

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS – UFMG
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA – PPGEE

ADILTON JUNIO LADEIRA PEREIRA

**UM ESTUDO COMPUTACIONAL DO EFEITO DA COMPACTAÇÃO
DOS CONDUTORES SOBRE O CAMPO ELÉTRICO EM ARRANJOS
DE LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO**

BELO HORIZONTE

2023

ADILTON JUNIO LADEIRA PEREIRA

**UM ESTUDO COMPUTACIONAL DO EFEITO DA COMPACTAÇÃO
DOS CONDUTORES SOBRE O CAMPO ELÉTRICO EM ARRANJOS
DE LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO**

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Engenharia de Potência

Linha de Pesquisa: Compatibilidade Eletromagnética e Qualidade de Energia

Orientador: Prof. Ivan José da Silva Lopes, Ph.D.

BELO HORIZONTE

2023

P436e Pereira, Adilton Junio Ladeira.
Um estudo computacional do efeito da compactação dos condutores sobre o campo elétrico em arranjos de linhas aéreas de transmissão [recurso eletrônico] / Adilton Junio Ladeira Pereira. - 2023.
1 recurso online (126 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Ivan José da Silva Lopes.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Apêndices: f. 120-125.

Bibliografia: f. 109-118.
Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Linha de transmissão - Teses.
3. Corona (Eletricidade) - Teses. 4. Campos elétricos - Teses. I. Lopes, Ivan José da Silva. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 621.3(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

FOLHA DE APROVAÇÃO

"UM ESTUDO COMPUTACIONAL DO EFEITO DA COMPACTAÇÃO DOS CONDUTORES SOBRE O CAMPO ELÉTRICO EM ARRANJOS DE LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO"

ADILTON JUNIO LADEIRA PEREIRA

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica. Aprovada em 24 de abril de 2023. Por:

Prof. Dr. Ivan José da Silva Lopes
DEE (UFMG) - Orientador

Prof. Dr. Elson José da Silva
DEE (UFMG)

Prof. Dr. Wallace do Couto Boaventura
DEE (UFMG)



Documento assinado eletronicamente por **Ivan Jose da Silva Lopes, Professor do Magistério Superior**, em 25/04/2023, às 06:58, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Wallace do Couto Boaventura, Professor do Magistério Superior**, em 25/04/2023, às 11:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Elson Jose da Silva, Professor do Magistério Superior**, em 02/05/2023, às 13:48, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **2243658** e o código CRC **22C5BE9D**.

Para Dona Laura.

Agradecimentos

Agradeço por minha saúde, motivação e sabedoria, imprescindíveis à realização deste trabalho. Agradeço aos meus pais, Adilton G. Pereira e Zenilde Ladeira, e ao meu irmão Cláudio Rodrigues, que não mediram esforços para me apoiar e incentivar, cada um do seu modo e maneira. Agradeço aos meus avós, Dona Laura Lima e Sr. Adilson Teotônio, ao meu Tio Paitha e às minhas tias: todos eles, alicerces de minha formação.

Aos meus professores e mestres, com quem convivi ao longo de minha caminhada, também sou grato. Em especial, aos professores da minha formação técnica no CEFET-MG, na Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, bem como aos professores da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Agradeço aos professores Carlos Ermídio Caetano e Thales Alexandre Maia pela disponibilidade e viabilização de acesso ao servidor do Laboratório de Extra-Alta Tensão (LEAT) da UFMG.

De igual forma, agradeço aos meus colegas de classe. Em especial, à Larissa Lima pelo apoio durante as disciplinas cursadas em regime remoto emergencial. Agradeço à Maria Tereza por sua disponibilidade e sua imensa generosidade. Ao meu amigo, Johnny Souza, sou grato pela parceria e amizade firmada desde os tempos de Católica e que se estendem aos dias atuais.

Não poderia deixar de agradecer aos meus colegas de trabalho na *SAE Towers Brasil* e *Tractebel Engineering*, cujas contribuições e ensinamentos acerca do universo da transmissão de energia foram fundamentais para a origem e continuidade desta pesquisa.

Reservo aqui o especial agradecimento ao meu Orientador, Professor Ivan José da Silva Lopes, peça indispensável durante toda a *Travessia*. Agradeço por seu cordial acolhimento e pela aceitação do convite desta orientação. De forma inequívoca, seus conselhos e sua dedicação foram essenciais no desenvolvimento deste trabalho e em seus desdobramentos. Registro, por fim, os meus votos de admiração ao Professor Ivan.

*Por me mostrar a beleza da vida, sou grato, e sempre serei, à minha Flor:
“Meu verso, meu silêncio, minha música!”.*

*“Porque se chamavam homens
Também se chamavam sonhos
E sonhos não envelhecem*

[...]

*E basta contar compasso
E basta contar consigo
Que a chama não tem pavio”*

(Lô Borges / Márcio Borges / Milton Nascimento)

Resumo

As linhas aéreas compactas de transmissão de energia propiciam maiores níveis de transmissão, para uma determinada largura de faixa, como resultado da proposta de redução das distâncias entre fases e expansão dos feixes de condutores. Por outro lado, os valores de campo elétrico sobre a superfície dos cabos, isoladores e ferragens são sensivelmente acentuados nestas configurações, resultando numa avaliação mais criteriosa dos impactos associados ao efeito corona. Por isso mesmo, para atendimento dos requisitos relacionados à emissão eletromagnética, a conformidade técnica dos projetos precisa ser atestada por meio da realização de ensaios laboratoriais. No caso dos arranjos de ferragens e isoladores, verifica-se, dentre outros requisitos, o nível de tensão para início e extinção do corona visual e o valor da Tensão de Rádio Interferência. Pelas limitações de recursos técnicos, financeiros e de espaço, estes ensaios são realizados, em sua grande maioria, em ambientes fechados de laboratórios através de uma reprodução monofásica do sistema de transmissão. Diante desta situação, um problema a ser investigado diz respeito à equivalência entre os valores de campo elétrico verificados nas superfícies dos condutores para a condição de instalação da reprodução monofásica em laboratório e da condição de operação da LT em ambiente trifásico. Para um sistema de transmissão com disposição de fases adjacentes, como o caso das linhas compactas de 500 kV utilizando estruturas do tipo Cross-Rope, o arranjo monofásico de ensaio deve incorporar o efeito dos condutores das fases adjacentes. Pelo procedimento normativo, este efeito de proximidade é simulado por meio da instalação de painéis laterais aterrados com afastamento pré-determinado. Com o objetivo de se avaliar a influência das fases adjacentes e a sua correlação com os níveis máximos de campo elétrico para as condições de teste, esta dissertação apresenta estudos de sensibilidade da reprodução monofásica tomados em função da tensão ensaio e do afastamento de painéis laterais reflexivos. Utilizando ambiente de simulação COMSOL *Multiphysics*[®], os resultados mostram que uma única tensão de ensaio não é capaz de garantir a correspondência para todos os subcondutores do feixe. Para os casos analisados, o afastamento dos painéis reflexivos foi capaz de alterar os níveis de campo elétrico sobre a superfície de subcondutores em até 13%, aproximadamente.

Palavras-chave: Linhas Aéreas Compactas. Efeito Corona. Feixe de Condutores. Intensidade de Campo Elétrico Superficial. COMSOL *Multiphysics*[®]. Planos Reflexivos.

Abstract

Compact AC overhead transmission power lines provide higher transmission levels, for a given right of way, because of the proposal to reduce distances between phases and expand conductor bundles. On the other hand, the electric field on the surface of conductors, insulators and hardware are significantly accentuated in these configurations, resulting in a more careful assessment of the impacts associated with the corona effect. For this reason, to meet the requirements related to electromagnetic emission, the technical conformity of the projects needs to be attested by carrying out indoor laboratory tests. In the case of hardware and insulators sets, it is verified, among other requirements, the voltage level for the onset and extinction of the visual corona effect and the value of the Radio Interference Voltage. Due to the limitations of technical, financial and space resources, these tests are carried out, for the most part, in closed laboratory environments through a single-phase reproduction of the transmission system. Faced with this situation, a problem to be investigated concerns the equivalence between the electric field values verified on the surfaces of the conductors for the installation condition of the single-phase reproduction in the laboratory and the operating condition of the TL in a three-phase environment. For a transmission system with an arrangement of adjacent phases, as is the case with compact lines of 500 kV using Cross-Rope type structures, the single-phase test arrangement must incorporate the effect of the conductors of adjacent phases. According to the normative procedure, this shielding effect is simulated through the installation of reflection planes with predetermined clearance. With the aim of evaluating the influence of adjacent phases and their correlation with the maximum levels of electric field, this dissertation presents sensitivity studies of single-phase reproduction taken as a function of the test voltage and the clearance of reflection planes. Using the COMSOL Multiphysics® environment, the results show that a single test voltage is not able to guarantee correspondence for all subconductors in the conductor bundle. Furthermore, the reflection planes of the reflective panels can alter the electric field levels on the surface of subconductors in the order of 13%.

Keywords: Compact AC Overhead Lines. Corona Effect. Conductors Bundle. Surface Electric Field Strength. COMSOL *Multiphysics*®. Reflection Planes.

Lista de Ilustrações

FIGURA 2.1 – (A) REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO ARRANJO MONOFÁSICO DE ENSAIO DA LT 230 kV <i>SEDRO WOOLLEY – MARCH POINT</i> LINHAS (DIMENSÕES EM MILÍMETROS); (B) FOTO DO ARRANJO INSTALADO EM LABORATÓRIO. ADAPTADO DE (MARUVADA; CHARTIER, 2008B).....	31
FIGURA 2.2 – SILHUETA DA ESTRUTURA COMPACTA DE 500 kV COM SEIS CONDUTORES POR FASE. DIMENSÕES EM MILÍMETROS. DESENHO SEM ESCALA. REPRODUZIDO COM DADOS EXTRAÍDOS DE (ELETROBRÁS, 2012).	36
FIGURA 2.3 – SILHUETA DA ESTRUTURA COMPACTA DE 500 kV COM FEIXES ELÍPTICOS ASSIMÉTRICOS. DIMENSÕES EM MILÍMETROS. DESENHO SEM ESCALA. REPRODUZIDO COM DADOS EXTRAÍDOS DE (GUIMARÃES <i>ET AL.</i> , 2015).	37
FIGURA 2.4 – SILHUETA DA CONFIGURAÇÃO SPLITFEX® DE 500 kV. DIMENSÕES EM MILÍMETROS. DESENHO SEM ESCALA. (HOFFMANN; HOFFMANN, 2019).....	38
FIGURA 2.5 – (A) CARGA PONTUAL Q NAS IMEDIAÇÕES DE UM PLANO CONDUTOR ATERRADO E (B) CONFIGURAÇÃO DE CARGAS EQUIVALENTES PARA APLICAÇÃO DO MÉTODO DAS IMAGENS. REPRODUZIDO DE (MACHADO, 2012).....	40
FIGURA 2.6 – (A) CONFIGURAÇÃO FILAMENTAR DE CARGAS SOBRE UM PLANO ATERRADO; (B) CONFIGURAÇÃO EQUIVALENTE PARA APLICAÇÃO DO MÉTODO DAS IMAGENS.	42
FIGURA 2.7 – INTENSIDADE DE CAMPO ELÉTRICO RESULTANTE NO PONTO M , ACIMA DO SOLO, DEVIDO AO CONDUTOR k E SUA CARGA-IMAGEM (ZAFFANELLA, 2005).	43
FIGURA 2.8 – CONDUTORES CILÍNDRICOS DE DIÂMETRO $d = 2rc$, AFASTADOS, CENTRO A CENTRO, PELA DISTÂNCIA $D = 2x0$ SUBMETIDOS A UM POTENCIAL ELÉTRICO ARBITRÁRIO $V0$ (VIASCIENCE ENGINEERING, 2022)	45
FIGURA 2.9 – CAMPO ELÉTRICO DEVIDO A UMA LINHA DE CARGAS λ NA PERIFERIA DE UMA CIRCUNFERÊNCIA. ADAPTADO DE (MARUVADA, 2000).	47
FIGURA 2.10 – CAMPO ELÉTRICO RESULTANTE SOBRE A SUPERFÍCIE DO SUBCONDUTOR 1. ADAPTADO DE (MARUVADA, 2000).....	48
FIGURA 3.1 – REPRESENTAÇÃO DO (A) DOMÍNIO GENÉRICO DE ESTUDO E DO (B) DOMÍNIO DE ELEMENTO INFINITO (DEI)	58
FIGURA 3.2 – SILHUETA DA ESTRUTURA TÍPICA DE UMA LT CONVENCIONAL DE 500 kV COM FEIXE TRIANGULAR DE SUBCONDUTORES. DIMENSÕES EM METROS. DESENHO SEM ESCALA. ELABORADO COM DADOS EXTRAÍDOS DE (GUIMARÃES, 2005).....	58
FIGURA 3.3 – MODELO NUMÉRICO DA LT CONVENCIONAL DE 500 kV COM FEIXE TRIANGULAR DE SUBCONDUTORES.....	60
FIGURA 3.4 – PERFIL LATERAL DE CAMPO ELÉTRICO DA LT DE 500 kV PARA DIFERENTES DOMÍNIOS GENÉRICOS DE ESTUDO	61
FIGURA 3.5 – PERFIL LATERAL DE CAMPO ELÉTRICO DA LT DE 500 kV CONSIDERANDO OS DOMÍNIOS DE ELEMENTO INFINITO (DEI).....	63

FIGURA 3.6 – PERFIL LATERAL DE CAMPO ELÉTRICO DA LT CONVENCIONAL DE 500 kV.	64
FIGURA 3.7 – CURVAS EQUIPOTENCIAIS E LINHAS DE CAMPO ELÉTRICO DA LT CONVENCIONAL DE 500 kV.	65
FIGURA 3.8 – MODELO NUMÉRICO TRIDIMENSIONAL DA LT CONVENCIONAL DE 500 kV DE FEIXE TRIANGULAR DE SUBCONDUTORES.	66
FIGURA 3.9 – PERFIL LATERAL DE CAMPO ELÉTRICO DA LT DE 500 kV CONSIDERANDO O MODELO BIDIMENSIONAL E TRIDIMENSIONAL.	67
FIGURA 3.10 – DISPOSIÇÃO GEOMÉTRICA DE UM SISTEMA AÉREO TRIFÁSICO DE 500 kV COM CINCO CONDUTORES (GOMES JR., 1995 APUD PAGANOTTI, 2012).	68
FIGURA 3.11 – INTENSIDADE MÁXIMA DE CAMPO ELÉTRICO SUPERFICIAL DO SISTEMA AÉREO TRIFÁSICO DE 500 kV COM CINCO CONDUTORES.....	69
FIGURA 3.12 – INTENSIDADE MÁXIMA DO CAMPO ELÉTRICO NA SUPERFÍCIE DOS SUBCONDUTORES DA FASE CENTRAL DA LINHA COMPACTA DE 500 kV COM FEIXE DE 600 MM.	72
FIGURA 3.13 – INTENSIDADE MÁXIMA DE CAMPO ELÉTRICO SUPERFICIAL EM FUNÇÃO DA ALTURA DO FEIXE CENTRAL DA LINHA COMPACTA DE 500 kV.	73
FIGURA 4.1 – SILHUETA TÍPICA DA LT 230 kV <i>SEDRO WOOLLEY – MARCH POINT</i> . DESENHO SEM ESCALA. DIMENSÕES EM MILÍMETROS. ADAPTADO DE (MARUVADA; CHARTIER, 2008A).	78
FIGURA 4.2 – DISTRIBUIÇÃO DA INTENSIDADE DE CAMPO ELÉTRICO SUPERFICIAL SOBRE OS CONDUTORES CA <i>NARCISSUS</i> DA LT 230 kV, CONSIDERANDO A CONDIÇÃO DE INSTALAÇÃO TRIFÁSICA E TENSÃO DE OPERAÇÃO IGUAL A $v_t = 240 \text{ kVrms}$	79
FIGURA 4.3 – (A) REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO ARRANJO MONOFÁSICO DE ENSAIO DA LT 230 kV <i>SEDRO WOOLLEY – MARCH POINT</i> LINHAS (DIMENSÕES EM MILÍMETROS); (B) FOTO DO ARRANJO INSTALADO EM LABORATÓRIO. ADAPTADO DE (MARUVADA; CHARTIER, 2008B).....	80
FIGURA 4.4 – INTENSIDADE DE CAMPO ELÉTRICO SUPERFICIAL DO ARRANJO MONOFÁSICO DE ENSAIO EM FUNÇÃO DA TENSÃO APLICADA.....	81
FIGURA 4.5 – (A) ESTRUTURA DELTA CONVENCIONAL DE 500 kV E (B) ESTRUTURA COMPACTA DO TIPO CROSS-ROPE. DIMENSÕES EM METROS. DESENHO SEM ESCALA. REPRODUZIDO COM DADOS EXTRAÍDOS DE (CORSO, 2018; CIGRE, 2020).	85
FIGURA 4.6 – EFEITO DA COMPACTAÇÃO DA DISTÂNCIA ENTRE AS FASES, DL , DOS SISTEMAS AÉREOS CONVENCIONAL E COMPACTO, SOBRE O PERFIL TRANSVERSAL DE CAMPO ELÉTRICO AO NÍVEL DO SOLO.....	86
FIGURA 4.7 – EFEITO DA COMPACTAÇÃO DA DISTÂNCIA ENTRE AS FASES, DL , DOS SISTEMAS AÉREOS CONVENCIONAL E COMPACTO, SOBRE O VALOR MÁXIMO DA INTENSIDADE DE CAMPO ELÉTRICO SUPERFICIAL DOS SUBCONDUTORES.....	87
FIGURA 4.8 – EFEITO DA COMPACTAÇÃO DA DISTÂNCIA ENTRE AS FASES, DL , SOBRE O VALOR MÁXIMO DA INTENSIDADE DE CAMPO ELÉTRICO NA SUPERFÍCIE DOS SUBCONDUTORES DA LINHA COMPACTA DE 500 kV.	88

FIGURA 4.9 – EFEITO DA EXPANSÃO DO FEIXE DE SUBCONDUTORES, S , SOBRE O VALOR MÁXIMO DA INTENSIDADE DE CAMPO ELÉTRICO NA SUPERFÍCIE DOS SUBCONDUTORES DA LINHA CONVENCIONAL DE 500 kV.	89
FIGURA 4.10 – REPRESENTAÇÃO COMPARATIVA ENTRE OS ARRANJOS TRIFÁSICO E MONOFÁSICO DE ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DO POSICIONAMENTO DOS PAINÉIS LATERAIS.	91
FIGURA 4.11 – SILHUETA DA ESTRUTURA COMPACTA DE 500 kV COM SEIS CONDUTORES POR FASE. DIMENSÕES EM MILÍMETROS. DESENHO SEM ESCALA. REPRODUZIDO COM DADOS EXTRAÍDOS DE (ELETROBRÁS, 2012).	92
FIGURA 4.12 – (A) INTENSIDADE MÁXIMA DO CAMPO ELÉTRICO NA SUPERFÍCIE DOS SUBCONDUTORES DA FASE CENTRAL DA LINHA COMPACTA DE 500 kV COM FEIXE DE 600 MM; (B) LINHAS EQUIPOTENCIAIS SOBRE O ARRANJO MONOFÁSICO DE ENSAIO CONSIDERANDO O EFEITO DOS PAINÉIS LATERAIS REFLEXIVOS; (C) LINHAS EQUIPOTENCIAIS SOBRE O ARRANJO DESCONSIDERANDO O EFEITO DOS PAINÉIS LATERAIS REFLEXIVOS;.....	94
FIGURA 4.13 – COMPARAÇÃO DOS NÍVEIS MÁXIMOS DE CAMPO ELÉTRICO SUPERFICIAL SOBRE OS SUBCONDUTORES PARA TRÊS DIFERENTES CONDIÇÕES DE SERVIÇO: INSTALAÇÃO TRIFÁSICA; ARRANJO MONOFÁSICO DE ENSAIO POSICIONADO ENTRE OS PAINÉIS REFLEXIVOS E ARRANJO MONOFÁSICO DE ENSAIO INSTALADO SEM OS PAINÉIS REFLEXIVOS.....	95
FIGURA 4.14 – COMPORTAMENTO DOS NÍVEIS MÁXIMOS DE CAMPO ELÉTRICO SUPERFICIAL SOBRE OS SUBCONDUTORES EM FUNÇÃO DO AFASTAMENTO DOS PAINÉIS LATERAIS REFLEXIVOS, w	96
FIGURA 4.15 – (A) REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO ARRANJO MONOFÁSICO DE ENSAIO DA LPNE 500 kV E (B) FOTO DO ARRANJO INSTALADO EM LABORATÓRIO DURANTE O ENSAIO DE CORONA VISUAL	98
FIGURA 4.16 – COMPORTAMENTO DOS NÍVEIS MÁXIMOS DE CAMPO ELÉTRICO SUPERFICIAL SOBRE OS SUBCONDUTORES EM FUNÇÃO DA TENSÃO MONOFÁSICA DE ENSAIO APLICADA.....	99

Lista de Tabelas

TABELA 3.1 – ERRO PERCENTUAL DE SIMULAÇÃO ASSOCIADO AO CÁLCULO DO CAMPO ELÉTRICO PARA DIFERENTES DOMÍNIOS DE ESTUDO	62
TABELA 3.2 – ESFORÇO COMPUTACIONAL DOS MODELOS BIDIMENSIONAL E TRIDIMENSIONAL.	67
TABELA 3.3 – INTENSIDADE MÁXIMA DE CAMPO ELÉTRICO SUPERFICIAL E ERRO PERCENTUAL DO SISTEMA DE CINCO SUBCONDUTORES	70
TABELA 4.1 – COMPARAÇÃO DOS NÍVEIS MÁXIMOS DE CAMPO ELÉTRICO SUPERFICIAL (kV/cm) SOBRE O SUBCONDUTOR DA FASE C DA LT 230 kV <i>SEDRO WOOLLEY – MARCH POINT</i> PARA DUAS CONDIÇÕES DE INSTALAÇÃO	81
TABELA 4.2 – COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES DE GRADIENTE ELÉTRICO NOMINAL E OS NÍVEIS MÁXIMOS DE CAMPO ELÉTRICO SUPERFICIAL SOBRE O SUBCONDUTOR DA FASE C DA LT 230 kV <i>SEDRO WOOLLEY – MARCH POINT</i>	84
TABELA 4.3 – COMPARAÇÃO DOS NÍVEIS MÁXIMOS DE CAMPO ELÉTRICO SUPERFICIAL SOBRE OS SUBCONDUTORES DAS TRÊS DIFERENTES CONDIÇÕES DE SERVIÇO.	93
TABELA 4.4 – COMPARAÇÃO DOS NÍVEIS MÁXIMOS DE CAMPO ELÉTRICO SUPERFICIAL SOBRE OS SUBCONDUTORES EM FUNÇÃO DO AFASTAMENTO DOS PAINÉIS REFLEXIVOS, w	96
TABELA 4.5 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS DO ENSAIO DE CORONA VISUAL DE UM ARRANJO DE LPNE DE 500 kV COM FEIXE REGULAR DE SEIS CABOS CONDUTORES (CEB, 2014)	98
TABELA 4.6 – COMPARAÇÃO DOS NÍVEIS MÁXIMOS DE CAMPO ELÉTRICO SUPERFICIAL SOBRE OS SUBCONDUTORES DAS TRÊS DIFERENTES CONDIÇÕES DE SERVIÇO.	99
TABELA A.1 – REGISTROS DE SIMULAÇÃO DOS MODELOS BIDIMENSIONAIS	120
TABELA A.2 – REGISTROS DE SIMULAÇÃO DOS MODELOS TRIDIMENSIONAIS	123

Lista de Abreviaturas e Siglas

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BPA	<i>Bonneville Power Administration</i>
CA	Condutor de Alumínio
CAA	Condutor de Alumínio com Alma de Aço
CEB	<i>Centre d'Essais de Bazet</i>
CEM	Compatibilidade Eletromagnética
CEP	Condutor Elétrico Perfeito
CEPEL	Centro de Pesquisas em Energia Elétrica
CICA	<i>Composite Insulator Cross-Arm</i>
CIGRE	<i>Conseil International des Grands Réseaux Électriques</i>
CISPR	<i>Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques</i>
DEI	Domínio de Elemento Infinito
DRA	Densidade Relativa do Ar
EEI	<i>Edison Electric Institute</i>
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FEMM	<i>Finite Element Method Magnetics</i>
HSIL	<i>High Surge Impedance Loading</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IEM	Interferência Eletromagnética
IREQ	<i>Institut de Recherche d'Hydro Québec</i>
LPNE	Linha de Potência Natural Elevada
LT	Linha Aérea de Transmissão de Energia
MDF	Método das Diferenças Finitas
MEC	Método dos Elementos de Contorno
MEF	Método dos Elementos Finitos
MIS	Método das Imagens Sucessivas
MME	Ministério de Minas e Energia
MoM	Método dos Momentos
MSC	Método da Simulação de Cargas

NEMA	<i>National Electrical Manufacturers Association</i>
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PB	Projeto Básico de Linha Aérea de Transmissão
PML	<i>Perfectly Matched Layer</i>
RA	Ruído Audível
RI	Rádio Interferência
RMA	<i>Radio Manufacturers Association</i>
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SIN	Sistema Interligado Nacional
SIL	<i>Surge Impedance Loading</i>
TAESA	Transmissora Aliança de Energia Elétrica S.A
TRI	Tensão de Rádio Interferência

Lista de Símbolos

Símbolo	Descrição	Unidade
$\hat{\mathbf{a}}_x$	Vetor unitário na direção do eixo cartesiano x	
$\hat{\mathbf{a}}_y$	Vetor unitário na direção do eixo cartesiano y	
$\hat{\mathbf{a}}_z$	Vetor unitário na direção do eixo cartesiano z	
$\hat{\mathbf{a}}_\rho$	Vetor unitário na direção do eixo cilíndrico ρ	
$\hat{\mathbf{a}}_r$	Vetor unitário na direção radial	
λ	Densidade linear de cargas	$[C/m]$
ρ_v	Densidade volumétrica de cargas	$[C/m^3]$
$d\vec{S}$	Vetor diferencial de área	
dv	Elemento diferencial de volume	
\vec{E}	Vetor Intensidade de Campo Elétrico	$[V/m]$
ϵ_0	Permissividade elétrica do espaço livre $\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12} C^2/Nm^2$	
δ_e	Erro percentual	$[\%]$
$\bar{\delta}_e$	Erro percentual médio	$[\%]$
v_n	Tensão de Ensaio, eficaz, fase-terra	$[kV]$
w_n	Afastamento dos painéis reflexivos	$[m]$

Sumário

1	Introdução.....	18
1.1	Considerações Iniciais	18
1.2	Motivação e Relevância.....	20
1.3	Objetivos.....	22
1.4	Metodologia	22
1.5	Produção Bibliográfica	23
1.6	Organização do Texto	23
2	Revisão Bibliográfica	27
2.1	Considerações Iniciais	27
2.2	Efeito Corona	28
2.2.1	Avaliação Experimental dos Arranjos Monofásicos	29
2.2.2	Estado da Arte	32
2.3	Linhas de Potência Natural Elevada (LPNE)	34
2.4	Intensidade de Campo Elétrico	39
2.4.1	Campo Elétrico nas Imediações de uma Linha Aérea.....	41
2.4.2	Campo Elétrico na Superfície de Condutores.....	44
2.5	Formulação do Problema em termos do Potencial Escalar Elétrico	50
2.5.1	Método dos Elementos Finitos	52
2.6	Considerações Finais	54
3	Modelos Computacionais das Linhas Aéreas de Transmissão	56
3.1	Considerações Iniciais	56
3.2	Domínio Artificial Bidimensional	57
3.2.1	Avaliação dos Domínios Genéricos	60
3.2.2	Avaliação do Domínio de Elemento Infinito.....	63

3.3	Comportamento do Campo Elétrico Distante	64
3.3.1	Comparação entre Modelos Bidimensionais e Tridimensionais	65
3.4	Comportamento do Campo Elétrico Superficial.....	68
3.4.1	Sistema com Cinco Subcondutores por Fase.....	68
3.4.2	Sistema com Seis Subcondutores por Fase	71
3.5	Considerações Finais	74
4	Estudos de Caso.....	76
4.1	Considerações Iniciais	76
4.2	LT 230 kV <i>Sedro Woolley – March Point</i>	77
4.3	Efeito da Compactação das Fases e Expansão dos Subcondutores	84
4.4	Reprodução Monofásica de Ensaio e Estudos de Sensibilidade.....	90
4.4.1	Sensibilidade em função da presença dos painéis reflexivos	92
4.4.2	Sensibilidade em função do afastamento dos painéis reflexivos.....	95
4.4.3	Sensibilidade em função da tensão de ensaio.....	97
4.5	Considerações Finais	100
5	Conclusões e Propostas de Continuidade de Pesquisa.....	103
5.1	Conclusões	103
5.2	Propostas de Continuidade de Pesquisa.....	106
	Referências	109
	Apêndice A – Registros de Simulação	120

1 Introdução

1.1 Considerações Iniciais

As atuais concepções dos projetos eletromecânicos das linhas aéreas de transmissão (LT) procuram aliar o aumento da capacidade de transmissão à disponibilidade técnico-econômica de arranjos condutores e estruturas suportes compatíveis aos requisitos normativos vigentes. Ao mesmo tempo, os custos de instalação de novos empreendimentos de transmissão reivindicam a redução das dimensões físicas dos cabos e arranjos isolantes, estruturas suportes e faixas de passagem.

Destaca-se que as perdas elétricas nos cabos condutores, por exemplo, compõem a parcela do custo total de um empreendimento de transmissão (FRONTIN, 2010). Se por um lado, para um mesmo nível de tensão de operação, a redução de área da seção transversal dos condutores favorece a elevação das perdas elétricas pelo Efeito Joule, por outro lado, condutores de menores dimensões propiciam a ocorrência do efeito corona, cujos impactos são determinantes para a definição da largura da faixa de passagem da LT. Evidencia-se, desta forma, o compromisso técnico-econômico durante a determinação do cabo condutor de uma LT (MARUVADA, 2000).

As características e os requisitos técnicos discriminados nos Procedimentos de Rede do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) definem o padrão de desempenho mínimo a ser atingido pelos empreendimentos brasileiros de transmissão de alta e extra-alta tensão (ONS, 2022). De maneira abrangente, estão ali reunidos os requisitos elétricos, mecânicos e eletromecânicos da linha. Em sua versão reestruturada, o item 3 do Submódulo 2.7 dos Procedimentos de Rede apresenta os requisitos elétricos mínimos das linhas aéreas em corrente alternada com classe de tensão entre 230 kV e 765 kV, além das linhas em corrente contínua e subterrâneas.

Por outro lado, para atendimento da Resolução Normativa N.º 915 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a intensidade de campo elétrico proveniente de

uma LT é também um dos aspectos técnicos observados durante a fase de Projeto Básico (PB). Avalia-se, neste caso, o valor de campo no interior e no limite da faixa de servidão da LT, considerando uma altura de um 1,5 m acima do nível do solo. No interior da faixa de servidão, avalia-se a exposição da população ocupacional, e no limite da faixa de servidão, avalia-se a exposição do público em geral (ANEEL, 2021).

Como importante fonte de perdas elétricas em linhas de alta e extra-alta tensão, o efeito corona está associado à propagação de ruídos audíveis, à emissão de ondas interferentes de alta frequência e a descargas luminosas (corona visual). Em LTs com tensão nominal de operação acima de 230 kV, as descargas parciais oriundas do efeito corona são responsáveis pelas perturbações de alta frequência, sendo um fator limitante de projeto durante a escolha econômica dos cabos condutores (LEÃO, 2008). Para atendimento aos requisitos relacionados à emissão eletromagnética, é expresso que os cabos, acessórios e ferragens das cadeias de isoladores não apresentem corona visual à tensão máxima operativa em 90% do tempo de operação dos sistemas aéreos de transmissão (ONS, 2022).

Do ponto de vista regulatório e de desempenho sistêmico, evidencia-se a importância da determinação dos valores de campo elétrico originados pelos sistemas aéreos de transmissão. Seja na superfície de subcondutores, ou em suas imediações ao nível do solo, os valores de campo elétrico orientam, portanto, a tomada de decisão do projetista, cujos resultados refletem na escolha do cabo condutor, dimensões dos feixes de subcondutores, distâncias de segurança da altura cabo-solo e, por último, na determinação da largura da faixa de servidão das LTs (FUCHS, 2015).

Este contexto está especialmente caracterizado dentro dos conceitos das linhas aéreas compactas, cujas premissas de projeto remontam da crescente necessidade de maiores níveis de capacidade de transmissão, para uma determinada largura de faixa. Este efeito de compactação pode ser obtido empregando materiais e técnicas mais eficazes, como por exemplo, estruturas suportes com mísulas isolantes, bem como técnicas que reduzem os níveis de sobretensões sobre as fases. Como resultado inerente da redução das distâncias entre fases e a expansão dos feixes, os valores de campo elétrico sobre a superfície dos cabos condutores, isoladores e ferragens são sensivelmente acentuados, o que leva à necessidade de uma avaliação criteriosa dos impactos associados ao efeito corona (CIGRE, 2020).

1.2 Motivação e Relevância

Historicamente, a concepção e o projeto eletromecânico destinado à mitigação do efeito corona sob os arranjos isolantes das LTs de alta e extra-alta tensão seguem as premissas ditadas pelos processos empíricos e qualitativos de desenvolvimento. Uma compreensão generalista do comportamento do campo elétrico nas proximidades de superfícies irregulares, a experiência com produtos já colocados em operação, associada às técnicas clássicas de blindagem equipotencial por meio de anéis e toroides, ainda são os recursos tradicionalmente disponíveis aos projetistas (DOUGLASS; STEWART, 2008).

Por isso mesmo, a conformidade técnica dos projetos precisa ser atestada por meio da realização de ensaios laboratoriais. No caso dos arranjos de ferragens e isoladores, verifica-se, dentre outros requisitos, o nível de tensão, à frequência industrial, para início e extinção do fenômeno de corona visual e o valor da Tensão de Rádio Interferência (TRI), em uma frequência especificada, expressa em $dB_{\mu V}$ (MARUVADA; CHARTIER, 2008b).

Naturalmente, seria desejável que as medições e a verificação experimental do efeito corona sob os arranjos isolantes e cabos condutores fossem realizadas nas mesmas condições de instalação e operação da LT. Assim, os efeitos de campo das fases adjacentes, estruturas suportes, associados às condições ambientais, seriam incorporados aos resultados. Entretanto, por limitações de recursos técnicos, financeiros e de espaço físico, estes ensaios são realizados, em sua grande maioria, em ambientes fechados de laboratórios através de uma reprodução monofásica do sistema de transmissão sob estudo. Adicionalmente, com a baixa disponibilidade de laboratórios para atendimento ao mercado industrial, os ensaios de alta tensão são particularmente dispendiosos e com agendas restritas. As dificuldades acentuam-se quando da necessidade de repetição de testes decorrentes de uma reprovação, ou mesmo para implementação de pesquisa e desenvolvimento tecnológico (KUFFEL *et al.*, 2008).

Considerando, ainda, as particularidades de um ambiente de laboratório de alta tensão, verificam-se, invariavelmente, interferências com os seus equipamentos internos, como as fontes e transformadores, com os divisores capacitivos de medição, e com as próprias paredes, teto e piso. Diante desta situação, o primeiro problema a ser investigado

diz respeito à equivalência entre os valores de campo elétrico verificados nas superfícies dos condutores para as duas condições de instalação: a reprodução monofásica instalada em ambiente de laboratório, bem como na condição de instalação trifásica, em ambiente aberto de operação da LT.

Considerando a avaliação de arranjos das linhas compactas de alta e extra-alta tensão, este cenário merece especial atenção. Para um sistema de transmissão trifásico com disposição geométrica de fases adjacentes, como é o caso das linhas compactas de 500 kV encontradas no sistema elétrico brasileiro, o arranjo monofásico de ensaio deve incorporar o efeito dos condutores destas fases adjacentes. Pelo procedimento normativo, este efeito de proximidade sobre o arranjo monofásico deve ser simulado por meio da instalação de painéis laterais aterrados com afastamento pré-determinado (IEC, 1997).

Uma vez que o processo de formação e início do efeito corona está intimamente relacionado ao campo elétrico na superfície dos subcondutores e ferragens, o procedimento normativo de ensaio descrito pelo Método da Tensão Determinada (IEC, 1997), além de um posicionamento inadequado dos planos laterais, pode levar a resultados incompatíveis. Neste sentido, os autores (OLSEN; TUOMINEN; LEMAN, 2018) sinalizam que uma simulação computacional pode ser uma alternativa eficaz para a substituição de testes em laboratório, uma vez que os resultados de simulação exibem graus de precisão que são comparáveis, ou até melhores, do que aqueles encontrados nos ensaios.

A consolidação das técnicas numéricas de cálculo, aliada à crescente e expressiva disponibilidade de processamento e memória, proporcionou o surgimento de programas computacionais destinados à modelagem numérica que permitem a reprodução e simulação de sistemas físicos, como o caso das linhas aéreas de transmissão. Em sua grande maioria, apresentam interfaces acessíveis ao público especializado para cálculo e avaliação das principais grandezas físicas envolvidas. É neste ambiente que surge, então, o conceito da Multifísica, disciplina que abrange o estudo, por meio de simulações computacionais, das múltiplas propriedades e fenômenos físicos que estão integrados em ambiente natural (COMSOL, 2022b). É certo que estas ferramentas de cálculo destinadas à interpretação e análise dos fenômenos eletrostáticos de alta tensão tornam-se recursos indispensáveis ao projetista eletromecânico de LTs.

1.3 Objetivos

O objetivo desta dissertação compreende o cálculo dos campos elétricos gerados por sistemas aéreos de transmissão de energia e a determinação da relação entre campos gerados por sistemas trifásicos e reproduções monofásicas em ambiente fechado de laboratório. Assim, investiga-se a influência de planos laterais reflexivos, descritos pelos procedimentos normativos, sobre o valor do campo elétrico crítico superficial dos subcondutores agrupados em feixes.

Para alcançar o objetivo principal deste trabalho, os objetivos específicos compreendem:

- Implementar e validar modelos, em ambiente COMSOL *Multiphysics*[®], que permitam o cálculo da intensidade de campo elétrico na superfície de subcondutores para diferentes configurações de feixes e condições de aplicação;
- Realizar estudos de caso com linhas aéreas compactas de 230 kV e 500 kV com vistas à determinação da equivalência entre uma reprodução monofásica de ensaio, com base em indicações normativas, a partir do posicionamento dos painéis laterais reflexivos.

1.4 Metodologia

O pacote computacional COMSOL *Multiphysics*[®] é utilizado para subsidiar os cálculos de campo elétrico durante a elaboração desta pesquisa. Desta forma, modelos bidimensionais de estudo são desenvolvidos com vistas a representar os sistemas aéreos de transmissão. Do ponto de vista do ambiente de simulação, uma região de espaço aberto de extensão idealmente infinita precisa ser delimitada por fronteiras numéricas fictícias. Desta forma, o trabalho realiza, inicialmente, uma avaliação de sensibilidade dos tamanhos dos domínios de estudo sem prejuízo aos resultados, precisão e tempo de processamento. Em seguida, a validação dos modelos é realizada por meio de comparações com medições em linhas de transmissão reais e resultados de simulações indicados na literatura.

Propõe-se, com a ferramenta de cálculo citada, três estudos de caso associados ao cálculo e avaliação do campo elétrico superficial em diferentes condições de aplicação.

Deste modo, as simulações contemplam tanto a condição de operação de diferentes tipos de arranjos e geometrias, sejam eles instalados em ambiente trifásico de operação, avaliando a influência das fases adjacentes, bem como a condição monofásica de laboratório. Com o objetivo de se avaliar a correlação entre os níveis máximos de campo elétrico superficial para duas condições de aplicação, estudos de sensibilidade da reprodução monofásica são tomados em função do afastamento de painéis laterais reflexivos, bem como em função da tensão de ensaio aplicada.

1.5 Produção Bibliográfica

Como resultado das pesquisas desenvolvidas para a elaboração desta dissertação, o seguinte artigo foi apresentado em evento científico nacional, conforme referência indicada:

PEREIRA, A. J. L.; LOPES, I. J. S. Influência dos Planos de Terra durante o Ensaio de Corona Visual em Arranjo Isolante para Linha Aérea de Transmissão de 500 kV. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS (SBSE)*, 9., 2022, Santa Maria, RS. *Anais [...]*. Santa Maria: UFSM, 2022.

Na ocasião de sua apresentação, destaca-se que o trabalho foi avaliado pela comissão técnica organizadora do evento, sendo agraciado com o prêmio por Menção Honrosa na categoria Mestrado.

1.6 Organização do Texto

Esta Dissertação de Mestrado está organizada em cinco capítulos, incluindo o presente capítulo. O **Capítulo 2** se inicia com uma revisão bibliográfica acerca do efeito corona sobre os sistemas aéreos de transmissão de energia, destacando os aspectos da verificação experimental, em ambiente de laboratório, do efeito corona visual e da correspondência entre os níveis de campo elétrico superficial para as condições de instalação trifásica de campo e monofásica de laboratório. Em seguida, discute-se os conceitos associados às linhas aéreas de potência natural elevada, ou ainda linhas aéreas compactas, no contexto do sistema elétrico brasileiro, cujos detalhes são retomados nos estudos de caso. Neste capítulo também se apresenta a caracterização teórica dos sistemas aéreos de transmissão, do ponto de vista do eletromagnetismo, indicando as condições que habilitam a determinação do campo elétrico nas proximidades da LT, com satisfatório

nível de rigor. Ainda nesta abordagem, são apresentadas as equações analíticas para o cálculo da expressão geral do campo elétrico na superfície de subcondutores agrupados em feixes regulares e isolados no espaço. Uma breve descrição da formulação do problema do tipo potencial é realizada para introduzir os conceitos dos métodos numéricos empregados para a resolução da equação de *Laplace*, com destaque para o Método dos Elementos Finitos. Neste contexto, apresenta-se o aplicativo do proprietário COMSOL *Multiphysics*[®], responsável por subsidiar as simulações numéricas de trabalho, bem como o aplicativo *Finite Element Method Magnetics* (FEMM).

O **Capítulo 3** está associado com a etapa de desenvolvimento e validação dos modelos numéricos em ambiente COMSOL[®]. Inicia-se, deste modo, com a avaliação de sensibilidade dos domínios genéricos de estudo, partindo, posteriormente, para os domínios artificiais. Mostra-se a eficiência de utilização do Domínio de Elemento Infinito (DEI) para representação de grandes domínios físicos, como, por exemplo, o espaço aberto nas imediações de uma linha aérea de transmissão. Para validação dos modelos propostos, os valores de campo elétrico, sejam eles calculados nas imediações das linhas de transmissão ou tomados ao longo da superfície dos condutores, são comparados com resultados publicados na literatura.

O **Capítulo 4** apresenta três estudos de casos desenvolvidos neste trabalho. O primeiro deles avalia a correspondência dos valores de campo elétrico na superfície dos condutores de uma linha compacta de 230 kV. Sinaliza, deste modo, para os desdobramentos e dificuldades associadas à necessidade de representar, em ambiente de laboratório, arranjos monofásicos de ensaio de configurações aéreas compactas. O segundo estudo mostra a relação estabelecida entre a proposta de redução das distâncias entre fases (e expansão dos feixes de condutores) e a elevação dos níveis de campo elétrico na superfície dos condutores. Para isso, compara-se duas configurações de linhas aéreas de 500 kV, com quatro subcondutores, por fase. Por fim, o terceiro estudo de caso propõe uma verificação dos níveis de sensibilidade do campo elétrico superficial associados ao arranjo monofásico de ensaio de uma Linha de Potência Natural Elevada (LPNE) de 500 kV. Uma vez instalado em ambiente de laboratório, o efeito de proximidade sobre este tipo de arranjo deve ser simulado por meio da instalação de painéis laterais aterrados com afastamento pré-determinado. Neste caso, o estudo investiga esta sensibilidade tanto em função da presença e afastamento dos painéis reflexivos, quanto da tensão de ensaio aplicada ao arranjo.

As principais conclusões são apresentadas no **Capítulo 5**, em conjunto com algumas propostas de continuidade dos trabalhos futuros.

*“O senhor... Mire veja: o mais importante e bonito, do mundo, é isto:
que as pessoas não estão sempre iguais, ainda não foram terminadas –
mas que elas vão sempre mudando. Afinam ou desafinam.
Verdade maior. É o que a vida me ensinou.
Isso que me alegra, montão.”*

Riobaldo, o sertanejo fáustico

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Considerações Iniciais

A manifestação intrínseca do efeito corona sobre os sistemas aéreos de transmissão de energia e seus desdobramentos são temas recorrentes na literatura técnica e mostram-se, ainda hoje, relevantes para o desenvolvimento de novas tecnologias e projetos. Neste aspecto, este capítulo apresenta uma abordagem do ponto de vista da verificação experimental, em ambiente de laboratório, do efeito corona sobre os arranjos isolantes. Segue, a partir desta abordagem, a discussão sobre a correspondência entre os níveis de campo elétrico superficial para as condições naturais de instalação trifásica e a condição monofásica de laboratório. Esta revisão bibliográfica mostra como os recentes estudos associam os recursos computacionais, por meio de simulação numérica, aos resultados experimentais de laboratório durante a investigação da natureza do fenômeno do efeito corona.

Sob uma segunda perspectiva dos sistemas de potência, as linhas aéreas compactas são conceituadas e contextualizadas no sistema elétrico brasileiro, por meio da implementação das Linhas de Potência Natural Elevada (LPNE) de 500 kV. Esta proposta técnica de compactação das fases carrega consigo um impacto sobre a acentuação dos níveis de campo elétrico na superfície dos condutores e acessórios. Desta forma, os conceitos da verificação experimental do efeito corona são retomados e aprofundados nos estudos de caso realizados nesta dissertação.

Uma caracterização teórica dos sistemas aéreos de transmissão, do ponto de vista do eletromagnetismo, é também realizada com o objetivo de indicar as condições que habilitam o cálculo do campo elétrico nas proximidades de uma LT, com satisfatório nível de rigor. Ainda nesta abordagem, são apresentadas as equações analíticas para o cálculo da expressão geral do campo elétrico na superfície de subcondutores agrupados em feixes regulares e isolados no espaço.

2.2 Efeito Corona

O estudo do fenômeno das descargas parciais em dielétricos gasosos, sob a ação de campos elétricos, procura responder sobre a origem e os impactos do efeito corona. Definido como o processo de ionização e ruptura parcial da camada de ar provocado pela acentuação de campos elétricos não uniformes sobre a superfície de materiais condutores ou isolantes, o efeito corona já está bem descrito na literatura desde o início do século passado. Destacam-se, naturalmente, os trabalhos pioneiros realizados por *Frank William Peek Jr.* (LEÃO, 2008).

Quando o valor de campo elétrico ultrapassa a rigidez dielétrica do ar, este fenômeno é capaz de produzir pulsos de correntes de curta duração e reduzidos tempos de subida. Em LTs com tensão nominal de operação acima de 230 kV, as descargas elétricas parciais do efeito corona são responsáveis por perturbações de alta frequência, sendo, por isso mesmo, um fator limitante de projeto durante a escolha dos cabos condutores (MARUVADA, 2000).

O processo geral de formação do fenômeno está bem documentado na literatura, podendo ser explicado pela avalanche de elétrons apresentado por *Townsend* (KUFFEL; KUFFEL; ZAENGL, 2000). Simplificadamente, este conceito estabelece que os elétrons livres ganham energia e são acelerados devido à aplicação do campo elétrico externo. Decorrente da colisão elástica com os elétrons livres excitados, as moléculas neutras do ar são ionizadas e se tornam íons positivos ao liberarem um elétron. Este mecanismo de ionização por colisão acentua-se, recursivamente, à medida que novos elétrons livres são liberados (SOUZA, 2009).

Sobre os sistemas aéreos de transmissão de energia, a Interferência Eletromagnética (IEM) originada é dita Rádio Interferência (RI) quando seu conteúdo espectral se encontra na faixa de transmissão dos sinais de rádio AM, FM e dos sinais televisão. Quando originada na superfície energizada de condutores aéreos, a RI atua, predominantemente, no limite máximo de 3 MHz, impactando na transmissão AM (0,535 – 1,605 MHz). As descargas de corona, por sua vez, são capazes de gerar conteúdo espectral de até 1 GHz, causando interferência na recepção dos sinais de TV (56 – 216 MHz) (MARUVADA, 2000).

2.2.1 Avaliação Experimental dos Arranjos Monofásicos

As primeiras tentativas de mensuração da RI causada pelas descargas de corona remontam o início da década de 1940, quando o Comitê de Coordenação Conjunta da *Edison Electric Institute* (EEI), da *National Electrical Manufacturers Association* (NEMA) e da *Radio Manufacturers Association* (RMA) publica a norma NEMA 107. A partir de 1961, entidades europeias como o *Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques* (CISPR) e a *Internacional Electrotechnical Commission* (IEC) passam a publicar as próprias resoluções com respeito aos métodos e aos circuitos padronizados para a medição da Tensão de Rádio Interferência (TRI) (HARROLD; DAKIN, 1973; CIGRE, 2008).

Em paralelo, durante a segunda metade do século passado, centros de pesquisa mundo afora desenvolveram metodologias analítico-empíricas e *softwares* para a predição dos níveis de campo elétrico, de Ruído Audível (RA) e Rádio Interferência (RI) emitidos pelos sistemas elétricos de potência em decorrência da manifestação do efeito corona. Destacam-se, nesta perspectiva, as pesquisas desenvolvidas no *Bonneville Power Administration* (BPA), sediado em *Portland, USA*, e no *Institut de Recherche d'Hydro Québec* (IREQ), *Varenes, Canadá*.

Inserido neste contexto de desenvolvimento científico, os autores (CHARTIER *et al.*, 1995) publicam os resultados de ensaios laboratoriais de corona visual realizados nos conjuntos de ferragens de uma linha compacta de 230 kV, utilizando apenas um cabo condutor por fase e disposição triangular das fases, juntamente com os dados de medição em campo dos valores de RI e RA desta configuração. Em relação ao procedimento de ensaio, os autores alertam sobre a necessidade de correção da tensão de ensaio ao se levar em consideração os efeitos da compactação das fases e da altitude¹. Uma vez que o processo de formação do efeito corona está intimamente relacionado ao campo elétrico na superfície do condutor, a determinação de uma tensão inadequada de ensaio traz consigo implicações diretas sobre os resultados obtidos.

¹ Está descrito na literatura que as atividades de corona aumentam em função da redução da Densidade Relativa do Ar (DRA), causada pela elevação da altitude (CHARTIER *et al.*, 1987).

Deste modo, o procedimento de ensaio adotado para a determinação da tensão de ensaio consistiu, inicialmente, no cálculo do campo elétrico sobre a superfície dos subcondutores do sistema trifásico, conforme encontrado em ambiente de operação. Para tal, recorreram ao programa computacional desenvolvido no BPA. Em seguida, “a tensão de ensaio necessária para produzir o mesmo valor de campo elétrico sobre a superfície do condutor singelo do arranjo monofásico de laboratório foi calculada, utilizando o mesmo *software*” (CHARTIER *et al.*, 1995).

Durante a etapa de desenvolvimento dos projetos eletromecânicos de linhas aéreas, ensaios elétricos são realizados em laboratórios de alta tensão. Seus resultados subsidiam a conformidade técnica dos projetos, bem como o grau de severidade do efeito corona sobre os arranjos isolantes. Por estes ensaios, verificam-se, dentre outros requisitos, o nível de tensão para início e extinção do fenômeno de corona visual e o valor da Tensão de Rádio Interferência (TRI), expressa em $dB_{\mu V}$, para uma frequência e tensão de ensaio especificadas (MARUVADA; CHARTIER, 2008b).

Naturalmente, seria desejável que as medições e a verificação experimental do corona visual nos arranjos isolantes e cabos condutores fossem realizadas nas mesmas condições de instalação e operação da LT, por meio da construção de linhas experimentais, por exemplo. Assim, os efeitos de campo das fases adjacentes devido à aproximação com as estruturas suportes e o solo, juntamente como as condições ambientais, seriam incorporadas nos resultados. Entretanto, por limitações de recursos técnicos, financeiros e de espaço físico, estes ensaios são realizados, em sua grande maioria, em ambientes fechados de laboratórios através de uma reprodução monofásica do sistema de transmissão. Adicionalmente, com a baixa disponibilidade de laboratórios para atendimento do mercado industrial, os ensaios de alta tensão são particularmente dispendiosos e com agendas restritas. As dificuldades acentuam-se quando da necessidade de repetição de testes decorrentes de uma reprovação, ou mesmo para implementação de pesquisa e desenvolvimento tecnológico (KUFFEL *et al.*, 2008).

Considerando as particularidades de um ambiente de laboratório de alta tensão, verificam-se, invariavelmente, interferências com os equipamentos de alimentação, fontes e geradores, com os divisores de medição, e com as paredes, teto e o piso. Diante desta situação, o primeiro problema a ser investigado diz respeito à equivalência entre os valores de campo elétrico verificados nas superfícies dos condutores para as duas

condições de instalação: a reprodução monofásica instalada em ambiente de laboratório, bem como na condição de instalação trifásica, em ambiente aberto de operação da LT. Para se evitar a repetição e a ambiguidade com o termo “campo”, este ambiente natural e aberto de operação trifásico será designado, simplifcadamente, por “espaço aberto”. Neste contexto, os autores propõem uma configuração monofásica para o ensaio de corona visual do arranjo isolante da linha compacta de 230 kV. A Figura 2.1 (a) apresenta as dimensões (em milímetros) do arranjo de ensaio, enquanto a Figura 2.1 (b) apresenta a fotografia do arranjo executado em ambiente de laboratório (CHARTIER *et al.*, 1995).

Destaca-se, aqui, a solução de laboratório para a simulação do cabo condutor através de um tubo metálico, com as devidas proteções de blindagem em suas extremidades, além dos equipamentos de alta tensão também protegidos por anéis toroidais. Neste ambiente de laboratório, deseja-se reduzir, o máximo possível, a influência dos elementos adjacentes sobre o objeto de ensaio (MARUVADA; CHARTIER, 2008b).

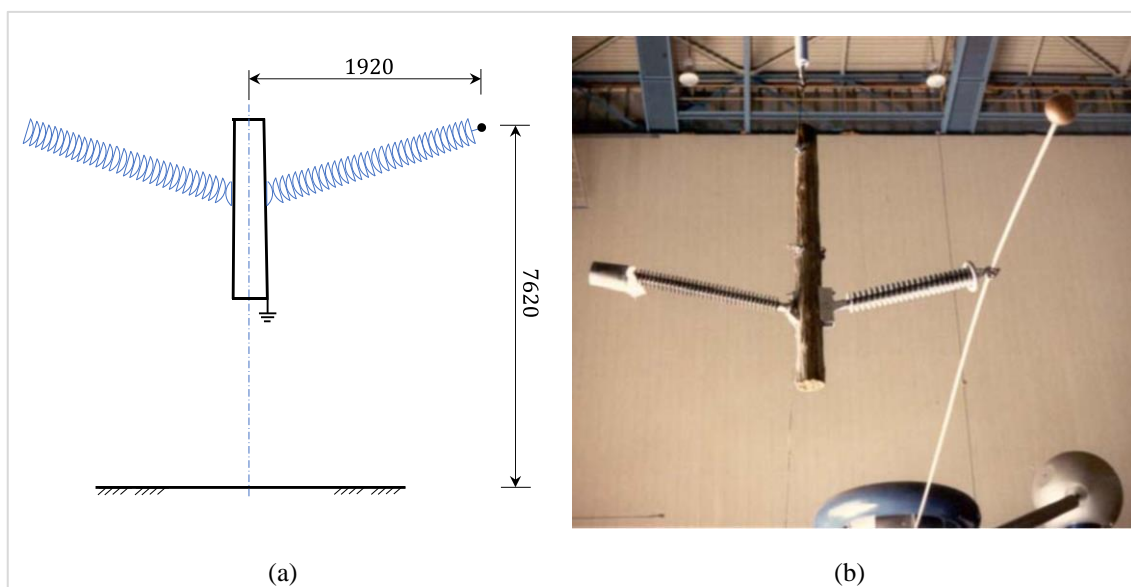


Figura 2.1 – (a) Representação esquemática do arranjo monofásico de ensaio da LT 230 kV *Sedro Woolley – March Point* Linhas (Dimensões em Milímetros); (b) Foto do arranjo instalado em laboratório. Adaptado de (MARUVADA; CHARTIER, 2008b).

Vale destacar que no ano de 1995, quando da realização do supracitado ensaio, não havia normalização consolidada que tratasse do tema. A publicação da norma europeia IEC 61284: *Overhead lines – Requirements and tests for fittings* (IEC, 1997) veio ocorrer dois anos após a publicação do trabalho, em 1997. Ainda assim, devido à experiência do corpo técnico da Divisão de Laboratórios do BPA, o procedimento seguido por

(CHARTIER *et al.*, 1995) está bastante coerente com o preconizado pela recomendação normativa e com aquilo que vem sendo realizado atualmente.

2.2.2 Estado da Arte

Em uma perspectiva mais recente de desenvolvimento científico, o trabalho de (OLSEN; TUOMINEN; LEMAN, 2018) procura estabelecer a correspondência entre os níveis de campo elétrico superficial para as condições de instalação trifásica no espaço aberto e monofásica de laboratório. Para tal, recorre à simulação numérica e utiliza modelos tridimensionais, associados a resultados experimentais. Desta forma, o trabalho é capaz de apontar as diferenças observadas entre os dois ambientes e indicar o grau de pertinência das reproduções laboratoriais, em comparação com as simulações computacionais. Uma vez mais, os autores alertam que o procedimento normativo de ensaio descrito pelo Método da Tensão Determinada (IEC, 1997) pode levar a resultados incompatíveis. Como exemplo, citam os resultados de campo elétrico superficial sob condutores de 3.3 cm de diâmetro, utilizados em uma LT de 230 kV, onde os valores obtidos em ambiente de laboratório superam em 3,8% os maiores valores de campo obtidos em condição de espaço aberto.

Considerando um modelo tridimensional de balancim², o trabalho de (OLSEN; TUOMINEN; LEMAN, 2018) sinaliza para a impossibilidade de uma tensão de ensaio ser capaz de garantir uma completa correspondência entre os valores de campo elétrico sobre a superfície das ferragens e condutores. Por outro lado, caso se busque esta correspondência, espera-se, portanto, que alguns pontos fiquem significativamente mais estressados do que outros, uma vez que os limites da faixa observada para a tensão de ensaio variam em 16,8%. Como consequência, é possível observar, em laboratório, corona em pontos da ferragem onde não ocorreria em espaço aberto de operação. Ao realizar uma abordagem não convencional sobre os resultados dos ensaios elétricos de alta tensão, os autores sinalizam que a simulação computacional pode ser uma alternativa eficaz para a substituição de testes em laboratório, uma vez que os resultados de simulação exibem graus de precisões que são comparáveis, ou até melhores, do que pode

² Ferragem acessória tipicamente utilizada para a fixação dos cabos condutores, agrupados em feixes, aos isoladores das linhas aéreas (PAVLIK, 1989).

ser alcançado em testes.

Ainda neste contexto, os trabalhos de (DE LA HOZ *et al.*, 2020a, 2020b) utilizam-se da simulação numérica baseada no Método dos Elementos Finitos (MEF) para calcular a intensidade de campo elétrico sob a superfície de geometrias não-uniformes. Utilizam, assim, estes cálculos iniciais para compor uma metodologia robusta de predição do efeito corona. Para avaliação dos estudos de caso desenvolvidos nestes trabalhos, dois diferentes critérios de predição são levados em consideração, cujos resultados são comparados entre si: o primeiro consiste na Formulação de Pedersen (PEDERSEN, 1967), enquanto o segundo utiliza a Interface de Detecção de Ruptura Elétrica³, disponível na plataforma computacional COMSOL[®] 5.5 e versões acima.

Pesquisas recentes também são desenvolvidas com o objetivo de se avaliar a intensidade de campo elétrico durante a etapa de desenvolvimento de protótipos de novas soluções de engenharia. É o caso dos arranjos destinados às Linhas Aéreas Compactas com Mísulas Isolantes Poliméricas⁴ (CICA) (KRANOONGON; TECHAUMNAT, 2020) e (ZACHARIADES, 2016). Esta tecnologia, ainda pouco explorada no contexto brasileiro quando da elaboração deste texto de dissertação, já vem sendo empregada no sistema elétrico europeu e asiático, notadamente, no sistema chinês. Devido à elevada complexidade geométrica dos múltiplos arranjos isolantes e ferragens envolvidos, torna-se inevitável o uso das plataformas numéricas implementadas via MEF, em três dimensões, para determinação dos valores de campo sobre as superfícies de anéis equipotenciais, isoladores tipo bastão polimérico e conjuntos de ferragens.

De maneira abrangente, as pesquisas conduzidas atualmente buscam não somente a determinação mais precisa dos valores de campo elétrico sobre geometrias complexas, mas também são capazes de avaliar a natureza física do processo de formação do efeito corona. Associado aos tradicionais resultados de ensaios laboratoriais, a potencialidade dos recursos computacionais de simulação numérica vem sendo explorada, cada vez mais, no contexto dos sistemas aéreos de potência.

³ Do inglês *Electric Breakdown Detection Interface (EBDI)* (DE LA HOZ *et al.*, 2020).

⁴ Tradução livre para *Composite Insulator Cross-Arm (CICA)*

2.3 Linhas de Potência Natural Elevada (LPNE)

A tendência histórica de evolução e desenvolvimento técnico-científico das metodologias de projeto, ferramentas de cálculo e, principalmente, dos materiais construtivos acompanhou o surgimento de linhas com níveis operativos de tensão e capacidade de transmissão cada vez maiores. Com o passar do tempo, a assimilação e a consolidação destas novas técnicas de projeto permitiram a revisão e o redimensionamento de LTs de menor nível de tensão, então chamadas de tradicionais. Com vistas à otimização de projeto, o conceito de linhas compactas associa-se à capacidade de redução dimensional, notadamente das distâncias entre fases, de uma linha aérea (DOUGLASS; STEWART, 2008).

Naturalmente, a utilização e disseminação do conceito de linha compacta implica no surgimento do conceito de linha tradicional, o que carrega consigo uma análise comparativa e cronológica. Neste sentido, uma linha compacta pode ser classificada com base em suas dimensões: seja pela altura e largura das estruturas, ou mesmo pela largura da faixa de passagem, tomando-se como referência uma LT existente de mesmo nível de tensão. Os conceitos das linhas compactas adquirem vantagem competitiva quando avaliados sob o aspecto da redução da largura da faixa de passagem, uma vez que restrições advindas de órgãos ambientais, bem como os custos fundiários, são fatores decisivos para a viabilidade econômica do empreendimento de transmissão. Fatores complementares como a redução do impacto visual e a redução da supressão vegetal também são vantagens competitivas de uma linha compacta frente às linhas convencionais (TONY GILLESPIE; VAN PELT, 2008).

A evolução das linhas compactas resulta também da crescente necessidade de maiores capacidades de transmissão, para uma mesma largura de faixa. Não por acaso, a redução das distâncias entre fases, a expansão dos feixes de condutores, ou a combinação de ambos, resulta na elevação da potência natural da linha⁵, motivo pelo qual as linhas compactas também são descritas com Linhas de Potência Natural Elevada (LPNE) (CIGRE, 2020; RÊGO, 2010). Embora se verifique uma redução dos níveis de campo

⁵ Parâmetro elétrico descrito pelo termo *Surge Impedance Loading* (SIL) e *High Surge Impedance Loading* (HSIL)

elétrico ao nível do solo, esta proposta técnica de compactação das fases carrega consigo um impacto sobre a acentuação dos níveis de campo elétrico na superfície dos condutores e acessórios, conforme discutido em (CIGRE, 2020; CHARTIER *et al.*, 1995).

Alternativas para o aumento da capacidade de longos corredores de transmissão visam a entrega de energia aos grandes centros de carga, ao mesmo tempo que favorecem as inserções regionais do Sistema Interligado Nacional (SIN). A partir dos Estudos para a Licitação da Expansão da Transmissão⁶ e dos Estudos de Detalhamento das Alternativas de Referência⁷, as primeiras LPNE brasileiras foram planejadas e disponibilizadas ao mercado via Leilão de Transmissão da ANEEL. Em decorrência do elevado potencial hidráulico do Complexo Hidrelétrico de Belo Monte, a exportação do excedente de geração para as regiões sudeste e nordeste do país exigiu a ampliação das capacidades de intercâmbio de energia entre as regiões Norte – Nordeste, Norte – Sudeste e Nordeste – Sudeste. Neste contexto de expansão energética, os estudos de detalhamento sinalizaram para uma estrutura de transmissão composta por linhas aéreas de 500 kV com fluxos máximos de potência da ordem de 1400 MW (EPE, 2012).

Na ocasião, para atendimento dos critérios elétricos estabelecidos pela EPE, propôs-se uma linha aérea com feixe de seis cabos condutores, por fase, com disposição regular hexagonal, com reatância série unitária limitada a $0,221 \Omega/km$. Para tal, recomendou-se a utilização de uma estrutura típica de suspensão estaiada do tipo Cross-Rope, conforme silhueta apresentada na Figura 2.2 (ELETROBRÁS, 2012).

⁶ Estudos sistêmicos conduzidos pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) com o objetivo de embasar tecnicamente as decisões do Ministério de Minas e Energia (MME) relativas ao desenvolvimento dos planos de expansão da geração e transmissão de energia elétrica de curto, médio e longo prazo (EPE, 2023).

⁷ Relatórios (R2) que acompanham os Anexos Técnicos dos Leilões de Transmissão no âmbito da ANEEL, detalhando as características técnicas dos escopos de linhas e subestações de energia.

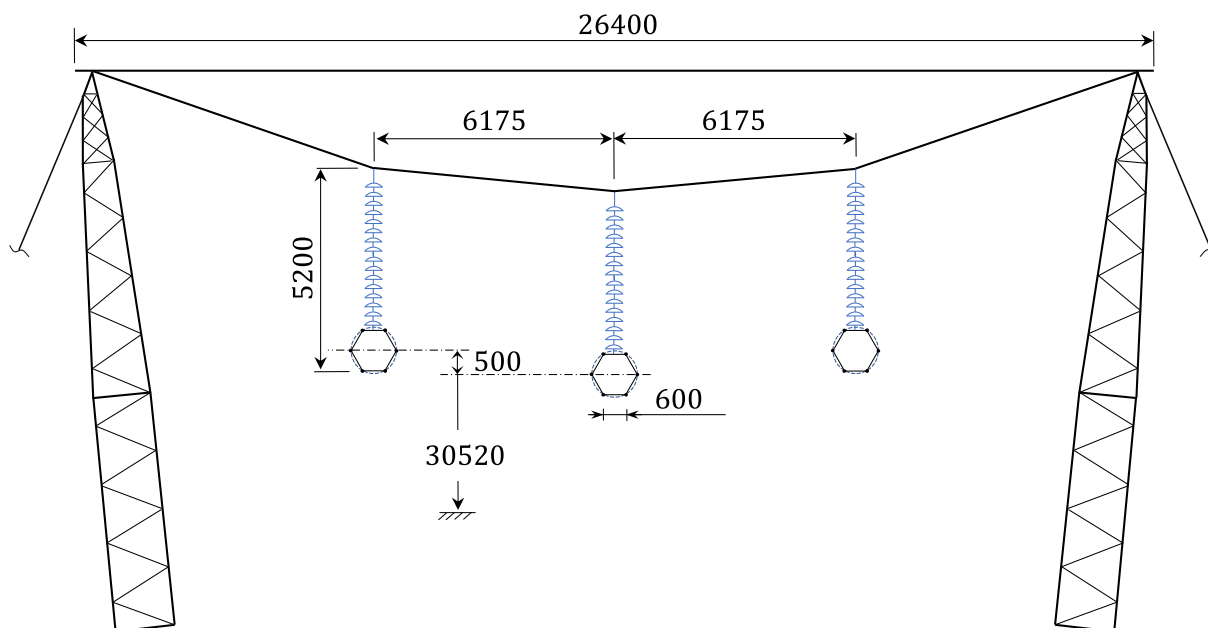


Figura 2.2 – Silhueta da estrutura compacta de 500 kV com seis condutores por fase. Dimensões em milímetros. Desenho sem escala. Reproduzido com dados extraídos de (ELETROBRÁS, 2012).

Complementarmente, ao se avaliar outro cenário do sistema elétrico nacional, os estudos apontaram para uma necessidade ainda maior de escoamento de fluxo energético. Desta vez, o Relatório R2 recomendou a implantação de eixos de transmissão em 500 kV, a partir de circuitos simples, com capacidade máxima de 1670 MW. Para tal, foi proposta uma configuração de linha compacta com seis condutores por fase, em arranjos elípticos expandidos e assimétricos, cuja impedância série da LT limitada a $0,192 \Omega/km$ e resistência de sequência positiva não superior a $0,0139 \Omega/km$ (TAESA, 2012).

Para atendimento desta segunda proposta, (GUIMARÃES *et al.*, 2015; SILVA *et al.*, 2017) apresentaram a solução eletromecânica estrutural para linhas aéreas de 500 kV cujos conceitos foram, à época, inéditos para atendimento da capacidade de transmissão de 1670 MW. A Figura 2.3 apresenta a silhueta da estrutura de suspensão do tipo Cross-Rope para a configuração compacta de seis cabos condutores elípticos. Utilizando as premissas combinadas de compactação entre as fases e expansão dos feixes, a configuração de SIL elevado de 1670 MW adota uma configuração assimétrica e expandida de seis condutores para as fases laterais e central. Nesta geometria, a fase central foi projetada com feixe elíptico expandido de $490 \times 960 \times 1390 \text{ mm}$ e as fases laterais com feixe elíptico superexpandido de $1050 \times 2100 \times 2580 \text{ mm}$.

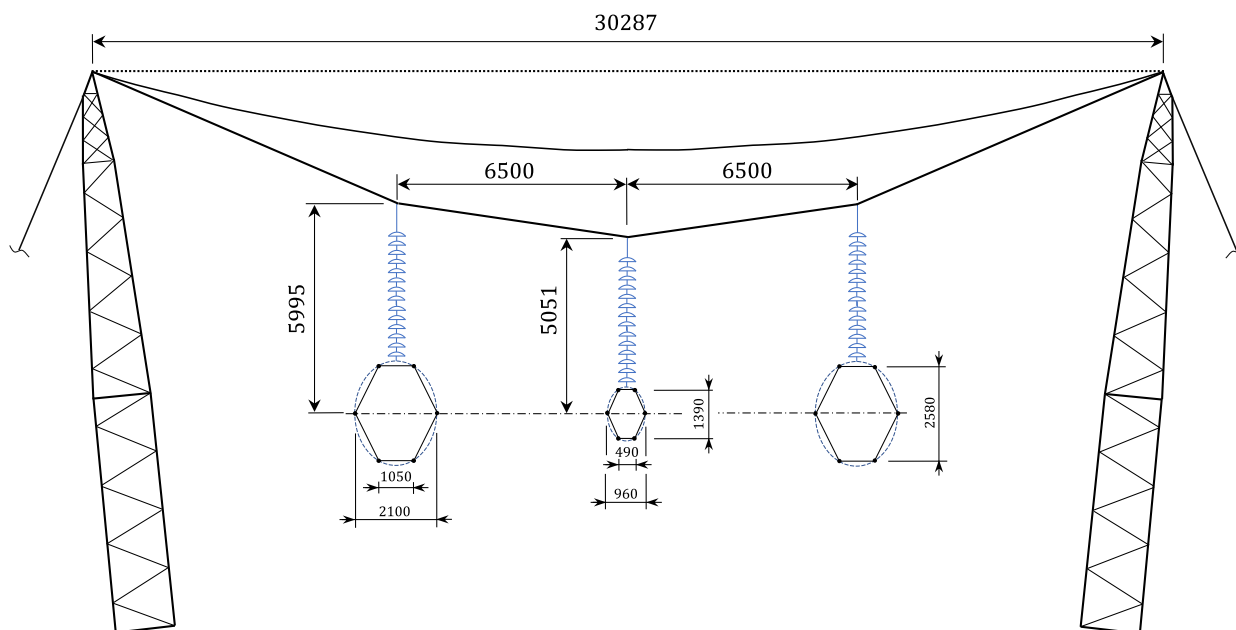


Figura 2.3 – Silhueta da estrutura compacta de 500 kV com feixes elípticos assimétricos. Dimensões em milímetros. Desenho sem escala. Reproduzido com dados extraídos de (GUIMARÃES *et al.*, 2015).

Embora seja evidente as potencialidades de uma LPNE em 500 kV com feixes elípticos na proposição de corredores com elevada capacidade de transmissão, estudos recentes indicam que regiões com relevos acentuadamente acidentados e montanhosos comprometem sobremaneira a utilização de estruturas do tipo Cross-Rope. A fim de se manter os requisitos de capacidade de transmissão, em face da redução de utilização de estruturas Cross-Rope, estruturas de Circuito Duplo do tipo Raquete e do tipo Cálice devem ser empregadas (VILELA, 2019).

Novas soluções eletromecânicas são ainda propostas com o objetivo de redução de custos com peso de estruturas, fundações e faixa de utilização para Linhas de Potência Natural Elevadas. Alternativamente à solução inaugural do tipo Cross-Rope empregando feixes elípticos expandidos, a solução Splitfex[®] insere-se neste atual contexto ao propor uma divisão física das fases em dois arranjos de subfeixes. A Figura 2.4 apresenta a silhueta típica da configuração Splitfex[®] em 500 kV para atendimento do SIL da ordem de 1670 MW.

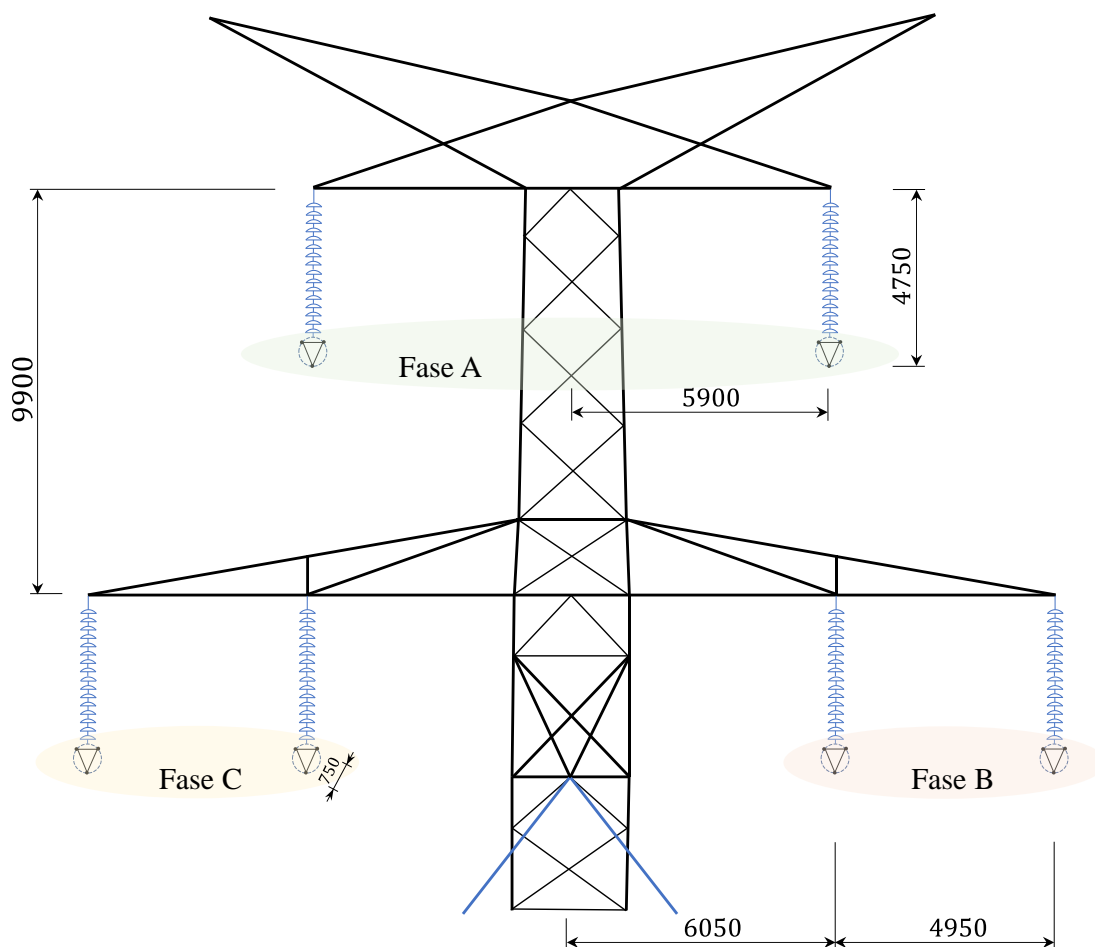


Figura 2.4 – Silhueta da configuração Splitfex® de 500 kV. Dimensões em milímetros. Desenho sem escala. (HOFFMANN; HOFFMANN, 2019).

Deste modo, os arranjos triangulares de subcondutores devem ser sustentados por estruturas de circuito duplo do tipo Estaiada Monomastro Danúbio e por estruturas autoportantes convencionais. Como vantagens competitivas, são apontadas a redução do comprimento dos cabos estais e das fundações dos mastros estruturais. Quando implementada em uma LPNE de 500 kV com extensão aproximada de 500 km, a solução eletromecânica Splitfex® apresenta redução de peso de 5%, em relação à solução com feixe elíptico e estrutura de suspensão Cross-Rope. A economia global calculada, nesta comparação, alcança US\$ 28.000 por km de linha de transmissão quando são levados em conta os custos com estruturas, ferragens, cabos estais, adicionais de faixa, fundações e manutenção em 30 anos (HOFFMANN; HOFFMANN, 2019).

2.4 Intensidade de Campo Elétrico

O mecanismo de transporte de energia elétrica por meio de uma linha aérea de transmissão resulta da interação das ondas de campo elétrico e magnético originadas pelas cargas elétricas depositadas sobre os condutores, sejam elas estacionárias ou colocadas em movimento. Os efeitos de propagação destes campos, por sua vez, se estendem pelo espaço aberto e pelo solo (HAYT; BUCK, 2013). Os sistemas aéreos de potências operando em frequência industrial são capazes de gerar campos eletromagnéticos numa taxa de variação temporal suficientemente lenta a ponto de permitir uma avaliação independente entre os campos elétrico e magnético. Considerados, portanto, desacoplados, a natureza dos campos nas proximidades⁸ de uma LT habilita o emprego das equações da estática com propósito prático e acurácia satisfatórios (OLSEN; WONG, 1992; ZAFFANELLA, 2005).

Partindo de uma concepção elementar, o módulo do vetor intensidade de campo elétrico pode, no contexto da eletrostática, ser avaliado pela aplicação da Lei de Gauss. Por sua formulação diferencial, uma densidade volumétrica de cargas, em um determinado ponto do espaço, constitui fonte de densidade de fluxo elétrico de natureza divergente. Recorrendo-se, por outro lado, ao Teorema da Divergência, a Lei de Gauss pode ser expressa em sua forma integral. Neste caso, é expresso que o fluxo elétrico que atravessa a superfície fechada, S , é numericamente igual à carga total contida no volume, v , encerrado pela superfície (BASTOS, 1996).

Em eletrostática, certos fenômenos físicos com configuração geométrica não trivial apresentam condições de contorno e distribuições de cargas de tal forma que não favorecem a resolução analítica da distribuição do potencial escalar elétrico através da equação diferencial parcial de *Poisson*. Recorre-se, neste caso, ao Método das Imagens para uma abordagem complementar. Este método considera a substituição das condições de contorno dadas por uma distribuição artificial de cargas, chamada cargas-imagens, com o objetivo de simplificação dos cálculos. Esta nova distribuição de cargas “deve ser

⁸ Região conhecida como Quase Estática caracterizada por uma distância suficientemente inferior ao comprimento de onda associado à frequência de propagação. Nesta região, os efeitos de acoplamento entre tensão e corrente são predominantes em relação aos campos irradiados (ZAFFANELLA, 2005).

escolhida de modo a reproduzir exatamente as condições de contorno dentro da região em que o problema está definido” (MACHADO, 2012).

Conforme indicado na Figura 2.5 (a), o problema elementar de determinação da intensidade de campo elétrico sobre o plano condutor e infinito, $z = 0$, de potencial elétrico nulo, devido ao efeito de proximidade com uma carga pontual positiva, Q , sugere a aplicação do Método das Imagens. Levando em conta as condições de equilíbrio do plano condutor, as linhas de campo elétrico que partem da carga pontual, localizada em \vec{r}_Q , em direção descendente devem, necessariamente, interceptar o plano de modo ortogonal.

Mantendo-se inalteradas a disposição das linhas de campo na região de interesse acima do plano, bem como o potencial elétrico nas superfícies em que as condições de contorno estão definidas, uma configuração equivalente de cargas considera a substituição do plano condutor por uma carga-imagem negativa, $-Q$, simetricamente localizada em relação ao plano, indicada pelo vetor posição \vec{r}_{-Q} , conforme indicado na Figura 2.5 (b). O campo elétrico gerado por um sistema qualquer de cargas pontuais é dado pela soma vetorial dos campos individuais. Desta forma, para a configuração do dipolo elétrico da Figura 2.5 (b), o campo elétrico numa posição arbitrária \vec{r} , é expresso pela equação (2.1) (MACHADO, 2012)

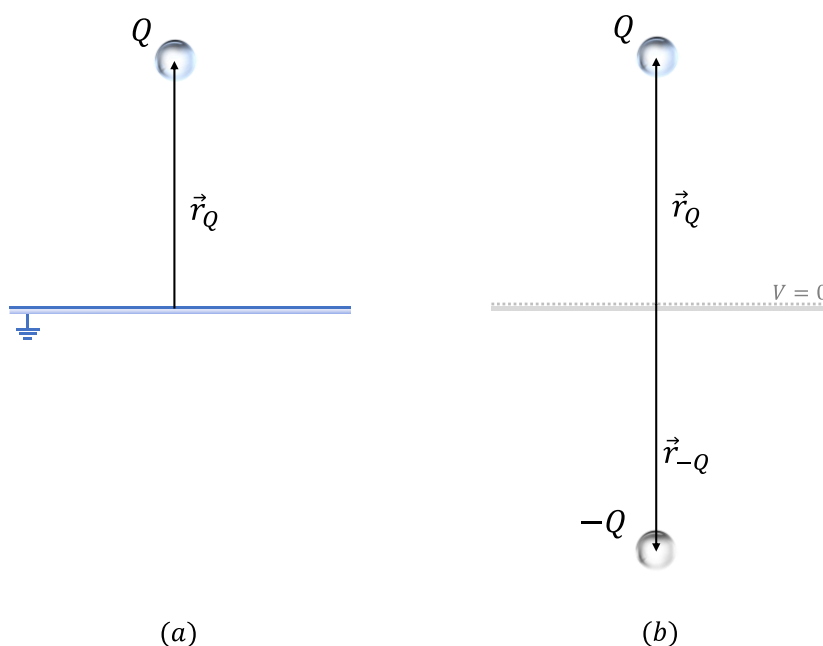


Figura 2.5 – (a) Carga pontual Q nas imediações de um plano condutor aterrado e (b) Configuração de cargas equivalentes para aplicação do Método das Imagens. Reproduzido de (MACHADO, 2012).

$$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \frac{(\vec{r} - \vec{r}_Q)}{|\vec{r} - \vec{r}_Q|^3} + \frac{(-Q)}{4\pi\epsilon_0} \frac{(\vec{r} - \vec{r}_{-Q})}{|\vec{r} - \vec{r}_{-Q}|^3} \quad (2.1)$$

Problemas envolvendo cargas e planos podem ser descritos em sistema de coordenadas retangulares, onde $\vec{r} = x\hat{a}_x + y\hat{a}_y + z\hat{a}_z$. Assumindo que o eixo que une as duas cargas pontuais seja o eixo z , por exemplo, e que o plano xy seja, portanto, a referência para o potencial nulo, os vetores posição da carga e carga-imagem são, respectivamente, $\vec{r}_Q = h\hat{a}_z$ e $\vec{r}_{-Q} = -h\hat{a}_z$, onde h é a altura em relação ao nível do plano $z = 0$. Por resultado, a equação (2.1) pode ser reescrita, em termos dos componentes unitários cartesianos, na equação (2.2):

$$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \left\{ \frac{x\hat{a}_x + y\hat{a}_y + (z - h)\hat{a}_z}{[x^2 + y^2 + (z - h)^2]^{3/2}} - \frac{x\hat{a}_x + y\hat{a}_y + (z + h)\hat{a}_z}{[x^2 + y^2 + (z + h)^2]^{3/2}} \right\} \quad (2.2)$$

O campo elétrico sobre o plano $z = 0$ pode também ser avaliado, conforme equação (2.3):

$$\vec{E}(x, y, 0) = -\frac{Q}{2\pi\epsilon_0} \frac{h}{[x^2 + y^2 + h^2]^{3/2}} \hat{a}_z \quad (2.3)$$

2.4.1 Campo Elétrico nas Imediações de uma Linha Aérea

Uma distribuição linear de cargas, λ , posicionada no espaço livre, produz um campo elétrico radial, \vec{E}_ρ , representado no sistema de coordenadas cilíndricas, conforme indicado na equação (2.4) (MACHADO, 2012).

$$\vec{E}_\rho = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0\rho} \hat{a}_\rho \quad (2.4)$$

Considerando, por outro lado, a presença de um plano condutor infinito com potencial elétrico arbitrariamente nulo, a resolução analítica é viabilizada pela aplicação do Método das Imagens. Para ilustrar sua aplicação, a Figura 2.6 (a) apresenta um sistema genérico com dois subcondutores, k e l , posicionados sobre o plano aterrado. A Figura 2.6 (b) representa o posicionamento das cargas imagens para a substituição do sistema físico real.

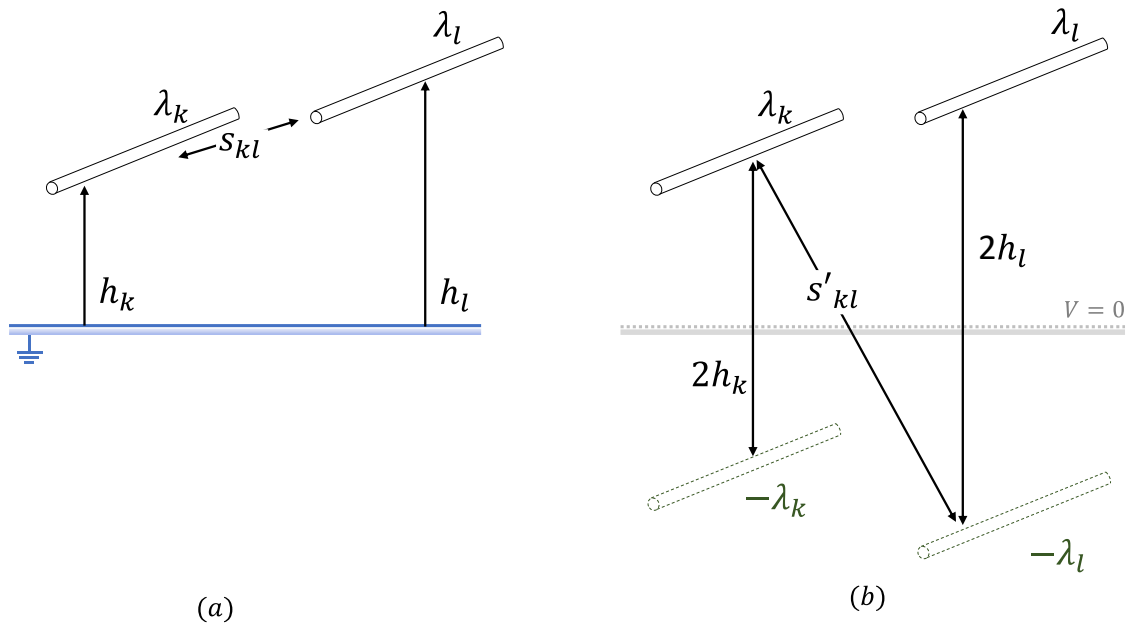


Figura 2.6 – (a) Configuração filamental de cargas sobre um plano aterrado; (b) Configuração equivalente para aplicação do Método das Imagens.

O cálculo das cargas elétricas, associadas aos subcondutores, considera o conhecimento prévio do potencial elétrico aplicado sobre eles, bem como da disposição geométrica do arranjo aéreo, conforme relação matricial (2.5) (ZAFFANELLA, 2005).

$$[\lambda] = [P]^{-1}[V] \quad (2.5)$$

Onde,

$[\lambda]$ é o vetor associado às distribuições de cargas dos condutores, em coulomb/metro.

$[P]$ é a Matriz de Coeficientes de Potencial de Maxwell, em metro/farad.

$[V]$ é o vetor associado aos potenciais elétricos dos condutores, em volt.

A Matriz de Coeficientes de Potencial de Maxwell estabelece a relação geométrica entre os condutores. Para um sistema de condutores paralelos, seus elementos são expressos como indicado nas equações (2.6) e (2.7) (ZAFFANELLA, 2005).

$$P_{kk} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln\left(\frac{4h_k}{d_k}\right) \quad (2.6)$$

$$P_{kl} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln\left(\frac{S'_{kl}}{S_{kl}}\right) \quad (2.7)$$

onde,

P_{kk} é o coeficiente próprio associado ao condutor k .

P_{kl} é o coeficiente mútuo associado aos condutores k e l .

d_k é o diâmetro do condutor k .

h_k é a altura do condutor k , em relação ao plano do solo.

S_{kl} é a menor distância entre os condutores k e l .

S'_{kl} é a menor distância entre o condutor k e o condutor-imagem l .

Pelo princípio linear da superposição, o campo elétrico total, em um ponto M do espaço, é resultado da avaliação individual de cada configuração filamentar de carga. Para o condutor k , e sua carga-imagem, este efeito está representado na Figura 2.7, onde o ponto M está definido pela sua distância horizontal, x_M , em relação ao centro do condutor k , e por sua altura h_M , em relação ao plano do solo. As coordenadas cartesianas retangulares, E_{kx} e E_{ky} , do vetor Intensidade de Campo Elétrico resultante, no ponto M , devido ao condutor k e sua carga-imagem, \vec{E}_k , estão expressas pelas equações (2.8) e (2.9), respectivamente (ZAFFANELLA, 2005).

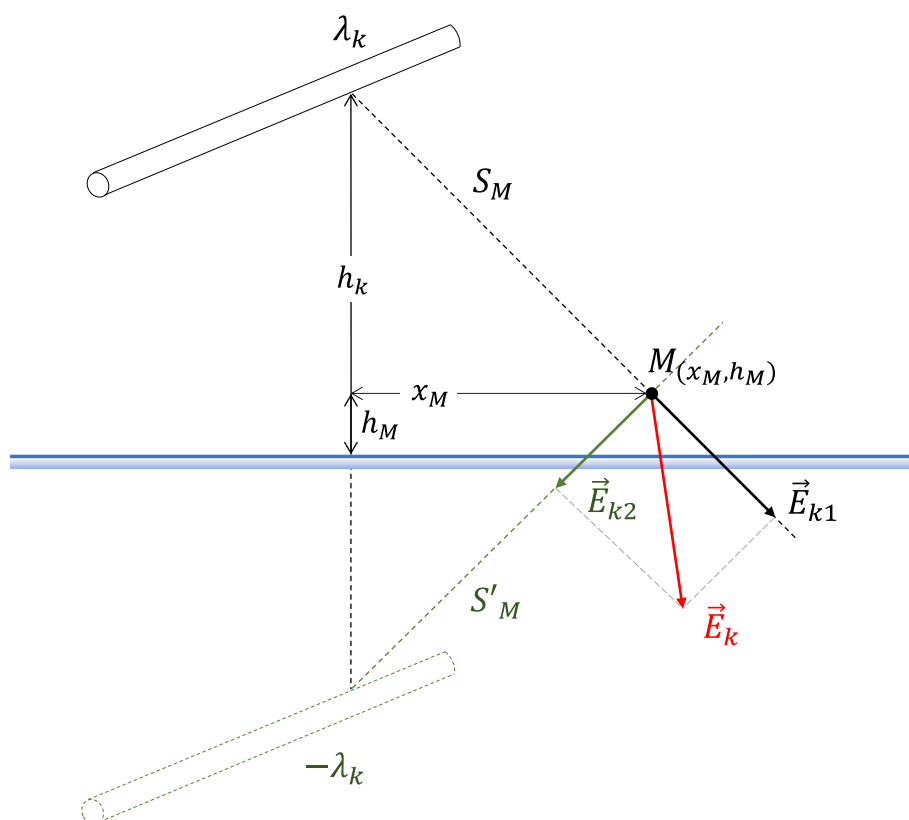


Figura 2.7 – Intensidade de Campo Elétrico resultante no ponto M , acima do solo, devido ao condutor k e sua carga-imagem (ZAFFANELLA, 2005).

$$E_{kx} = \frac{\lambda_k}{2\pi\epsilon_0} \left[\frac{x_M}{(x_M)^2 + (h_k - h_M)^2} - \frac{x_M}{(x_M)^2 + (h_k + h_M)^2} \right] \quad (2.8)$$

$$E_{ky} = \frac{\lambda_k}{2\pi\epsilon_0} \left[\frac{h_M - h_k}{(x_M)^2 + (h_k - h_M)^2} - \frac{h_M + h_k}{(x_M)^2 + (h_k + h_M)^2} \right] \quad (2.9)$$

Finalmente, o Campo Elétrico resultante, \vec{E}_k , é indicado pela soma vetorial da equação (2.10).

$$\vec{E}_k = \vec{E}_{k1} + \vec{E}_{k2} = E_{kx}\hat{a}_x + E_{ky}\hat{a}_y \quad (2.10)$$

2.4.2 Campo Elétrico na Superfície de Condutores

A solução exata da distribuição de campo elétrico superficial sobre uma configuração genérica de n-subcondutores submetida a um potencial elétrico arbitrário e isolado no espaço livre não pode ser determinada diretamente pela Equação de Laplace. Isto ocorre devido à impossibilidade de definição de um sistema de coordenadas apropriado para a sua resolução analítica. Por outro lado, para o caso particular constituído por apenas dois subcondutores, é possível escrever a solução analítica em termos do sistema de coordenadas cilíndricas bipolares⁹ (SARMA, JANISCHEWSKYJ, 1969; MARUVADA, 2000).

A escolha do sistema de coordenadas de um problema físico está diretamente associada às suas características geométricas, condições de contorno e de simetria. Em alguns casos, a escolha inadequada do sistema de coordenadas pode resultar em esforço matemático excessivo ou até mesmo inviabilizar a resolução do problema.

O sistema de coordenadas bipolares constitui um sistema bidimensional inserido no grupo dos sistemas de coordenadas cilíndricas. Para uma expansão tridimensional, realiza-se um prolongamento sobre o eixo longitudinal z resultando no sistema de coordenadas bicilíndricas. Deste modo, estes dois sistemas são especialmente úteis para a definição e resolução do problema eletrostático constituído por dois condutores

⁹ A evolução dos sistemas computacionais e das técnicas numéricas de cálculo são, em parte, responsáveis pela redução e desuso deste sistema de coordenadas, associado às suas especificidades (ARFKEN; WEBER, 2007).

cilíndricos, paralelos e infinitos posicionados no espaço livre, o qual não poderia ser resolvido analiticamente nos sistemas cartesianos, cilíndricos ou esféricos (VIASCIENCE ENGINEERING, 2022; LUCHT, 2015).

Um sistema físico constituído por dois condutores cilíndricos de diâmetro $d = 2r_c$, paralelos e afastados centro a centro pela distância $D = 2x_0$ está representado na Figura 2.8. O condutor da direita, localizado no semieixo $x > 0$, está submetido a um potencial elétrico positivo, $V_0/2$, enquanto o condutor diametralmente oposto, submetido ao potencial $-V_0/2$.

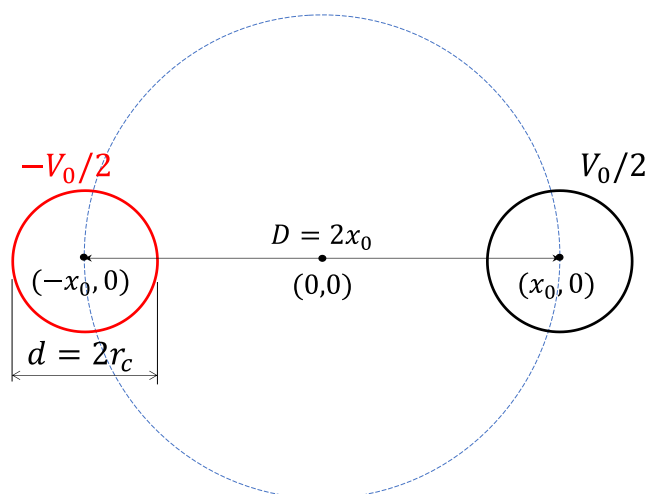


Figura 2.8 – Condutores cilíndricos de diâmetro $d = 2r_c$, afastados, centro a centro, pela distância $D = 2x_0$ submetidos a um potencial elétrico arbitrário V_0 (VIASCIENCE ENGINEERING, 2022)

Em coordenadas bipolares (u, v) , o sistema da Figura 2.8 pode ser expresso pelo par de equações paramétricas indicados na equação (2.11) (VIASCIENCE ENGINEERING, 2022):

$$\begin{cases} x = a \frac{\sinh u}{\cosh u - \cos v} \\ y = a \frac{\sin v}{\cosh u - \cos v} \end{cases} \quad (2.11)$$

onde,

$$a = \frac{1}{2} \sqrt{D^2 - d^2} \quad (2.12)$$

é uma constante escalar com unidade de comprimento localizada sobre o eixo das abscissas.

As coordenadas bipolares (u, v) possuem limites definidos por $-\infty < u < \infty$,

$-\pi < v \leq \pi$. Neste sistema, a função $u = u_0$ define uma circunferência no semieixo $x > 0$, enquanto a curva $u_i = -u_0$ define a imagem de u , em relação ao eixo das ordenadas. Tomando a superfície $u = u_0$, indicada na equação (2.13), relativa à superfície do subcondutor, é possível calcular a distribuição da intensidade de campo por meio da variação da coordenada $-\pi < v \leq \pi$ (VIASCIENCE ENGINEERING, 2022).

$$u_0 = \cosh^{-1}\left(\frac{D}{d}\right) \quad (2.13)$$

Deste modo, é possível resolver a Equação de Laplace em termos das coordenadas bipolares e escrever o potencial escalar elétrico em função da variável u , conforme indicado na equação (2.14). Assim, mostra-se que os valores $u - constante$ são as superfícies equipotenciais do sistema (VIASCIENCE ENGINEERING, 2022):

$$V(u) = \frac{V_0}{2u_0} u \quad (2.14)$$

Em seguida, o campo elétrico também pode ser escrito em coordenadas bipolares, conforme indicado na equação (2.15) (VIASCIENCE ENGINEERING, 2022):

$$\vec{E} = - \frac{\cosh u - \cos v}{a} \frac{V_0}{2u_0} \hat{a}_u \quad (2.15)$$

onde \hat{a}_u é o vetor unitário da coordenada u .

O campo elétrico máximo, expresso na equação (2.16), ocorre para as superfícies equipotenciais $u = \pm u_0$ e $v = \pi$ ($\cos v = -1$) (VIASCIENCE ENGINEERING, 2022):

$$E_{max} = \frac{\cosh u_0 + 1}{a} \frac{V_0}{2u_0} \quad (2.16)$$

Para uma configuração isolada de n -subcondutores, o cálculo do campo elétrico superficial precisa ser realizado numericamente ou através de uma solução analítica aproximada. Os esforços iniciais para uma proposição analítica aproximada são atribuídos aos trabalhos de *G. Markt e B. Mengele*, datados do início da década de 1930 e publicados na língua alemã (IEEE, 1979), cujos desdobramentos e comparações são encontrados em (ADAMS, 1955; KING, 1959; TIMASCHEFF, 1961).

Como premissa geral do método de *Markt e Mengele*, assume-se que a carga elétrica total do feixe está igualmente distribuída entre todos os subcondutores, dado que estão isolados no espaço livre. Esta fração apresenta-se como uma distribuição linear de cargas, λ , localizada no centro de cada subcondutor. Uma segunda premissa simplificativa assume que os subcondutores do feixe estão uniformemente posicionados sobre a periferia de uma circunferência, cujo raio é muito maior que os raios individuais dos subcondutores (MARUVADA, 2000).

Assumindo as premissas acima, a Figura 2.9 representa um feixe de n -subcondutores agrupados uniformemente sobre a periferia da circunferência de diâmetro $D = 2R$. Destaca-se, em vermelho, uma densidade linear de carga, λ_n , associada ao subcondutor genérico n , localizado no ponto A da periferia do feixe.

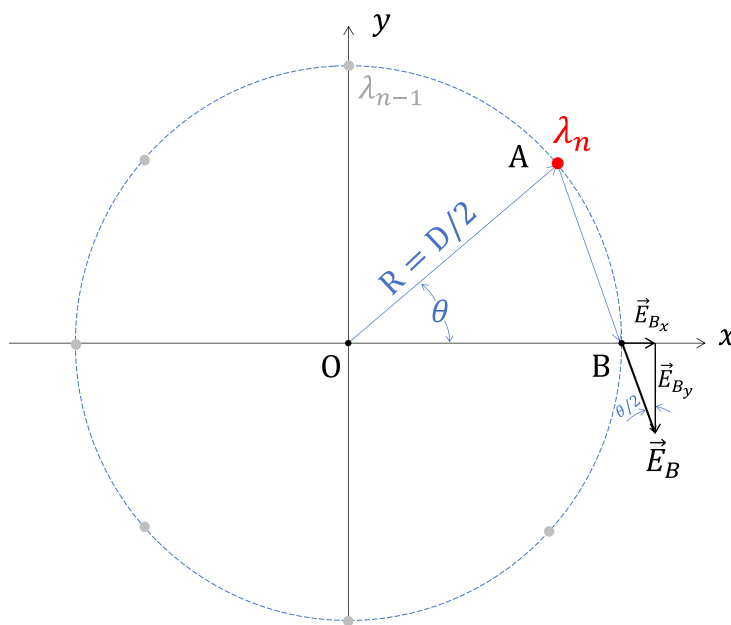


Figura 2.9 – Campo elétrico devido a uma linha de cargas λ na periferia de uma circunferência. Adaptado de (MARUVADA, 2000).

Utilizando a Lei dos Cossenos, bem como a identidade trigonométrica $(1 - \cos \theta) = 2 \sin^2(\theta/2)$, a Intensidade de Campo Elétrico calculado no ponto B, \vec{E}_B , devido à λ_n , está indicado na equação (2.17):

$$\vec{E}_B = \frac{\lambda_n}{2\pi\epsilon_0} \frac{1}{2R \sin(\theta/2)} \hat{a}_r \quad (2.17)$$

onde \hat{a}_r é o vetor unitário do segmento de reta AB .

Dado o efeito superposto de $(n - 1)$ subcondutores simetricamente espaçados em torno da periferia circular, é possível mostrar que a resultante do campo elétrico calculado no ponto B apresenta apenas componente ao longo do eixo x . Indicando o módulo deste campo resultante por E_x , seu valor é calculado conforme indicado na equação (2.18) (MARUVADA, 2000):

$$E_x = (n - 1) \frac{\lambda_n}{2\pi\epsilon_0} \frac{1}{2R} \quad (2.18)$$

Ainda pela Figura 2.9, dentre os n subcondutores do feixe, não se pode esquecer a presença de um subcondutor localizado justamente no ponto B . Assumindo-o de índice 1, este subcondutor está imerso no campo elétrico externo total, E_x , produzido pelos subcondutores vizinhos e calculado na equação (2.18).

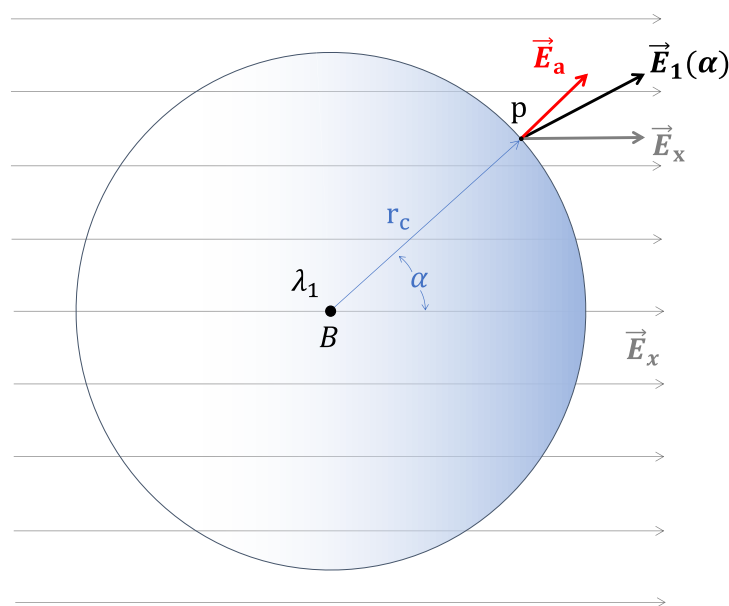


Figura 2.10 – Campo elétrico resultante sobre a superfície do subcondutor 1.
Adaptado de (MARUVADA, 2000).

A Figura 2.10 apresenta o subcondutor de índice 1 e raio r_c , com destaque para o campo elétrico externo horizontal, E_x , e o campo elétrico radial, E_a , devido à sua própria densidade linear de cargas, λ_1 , localizada sobre o ponto B . O módulo da intensidade de campo elétrico $E_1(\alpha)$, sobre a superfície do subcondutor 1, é escrito pela superposição dos campos E_a e do campo externo, E_x , como apresentado na equação (2.19) (MARUVADA, 2000):

$$E_1(\alpha) = E_a + 2E_x \cos \alpha \quad (2.19)$$

Rescrevendo a equação (2.19) em termos das equações (2.4) e (2.18), tem-se como resultado a expressão geral do campo elétrico na superfície dos subcondutores, em função da variação angular, α , conforme indicado na equação (2.22) (DOUGLASS; STEWART; CLAIRMONT, 2005; MARUVADA, 2000):

$$E_1(\alpha) = \frac{\lambda_1}{2\pi\epsilon_0 r_c} + 2(n-1) \frac{\lambda_n}{2\pi\epsilon_0} \frac{1}{2R} \cos \alpha \quad (2.20)$$

$$E_1(\alpha) = \frac{\lambda_c}{2\pi\epsilon_0 r_c} \left[1 + (n-1) \frac{r_c}{R} \cos \alpha \right] \quad (2.21)$$

$$E_1(\alpha) = E_{avg} \left[1 + (n-1) \frac{d_c}{D} \cos \alpha \right] \quad (2.22)$$

A equação (2.22) mostra, ainda, que o campo elétrico sobre a superfície de um subcondutor agrupado em feixe isolado, calculado pelas simplificações propostas por *Markt e Mengele*, varia cossenoidalmente sobre um valor médio E_{avg} ,

$$E_{avg} = \frac{\lambda_c}{2\pi\epsilon_0 r_c} \quad (2.23)$$

O valor de λ_c , na equação (2.23), corresponde à fração da densidade linear de cargas total do feixe distribuída uniformemente sobre todos os subcondutores:

$$\lambda_c = \frac{\lambda}{n} \quad (2.24)$$

O valor máximo do campo elétrico $E_1(\alpha)$ ocorre para a condição $\alpha = 0$, conforme indicado na equação (2.25).

$$E_{max} = E_{avg} \left[1 + (n-1) \frac{d_c}{D} \right] \quad (2.25)$$

Com o avanço dos anos, abordagens mais precisas em relação ao método analítico de *Markt e Mengele* foram apresentadas com o objetivo de incluir o efeito do solo e das fases adjacentes no cômputo do campo elétrico superficial. Neste caso, a consideração simultânea destes efeitos resulta numa distribuição não uniforme da carga total sobre os

subcondutores dos feixes. Neste sentido, destacam-se o Método das Imagens Sucessivas (MIS), o Método dos Momentos (MoM) e o Método da Simulação de Cargas (MSC) (SARMA; JANISCHEWSKYJ, 1969).

2.5 Formulação do Problema em termos do Potencial Escalar

Elétrico

Em sua forma diferencial, a primeira Equação de Maxwell para campos invariantes no tempo expressa a ausência de fontes de campo elétrico do tipo rotacional, conforme equação (2.26).

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = 0 \quad (2.26)$$

A solução de problemas de campos eletrostáticos é simplificada pelo uso do conceito matemático do Potencial Escalar Elétrico. A partir de uma distribuição genérica de cargas, é possível associar uma função escalar, φ , para o potencial elétrico desta distribuição e calcular o Campo Eletrostático conservativo, \vec{E} , através da relação matemática do gradiente, expressa pela equação (2.27) (BASTOS, 1996).

$$\vec{E} = -\vec{\nabla}\varphi \quad (2.27)$$

A identidade vetorial que indica que o rotacional do gradiente de uma função escalar é sempre nulo confirma a Lei de Faraday para campos eletrostáticos, dado pela equação (2.28).

$$\vec{\nabla} \times (-\vec{\nabla}\varphi) = 0 \quad (2.28)$$

Levando em consideração que a Lei de Gauss estabelece que uma densidade volumétrica de carga, ρ , em um ponto do espaço, constitui fonte de Densidade de Fluxo Elétrico de natureza divergente e que a relação constitutiva do meio dielétrico indica que a Intensidade de Campo Elétrico é diretamente proporcional à Densidade de Fluxo Elétrico, deriva-se a equação de *Poisson*, relativa à distribuição do potencial elétrico no domínio, diretamente a partir das Equações de Maxwell (BASTOS, 1996).

$$\vec{\nabla} \cdot \varepsilon(-\vec{\nabla}\varphi) = \rho \quad (2.29)$$

Em sua forma explícita, para um único meio no domínio bidimensional de estudo, a equação de *Poisson* resulta na expressão indicada em (2.30) (BASTOS, 1996).

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = -\frac{\rho}{\varepsilon} \quad (2.30)$$

Para o caso particular em que a densidade volumétrica de cargas é nula, $\rho = 0$, a equação de *Poisson* se transforma na equação de *Laplace*, expressa pela equação (2.31). “Neste caso, a fonte de campo elétrico é obrigatoriamente a diferença de potencial imposta nas fronteiras do domínio”.

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = 0 \quad (2.31)$$

Ambos os fenômenos eletromagnéticos avaliados em regime permanente, seja eletrostático ou magnetostático, são descritos como problemas do tipo potencial. Podem, dessa forma, ser expressos em termos da classe de equações do tipo elíptica¹⁰, indicada na equação (2.32), em associação às condições de contorno do tipo *Dirichlet*, *Neumann* ou mista, indicadas nas equações (2.33), (2.34) e (2.35), respectivamente (SABONNADIÈRE; COULOMB, 1986):

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} = 0 \quad (2.32)$$

$$\Phi(s) = \Phi_0 = f_0(s) \quad (2.33)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n}(s) = g_0(s) \quad (2.34)$$

$$\Phi(s) + \frac{\partial \Phi}{\partial n}(s) = h_0(s) \quad (2.35)$$

¹⁰ Dentro do amplo conjunto de equações diferenciais a derivadas parciais de segunda ordem, as classes de Equações Elípticas, Equações Parabólicas e Equações Hiperbólicas têm maior destaque, pois cada uma delas é capaz de ilustrar fenômenos físicos de natureza muito particular (SABONNADIÈRE; COULOMB, 1986).

Uma fronteira que possui a função potencial, $\Phi(s)$, imposta como condição de contorno é dita como condição *Dirichlet*. Por consequência do potencial constante nesta fronteira, o campo elétrico, oriundo de seu gradiente, será obrigatoriamente, perpendicular à fronteira. Por outro lado, quando uma fronteira não possui uma condição imposta, verifica-se, “como condição intrínseca da formulação”, uma condição natural de *Neumann*, onde a densidade de fluxo elétrico, dirigido para o exterior do domínio, não é computado. Equivale, portanto, considerar que o componente de \vec{D} , perpendicular à fronteira natural de *Neumann*, é nulo e que a indução elétrica sobre este contorno é unicamente tangencial (BASTOS, 1996).

2.5.1 Método dos Elementos Finitos

Os métodos numéricos de cálculo viabilizam a resolução das equações a derivadas parciais de segunda ordem, associados aos principais problemas físicos e de engenharia, com maior nível de agilidade e eficiência. Dentre as técnicas de maior destaque, encontram-se o Método dos Momentos (MoM), Método dos Elementos de Contorno (MEC), Método das Diferenças Finitas (MDF) e o Método dos Elementos Finitos (MEF). O MEC e MoM solucionam numericamente as equações diferenciais através de seu formato integral. Por outro lado, o MDF e o MEF buscam a solução através da sua forma diferencial, sendo possível, desta forma, tratar uma maior parte do espaço do sistema (FARAH, 2014).

Estabelecido como um procedimento numérico de cálculo, o MEF requer uma associação entre a técnica de definição do elemento finito com a formulação física do problema. Tradicionalmente, este procedimento numérico é implementado através do Método Variacional, ou pelo Método de Resíduos Ponderados. Deste último, deriva o Método Residual de *Galerkin*, “atualmente o mais empregado para estabelecimento de técnicas numéricas baseada no MEF” (BASTOS; SADOWSKI, 2003).

Com os primeiros trabalhos publicados durante a década de 1950 para aplicações aeronáuticas e mecânicas, envolvendo problemas de difusão de campo, o MEF aplicado aos problemas do Eletromagnetismo tem seu início a partir dos anos 1970. A abordagem incluída na publicação de *P. P. Silvester* e *M. V. K. Chari* foi pioneira ao tratar sobre a resolução de problemas não-lineares de saturação em elementos ferromagnéticos (BASTOS; SADOWSKI, 2003; FARAH, 2014).

O aspecto conceitual implícito no MEF consiste na transformação de um domínio contínuo de estudo em associações de elementos discretos menores, respeitando a fronteira entre diferentes meios. Adicionalmente, deve também “admitir funções contínuas que representam, por exemplo, o campo de deslocamentos no domínio de um elemento”. Por fim, associado às relações constitutivas do material, torna-se possível escrever um sistema de equações lineares que retoma o estado original de todo o elemento (ASSAN, 2003).

Pensando em ambientes de código aberto e colaboração comunitária, destaca-se o aplicativo *Finite Element Method Magnetics* (FEMM), desenvolvido pelo professor e cientista David Meeker. Na sua versão 4.2, o FEMM resolve os problemas eletromagnéticos de baixa frequência, no domínio bidimensional, empregando as formulações do Método dos Elementos Finitos. No magnetismo, o *software* é capaz de representar os problemas lineares e não lineares de estática e de variação harmônica no tempo. Para os problemas de eletrostática, apenas problemas lineares são possíveis, sendo resolvidos considerando apenas a presença e os efeitos do campo elétrico de natureza irrotacional. Em termos práticos, o FEMM resolve a Equação de *Poisson* para o potencial escalar elétrico sobre um domínio e condições de contorno definidos pelo usuário. Neste caso, o usuário pode definir um problema de domínio planar ou no domínio axi-simétrico com simetria rotacional (MEEKER, 2010).

Outros aplicativos proprietários também cumprem o objetivo de simulação de sistemas físicos complexos. É o caso do COMSOL *Multiphysics*[®], utilizado nas simulações desta pesquisa. Seus módulos de aplicação abrangem grande parte das engenharias, do setor industrial e científico: problemas mecânicos estruturais, de eletromagnetismo, mecânica dos fluídos, transferência de calor, dinâmica dos corpos sólidos, entre outros. No campo do eletromagnetismo, os módulos disponíveis são capazes de representar problemas de baixa frequência (*AC/DC Module*), de rádio frequência (*RF Module*), de ondas e raios óticos (*Wave and Ray Optics Module*), plasma e semicondutores.

O Módulo AC/DC apresenta forte interação com o contexto dos sistemas elétricos de potência, âmbito de análise deste trabalho de dissertação. Ele é responsável pelas simulações de baixas frequências e de estática (eletrostática e magnetostática), avaliações campos eletromagnéticos nos domínios do tempo e da frequência, análises de

Compatibilidade e Interferência Eletromagnética, além dos componentes eletromecânicos, como transformadores e máquinas rotativas (COMSOL, 2013).

Inserido neste contexto, trabalhos recentes mostram a versatilidade dos programas baseados em MEF para análise dos sistemas elétricos de potência, incluindo os sistemas aéreos de transmissão. A partir deles, é possível levantar os perfis transversais da Intensidade de Campo Elétrico e da Intensidade de Campo Magnético de linhas aéreas operando em regime permanente (ANDRÉS, 2021; BASHARAHIL; AHMAD, 2021; POTKRAJAC; PAPANHEIM; KIZILCAY, 2017).

2.6 Considerações Finais

A partir da relevância e da contemporaneidade dos estudos apresentados que vinculam os sistemas de potência aos conceitos de simulação Multifísica, torna-se oportuno buscar ferramentas computacionais já disponíveis para desenvolvimento de modelos capazes de avaliar o comportamento das grandezas físicas de interesse com maior agilidade e acurácia.

Considerando ainda o atual estágio de desenvolvimento e discussão das particularidades das linhas compactas, seja em relação à acentuação dos níveis de campo elétrico na superfície dos condutores, ou das etapas de verificação experimental do efeito corona em ambiente de laboratório, destaca-se que a discussão sobre a correspondência entre os níveis de campo elétrico pode ser realizada a partir de simulações computacionais, sem prejuízo da qualidade dos resultados alcançados, e respaldada por validações obtidas por medições em campo e pelos resultados dos ensaios de laboratório.

*“Assaz o senhor sabe: a gente quer passar um rio a nado, e passa;
mas vai dar na outra banda é num ponto muito mais em baixo,
bem diverso do que em primeiro se pensou.*

Viver nem não é muito perigoso?”

Riobaldo, o sertanejo fáustico

3 Modelos Computacionais das Linhas Aéreas de Transmissão

3.1 Considerações Iniciais

Dentre os aplicativos proprietários comercialmente disponíveis, este trabalho adota o pacote COMSOL *Multiphysics*[®], baseado em MEF, para a condução da pesquisa. Com isso, utiliza-se o *AC/DC Module*, responsável pelas simulações em baixas frequências e estática, onde as principais simulações são realizadas em domínio bidimensional. Neste aspecto, o objetivo principal deste capítulo é apresentar a etapa de desenvolvimento e validação do modelo de linhas aéreas em ambiente COMSOL[®], para, em seguida, viabilizar a sua utilização nos estudos de casos propostos.

Inicialmente, avalia-se o comportamento do domínio de estudo em função de seu tamanho, representado pelo raio do semicírculo de ar. Para tal, recorre-se ao recurso do Domínio Artificial Bidimensional para representar os grandes domínios físicos, como o caso dos sistemas aéreos operando no espaço aberto. Nos modelos propostos, os valores de campo elétrico, calculados nas imediações das linhas de transmissão, são comparados com os resultados de medição em campo publicados na literatura para uma LT de 500 kV, juntamente com os resultados obtidos pelas equações analíticas. Utilizando a mesma implementação computacional, os valores de campo elétrico na superfície dos subcondutores agrupados em feixes são também avaliados, cujos resultados são igualmente comparados com resultados publicados na literatura.

3.2 Domínio Artificial Bidimensional

Quando representada em ambiente de simulação, uma região de espaço aberto de extensão idealmente infinita precisa ser delimitada por fronteiras numéricas fictícias. A fim de representar com razoável aproximação o fenômeno de interesse, um modelo computacional precisa levar em consideração a caracterização do domínio de estudo e suas fronteiras. Invariavelmente, as implicações dessa análise refletem nos resultados, precisão e tempo de processamento das simulações (FREI, 2016). A depender da natureza do fenômeno, três estratégias distintas de truncamento estão disponíveis em ambiente COMSOL®: *Infinite Element Domain*, *Perfectly Matched Layer Domain* e *Absorbing Layer* (COMSOL, 2022a).

O Domínio de Elemento Infinito¹¹ (DEI) surge da necessidade legítima de representação de um domínio físico infinitamente grande. Destina-se, deste modo, a governar fenômenos de natureza divergente que se propagam pelo espaço aberto, como por exemplo, a difusão de calor ou mesmo a propagação das linhas de campo elétrico geradas por uma carga pontual presente no espaço livre. Os domínios *Perfectly Matched Layer* (PML) e o *Absorbing Layer*, por outro lado, são empregados em sistemas físicos governados pela teoria de propagação de ondas. Associado ao conceito de energia irradiada, os domínios têm por objetivo representar uma região que se comporta, idealmente, como irradiador ou absorvedor. Enquanto o primeiro domínio é destinado aos estudos de ondas eletromagnéticas no domínio da frequência, o segundo deve ser empregado nas análises que envolvem variação temporal. O estudo em regime estacionário do Módulo AC/DC permite a implementação dos domínios artificiais DEI e PML (COMSOL, 2022a).

Considerando o presente interesse pelos sistemas aéreos de transmissão, a Figura 3.1 representa dois domínios distintos de estudo, ambos de raio R . A porção (a), à esquerda, desconsidera a aplicação de um domínio artificial de borda, aqui denominado Domínio Genérico. Por outro lado, a porção (b), à direita, indica a existência do DEI. Nestes casos, é típico considerar a espessura próximo a um décimo das dimensões gerais do espaço de modelagem, onde a distância da região de interesse ao domínio infinito é

¹¹ Tradução livre para *Infinite Element Domain* (COMSOL, 2022a).

um parâmetro que precisa ser estudado (COMSOL, 2022a).

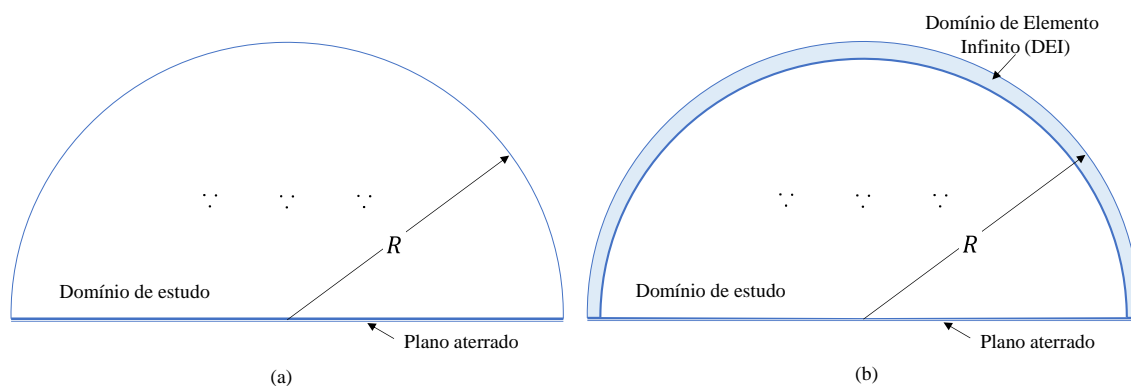


Figura 3.1 – Representação do (a) Domínio Genérico de estudo e do (b) Domínio de Elemento Infinito (DEI)

A título de comparação destes dois domínios de estudo, encontra-se presente na região de interesse uma linha aérea de transmissão convencional de 500 kV, cuja silhueta típica está representada na Figura 3.2. Esta LT apresenta afastamento horizontal das fases de 12 m e tensão operativa média de 545 kV_{rms} . Os subcondutores apresentam diâmetro de $\text{Ø}28,74 \text{ mm}$ e estão agrupados em feixes triangulares com espaçamento de 457 mm. Como referência de cálculo, a altura cabo-solo média dos subcondutores é de 11 m (GUIMARÃES, 2005).

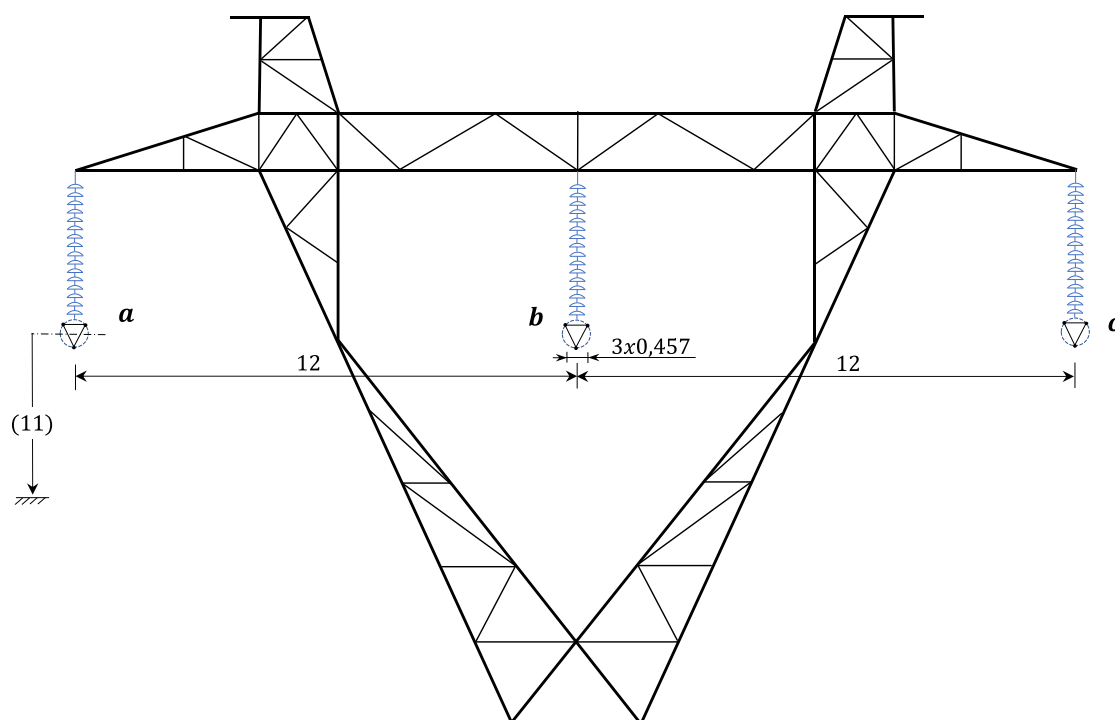


Figura 3.2 – Silhueta da estrutura típica de uma LT convencional de 500 kV com feixe triangular de subcondutores. Dimensões em metros. Desenho sem escala. Elaborado com dados extraídos de (GUIMARÃES, 2005).

Ainda pela Figura 3.2, a distância indicada entre parênteses refere-se à menor altura do cabo condutor, definida pela distância mínima cabo-solo. Para um vão teórico, sendo ele regular e sem desnível, e com alturas idênticas das estruturas suportes, esta distância ocorre no valor médio do vão. Para um sistema trifásico de transmissão, considera-se uma fonte de alimentação operando com desfasamento angular equilibrado, igual $2\pi/3$ radianos. Como resultado, as cargas elétricas sobre os condutores também apresentam variação senoidal e são expressas em variáveis complexas, com parte real e parte imaginária.

Garantindo que os valores de campo sejam avaliados a uma distância suficiente das fontes de cargas, os condutores podem ser substituídos por distribuições filamentosas de cargas posicionadas paralelamente ao solo. Devido à natureza macroscópica do fenômeno eletrostático e ao exíguo tempo de relaxação das cargas induzidas no solo, é possível assumir o solo como um Condutor Elétrico Perfeito (CEP). Despreza-se, por fim, os efeitos de distorções de campos ao se considerar os condutores tomados no meio do vão. As considerações simplificativas de cálculo, tradicionalmente empregadas, permitem transpor o problema para o domínio planar com satisfatório nível de pertinência e acurácia. A primeira delas assume que o espaço aberto compreendendo as imediações da LT está livre de cargas espaciais, garantido que as cargas elétricas depositadas sobre a superfície dos subcondutores são as únicas fontes do campo elétrico. Portanto, a carga espacial resultante do efeito corona é negligenciada (ZAFFANELLA, 2005).

A Figura 3.3 apresenta o modelo bidimensional de estudo desenvolvido em ambiente COMSOL[®] para o cálculo do campo elétrico da LT convencional de 500 kV supracitada, incluindo a presença do DEI, com destaque para o sistema automático de malhas. A primeira etapa de elaboração de um programa MEF é, comumente, designada por pré-processamento. Nesta fase, o usuário fornece os elementos gráficos (geometria) do domínio, define as condições de contorno e as fontes. Ainda nesta etapa, é necessário discretizar o domínio pela geração da malha.

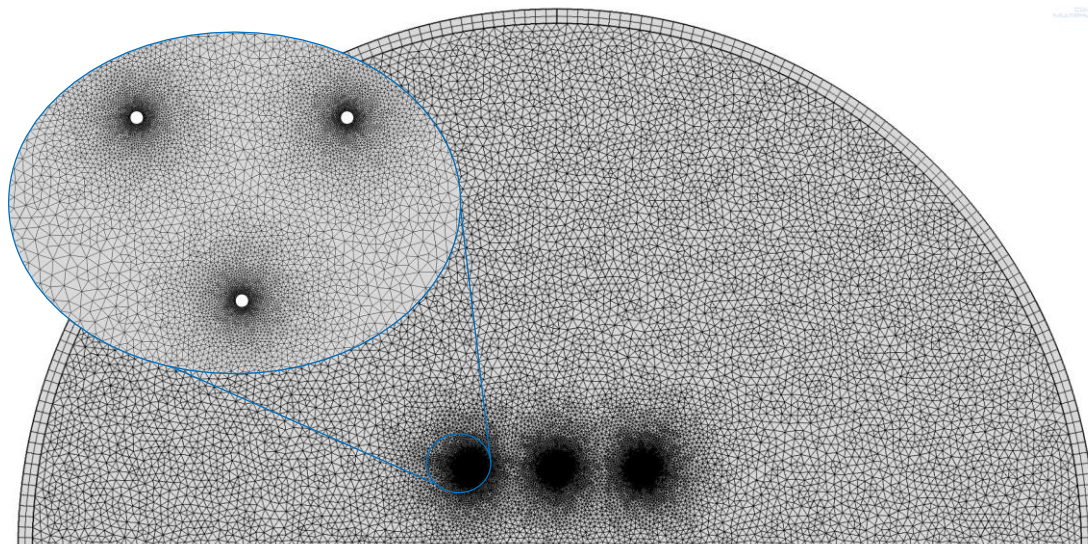


Figura 3.3 – Modelo numérico da LT convencional de 500 kV com feixe triangular de subcondutores.

3.2.1 Avaliação dos Domínios Genéricos

Num primeiro momento de avaliação, desconsidera-se a aplicação do DEI para avaliação de sensibilidade de diferentes tamanhos de domínios semicirculares sobre o perfil lateral da Intensidade de Campo Elétrico da LT convencional de 500 kV supracitada, conforme representação da Figura 3.1 (a).

Neste sentido, a Figura 3.4 apresenta os resultados de simulação com domínios genéricos que variam de tamanho na faixa de $R_1 = 25\text{ m}$ até $R_5 = 75\text{ m}$. Os resultados tomados ao longo do perfil transversal da LT, nas respectivas posições dos subíndices, em metros, estão agrupados no gráfico de barras auxiliar da Figura 3.4. Desta forma, o primeiro grupo de medições, x_{10} , refere-se ao valor do campo elétrico tomado a 10 m, transversalmente à LT, considerando a faixa dos diferentes tamanhos de domínios genéricos – R_1 a R_5 .

O segundo grupo de medições, denominado E_{max} , refere-se à posição onde o valor do campo transversal é máximo, localizado a 13,5 m distante da LT, aproximadamente. Para fins de comparação, o Método das Imagens é escolhido como metodologia de cálculo para obtenção dos valores de referência, estando indicado em cinza no gráfico de barras. Em relação ao valor máximo do campo elétrico, os dois primeiros domínios genéricos adotados, $R_1 = 25\text{ m}$ e $R_2 = 35\text{ m}$, não são capazes de aproximar os resultados, em relação ao valor de referência, como apresentado na Figura 3.4.

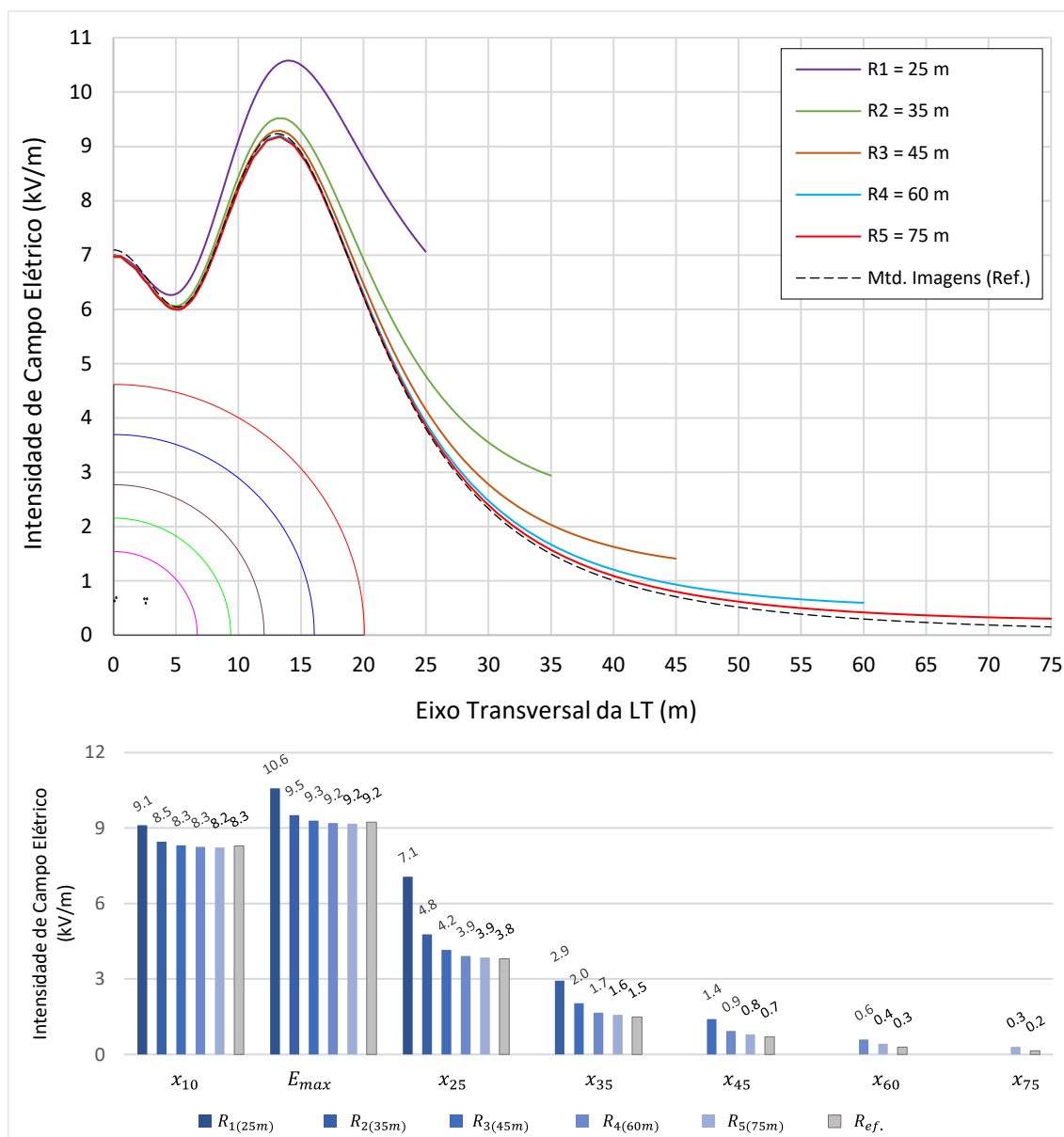


Figura 3.4 – Perfil lateral de campo elétrico da LT de 500 kV para diferentes domínios genéricos de estudo

Se considerado o perfil completo da curva de decaimento, o domínio $R_3 = 45 \text{ m}$ também não capaz de representar adequadamente o comportamento da curva de referência, resultado evidenciado com maior destaque a partir da coordenada $x = 20 \text{ m}$. Sendo assim, os resultados de simulação, em ambiente COMSOL[®], mostram que os domínios genéricos com raio de 60 m e 75 m são mais eficazes para a determinação do perfil transversal de campo elétrico para a LT convencional de 500 kV da Figura 3.2.

O cálculo do desvio percentual dos resultados de simulação considerou a formulação apresentada na equação (3.1), formulada a partir do módulo diferença entre a razão dos valores de referência e de simulação com a unidade.

$$\delta_e(\%) = \left| \frac{e_{calc}}{e_{ref}} - 1 \right| \cdot 100\% \quad (3.1)$$

onde,

$\delta_e(\%)$ é o valor do erro percentual;

e_{calc} é o valor do campo elétrico obtido em simulação;

e_{ref} é o valor do campo elétrico tomado como referência.

Considerando os resultados do modelo construído a partir dos domínios genéricos de estudo, apresentados na Figura 3.4, os erros percentuais calculados em relação ao valor de referência, empregando o Método das Imagens, estão indicados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Erro percentual de simulação associado ao cálculo do campo elétrico para diferentes domínios de estudo

Domínios	x_{10}	E_{max}	x_{25}	x_{35}	x_{45}	x_{60}	x_{75}
$R_{25 m}$	9.9%	14.6%	85.5%				
$R_{35 m}$	2.1%	3.1%	25.3%	96.7%			
$R_{45 m}$	0.3%	0.6%	9.2%	36.0%	99.9%		
$R_{60 m}$	0.4%	0.3%	3.0%	11.4%	32.2%	100.3%	
$R_{75 m}$	0.7%	0.6%	1.2%	5.7%	13.2%	41.4%	100.8%

Para todos os domínios genéricos indicados na Tabela 3.1, à medida que se caminha ao longo do eixo transversal, afastando-se dos condutores da LT, o erro percentual de simulação se eleva. Este efeito está associado à aproximação com a borda da fronteira numérica, onde o valor máximo de erro ocorre justamente sobre a borda do respectivo domínio. Este comportamento está destacado, pelo sentido da seta vermelha, na Tabela 3.1. Esta influência fronteira faria supor que o menor domínio de estudo, $R_{25 m}$, apresentasse o maior erro percentual sobre os resultados de simulação, imaginando que o pequeno domínio de estudo traria maiores limitações para o modelo. Por outro lado, os erros percentuais crescem no sentido de crescimento do tamanho do domínio, chegando ao valor máximo no domínio de raio $R_{75 m}$.

3.2.2 Avaliação do Domínio de Elemento Infinito

Em seguida, a segunda etapa de avaliação numérica considera a incorporação de uma fronteira artificial do tipo DEI com espessura de 2 m sobre os mesmos domínios apresentados no item anterior. Deste modo, este comportamento está associado ao modelo numérico apresentado na Figura 3.3. Mantendo-se inalteradas as demais condições, os resultados de simulação estão apresentados na Figura 3.5, considerando os domínios $R_1 = 25\text{ m}$, $R_2 = 35\text{ m}$ e $R_5 = 75\text{ m}$. Os demais domínios, omitidos para não sobrecarregar a imagem gráfica, apresentam comportamento análogo a estes três resultados. As curvas pontilhadas referem-se aos resultados obtidos inicialmente, com a aplicação dos domínios genéricos, para as respectivas dimensões, e podem ser retomadas pelo gráfico da Figura 3.4.

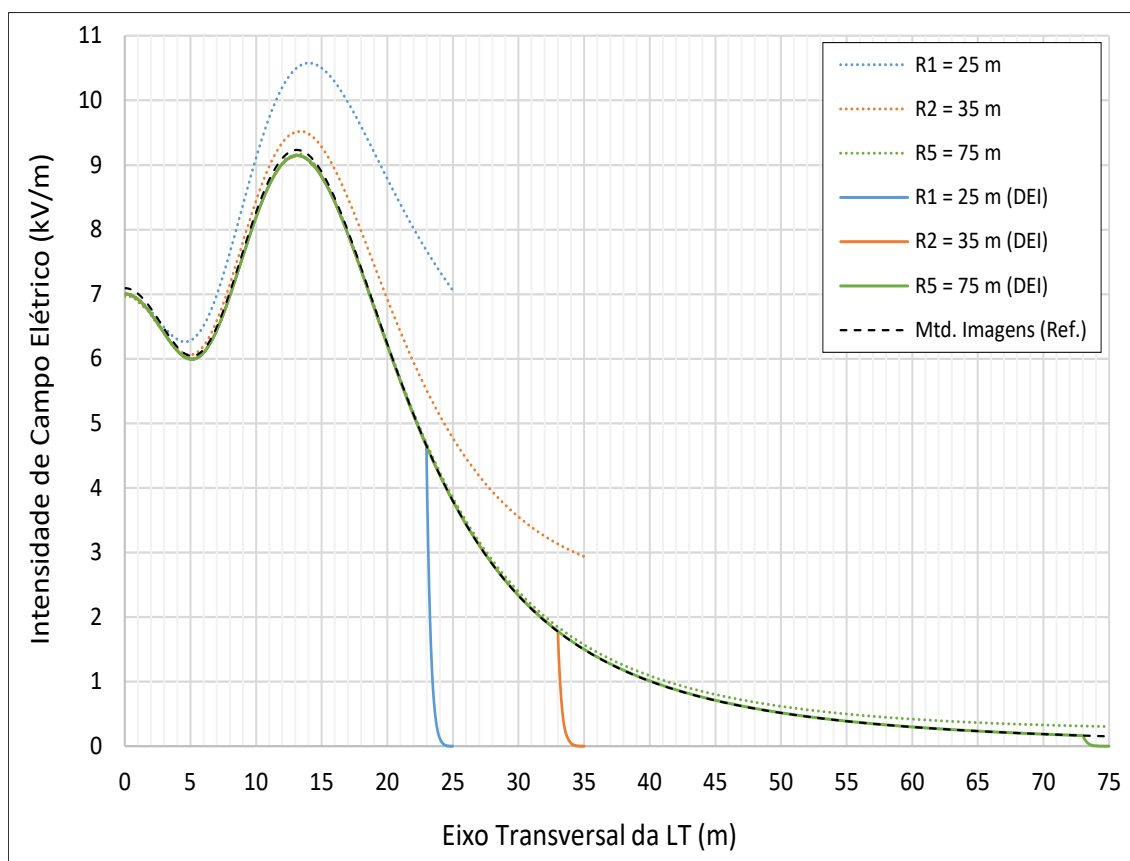


Figura 3.5 – Perfil lateral de campo elétrico da LT de 500 kV considerando os Domínios de Elemento Infinito (DEI).

Considerando, agora, a aplicação do DEI, os três domínios de estudo apresentam resultados concordantes e equivalentes ao resultado obtido com a referência de cálculo, aplicando o Método das Imagens, o que evidencia a efetividade do Domínio de Elemento Infinito disponível no ambiente COMSOL®. Este recurso é capaz, portanto, de representar

regiões de espaço aberto por meio regiões numéricas artificiais de menor dimensão e sem prejuízo dos resultados e distorções de campo. Desta forma, mostra-se que o domínio de estudo $R_1 = 25 \text{ m}$ associado à fronteira do tipo DEI é equivalente ao domínio genérico $R_5 = 75 \text{ m}$ até a distância transversal de 23 m.

O decaimento do campo elétrico a zero, no espaço complementar de dois metros à frente, evidencia a zona destinada à fronteira infinita. Destaca-se que esta representação neutraliza os efeitos de proximidade de campo sobre os valores calculados dentro da região de interesse, onde resultados estão sobrepostos. Este comportamento se repete, de igual forma, para os modelos de dimensões de $R_2 = 35 \text{ m (DEI)}$ e $R_5 = 75 \text{ m (DEI)}$.

3.3 Comportamento do Campo Elétrico Distante

Para fins de validação do modelo numérico elaborado em ambiente COMSOL[®], considerando a aplicação do Domínio de Elemento Infinito de raio $R_2 = 35 \text{ m}$, o perfil lateral da Intensidade de Campo Elétrico da LT convencional de 500 kV está apresentado no gráfico da Figura 3.6.

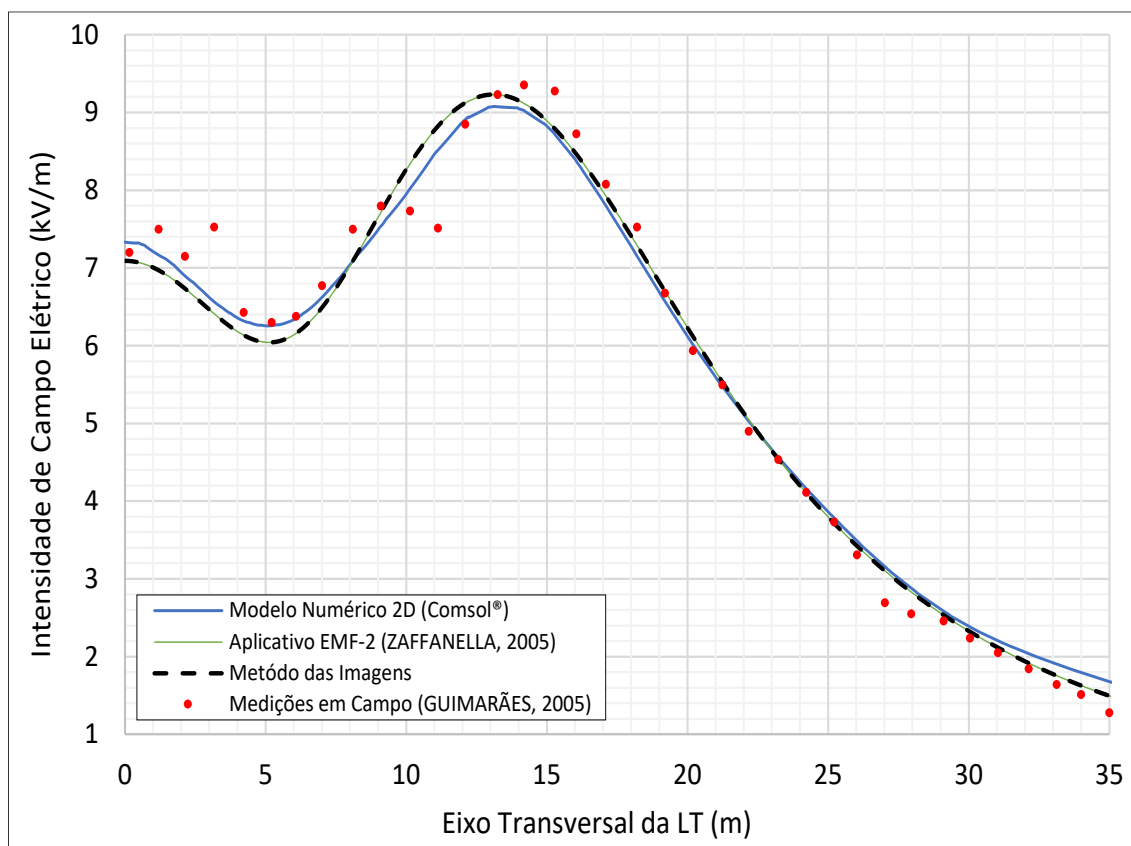


Figura 3.6 – Perfil lateral de campo elétrico da LT Convencional de 500 kV.

Para respaldar os resultados de simulação desta dissertação, foram adicionadas três metodologias distintas: A primeira delas considera a aplicação direta do Método das Imagens, já apresentada anteriormente como referência comparativa. A segunda metodologia, considera a utilização do aplicativo de cálculo EMF-2, discutido e disponibilizado em (ZAFFANELLA, 2005). Finalmente, o terceiro grupo de resultados considera as medições de campo realizadas em um vão típico da LT sob estudo, disponíveis em (GUIMARÃES, 2005). Este último grupo de medições, dado sua representatividade e respaldo técnico, passa a ser tomado como referência comparativa, em substituição à metodologia adotada inicialmente via Método das Imagens.

A etapa de pós-processamento do ambiente COMSOL[®] permite, ainda, a construção de gráficos e mapas de cores para interpretação dos resultados numéricos. Deste modo, obtém-se as curvas equipotenciais e a representação vetorial normalizada das linhas de campo elétrico do sistema aéreo em estudo, cujos resultados gráficos estão apresentados na Figura 3.7.

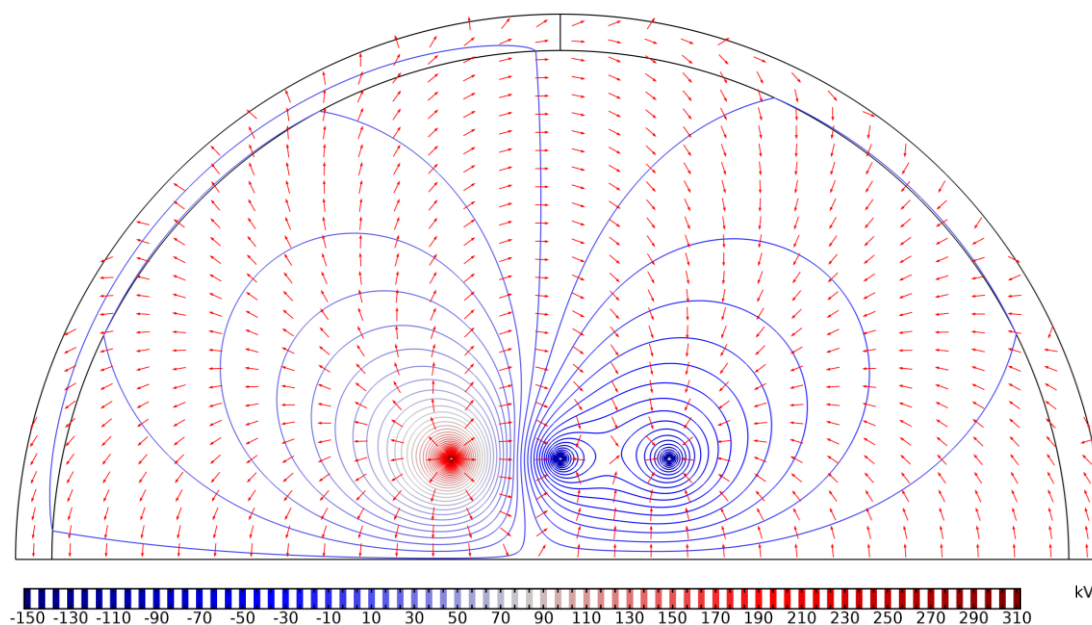


Figura 3.7 – Curvas equipotenciais e linhas de campo elétrico da LT convencional de 500 kV.

3.3.1 Comparação entre Modelos Bidimensionais e Tridimensionais

Para fins de comparação do tempo de processamento e dos resultados de simulação, um modelo numérico considerando geometria tridimensional é proposto. Considerando a geometria do problema sob análise, o modelo tridimensional pode ser construído com relativa simplicidade, quando tomado a partir das definições bidimensionais preliminares.

Neste caso, o recurso *Extrude*, disponível na aba Geometria, é o comando principal responsável pela transformação de elementos planares em elementos tridimensionais.

De maneira análoga ao discutido no tópico anterior para o caso da LT convencional de 500 kV, a Figura 3.8 (a) apresenta um modelo tridimensional que incorpora o Domínio de Elemento Finito de espessura de 2 m e alcance de $R_2 = 35\text{ m}$, bem como a geração automática de malhas.

Figura 3.8 (b) apresenta os resultados numéricos de simulação para o cálculo do campo elétrico tomado ao nível do solo.

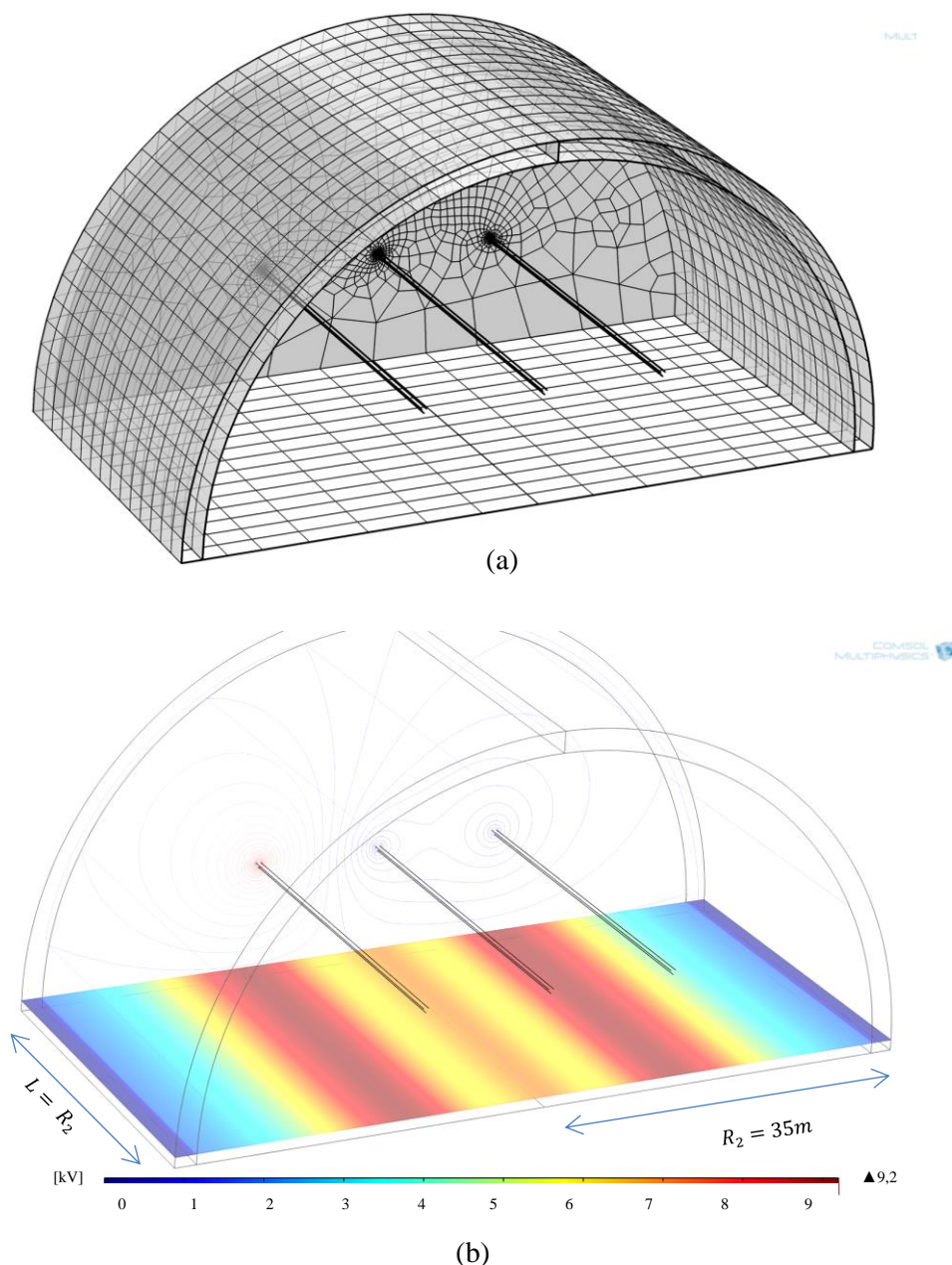


Figura 3.8 – Modelo numérico tridimensional da LT convencional de 500 kV de feixe triangular de subcondutores.

Considerando uma máquina equipada com sistema operacional de 64 bits, processador Intel® Core™ i9-7920X CPU @ 2.90 GHz 2.90 GHz e memória instalada de

128 GB, a Tabela 3.2 apresenta os tempos de processamento requeridos para se obter os resultados de campo elétrico para os modelos numéricos da LT de 500 kV, em função do tamanho do domínio de fronteira artificial do tipo DEI.

Tabela 3.2 – Esforço computacional dos modelos bidimensional e tridimensional.

Domínios	Tempo de Processamento [s]	
	Modelo 2D	Modelo 3D
$R_{25\text{ m}}$	2	125
$R_{35\text{ m}}$	3	206
$R_{45\text{ m}}$	3	119
$R_{60\text{ m}}$	3	120
$R_{75\text{ m}}$	3	128

Em termos gráficos, a Figura 3.9 apresenta os resultados de simulação para o perfil lateral de campo elétrico obtidos com os modelos desenvolvidos em domínio bidimensional e tridimensional, considerando um Domínio de Elemento Finito de espessura de 2 m e alcance de $R_2 = 35\text{ m}$. Ambos os resultados são concordantes e equivalentes ao resultado de referência.

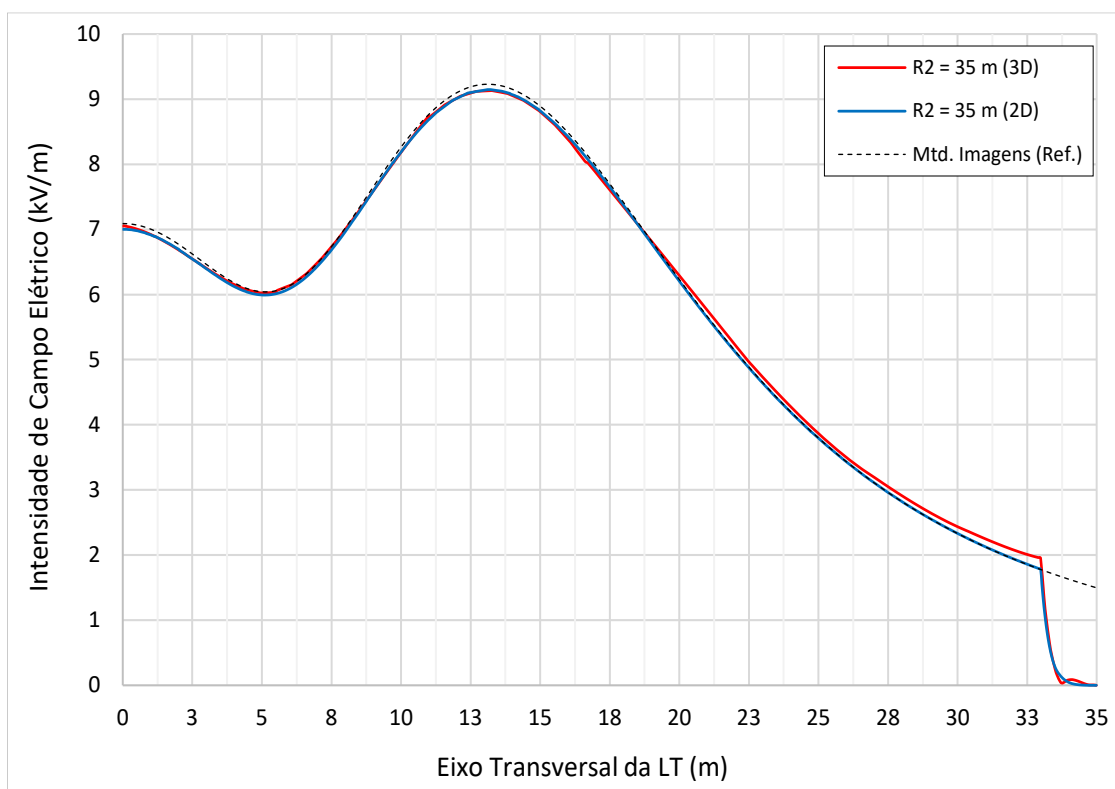


Figura 3.9 – Perfil lateral de campo elétrico da LT de 500 kV considerando o modelo bidimensional e tridimensional.

O resultado do modelo tridimensional apresenta um pequeno descolamento, em relação aos demais, à medida que se caminha em direção à fronteira, a partir da distância

transversal de $x = 20 \text{ m}$. Em função dos tempos de processamento indicados na Tabela 3.2, associados ao bom comportamento dos resultados e à sua facilidade de construção e manipulação no ambiente de computador, decidiu-se, portanto, em adotar os modelos bidimensionais para a condução dos estudos de caso.

Para maiores detalhes das simulações, consultar o Apêndice A – Registros de Simulação.

3.4 Comportamento do Campo Elétrico Superficial

3.4.1 Sistema com Cinco Subcondutores por Fase

Os modelos desenvolvidos em ambiente COMSOL[®] permitem, ainda, a avaliação da Intensidade de Campo Elétrico sobre a superfície dos subcondutores dos sistemas aéreos de transmissão. Basta, para tal, vincular as fronteiras dos subcondutores como referência para o cálculo, durante a etapa de pós-processamento do aplicativo. Neste contexto e para fins de validação, a Figura 3.10 apresenta a disposição geométrica de um sistema aéreo trifásico com cinco condutores agrupados em feixe assimétrico operando com tensão nominal de 500 kV, para o qual se deseja realizar o cálculo do campo elétrico na superfície de seus subcondutores de diâmetro externo igual a $d_{\phi} = 27,8 \text{ mm}$ (GOMES JR., 1995 *apud* PAGANOTTI, 2012).

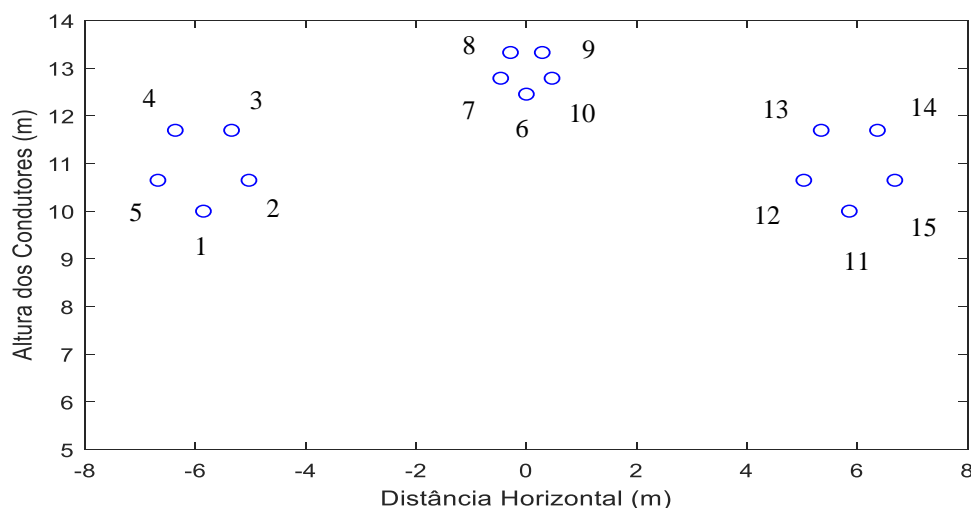


Figura 3.10 – Disposição geométrica de um sistema aéreo trifásico de 500 kV com cinco condutores (GOMES JR., 1995 *apud* PAGANOTTI, 2012).

A Figura 3.11 apresenta os resultados de simulação utilizando o módulo AC/DC do COMSOL[®], associados àqueles obtidos pelo Método das Imagens Sucessivas por

(GOMES JR., 1995 *apud* PAGANOTTI, 2012), e utilizados como referência comparativa. As barras em azul claro referem-se aos resultados calculados pelo aplicativo COMSOL[®], decorrente desta pesquisa. As barras em azul escuro, por outro lado, são os resultados retirados do trabalho de (GOMES JR., 1995 *apud* PAGANOTTI, 2012).

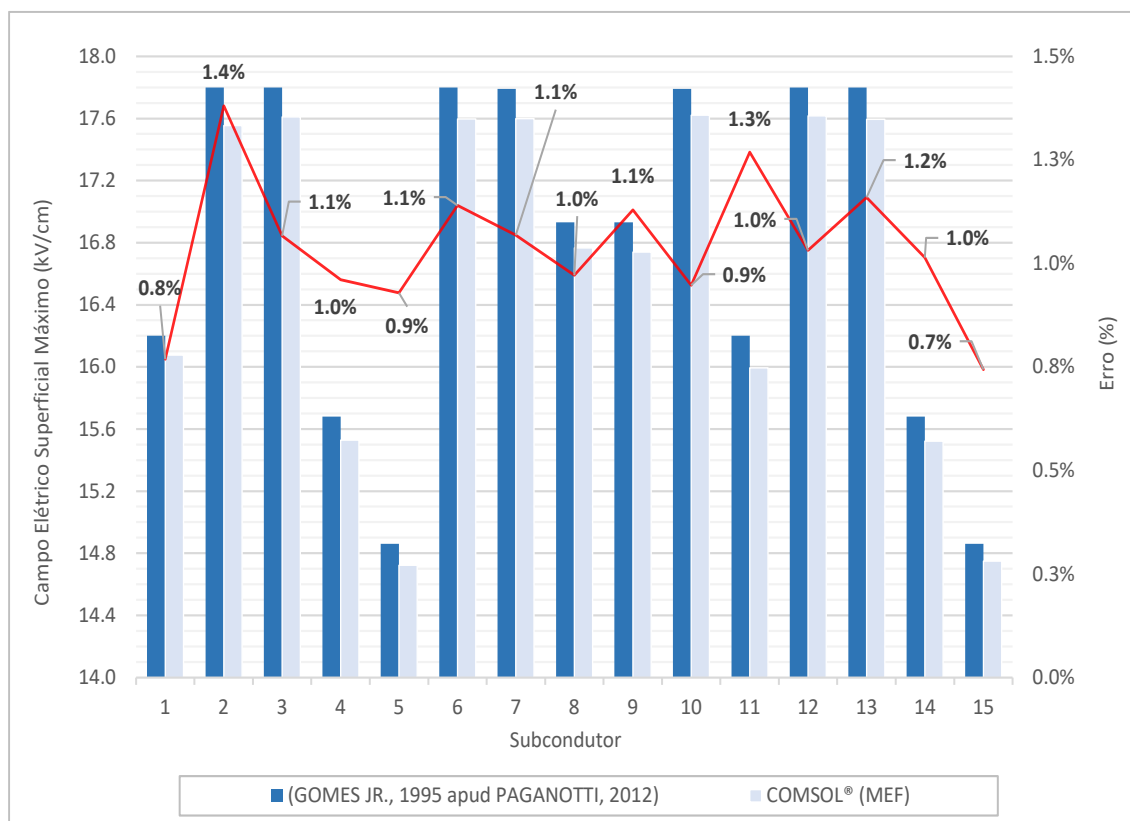


Figura 3.11 – Intensidade máxima de campo elétrico superficial do sistema aéreo trifásico de 500 kV com cinco condutores

Ambos os valores da intensidade de campo elétrico são lidos pelo eixo vertical da esquerda do gráfico, na unidade kV/cm . Sobre o gráfico de barras, foi adicionado a curva em vermelho para expressar a comparação em termos dos erros percentuais, $\delta_e(\%)$, entre as duas medições, cujos valores são calculados conforme equação (3.1). Seu valor deve ser lido pelo eixo vertical direita, na unidade percentual.

O valor máximo de campo elétrico superficial calculado por (GOMES JR., 1995 *apud* PAGANOTTI, 2012) está associado ao conjunto formado pelos subcondutores de índices 02, 03, 06, 07, 10, 12 e 13. Este resultado está coerente com os resultados de simulação pelo aplicativo COMSOL[®]. Considerando a simulação deste sistema de cinco condutores por fase, o erro máximo obtido é de 1,4%, associado para o subcondutor N.º 2. De maneira global, o valor médio do erro calculado para todos os subcondutores

do sistema está limitado a 1%, cujos resultados apontam para uma concordância considerada aceitável dos resultados de simulação.

De forma semelhante ao adotado para os resultados do perfil transversal do campo elétrico, do tópico anterior, adiciona-se um terceiro grupo de simulação aos resultados já obtidos. Trata-se da utilização direta do aplicativo de cálculo denominado CC-1, descritivo e disponibilizado em (ZAFFANELLA, 2005). A Tabela 3.3 resume os resultados de simulação dos valores máximos de campo elétrico sobre a superfície dos subcondutores do sistema trifásico com cinco condutores, operando com tensão nominal de 500 kV.

Tabela 3.3 – Intensidade máxima de campo elétrico superficial e erro percentual do sistema de cinco subcondutores

Subcondutor	GOMES JR., 1995 <i>apud</i> PAGANOTTI, 2012 (<i>kV/cm</i>)	CC-1 (ZAFFANELLA, 2005) (<i>kV/cm</i>)	COMSOL® (<i>kV/cm</i>)	δ_e (%)
1	16,20	16,20	16,08	0.8%
2	17,80	17,77	17,55	1.4%
3	17,80	17,76	17,61	1.1%
4	15,68	15,65	15,53	1.0%
5	14,86	14,85	14,72	0.9%
6	17,80	17,81	17,60	1.1%
7	17,79	17,80	17,60	1.1%
8	16,93	16,92	16,77	1.0%
9	16,93	16,92	16,74	1.1%
10	17,79	17,80	17,62	0.9%
11	16,20	16,20	15,99	1.3%
12	17,80	17,77	17,62	1.0%
13	17,80	17,76	17,59	1.2%
14	15,68	15,65	15,52	1.0%
15	14,86	14,85	14,75	0.7%

Os resultados de simulação e os erros percentuais associados, apresentados na Tabela 3.3, ressaltam a validade do modelo implementado em ambiente COMSOL® sinalizando para uma adequada avaliação dos níveis de campo elétrico associados a um sistema aéreo de transmissão de energia. Enquanto o erro percentual máximo calculado por (PAGANOTTI, 2012) utilizando o MIS é da ordem de 5,3%, o modelo numérico aqui desenvolvido apresenta erro percentual máximo da ordem de 1,4%, levando em consideração os valores de referência de (GOMES JR., 1995 *apud* PAGANOTTI, 2012).

3.4.2 Sistema com Seis Subcondutores por Fase

Com um modelo numérico versátil, o ambiente COMSOL[®] permite, portanto, o cálculo do campo elétrico nas imediações de uma LT, na altura do nível do solo e ao longo da faixa de passagem, bem como o campo elétrico máximo na superfície de seus subcondutores. Esta metodologia de cálculo em ambiente COMSOL[®] pode ser estendida para outras configurações geométricas de feixes, na qual podem ser obtidos resultados gráficos complementares.

Considerando, como segundo exemplo, a configuração típica da linha compacta de 500 kV com feixe regular hexagonal, apresentada na Figura 2.2, a intensidade máxima de campo elétrico sobre a superfície dos seis cabos condutores da fase central deste sistema de transmissão está representada na Figura 3.12. Para possibilitar o respaldo comparativo, as simulações em ambiente COMSOL[®] foram realizadas considerando o cabo condutor CAA *Tern* com diâmetro de $\varnothing 27,03 \text{ mm}$; o centro do feixe da fase central localizado a uma altura de $30,52 \text{ m}$ e o sistema trifásico alimentado com tensão máxima operativa de 550 kVrms . Os resultados de simulação foram comparados com aqueles calculados pelo programa SIGA, desenvolvido no Centro de Pesquisas em Energia Elétrica (CEPEL) e apresentados em (ELETROBRÁS, 2012).

O desvio percentual máximo entre os resultados, calculado conforme equação (3.1), é de 1,19% e corresponde ao subcondutor número 6. Por sua vez, se tomados os seis subcondutores do feixe, o erro médio dos resultados é equivalente a 0,80%. Os valores de campo elétrico calculados para a fase central são, em média, 16% superiores aos valores calculados para as fases laterais, e por isso decidiu-se pela apresentação somente destes associados à fase central. No gráfico de barras da Figura 3.12, os resultados em azul escuro referem-se àqueles obtidos em ambiente COMSOL[®], enquanto os resultados em azul claro estão disponibilizados em (ELETROBRÁS, 2012).

Embora implícita em seu texto, é importante destacar que a metodologia de cálculo verificada em (ELETROBRÁS, 2012) considera os condutores posicionados na altura de fixação da estrutura típica. Por outro lado, considerando os vãos típicos de linhas brasileiras de 500 kV e os condutores operando em regime de curta duração, os valores típicos de altura mínima cabo-solo são da ordem de $12,0 \text{ m}$, portanto, inferiores àqueles verificados junto às estruturas suportes.

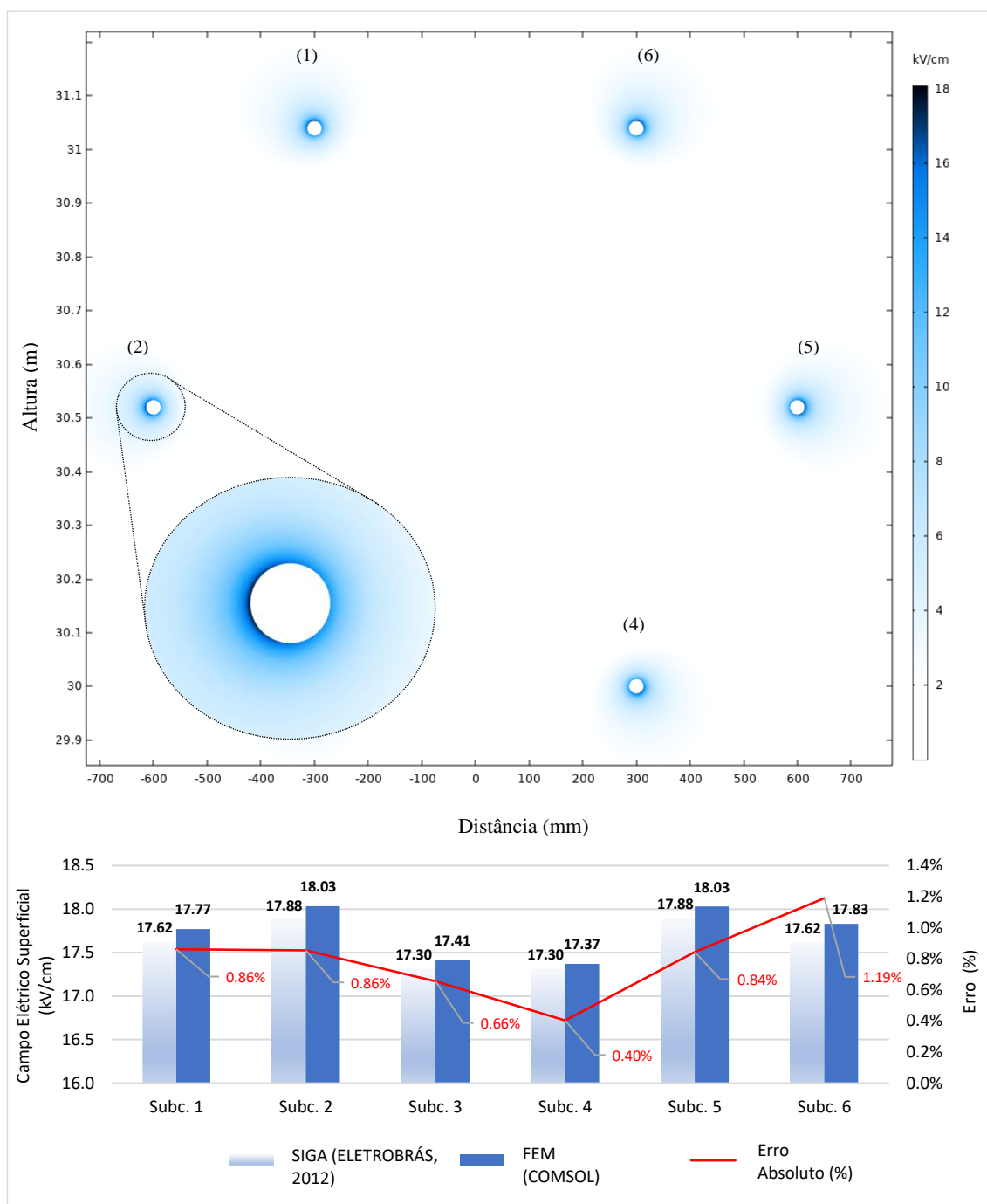


Figura 3.12 – Intensidade máxima do campo elétrico na superfície dos subcondutores da fase central da Linha Compacta de 500 kV com feixe de 600 mm.

Faz-se oportuno, portanto, destacar a influência da altura dos cabos condutores, em relação ao nível do solo, sobre o valor da intensidade de campo elétrico superficial. Neste caso, é possível estabelecer uma metodologia alternativa de cálculo ao posicionar os subcondutores na altura mínima estabelecida para a condição de cabo-solo.

A Figura 3.13 apresenta os resultados de simulação desta avaliação de influência da altura dos cabos condutores sobre a intensidade máxima de campo elétrico superficial. Dado a regularidade do feixe proposto e considerando a natureza do problema, os valores de campo elétrico da fase central apresentam simetria vertical entre os três subcondutores da direita e os da esquerda. Por este motivo, escolheu-se apresentar apenas os resultados dos três subcondutores da face esquerda do feixe central, descritos pelos índices 1, 2 e 3.

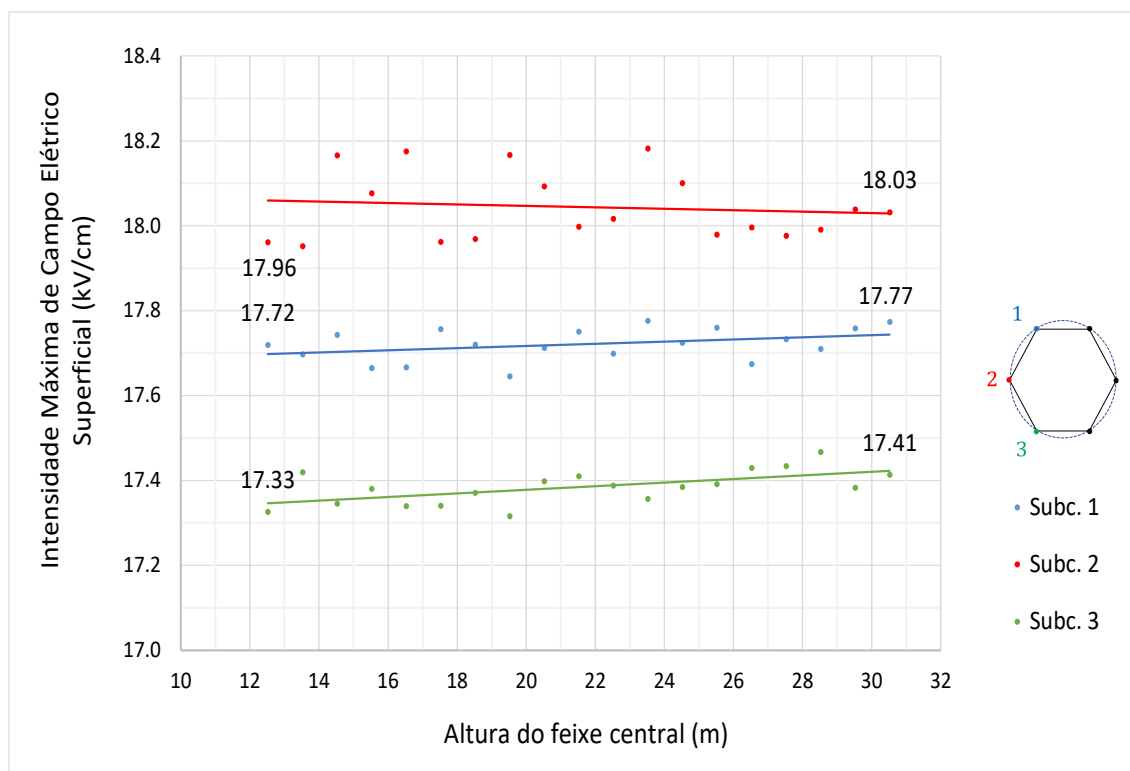


Figura 3.13 – Intensidade máxima de campo elétrico superficial em função da altura do feixe central da Linha Compacta de 500 kV.

Considerando as condições do problema, os resultados apontados na Figura 3.13 sinalizam para uma pequena sensibilidade do campo elétrico superficial do arranjo hexagonal frente à uma variação de altura, com variações percentuais inferiores a 1%. Esta pequena influência da altura do arranjo sobre os resultados de campo elétrico na superfície dos subcondutores pode ser explicada pela relação h/d_c , onde h é a altura do arranjo e d_c , o diâmetro do subcondutor. Considerando a menor altura avaliada nas simulações, $h = 12\text{ m}$, esta relação assume a ordem de grandeza de 400 vezes, cujos condutores podem ser considerados suficientemente distantes do plano do solo. Deste modo, apenas a configuração local, seja ela, o diâmetro do cabo condutor e a geometria do feixe, é capaz de alterar significativamente os valores de campo elétrico superficial.

3.5 Considerações Finais

Este capítulo mostrou que os Domínios Genéricos de estudos, se adotados, requerem modelos numéricos de dimensões superiores para uma adequada avaliação dos parâmetros físicos, sob o risco de penalizar os resultados caso modelos de dimensões restritivas sejam empregados. Por outro lado, o estudo de validação mostrou que os modelos numéricos desenvolvidos a partir da aplicação do Domínio de Elemento Infinito (DEI) Bidimensional foram capazes de aproximar os resultados de simulação com as referências adotadas de cálculo, sejam elas analíticas ou de medições experimentais em campo. Estes resultados evidenciaram a efetividade do DEI dentro do contexto do ambiente COMSOL[®]. Deste modo, o recurso foi capaz de representar regiões de espaço aberto por meio regiões numéricas artificiais de menor dimensão e sem prejuízo dos resultados.

As validações comparativas realizadas para as condições de campo elétrico distante, calculado ao nível do solo, considerando uma LT convencional de 500 kV, bem como a avaliação do campo elétrico na superfície dos subcondutores agrupados em feixe, apresentaram desvio percentual máximos da ordem de 1,4%, em relação aos resultados publicados na literatura considerando metodologias complementares. Assim, os modelos mostraram-se eficazes na representação do fenômeno associado às linhas aéreas. A comparação entre os modelos bidimensionais e tridimensionais, realizada em função dos tempos de processamento e a partir do comportamento dos resultados gráficos, indicou a viabilidade de se adotar modelos bidimensionais para a condução dos estudos de caso, sem prejuízo para os resultados almejados.

Deste modo, a partir da relevância e da contemporaneidade dos estudos que vinculam os sistemas de potência aos conceitos de simulação Multifísica, torna-se oportuno buscar ferramentas computacionais já disponíveis, como o caso do COMSOL[®], para desenvolvimento de modelos capazes de avaliar o comportamento das grandezas físicas de interesse com maior agilidade e acurácia.

*"O correr da vida embrulha tudo, a vida é assim: esquenta e esfria,
aperta e daí afrouxa, sossega e depois desinquieta.*

O que ela quer da gente é coragem."

Riobaldo, o sertanejo fústico

4 Estudos de Caso

4.1 Considerações Iniciais

Após a etapa de implementação e validação dos modelos das linhas aéreas de transmissão em ambiente COMSOL[®], este capítulo apresenta o desenvolvimento dos estudos computacionais para avaliação dos arranjos condutores compactos e da relação estabelecida entre campos gerados por sistemas trifásicos e reproduções monofásicas em ambiente fechado de laboratório.

O primeiro estudo faz referência à LT 230 kV *Sedro Woolley – March Point*, uma linha compacta de 230 kV, com um condutor por fase, avaliando os impactos da representação, em ambiente de laboratório, dos arranjos monofásicos de ensaio durante a verificação experimental do efeito corona visual. Resultados de simulação numérica, em consonância com os resultados de ensaios publicados na literatura, mostram o comportamento linear da intensidade de campo elétrico sobre a superfície do condutor singelo do arranjo sob ensaio, em função da tensão monofásica de ensaio.

O segundo estudo investiga de que maneira a redução das distâncias entre fases, associada também à expansão dos feixes de condutores, impacta sobre a elevação dos níveis de campo elétrico na superfície dos condutores. Para isso, duas configurações de linhas aéreas de 500 kV publicadas em literatura são adotadas: uma delas, de configuração compacta e a segunda, de configuração tradicional. Considerando que ambas as configurações possuem quatro condutores por fase, variações do afastamento da distância entre as fases e do tamanho dos feixes de condutores são propostas para avaliação do impacto sobre os níveis de campo elétrico superficial e campo elétrico distante.

O terceiro estudo de caso propõe uma verificação dos níveis de sensibilidade do campo elétrico superficial associados ao arranjo monofásico de ensaio de uma LPNE de 500 kV. Uma vez instalado em ambiente de laboratório, o efeito de proximidade sobre este tipo de arranjo deve ser simulado por meio da instalação de painéis laterais aterrados

com afastamento pré-determinado. Neste caso, o estudo investiga esta sensibilidade tanto em função da presença e afastamento dos painéis reflexivos, quanto da tensão de ensaio aplicada ao arranjo.

4.2 LT 230 kV *Sedro Woolley – March Point*

A linha de transmissão objeto deste primeiro estudo de caso remete ao contexto de modernização do sistema elétrico do estado norte-americano de *Washington*, nos idos finais de 1980. A indisposição para aquisição de novas faixas de servidão decorrente, sobretudo, da reação negativa da sociedade civil local, levou a concessionária *Puget Power* à decisão de repotencializar¹² trechos de linhas já instaladas, ao lugar de propor instalações em novos trechos de terra. A fim de aproveitar faixas já disponíveis e com o objetivo de minimizar os efeitos de campo elétrico e magnético ao nível do solo, a solução adotada foi, portanto, a instalação de uma linha compacta de 230 kV. Considerando as particularidades da região atravessada pela LT, trechos com um ou dois cabos condutores, por fase, foram propostos. Ambos utilizam isoladores poliméricos do tipo *line post* em estruturas suportes de madeira com disposição triangular das fases (MARUVADA; CHARTIER, 2008a).

Em função dos desdobramentos intrínsecos associados à proposta de compactação das fases sobre os níveis de campo elétrico na superfície dos condutores e acessórios, bem como a necessidade de obtenção da certificação de atendimento aos níveis regulatórios exigidos, os envolvidos no projeto da LT 230 kV *Sedro Woolley – March Point* decidiram pela realização dos ensaios de verificação do efeito corona visual, cujos resultados e experiência prática estão publicados em (CHARTIER *et al.*, 1995). A Figura 4.1 apresenta a silhueta típica da estrutura utilizada na LT compacta de 230 kV, considerando o trecho em que apenas um cabo condutor de alumínio (CA) 1272 kcmil *Narcissus* (Ø33,02 mm) é empregado, por fase.

¹² O termo Repotencialização (*Uprating*) pode ser definido como um “aumento da característica elétrica da linha aérea”, com vistas ao incremento de sua capacidade de transmissão. Por outro lado, o termo Revitalização (*Upgrading*) é usado para tratar de reforços nos componentes da linha, buscando-se, assim um melhoramento em sua confiabilidade (PESSOA, 2017).

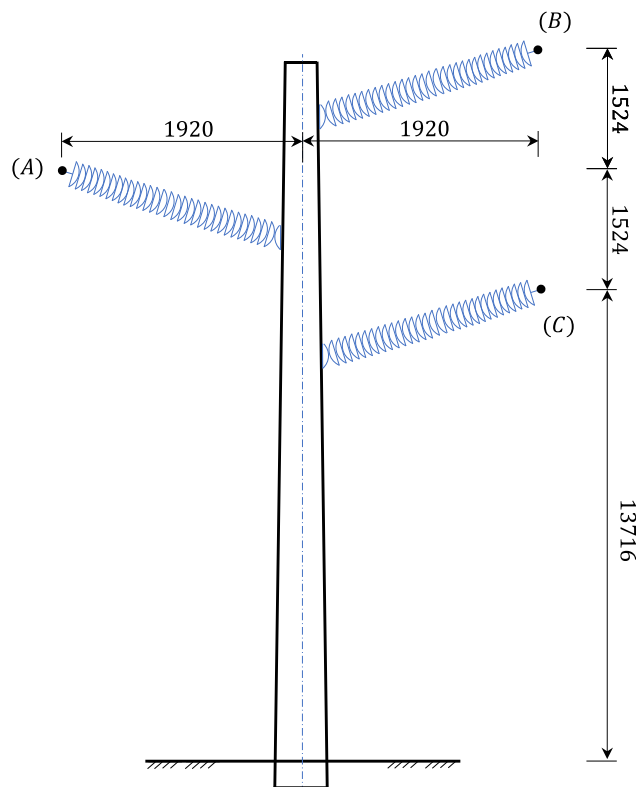


Figura 4.1 – Silhueta típica da LT 230 kV *Sedro Woolley – March Point*. Desenho sem escala. Dimensões em milímetros. Adaptado de (MARUVADA; CHARTIER, 2008a).

Seguindo a metodologia descrita em (CHARTIER *et al.*, 1995), a determinação da tensão de ensaio deve estar respaldada pela correspondência entre os valores do campo elétrico superficial para as duas condições de aplicação: sistema trifásico de operação e arranjo monofásico de ensaio. Desta forma, o presente estudo de caso recorre ao ambiente de simulação do COMSOL[®] para representação da LT 230 kV *Sedro Woolley – March Point*, conforme dimensões apresentadas na Figura 4.1.

Calculou-se, inicialmente, os valores de campo elétrico na superfície dos condutores CA *Narcissus* para a condição de instalação trifásica. Os resultados de simulação, considerando uma tensão de operação igual $v_t = 240 \text{ kV}_{rms}$, fase-fase, estão apresentados na Figura 4.2. De forma semelhante aos resultados obtidos pelos autores (CHARTIER *et al.*, 1995), destaca-se que os maiores valores de campo foram observados para a *Fase C*, cujo valor máximo de campo elétrico superficial foi igual a $E_{max} = 16,1 \text{ kV/cm}$. Este comportamento pode ser explicado pela localização do condutor mais próximo ao nível do solo, em relação às demais fases. Uma vez afastada dos demais condutores da configuração, o condutor da *Fase A* apresentou os menores valores de campo elétrico superficial.

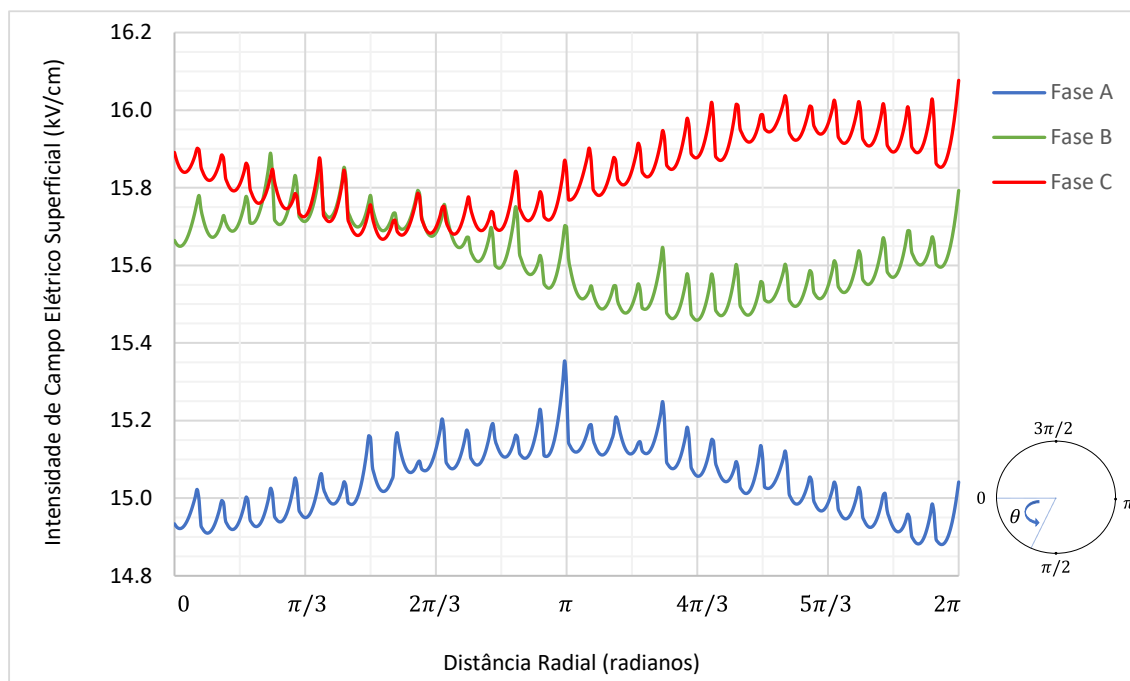


Figura 4.2 – Distribuição da intensidade de campo elétrico superficial sobre os condutores CA *Narcissus* da LT 230 kV, considerando a condição de instalação trifásica e tensão de operação igual a $v_t = 240 \text{ kV}_{rms}$.

Considerando a necessidade de se avaliar a configuração compacta em ambiente de laboratório, os autores recorreram à opção de se ensaiar a reprodução monofásica do arranjo isolante em escala natural. Neste caso, a altura do objeto sob ensaio, em relação ao piso, foi definida conforme disponibilidade técnica do laboratório, atendendo às distâncias mínimas de isolamento para as demais partes aterradas, como paredes, teto e demais equipamentos. Para este arranjo monofásico de 230 kV, definiu-se uma altura de $h = 7,62 \text{ m}$, conforme apresentado na Figura 2.1 – reapresentada neste capítulo como Figura 4.3 para melhor fluidez do texto (CHARTIER *et al.*, 1995; MARUVADA; CHARTIER, 2008b).

É oportuno destacar que, tradicionalmente, a tensão de ensaio para a realização do ensaio de determinação do início e extinção do efeito corona visual é, arbitrariamente, especificada em termos da máxima tensão operativa da linha de transmissão, em desfavor à análise de equivalência de campo elétrico superficial. A título ilustrativo do sistema elétrico nacional, uma LT com nível de tensão de 230 kV deve apresentar uma máxima tensão operativa igual a $v_{max} = 242 \text{ kV}_{rms}$ (ONS, 2022). Desta forma, é comum se especificar uma tensão monofásica de ensaio de $v_{1\phi} = 154 \text{ kV}$ – equivalente a 110% da máxima tensão operativa da LT, aproximadamente, em termos da tensão fase-terra.

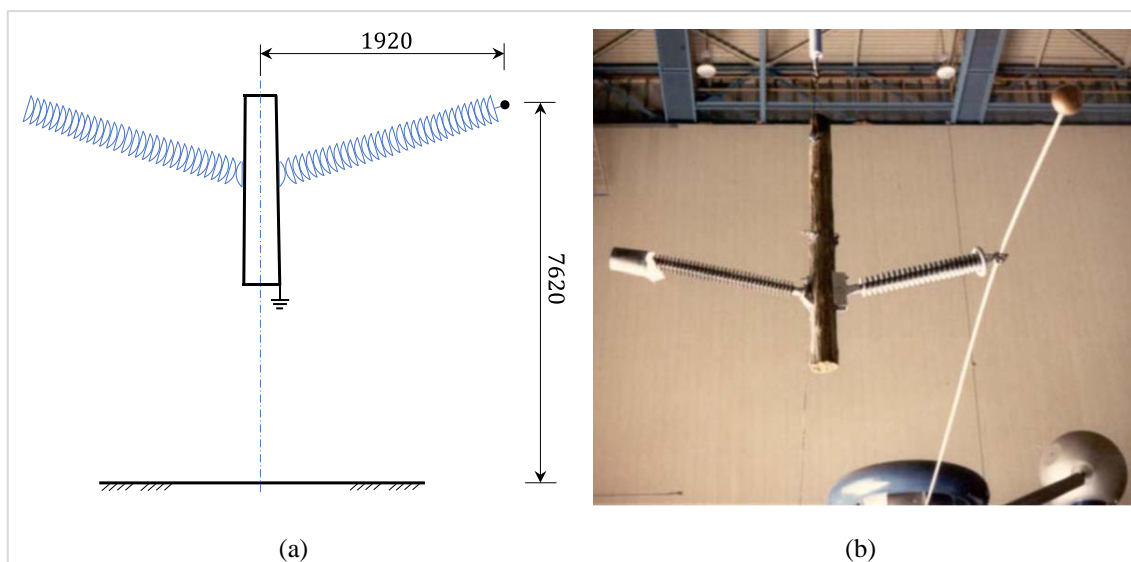


Figura 4.3 – (a) Representação esquemática do arranjo monofásico de ensaio da LT 230 kV *Sedro Woolley – March Point* Linhas (Dimensões em Milímetros); (b) Foto do arranjo instalado em laboratório. Adaptado de (MARUVADA; CHARTIER, 2008b).

Por outro lado, considerando o contexto norte-americano de sua publicação, o trabalho de (CHARTIER *et al.*, 1995) indicou o fator de 120% da tensão máxima operativa da LT. Uma vez que a tensão máxima operativa, lá determinada, é equivalente a $v_{max} = 240 kV_{rms}$, a tensão monofásica de ensaio do arranjo foi especificada como $v_{1\phi} = 166 kV$, valor eficaz.

Para avaliação da correspondência entre os dois ambientes de instalação, o presente estudo de caso, através de um modelo computacional, determinou a intensidade de campo elétrico sobre a superfície do condutor singelo do arranjo de 230 kV, em função da tensão monofásica de ensaio e das dimensões indicadas na Figura 4.3 (a). Os resultados desta simulação estão indicados na Figura 4.4, onde quatro valores representativos de tensão estão destacados em vermelho: $v_1 = 154 kV_{rms}$, $v_2 = 166 kV_{rms}$, $v_3 = 180 kV_{rms}$ e $v_4 = 216 kV_{rms}$.

Da parte inferior para a superior no gráfico, os dois primeiros valores, $v_1 = 154 kV_{rms}$ e $v_2 = 166 kV_{rms}$, dizem respeito à situação em que as tensões de ensaios são aquelas tradicionalmente especificados no contexto brasileiro e norte-americano, respectivamente.

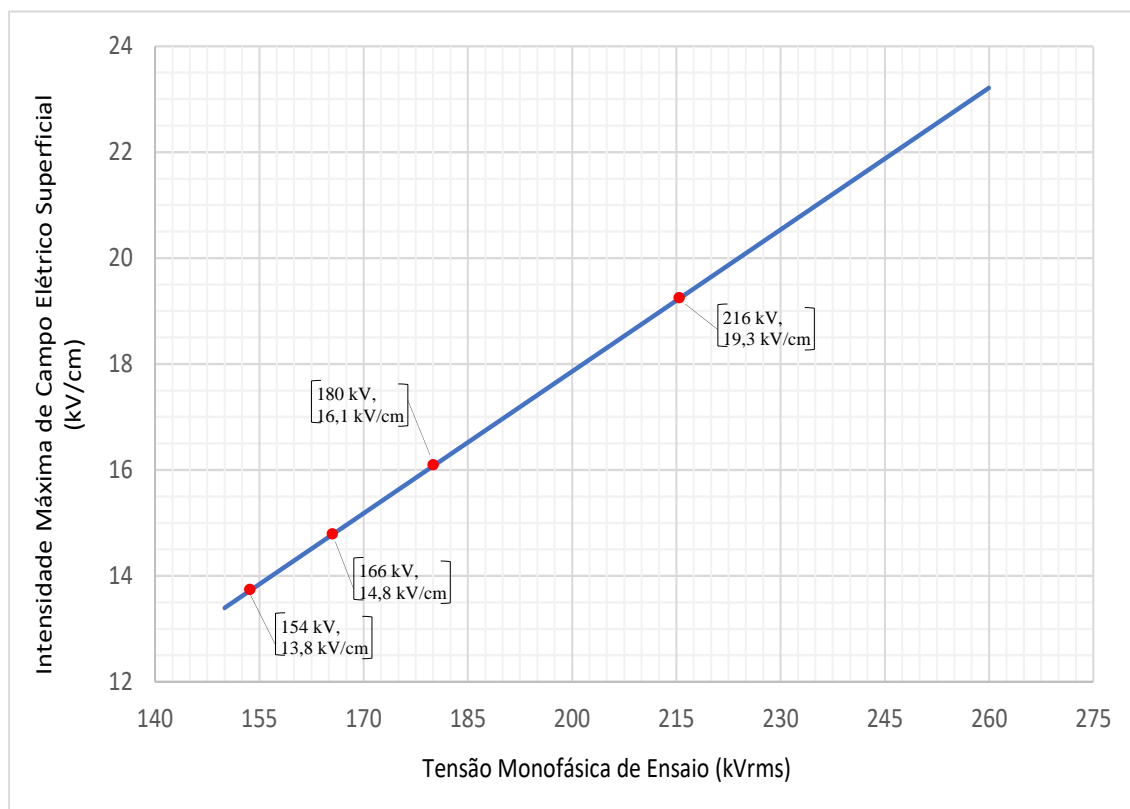


Figura 4.4 – Intensidade de campo elétrico superficial do arranjo monofásico de ensaio em função da tensão aplicada.

Por estes dois valores iniciais, nota-se que o procedimento que vincula a determinação da tensão monofásica de ensaio ao valor da máxima tensão operativa da LT, em termos percentuais, não é capaz de avaliar adequadamente a configuração da LT compacta 230 kV *Sedro Woolley – March Point*, uma vez que os dois valores de campo elétrico do arranjo monofásico não correspondem ao máximo valor obtido para a configuração trifásica de operação.

A Tabela 4.1 apresenta a comparação destes resultados de simulação em termos percentuais, calculados conforme equação (3.1), cujos valores de referência são aqueles obtidos para a configuração trifásica de operação da LT.

Tabela 4.1 – Comparação dos níveis máximos de campo elétrico superficial (kV/cm) sobre o subcondutor da Fase C da LT 230 kV *Sedro Woolley – March Point* para duas condições de instalação

Condição Trifásica de Instalação (Figura 4.2)	Condição Monofásica de Ensaio (Figura 4.3)			
	Tensão Monofásica Equivalente			
138,6 kV_{rms}	154 kV_{rms}	166 kV_{rms}	180 kV_{rms}	216 kV_{rms}
16,08 (Valor de Referência)	13,75 $\delta_{e_1} = 14,5\%$ (↓)	14,82 $\delta_{e_2} = 7,8\%$ (↓)	16,07 $\delta_{e_3} = 0$	19,29 $\delta_{e_4} = 20,0\%$ (↑)

Considerando a primeira tensão de ensaio especificada, $v_n = 154 \text{ kV}$, a diferença percentual obtida para o valor do campo elétrico, para as duas condições de aplicação, é $\delta_{e_1} = 14,5\%$ inferior àquele valor verificado na condição trifásica de referência – onde o símbolo (\downarrow), representado na Tabela 4.1, indica que o valor calculado é inferior ao valor de referência. O terceiro valor destacado na Figura 4.4, $v_3 = 180 \text{ kV}_{rms}$, diz respeito, justamente, à tensão de ensaio monofásica necessária para se obter a desejada correspondência entre os valores de campo elétrico na superfície do condutor, segundo os resultados de simulação deste estudo.

Por fim, o quarto valor mais afastado dos demais, $v_4 = 216 \text{ kV}_{rms}$, diz respeito à tensão de ensaio considerada pelos autores (CHARTIER *et al.*, 1995) para condução dos testes e adotada como critério de aprovação com uma margem maior de segurança. Neste caso, seguindo outro paradigma metodológico, o critério de ensaio e aprovação dos autores adotou a referência de 120% em relação ao máximo valor de campo elétrico superficial observado na condição de instalação trifásica, e não a referência percentual da máxima tensão de operação da LT. Este comportamento está indicado na Tabela 4.1, através do desvio percentual $\delta_{e_4} = 20,0\%$ (\uparrow).

Depreende-se, deste modo, que os resultados da Figura 4.4 estão coerentes com a afirmação de que o “campo elétrico para uma dada configuração é diretamente proporcional à tensão aplicada” (MARUVADA; CHARTIER, 2008b). Além disso, uma ampla faixa de valores está associada à escolha da tensão monofásica de ensaio, a depender da metodologia de referência ou dos recursos computacionais disponíveis para a avaliação e cálculo de campo elétrico superficial. Desta forma, evidencia-se, uma vez mais, a dependência aparecimento do efeito corona em função do campo elétrico aplicado, e por consequência, da tensão de ensaio adotada. A depender do valor adotado desta tensão, sucede-se uma inadequada avaliação dos resultados de ensaios, tanto como para evidenciar ou dissimular o aparecimento do efeito corona. Em ambos os casos, contudo, depreende-se impactos técnicos-econômicos significativos sobre o sistema de transmissão.

Esta situação não é exclusiva dos arranjos isolantes com nível de tensão de 230 kV . Para LTs com nível de tensão de 500 kV (ou 525 kV), é possível encontrar especificações técnicas apresentando o valor da tensão de ensaio igual a 320 kV , ou mesmo 335 kV . Este último valor, representa 105% da máxima tensão operativa da LT,

aproximadamente. De maneira geral, o valor especificado encontra-se compreendido na faixa entre 5% e 10% acima da tensão máxima operativa correspondente da LT.

Em ambiente de laboratório, a tensão de ensaio monofásica à frequência industrial é, em muitos casos, um dos recursos mais versáteis a qual os operadores têm acesso e controle. A depender das dimensões internas do laboratório, e dos equipamentos ali presentes, não é possível uma grande flexibilidade em relação a ajustes físicos na posição do arranjo sob ensaio, como, por exemplo, a altura em relação ao piso e o afastamento em relação às paredes. Com isso, a aplicação de uma adequada tensão de ensaio deve ser utilizada na condução dos testes e obtenção de uma melhor correspondência dos níveis de campo.

Neste contexto de avaliação prática em ambiente de laboratório, publicações técnicas apresentam o conceito do gradiente elétrico nominal, associado a um subcondutor singelo posicionado sobre um plano aterrado. Desta forma, utilizando-se a equação (4.1), é possível expressar uma relação entre o valor da tensão monofásica aplicada sobre o subcondutor e o valor do campo elétrico sobre a sua superfície (IEC, 1997; IEEE, 2017).

$$E_n = \frac{V}{r_c \ln\left(\frac{2h}{r_c}\right)} \quad (4.1)$$

onde,

E_n é o valor do gradiente elétrico nominal do subcondutor singelo;

V é a tensão aplicada sobre o subcondutor singelo;

r_c é o raio do subcondutor singelo;

h é altura do subcondutor singelo, em relação ao plano aterrado;

Considerando, uma vez mais, o arranjo monofásico da LT 230 kV *Sedro Woolley – March Point* apresentado na Figura 4.3, emprega-se a equação (4.1) para a determinação do valor do gradiente elétrico nominal, E_n , definido pela resolução normativa. Neste caso, tem-se $h = 762 \text{ cm}$ e $r_c = 1,65 \text{ cm}$. Os resultados do cálculo de E_n , juntamente com os valores máximos de simulação da Figura 4.4, obtidos para os quatro valores notáveis de tensão – $v_1 = 154 \text{ kV}_{rms}$, $v_2 = 166 \text{ kV}_{rms}$, $v_3 = 180 \text{ kV}_{rms}$ e $v_4 = 216 \text{ kV}_{rms}$ – estão indicados na Tabela 4.3.

Tabela 4.2 – Comparação entre os valores de gradiente elétrico nominal e os níveis máximos de campo elétrico superficial sobre o subcondutor da Fase C da LT 230 kV *Sedro Woolley – March Point*

Tensão de Ensaio, v_n (kV_{rms})	Gradiente elétrico nominal, E_n (Equação 4.1) (kV/cm)	Campo elétrico máximo, E_{max} (Figura 4.4) (kV/cm)
154	13,66	13,75
166	14,73	14,82
180	15,97	16,07
216	19,16	19,29

Diante dos resultados apresentados na Tabela 4.3, é possível concluir que o conceito do gradiente elétrico nominal (IEC, 1997; IEEE, 2017), trata-se, em essência, do nível máximo de campo elétrico sobre a superfície do subcondutor singular posicionado sobre um plano aterrado. Desta forma, na ausência de recursos de cálculo dedicados à avaliação de campo elétrico, a equação (4.1) pode ser empregada para a determinação da tensão monofásica de ensaio de uma configuração compacta de 230 kV, com condutores singelos, para a garantia da correspondência dos níveis de campo elétrico nas duas condições de aplicação.

4.3 Efeito da Compactação das Fases e Expansão dos

Subcondutores

O capítulo 2 apresentou a discussão inicial sobre as linhas compactas, indicando que a redução das distâncias entre fases, a expansão dos feixes de condutores, ou a combinação de ambos, resulta na elevação da potência natural de uma linha de transmissão aérea. Este aspecto ganha destaque quando associado à necessidade de redução dos custos fundiários para implantação das larguras de faixa de servidão. Embora se verifique uma redução dos níveis de campo elétrico ao nível do solo, esta proposta técnica de compactação das fases carrega consigo um impacto sobre a acentuação dos níveis de campo elétrico na superfície dos condutores e acessórios, conforme já discutido no tópico anterior (CIGRE, 2020; CHARTIER *et al.*, 1995).

Para exemplificar este comportamento antagônico, este segundo estudo propõe uma comparação direta entre duas configurações de linhas aéreas de 500 kV. Duas LTs, de mesmo nível de tensão, podem ser comparadas com base no afastamento de suas fases, d_L , sendo este um dos principais parâmetros de caracterização de uma LT compacta.

Deste modo, a Figura 4.5 (a) apresenta a silhueta típica de uma LT convencional de 500 kV, para quatro subcondutores de diâmetro $d_{\phi} = 25,15 \text{ mm}$, agrupados em feixe de $S = 457 \text{ mm}$, e afastamento entre as fases, $D_{L1} = 12,75 \text{ m}$. Esta disposição é suportada por uma estrutura típica autoportante, com disposição horizontal das fases, denominada configuração Delta (CORSO, 2018). Por outro lado, a Figura 4.5 (b) apresenta uma disposição compacta suportada por uma estrutura típica denominada Suspensão do tipo Cross-Rope, considerando um afastamento entre fases igual a $d_{L2} = 5,5 \text{ m}$ (CIGRE, 2020).

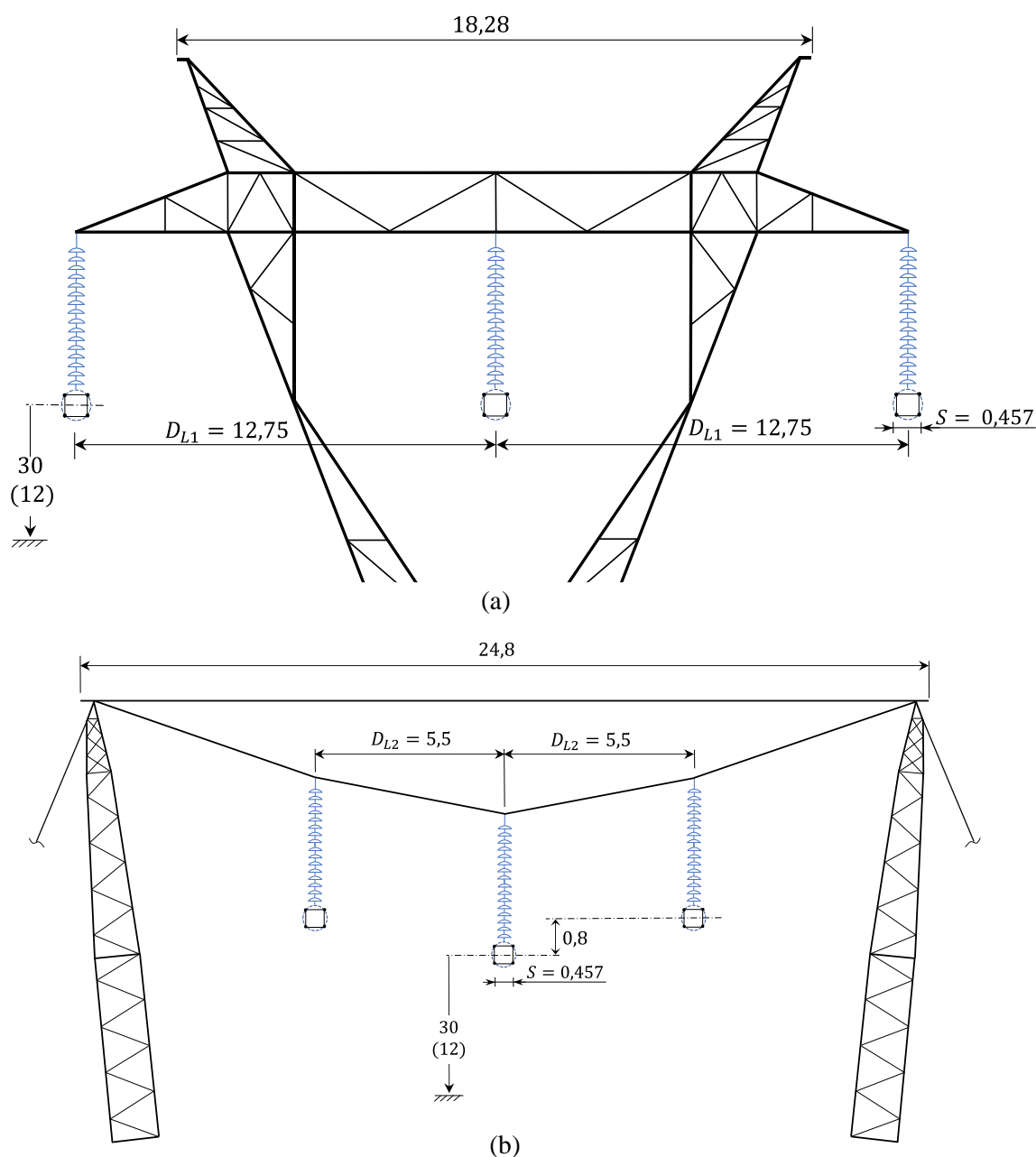


Figura 4.5 – (a) Estrutura Delta convencional de 500 kV e (b) Estrutura Compacta do tipo Cross-Rope. Dimensões em metros. Desenho sem escala. Reproduzido com dados extraídos de (CORSO, 2018; CIGRE, 2020).

Em ambos os casos, as indicações entre parênteses referem-se à altura do condutor tomado no meio do vão. Bem descrita na literatura, a configuração Cross-Rope remonta aos estudos de modernização das estruturas utilizadas pela Eletronorte, mostrando-se adequada para atendimento da capacidade de transmissão de 1.200 MW. É constituída por dois mastros metálicos, treliçados e estaiados, separados na base e interligados na parte superior através do cabo de aço principal e auxiliar. Em relação à sua equivalente técnica do tipo Raquete, mostrou-se que esta estrutura apresenta uma redução de custo de instalação da ordem de 20% (GUIMARÃES *et al.*, 2001; CIGRE, 2020).

A Figura 4.6 apresenta os resultados de simulação correspondentes à avaliação do efeito da compactação da distância entre as fases dos sistemas aéreos convencional e compacto sobre o perfil de campo elétrico ao nível do solo. A curva em azul representa o perfil transversal da intensidade de campo elétrico da LT convencional, obtido à altura $h_e = 1,5\text{ m}$ acima do solo, enquanto as curvas em verde representam os resultados obtidos para a LT compacta, em função de D_L . As demais características são mantidas constantes, como a altura cabo solo de $h_{cs} = 12\text{ m}$, tomado no meio do vão, e a configuração do feixe de condutores.

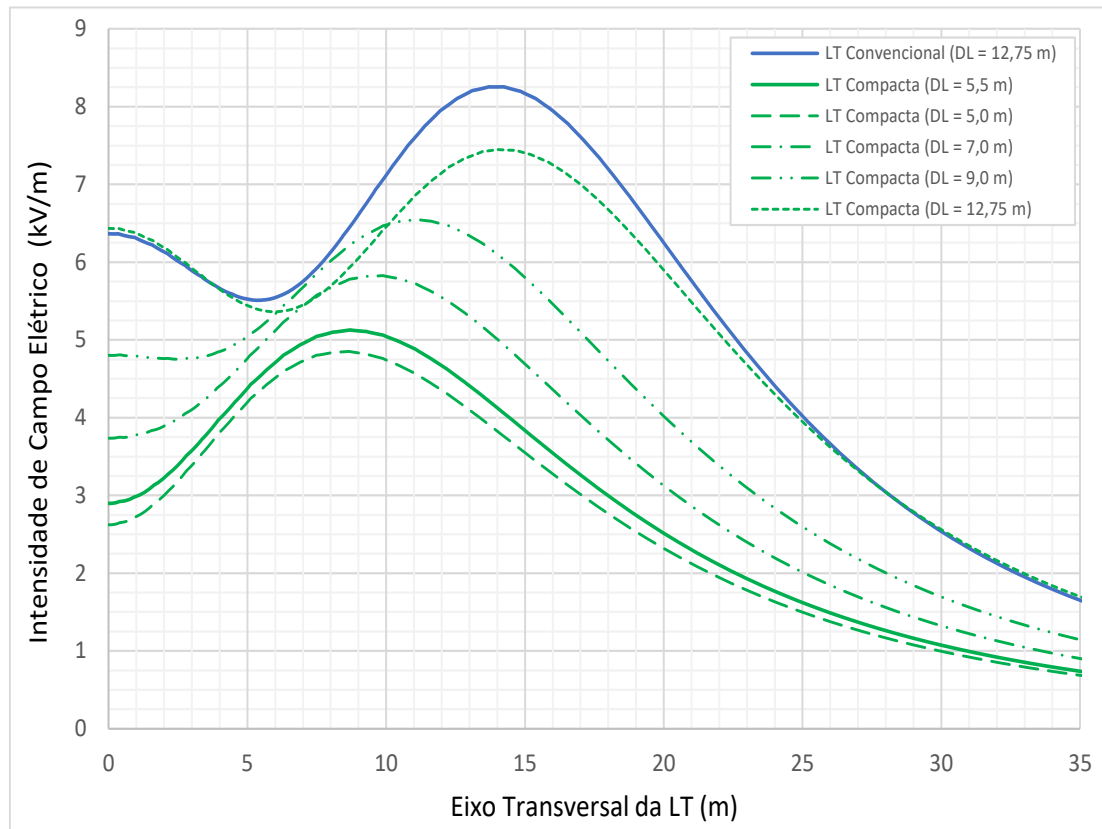


Figura 4.6 – Efeito da compactação da distância entre as fases, D_L , dos sistemas aéreos convencional e compacto, sobre o perfil transversal de campo elétrico ao nível do solo

De maneira geral, os resultados da Figura 4.6 indicam uma redução do valor máximo do campo elétrico nas imediações da LT à medida que se intensifica o efeito de compactação das fases. Como efeito combinado, as cristas destas curvas se deslocam também em direção ao eixo central da LT.

Seguindo a mesma metodologia, a Figura 4.7 apresenta os resultados correspondentes à avaliação do efeito da compactação sobre o valor máximo da intensidade de campo elétrico superficial dos subcondutores agrupados em feixe. Tudo o mais constante, a barra em azul representa o resultado para a LT convencional, enquanto a barra em verde, para a LT compacta, considerando $D_L = 5,5 \text{ m}$. Neste caso, a LT compacta apresentou uma elevação da intensidade dos níveis de campo elétrico superficial da ordem de 25%, em relação a uma LT convencional de mesma natureza.

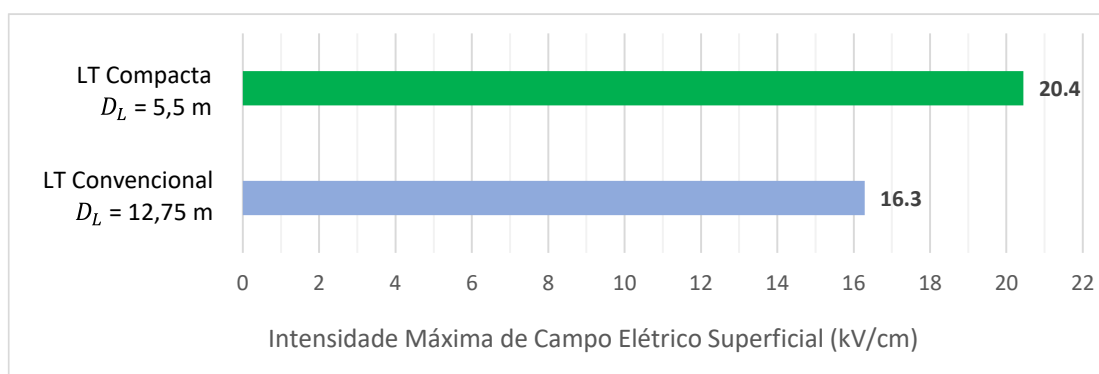


Figura 4.7 – Efeito da compactação da distância entre as fases, D_L , dos sistemas aéreos convencional e compacto, sobre o valor máximo da intensidade de campo elétrico superficial dos subcondutores.

Tomando por referência o arranjo da LT Compacta de 500 kV para quatro subcondutores, a Figura 4.8 apresenta os resultados do estudo que avalia o efeito da compactação das fases sobre os níveis de campo elétrico superficial sobre todos os subcondutores do arranjo. Neste caso, os resultados indicam a tendência natural de elevação dos valores de campo elétrico superficial à medida que os subcondutores se aproximam.

Os resultados em azul representam os valores de campo elétrico na superfície dos subcondutores da fase central, onde estão concentrados os maiores valores de simulação. Este efeito é esperado uma vez que os subcondutores da fase central estão sob influência de ambas as fases laterais. Por outro lado, os resultados em verde associam-se aos pares de subcondutores das fases laterais voltados para dentro do arranjo, enquanto os resultados em vermelho para os subcondutores das extremidades voltados para fora.

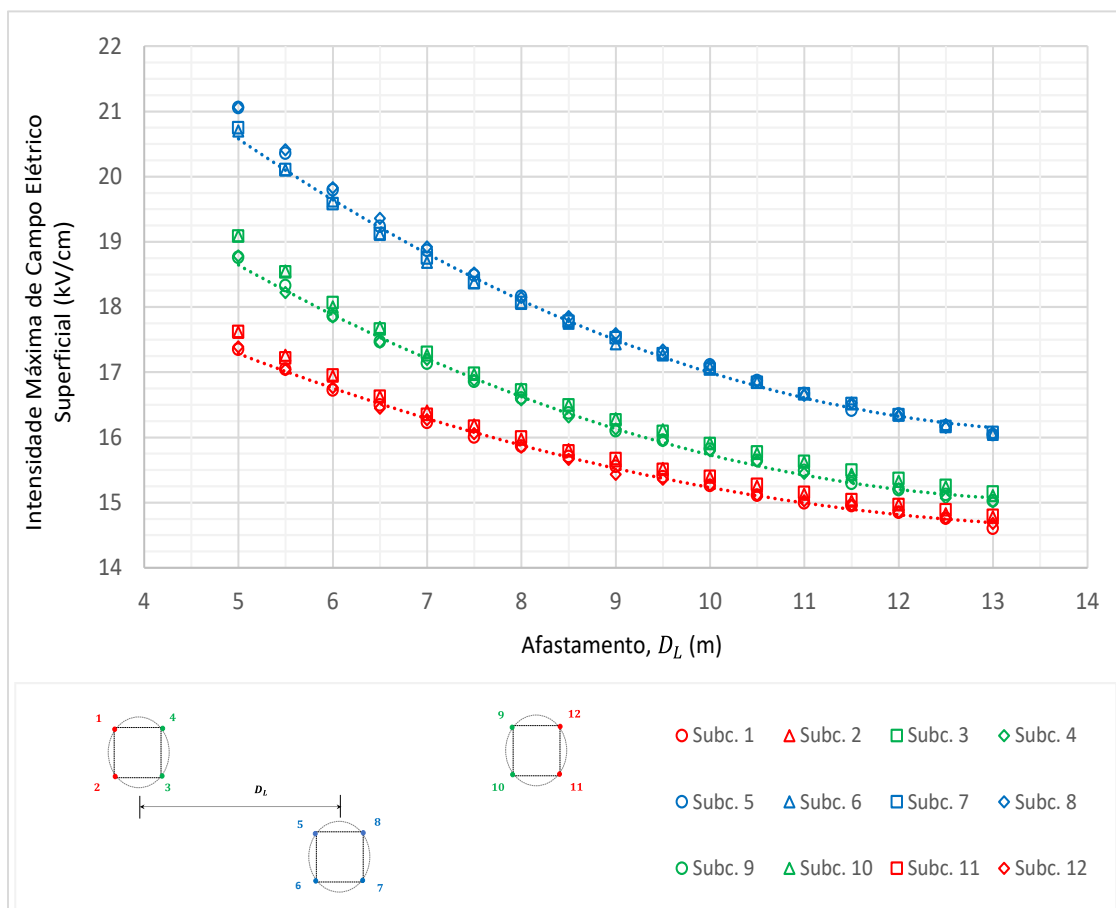


Figura 4.8 – Efeito da compactação da distância entre as fases, D_L , sobre o valor máximo da intensidade de campo elétrico na superfície dos subcondutores da Linha Compacta de 500 kV.

Os resultados da Figura 4.8 apontam para um comportamento não linear da variação do campo elétrico superficial ao longo da faixa indicada de compactação das fases. O efeito de compactação sob os níveis superficiais de campo é mais expressivo quanto mais próximo estão as fases adjacentes. Este comportamento se justifica pela análise da relação D_L/d_c , onde D_L é o afastamento entre as fases adjacentes e d_c , o diâmetro do subcondutor. À medida que se eleva o afastamento entre subcondutores, o diâmetro do subcondutor e a configuração local do feixe ganham proeminência sobre a variação do campo elétrico superficial. Como estas duas características não sofrem alteração, verifica-se a tendência de acomodação dos resultados de campo. Por outro lado, quanto mais próximas estão as fases adjacentes, qualquer mínima variação de D_L é capaz de provocar uma expressiva variação dos níveis de campo elétrico sob a superfície dos condutores agrupados em feixe.

Resultado análogo, expresso por outra perspectiva, diz respeito ao efeito da expansão dos feixes de condutores – representado pelo tamanho da aresta, S , do quadrado

– sobre o valor do campo elétrico superficial. Neste caso, mantendo-se inalterado o afastamento das fases, D_L , o efeito de expansão pode ser compreendido como um efeito análogo ao da compactação das fases. Este efeito pode ser verificado nos resultados de simulação apresentados no gráfico da Figura 4.9, para o arranjo da LT Convencional de 500 kV, considerando o afastamento entre as fases fixo e equivalente a $D_{L1} = 12,75 \text{ m}$.

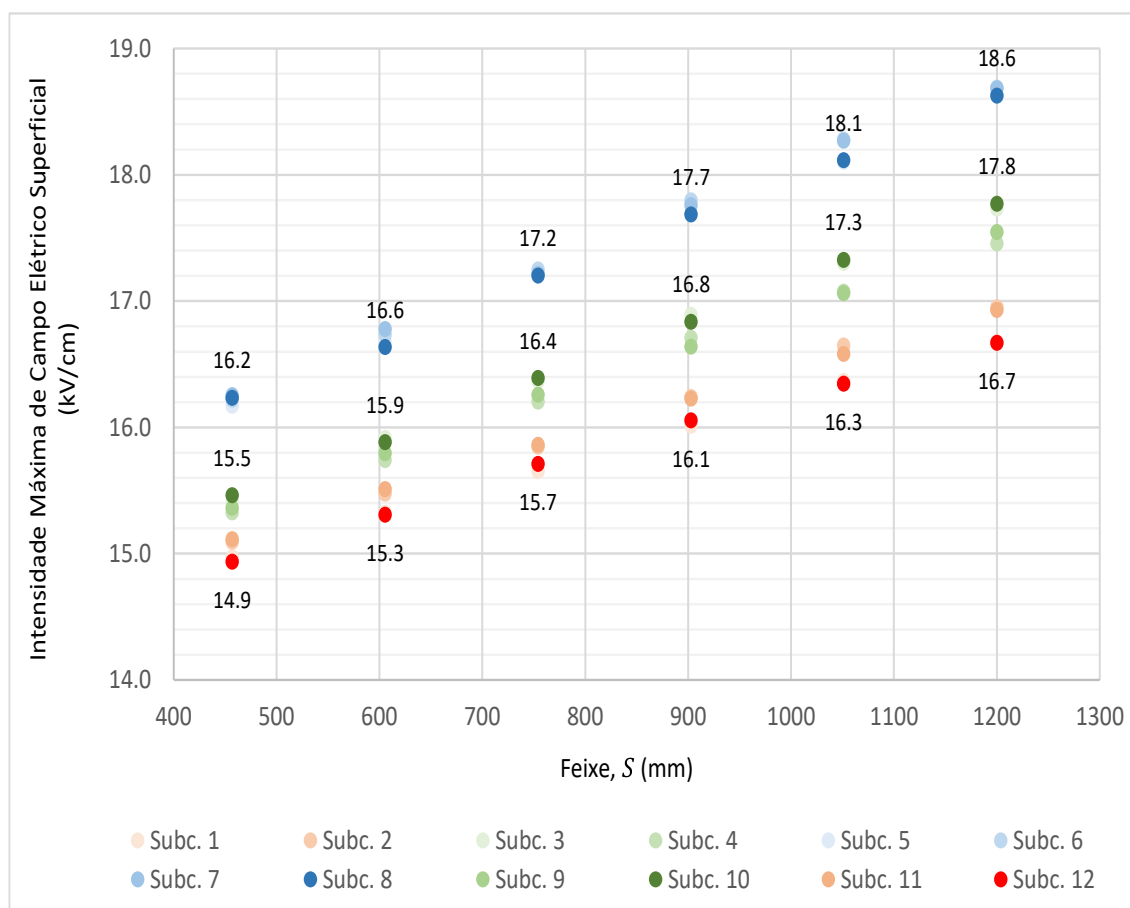


Figura 4.9 – Efeito da Expansão do feixe de subcondutores, S , sobre o valor máximo da intensidade de campo elétrico na superfície dos subcondutores da Linha convencional de 500 kV.

Com base em uma silhueta típica de LT convencional de 500 kV e uma segunda silhueta de LT compacta, de mesmo nível de tensão, os resultados deste segundo estudo expressaram o comportamento de variação da intensidade de campo elétrico calculado ao nível do nível do solo. Por outro lado, mostrou com o efeito de compactação das fases intensifica os níveis de campo elétrico na superfície dos subcondutores agrupados em feixe. Neste último caso, os resultados correspondentes à avaliação do efeito da compactação mostraram que a elevação dos níveis de campo elétrico superficial está na ordem de 25%, quando se comparou a LT compacta com a LT convencional para quatro subcondutores.

4.4 Reprodução Monofásica de Ensaio e Estudos de Sensibilidade

Para um sistema de transmissão trifásico com disposição de fases adjacentes, como o caso das linhas compactas de 500 kV utilizando estruturas de suspensão do tipo Cross-Rope, o arranjo monofásico de ensaio deve incorporar o efeito dos condutores destas fases adjacentes. Pelo procedimento normativo¹³, este efeito de proximidade é simulado por meio da instalação de painéis laterais aterrados com afastamento pré-determinado, w , conforme indicado na equação (4.2) (IEC, 1997).

$$w = 0,7 d \quad (4.2)$$

onde,

d é a distância horizontal entre dois subcondutores de fases adjacentes.

A Figura 4.10 (a) apresenta o perfil esquemático do típico sistema de transmissão LPNE utilizando feixes hexagonais. Nesta configuração, as fases estão instaladas de modo que os subcondutores de fases adjacentes estejam colocados lado a lado, conforme denominado “Variante C” na resolução normativa (IEC, 1997). A Figura 4.10 (b), por sua vez, apresenta o diagrama esquemático da reprodução monofásica de ensaio para a fase central, com as distâncias para os planos de terra, w , e altura de instalação para o plano do solo, h , também indicadas.

Fonte importante de discussões no contexto industrial e de interpretações ambíguas, destaca-se que a distância de separação, d , está definida em termos do espaçamento entre os subcondutores de fases adjacentes, enquanto a distância de afastamento dos painéis laterais, w , está definida em relação ao centro do arranjo monofásico de ensaio para o plano lateral, conforme expresso na resolução normativa IEC 61284: *Overhead lines – Requirements and tests for fittings* (IEC, 1997).

¹³ Os planos de reflexão não são exigidos para uma distância de separação superior a $d = 6 \text{ m}$, para sistemas de um único condutor, por fase; para uma distância de separação superior a 7,5 m, em caso de sistemas utilizando feixes de condutores; e uma distância de separação superior a 9 m, para sistemas com tensão máxima operativa igual a $U_m = 765 \text{ kV}$ (IEC, 1997).

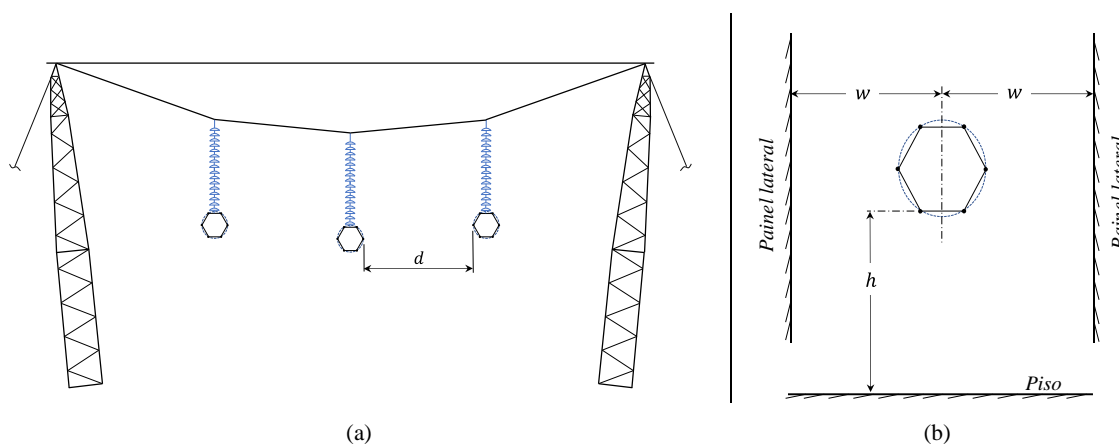


Figura 4.10 – Representação comparativa entre os arranjos trifásico e monofásico de ensaio para determinação do posicionamento dos painéis laterais.

Intimamente associado às limitações físicas das salas de ensaio, a resolução normativa internacional também recomenda a altura do arranjo de ensaio, h , tomado em relação ao subcondutor inferior e o piso do laboratório. Para o nível de transmissão de 500 kV , os arranjos devem ser ensaiados considerando $h = 6\text{ m}$, com tolerância dimensional absoluta de 10% (IEC, 1997).

Os requisitos de uma Especificação Técnica para fornecimento de materiais estabelecem que o objeto sob ensaio não deve apresentar o fenômeno de corona visual para uma tensão predeterminada, denominada de Tensão de Ensaio. Tradicionalmente, os projetistas especificam uma tensão de ensaio compreendida na faixa de 320 kV_{rms} e 335 kV_{rms} , fase-terra, para realização dos ensaios em arranjos de ferragens e isoladores utilizados em LTs brasileiras de 500 kV . O limite inferior adotado para esta faixa está associado ao valor máximo de operação da LT, $U_m = 550\text{ kV}_{rms}$, tomado em relação ao valor monofásico fase-terra. O limite superior, por outro lado, estabelece uma margem de segurança de 5%, aproximadamente.

O procedimento normativo para execução do ensaio de corona visual pelo Método da Tensão Determinada estabelece que o arranjo monofásico do sistema de transmissão seja reproduzido em escala real, em ambiente de laboratório, com protótipos fornecidos pelos respectivos fabricantes e retirados da série de fornecimento. Por meio da aplicação da tensão de ensaio à frequência industrial, igual à tensão eficaz fase-terra, determina-se os valores de início e extinção do efeito corona visual. As condições de serviço são simuladas por réplicas das estruturas suportes ou pela adoção dos painéis laterais aterrados, com as condições ambientais de temperatura, umidade do ar, atitude registradas. Inicialmente, eleva-se a tensão aplicada, à frequência industrial, sobre o

protótipo até que o fenômeno de corona se torne visível a olho nu. Esse valor é anotado como a Tensão de Início do efeito corona visual. Em seguida, a tensão é suavemente reduzida até que o fenômeno não seja mais visível. Este valor é, então, anotado como a respectiva Tensão de Extinção do efeito corona visual.

4.4.1 Sensibilidade em função da presença dos painéis reflexivos

Este estudo de caso recorreu às simulações computacionais em ambiente COMSOL® para verificação do nível de sensibilidade do arranjo monofásico de ensaio sobre os valores máximos de campo elétrico nas superfícies dos subcondutores, em função da presença dos painéis laterais reflexivos.

Considerando o sistema de transmissão da LPNE de 500 kV com feixes hexagonais de 600 mm e dimensões indicadas na Figura 4.11 – retomada a partir da Figura 2.2, para melhor fluidez do texto –, o afastamento dos painéis reflexivos de simulação das fases adjacentes, w , foi calculado como mostrado na equação (4.3). Desta forma, o afastamento normativo, igual a $w_n = 3,48 m$, foi tomado como referência comparativa. Adicionalmente, considerou-se o arranjo monofásico de ensaio posicionado a uma altura $h = 6 m$, em relação aos subcondutores inferiores, com uma tensão de ensaio típica de $v = 335 kV_{rms}$, fase-terra. Os subcondutores foram simulados considerando o cabo condutor CAA Tern, de diâmetro $\varnothing 27,03 mm$.

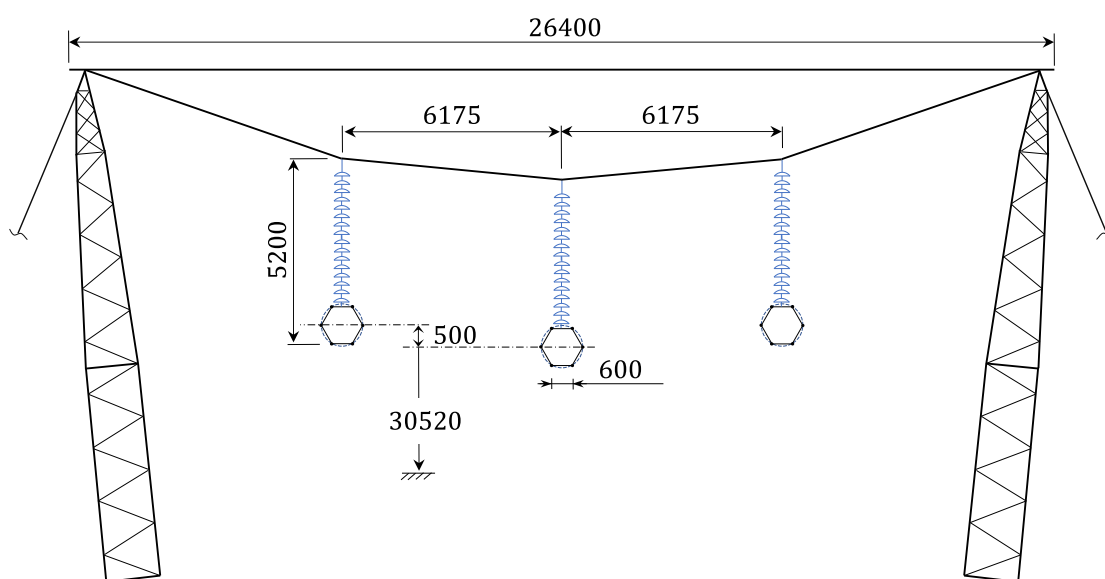


Figura 4.11 – Silhueta da estrutura compacta de 500 kV com seis condutores por fase. Dimensões em milímetros.

Desenho sem escala. Reproduzido com dados extraídos de (ELETROBRÁS, 2012).

$$w = 0,7 \cdot d = 0,7 \cdot (6,18 - 1,20) = 3,48 \text{ m} \quad (4.3)$$

Para fins de avaliação de sensibilidade dos painéis reflexivos, a Figura 4.12 (a) reapresenta os resultados de simulação obtidos no item 3.4, deste texto, relativos aos níveis de campo elétrico superficial da fase central da configuração trifásica em espaço aberto. Uma vez validados com a metodologia (ELETROBRÁS, 2012), são aqui tomados como referência para fins de comparação com os estudos de sensibilidade deste estudo de caso. Em seguida, utilizando os mesmos modelos computacionais, a Figura 4.12 (b) apresenta os resultados dos níveis de campo associados ao arranjo monofásico posicionado entre os painéis laterais reflexivos, considerando o ambiente de laboratório, com destaque para a distribuição das linhas equipotenciais. De forma análoga, a Figura 4.12 (c), ao lado, apresenta o perfil das curvas equipotenciais desconsiderando, desta vez, a presença dos painéis laterais reflexivos.

Ainda neste contexto do arranjo compacto de seis condutores, a Figura 4.13 apresenta a comparação dos níveis máximos de campo elétrico superficial sobre os três subcondutores da face esquerda (N.º 1, 2 e 3) para três diferentes condições de serviço: (i) valores de referência de espaço aberto (barras em verde); (ii) arranjo monofásico considerando os painéis posicionados a uma distância $w = 3,48 \text{ m}$ (barras em azul claro); (iii) arranjo de ensaio desconsiderando os painéis reflexivos (barras em azul escuro). Por simetria, os valores obtidos para os três subcondutores da direita (N.º 4, 5 e 6) são equivalentes aos valores dos subcondutores apresentados e por isso foram omitidos para melhor leitura dos resultados.

A Tabela 4.3 resume os resultados deste primeiro conjunto de simulação de sensibilidade e expressa a comparação em termos percentuais, δ_e , cujos valores são calculados conforme equação (3.1).

Tabela 4.3 – Comparação dos níveis máximos de campo elétrico superficial sobre os subcondutores das três diferentes condições de serviço.

Sub. #	Condição Trifásica (Referência) (kV/cm)	Reproduções Monofásicas de Ensaio			
		Com os Planos Laterais, $w = 3,48 \text{ m}$ (kV/cm)	δ_e (%)	Sem os Planos Laterais (kV/cm)	δ_e (%)
1	17,77	19,43	9,3 (↑)	12,83	27,8 (↓)
2	18,03	19,90	10,4 (↑)	13,48	25,2 (↓)
3	17,41	19,63	12,8 (↑)	14,16	18,6 (↓)

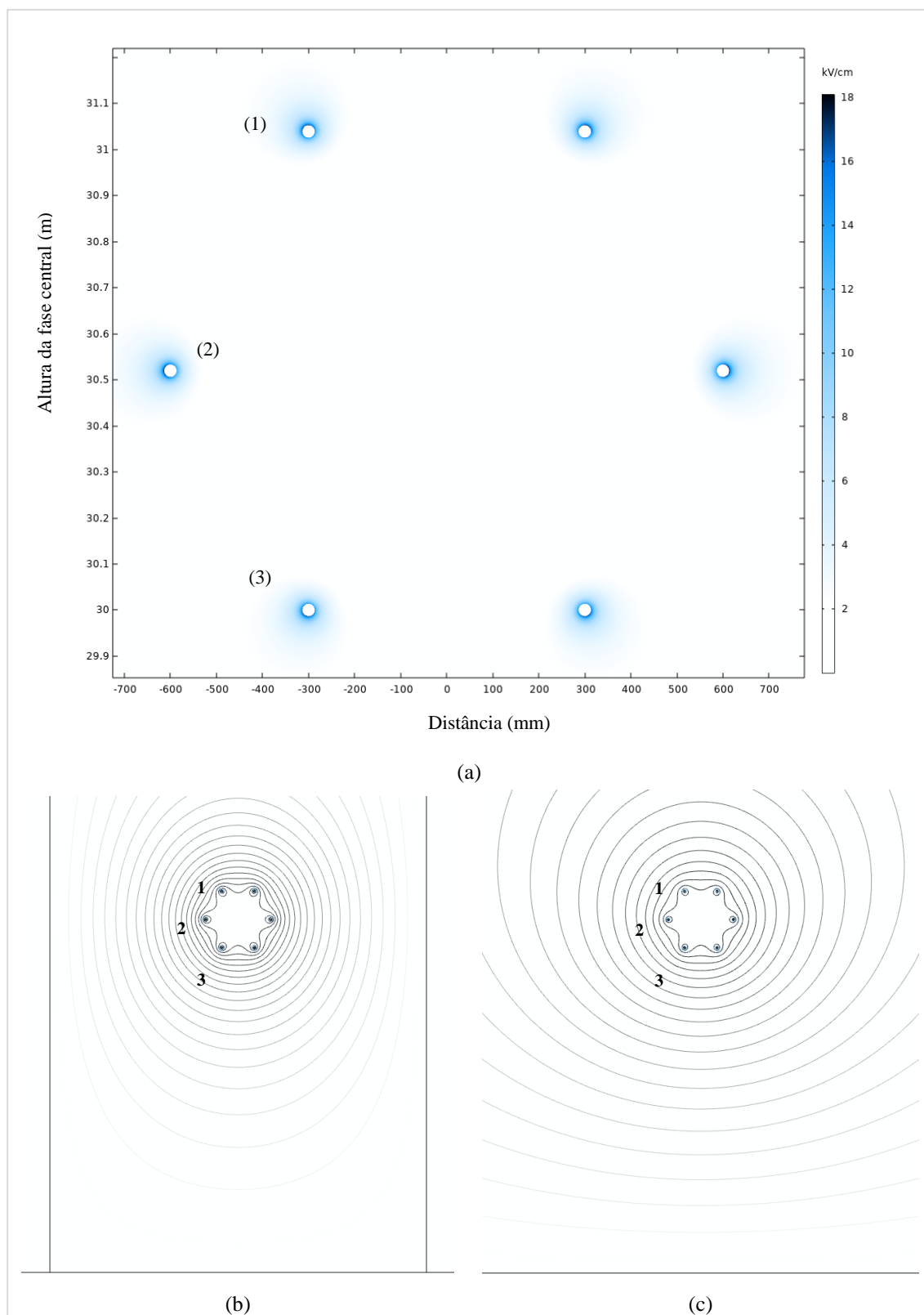


Figura 4.12 – (a) Intensidade máxima do campo elétrico na superfície dos subcondutores da fase central da Linha Compacta de 500 kV com feixe de 600 mm; (b) Linhas equipotenciais sobre o arranjo monofásico de ensaio considerando o efeito dos painéis laterais reflexivos; (c) Linhas equipotenciais sobre o arranjo desconsiderando o efeito dos painéis laterais reflexivos;

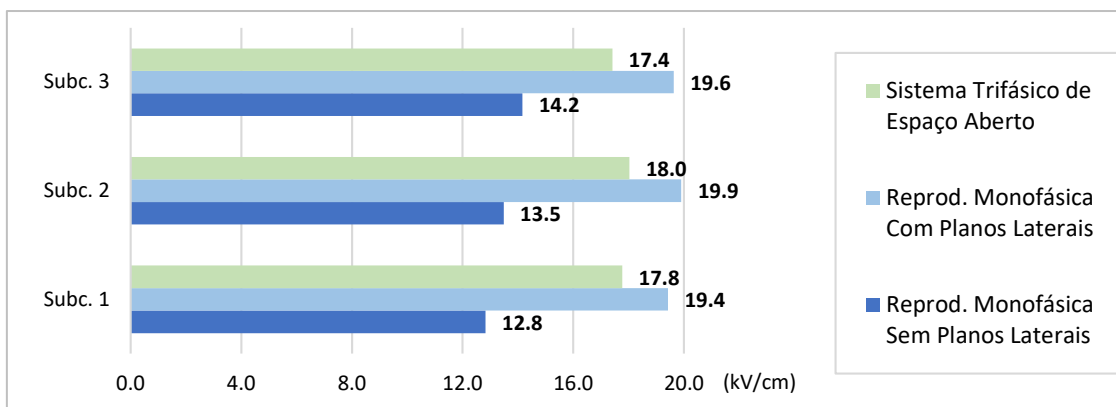


Figura 4.13 – Comparação dos níveis máximos de campo elétrico superficial sobre os subcondutores para três diferentes condições de serviço: Instalação trifásica; Arranjo monofásico de ensaio posicionado entre os painéis reflexivos e Arranjo monofásico de ensaio instalado sem os painéis reflexivos

Depreende-se, imediato, sobre a real necessidade de representação do arranjo monofásico de ensaio desta LPNE com a presença dos painéis laterais reflexivos, com o objetivo de se alcançar a desejável correspondência entre os níveis de campo elétrico. Os resultados de simulação mostram que apenas o posicionamento segundo recomendação normativa, desassociado de outros parâmetros, não é capaz de atingir níveis satisfatórios de correspondência. Para este caso, o desvio percentual médio, em relação ao valor de referência, se encontra na faixa de 10,8% para um afastamento de $w = 3,48 m$, aproximadamente.

4.4.2 Sensibilidade em função do afastamento dos painéis reflexivos

Em virtude dos resultados anteriores, acrescenta-se ao estudo de caso a avaliação do nível de sensibilidade dos valores de campo elétrico superficial em função do afastamento dos painéis reflexivos. De igual forma, considera-se que arranjo monofásico está submetido à uma tensão de ensaio predeterminada igual a $v = 335 kV_{rms}$ e posicionado a uma altura $h = 6 m$, em relação aos subcondutores inferiores.

A Figura 4.14 apresenta o comportamento dos níveis de campo elétrico sobre os subcondutores da face esquerda (N.º 1, 2 e 3) em função do afastamento dos painéis reflexivos. A faixa adotada nas simulações compreende um afastamento mínimo de $w_1 = 3,0 m$ até o afastamento máximo de $w_2 = 4,8 m$, em intervalos regulares de $w = 0,05 m$. Tomando como referência o valor de campo para $w_1 = 3,0 m$, $E_s = 21,63 kV/cm$, uma variação no afastamento de $\delta_w = 1,8 m$ foi capaz de atenuar o campo elétrico em 18,7 %, quando avaliado na superfície do subcondutor N.º 2.

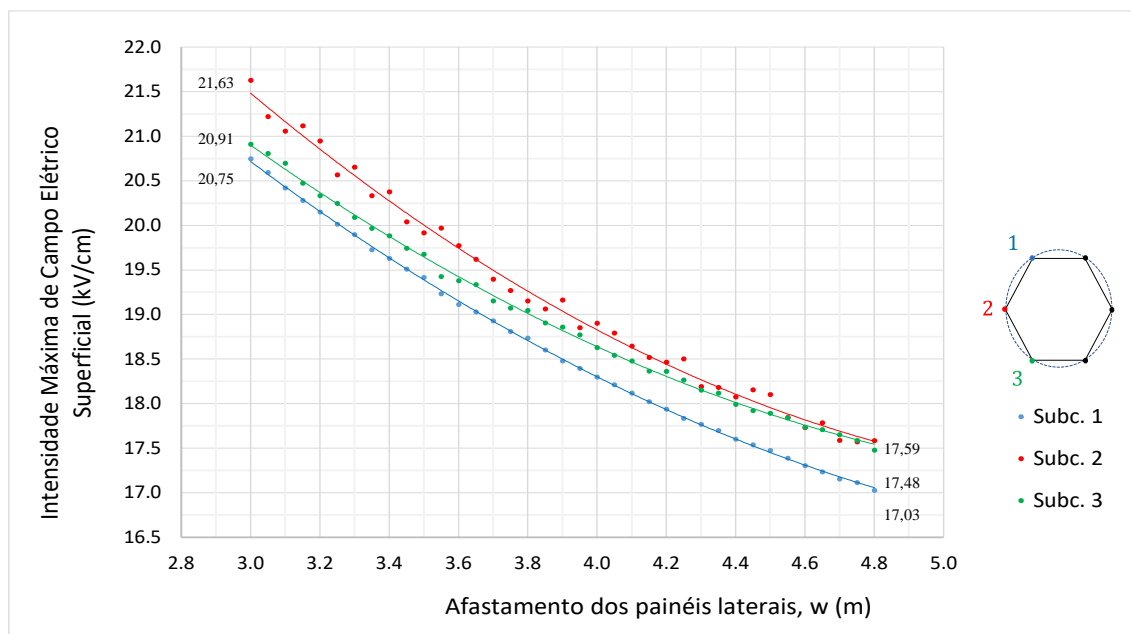


Figura 4.14 – Comportamento dos níveis máximos de campo elétrico superficial sobre os subcondutores em função do afastamento dos painéis laterais reflexivos, w .

O resumo deste segundo grupo de resultados é mostrado na Tabela 4.4. Além dos níveis de campo associados ao afastamento normativo dos painéis reflexivos, $w_n = 3,48 \text{ m}$, apresenta-se o posicionamento simulado que levou à melhor correspondência dos níveis de campo elétrico superficial, em relação à condição trifásica de operação: $w_e = 4,4 \text{ m}$ ($w_e \cong 0,88 \cdot d$). Dentro da faixa analisada, este afastamento foi capaz de levar ao menor desvio percentual médio, igual a $\bar{\delta}_e = 1,5\%$. Em relação ao valor de $w_n = 3,48 \text{ m}$, este novo posicionamento, $w_e = 4,4 \text{ m}$, faz com que os painéis fiquem 26% mais afastados.

Tabela 4.4 – Comparação dos níveis máximos de campo elétrico superficial sobre os subcondutores em função do afastamento dos painéis reflexivos, w

Sub. #	Condição Trifásica (Referência) (kV/cm)	Reproduções Monofásicas de Ensaio			
		Planos Laterais a $w_n = 3,48 \text{ m}$ (kV/cm)	δ_e (%)	Planos Laterais a $w_e = 4,4 \text{ m}$ (kV/cm)	δ_e (%)
1	17,77	19,43	9,3 (↑)	17,60	0,9 (↓)
2	18,03	19,90	10,4 (↑)	18,08	0,3 (↑)
3	17,41	19,63	12,8 (↑)	17,99	3,4 (↑)

Percebe-se, todavia, que uma única tensão de ensaio, associada a um afastamento pré-estabelecido, não é capaz de garantir uma correspondência para todos os subcondutores do feixe. Neste último caso em questão, o subcondutor mais próximo do

solo apresentou um desvio percentual maior, notadamente pela influência resultante da presença do solo, que não é verificada na mesma medida para a condição de referência de instalação em espaço aberto.

Complementarmente, promoveu-se uma avaliação de sensibilidade da altura, h , do arranjo, em relação ao piso. De forma análoga aos resultados da Figura 3.13, verificou-se uma pequena variação do campo elétrico superficial máximo para este parâmetro, considerando a faixa avaliação de 3 m do arranjo instalado em laboratório. Neste caso, a variação máxima observada para o campo elétrico foi de 1,6 %, relativa ao subcondutor mais próximo do solo.

4.4.3 Sensibilidade em função da tensão de ensaio

Neste tópico, acrescenta-se um terceiro grupo de resultados ao escopo de avaliações que associa a tensão monofásica de ensaio aos níveis de campo elétrico sobre o arranjo. Para subsidiar a escolha dos valores de tensão a serem adotados nas avaliações de sensibilidade, resultados de ensaios para a determinação do início e extinção do efeito corona visual foram consultados. Destaca-se que estes ensaios foram realizados em um contexto anterior ao desenvolvimento deste trabalho e seus resultados foram disponibilizados a título de cortesia. Faz parte deste grupo os resultados experimentais do arranjo monofásico apresentado na Figura 4.15, associado à fase central de uma LPNE de 500 kV utilizando feixes hexagonais. Esta reprodução contou com os protótipos em escala real dos conjuntos de ferragens e isoladores da linha de transmissão e foram instalados em ambiente fechado de laboratório.

O feixe de condutores foi simulado por meio de tubos de alumínio com comprimento total de 12 m, diâmetro externo de 30 mm com o arranjo posicionado a uma altura de $h = 6,5 m$, em relação ao centro do feixe e o piso do laboratório. Os planos laterais foram simulados por quadros retangulares de alumínio de dimensões de 12 x 2 m, aterrados em suas extremidades, e afastamento $w = 3,82 m$.

Quando submetido ao ensaio de corona visual, conforme exigência de validação técnica industrial, o protótipo apresentou os resultados indicados na Tabela 4.5 (CEB, 2014). Neste contexto, a faixa adotada para as simulações compreende os valores de $v_1 = 280 kV$ até $v_2 = 409 kV$, em intervalos regulares de $v = 2 kV$.

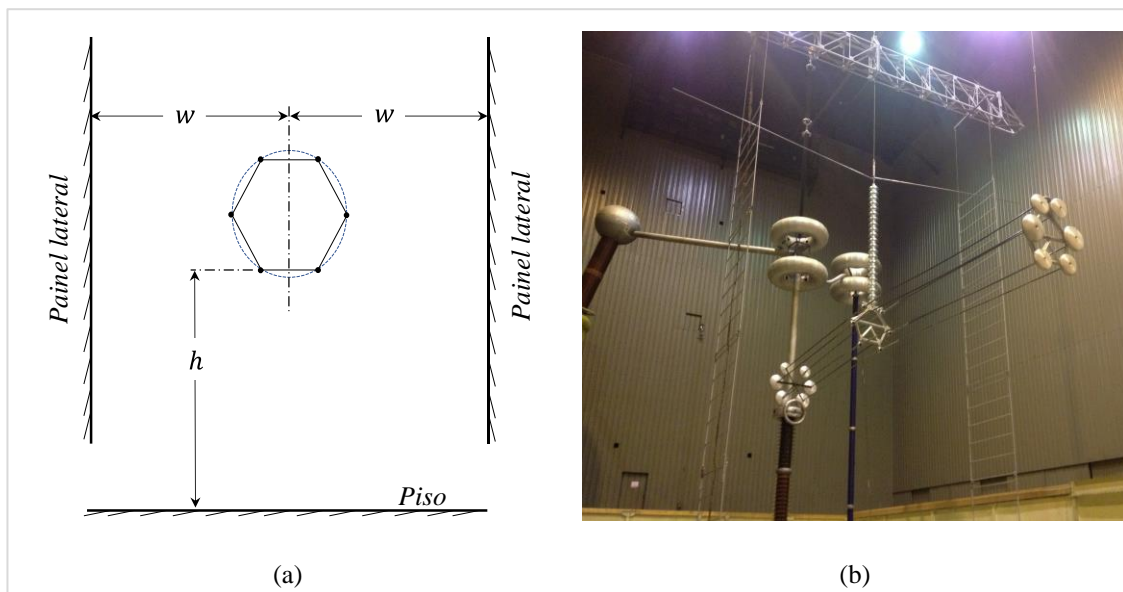


Figura 4.15 – (a) Representação esquemática do arranjo monofásico de ensaio da LPNE 500 kV e (b) Foto do arranjo instalado em laboratório durante o ensaio de corona visual

Tabela 4.5 – Resultados experimentais do ensaio de corona visual de um arranjo de LPNE de 500 kV com feixe regular de seis cabos condutores (CEB, 2014)

Tensão de Ensaio (fase-terra)	Resultados
$v_1 = 335 \text{ kV}_{rms}$	Sem Corona Positivo
$v_2 = 396 \text{ kV}_{rms}$	Extinção do Corona Positivo
$v_3 = 404 \text{ kV}_{rms}$	Aparição do Corona Positivo

A Figura 4.16 apresenta o comportamento dos níveis de campo elétrico sobre os subcondutores da face esquerda (N.º 1, 2 e 3) em função da tensão de ensaio aplicada. Considera-se, de igual forma, o arranjo posicionado a uma altura $h = 6 \text{ m}$, em relação aos subcondutores inferiores, e os painéis mantidos fixos a uma distância equivalente a $w = 3483 \text{ mm}$. De forma análoga aos resultados encontrados para a LT 230 kV *Sedro Woolley – March Point*, revela-se o comportamento linear do campo elétrico superficial em função da tensão aplicada, com comportamento bastante regular.

Fazendo uma leitura dos resultados indicados na Figura 4.13 e Figura 4.16, é possível estabelecer os valores das tensões de ensaio necessárias para se obter uma melhor correspondência entre os níveis de campo elétrico na superfície dos subcondutores considerando as duas condições de serviço.

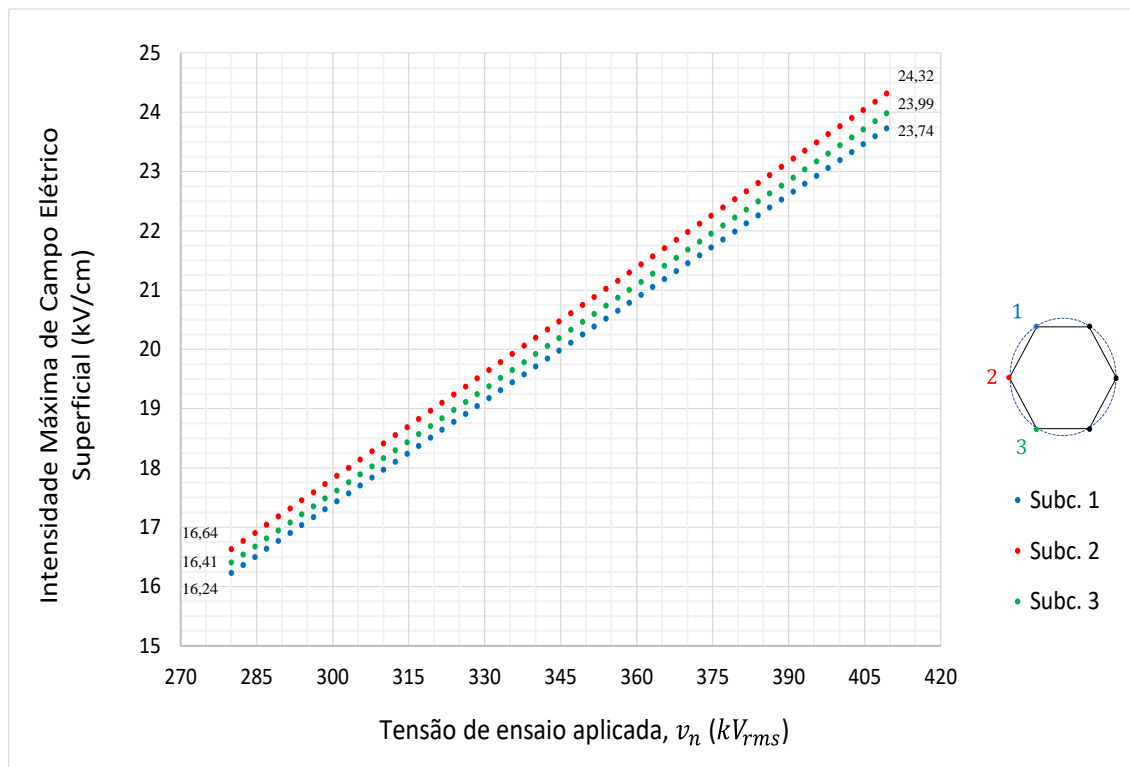


Figura 4.16 – Comportamento dos níveis máximos de campo elétrico superficial sobre os subcondutores em função da tensão monofásica de ensaio aplicada.

Neste contexto, a Tabela 4.6 expressa a comparação em termos percentuais, δ_e , para o valor da tensão de ensaio necessária, segundo simulações, para obtenção desta correspondência: a saber, $v_3 = 303 kV_{rms}$, fase-terra. Esta tensão de ensaio foi capaz de levar ao menor desvio percentual médio, dentro da faixa analisada, igual a $\bar{\delta}_e = 1,1\%$.

Tabela 4.6 – Comparação dos níveis máximos de campo elétrico superficial sobre os subcondutores das três diferentes condições de serviço.

Subcondutor #	Valor de Referência (kV/cm)	Reprodução Monofásica de Ensaio	
		$v_3 = 303 kV$	δ_e (%)
1	17,77	17,58	1,1
2	18,03	18,01	0,1
3	17,41	17,76	2,0

Os resultados da Tabela 4.6 reforçam a argumentação dos autores (OLSEN; TUOMINEN; LEMAN, 2018; KUFFEL *et al.*, 2008), para a impossibilidade de correspondência dos níveis de campo elétrico com uma única tensão de ensaio, dado que cada subcondutor do feixe central, da configuração trifásica, exige uma tensão de ensaio distinta para garantia desta correspondência.

Ao apresentar maior influência do plano do solo, o subcondutor N.º 3 possui o maior desvio percentual do valor de campo elétrico, equivalente a $\bar{\delta}_{MAX} = 2,0\%$. Em virtude das características do procedimento normativo do Método da Tensão Determinada, a sensibilidade do arranjo monofásico frente à tensão de ensaio adquire particular importância, uma vez que o ambiente de laboratório se torna o principal parâmetro de avaliação durante a determinação dos valores de início e extinção do efeito corona visual.

4.5 Considerações Finais

A avaliação do arranjo compacto de 230 kV da LT *Sedro Woolley – March Point* mostrou que as duas tensões de ensaios tradicionalmente adotadas, seja no contexto do sistema elétrico brasileiro ou norte-americano, não foi capaz de avaliar adequadamente o comportamento de campo elétrico superficial durante a verificação experimental do ensaio de corona visual. Neste caso, o valor de campo elétrico calculado para o arranjo monofásico ficou inferior ao valor máximo obtido para a configuração trifásica, com diferença de 14%.

Realizados sobre o arranjo monofásico central de uma LPNE de 500 kV, os estudos de sensibilidade do posicionamento dos painéis reflexivos indicaram um novo valor de afastamento para melhor aproximar os níveis de campo elétrico dos valores de referência. O afastamento obtido foi 26% superior àquele recomendado na resolução normativa (IEC, 1997), sendo capaz de levar ao menor desvio percentual médio, dentro da faixa analisada, de $\bar{\delta}_e = 1,5\%$.

Desta forma, as simulações computacionais apontaram a efetividade de representação das fases adjacentes do sistema trifásico por meio da instalação dos painéis laterais reflexivos, com o objetivo de se alcançar a desejável correspondência entre os níveis de campo elétrico. Entretanto, mostraram que apenas o posicionamento segundo recomendação normativa, desassociado de outros parâmetros, não é capaz de atingir níveis satisfatórios de correspondência. Seguindo o posicionamento normativo, o desvio percentual médio dos resultados de simulação, em relação ao valor de referência, se situou na faixa de 10,8%. Do outro lado, naquela simulação onde não foram considerados os painéis reflexivos, o erro percentual médio do campo elétrico, em relação ao valor de referência do sistema trifásico, atingiu patamares de 23,9%.

Por outro lado, a tensão monofásica de ensaio aplicada sobre os arranjos foi também avaliada como mecanismo de alteração dos níveis de campo elétrico superficial. Neste caso, para subsidiar a escolha dos valores adotados nas avaliações de sensibilidade, o trabalho respaldou-se em resultados de ensaios realizados anteriormente em configurações de escala natural.

“Acertasse eu com o que depois sabendo fiquei, para de lá de tantos assombros... Um está sempre no escuro, só no último derradeiro é que clareiam a sala.

Digo: o real não está na saída nem na chagada: ele se dispõe para a gente é no meio da travessia.”

Riobaldo, o sertanejo fáustico

5 Conclusões e Propostas de Continuidade de Pesquisa

5.1 Conclusões

A determinação dos valores de campo elétrico produzidos pelos sistemas aéreos de transmissão, sejam eles avaliados sobre o nível do solo, ou obtidos sobre a superfície dos subcondutores, é requisito regulatório do sistema elétrico brasileiro. A importância desta avaliação evidencia-se, por exemplo, durante a escolha do cabo condutor, das dimensões dos feixes de subcondutores, das distâncias de segurança da altura cabo-solo e, por último, na determinação da largura da faixa de servidão das LTs. Especialmente no contexto das linhas aéreas compactas, os valores de campo elétrico sobre a superfície dos cabos condutores, isoladores e ferragens são sensivelmente acentuados, o que leva à necessidade de uma avaliação criteriosa dos impactos associados ao efeito corona.

Tradicionalmente, a conformidade técnica dos projetos eletromecânicos das linhas é atestada por meio da realização de ensaios laboratoriais. É o caso das medições para a verificação experimental do efeito corona visual sob os arranjos isolantes e cabos condutores, cujos ensaios são realizados, em sua grande maioria, em ambientes fechados de laboratório através de uma reprodução monofásica do sistema de transmissão sob estudo. Para uma adequada avaliação dos arranjos das linhas compactas, por exemplo, é necessário que o ensaio incorpore o efeito dos condutores das fases adjacentes do sistema trifásico de transmissão. Pelo procedimento normativo, deste modo, este efeito de proximidade deve ser simulado por meio da instalação de painéis laterais aterrados com afastamento pré-determinado. Dado que as medições e a verificação experimental em

laboratório não podem ser realizadas nas mesmas condições de instalação e operação da LT, na grande maioria dos casos, o problema investigado neste trabalho referiu-se à avaliação da equivalência entre os valores de campo elétrico verificados para estas duas condições de instalação, além do nível de sensibilidade associado à presença dos painéis laterais em ambiente de laboratório.

A consolidação das técnicas numéricas de cálculo, aliado à crescente e expressiva disponibilidade de processamento e memória, proporcionou o surgimento de programas computacionais destinados à modelagem numérica que permitem a reprodução e simulação de sistemas físicos, como o caso das linhas aéreas de transmissão. Atualmente, a simulação computacional já pode, de forma notável, ser considerada uma alternativa eficaz aos testes realizados em laboratório.

Este trabalho inseriu-se nesse contexto ao propor o desenvolvimento de modelos computacionais, em ambiente COMSOL *Multiphysics*[®], destinado a calcular campos elétricos gerados pelos sistemas aéreos de transmissão de energia. Assim sendo, foram implementados e validados os modelos das linhas aéreas de transmissão tradicionais e compactas, de diferentes configurações de feixes e condições de aplicação. Como etapa metodológica, investigou-se a aplicação dos domínios genéricos de estudos e dos domínios artificiais, como o Domínio de Elemento Infinito, disponível na referida plataforma. Este último recurso foi capaz de aproximar, com melhor eficiência, os resultados de simulação com as referências analíticas e de medições em campo adotadas durante a etapa de validação dos modelos. Estes resultados evidenciaram, portanto, a efetividade da escolha do Domínio de Elemento Infinito como instrumento capaz de representar grandes regiões de espaço aberto empregando fronteiras numéricas artificiais de menor dimensão, sem prejuízo dos resultados ou distorções nas curvas de campo elétrico ao nível do solo.

As validações comparativas realizadas para as condições de campo elétrico distante, considerando uma LT convencional de 500 kV, bem como a avaliação do comportamento do campo elétrico na superfície dos subcondutores agrupados em feixe de condutores, apresentaram desvios percentuais limitados a 1,4%. Os resultados de simulação foram comparados com os aqueles publicados em literatura e obtidos por metodologias complementares. Adicionalmente, a comparação realizada entre modelos bidimensionais

e tridimensionais indicou para a viabilidade de se adotar modelos bidimensionais sem prejuízo dos resultados de simulação.

Neste sentido, estudos de caso foram propostos com o objetivo de se avaliar o comportamento do campo elétrico superficial associado aos arranjos compactos, em função de uma tensão monofásica de ensaio, bem como se determinou uma relação entre os campos gerados por sistemas trifásicos e reproduções monofásicas em ambiente fechado de laboratório. Além disso, investigou-se a influência dos planos laterais reflexivos, descritos pelos procedimentos normativos de ensaio, sobre o valor do campo elétrico superficial dos subcondutores agrupados em feixes para uma LT compacta de 500 kV inserida no atual contexto do sistema elétrico brasileiro.

Durante a verificação experimental do início e extinção do efeito corona visual sob arranjos isolante, é necessário garantir a correspondência entre os valores de campo elétrico para as duas condições de instalação: do ambiente de laboratório e condição trifásica de operação. Neste aspecto, os recursos computacionais apresentam destaque por permitir uma avaliação técnica mais vantajosa, do ponto de vista financeiro e do tempo de execução. Neste contexto, os resultados de simulação indicaram que este procedimento determinístico de ensaio – que associa a tensão monofásica de ensaio à máxima tensão operativa da LT – não foi capaz de avaliar adequadamente a configuração da LT compacta de 230 kV *Sedro Woolley – March Point*.

Por outro lado, verificou-se que a relação matemática apresentada nas publicações (IEC, 1997; IEEE, 2017) que associa o nível de campo elétrico na superfície de um condutor singelo à tensão monofásica de ensaio pode ser utilizada para uma adequada avaliação de correspondência dos níveis de campo para as duas condições de aplicação. Adicionalmente, a avaliação dos arranjos compactos de 230 kV e 500 kV confirmou o comportamento proporcional e linear do campo elétrico superficial a partir da tensão monofásica de ensaio aplicada.

Em relação aos estudos de sensibilidade realizados sobre o arranjo monofásico hexagonal da LPNE de 500 kV, as simulações computacionais apontaram a efetividade de representação das fases adjacentes do sistema trifásico por meio da instalação dos painéis laterais reflexivos, com o objetivo de se alcançar a desejável correspondência entre os níveis de campo elétrico. Entretanto, mostraram que apenas o posicionamento segundo recomendação normativa, desassociado de outros parâmetros, não é capaz de

atingir níveis satisfatórios de correspondência. Além disso, a avaliação dos arranjos monofásicos com subcondutores agrupados em feixe mostrou que não é possível uma única tensão de ensaio ser capaz de garantir uma completa correspondência entre os valores de campo elétrico sobre a superfície de todos os subcondutores, simultaneamente.

A partir da relevância e da contemporaneidade dos estudos vinculados aos sistemas elétricos de potência, o trabalho ressaltou a efetividade da ferramenta computacional empregada como meio de avaliação do comportamento das grandezas físicas de interesse com maior agilidade e acurácia. Nas situações em que a realização dos tradicionais ensaios laboratoriais não se fizer possível, indiscutivelmente, este recurso computacional pode ser empregado com suficiente nível de equivalência.

5.2 Propostas de Continuidade de Pesquisa

Uma vez que este trabalho está vinculado ao desenvolvimento em ambiente computacional, verifica-se uma grande abrangência para as propostas de continuidade das pesquisas. A primeira delas diz respeito ao suporte computacional adotado. Insuspeito em suas capacidades e atributos, é importante ressaltar que o software COMSOL *Multiphysics*[®] é uma plataforma com licença comercial, restringindo, invariavelmente, o amplo e público acesso. Neste aspecto, almeja-se que trabalhos futuros busquem também a disseminação dos modelos aqui desenvolvidos em plataformas de licença pública. Uma das mais reconhecidas e utilizadas é o aplicativo *Finite Element Method Magnetics* (FEMM), que conta com uma ampla base científica já estabelecida. Desde modo, é possível buscar avaliações e comparações com resultados apresentados pelo COMSOL[®], no que diz respeito à capacidade de criação de modelos, malhas, domínios artificiais de estudo e capacidade de processamento.

Considerando, por outro lado, a disponibilidade do pacote computacional COMSOL[®] no laboratório de pesquisa da Escola de Engenharia da UFMG, sugere-se que o *software* seja estudado e utilizado como ferramenta didática de ensaio. Disciplinas como Fundamentos de Eletromagnetismo, Modelagem Eletromagnética para Sistemas Elétricos de Potência, ou mesmo, Engenharia de Alta Tensão podem se beneficiar da adoção desta ferramenta de cálculo na grade curricular.

Sob o aspecto dos conceitos da Multifísica, sugere-se a ampliação dos modelos elaborados considerando a incorporação de outros parâmetros físicos. Notadamente pela

influência imediata no comportamento do efeito corona, indicam-se os parâmetros climáticos como a umidade, temperatura e pressão.

Com respeito à proposição de melhoria dos modelos empregados, é oportuno indicar a elaboração de estudos baseados em desenvolvimento puramente tridimensional. Reconhecendo as limitações associadas à representação de grandes domínios tridimensionais, sugere-se, por exemplo, a redução do campo de análise às geometrias dos arranjos de ferragens, cuja complexidade construtiva já oferece um amplo campo de investigação. Neste contexto tridimensional, atenção crucial deve ser dispensada ao estudo e desenvolvimento da modelagem da malha, o que implica diretamente no bom desempenho do modelo. As possibilidades advindas dos modelos tridimensionais são inesgotáveis. Torna-se viável a representação do ambiente interno do laboratório com destaque para o impacto dos equipamentos e fronteiras físicas sob o objeto de ensaio.

De forma análoga ao estabelecido para os estudos de sensibilidade dos planos laterais reflexivos, é possível complementar esta pesquisa com a avaliação do procedimento normativo de ensaio apresentado e discutido em (KUFFEL *et al.*, 2008; IEEE, 2017) – Método do Gradiente Calibrado – considerando arranjos com subcondutores agrupados em feixe, como o caso das Linhas Compactas de seis subcondutores. Para a determinação do início e extinção do efeito corona visual, este procedimento de ensaio adota o dispositivo de calibração por esfera destinado ao cálculo de uma adequada tensão de ensaio. Como proposta alternativa ao método determinístico da tensão de ensaio, discutido neste trabalho, este procedimento ainda não é amplamente disseminado devido à sua maior complexidade, maior duração de execução dos ensaios, e até mesmo devido à dificuldade de interpretação dos resultados. Neste sentido, é desejável que estudos acadêmicos lancem luz sobre este procedimento para, com isso, associar os resultados experimentais específicos com simulações numéricas de validação metodológica.

*“Estou hoje vencido, como se soubesse a verdade.
Estou hoje lúcido, como se estivesse para morrer,*

[...]

*Estou hoje perplexo, como quem pensou e achou e esqueceu.
Estou hoje dividido entre a lealdade que devo
À Tabacaria do outro lado da rua, como coisa real por fóra,
E à sensação de que tudo é sonho, como coisa real por dentro.”*

Trecho de Tabacaria, Álvaro de Campos

Referências

ADAMS, G. E. Voltage Gradients on High-Voltage Transmission Lines [includes discussion]. **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers**. Part III: Power Apparatus and Systems, vol. 74, no. 3, pp. 5-11, Jan. 1955, doi: 10.1109/AIEEPAS.1955.4499040. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4499040>. Acesso em: 03 de jul. de 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (Brasil). Resolução Normativa ANEEL Nº 915, de 23 de fevereiro de 2021. Regulamenta a Lei nº 11.934, de 5 de maio de 2009, no que se refere aos limites à exposição humana a campos elétricos e magnéticos originários de instalações de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica e revoga a Resolução Normativa nº 398, de 23 de março de 2010; a Resolução Normativa nº 413, de 3 de novembro de 2010 e a Resolução Normativa nº 616, de 1º de julho de 2014. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, n. 39, p. 102, v. 159, 01 mar. 2021. Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/dou/-/resolucao-normativa-aneel-n-915-de-23-de-fevereiro-de-2021-305686044>. Acesso em: 22 de mar. de 2021.

ANDRÉS, A. M., *et al.* Simulation of Low Frequency Electromagnetic Fields in 132kV Overhead Transmission Lines Using 2D Finite Element Analysis. *In: XIX Workshop on Information Processing and Control (RPIC)*, San Juan, Argentina, 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/RPIC53795.2021.9648438. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9648438>. Acesso em: 02 de maio de 2022.

ARFKEN, George B.; WEBER, Hans-Jurgen. Física matemática: métodos matemáticos para engenharia e física. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007. xii, 900 p. ISBN 978-85-35220-50-6.

ASSAN, Aloisio Ernesto. **Método dos elementos finitos**: primeiros passos. 2.ed. Campinas, SP: Editora da UNICAMP, c2003. 298p. ISBN 8526806238.

BASHARAHIL, M. Khaled Omar; AHMAD, N. Azlinda. Electromagnetic Fields Characteristics From Overhead Lines, Underground Cables and Transformers Determined Using Finite Element Method. *In: IEEE 13th International Conference on*

the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM), Johor Bahru, Malaysia, 2021, pp. 338-341. doi: 10.1109/ICPADM49635.2021.9493976. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9493976>. Acesso em: 02 de maio de 2022.

BASTOS, João Pedro Assumpção. **Eletromagnetismo e cálculo de campos**. 3 ed. rev. Florianópolis: Ed. da UFSC, 1996. 452 p.: il (Série Didática). CDU 538.3:681.325.53.

BASTOS, João Pedro Assumpção; SADOWSKI, Nelson. **Electromagnetic Modeling by Finite Element Methods**. New York, NY: Marcel Dekker, 2003. xii, 490p. (Electrical and computer engineering ; v. 117). ISBN 0824742699 (broch.).

CARDOSO, José Roberto. **Introdução ao método dos elementos finitos**: para engenheiros eletricitas. [S.l.: s.n.], [1996?] 110 p.:

CENTRE d'ESSAIS DE BAZET (CEB). **RIV/Corona and Voltage Distribution Tests for 500 kV Line**. Test Report N° 1768-14. Bazet High-Voltage Laboratory. Bazet, France. Janeiro de 2014.

CHARTIER, Vernon L. *et al.* Effect of High Altitude on High Voltage AC Transmission Line Corona Phenomena. **IEEE Transactions on Power Delivery**, vol. 2, no. 1, pp. 225-237, Jan. 1987, doi: 10.1109/TPWRD.1987.4308094. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4308094>. Acesso em: 28 de dez. de 2022.

CHARTIER, Vernon L. *et al.* Corona performance of a compact 230-kV line. **IEEE Transactions on Power Delivery**, vol. 10, no. 1, pp. 410-420, Jan. 1995, doi: 10.1109/61.368372. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/368372>. Acesso em: 12 de out. de 2022.

CIGRE. **Compact AC Overhead Lines**. Technical Brochure 792. Working Group B2.63. Paris: Conseil International des Grands Réseaux Électriques (CIGRE), 2020, 163 p. ISBN 978-2-85873-494-8.

CIGRE. **Guide for Partial Discharge Measurements in Compliance to IEC 60270**. Technical Brochure No. 366. Working Group D1.33. Paris: Conseil International des Grands Réseaux Électriques (CIGRE), December, 2008.

COMSOL. **Introduction to the AC/DC Module**. COMSOL Multiphysics® v. 4.4. COMSOL AB, Stockholm, Sweden. November. 2013.

COMSOL. **Setup and Meshing of Infinite Elements, Perfectly Matched Layers, and Absorbing Layers**. COMSOL AB, Stockholm, 2022a. Disponível em: <https://www.comsol.com/support/knowledgebase/1272>. Acesso em: 02 de jun. de 2022.

COMSOL. **What Is Multiphysics?**. COMSOL AB, Stockholm, 2022b. Disponível em: <https://www.comsol.com/multiphysics>. Acesso em: 27 de ago. de 2022.

CORSO, Marcelo Picolotto *et al.* Evaluation of Methods for Electric Field Calculation in Transmission Lines. **IEEE Latin America Transactions**, vol. 16 (no. 12), pp. 2970-2976, 2018. doi: 10.1109/TLA.2018.8804264. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8804264>. Acesso em: 30 de abr. de 2022.

DE LA HOZ, Manuel *et al.* Impact assessment of clearance in corona testing for a high-voltage substation connector set using FEM. **IET Generation, Transmission & Distribution**, 2020a, Vol. 14, Iss. 18, pp. 3710-3718. Disponível em: <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2019.1798>. Acesso em: 30 de abr. de 2022.

DE LA HOZ, Manuel *et al.* Corona effect prediction methodologies for grounded sphere-sphere configurations. *In*: COMSOL CONFERENCE, 2020b. **Proceedings [...]**. Disponível em: <https://www.comsol.com/paper/download/857081/8141.pdf>. Acesso em: 01 de maio de 2022.

DOUGLASS, Dale A.; STEWART, James; CLAIRMONT, Bernie. Electrical Characteristics of Conductor Configurations and Circuits. *In*: LINGS, Raymond (coord.). **EPRI AC Transmission Line Reference Book: 200 kV and above**. 3. ed. Palo Alto, CA: Electric Power Research Institute (EPRI), 2005. Capítulo 2.

DOUGLASS, Dale A.; STEWART, James. Introduction to Compact Lines. *In*: CHAN, John K. (ed.). **EPRI Transmission Line Reference Book – 115-345 kV Compact Line Design**. Palo Alto, CA: Electric Power Research Institute (EPRI), 2008. Capítulo 1.

ELETROBRÁS. **Detalhamento da Alternativa de Referência da LT 500 kV Gilbués - Barreiras II** (Relatório R2). RE_EPPT_1.003/12. Revisão 01 de 31/07/2012. Diretoria de Planejamento e Engenharia – DE. Superintendência de Planejamento da Expansão. Centrais Elétricas do Norte do Brasil S.A: Brasília, DF. 2012. Disponível em: https://www2.aneel.gov.br/aplicacoes_liferay/editais_transmissao/edital_transmissao.cfm. Acesso em: 01 de out. de 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Estudos para a Licitação da Expansão da Transmissão**. Análise técnico-econômica de alternativas: Relatório R1 – Ampliação das Interligações Norte/Nordeste/Sudeste para escoamento da geração excedente nas regiões Norte/Nordeste. EPE-DEE-RE-063/2011-r2, revisão de 14 de setembro de 2012. EPE: Brasília, 2012.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **A EPE: O Que Fazemos**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/a-epe/o-que-fazemos>. Acesso em: 20 de fev. de 2023.

FARAH, Arthur Araújo Maia. **Cálculo de campos elétricos e magnéticos em linhas de transmissão pelo método dos elementos finitos**. 225 f. Dissertação (mestrado) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais em associação ampla com a Universidade Federal de São João Del Rei, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Belo Horizonte, 2014. Disponível em: <http://www.ppgel.ufsj.edu.br/dissertacoes.php>. Acesso em: 30 de abr. de 2022.

FREI, W. **How to Choose Between Boundary Conditions for Coil Modeling**. COMSOL Blog. 2016. Disponível em: <https://www.comsol.com/blogs/how-to-choose-between-boundary-conditions-for-coil-modeling/>. Acesso em: 02 de jun. de 2022.

FRONTIN, Sergio de Oliveira. **Condutores de Linhas de Transmissão**. In: FRONTIN, Sergio de Oliveira (coord.). **Prospecção e hierarquização de inovações tecnológicas aplicadas a linhas de transmissão**, Brasília: Goya, 2010. 368 pp. Capítulo 8. Disponível em: https://tlgomes.files.wordpress.com/2011/01/inovalt_web.pdf. Acesso em: 30 de abr. de 2022.

FUCHS, Rubens Dario. **Transmissão de energia elétrica: linhas aéreas**. 3. ed. rev. e ampl. Uberlândia: EDUFU, 2015. 2 v.: il. ISBN: 978-85-7078-385-1.

GUIMARÃES, Gernan Edson. **Medições e cálculos de campos elétricos e magnéticos de uma linha de transmissão de 500 kV**. 2005. 84 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte, 2005. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/BUOS-8CZG49>. Acesso em: 12 de ago. de 2018.

GUIMARÃES, Rogério Peixoto *et al.* Estrutura Compacta Tipo Cross-Rope para Linha de Transmissão em 500 kV. *In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (SNPTEE)*, 16., 2001, Campinas, SP. **Anais [...]**. Campinas: SNPTEE, 2001.

GUIMARÃES, Rogério Peixoto *et al.* LT 500 kV CS Barreiras II – Rio das Éguas – Luziânia. Solução Eletromecânica Estrutural para SIL de 1670 MW. *In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (SNPTEE)*, 23., 2015, Foz do Iguaçu, RS. **Anais [...]**. Foz do Iguaçu: SNPTEE, 2015.

HARROLD, Ronald T.; DAKIN, Thomas W. The Relationship Between the Picocoulomb and Microvolt for Corona Measurements on HV Transformers and Other Apparatus. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, vol. PAS-92, no. 1, pp. 187-198, Jan. 1973. doi: 10.1109/TPAS.1973.293612. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4075056>. Acesso em: 02 de out. de 2022.

HAYT, William Hart; BUCK, John A. **Eletromagnetismo**. 8. ed. Porto Alegre, RS: AMGH, 2013. xviii, 595 p. ISBN 9788580551532.

HOFFMANN, André; HOFFMANN, João Nelson. LPNE de 1670 MW com Subfeixes de Condutores (SplitFex®). *In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (SNPTEE)*, 25., 2019, Grupo de Estudo de Linhas de Transmissão – GLT, Belo Horizonte, MG. **Anais [...]**. Belo Horizonte: SNPTEE, 2019.

IEEE Corona And Field Effects Subcommittee Report. A Survey of Methods for Calculating Transmission Line Conductor Surface Voltage Gradients: Radio Noise Working Group. **IEEE Transactions On Power Apparatus And Systems**, v. PAS-98, n. 6, p. 1996-2014, 1979. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4113716/>. Acesso em: 03 jul. 2022.

IEEE Guide for Conducting Corona Tests on Hardware for Overhead Transmission Lines and Substations. **IEEE Std 1829-2017**, pp.1-32, 31 March 2017, doi: 10.1109/IEEESTD.2017.7891097. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7891097/>. Acesso em: 27 mar. 2023.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 61824**: Overhead lines – Requirements and tests for fittings. Geneva: IEC, 1997.

KING, S. Y. The electric field near bundled conductors. **Proc. IEE** (London), Part.C, monogr. 338s, pp.200-206, June 1959.

KRANOONGON, P.; TECHAUMNAT, B. Electric Field Analysis of the 230 kV AC Transmission Line System for an Limited Area. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL ENGINEERING/ELECTRONICS, COMPUTER, TELECOMMUNICATIONS AND INFORMATION TECHNOLOGY (ECTI-CON), 24-27 June 2020, 17., Songkhla, Thailand. **Proceedings [...]**. pp. 308-311, doi: 10.1109/ECTI-CON49241.2020.9158322. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9158322>. Acesso em: 17 de set. de 2022.

KUFFEL, E; KUFFEL, J; ZAENGL, W. S. **High voltage engineering: fundamentals**. Oxford: Newnes, c2000. 539p. ISBN 0750636343.

KUFFEL, J.; LI, Z.; FREIMARK, B.; RAO, T. Technical Development of the IEEE Guide for Visual Corona Testing of Insulator Assemblies and Line Hardware and its Application in the Testing of 765-kV Transmission Line Insulator Assemblies. 2008 Joint International Conference on Power System Technology and IEEE Power India Conference, New Delhi, India, 2008, pp. 1-7, doi: 10.1109/ICPST.2008.4745383. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4745383>. Acesso em: 27 de mar. de 2023.

LEÃO, Ricardo Micheletto. **Rádio interferência proveniente de linhas de alta tensão**. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2008. 146p. [E-Book]. Disponível em: http://verum.pucrs.br/exlibris/aleph/a23_1/apache_media/3C56TKSS7UALP8HSI2B1GAXT4E75BK.pdf. Acesso em: 29 out. 2022.

LUCHT, Phil. **Bipolar Coordinates and the Two-Cylinder Capacitor**. Rimrock Digital Technology, Salt Lake City, Utah. 2015. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/273123774_Bipolar_Coordinates_and_the_Two-Cylinder_Capacitor. Acesso em: 25 de jun. de 2022.

MACHADO, Kleber Daum. **Eletromagnetismo**. Ponta Grossa, PR: TODAPALAVRA, 2012. vol. 1, 1034 p. ISBN 978-85-62450-28-0.

MARUVADA, P. Sarma. **Corona Performance of High-voltage Transmission Lines**. Baldock, Hertfordshire: Research Studies Press, 2000. ISBN 0-86380-254-0.

MARUVADA, P. Sarma; CHARTIER, Vernon L. Compact Line Experience. In: CHAN, John K. (ed.). **EPRI Transmission Line Reference Book – 115-345 kV Compact Line Design**. Palo Alto, CA: Electric Power Research Institute (EPRI), 2008a. Capítulo 2.

MARUVADA, P. Sarma; CHARTIER, Vernon L. Corona and Field Effects. In: CHAN, John K. (ed.). **EPRI Transmission Line Reference Book – 115-345 kV Compact Line Design**. Palo Alto, CA: Electric Power Research Institute (EPRI), 2008b. Capítulo 7.

MEEKER, David. **Finite Element Method Magnetics**. Version 4.2. User's Manual, 2010. Disponível em: <https://www.femm.info/wiki/Documentation/>. Acesso em: 28 de ago. de 2022.

OLSEN, R. G.; WONG, P. S. K. Characteristics of low frequency electric and magnetic fields in the vicinity of electric power lines. **IEEE Transactions on Power Delivery**, vol. 7, no. 4, pp. 2046-2055, Oct. 1992. doi: 10.1109/61.157008. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/157008>. Acesso em: 02 de maio de 2022.

OLSEN, R. G.; TUOMINEN, M. W.; LEMAN, J. T. On Corona Testing of High-Voltage Hardware Using Laboratory Testing and/or Simulation. **IEEE Transactions on Power Delivery**, vol. 33, no. 4, pp. 1707-1715, aug. 2018. doi: 10.1109/TPWRD.2017.2720198. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7959188>. Acesso em: 30 de abr. de 2022.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Procedimentos de Rede: Módulo 2 – Critérios e Requisitos**. Submódulo 2.7: Requisitos mínimos para linhas de transmissão. Revisão 2022.08. Despacho ANEEL nº 1.772/2022. Data de aprovação:

10/08/2022. Brasília: ONS, 2022. Disponível em: <https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-ons/procedimentos-de-rede/vigentes>. Acesso em: 24 de mar. de 2023.

PAGANOTTI, André Luiz. **Cálculo e minimização de campo elétrico de linhas de transmissão**. 2012. 178 f. Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais em associação ampla com a Universidade Federal de São João Del Rei, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Belo Horizonte, 2012. Disponível em: <http://www.ppgel.ufsj.edu.br/dissertacoes.php>. Acesso em: 30 de abr. de 2022.

PAVLIK, B. L. **Tecnologia da ferragem para linhas de AT e EAT**. São Paulo: 1989. 329p.

PEDERSEN, A. Calculation of Spark Breakdown or Corona Starting Voltages in Nonuniform Fields. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, vol. PAS-86, no. 2, pp. 200–206, Feb. 1967. doi: 10.1109/TPAS.1967.291836. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4073260>. Acesso em: 16 de jul. de 2022.

PESSOA, Lígia Verônica Genésio. **Proposta de tecnologia para recapacitação de linhas de transmissão baseado na relocação de estruturas de concreto**. 2017. 142f. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco. CTG, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Recife, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/24926>. Acesso em: 01 de jan. de 2023.

POTKRAJAC, Dejan; PAPPENHEIM, Simon; KIZILCAY, Mustafa. Three-dimensional FEM model of an AC/DC hybrid high voltage transmission line to analyze the electrical field along composite insulators. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER SYSTEMS TRANSIENTS (IPST)*, 2017, Seoul. **Proceedings [...]**. Disponível em: https://www.ipstconf.org/papers/Proc_IPST2017/17IPST214.pdf. Acesso em: 24 de abr. de 2022.

RÊGO, Vinícius Barros. Estruturas de Linhas de Transmissão. *In: FRONTIN, Sergio de Oliveira (coord.). Prospecção e hierarquização de inovações tecnológicas aplicadas a linhas de transmissão*, Brasília: Goya, 2010. 368 pp. Capítulo 7. Disponível em: https://tlgomes.files.wordpress.com/2011/01/inovalt_web.pdf. Acesso em: 30 de abr. de 2022.

SABONNADIÈRE, Jean-Claude; COULOMB, Jean-Louis. **Elementos finitos e CAE: aplicações em engenharia elétrica**. São Paulo: Aleph, c1986. 214p.

SARMA, M. P.; JANISCHEWSKYJ, W. Electrostatic Field of a System of Parallel Cylindrical Conductors. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, vol. PAS-88, no. 7, pp. 1069-1079, July 1969, doi: 10.1109/TPAS.1969.292507. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4073945>. Acesso em: 09 de maio de 2022.

SILVA, João Batista Guimarães Ferreira *et al.* Projeto Paranaíba – Uma Linha com Elevada Capacidade de Transmissão. In: ENCUENTRO REGIONAL IBERO-AMERICANO DE CIGRÉ (ERAC), 17., 2017, *Ciudad del Este*. **Anais [...]. Ciudad del Este**: ERAC, 2017.

SOUZA, Ailton Lopes. **Estudo de modelos para definição de um critério de início de corona através da análise de experimentos e simulações computacionais**. 2009. 80 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte, 2009. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/DJPV-84VN2X>. Acesso em: 23 de abr. de 2022.

TAESA. **Detalhamento da Alternativa de Referência (R2) da LT 500 kV Barreiras II – Rio das Éguas**. Relatório Técnico TAE.RT.0101.00, Revisão 00 de 26/03/2012. Transmissora Aliança de Energia Elétrica S.A (TAESA). 2012. Disponível em: https://www2.aneel.gov.br/aplicacoes_liferay/editais_transmissao/edital_transmissao.cfm. Acesso em: 01 de out. de 2022.

TIMASCHEFF, A. S. Field Patterns of Bundle Conductors and Their Electrostatic Properties. **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers**. Part III: Power Apparatus and Systems, vol. 80, no. 3, pp. 590-596, April 1961, doi: 10.1109/AIEEPAS.1961.4501098. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4501098>. Acesso em: 03 de jul. de 2022.

TONY GILLESPIE, J. A.; VAN PELT, John. Aesthetic and Environmental Aspects of Compact Lines. In: CHAN, John K. (ed.). **EPRI Transmission Line Reference Book – 115-345 kV Compact Line Design**. Palo Alto, CA: Electric Power Research Institute (EPRI), 2008. Capítulo 9.

VIASCIENCE ENGINEERING. **Advanced Electromagnetics**. Lecture 21. Bipolar Cylindrical Coordinates. A companion channel to viascience.org. 2022. Disponível em: <https://drive.google.com/drive/folders/1hCILISaF5X0Pggqo11bXL9VGjEVt1LoaX>. Acesso em: 25 de jun. de 2022.

VILELA, Pedro Henrique Soares. **Uma proposta de análise técnica para linhas de transmissão compactas com potência natural elevada em regiões com topografia acidentada**. 2019. 90 f. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/30268>. Acesso em: 24 de set. de 2022.

ZACHARIADES, C. *et al.* Development of Electric-Field Stress Control Devices for a 132 kV Insulating Cross-Arm Using Finite-Element Analysis. **IEEE Transactions on Power Delivery**, vol. 31, no. 5, pp. 2105-2113, Oct. 2016. doi: 10.1109/TPWRD.2015.2499795. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7327203>. Acesso em: 02 de maio de 2022.

ZAFFANELLA, Luciano E. Electric and Magnetic Fields. In: LINGS, Raymond (coord.). **EPRI AC Transmission Line Reference Book: 200 kV and above**. 3. ed. Palo Alto, CA: Electric Power Research Institute (EPRI), 2005. 1011974. Capítulo 7.

“Os cacos da vida, colados, formam uma estranha xícara.

Sem uso,

ela nos espia do aparador.”

Carlos Drummond de Andrade

Apêndice A – Registros de Simulação

Os registros de simulação do problema bidimensional apresentado na seção 3.3.1 – Comparação entre Modelos Bidimensionais e Tridimensionais estão reproduzidos na Tabela A.1, em função do tamanho do domínio de estudo.

Tabela A.1 – Registros de Simulação dos Modelos Bidimensionais

Domínio de $R_1 = 25 m$

Number of vertex elements: 6
 Number of boundary elements: 328
 Number of elements: 632
 Minimum element quality: 0.9866
 Number of vertex elements: 43
 Number of boundary elements: 708
 Number of elements: 63406
 Minimum element quality: 0.7113

=====

Stationary Solver 1 in Solver 1 started at 3-Set-2022 19:55:38.

Linear solver

Number of degrees of freedom solved for: 128614.

Symmetric matrices found.

Scales for dependent variables:

Electric potential (comp1.V): 1

Iter	Damping	Stepsize	#Res	#Jac	#Sol	LinErr	LinRes
1	1.0000000	0.98	1	1	1	1.1e-010	6.5e-015

Stationary Solver 1 in Solver 1: Solution time: 2 s

Physical memory: 2.02 GB

Virtual memory: 2.29 GB

 Domínio de $R_2 = 35 m$

Number of vertex elements: 6
 Number of boundary elements: 325
 Number of elements: 474
 Minimum element quality: 0.9897
 Number of vertex elements: 43
 Number of boundary elements: 709
 Using conservative strategy on domain
 Number of elements: 81488
 Minimum element quality: 0.4794

=====

Stationary Solver 1 in Solver 1 started at 3-Set-2022 19:56:34.

Linear solver

Number of degrees of freedom solved for: 164464.

Symmetric matrices found.

Scales for dependent variables:

Electric potential (comp1.V): 1

Iter	Damping	Stepsize	#Res	#Jac	#Sol	LinErr	LinRes
1	1.0000000	0.98	1	1	1	1.4e-010	5.2e-015

Stationary Solver 1 in Solver 1: Solution time: 3 s

Physical memory: 2.12 GB

Virtual memory: 2.38 GB

 Domínio de $R_3 = 45 m$

Number of vertex elements: 6
 Number of boundary elements: 325
 Number of elements: 474
 Minimum element quality: 0.9514
 Number of vertex elements: 43
 Number of boundary elements: 709
 Using conservative strategy on domain
 Number of elements: 84006
 Minimum element quality: 0.4751

=====

Stationary Solver 1 in Solver 1 started at 3-Set-2022 19:57:54.

Linear solver

Number of degrees of freedom solved for: 169500.

Symmetric matrices found.

Scales for dependent variables:

Electric potential (comp1.V): 1

Iter	Damping	Stepsize	#Res	#Jac	#Sol	LinErr	LinRes
1	1.0000000	0.97	1	1	1	1.4e-010	5.1e-015

Stationary Solver 1 in Solver 1: Solution time: 3 s

Physical memory: 2.16 GB

Virtual memory: 2.42 GB

 Domínio de $R_4 = 60\text{ m}$

Number of vertex elements: 6
 Number of boundary elements: 322
 Number of elements: 316
 Minimum element quality: 0.9766

=====

Stationary Solver 1 in Solver 1 started at 3-Set-2022 20:02:00.

Linear solver

Number of degrees of freedom solved for: 173146.

Symmetric matrices found.

Scales for dependent variables:

Electric potential (comp1.V): 1

Iter	Damping	Stepsize	#Res	#Jac	#Sol	LinErr	LinRes
1	1.0000000	0.95	1	1	1	1.4e-010	5.1e-015

Stationary Solver 1 in Solver 1: Solution time: 3 s

Physical memory: 2.19 GB

Virtual memory: 2.44 GB

 Domínio de $R_5 = 75\text{ m}$

Number of vertex elements: 6
 Number of boundary elements: 322
 Number of elements: 316
 Minimum element quality: 0.9191
 Number of vertex elements: 43
 Number of boundary elements: 726
 Using conservative strategy on domain
 Number of elements: 87022
 Minimum element quality: 0.5307

=====

Stationary Solver 1 in Solver 1 started at 3-Set-2022 20:03:24.

Linear solver

Number of degrees of freedom solved for: 175234.

Symmetric matrices found.

Scales for dependent variables:

Electric potential (comp1.V): 1

Iter	Damping	Stepsize	#Res	#Jac	#Sol	LinErr	LinRes
1	1.0000000	0.93	1	1	1	1.4e-010	5.1e-015

Stationary Solver 1 in Solver 1: Solution time: 3 s

Physical memory: 2.19 GB

Virtual memory: 2.45 GB

Os registros de simulação do problema tridimensional apresentado na seção 3.3.1 – Comparação entre Modelos Bidimensionais e Tridimensionais estão reproduzidos na Tabela A.2, em função do tamanho do domínio de estudo.

Tabela A.2 – Registros de Simulação dos Modelos Tridimensionais

Domínio de $R_1 = 25 m$									
Stationary 19:07:44 Linear solver	Solver	1	in	Solver	1	started at	03/set/22		
Number of	degrees of	freedom solved	for:	388263					
Symmetric	matrices found.								
Scales for	dependent	variables:							
Electric potential (comp1.V):	1								
Iter	Damping	Stepsize	#Res	#Jac	#Sol	LinIt	LinErr	LinRes	
1	1	0.98	1	1	1	731	0.00099	0.00023	
Stationary (2 minutes, Physical memory: 4.73 GB Virtual memory: 5.03 GB)	Solver	1	in	Solver	01:00	Solution time:	125	s	
Domínio de $R_2 = 35 m$									
Stationary 19:12:21 Linear solver	Solver	1	in	Solver	1	started at	03/set/22		
Number of	degrees of	freedom solved	for:	429063					
Symmetric	matrices found.								
Scales for	dependent	variables:							
Electric potential (comp1.V):	1								
Iter	Damping	Stepsize	#Res	#Jac	#Sol	LinIt	LinErr	LinRes	
1	1	0.96	1	1	1	883	0.00099	0.00025	
Stationary (3 minutes, 26 seconds) Physical memory: 2.62 GB Virtual memory: 2.8 GB)	Solver	1	in	Solver	01:00	Solution time:	206	s	

 Domínio de $R_3 = 45 m$

Stationary Solver 1 in Solver 1 started at 03/set/22
 19:24:21
 Linear solver

Number of degrees of freedom solved for: 543609

Symmetric matrices found.

Scales for dependent variables:

Electric potential (comp1.V): 1

Iter	Damping	Stepsize	#Res	#Jac	#Sol	Lint	LinErr	LinRes
1	1	0.96	1	1	1	1	513	0.00097 9.20E-05

Stationary Solver 1 in Solver 01:00 Solution time: 119 s
 (1 minute, 59 seconds)
 Physical memory: 2.93 GB
 Virtual memory: 3.1 GB

 Domínio de $R_4 = 60 m$

Stationary Solver 1 in Solver 1 started at 03/set/22
 19:31:45
 Linear solver

Number of degrees of freedom solved for: 541161

Symmetric matrices found.

Scales for dependent variables:

Electric potential (comp1.V): 1

Iter	Damping	Stepsize	#Res	#Jac	#Sol	Lint	LinErr	LinRes
1	1	0.92	1	1	1	1	479	0.00097 9.50E-05

Stationary Solver 1 in Solver 01:00 Solution time: 120 s
 (2 minutes, 0 seconds)
 Physical memory: 2.88 GB
 Virtual memory: 3.14 GB

Domínio de $R_5 = 75 \text{ m}$

Stationary Solver 1 in Solver 1 started at 03/set/22
19:37:40
Linear solver

Number of degrees of freedom solved for: 668559

Symmetric matrices found.

Scales for dependent variables:

Electric potential (comp1.V): 1

Iter	Damping	Stepsize	#Res	#Jac	#Sol	Lintt	LinErr	LinRes
1	1	1	0.88	1	1	1	430	0.00098 7.00E-05

Stationary Solver 1 in Solver 01:00 Solution time: 128 s
(2 minutes, 8 seconds)

Physical memory: 3.9 GB

Virtual memory: 4.25 GB

*“For millions of years, mankind lived just like the animals.
Then something happened which unleashed the power of our
imagination.*

We learned to talk and we learned to listen”.

*Stephen Hawking
(British Telecom Advertisement, 1993)*
