado LT sem cabo guarda. Distâncias da LT são conforme figura 19. Dados de geometria da tubulação e do sistema são os mesmos da análise 1.

Figura 19 - Configurações de geometria de LT. (a) Horizontal. (b) Vertical. (c) Delta.



Fonte: DJEKIDEL, 2014.

4.4 RESULTADOS

A fim de verificar o comportamento da tensão induzida na tubulação para diferentes posições da tubulação, variou-se a distância da tubulação em relação ao eixo central da LT, tanto positivamente como negativamente, ou seja, para a tubulação a esquerda e a direita do eixo de referência da figura 18.

Os gráficos serão obtidos a partir do MATLAB (*MATrix LABoratory*).

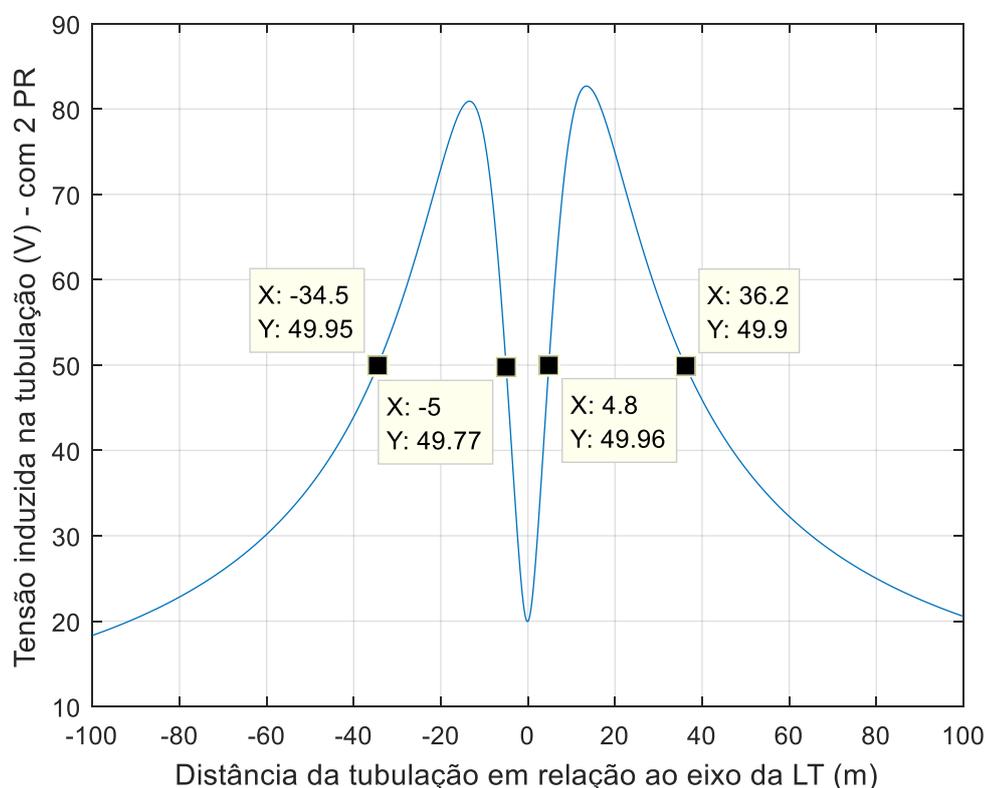
O MATLAB é um *software* interativo de alta performance voltado para o cálculo numérico (WIKIPÉDIA, 2019) desenvolvido pela *MathWorks*. O qual combina um ambiente de área de trabalho ajustado para análise iterativa e processos de design com uma linguagem de programação que expressa matriz e matriz de matemática diretamente (MATHWORKS, 2019). Utilizou-se a versão R2017a.

4.4.1 Análise 1

A primeira análise consiste no estudo da tensão induzida na tubulação de acordo com a distância entre a LT e a tubulação para os três casos: LT com dois cabos guarda; LT com um cabo guarda; e LT sem cabo guarda. Conforme os dados apresentados no tópico 4.3.1.

A figura 20 apresenta o gráfico para o caso da LT com dois cabos guarda, em que a tensão limite de 50V é destaca na mesma figura.

Figura 20 - Gráfico da tensão induzida na tubulação em função variação da posição da tubulação.
Situação da LT com dois cabos guarda. LT na disposição horizontal.



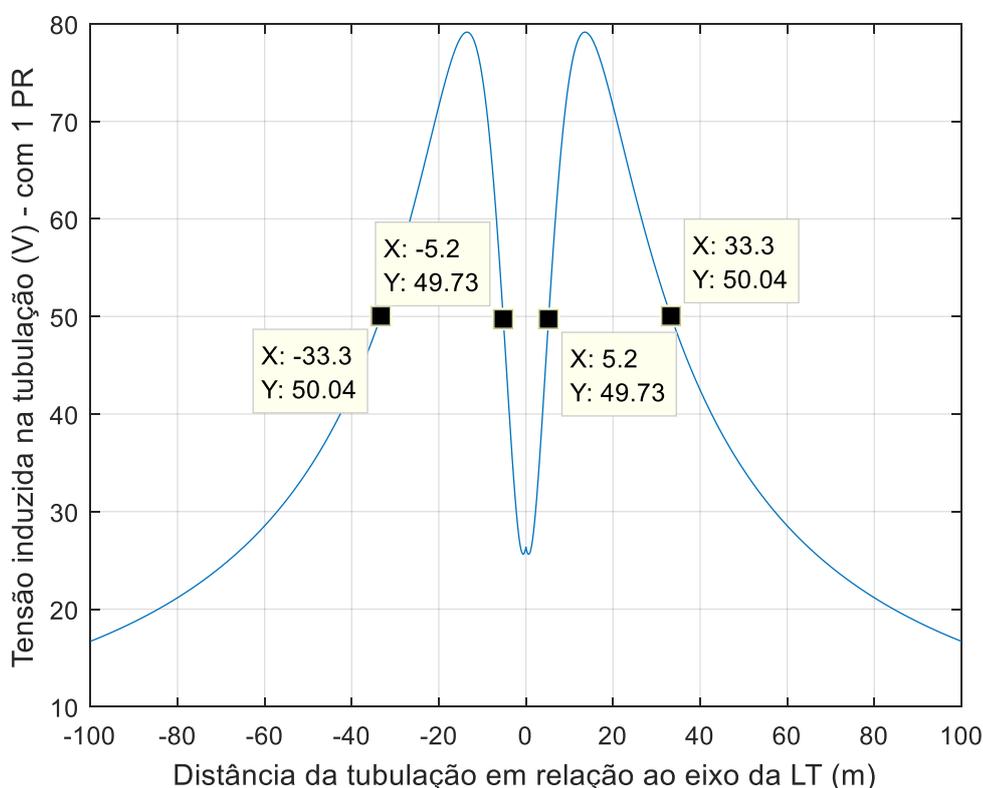
Fonte: A Autora, 2019.

De acordo com a figura 20, verifica-se que a tensão induzida na tubulação é assegurada menor do que 50V para a tubulação: no trecho entre 5 m a esquerda e 4,8 m a direita do eixo de referência; afastada a partir de 36,2 m a direita do eixo de referência; e afastada a partir de 34,5 m a esquerda do eixo de referência.

No gráfico da figura 20, observa-se ainda uma pequena assimetria em relação ao eixo de abcissa zero, o qual equivale ao eixo de referência da figura 18. Essa pequena assimetria é devido ao fato de que a corrente do cabo guarda 2 (I_{G2}) ser um pouco mais do que a corrente do cabo guarda 1 (I_{G1}), segundo resultados de simulação $I_{G2} = 36,9654 A$ e $I_{G1} = 36,3226 A$. Assim, a tensão induzida na tubulação é um pouco maior quando a tubulação está a direita do eixo de referência do que quando está a esquerda do eixo.

A figura 21 apresenta o gráfico para o caso da LT com um cabo guarda, em que a tensão limite de 50V é destaca na mesma figura.

Figura 21 - Gráfico da tensão induzida na tubulação em função variação da posição da tubulação.
Situação da LT com um cabo guarda. LT na disposição horizontal.

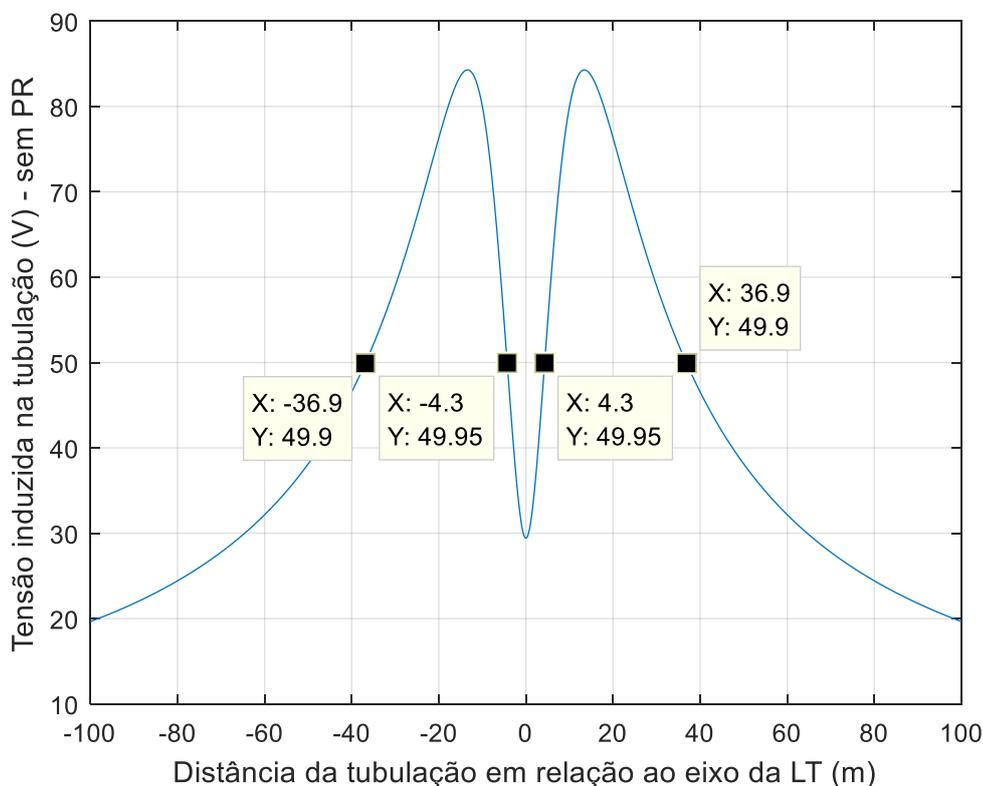


Fonte: A Autora, 2019.

De acordo com a figura 21, verifica-se que a tensão induzida na tubulação é assegurada menor do que 50V para a tubulação: no trecho entre 5,2 m a esquerda e a direita do eixo de referência; afastada a partir de 33,3 m a direita do eixo de referência; e afastada a partir de 33,3 m a esquerda do eixo de referência.

A figura 22 apresenta o gráfico para o caso da LT sem cabo guarda, em que a tensão limite de 50V é destaca na mesma figura.

Figura 22 - Gráfico da tensão induzida na tubulação em função variação da posição da tubulação.
Situação da LT sem cabo guarda. LT na disposição horizontal.

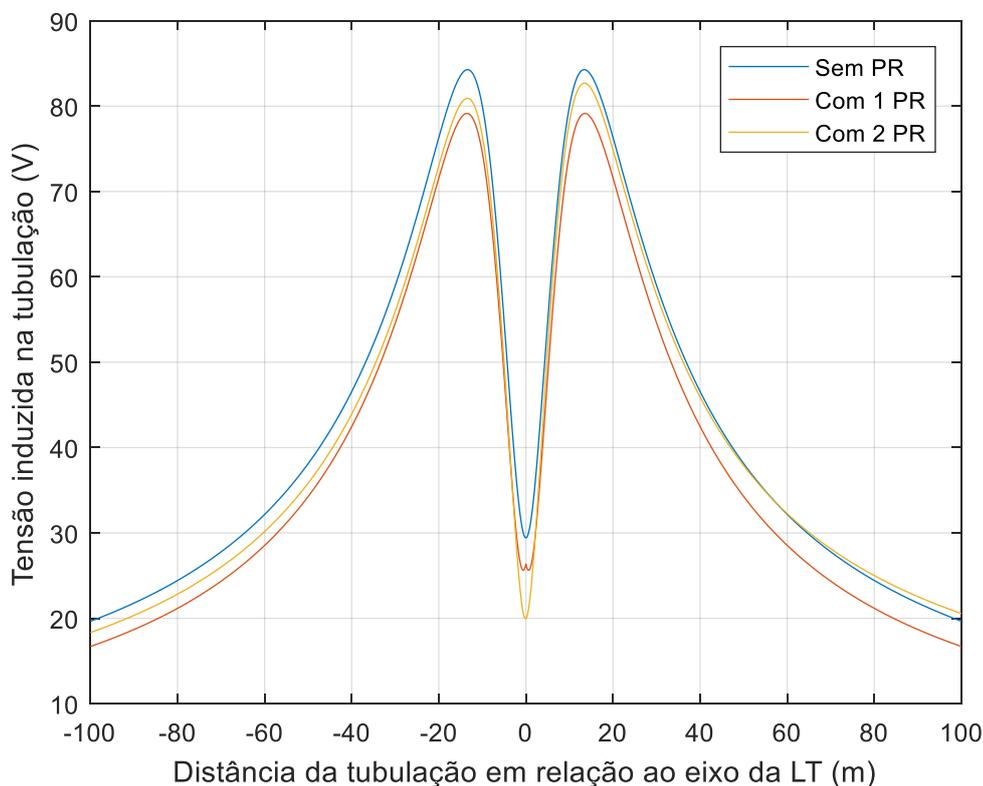


Fonte: A Autora, 2019.

De acordo com a figura 22, verifica-se que a tensão induzida na tubulação é assegurada menor do que 50V para a tubulação: no trecho entre 4,3 m a esquerda e a direita do eixo de referência; afastada a partir de 36,9 m a direita do eixo de referência; e afastada a partir de 36,9 m a esquerda do eixo de referência.

A figura 23 apresenta o comparativo das tensões induzidas relativas às situações das figuras 20, 21 e 22.

Figura 23 - Gráfico da tensão induzida na tubulação em função variação da posição da tubulação. Comparativo das situações da LT com dois cabos guarda, LT com um cabo guarda e LT sem cabo guarda. LT na disposição horizontal.



Fonte: A Autora, 2019.

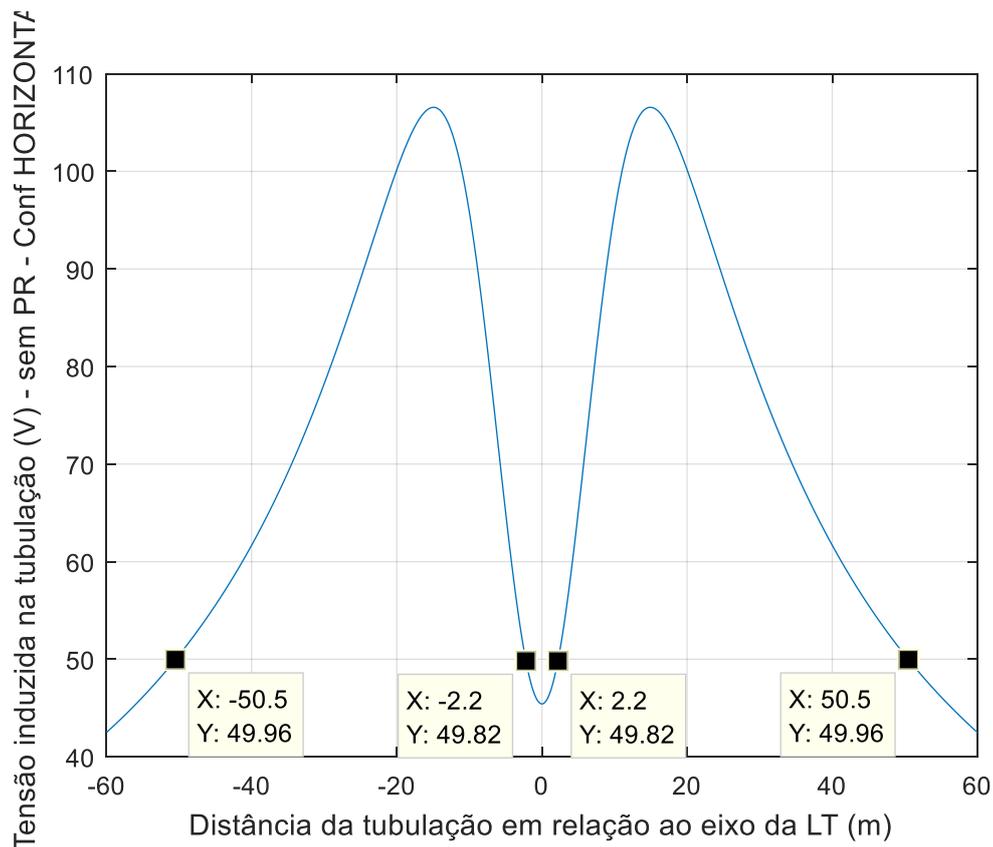
Assim, observa-se que o cabo guarda dependendo da quantidade e posição atua também no sentido de minimizar a tensão induzida na tubulação.

4.4.2 Análise 2

A segunda análise consiste no estudo da tensão induzida na tubulação de acordo com a distância entre a LT e a tubulação para os três casos apresentados na figura 19: LT na disposição horizontal; LT na disposição vertical; e LT na disposição triangular. Conforme os dados apresentados no tópico 4.3.2.

A figura 24 apresenta o gráfico para o caso da LT na disposição horizontal, em que a tensão limite de 50V é destaca na mesma figura.

Figura 24 - Gráfico da tensão induzida na tubulação em função variação da posição da tubulação.
Situação da LT na configuração horizontal. LT sem cabo guarda.

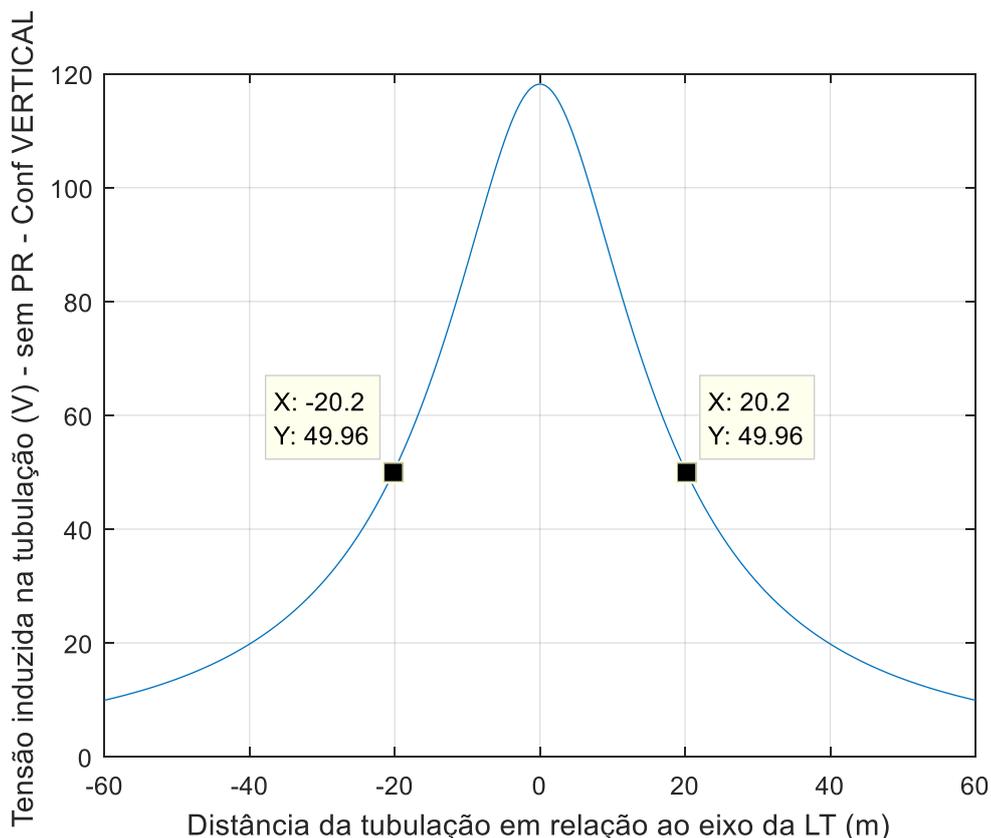


Fonte: A Autora, 2019.

De acordo com a figura 24, verifica-se que a tensão induzida na tubulação é assegurada menor do que 50V para a tubulação: no trecho entre 2,2 m a esquerda e a direita do eixo de referência; afastada a partir de 50,5 m a direita do eixo de referência; e afastada a partir de 50,5 m a esquerda do eixo de referência.

A figura 25 apresenta o gráfico para o caso da LT na disposição vertical, em que a tensão limite de 50V é destaca na mesma figura.

Figura 25 - Gráfico da tensão induzida na tubulação em função variação da posição da tubulação.
Situação da LT na configuração vertical. LT sem cabo guarda.



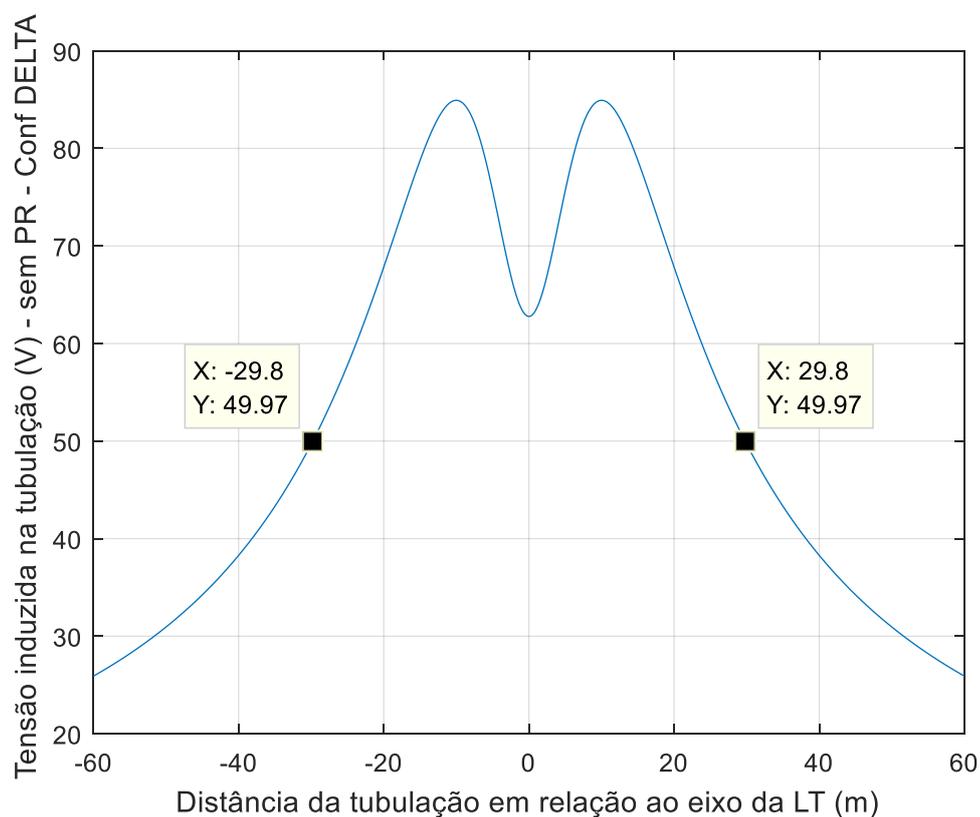
Fonte: A Autora, 2019.

De acordo com a figura 25, verifica-se que a tensão induzida na tubulação é assegurada menor do que 50V para a tubulação: afastada a partir de 20,2 m a direita do eixo de referência; e afastada a partir de 20,2 m a esquerda do eixo de referência.

Observa-se das figuras 24 e 25 que o comportamento da tensão induzida na tubulação em função da variação da posição da tubulação é distinto com a LT nas disposições horizontal e vertical, visto que para a LT horizontal temos que a menor distância absoluta entre a LT e a tubulação obtém-se uma tensão induzida na tubulação que satisfaz o critério de segurança de 50V, e para a LT vertical temos que a menor distância absoluta entre a LT e a tubulação obtém-se uma tensão induzida na tubulação que ultrapassa o critério de segurança de 50V.

A figura 26 apresenta o gráfico para o caso da LT na disposição delta, em que a tensão limite de 50V é destaca na mesma figura.

Figura 26 - Gráfico da tensão induzida na tubulação em função variação da posição da tubulação.
Situação da LT na configuração delta. LT sem cabo guarda.



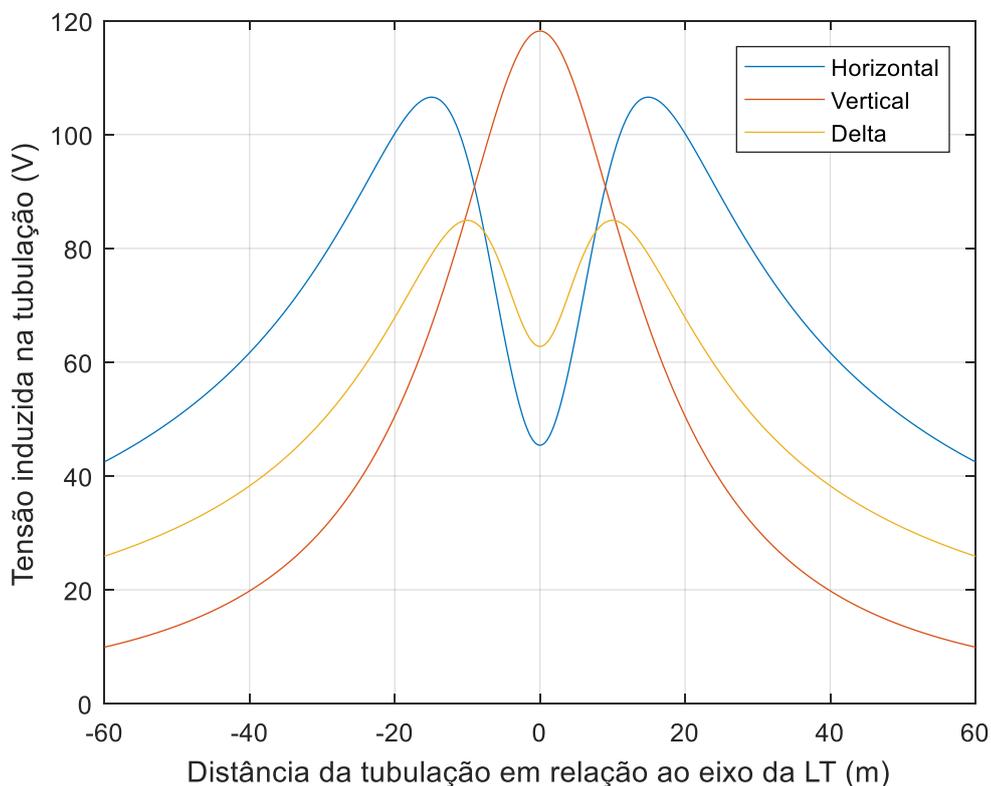
Fonte: A Autora, 2019.

De acordo com a figura 26, verifica-se que a tensão induzida na tubulação é assegurada menor do que 50V para a tubulação: afastada a partir de 29,8 m a direita do eixo de referência; e afastada a partir de 29,8 m a esquerda do eixo de referência.

A figura 27 apresenta o comparativo das tensões induzidas relativas às situações das figuras 24, 25 e 26.

Figura 27 - Gráfico da tensão induzida na tubulação em função variação da posição da tubulação.
Comparativo das configurações de LT: horizontal, vertical e delta.

LT sem cabo guarda.



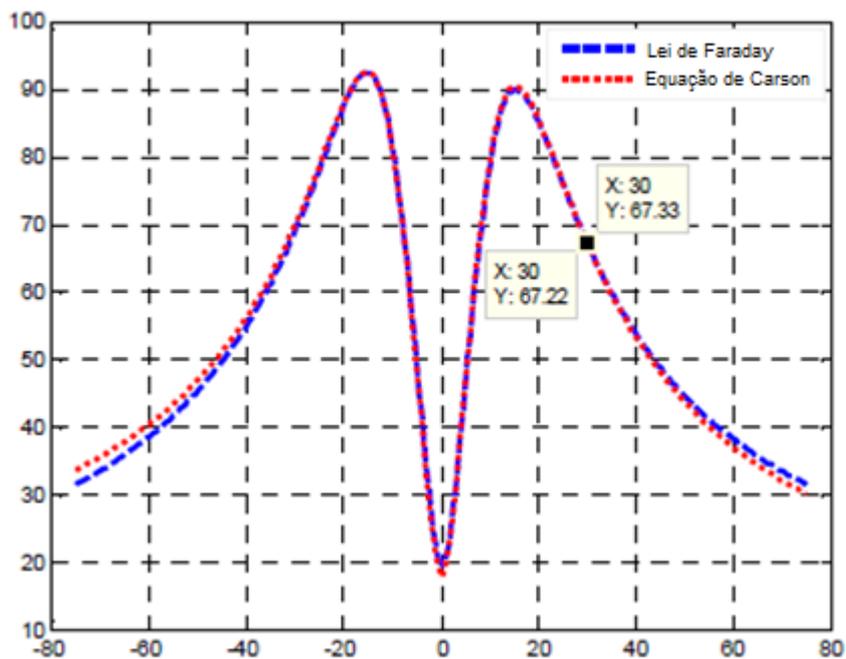
Fonte: A Autora, 2019.

Da figura 27, observa-se que a configuração de LT delta apresenta um comportamento da tensão induzida na tubulação dado pela combinação do comportamento da tensão induzida na tubulação nas configurações de LT horizontal e vertical.

No caso de implantação de uma LT existindo uma tubulação metálica aérea com trecho de paralelismo a LT, a tensão induzida na tubulação devido a LT também deve ser um parâmetro analisado na escolha do tipo de disposição dos cabos fase da LT (horizontal, vertical ou triangular/delta).

A fim de comprovar a eficácia do método utilizado para simulação, a figura 28 apresenta a aplicabilidade comparativa entre o método de Carson e a lei de Faraday.

Figura 28 - Comparação da aplicabilidade entre o método de Carson e a lei de Faraday.



Fonte: DJEKIDEL, 2014 (Adaptado).

Os dados obtidos permitem inferir a necessidade de que o sistema dutoviário seja instalado a uma distância regulamentar em conformidade com os gráficos ilustrados nas figuras 20 a 27.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

As análises dos gráficos da tensão induzida na tubulação *versus* distância entre LT e tubulação permitem localizar a posição adequada da tubulação a fim de assegurar tensão limite de 50 V, para as condições estabelecidas.

Um resultado interessante obtido é o fato de que a tensão induzida ser menor no ponto de menor distância absoluta entre os eixos da LT e da tubulação para a LT na configuração horizontal, como visualizado nas figuras 20 e 22. Porém para a LT e a tubulação com eixo coincidente trata-se de uma posição fisicamente não viável, devido à tubulação ser aérea.

O cabo guarda, além desempenhar sua função em relação a descargas atmosféricas, mostrou-se no estudo realizado como um elemento que pode minimizar as tensões dependendo da quantidade e posição em que é projetado (ver figura 23). Isso porque considerou-se o cabo guarda multiaterrado, o que permite a circulação de corrente no mesmo e conseqüentemente a criação de um campo que também induz tensão na tubulação.

A configuração da geometria utilizada na torre da LT (ver figura 27) tem influência direta na tensão induzida na tubulação, sendo a configuração vertical gera uma tensão induzida de perfil totalmente diferente das demais configurações. Isso porque na configuração vertical os condutores fases estão alinhados num mesmo eixo vertical, o campo resultante é somado nesse ponto central.

Em relação ao método utilizado, o método de Carson proposto mostrou-se compatível com a teoria eletromagnética, coincidindo com os resultados da lei de Faraday (ver figura 28).

Por fim para a coexistência de LT e tubulação metálica numa mesma faixa de servidão, a verificação na fase de projeto da LT, isso caso a tubulação já exista; ou na fase de projeto da tubulação, caso a LT já exista, é primordial a simulação da tensão induzida na tubulação para diferentes posições geométricas, a fim de obter-se a menor tensão induzida na tubulação na condição de regime permanente. Visto que, a tensão induzida está diretamente atrelada a corrente induzida circulante na tubulação, e conseqüente a corrente de choque que pode circular nas pessoas da região próxima e nos operadores da rede dutoviária.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

O estudo de interferências eletromagnéticas entre LT e tubulações metálicas é amplo, visto abrange mais de uma área da engenharia. Assim, são pontuados a seguir alguns tópicos de possíveis trabalhos futuros:

- Análise para condição de falta do sistema elétrico;
- Análise para o caso de tubulação metálica enterrada;
- Análise em relação aos acoplamentos capacitivo e condutivo;
- Análise para LT de corrente contínua;
- Análise para LT subterrânea;
- Análise de verificação das juntas da tubulação, dispositivos conectados e revestimento interno da tubulação;
- Desenvolvimento de *software* voltado especificamente para o estudo da interferência de LT's e tubulações metálicas, a fim de que estudantes e pesquisadores possam realizar estudos específicos, visto que *softwares* semelhantes já existem, porém são privados para serviços de empresas;
- Realizar estudos específicos para cada tipo transporte da tubulação, como adutora, oleoduto, gasoduto, a fim de estudar o comportamento de cada tipo de fluido na situação de interferência com LT's;
- Projetar dispositivo de proteção que atue e avise remotamente situações de risco iminente quanto a interferência de LT afetar tubulações metálicas e seres humanos.

REFERÊNCIAS

ANTT. Transporte Dutoviário. Disponível em: <http://appweb2.antt.gov.br/carga/dutoviario/dutoviario.asp>. Acesso em: 20 jun. 2019.

SESSION, CIGRE. Experience of CHESF concerning interferences between EHV transmission lines and pipelines. Paris. Paper, p. 36-07, 1986. Paris, 1986.

BRITTO, A. G. M. **Modelagem das interferências eletromagnéticas entre linhas de transmissão e tubulações metálicas subterrâneas e análise de impactos**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

CIGRÉ, Guide Concerning influence of high voltage AC power systems on metallic pipelines. CIGRE Working group, v. 36, 1995. Paris, 1995.

CORREIA, D.M. **Interferência de linhas de transmissão sobre tubulações por acoplamentos indutivo e condutivo**. 1993. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 1993.

CORROSIONPEDIA. Corrosion and Electrical Interference in Buried Metallic Structures. Disponível em: <https://www.corrosionpedia.com/corrosion-and-electrical-interference-in-buried-metallic-structures/2/5782>. Acesso em: 17 jun. 2019.

DJEKIDEL, R.; MAHI, D. Calculation and analysis of inductive coupling effects for HV transmission lines on aerial pipelines. **Przeegląd Elektrotechniczny**, v. 90, n. 9, p. 151-156, 2014. Algeria, 2014.

EPE. Web Map EPE. Disponível em: <https://gisepeprd.epe.gov.br/webmapepe/#>. Acesso em: 14 mai. 2019.

EPL. Dutoviário. Disponível em: <https://www.ontl.epl.gov.br/dutoviario>. Acesso em: 18 jun. 2019a.

EPL. Mapas ONTL. Disponível em: <https://www.ontl.epl.gov.br/mapas>. Acesso em: 18 jun. 2019b.

FUCHS, R. D. **Transmissão de Energia Elétrica**. 3. ed. Uberlândia: EDUFU, 2015.

GOMES, L. P. **Sistemas de proteção catódica**. 1. ed. Rio de Janeiro: IEC-Instalações e Engenharia de Corrosão Ltda, 2007.

GUMMOW, R. A. **A/C Interference Guideline Final Report**. 1. ed. Ontario: CEPA, 2014.

KINDERMANN, G.; CAMPAGNOLO, J. M. **Aterramento elétrico**. 3. ed. Porto Alegre: Sagra-DC Luzzatto, 1995.

MATHWORKS. MATLAB. Disponível em: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>. Acesso em: 03 jul. 2019.

MATTOS, T. S. Curso de engenharia de dutos – Sulgás. 2012. Disponível em: <http://sulgas.usuarios.rdc.puc-rio.br>. Acesso em: 18 jun. 2019.

METALICA. As dutovias como boa alternativa de transporte, apesar da predominância do modo rodoviário. Disponível em : <http://www.metalica.com.br/artigos-tecnicos/as-dutovias-como-boa-alternativa-de-transporte-apesar-da-predominancia-do-modo-rodoviario>. Acesso em: 18 jun. 2019.

ONS. O que é o SIN. Disponível em: <http://ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-que-e-o-sin>. Acesso em: 09 mai. 2019a.

ONS. O sistema em números. Disponível em: <http://ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>. Acesso em: 09 mai. 2019b.

PETROBRAS. Gasodutos. Disponível em: <http://www.petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/principais-operacoes/gasodutos/>. Acesso em: 14 mai. 2019.

SADIKU, M. N.O. **Elementos de eletromagnetismo**. 3. ed. Porto Alegre: AMGH, 2004.

SANZ, R. et al. Induced effects caused by overhead transmission lines on metallic structures. **CIGRE Paper 36-202**, 1990. Paris, 1990.

WIKIPÉDIA. MATLAB. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/MATLAB>. Acesso em: 03 jul. 2019.