

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ÁLVARO SERRALTA HURTADO DE MENEZES

**OTIMIZAÇÃO MULTI-OBJETIVO DA
CONFIGURAÇÃO GEOMÉTRICA DE
FEIXES DE LINHAS DE TRANSMISSÃO
COM POTÊNCIA NATURAL ELEVADA**

Porto Alegre
2021

ÁLVARO SERRALTA HURTADO DE MENEZES

**OTIMIZAÇÃO MULTI-OBJETIVO DA
CONFIGURAÇÃO GEOMÉTRICA DE
FEIXES DE LINHAS DE TRANSMISSÃO
COM POTÊNCIA NATURAL ELEVADA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.
Área de concentração: Energia

ORIENTADOR: Prof. Dr. Sérgio Haffner

Porto Alegre
2021

ÁLVARO SERRALTA HURTADO DE MENEZES

**OTIMIZAÇÃO MULTI-OBJETIVO DA
CONFIGURAÇÃO GEOMÉTRICA DE
FEIXES DE LINHAS DE TRANSMISSÃO
COM POTÊNCIA NATURAL ELEVADA**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: _____

Prof. Dr. Sérgio Haffner, UFRGS

Doutor pela Universidade Estadual de Campinas – Campinas, Brasil

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Antônio Carlos Siqueira de Lima, UFRJ

Doutor pela Universidade Federal do Rio de Janeiro – Rio de Janeiro, Brasil

Prof. Dr. Flávio Antônio Becon Lemos, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal de Santa Catarina – Florianópolis, Brasil

Profa. Dra. Mariana Resener, UFRGS

Doutora pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil

Coordenador do PPGEE: _____

Prof. Dr. Sérgio Haffner

Porto Alegre, março de 2021.

AGRADECIMENTOS

A meus pais, Ruy e Cecília, pelo amor, carinho e apoio incondicional em todos os momentos da minha vida pessoal e profissional.

A meu pai especialmente, que é minha principal referência profissional pela sua competência, ética e humildade exemplar e que sempre me apoiou e orientou na carreira profissional e acadêmica, me ensinando e facilitando caminhos com cuidado e carinho.

Ao Professor Sérgio Luís Haffner, pela disponibilidade, objetividade, seriedade e qualidade da orientação deste trabalho e pelas excelentes contribuições, que me ajudaram a alinhar os passos para conclusão dessa dissertação.

Ao Professor Roberto Chouhy Leborgne, pelo apoio e orientação em diversos passos importantes da minha graduação e pós-graduação na Engenharia Elétrica.

Aos colegas, professores e funcionários do Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, que me ofereceram condições de aprendizado acadêmico pelo bom coleguismo e excelência técnica.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico (CNPq) que forneceram ambientes, condições e apoios importantes em diversas etapas de minha trajetória acadêmica.

A todos colegas da Enel Rio, em especial Francisco Gris, Giovanni Faune e Renata Gheno, por formarem uma excelente equipe de trabalho que me incentiva a aprender cada vez mais e me motiva a superar os desafios associados ao planejamento, projeto e obras de linhas de transmissão no estado do Rio de Janeiro.

Ao CIGRÉ, em especial a João Batista Guimarães Ferreira da Silva e Oswaldo Régis Júnior, pelo apoio e incentivo na participação grupos de trabalho, cujas discussões técnicas de excelência ampliam o espectro de visão técnica-profissional e possibilitam intercâmbio único e diferenciado de experiências.

A Vicente Ribeiro Simoni e André Luiz Pereira da Cruz pela discussão e apoio na validação dos resultados de cálculo de campos elétricos e pela busca de materiais de referência.

A meus amigos, que, independente de distância ou frequência de contato, me proporcionam momentos de alegria, carinho e parceria que são fundamentais para saúde mental de qualquer pessoa e sucesso em jornadas pessoais e profissionais.

RESUMO

Linhas de transmissão em alta tensão são parte fundamental de um sistema elétrico interligado. Em níveis de tensão elevados como, por exemplo, 500 kV, as linhas utilizam múltiplos subcondutores por fase, para obter parâmetros que atendam aos requisitos de desempenho no sistema e respeitem limites de campo elétrico na superfície dos condutores. A disposição geométrica dos condutores influencia tanto os campos superficiais quanto os parâmetros elétricos. Este trabalho faz um estudo dos efeitos que a geometria de uma linha têm sobre os parâmetros e campos superficiais, bem como quais são as diretrizes para a otimização dessas grandezas. Aplicou-se um método de otimização multi-objetivo para otimizar a relação entre a potência natural e os campos elétricos superficiais. A expansão do feixe e a compactação das fases aumentam não só a potência natural, mas também os campos elétricos na superfície dos condutores, que geram os indesejados efeitos de corona. Desta forma, a minimização do gradiente superficial e o aumento da potência natural são objetivos conflitantes. Este trabalho apresenta algumas configurações geométricas que têm uma relação otimizada entre parâmetros elétricos e os campos superficiais. Uma análise gráfica do processo de otimização multi-objetivo é apresentada. O trabalho permitiu identificar e compreender os compromissos estabelecidos na otimização de parâmetros elétricos de linhas de transmissão, tanto pelo viés de cálculos elétricos práticos de projeto quanto pelo viés do estudo dos algoritmos heurísticos de otimização.

Palavras-chave: Sistemas de potência, linhas de transmissão, parâmetros elétricos, efeitos de corona, otimização multi-objetivo, NSGAIL.

ABSTRACT

Overhead transmission lines are a fundamental part of an interconnected electrical power system. Lines with higher voltage levels such as 500 kV use multiple sub conductors per phase to attend required parameters and keep the surface voltage gradient of conductors within design limits. Conductor's geometry influences the surface gradient and the electrical parameters. This work studies the effects that phase and bundle geometry have on electrical parameters and surface gradients. A detailed investigation about the geometric guidelines for electrical optimization of transmission lines is presented. A multi-objective optimization method was implemented and identified compromises between the increase in surge impedance loading (SIL) and the surface gradient. Several geometric configurations which represent an optimal relationship between its electrical parameters and the surface electric fields are presented. A graphical analysis of the optimization process is presented in order to highlight the multi-objective nature of the problem and conflicts between such objectives. This work identifies the main compromises assumed when optimizing electrical parameters of transmission lines, not only by performing overhead line's classical design calculations but also by the study of multi-objective heuristic optimization algorithms.

Keywords: power systems, overhead transmission lines, electrical parameters, corona effects, multi-objective optimization, NSGAI.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 –	Silhueta LPNE PTE 500 kV Barreiras II – Luziânia	17
Figura 2 –	Foto LPNE Furnas trecho experimental 500 kV Angra – Adrianópolis	17
Figura 3 –	Geometria das fases LPNE Furnas trecho experimental 500 kV Angra – Adrianópolis	18
Figura 4 –	Foto LPNE VX CHESF 500 kV Presidente Dutra – Teresina	18
Figura 5 –	Geometria LPNE VX CHESF 500 kV Presidente Dutra – Teresina . .	18
Figura 6 –	Modelo de linha de transmissão com parâmetros distribuídos	28
Figura 7 –	Cálculo GMR e GMD de uma configuração qualquer de feixe e de fases	29
Figura 8 –	Torre 500kV com diferença de equalização do campo elétrico	33
Figura 9 –	Influência da equalização no ruído audível	33
Figura 10 –	Solução para feixe de quatro condutores	40
Figura 11 –	Código genético de uma solução	41
Figura 12 –	Mecanismo de recombinação genética	42
Figura 13 –	Fluxograma do algoritmo NSGAI	43
Figura 14 –	Silhueta torre monomastro cara-de-gato 500kV	46
Figura 15 –	Localização dos condutores e dos para-raios - torre cara-de-gato, feixe 95cm	47
Figura 16 –	Campo elétrico superficial nos condutores: cara-de-gato 95 cm	48
Figura 17 –	Localização dos condutores e dos para-raios - torre cara-de-gato, feixe 45cm	48
Figura 18 –	Distribuição campo elétrico superficial: torre cara de gato 45 cm	49
Figura 19 –	Silhueta Torre Cross Rope 500kV	50
Figura 20 –	Localização dos condutores e dos para-raios - Cross Rope - feixe 45.7 cm	51
Figura 21 –	Distribuição campo elétrico superficial: Cross Rope	52
Figura 22 –	Silhueta Torre VX 500kV	53
Figura 23 –	Localização dos condutores e dos para-raios - Torre VX - FEX assimétrico	54
Figura 24 –	Distribuição campo elétrico superficial: VX FEX assimétrico	54
Figura 25 –	Silhueta da configuração elétrica da torre raquete compacta 500kV . .	55
Figura 26 –	Geometria Torre Raquete Compacta 500kV - feixe 45.7cm	56
Figura 27 –	Distribuição campo elétrico superficial: Raquete Compacta	57
Figura 28 –	Silhueta cross-rope FEXCOM 500kV	58
Figura 29 –	Geometria condutores PTE Cross Rope 500kV	58
Figura 30 –	Distribuição campo elétrico superficial: PTE	59
Figura 31 –	Silhueta e geometria das fases - cross-rope FURNAS experimental . .	60
Figura 32 –	Geometria das fases trecho experimental em 500 kV de Furnas	61

Figura 33 –	Distribuição campo elétrico superficial: trecho experimental de Furnas	62
Figura 34 –	Compactação de fases LT 500kV - geometrias	63
Figura 35 –	Geometria LT 500kV tipo cara de gato - Expansão do feixe	64
Figura 36 –	Geometria LT 500kV tipo raquete compacta - Expansão do feixe . . .	64
Figura 37 –	Expansão do feixe - Potência natural	65
Figura 38 –	Expansão do feixe - Campo elétrico superficial	65
Figura 39 –	Expansão do feixe - efeito sobre perfil do campo elétrico superficial .	66
Figura 40 –	Expansão do feixe - efeito sobre a capacitância em derivação	67
Figura 41 –	Expansão do feixe - efeito sobre a reatância série	67
Figura 42 –	Expansão do feixe - efeito sobre dispersão do campo elétrico	68
Figura 43 –	Número de subcondutores: efeito sobre o raio médio geométrico . . .	69
Figura 44 –	Número de subcondutores: efeito sobre potência natural e impedân- cia característica	69
Figura 45 –	Número de subcondutores: efeito sobre a reatância e a capacitância .	70
Figura 46 –	Número de subcondutores: efeito sobre o campo elétrico superficial .	71
Figura 47 –	Circuito horizontal compacto - L1C1	72
Figura 48 –	Circuito horizontal compacto detalhe do feixe - L1C1	73
Figura 49 –	Campos superficiais configuração L1C1 - horizontal compacto	73
Figura 50 –	Circuito triangular - L1C1	74
Figura 51 –	Circuito triangular detalhe do feixe - L1C1	75
Figura 52 –	Campos superficiais configuração L1C1 - circuito triangular	75
Figura 53 –	Cara de gato 45 cm - minimização Z_c	79
Figura 54 –	Cara de gato 45 cm - minimização campo elétrico superficial	80
Figura 55 –	Cara de gato 45 cm - minimização da dispersão	80
Figura 56 –	Campo elétrico sup. otimizado para Z_c - ref. cara de gato 45 cm . . .	81
Figura 57 –	Campo elétrico sup. otimizado para E_{sup} - ref. cara de gato 45 cm . .	81
Figura 58 –	Campo elétrico sup. otimizado para dispersão - ref. cara de gato 45 cm	82
Figura 59 –	Cara de gato 95 cm - minimização Z_c	83
Figura 60 –	Cara de gato 95 cm - minimização campo elétrico superficial	83
Figura 61 –	Cara de gato 95 cm - minimização da dispersão	84
Figura 62 –	Campo elétrico sup. otimizado para Z_c - ref. cara de gato 95 cm . . .	84
Figura 63 –	Campo elétrico sup. otimizado para E_{sup} - ref. cara de gato 95 cm . .	85
Figura 64 –	Campo elétrico sup. otimizado para dispersão - ref. cara de gato 95 cm	85
Figura 65 –	Raquete compacta 45 cm - minimização Z_c	86
Figura 66 –	Raquete compacta 45 cm - minimização campo elétrico superficial . .	87
Figura 67 –	Raquete compacta 45 cm - minimização da dispersão	87
Figura 68 –	Campo elétrico sup. otimizado para Z_c - ref. raquete compacta 45 cm	88
Figura 69 –	Campo elétrico sup. otimizado para E_{sup} - ref. raquete compacta 45 cm	88
Figura 70 –	Campo elétrico sup. otimizado para dispersão - ref. raquete compacta 45 cm	89
Figura 71 –	Cross rope 45 cm - minimização Z_c	90
Figura 72 –	Cross rope 45 cm - minimização campo elétrico superficial	90
Figura 73 –	Cross rope 45 cm - minimização da dispersão	91
Figura 74 –	Campo elétrico sup. otimizado para Z_c - ref. cross rope 45 cm	91
Figura 75 –	Campo elétrico sup. otimizado para E_{sup} - ref. cross rope 45 cm . . .	92
Figura 76 –	Campo elétrico sup. otimizado para dispersão - ref. cross rope 45 cm	92
Figura 77 –	VX Chesf - minimização Z_c	93
Figura 78 –	VX Chesf - minimização campo elétrico superficial	94

Figura 79 – VX Chesf - minimização da dispersão	94
Figura 80 – Campo elétrico sup. otimizado para Z_c - ref. VX Chesf	95
Figura 81 – Campo elétrico sup. otimizado para E_{sup} - ref. VX Chesf	95
Figura 82 – Campo elétrico sup. otimizado para dispersão - ref. VX Chesf	96
Figura 83 – Projeto Paranaíba - minimização Z_c	97
Figura 84 – Projeto Paranaíba - minimização campo elétrico superficial	97
Figura 85 – Projeto Paranaíba - minimização da dispersão	98
Figura 86 – Campo elétrico sup. otimizado para Z_c - ref. Projeto Paranaíba	98
Figura 87 – Campo elétrico sup. otimizado para E_{sup} - ref. Projeto Paranaíba	99
Figura 88 – Campo elétrico sup. otimizado para dispersão - ref. Projeto Paranaíba	99
Figura 89 – P&D Furnas - minimização Z_c	101
Figura 90 – P&D Furnas - minimização campo elétrico superficial	101
Figura 91 – P&D Furnas - minimização da dispersão	102
Figura 92 – Campo elétrico sup. otimizado para Z_c - ref. P&D Furnas	102
Figura 93 – Campo elétrico sup. otimizado para E_{sup} - ref. P&D Furnas	103
Figura 94 – Campo elétrico sup. otimizado para dispersão - ref. P&D Furnas	103
Figura 95 – Soluções no espaço dos objetivos: Geração 1	107
Figura 96 – Soluções no espaço dos objetivos: Geração 8	107
Figura 97 – Soluções no espaço dos objetivos: Geração 10	108
Figura 98 – Soluções no espaço dos objetivos: Geração 25	108
Figura 99 – Fronteira da geração 250	109
Figura 100 – Soluções no espaço dos objetivos: Z_c versus Méd. Campo Sup. - Ger: 1 e 250	110
Figura 101 – Espaço dos objetivos: Méd. C.Elétrico Sup. versus Dispersão - Ger: 1 e 250	110
Figura 102 – Espaço dos objetivos: Dispersão versus Z_C - Ger: 1 e 250	111
Figura 103 – <i>Crowding distances</i> da população e suas dispersões	112
Figura 104 – Influencia dos parâmetros sobre renovação da fronteira	113
Figura 105 – Influência do tamanho da população na fronteira	114
Figura 106 – Compromisso entre soluções da fronteira	115
Figura 107 – Percentual de soluções dominantes nas gerações	116
Figura 108 – Percentual de soluções dominadas pela referência	116

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Exemplo de valores de potência natural em de LTs 500 kV	16
Tabela 2 –	Efeito da compactação de fases em LT 500kV	63
Tabela 3 –	Efeito do número de subcondutores.	71
Tabela 4 –	Comparação: efeito da assimetria do feixe em circuito horizontal compacto	76
Tabela 5 –	Comparação: efeito da assimetria do feixe em circuito triangular . . .	76
Tabela 6 –	Comparação geometrias otimizadas - referência cara de gato 45 cm .	79
Tabela 7 –	Comparação geometrias otimizadas - referência cara de gato 95 cm .	82
Tabela 8 –	Comparação geometrias otimizadas - referência raquete compacta 45 cm	86
Tabela 9 –	Comparação geometrias otimizadas - referência cross rope 45 cm . .	89
Tabela 10 –	Comparação geometrias otimizadas - referência VX Chesf	93
Tabela 11 –	Comparação geometrias otimizadas - referência Projeto Paranaíba . .	96
Tabela 12 –	Comparação geometrias otimizadas - referência P&D Furnas	100

LISTA DE ABREVIATURAS

ACSR	<i>Aluminium Conductor Steel Reinforced</i> , condutor de alumínio com alma de aço
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CAA	Cabo de alumínio com alma de aço
CC	Corrente contínua
CEPEL	Centro de Pesquisas do Grupo Eletrobrás
LT	Linha de transmissão
LPNE	Linha de transmissão com potência natural elevada
GMD	<i>Geometric Mean Radius</i> , Distância média geométrica
GMR	<i>Geometric Mean Distance</i> , Raio médio geométric
MIS	Método das Imagens Sucessivas
ONS	Operador Nacional do Sistema
RA	Ruído audível
RI	Rádio interferência
SIL	<i>Surge Impedance Loading</i> , termo em inglês para potência natural
SIN	Sistema Interligado Nacional
HVDC	<i>High Voltage Direct Current</i> , Alta tensão e corrente contínua (Linhas de transmissão em corrente contínua)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Linhas de transmissão sob perspectiva da engenharia elétrica	15
1.2	Linhas com potência natural elevada	15
1.3	Linhas com potência natural elevada no sistema interligado nacional brasileiro	16
1.4	Fatores e aspectos para otimização de projetos de LTs	19
1.5	Objetivo e limitações	20
2	FUNDAMENTOS DE PROJETOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO	22
2.1	Projeto civil e estrutural	22
2.2	Projeto eletromecânico	23
2.3	Projeto elétrico	24
2.3.1	Parâmetros elétricos	24
2.3.2	Efeitos de corona	25
2.3.3	Coordenação do isolamento	25
2.4	Otimização do projeto elétrico de linhas de transmissão	26
3	CÁLCULO DE PARÂMETROS ELÉTRICOS	27
3.1	Modelo de circuito Linha de Transmissão	28
3.2	Raio médio geométrico e distância média geométrica	29
3.3	Indutância série	29
3.4	Capacitância	30
3.5	Impedância característica	30
3.6	Potência natural	31
3.7	Cálculo do campo elétrico superficial: Método das imagens sucessivas	31
3.8	Equalização do campo elétrico superficial	32
4	FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO	34
4.1	Funções objetivo	34
4.2	Características gerais do modelo	35
4.2.1	Simetria da geometria com relação ao eixo vertical	36
4.2.2	Distâncias mínimas entre subcondutores	36
4.2.3	Tipo de condutor, afastamento mínimo cabo-solo e flecha	36
4.2.4	Posição do cabo para-raios	37
4.3	Otimização multi-objetivo com NSGAII	38
4.3.1	Conceitos fundamentais	38
4.3.2	Codificação	40

4.3.3	Operadores do algoritmo genético	41
4.3.4	Esquema geral da otimização com NSGA II	42
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
5.1	Parâmetros elétricos de configurações típicas	45
5.1.1	Torre estaiada monomastro cara-de-gato 500kV - FEX 95cm	46
5.1.2	Torre estaiada monomastro cara-de-gato 500kV - Feixe 45,7 cm	47
5.1.3	Torre estaiada compacta tipo cross Rope 500kV	49
5.1.4	Torre VX 500kV - Feixe expandido assimétrico	52
5.1.5	Torre autoportante tipo raquete compacta 500kV	55
5.1.6	Projeto Paranaíba - Cross Rope FEXCOM	57
5.1.7	Cross-rope experimental FURNAS	60
5.2	Diretrizes de otimização	62
5.2.1	Compactação das fases	62
5.2.2	Expansão do feixe	63
5.2.3	Número de subcondutores	68
5.2.4	Assimetria da geometria do feixe	72
5.2.5	Discussão sobre ações de otimização	77
5.3	Geometrias obtidas do processo de otimização e comparação com LTs típicas	78
5.3.1	Comparação: cara-de-gato 45 cm	78
5.3.2	Comparação: Cara de gato 95 cm	81
5.3.3	Comparação: Raquete compacta	86
5.3.4	Comparação: Cross Rope Eletronorte	89
5.3.5	Comparação: VX CHESF	93
5.3.6	Comparação: Cross-rope PTE	96
5.3.7	Comparação: Cross-rope experimental Furnas	100
5.3.8	Discussão a respeito das geometrias fornecidas pelo método de otimização	104
5.4	Desempenho do NSGAI	106
5.4.1	Representação das soluções no espaço dos objetivos	106
5.4.2	Evolução da <i>crowding distance</i> ao longo da evolução	111
5.4.3	Influência dos parâmetros e seletividade do método.	112
5.4.4	Compromisso das soluções de fronteira	114
5.4.5	Avaliação das relações de dominância para soluções de referência	115
6	CONCLUSÕES	117
6.1	Trabalhos futuros	118
	REFERÊNCIAS	121
	APÊNDICE A	124
A.1	Fundamentos sobre campo elétrico na superfície dos condutores	124
A.2	Fundamentos do método das imagens sucessivas	125
A.3	Implementação computacional: método das imagens sucessivas	128
A.3.1	Script com sequência de funções	128
A.3.2	Inserção de dados e resultados fornecidos	129
A.3.3	Auto-avaliação dos resultados	133
A.3.4	Validação de resultados	136
A.3.5	Número de imagens no algoritmo de otimização	138

APÊNDICE B	139
B.1 Análise de geometria de feixe assimétrico	139
B.1.1 Geometrias de feixe central consideradas	139
B.1.2 Geometrias de feixe lateral consideradas	141
B.1.3 Geometria horizontal compacta	144
B.1.4 Geometria triangular	154
APÊNDICE C	167
C.1 Conceitos elementares de linhas aéreas de transmissão	167
APÊNDICE D	170
D.1 Implementação computacional NSGAI	170
D.1.1 Geração da população inicial - <i>geraPop</i>	170
D.1.2 Avaliação dos indivíduos - <i>evalElement</i>	170
D.1.3 Classificação das soluções dentro da população - <i>buildFront</i> e <i>buildCDS</i>	170
D.1.4 Seleção, recombinação e mutação - <i>selectParent</i> , <i>crossGen</i> e <i>mutatePop</i>	171
D.1.5 Registro histórico	172

1 INTRODUÇÃO

Linhas de transmissão (LTs) são componentes fundamentais de qualquer sistema de potência interligado. Elas transportam grandes quantidades de energia entre subestações, onde a tensão é elevada, para o transporte em longas distâncias, ou é reduzida, para distribuição junto ao sistema de consumo.

No sistema elétrico brasileiro, são utilizadas LTs em corrente alternada (CA) e em corrente contínua (CC). As LTs em CA operam em diversos níveis de tensão: 69, 138, 230, 345, 440, 500, e 750 kV¹. O sistema elétrico brasileiro também conta com LTs em CC contínua (*high-voltage, direct current*, HVDC) em ± 600 e ± 800 kV (ONS, 2020).

As LTs que operam em tensões superiores a 230 kV utilizam feixes condutores, isto é, múltiplos condutores por fase, sendo estes denominados subcondutores. Isso ocorre por diversos motivos, entre os quais estão: (i) atingir uma determinada capacidade de transmissão de corrente, (ii) manter o campo elétrico na superfície dos condutores abaixo de um determinado valor (mitigando assim os efeitos de corona) e (iii) aumentar o limite de estabilidade estático da linha (KIESSLING *et al.*, 2003). Algumas LTs em 138 kV e 230 kV também utilizam múltiplos condutores por fase. Em 138 kV o uso de múltiplos condutores ocorre quando é necessário uma grande capacidade de corrente. Em 230 kV, o uso de feixes condutores pode ser necessário pela capacidade de corrente e também pelo aumento do limite de estabilidade estático da linha. Linhas em 345 kV utilizam geralmente feixes com dois ou três subcondutores por fase. Linhas em 500 kV utilizam feixes com três, quatro ou seis subcondutores por fase. Os subcondutores de um feixe estão dispostos geralmente em polígonos regulares, ou seja, triângulo equilátero, quadrado e assim por diante. Quando os subcondutores estão dispostos em polígonos regulares, diz-se que o feixe de condutores tem uma geometria convencional.

No sistema elétrico, o comportamento em regime permanente de uma LT é modelado através de circuitos equivalentes de sequência positiva e zero². Estes circuitos são constituídos por uma impedância série e uma admitância em derivação. Os parâmetros do circuito dependem do tipo de condutor, da disposição geométrica das fases e dos feixes de condutores.

¹O Manual de Controle Patrimonial do Setor Elétrico (MCPSE) (ANEEL, 2015) usa o termo “linha de transmissão” apenas para níveis de tensão iguais ou superiores a 230 kV, pois tais linhas fazem parte da “Rede Básica” que forma o Sistema Interligado Nacional (SIN) e são operadas pelo Operador Nacional do Sistema (ONS). As linhas com tensões inferiores são operadas por concessionárias de distribuição e, portanto, são classificadas como “linhas de distribuição” ou “subtransmissão”. No jargão comum da indústria do setor elétrico, o termo “linha de transmissão” é utilizado indistintamente para níveis de tensão iguais ou superiores a 69 kV.

²Os parâmetros de sequência zero são utilizados nas avaliações de faltas. O termo “regime permanente” é utilizado aqui inclusive para análise de perturbações em regime permanente, isto é, após a ocorrência dos transitórios eletromagnéticos.

Durante sua operação, uma LT pode consumir ou fornecer potência reativa ao sistema. Isso depende de suas características geométricas e dos níveis de tensão e corrente que a LT opera. O planejamento e a operação de um sistema elétrico interligado estabelece e utiliza esses parâmetros para planejar o sistema com o mínimo custo global e operá-lo de forma segura.

Do ponto de vista ambiental, uma LT é uma construção civil que impacta a vizinhança ao longo de seu traçado. A faixa de servidão³ de uma linha impõe restrições às atividades que podem ser realizadas em seu interior. Uma linha também causa impactos ambientais como ruído audível (RA), rádio interferência (RI) e campos eletromagnéticos, que devem obedecer aos limites normativos e legais. Tais impactos dependem de diversos fatores como por exemplo nível de tensão, corrente e disposição geométrica de fases e do feixe (KIESSLING *et al.*, 2003).

1.1 Linhas de transmissão sob perspectiva da engenharia elétrica

Muitos temas da Engenharia Elétrica estão relacionados a linhas de transmissão, sendo que a maioria deles se inter-relaciona. Após a avaliação de planejamento que determina um nível de tensão, o tema principal e mais abrangente relacionado a uma LT é sua capacidade de transmissão. Este trabalho foca nas linhas de tensão alternada. Muitos parâmetros constam no equacionamento da capacidade de transmissão. Entre eles, pode-se citar: perdas, isolamento para condições em regime e transitórias, aterramento, proteção e estabilidade, campos eletromagnéticos e seus efeitos.

Uma linha de transmissão tem diferentes limitantes de capacidade de transmissão. Estes são: (i) a capacidade térmica e (ii) o limite de estabilidade estático (SAADAT, 1999). A capacidade térmica diz respeito à quantidade de corrente máxima que a LT pode transportar sem que a temperatura máxima de operação dos condutores seja superada. A capacidade térmica depende das condições ambientais e dos limites operacionais sem dano do tipo de condutor utilizado.

O limite de estabilidade estático é a quantidade máxima de potência que uma LT pode transportar sem exceder a diferença angular dos fasores de tensão entre as subestações adjacentes. Esse limite depende essencialmente da reatância série da linha e será tão maior quanto menor for a sua reatância série. Assim, o limite de estabilidade estático é aumentado através da atuação sobre a parcela indutiva da reatância, o que se faz modificando a geometria das fases e do feixe de condutores ou instalando capacitores em série (compensação série) (KIESSLING *et al.*, 2003).

1.2 Linhas com potência natural elevada

A potência natural é uma característica da linha que relaciona a tensão e a corrente de operação da linha para qual esta não consome nem fornece potência reativa ao sistema. Em outras palavras, quando uma LT alimenta uma carga puramente resistiva com valor igual à sua potência natural, a linha não gera nem consome reativos do sistema. Quando a linha opera nessa condição, diz-se que a LT está sintonizada.

³Área de terreno por onde a linha passa em que existem restrições normativas e legais sobre sua utilização para atender requisitos de segurança e manutenção. A faixa de servidão não é necessariamente propriedade da empresa dona da linha. Ela é registrada em cartório após um decreto de utilidade pública emitido pela autoridade competente à concessionária de transmissão.

A potência natural típica de uma LT em 500 kV⁴ é um valor que corresponde geralmente a aproximadamente 30% de sua capacidade térmica de transmissão. Isto significa que, para aproveitamento pleno de sua capacidade térmica, é necessária compensação de reativos. Conforme a distância de transmissão aumenta, a compensação de reativos encarece e a capacidade de transmissão fica limitada.

O termo “linha com potência natural elevada” (LPNE) é utilizado no jargão do setor elétrico. Em inglês, o termo para LPNE é *High Surge Impedance Loading (HSIL) lines*. Ghassemi (2019) define LPNEs como linhas “auto-compensadas” de reativos. Acosta e Tavaves (2017) definem LPNEs como linhas que têm capacidade de transmissão elevada. Ambas as definições não são suficientemente inequívocas. De qualquer forma, esse termo sempre é usado para linhas cujo projeto eletromecânico do feixe de condutores e das geometrias de fases visa aumentar a sua potência natural e reduzir sua reatância série, aproximando-a o máximo possível do seu limite térmico.

1.3 Linhas com potência natural elevada no sistema interligado nacional brasileiro

LPNEs são empregadas em uma parte considerável do sistema interligado brasileiro, conforme apresentado por (RÉGIS; DART; CRUZ, 2009). Para elevar a potência natural de uma LT, pode-se aproximar as fases e/ou expandir os feixes de subcondutores, utilizando geometrias não convencionais. A Tabela 1 apresenta valores de potência natural de uma LT 500 kV convencional em comparação com LTs cuja geometria do feixe ou de fases foi modificada para elevar sua potência natural (RÉGIS; DART; CRUZ, 2009). A seguir, são apresentados alguns exemplos de LPNEs que utilizam geometrias não convencionais de fase e de feixe.

Tabela 1 – Exemplo de valores de potência natural em de LTs 500 kV

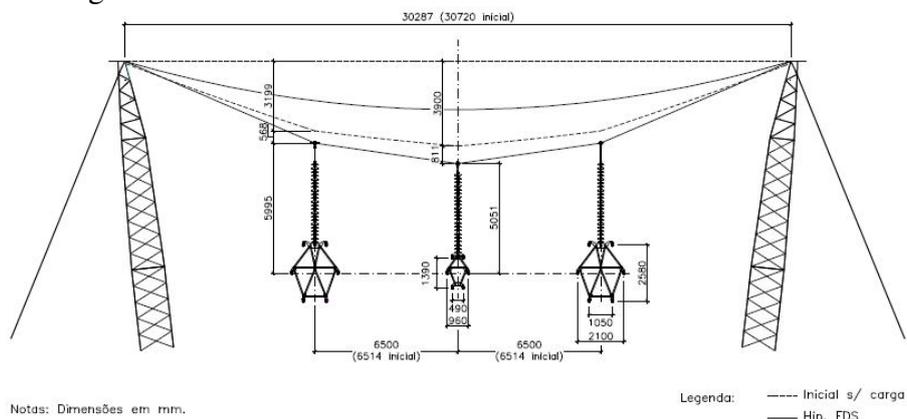
Tipo de torre	Disposição de fases	Feixe	Potência natural natural (MW)
Cara-de-gato (convencional)	Triângulo	Quadrado 45 cm	1030
Cara-de-gato (LPNE)	Triângulo	Quadrado 115 cm	1250
Raquete (LPNE)	Triângulo compacto	Quadrado 45 cm	1190

Silva e Hiruma (2017) apresentam o projeto da LT 500 kV Barreiras II – Luziânia, projeto da Paranaíba Transmissora de Energia (PTE). A Figura 1 apresenta a silhueta da cabeça de torre⁵ da LT. Ela utiliza seis condutores de alumínio com alma de aço (ACSR - *Aluminium Conductor Steel Reinforced*) Tern (795,0 MCM, formação 45/7) por fase. Os subcondutores estão dispostos em forma elíptica, com feixe central mais compacto que os feixes laterais. A potência natural dessa LT é 1670 MW. Os cabos de proteção (cabos para-raios) estão posicionados nas pontas dos mastros.

⁴LT em 500 kV com quatro subcondutores tipo ACSR por fase com diâmetro de aproximadamente 30 mm e espaçamento de subcondutores de 457 mm e distância média geométrica entre fases de 12 metros.

⁵Parte da estrutura de uma torre de transmissão onde os cabos condutores, para raios e cadeias de isoladores estão fixados. Conceitos fundamentais elementares de torres de LTs estão apresentados no apêndice C.1.

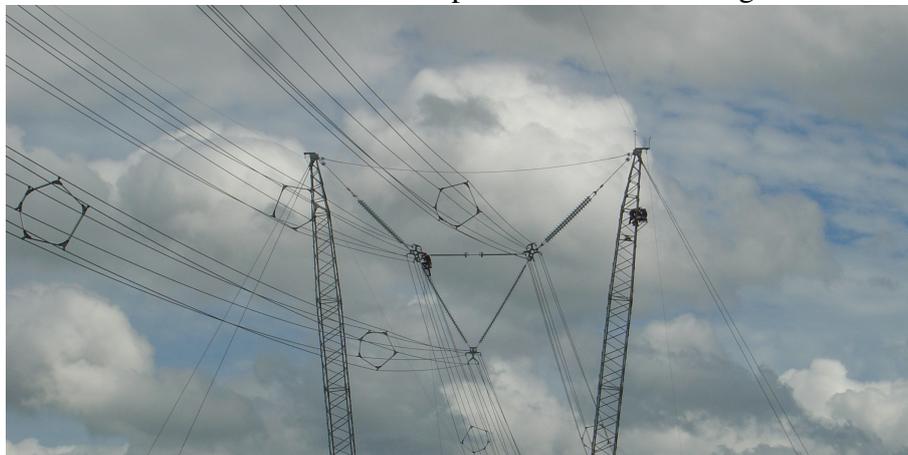
Figura 1 – Silhueta LPNE PTE 500 kV Barreiras II – Luziânia



Fonte: adaptado de (SILVA; HIRUMA, 2017)

Esmeraldo *et al.* (1999) apresentam o projeto de um trecho experimental da LT 500 kV Angra – Adrianópolis de Furnas. Essa configuração utiliza seis condutores ACSR Rail (954,0 MCM, formação 45/7) por fase e tem uma potência natural de 1800 MW. As Figuras 2 e 3 mostram a foto e as geometrias dos feixes. Esse projeto de pesquisa e desenvolvimento foi desenvolvido pelo Centro de Pesquisas do Grupo Eletrobrás (CEPEL) teve como objetivo estudar em escala real o comportamento eletromecânico de uma LPNE otimizada.

Figura 2 – Foto LPNE Furnas trecho experimental 500 kV Angra – Adrianópolis

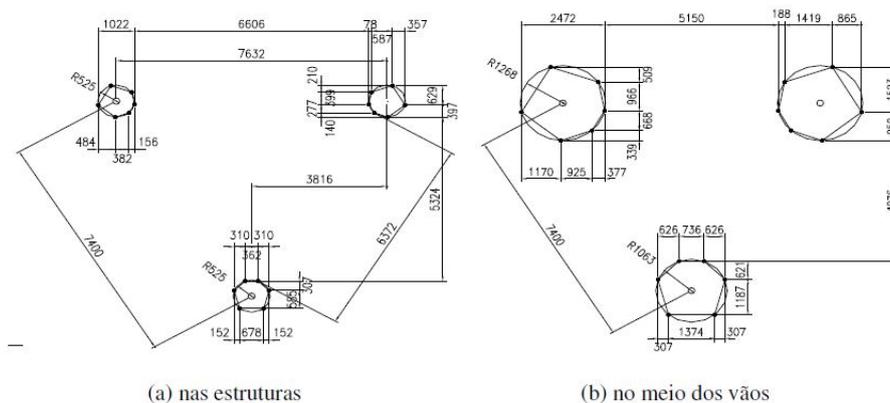


Fonte: arquivo pessoal do autor

Régis *et al.* (2009) apresentam diferentes concepções de LPNEs. A LT 500 kV Presidente Dutra – Teresina está apresentada nas Figuras 4 e 5. Esta LT utiliza quatro subcondutores ACSR Rail (954,0 MCM, formação 45/7) por fase e tem uma potência natural de 1175 MW. A geometria de fases não é compacta, contudo esta LT utiliza uma geometria de feixe não convencional com o feixe central retangular e os feixes laterais formando um trapézio. Isso aumenta o raio médio geométrico do feixe e, conseqüentemente, aumenta a potência natural.

Cabe mencionar que, apesar das geometrias possuírem feixes e geometrias de fases diferentes, o circuito trifásico não fica desequilibrado, pois se assume que as linhas longas são transpostas. Isto significa que a posição de cada uma das fases é trocada ao longo de seu trajeto para equilibrar os efeitos das diferentes geometrias.

Figura 3 – Geometria das fases LPNE Furnas trecho experimental 500 kV Angra – Adri-anópolis



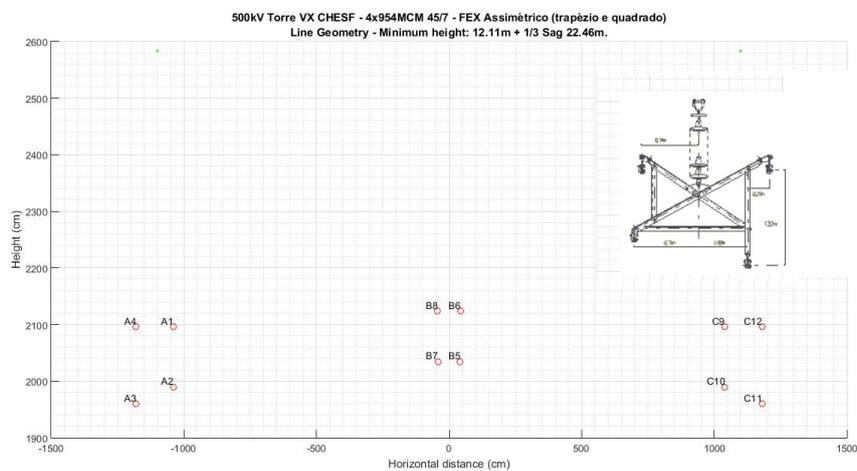
Fonte: (AMON *et al.*, 2009)

Figura 4 – Foto LPNE VX CHESF 500 kV Presidente Dutra – Teresina



Fonte: (RÉGIS; DART; CRUZ, 2009)

Figura 5 – Geometria LPNE VX CHESF 500 kV Presidente Dutra – Teresina



Fonte: adaptado de (RÉGIS; DART; CRUZ, 2009)

1.4 Fatores e aspectos para otimização de projetos de LTs

Linhas de transmissão aéreas possuem diversos aspectos que podem ser otimizados durante o projeto. Há aspectos que visam melhorar o desempenho elétrico, facilitar rotinas de manutenção, minimizar custos construtivos pela concepção estrutural das torres e de suas fundações. Dessa forma, o projeto de uma LT pode ser otimizado em diversas frentes.

Do ponto de vista de desempenho elétrico, é desejável aumentar a potência natural, pela redução da reatância série. Porém deve-se atender às restrições dos limites dos efeitos de corona e de campos eletromagnéticos, bem como manter distâncias elétricas para o isolamento da linha nas diferentes condições de operação e manutenção em linha viva.

Em nível de pesquisa e desenvolvimento, o CEPTEL desenvolveu ferramentas computacionais utilizadas para a concepção elétrica ótima de um trecho experimental de LT (ESMERALDO *et al.*, 1999). Nesse caso, o trecho experimental teve sua potência natural maximizada e a sua distribuição dos campos elétricos superficiais equalizada.

Portela (1997) apresenta um programa computacional para otimizar parâmetros elétricos a partir de uma geometria básica, levando em conta os campos elétricos críticos para inceptção da corona visual e maximizar a potência natural. O trabalho apresenta diversas geometrias interessantes, inclusive algumas que serviram de inspiração para casos práticos de recapacitação de linhas do sistema interligado nacional.

Em nível acadêmico, Acosta e Tavares (2020) apresentam a otimização da seleção e posicionamento dos condutores em linhas com múltiplos circuitos. O objetivo é maximizar a potência natural e minimizar os custos, faixa de servidão e altura das torres. O trabalho concatenou os quatro objetivos em uma função apenas e utilizou algoritmos genéticos no processo de otimização. Este trabalho é a continuação dos seus trabalhos anteriores (ACOSTA; TAVARES, 2018), nos quais são analisados parâmetros elétricos e custos associados a diversos níveis de tensão, tipo e número de subcondutores e geometrias de feixe e de fases. Ambos os artigos possuem muitas informações, desde metodologias básicas para cálculo de parâmetros como também considerações sobre custos associados a materiais e construção. O trabalho dos autores propõe geometrias, número e tipo de condutores otimizados para cada nível de tensão. A otimização apresentada em Acosta e Tavares (2018) consiste em maximizar a razão entre a potência natural e o somatório dos custos associados.

Um estudo experimental para mitigação do ruído audível (RA) produzido por LTs e o efeito da mitigação sobre os parâmetros elétricos é apresentado no trabalho de Pischler *et al.* (2017). Este trabalho aplica modelagem por elementos finitos para determinar o efeito do espaçamento do feixe sobre o campo elétrico superficial dos condutores e a sua influência sobre a indutância e capacitância de uma linha. Baseado em resultados de suas simulações e em indicações de suas referências, os autores fizeram ensaios de medição de RA para diferentes diâmetros de condutores e espaçamento de feixe. Pischler *et al.* (2017) mostraram que, para reduzir o RA, reduz-se também a potência natural. Isso evidencia o conflito existente entre estes dois objetivos e, portanto, a necessidade de estabelecer um compromisso entre mitigação do RA e aumento da potência natural.

Park *et al.* (1991) propõem geometrias de feixe de fases para mitigação do RA produzido por LTs. Este trabalho utiliza o método de simulação de cargas aplicado a um processo de otimização com programação não-linear para minimizar o campo elétrico superficial dos subcondutores do feixe inferior de uma linha de circuito duplo em 765 kV e feixe sextuplo com circuitos verticais. Este trabalho fez medições de RA em laboratório, comprovando que a geometria proposta para o feixe inferior resulta em uma redução dos níveis de RA. A geometria proposta consiste em aproximar os subcondutores inferiores e

compactar o feixe inferior de forma a reduzir o campo elétrico superficial. O trabalho não analisou os efeitos dessas modificações sobre os parâmetros elétricos de indutância série nem capacitância em derivação.

A minimização dos custos globais construtivos de LTs é apresentada em Peyrot *et al.* (1993). O artigo descreve as ferramentas computacionais baseadas em programação dinâmica para otimização de locação de estruturas, considerando custos materiais e custos construtivos de obra. Nesse trabalho, é apresentada a relação entre a otimização de uma série de estruturas e sua locação no traçado da LT, a fim de diminuir os custos totais de construção e respeitar as distâncias de segurança cabo-solo e os limites mecânicos de estruturas e condutores. O método apresentado por Peyrot *et al.* (1993) é empregado atualmente em ferramentas de software para projeto de linhas de transmissão.

O projeto de uma série de estruturas⁶ para uma LT é por si só uma medida de otimização de projeto. A série deve atender aos requisitos eletromecânicos e civis para um tipo de condutor em uma região com o menor custo global possível. A integração entre o projeto de estruturas e o projeto das fundações também deve ser considerada.

Além do escopo técnico de engenharia, existem questões ambientais, fundiárias e comerciais que afetam custos. Tais questões devem ser consideradas na otimização global do empreendimento. Atrasos devidos a licenciamento ambiental, negociação fundiária e logística são fatores estratégicos que muitas vezes levam a escolhas que não são ótimas tecnicamente, mas que reduzem tempo de obra, viabilizando empreendimentos.

1.5 Objetivo e limitações

O objetivo desse trabalho é estudar a otimização de parâmetros elétricos de linhas de transmissão através da modificação das geometrias dos feixes e das fases. São estudados e avaliados os efeitos das modificações sobre a potência natural e os campos elétricos na superfície dos condutores. Para isso o trabalho divide-se em duas etapas principais, descrita a seguir.

A primeira etapa consiste em desenvolver e implementar uma ferramenta computacional que calcule os parâmetros elétricos de qualquer LT com múltiplos subcondutores por fase, independentemente da configuração de fases e do feixe. O principal desafio da implementação é desenvolver e validar um programa que faça o cálculo do perfil do campo elétrico na superfície de cada subcondutor individualmente.

A segunda etapa consiste em aplicar um método de otimização multi-objetivo para obter configurações geométricas ótimas que atendam ao conjunto de restrições dos parâmetros elétricos escolhidos para a LT. O método de otimização desenvolvido tem três objetivos: (i) maximizar a potência natural através da minimização da impedância característica da LT, (ii) minimizar a média dos campos elétricos superficiais máximos dos condutores e (iii) equalizar os valores de campos elétricos máximos. O desenvolvimento da primeira etapa é a base que possibilita o cálculo das funções objetivo no método de otimização da segunda etapa. O método de otimização implementado é o NSGA II (*Non-dominated sorting genetic algorithm*) (DEB *et al.*, 2000), que é um método heurístico evolutivo de fácil implementação especialmente desenvolvido para lidar com problemas multi-objetivo.

Este trabalho contribui com uma análise da sensibilidade dos fatores geométricos para

⁶Conjunto de estruturas com diferentes alturas e funções na linha. Uma série de estrutura pode contemplar torres de suspensão (leve e pesada), ancoragem em ângulo (com diferentes ângulos), ancoragem terminal, transposição de fases.

desempenho elétrico de uma linha de transmissão, apresentando análises sobre estudos de casos reais. Tais análises proporcionam uma visão qualitativa e quantitativa dos efeitos que a geometria de uma linha tem sobre o desempenho elétrico de uma linha, facilitando decisões prévias a respeito das diretrizes de projeto de LTs.

Este trabalho apresenta análises sobre o método de otimização implementado que possibilitam visualizar a natureza das relações entre as variáveis desde o ponto de vista de otimização matemática. Ainda que haja outros métodos que possam ser aplicados, o trabalho se restringe a avaliar o desempenho deste apenas no problema formulado, mantendo o foco na análise do problema e não nos possíveis resultados que outros métodos poderiam fornecer.

As configurações geométricas resultantes não são necessariamente viáveis do ponto de vista prático. Elas buscam apenas orientar as diretrizes possíveis de otimização elétrica. A otimização global da configuração geométrica das fases e do feixe depende também de outros fatores, tais como estabilidade mecânica, aspectos comerciais, logísticos, etc., todos fora do escopo desse trabalho. Desta forma, este trabalho contribui com uma análise da sensibilidade dos fatores geométricos para desempenho elétrico de uma linha de transmissão, apresentando análises sobre estudos de casos reais de linhas existentes.

2 FUNDAMENTOS DE PROJETOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

O projeto e construção de uma LT é multidisciplinar, abrangendo aspectos elétricos, estruturais, mecânicos, geotécnicos, ambientais e econômicos. Um bom projeto deve atender a requisitos técnicos como parâmetros elétricos e confiabilidade de operação, entre outros, conforme planejamento econômico das concessionárias e dos operadores do sistema (KIESSLING *et al.*, 2003).

A confiabilidade de uma linha de transmissão está relacionada às condições de operação que ela deve atender. O projeto de locação das estruturas determina em quais pontos estas devem ser instaladas para atender requisitos ambientais, distâncias elétricas e capacidade eletromecânica. Assim, o projeto de uma LT envolve tomadas de decisões diversos agentes técnicos, econômicos e políticos (PAPAILIOU, 2016).

O objetivo desse capítulo é apresentar uma visão geral dos principais aspectos práticos de um projeto de linha de transmissão, apresentando brevemente como estes pontos se relacionam e tornam o projeto de uma linha uma atividade multidisciplinar. Esta seção assume que o leitor já possui alguma familiaridade com o jargão técnico de linhas de transmissão. Para uma introdução aos conceitos fundamentais elementares de linhas aéreas de transmissão recomenda-se a leitura do Apêndice C.1.

2.1 Projeto civil e estrutural

Em suma, o projeto civil e estrutural de uma linha está relacionado ao projeto dos tipos de estruturas e fundações que serão utilizados em um determinado traçado para suportar os condutores e cabos de proteção. Existem dois tipos básicos de estruturas: ancoragem e suspensão. Torres tipo suspensão são estruturas projetadas para carregamentos compatíveis com a finalidade principal de suspender os cabos. Além dessa finalidade, essas estruturas devem suportar a ação do vento nelas próprias e nos cabos, principalmente quando o vento age transversalmente a elas e também devem suportar a eventuais cargas longitudinais em situações de contingência (BURIN, 2010). Dessa forma, torres de suspensão são colocadas geralmente no alinhamento do eixo da linha ou com ângulos pequenos.

Torres de ancoragem são aquelas projetadas para suportar carregamentos compatíveis com a finalidade principal de ancorar os cabos. Sendo assim, têm uma resistência maior a esforços longitudinais quando comparadas às estruturas de suspensão (BURIN, 2010). Torres de ancoragem estão presentes nos vértices do traçado de uma linha. Estruturas de ancoragem têm pesos maiores que estruturas de suspensão¹ e também têm fundações

¹Para dizer que uma estrutura de ancoragem pesa mais que uma estrutura de suspensão em uma linha,

maiores, que implicam custos de materiais e serviços mais elevados.

Tendo em vista que o traçado de uma linha tem implicações diretas sobre o número, alturas e tipos de estruturas, que são empregadas no projeto, conclui-se que há forte interdisciplinariedade entre projeto civil de fundações, projeto e concepção dos tipos de estrutura e aspectos logísticos, ambientais e fundiários. Portanto, a concepção e projeto dos tipos de estruturas, a locação destas no traçado e a própria diretriz de traçado escolhida representam variáveis para minimizar custos com materiais e serviços.

2.2 Projeto eletromecânico

O projeto eletromecânico abrange cálculos mecânicos e geometrias de estruturas, condutores, cadeias, etc. A escolha do tipo, bitola e número de condutores por fase tem influência significativa sobre a capacidade de transmissão de uma linha. No modelo atual do sistema elétrico nacional, o tipo de condutor para um empreendimento de transmissão é determinado a partir de um valor de referência para a resistência máxima especificada no edital de concessão (ANEEL, 2020).

Há diversos tipos de condutores para linhas de transmissão. Entre os principais tipos estão o cabo de alumínio com alma de aço (CAA), cabo de alumínio (CA), cabo de alumínio liga (CAL), cabo de alumínio com alma de alumínio liga (ACAR, *Aluminium conductor alloy reinforced*). Cada tipo de material do cabo condutor tem propriedades eletromecânicas distintas. O alumínio é o material condutor, porém tem resistência mecânica menor que o aço. O aço é utilizado nos condutores para conferir resistência mecânica aos cabos, mas, se comparado ao alumínio, tem pouca contribuição para condução de corrente. As ligas de alumínio (usualmente liga 1120 ou 6201) têm propriedades mecânicas melhores que do alumínio, porém têm resistividade maior (KIESSLING *et al.*, 2003; NE-XANS, 2009).

Cada tipo de condutor possui entre outras características, peso linear, diâmetro nominal, encordoamento, resistência elétrica, módulo de elasticidade e carga mecânica de ruptura. Portanto, a escolha do tipo de condutor tem implicações diretas sobre as cargas mecânicas que as estruturas devem suportar devido ao seu peso, às cargas transversais devido ao vento, à regulagem sua de tracionamento, etc. (PAPAILIOU, 2016). Além disso, as relações entre peso linear, diâmetro do condutor e as dimensões dos vãos adjacentes estão relacionada ao ângulo que uma cadeia de suspensão pode se aproximar da estrutura sob ação do vento, influenciando portanto o desempenho do isolamento da linha. Verifica-se, portanto, que o tipo de condutor tem influência direta sobre a escolha dos tipos e projeto de estruturas e fundações. A regulagem de tracionamento dos cabos, a topografia do terreno e a altura das estruturas no ponto de engate com a estrutura determinam a posição do cabo ao longo do vão. O condutor deve manter afastamentos mínimos de segurança entre obstáculos tais como, por exemplo, rodovias, lugares acessíveis somente para pedestres, outras linhas de transmissão, etc. (ABNT, 1985).

Por outro lado, a regulagem dos condutores deve também levar em conta o fenômeno da vibração eólica nos condutores, que pode causar deterioração das propriedades mecânicas ao longo da vida útil, como por exemplo, rompimento de tentos e formação de pontos quentes. Por essa razão, um aspecto mecânico importante a ser considerado no

deve-se considerar estruturas projetadas para o mesmo condutor, mesma altura útil e mesmos critérios de projeto. Ainda assim, o peso final de cada tipo de estrutura é consequência de especificações de projeto. Portanto, a afirmação sobre a comparação dos pesos é feita de forma genérica apenas a título informativo para o leitor leigo se familiarizar com os aspectos de projeto de linhas.

projeto é o sistema de amortecimento dos condutores (B2.11.04, 2005).

Observa-se, de um modo geral, que o projeto eletromecânico de uma linha está intimamente relacionado ao seu projeto civil e elétrico. O projeto das estruturas deve atender às distâncias elétricas na cabeça da torre, estabelecidas pela coordenação do isolamento. O projeto de uma série de estruturas deve atender requisitos mínimos de confiabilidade estrutural para garantir a integridade das torres em diferentes solicitações ambientais como vento e neve.

2.3 Projeto elétrico

O projeto elétrico de uma LT visa atender os seguintes aspectos:

- adequação dos parâmetros elétricos do circuito equivalente;
- respeitar os níveis de campos eletromagnéticos dentro da faixa de servidão da LT;
- respeitar os níveis de ruído audível e rádio interferência causados pelo campo elétrico dos condutores;
- manter a integridade da linha em caso de curto-circuito; e
- assegurar confiabilidade do isolamento em diversas condições de operação.

A otimização de cada um dos itens citados anteriormente fornece uma diretriz de ação que pode ser conflitante com algum outro objetivo. Por exemplo: a redução da impedância série da LT é feita aproximando as fases entre si. Porém essa aproximação também aumenta os níveis de ruído audível produzidos pela linha, uma vez que aumenta o campo elétrico na superfície dos condutores (KIESSLING *et al.*, 2003).

O projeto elétrico da LT deve estabelecer um compromisso entre a otimização de cada um desses itens, mas deve respeitar critérios que estabelecem valores mínimos para cada um deles.

2.3.1 Parâmetros elétricos

Os parâmetros elétricos de uma LT devem atender requisitos definidos pelas autoridades de planejamento. No Brasil, por exemplo, leilões de concessão têm editais nos quais são exigidos requisitos como: impedância série de sequência positiva e zero, capacitância em derivação e capacidade de corrente (ANEEL, 2020).

A resistência de uma LT é determinada pela escolha do tipo e número de condutores por fase. A resistência máxima de uma LT em determinada condição de operação é estabelecida principalmente para atender às perdas máximas toleradas na rede.

A reatância série de uma LT é determinada pela sua indutância. Para circuitos em tensão elevada (extra alta e ultra alta tensão) a reatância série tem ordem de magnitude de dez vezes o valor da resistência série e, portanto, tem grande importância para queda de tensão na linha. A distância média entre fases e a geometria do feixe de condutores influencia diretamente a indutância. Considerando o arranjo dos condutores, quanto mais próximas estiverem as fases e mais expandido for o feixe, menor será a indutância de sequência positiva equivalente por fase da LT (SAADAT, 1999).

A capacitância em derivação de uma LT é influenciada também pela geometria do feixe e das fases. Quanto mais próximas estiverem as fases e mais expandido for o feixe, maior será a capacitância em derivação da LT (SAADAT, 1999).

A impedância característica de uma LT sem perdas é a raiz quadrada da razão entre a indutância e capacitância de sequência positiva. Essa impedância e o nível de tensão de operação da linha determinam qual é a potência natural da LT. Quando a carga da LT é menor que a potência natural, a LT opera fornecendo potência reativa à rede; quando a carga é maior que a potência natural, a LT funciona como um indutor consumindo potência reativa.

A capacidade térmica de uma LT é determinada pela corrente máxima que os condutores podem transportar. Para circuitos em tensão elevada (extra alta e ultra alta tensão), a capacidade térmica de uma LT é aproximadamente três vezes maior que a sua potência natural. Portanto, em LTs longas a capacidade de transporte de energia é limitada geralmente pelo seu limite de estabilidade (PAPAILIOU, 2016)(KIESSLING *et al.*, 2003).

2.3.2 Efeitos de corona

Os efeitos de corona são os efeitos causados pelo campo elétrico na superfície dos condutores. O termo corona se refere à forma de coroa que as linhas de campo elétrico radial assumem na superfície de um condutor cilíndrico. Em um modelo ideal de condutor cilíndrico, o campo elétrico é nulo no seu interior e toda a carga se acumula em sua superfície. Isso gera um campo elétrico muito alto na superfície dos condutores, que dá origem a pequenas descargas elétricas oriundas da ruptura da rigidez dielétrica do ar. Tais descargas geram os chamados efeitos de corona, ou seja, o ruído audível, rádio interferência, perdas e a corona visual (CIGRÉ) (01 OF SC.36, 1974).

O campo elétrico na superfície dos condutores é influenciado pela capacitância do arranjo geométrico do feixe e das fases. Quanto maior a capacitância, mais carga se armazena na superfície dos condutores e maior será o campo elétrico superficial acarretando um aumento dos efeitos de corona (KIESSLING *et al.*, 2003).

O projeto elétrico deve assegurar que os impactos causados pelos efeitos de corona se mantenham dentro dos limites regulatórios (ANEEL, 2020).

2.3.3 Coordenação do isolamento

A coordenação do isolamento define as distâncias elétricas mínimas que os condutores devem manter de obstáculos como estruturas, estais e outros condutores. As distâncias elétricas mínimas são definidas para diversas condições de operação, entre as quais cita-se:

- operação sob condição de vento forte (causando balanço dos condutores e aproximação);
- ocorrência de sobretensões de manobra (energização, abertura, religamento, conexão de banco de capacitores, rejeição de carga); e
- ocorrência de descargas atmosféricas nos cabos de proteção, nos cabos de fase, nas estruturas ou até mesmo nas vizinhanças da linha.

Cada uma dessas condições vai implicar alguma restrição no projeto, geralmente em função de determinados níveis mínimos de necessários. O projeto geométrico da cabeça das estruturas deve atender às distâncias elétricas necessárias para correta coordenação do isolamento. O projeto de coordenação do isolamento, via de regra, tende a afastar os condutores entre si e tornar as estruturas mais altas, provocando aumento no custo da LT (B2.06, 2008).

2.4 Otimização do projeto elétrico de linhas de transmissão

Conforme apresentado nas Seções 2.1, 2.2 e 2.3, há diversos aspectos que podem ser otimizados em um projeto de linha de transmissão. Do ponto de vista de desempenho elétrico, se pode citar os seguintes objetivos a se otimizar:

- maximizar a potência natural;
- reduzir perdas ôhmicas;
- minimizar a reatância de sequência positiva;
- reduzir o valor máximo do campo elétrico no solo;
- maximizar a confiabilidade do projeto de coordenação do isolamento;
- minimizar os valores de campo elétrico superficial nos condutores; e
- equalizar as cargas elétricas entre os subcondutores do feixe.

Desta forma, a otimização do projeto elétrico de uma LT requer primeiramente a escolha dos objetivos a serem otimizados. A escolha dos objetivos é feita pelo agente dono da LT, conforme a sua necessidade de desempenho e disponibilidade de recursos. Como alguns desses objetivos podem ser conflitantes, isto é, a melhora de um objetivo pode implicar a piora de outro, um compromisso entre soluções aceitáveis deve ser estabelecido.

3 CÁLCULO DE PARÂMETROS ELÉTRICOS

Uma linha de transmissão tem diversos parâmetros que são importantes para modelar sua resposta e descrever seu desempenho elétrico no sistema. Esta seção descreve os métodos de cálculo dos parâmetros elétricos dos componentes do circuito equivalente de uma LT e do cálculo do campo elétrico superficial nos condutores, que é o principal parâmetro que define os efeitos de corona da LT.

Por ser um tema de grande importância para a representação do sistema elétrico, as deduções necessárias para calcular os parâmetros das LTs estão presentes em diversas publicações (ELGERD, 1978; GRAINGER; STEVENSON Jr., 1994; SAADAT, 1999; BERGEN; VITTAL, 2000; MONTICELLI; GARCIA, 2011; GONEN, 2013; BHATTACHARYA; DOMMEL, 1992; ANDERSON; ANDERSON, 1995). Na representação das LTs, os seguintes parâmetros são considerados:

- a) resistência série;
- b) indutância série;
- c) capacitância em derivação;
- d) impedância característica; e
- e) potência natural.

Para todos os cálculos dos parâmetros elétricos, supõe-se que a LT seja transposta¹. Neste trabalho, serão considerados apenas os parâmetros de sequência positiva, pois o interesse principal do trabalho é avaliar o comportamento elétrico em regime permanente de operação normal da linha.

O cálculo do campo elétrico na superfície de condutores de linhas com múltiplos subcondutores é normalmente feito através do conceito do raio equivalente. O método do raio equivalente assume que todos os subcondutores do feixe distribuem suas cargas elétricas de forma igual e que portanto, o feixe de subcondutores pode se comportar como um único condutor com um raio equivalente. Tal abordagem, entretanto, desconsidera a influência das fases vizinhas sobre a distribuição das cargas dos subcondutores das fases adjacentes.

Nesse trabalho, o cálculo do campo elétrico superficial é baseado no método das imagens sucessivas (SARMA; JANISCHEWSKYJ, 1969). De acordo com (IEEE, 1979), o método das imagens sucessivas tem vantagens importantes frente a outros métodos pois

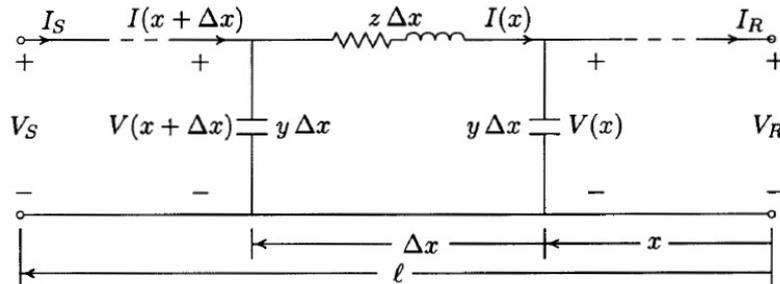
¹Linha em que cada uma das fases têm impedância total similar. Para obter isso, faz-se com que cada uma das fases ocupe cada uma das posições da geometria da LT por igual distância.

utiliza um sistema de equações lineares para resolver um problema cuja solução exata requer a solução de uma complexa equação diferencial. Quanto maior o número de imagens utilizado, maior é a precisão do método e maior será o sistema linear a ser resolvido. A implementação deste método possibilita calcular o campo elétrico superficial em cada subcondutor individualmente. Isso é fundamental para o cálculo das funções objetivo apresentadas no Capítulo 4.

3.1 Modelo de circuito Linha de Transmissão

Uma LT pode ser representada em regime permanente por um circuito π , com parâmetros distribuídos, conforme mostrado na Figura 6. A este circuito, são associadas as seguintes grandezas e parâmetros:

Figura 6 – Modelo de linha de transmissão com parâmetros distribuídos



Fonte: adaptado de (SAADAT, 1999)

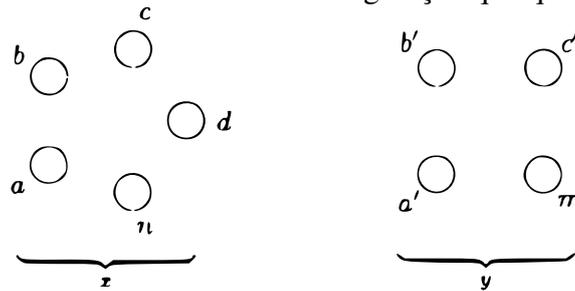
- V_S e V_R são os fasores das tensões no terminal da fonte e da carga, respectivamente, em V;
- I_S e I_R são os fasores das correntes no terminal da fonte e da carga, respectivamente, em A;
- $V(x)$ e $I(x)$ são os fasores tensão e corrente a uma distância x do terminal da carga, em V e A, respectivamente;
- Δx é um diferencial de distância em km;
- z é a impedância série por unidade de comprimento em Ω/km ;
- y é a admitância *shunt* por unidade de comprimento em S/km; e
- l é o comprimento total da LT, em km.

Quando representada por um circuito π de parâmetros concentrados, a LT possui uma impedância série $Z = z\ell$, dada em Ω , e uma admitância em derivação $Y = y\ell$, dada em S. A impedância série é composta por uma resistência R e uma reatância $X = \omega L$, sendo ω a velocidade angular do sistema, dada em rad/s, e L a indutância equivalente da LT, dada em H. A indutância equivalente L é uma composição entre a indutância própria e das indutâncias mútuas. A admitância em derivação Y é composta por uma condutância G e uma susceptância $B = \omega C$, sendo C a capacitância equivalente da LT, dada em F. A condutância G é normalmente muito baixa e é desprezada. A capacitância equivalente C é uma composição da capacitância entre as fases e entre as fases e a terra.

3.2 Raio médio geométrico e distância média geométrica

Os cálculos de indutância e capacitância das LTs são baseados no conceito de raio médio geométrico do feixe (GMR, em inglês *Geometric Mean Radius*) e distância média geométrica entre fases (GMD, em inglês *Geometric Mean Distance*). A Figura 7 apresenta uma configuração genérica de dois feixes de condutores (feixe x , com n subcondutores, e feixe y , com m subcondutores) afastados entre si. para os condutores desta figura, a distância média geométrica entre os feixes x e y é dada por:

Figura 7 – Cálculo GMR e GMD de uma configuração qualquer de feixe e de fases



Fonte: (SAADAT, 1999)

$$GMD_{xy} = \sqrt[mn]{(D_{aa'}D_{ab'}\dots D_{am})\dots(D_{na'}D_{nb'}\dots D_{nm})}, \quad (1)$$

sendo $D_{nm'}$ a distância entre o subcondutor n do feixe x e o subcondutor m' do feixe y . O raio médio geométrico do feixe x com n subcondutores é dado pelas seguintes expressões:

$$GMR_x = \sqrt[n]{(re^{-1/4}D_{ab}\dots D_{an})(D_{ba}re^{-1/4}\dots D_{bn})\dots(D_{na}D_{nb}\dots re^{-1/4})}, \quad (2)$$

$$GMR'_x = \sqrt[n]{(D_{aa}D_{ab}\dots D_{an})(D_{ba}D_{bb}\dots D_{bn})\dots(D_{na}D_{nb}\dots D_{nn})}, \quad (3)$$

$$D_{aa} = D_{bb} = \dots = D_{nn} = r, \quad (4)$$

onde D_{an} é a distância entre os subcondutores a e n , ambos do feixe x , e r é o raio dos subcondutores (aqui assumindo que são todos iguais). A Equação (2) é utilizada quando calcula-se o GMR para o cálculo da indutância ao passo que a Equação (3) é utilizada no cálculo da capacitância.

3.3 Indutância série

O cálculo da indutância série de uma linha de transmissão com feixe de condutores é baseado no raio médio geométrico do feixe e na distância média geométrica das fases. Para uma configuração genérica em que as fases A , B e C tenham cada uma uma geometria de feixe diferente, a indutância equivalente por unidade de comprimento da LT transposta é dada por²:

$$L = 2 \times 10^{-4} \ln \frac{GMD}{\sqrt[3]{GMR_A GMR_B GMR_C}} \left[\frac{\text{H}}{\text{km}} \right], \quad (5)$$

$$GMD = \sqrt[3]{GMD_{AB} GMD_{BC} GMD_{CA}}. \quad (6)$$

²Nestas expressões, é necessário que todas as medidas utilizadas no cálculo do GMD e do GMR estejam na mesma unidade.

3.4 Capacitância

A capacitância equivalente ao neutro por unidade de comprimento por fase de uma LT trifásica transposta é dada por:

$$C = \frac{C_A + C_B + C_C}{3} \left[\frac{\mu\text{F}}{\text{km}} \right], \quad (7)$$

$$C_X = \frac{0,0556}{\ln \frac{GMD}{GMR'_X}} \left[\frac{\mu\text{F}}{\text{km}} \right], \text{ sendo } X \in \{A, B, C\}. \quad (8)$$

No cálculo da capacitância, segundo nas Equações (7) e (8), as influências da altura dos condutores do plano de terra e da posição dos cabos para-raios são desconsideradas. Optou-se por desconsiderar tais efeitos a fim de simplificar a modelagem do problema de otimização e o cálculo das funções objetivo, tendo em vista as características gerais do modelo apresentadas na Seção 4.2.

A desconsideração do plano de terra e dos cabos para-raios no cálculo da capacitância implica resultados de capacitâncias ligeiramente inferiores aos reais. Por exemplo, em uma linha típica³ em 500 kV, a capacitância equivalente por unidade de comprimento calculada levando em conta a presença dos para-raios e do plano de terra é 16,60 nF/km, enquanto o valor calculado desconsiderando o plano de terra e os cabos guarda seria 16,05 nF/km.

3.5 Impedância característica

A impedância característica Z_c de uma LT é a razão entre as ondas de tensão e correntes que se propagam em uma linha infinita. A impedância característica é dada em Ω e depende da frequência sendo dada pela seguinte expressão:

$$Z_C = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}. \quad (9)$$

Quando $R \rightarrow 0$ e $G \rightarrow 0$, a LT é considerada uma linha sem perdas. Por outro lado, considerando frequências muito altas ($\omega \rightarrow \infty$), tem-se a impedância característica da LT para altas frequências, ou seja, a impedância de surto. Ambas as considerações resultam em:

$$Z_C = \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (10)$$

A análise detalhada da importância da impedância característica no comportamento das tensões e correntes ao longo de uma LT representada na Figura 6 é apresentada em (SAADAT, 1999). Uma análise simplificada da importância do parâmetro Z_C é apresentada na Seção 3.6 para cálculo da potência natural de uma LT.

³Geometria da torre cara de gato monomastro, mostrada na Figura 15.

3.6 Potência natural

A potência natural (*Surge Impedance Loading, SIL*) de uma LT é a potência que uma carga puramente resistiva deve ter para que a LT forneça a mesma quantidade de potência reativa que consome.

Um capacitor armazena energia em seu campo elétrico. A energia armazenada no capacitor em função da tensão aplicada é dada por:

$$U_C = \frac{1}{2} C V^2. \quad (11)$$

Por outro lado, um indutor armazena energia no campo magnético. A energia armazenada no indutor em função da corrente que circula é dada por:

$$U_L = \frac{1}{2} L I^2. \quad (12)$$

Quando $U_C = U_L$, tem-se:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} C V^2 &= \frac{1}{2} L I^2 \\ \frac{V^2}{I^2} &= \frac{L}{C} \\ \frac{V}{I} &= \sqrt{\frac{L}{C}} \end{aligned} \quad (13)$$

Observando o resultado da Equação (13), conclui-se que existe uma relação entre tensão V_R e corrente I_R no terminal de carga em que a linha consome a mesma quantidade que fornece de potência reativa. Esta relação é igual à impedância característica Z_c da LT. Assim, tem-se que a SIL de uma LT trifásica é dada por:

$$SIL = \frac{|V_{L-L}|^2}{Z_C}, \quad (14)$$

sendo V_{L-L} a tensão entre fases da LT.

Quando a LT está carregada com uma potência superior à sua potência natural, ela tem um comportamento indutivo, consumindo potência reativa e aumentando a queda tensão. Nesse caso, são necessários capacitores *shunt* para ajustar a tensão. Por outro lado, quando a potência da carga é inferior à potência natural, a linha funciona como um capacitor, aumentando a tensão no terminal de carga. Nesse caso, é necessária a compensação com reatores para consumo de potência reativa gerada pela LT.

Como a tensão de operação do sistema deve sempre ficar próxima ao seu valor nominal, para aumentar a potência natural da LT, deve-se diminuir a sua impedância característica Z_C , pois pouca liberdade existe para aumentar a tensão de operação além do valor nominal de projeto.

3.7 Cálculo do campo elétrico superficial: Método das imagens sucessivas

Em (IEEE, 1979) são comparados os diferentes métodos de cálculo para o campo elétrico superficial nos condutores. O método das imagens sucessivas, apresentado em

(SARMA; JANISCHEWSKYJ, 1969), é indicado por (IEEE, 1979) como o que produz os melhores resultados com o menor esforço computacional.

O campo elétrico superficial nos condutores pode ser avaliado de forma individual, considerando cada subcondutor individualmente, ou de forma média, considerando um feixe de condutores como um condutor com raio equivalente.

Para fins deste trabalho, é fundamental que o campo elétrico em cada subcondutor seja avaliado individualmente, uma vez que medidas de dispersão dos campos máximos e suas médias serão consideradas nas funções objetivos utilizadas neste trabalho.

Este trabalho utiliza apenas o método de cálculo das imagens sucessivas. A fim de não tornar o texto desse capítulo demasiado extenso, uma breve explicação sobre fundamentos sobre o método, bem como detalhes sua implementação computacional e validação são mostrados no Apêndice A.

3.8 Equalização do campo elétrico superficial

Esta seção apresenta a importância da equalização dos campos elétricos superficiais em um feixe de condutores. A equalização dos campos superficiais é importante por três razões: (i) otimização da relação entre cargas elétricas máximas acumuladas em um grupo de subcondutores e os parâmetros elétricos da linha, (ii) possibilidade de minimizar a seção transversal total de condutor e (iii) mitigação dos efeitos de corona, como ruído audível e rádio interferência.

Resumidamente, uma melhor equalização dos campos elétricos superficiais dos condutores significa que cada subcondutor possui uma quantidade carga elétrica próxima à dos outros, evitando que alguns condutores tenham campos muito altos enquanto outros tenham campos baixos. Tomando cuidado de manter os campos equalizados, é possível aumentar o GMR e diminuir a GMD (reduzindo, portanto, a reatância série e aumentando o SIL) sem que essas modificações sejam limitadas prematuramente pelos efeitos de corona de um subcondutor individualmente.

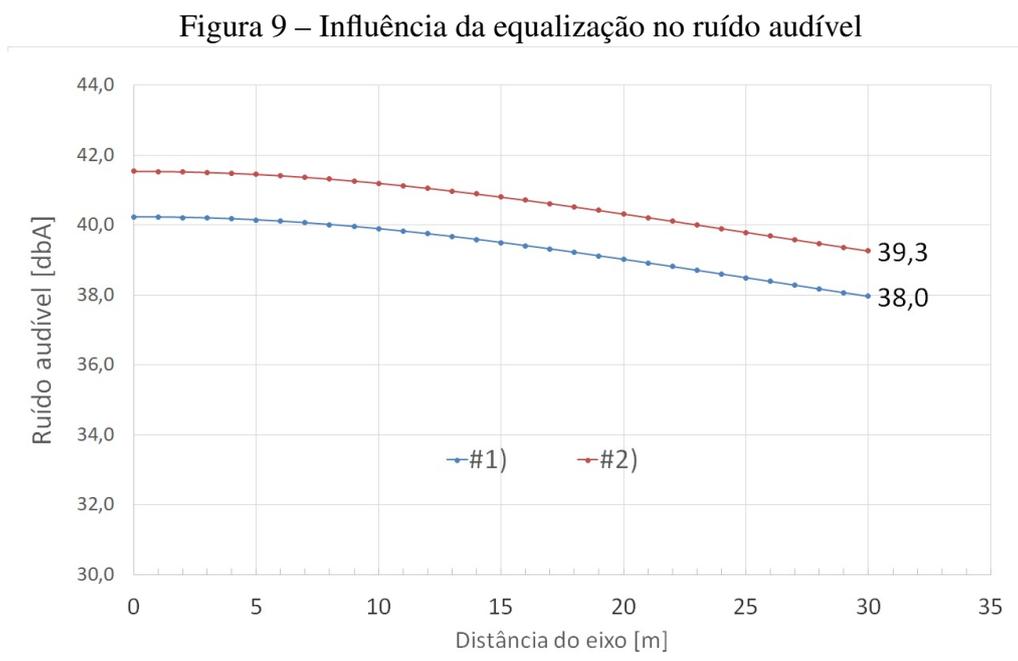
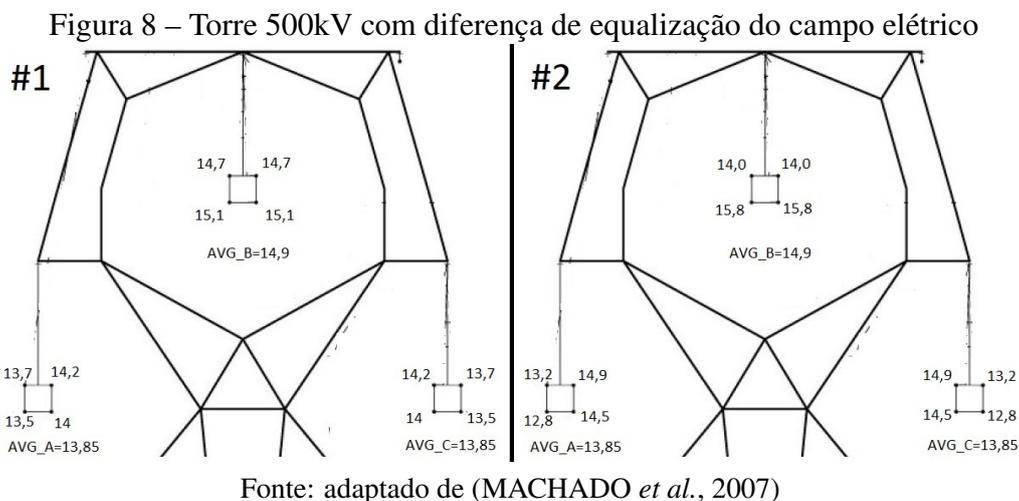
A importância dessa equalização é considerada também na verificação da possibilidade de minimização da seção transversal total de condutores, pois o subcondutor mais carregado de uma fase será o mais crítico e determinará o diâmetro mínimo necessário para que este não exceda os efeitos de corona máximos admitidos.

Para compreender como a equalização dos campos elétricos pode mitigar os efeitos de corona, deve-se analisar cada subcondutor como uma fonte individual de ruído audível ou rádio interferência. O campo elétrico superficial em cada subcondutor de um feixe tem um perfil. Cada subcondutor de um mesmo feixe possui diferentes valores de campo elétrico mínimo, máximo e médio. A dispersão desses valores em torno de uma média afeta os efeitos de corona produzidos pela LT.

Considere as situações hipotéticas apresentadas na Figura 8: (#1) desbalanceamento baixo dos campos elétricos superficiais e (#2) desbalanceamento alto dos campos elétricos. Em ambas as situações, a média dos campos elétricos é a mesma. Os campos elétricos superficiais mostrados na Figura 8 são os valores máximos, expressos em kV/cm.

O perfil de ruído audível para cada uma das situações é calculado de acordo com o método do *Electric Power Research Institut* (EPRI) descrito em CIGRÉ (01 OF SC.36, 1976). No cálculo apresentado, cada condutor é considerado uma fonte individual de ruído. A Figura 9 apresenta perfil de ruído audível ao longo da faixa gerado pelas duas situações. Observa-se que, mesmo com a mesma média de campos elétricos, a situação menos equalizada (#2) produz um ruído maior que a situação mais equalizada (#1). Isso

confirma a necessidade de manter os valores de campos elétricos razoavelmente equalizados no feixe.



As equações empíricas da referência CIGRÉ (01 OF SC.36, 1976) sugerem que a natureza matemática do fenômeno de ruído audível e da rádio interferência são muito semelhantes. Dessa forma, conclui-se que o efeito da equalização dos campos elétricos seja semelhante tanto para a rádio interferência quanto para o ruído audível. Portanto, pode-se considerar que a equalização dos campos elétricos superficiais nos subcondutores mitiga o ruído audível e a rádio interferência produzidos por um feixe de fase com valores médios idênticos.

4 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO

Este capítulo apresenta o método e as ferramentas utilizadas na formulação e solução do problema de otimização multi-objetivo. A formulação do modelo de otimização é detalhada em suas funções objetivo (baseadas nos parâmetros elétricos descritos no Capítulo 3) e nas variáveis e restrições consideradas, visando incorporar diretamente na representação as características que são impostas aos arranjos dos condutores nos feixes. A seguir, é apresentada em detalhes a aplicação do algoritmo heurístico NSGA II, utilizado para otimização do modelo de otimização multi-objetivo desenvolvido.

4.1 Funções objetivo

O modelo de otimização multi-objetivo apresentado neste trabalho considera três objetivos que são conflitantes entre si¹:

- maximização da potência natural da LT através da minimização da sua impedância característica;
- minimização da média dos campos elétricos máximos na superfície dos condutores, reduzindo os efeitos de corona;
- maximização da equalização da distribuição do campo elétrico máximo na superfície dos condutores, feita pela minimização da dispersão relativa dos valores máximos.

Em linhas longas (>200 km, por exemplo), o aumento da potência natural implica maior transporte de energia utilizando menor compensação de reativos. Deseja-se reduzir a média dos campos elétricos superficiais máximos pois esses campos são responsáveis pelos efeitos de corona (ruído audível, rádio interferência e perdas por corona). A equalização dos campos elétricos superficiais é importante por sua vez para que a carga elétrica fique distribuída uniformemente entre os subcondutores de um feixe de fase, evitando que um subcondutor fique sobrecarregado e gere efeitos de corona enquanto outros subcondutores não. Assim, as três funções objetivo do problema podem ser escritas na forma de minimização:

- f_1 : impedância característica (minimizar):

$$\min f_1 = Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (15)$$

¹Para que possamos caracterizar um modelo de otimização como multi-objetivo é imprescindível que os objetivos utilizados sejam conflitantes entre si. A comprovação desta afirmativa inicial é realizada junto com a análise dos resultados obtidos nesta dissertação.

Para detalhes de como essa grandeza é calculada, vide Capítulo 3, Equação (10).

- f_2 : **média dos valores máximos de campo elétrico superficial dos condutores (minimizar):**

$$\min f_2 = \mu = \frac{\sum_{k=1}^N E_k^{max}}{N}, \quad (16)$$

onde μ é a média dos campos elétricos superficiais máximos, N é o número total de condutores e E_k^{max} é o campo elétrico máximo do k -ésimo subcondutor calculado conforme a Equação (26).

- f_3 : **dispersão relativa dos valores máximos de campo elétrico superficial (minimizar):**

$$\min f_3 = CV = \frac{\sigma}{\mu} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N (E_k^{max} - \mu)^2}{N}}}{\mu}, \quad (17)$$

onde σ é o desvio padrão dos campos elétricos superficiais máximos.

Portanto, a função objetivo do problema de otimização multi-objetivo pode ser escrita da forma:

$$\min(f_1, f_2, f_3). \quad (18)$$

Após definidos os objetivos, o passo seguinte para formulação do modelo de otimização é a verificação das restrições que as variáveis envolvidas devem estar submetidas. Nesta etapa, todas as características do problema precisam ser levadas em conta. Como já observado no Capítulo 3, as grandezas envolvidas nas funções objetivo (15) a (17) dependem das características e do posicionamento dos subcondutores na LT.

4.2 Características gerais do modelo

A construção de um modelo de linha de transmissão requer a adoção de algumas premissas que limitam as geometrias resultantes possíveis. Essas premissas têm três razões principais. A primeira razão é garantir que apenas a geometria das fases e do feixe sejam avaliadas, evitando que, por exemplo, fatores externos como a altura cabo-solo e o diâmetro dos condutores afetem os resultados. Desta forma, são avaliadas apenas alternativas que sejam iguais em termos de alturas úteis² e cargas mecânicas dos condutores sobre as estruturas. A segunda razão é melhorar a eficácia da implementação computacional, garantindo a qualidade dos resultados obtidos. Por último, tais premissas buscam refletir minimamente algumas restrições práticas do projeto da geometria de cabeça de torre, como por exemplo as distâncias de isolamento entre fases, afastamento mínimo entre condutores e localização do cabo para-raios.

Desta forma, ao longo de todo o processo iterativo de otimização, as seguintes características da linha são mantidas fixas:

- diâmetro e flecha do condutor,
- nível de tensão,

²A altura desde o solo até o ponto de fixação mais baixo na estrutura da fase mais baixa.

- distância mínima condutor-solo e
- posição dos cabos para-raios relativa aos condutores mais externos e altos.

Assim, apenas a localização dos subcondutores e a geometria de fases são variadas. Além disto, todos os cálculos são feitos considerando a altura média dos condutores (distância mínima mais 1/3 da flecha).

4.2.1 Simetria da geometria com relação ao eixo vertical

As LTs apresentam simetria com relação ao eixo vertical central, assim a geometria dos condutores pode ser completamente definida pelo posicionamento dos condutores que estão dispostos em apenas um dos lados, a partir do eixo central da LT. Na representação adotada neste trabalho, a coordenada horizontal do centro geométrico da fase central está posicionada sobre o eixo vertical. As fases laterais também estão simetricamente afastadas em relação ao eixo vertical. Desta forma, só é necessário representar metade dos condutores, evitando o cálculo dos campos elétricos superficiais na outra metade. Isso reduz o esforço computacional do algoritmo, tornando as simulações mais rápidas. Para facilitar a codificação das soluções e também a execução dos operadores de recombinação e mutação, o algoritmo de geração de soluções impede que subcondutores sejam posicionados sobre o eixo vertical.

4.2.2 Distâncias mínimas entre subcondutores

Subcondutores da mesma fase mantém uma distância mínima de 20 cm entre si. Tal premissa é necessária por dois motivos. O primeiro motivo é mecânico e de viabilidade executiva. Os subcondutores devem manter um afastamento mínimo entre si devido a fenômenos de vibração. Embora haja vantagens elétricas em aproximar subcondutores, isso implicaria um aumento do número de espaçadores necessários para garantir a integridade mecânica dos condutores. Dependendo da geometria resultante, a exequibilidade dos espaçadores e das ferragens fica comprometida. Ressalta-se que o afastamento mínimo de 20 cm, por si só, não garante a viabilidade executiva nem a estabilidade mecânica do feixe. Este afastamento mínimo tem a finalidade de reduzir as dificuldades associadas à proximidade dos condutores. A estabilidade mecânica e viabilidade executiva do feixe e do sistema de amortecedores e espaçadores requer um estudo aprofundado, que foge do escopo desse trabalho.

O segundo motivo é garantir que, para o diâmetro de condutor e o número de imagens escolhido³, o erro máximo fique limitado a menos de 0,75%.

4.2.3 Tipo de condutor, afastamento mínimo cabo-solo e flecha

Ao longo do processo de otimização, o diâmetro do condutor é mantido constante. Tal premissa é adotada pois, do ponto de vista prático, a resistência série da linha é requisito básico de sistema e é praticamente independente da posição dos subcondutores. O mesmo condutor implica, via de regra, também a mesma flecha, que por sua vez determina a altura sobre o solo em que os cálculos elétricos são feitos.

³Conforme mostrado no Apêndice A, o número de imagens utilizados no cálculo dos campos elétricos superficiais influencia no tamanho das matrizes de coeficientes de potencial. Dessa forma, a solução dos cálculos de campos elétricos será tão mais lenta quanto maior for o número de imagens. Portanto, o número de imagens escolhido diz respeito não apenas a exatidão dos resultados, como também à velocidade de execução.

Todas as soluções geradas têm a mesma distância mínima cabo-solo. Isto é, o condutor mais baixo de qualquer solução está no mesmo nível que o condutor mais baixo das outras soluções. Todos os cálculos elétricos são feitos na altura média dos condutores, isto é, na altura correspondente do condutor mais um terço da sua flecha ⁴.

Essa condição é necessária, pois, para diminuir o campo elétrico na superfície dos condutores, o algoritmo priorizaria soluções com condutores cada vez mais altos para diminuir a capacitância da linha. Tal efeito inviabilizaria as soluções do ponto de vista prático, pois acarretaria estruturas cada vez mais altas. Além disso, tal condição ajuda a mitigar os efeitos da desconsideração da altura sobre o solo no cálculo das capacitâncias sobre as diferenças relativas entre as soluções geradas.

4.2.4 Posição do cabo para-raios

Em todas as soluções geradas, os cabos para-raios são posicionados da mesma forma em relação ao condutor mais alto e/ou o mais externo em relação ao eixo da linha. Eles são posicionados no máximo sobre 2 m do condutor mais alto e posicionados o mais próximo possível do eixo vertical, desde que forme um ângulo de proteção ao condutor mais externo seja no máximo 30°.

Tal premissa tem o objetivo de manter o condutor de proteção o mais próximo possível das estruturas e dos condutores, evitando assim estruturas maiores e, em princípio, mais caras. Tais condições aproximam o cabo para-raios o máximo possível dos condutores, o que representa a influência mais severa do para-raios sobre o campo elétrico na superfície dos condutores, isto é, a que mais aumenta o campo elétrico. Assim, a solução gerada ao longo do processo de otimização sempre poderia ser um pouco melhorada posicionando os cabos para-raios em alturas maiores ou mais afastadas do eixo vertical. Por exemplo, em uma geometria típica de uma LT em 500 kV, cuja média dos campos elétricos superficiais é 15,53 kV/cm, considerando a posição normal dos cabos para-raios, a média seria reduzida para 15,36 kV/cm, caso a existência dos cabos para-raios fosse desconsiderada.

Conforme comentado na Seção 3.4, a maior influência sobre o parâmetro elétrico da capacitância se deve à posição relativa entre si dos cabos condutores energizados e não ao afastamento dos condutores aos cabos para-raios. A consideração da existência dos cabos para-raios no cálculo da capacitância aumentaria um pouco o seu valor calculado. Além disso, a maior aproximação destes cabos com os condutores de fase é a condição que mais aumenta a capacitância da linha e, portanto, diminui a impedância característica. Dessa forma, o valor resultante de impedância característica real sempre será menor que o calculado.

Portanto, a premissa de posicionamento próximo e fixo dos cabos para-raios em relação aos condutores de fase implica resultados conservadores na média dos campos elétricos superficiais que poderiam, ainda, ser melhorados através do reposicionamento dos cabos para-raios, sem causar aumento no valor de impedância característica calculada para essa solução e, portanto, sem afetar a relação de dominância entre soluções.

⁴A altura média calculada como descrito é matematicamente válida para o caso em que a posição do cabo no espaço é descrita por uma parábola. A abordagem mais correta de descrição do cabo é pela curva catenária. Ainda assim, para dimensões e tracionamentos típicos de linhas de transmissão, a aproximação da altura média conforme usada nesse trabalho é suficientemente válida.

4.3 Otimização multi-objetivo com NSGAI

A otimização multi-objetivo dos parâmetros elétricos de uma LT requer a escolha de um método adequado e uma ferramenta de avaliação das funções objetivo. Em (DEB *et al.*, 2000) é descrito o método NSGA II (*Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II*), que é baseado em algoritmos evolutivos adaptados para problemas multi-objetivo. O NSGA II foi escolhido para ser aplicado no problema de otimização deste trabalho, pois utiliza um método de classificação das soluções que favorece à diversidade de soluções ótimas com mais de um objetivo.

4.3.1 Conceitos fundamentais

Esta seção descreve alguns conceitos fundamentais de otimização necessários para o entendimento do método NSGA II. São abordados os conceitos de algoritmos genéticos, otimização multi-objetivo, *crowding distance sorting* (DEB *et al.*, 2000), relação de dominância de soluções e Fronteira de Pareto.

4.3.1.1 Algoritmo genético

Um algoritmo genético de otimização é um procedimento no qual uma população de soluções aleatórias é gerada com um padrão de codificação. Esse “código genético” é chamado de cromossomo e possui todas as informações para avaliação das funções objetivo.

De forma análoga à evolução natural, soluções com maior adaptação (melhores funções objetivo) têm mais chances de passarem seus códigos genéticos adiante. Sucessivas gerações são simuladas a partir da população atual através de mecanismos de recombinação, mutação ou clonagem dos elementos da geração anterior.

4.3.1.2 Relação de dominância entre soluções

Para um problema de otimização com k objetivos de minimização, ou seja, cuja função objetivo é dada por $\min(f_1, f_2, \dots, f_k)$, diz-se que uma solução \mathbf{x} domina a solução \mathbf{y} se:

$$f_i(\mathbf{x}) \leq f_i(\mathbf{y}), \quad \forall i = 1, 2, \dots, k \quad (19)$$

$$f_j(\mathbf{x}) < f_j(\mathbf{y}), \quad \text{para algum } j = 1, 2, \dots, k \quad (20)$$

Em outras palavras, a solução \mathbf{x} domina a solução \mathbf{y} quando $f_i(\mathbf{x})$ não é pior que $f_i(\mathbf{y})$ em nenhum dos k objetivos e $f_j(\mathbf{x})$ é melhor que $f_j(\mathbf{y})$ em pelo menos um deles.

4.3.1.3 Fronteira de Pareto

A Fronteira de Pareto é o conjunto de soluções de uma população que não são dominadas pelas demais soluções. Isto é, nenhuma solução daquela população domina uma solução da Fronteira de Pareto. Todas as soluções que fizerem parte da Fronteira de Pareto são consideradas soluções ótimas para o problema multi-objetivo. Em um problema com dois objetivos, as soluções que fazem parte da Fronteira de Pareto constituem uma curva, no espaço dos objetivos (cuja dimensão é dois); em um problema com três objetivos, as soluções que fazem parte da Fronteira de Pareto constituem uma superfície no espaço dos objetivos (cuja dimensão é três).

O método do NSGA II considera mais de uma fronteira na mesma população e, para isso, cria uma relação de ordem entre elas. No NSGA II, a primeira Fronteira de Pareto

é o conjunto de soluções que não são dominadas por nenhuma outra solução daquela população. A segunda fronteira é o conjunto de soluções que são dominadas apenas pelas soluções que pertencem a primeira fronteira. Dessa forma, define-se sucessivamente a ordem das fronteiras.

4.3.1.4 Crowding distance sorting

A *crowding distance* é uma medida que avalia o afastamento de um dos objetivos de uma solução em relação aos objetivos com valores adjacentes de outras soluções da mesma fronteira. Em outras palavras, a *crowding distance* é uma medida de distanciamento entre valores dos objetivos de uma solução e os valores dos objetivos das outras soluções vizinhas e pertencentes à mesma fronteira.

A classificação por *crowding distance* é feita por etapas de acordo com cada objetivo. Isto significa que, em um primeiro momento, calcula-se a *crowding distance* específica de cada solução para cada um dos objetivos. Após o cálculo para cada um dos objetivos, a *crowding distance* total de uma solução específica é a soma de suas *crowding distances* de todos os objetivos.

Considere uma determinada fronteira P , constituída por n soluções que estão ordenadas pelo objetivo m , do menor valor para o maior valor: $P = \{\mathbf{x}^1, \mathbf{x}^2, \dots, \mathbf{x}^n\}$. Como as soluções estão ordenadas pelo objetivo m , sabe-se que:

$$f_m(\mathbf{x}^1) \leq f_m(\mathbf{x}^2) \leq \dots \leq f_m(\mathbf{x}^{i-1}) \leq f_m(\mathbf{x}^i) \leq f_m(\mathbf{x}^{i+1}) \leq \dots \leq f_m(\mathbf{x}^n) \quad (21)$$

Dessa forma, a *crowding distance* de uma solução \mathbf{x}^i com $1 \leq i \leq n$ em relação ao objetivo m é dada por:

$$CD_m(\mathbf{x}^i) = \frac{f_m(\mathbf{x}^{i+1}) - f_m(\mathbf{x}^{i-1})}{f_m(\mathbf{x}^n) - f_m(\mathbf{x}^1)}, \quad \forall 1 < i < n \quad (22)$$

$$CD_m(\mathbf{x}^1) = \infty \quad (23)$$

$$CD_m(\mathbf{x}^n) = \infty, \quad (24)$$

sendo \mathbf{x}^n a solução que apresenta o maior valor da função objetivo f_m e \mathbf{x}^1 a solução que apresenta o menor valor da função objetivo f_m . Observar que (22) não define a *crowding distance* para as soluções extremas (\mathbf{x}^1 e \mathbf{x}^n), mas estas são definidas como infinitas. Essa definição assegura que as soluções com os maiores e menores valores de um determinado objetivo sejam consideradas as mais afastadas. Como a *crowding distance* é uma das medidas da qualidade das informações que determinada solução oferece para uma população, soluções com maiores *crowding distance* devem ser preservadas pois contribuem para permitir representar a fronteira ao longo de toda a sua extensão.

Em outras palavras, cada solução da fronteira possui uma *crowding distance* relacionada a cada um dos objetivos. A Equação (22) mostra o cálculo da *crowding distance* da solução $\mathbf{x}^i \in P$ em relação ao objetivo m . O numerador da Equação (22) quantifica o afastamento da solução \mathbf{x}^i em relação às soluções adjacentes, isto é, aquelas soluções que possuem valores do objetivo m imediatamente maiores e menores que o da solução \mathbf{x}^i . O denominador da Equação (22) quantifica a amplitude dos valores do objetivo m das soluções de uma fronteira P . Dessa forma, a *crowding distance* de um uma determinada solução em relação a um determinado objetivo m sempre será relativa à amplitude de valores da fronteira.

A *crowding distance* total de uma solução \mathbf{x} é dada pelo somatório das *crowding distances* de todos os k objetivos:

$$CD_{total}(\mathbf{x}) = CD_1(\mathbf{x}) + CD_2(\mathbf{x}) + \dots + CD_k(\mathbf{x}). \quad (25)$$

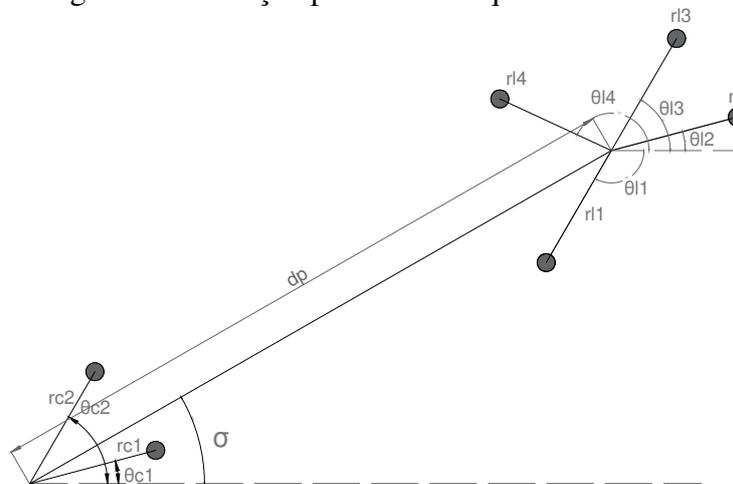
A *crowding distance* total mede a distância de uma solução para suas vizinhas da população. Uma solução \mathbf{x} que tenha CD_{total} pequeno significa, via de regra, que ela é muito parecida a alguma outra solução vizinha no espaço dos objetivos.

A *crowding distance* procura classificar as soluções dentro de uma mesma fronteira de acordo com a “diversidade” que elas apresentam nesta fronteira. Uma solução com uma *crowding distance* grande provavelmente possui características diferentes das demais e portanto enriquece a variabilidade genética daquela população. Dessa forma, quando maior for a *crowding distance* de uma determinada solução, maior preferência ela deve ter para seguir adiante no algoritmo evolutivo, sendo este o critério de desempate quando duas soluções da mesma fronteira estão competindo pela permanência durante o processo de seleção⁵.

4.3.2 Codificação

A codificação de uma solução com quatro condutores por fase é apresentada na Figura 10. Há sempre simetria com o eixo vertical. A geometria de fases é representada por uma distância dp e um ângulo σ . O feixe de condutores da fase central é representado por dois raios e dois ângulos. O feixe de condutores da fase lateral é representado por quatro raios e quatro ângulos.

Figura 10 – Solução para feixe de quatro condutores



Fonte: autor

Dessa forma, o código genético de uma solução de uma LT com quatro subcondutores por fase é apresentado como na Figura 11. Ao total são 14 genes, com codificação real, que descrevem uma solução com quatro condutores. Dois genes definem a geometria e a distância entre fases. Quatro e oito genes descrevem as configurações dos feixes central e lateral, respectivamente.

Os valores dos ângulos são sempre gerados e manipulados tais que $\theta_n \leq \theta_{n+1}$ independente do feixe ser central ou lateral. Os valores $rc1, rc2, rl1, rl2$ etc, são as distâncias entre o centro do feixe de fases e a localização do subcondutor. Esses valores são calculados a partir de uma distância a , para o feixe central e uma distância b para o feixe

⁵O primeiro critério é a fronteira que o indivíduo pertence.

Figura 11 – Código genético de uma solução

distância entre fases	feixe central	feixe lateral
dp, σ	rc1, θ c1	rl1, θ l1
	rc2, θ c2	rl2, θ l2
		rl3, θ l3
		rl4, θ l4

Fonte: autor

lateral. Os valores de a e b variam entre 5% e 50% da distância dp , sendo tais valores determinados de acordo com as dimensões máximas das geometrias de feixe admitidas para cada processo de otimização.

Os valores limites que um dos genes pode assumir são:

$$\begin{aligned}
 5 \text{ m} &\leq dp &&\leq 17 \text{ m} \\
 -70^\circ &\leq \sigma &&\leq 70^\circ \\
 0,05a \text{ m} &\leq rc1, rc2 &&\leq a \text{ m} \\
 0,05b \text{ m} &\leq rl1, rl2, rl3, rl4 &&\leq b \text{ m} \\
 -80^\circ &\leq \theta c1, \theta c2 &&\leq 80^\circ \\
 -180^\circ &\leq \theta l1, \theta l2, \theta l3, \theta l4 &&\leq 180^\circ
 \end{aligned}$$

Os valores apresentados podem variar de acordo com a geometria típica aproximada das soluções que se deseja obter. Se, por exemplo, deseja-se que todas as configurações de fases do processo de otimização sejam aproximadamente horizontais, ajusta-se $-5^\circ \leq \sigma \leq 5^\circ$. A possibilidade de fazer tais ajustes na modelagem é desejável para fazer otimização dentro de determinados limites geométricos de afastamento de fases, ângulos e espaçamento de feixe. Isso permite limitar a largura e altura da cabeça de torre necessária para implementar tal geometria e acaba colaborando a favor da viabilidade executiva dos resultados.

Para os casos em que são codificados seis condutores por fase, o código genético é análogo, mas com o feixe central descrito por 6 genes e o feixe lateral por 12.

4.3.3 Operadores do algoritmo genético

A otimização por algoritmo genético utiliza operadores de seleção dos pais, recombinação e mutação. Esta seção descreve como estes operadores funcionam no algoritmo implementado.

4.3.3.1 Seleção dos pais

Os indivíduos da população são selecionados para recombinação e mutação através de torneio entre dois indivíduos. Em cada torneio, quatro elementos são aleatoriamente selecionados para formar um casal de pais. Cada par de indivíduos sorteados disputa uma das duas vagas para ser um dos pais. Ao final do torneio, os quatro elementos estarão novamente disponíveis para sorteio e participação aleatória em novos torneios.

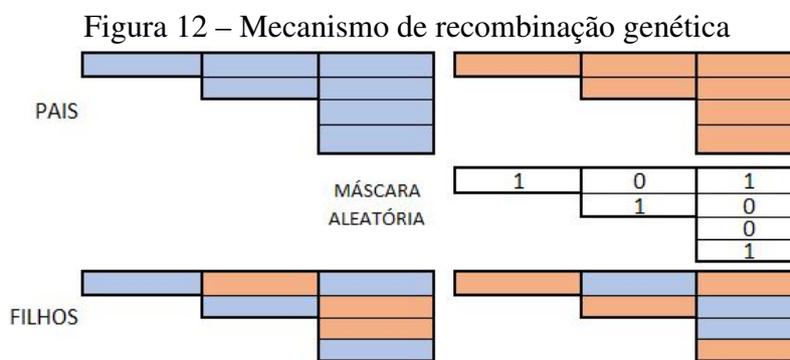
Em cada torneio, o primeiro fator de classificação é a fronteira em que os indivíduos se encontram. Se o indivíduo A se encontra na Fronteira 1 (soluções não dominadas) e o indivíduo B se encontra na Fronteira 2 (soluções dominadas apenas por elementos da fronteira 1) o elemento A vence o torneio e será um dos pais do casal. Caso ambos os indivíduos pertençam à mesma fronteira, a *crowding distance* dos elementos é utilizada

como critério de desempate. O indivíduo que possuir a maior *crowding distance* será selecionado.

O torneio simples com dois elementos é um critério menos elitista, pois dá chance aos elementos de fronteiras mais distantes de repassarem seus genes às próximas gerações. Se, por exemplo, fosse feito um torneio com muitos elementos, a tendência seria sempre selecionar apenas os indivíduos mais bem classificados, tornando o algoritmo demasiadamente elitista.

4.3.3.2 Recombinação

O mecanismo pelo qual dois pais geram dois filhos é a recombinação, apresentado na Figura 12. Neste trabalho, a recombinação foi realizada utilizando-se uma máscara com valores binários, gerada aleatoriamente para cada gene. Os valores binários da máscara definem de qual pai virá o gene correspondente.



Fonte: autor

Assim, cada par de pais irá sempre produzir um par de descendentes que irão herdar características de seus antecessores. Este operador tem por característica obter novas soluções por intermédio da combinação de partes das soluções anteriores.

4.3.3.3 Mutação

A mutação é o mecanismo pelo qual os indivíduos geram descendentes a partir de um único pai. A mutação ocorre sobre alguns elementos da população, selecionados aleatoriamente. A mutação promove variabilidade genética ao longo das gerações e também insere material genético novo que não está contido nos indivíduos da população.

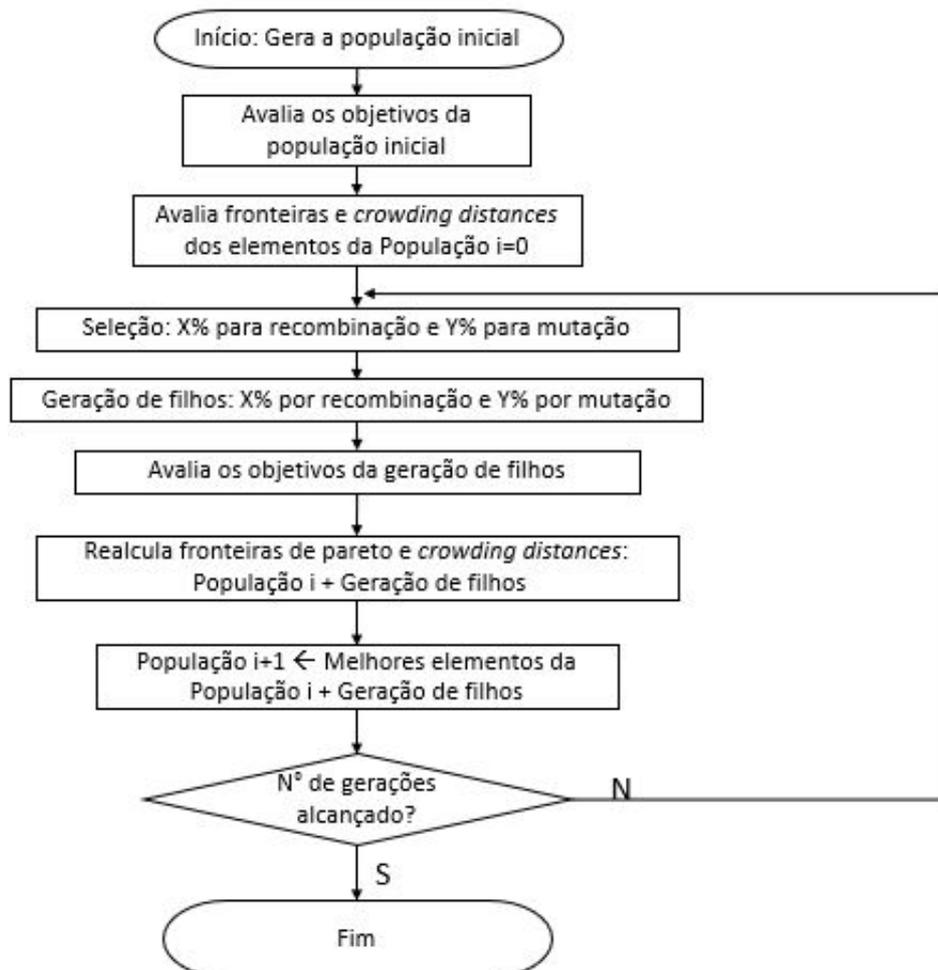
O operador de mutação seleciona aleatoriamente um número pré-determinado de elementos da população atual. Para cada um dos elementos que vão sofrer mutação, um par de genes sofrerá mutação. O par selecionado diz respeito a apenas um dos subcondutores ($r/l2$, $\theta/l2$, por exemplo) ou da geometria de fases. A mutação altera ambos os genes do par dentro do limite de $\pm 20\%$ do valor original. O operador de mutação mantém os valores de cada gene dentro dos limites estabelecidos dentro da codificação e não permite que sejam formados novos indivíduos que não atendam as premissas adotadas na Seção 4.2.

4.3.4 Esquema geral da otimização com NSGA II

O fluxograma da otimização com o NSGAII desenvolvida neste trabalho está apresentado na Figura 13. Uma descrição mais detalhada das rotinas e funções implementadas em cada etapa do fluxograma pode ser encontrada no Apêndice D.

A população de soluções iniciais é gerada aleatoriamente. Para tanto, são gerados valores uniformemente distribuídos para cada um dos genes do código genético, de forma tal que estejam dentro dos limites estabelecidos para cada experimento. A função que gera a população inicial também verifica se todas as soluções atendem às premissas adotadas na Seção 4.2. Caso algum elemento não respeite às premissas adotadas, outra solução é novamente criada e verificada até que todos os indivíduos sejam considerados viáveis e respeitem as premissas.

Figura 13 – Fluxograma do algoritmo NSGAI



Fonte: autor

A avaliação dos objetivos faz o cálculo dos valores das funções objetivo de acordo com equações apresentadas na Seção 4.1. Nessa etapa, as soluções são novamente avaliadas em relação à sua viabilidade. Caso a geometria gerada resulte em um sistema linear mal condicionado como, por exemplo, condutores de uma fase demasiadamente próximos de condutores de outra fase, essa solução é excluída e uma nova solução é gerada. Via de regra, isso ocorre somente em alguns poucos casos em que os limites de valores dentro do código são amplos demais, possibilitando cruzamentos que proporcionem a geração de soluções inviáveis. Na maioria dos casos, a aproximação demasiada de condutores de outras fases gera campos elétricos superficiais muito elevados, que naturalmente são excluídos ao longo do processo evolutivo.

A seleção dos pais para recombinação e para mutação é feita conforme apresentado na Seção 4.3.3. A geração dos descendentes é avaliada previamente para verificar se todos

os novos indivíduos obedecem às premissas da Seção 4.2. Caso algum novo indivíduo não obedeça, é feito um ajuste local no par de genes onde está a não conformidade. O ajuste local visa apenas atender as premissas da Seção 4.2, alterando minimamente as informações contidas nos genes dos indivíduos. Caso o ajuste não seja possível, um novo cruzamento ou mutação é feita até que a solução obedeça a todos os critérios estabelecidos.

Os valores das funções objetivo dos filhos são calculados e, caso alguma solução resulte em um sistema mal condicionado, esta é excluída e um novo indivíduo é criado aleatoriamente.

Após o cálculo dos objetivos da população anterior e dos novos indivíduos gerados nesta geração, é feita a reavaliação das relações de dominância e das *crowding distances*. Com isso classifica-se os indivíduos para seguirem adiante para as próximas gerações. Os indivíduos são classificados primeiramente de acordo com a sua fronteira. Aqueles indivíduos que não são dominados por nenhuma solução de sua geração, pertencem a “1ª fronteira”. Os indivíduos que são dominados apenas pelas soluções pertencentes à 1ª fronteira, são classificados como pertencentes à “2ª fronteira” e assim sucessivamente. A próxima geração é selecionada primeiramente de acordo com as fronteiras nas quais os elementos se encontram. Indivíduos das primeiras fronteiras têm prioridade. Caso os indivíduos pertençam à mesma fronteira, o critério de desempate é a *crowding distance*. Dessa forma, aqueles indivíduos que possuem *crowding distances* maiores são selecionados para ir às próximas gerações.

Na implementação realizada neste trabalho, ao longo de todo o processo, o número da geração em que cada elemento foi criado é anotado e a informação é armazenada. Com isso, é possível avaliar e rastrear a renovação das populações e das fronteiras, permitindo uma melhor análise do desempenho do NSGA II no problema formulado.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para permitir exemplificar a utilização das metodologias de cálculo e de otimização desenvolvidas nesse trabalho, os resultados apresentados neste capítulo foram divididos em quatro blocos.

O primeiro bloco (Seção 5.1) apresenta os resultados dos cálculos de parâmetros elétricos de configurações típicas de linhas de transmissão em 500 kV do sistema elétrico interligado brasileiro. Optou-se por avaliar somente linhas em 500 kV pois estas, via de regra, utilizam mais subcondutores por fase do que as linhas em 230 kV e em 345 kV. Além disso, o sistema interligado nacional brasileiro possui linhas em 500 kV com geometrias e concepções elétricas interessantes, que servem como base para comparação com as configurações obtidas pelo processo de otimização desenvolvido neste trabalho. Os resultados foram obtidos usando os métodos e ferramentas descritos no Capítulo 3.

O segundo bloco (Seção 5.2) apresenta os efeitos que a geometria das fases e do feixe têm sobre o desempenho elétrico de uma configuração de LT. Os efeitos da compactação das fases, da expansão e assimetria do feixe sobre o desempenho elétrico de LTs são avaliados individualmente de forma tal que seja possível identificar quais são as possíveis diretrizes de otimização que podem ser adotadas de acordo com a necessidade prática de um projeto elétrico.

O terceiro bloco (Seção 5.3) apresenta as configurações geométricas obtidas pelo algoritmo de otimização implementado. Essas configurações são apresentadas de forma comparativa com as configurações mostradas na Seção 5.1. A comparação tem a finalidade de fornecer intuição sobre as diretrizes de otimização possíveis a partir de configurações típicas de referência.

O quarto bloco (Seção 5.4) apresenta o desempenho do algoritmo de otimização em sua implementação no problema formulado no Capítulo 4. Neste bloco, são mostrados como os parâmetros de ajuste do método de otimização implementado impactam nos resultados obtidos. O foco desta seção é comprovar, sob a ótica de um problema de otimização multi-objetivo, o desempenho do método NSGAI desenvolvido neste trabalho.

5.1 Parâmetros elétricos de configurações típicas

Esta seção apresenta os resultados do cálculo dos parâmetros elétricos de algumas configurações de linhas de transmissão em 500 kV brasileiras. Os cálculos foram realizados utilizando as ferramentas implementadas para este trabalho, conforme descrito no Capítulo 3. O propósito desta seção é analisar parâmetros elétricos de linhas existentes, utilizando as ferramentas desenvolvidas e avaliar conceitualmente a influência das concepções geométricas sobre esses parâmetros.

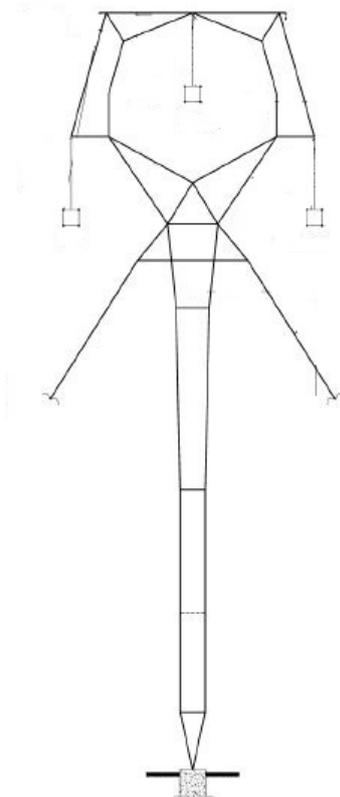
Todos os resultados desta seção foram realizados considerando o mesmo condutor

(CAA 954 MCM RAIL), a mesma flecha (20 m) e a mesma altura mínima cabo-solo. Essas considerações têm a finalidade didática de fornecer bases para uma comparação com foco na geometria do feixe e no posicionamento das fases. Tais considerações, ainda que não representem exatamente os projetos originais de alguns casos, não invalidam quaisquer análises conceituais sobre o projeto elétrico original, uma vez que eventuais diferenças são relativamente pequenas.

5.1.1 Torre estaiada monomastro cara-de-gato 500kV - FEX 95cm

A torre estaiada monomastro cara-de-gato com feixe expandido simétrico de 95 cm foi a solução técnica estrutural¹ adotada pela concessionária responsável pela LT 500 kV Interligação Norte / Sul III - Trecho 2, com 525 km de extensão (MACHADO *et al.*, 2007). O condutor utilizado para essa linha foi o ACSR 954MCM 45/7 (RAIL). A Figura 14 apresenta a silhueta torre monomastro estaiada de suspensão tipo SEQ1².

Figura 14 – Silhueta torre monomastro cara-de-gato 500kV



Fonte: adaptado de (MACHADO *et al.*, 2007)

A Figura 15 apresenta a configuração geométrica dos condutores e dos para-raios na altura média. Essa configuração resulta nos seguintes valores:

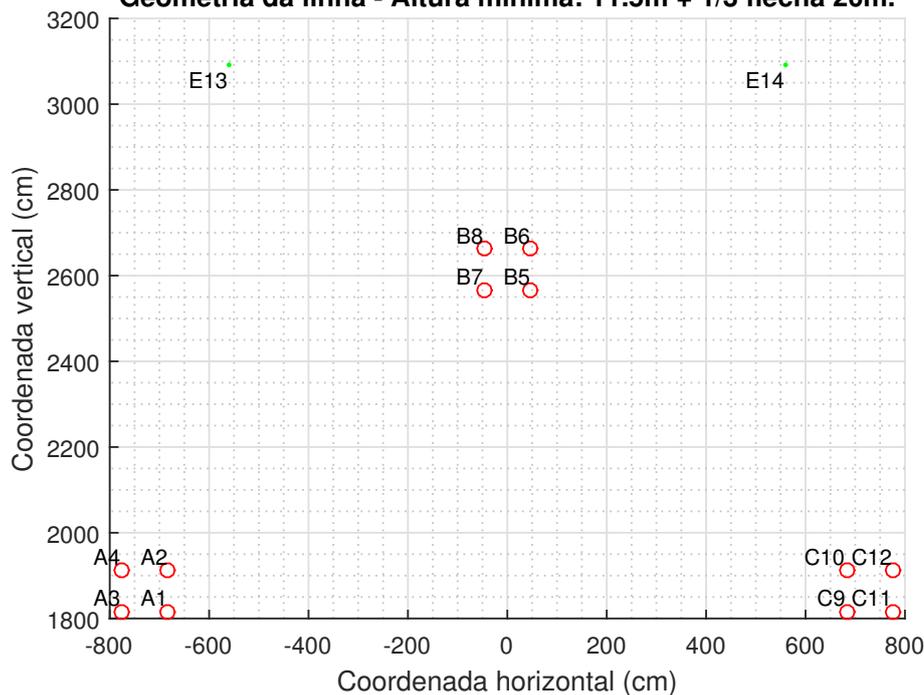
- potência natural, SIL=1192,9 MW ($Z_c=209,6 \Omega$);

¹Em projetos de linhas de transmissão a torre de suspensão é a mais frequente, portanto é prática comum de projeto considerar que a linha toda é representada por um tipo específico de estrutura. Na prática, a frequência da ocorrência de uma estrutura na linha depende de diversos fatores entre os quais o principal é a topografia do traçado.

²SEQ1 é o código da estrutura dentro da série de estruturas considerada para este projeto

- reatância série de sequência positiva, $X_L=0,2659 \Omega/\text{km}$;
- capacitância em derivação, $C=16,06 \text{ nF}/\text{km}$;
- distância média geométrica entre fases, $\text{GMD}=11,69 \text{ m}$;
- raio médio geométrico, $\text{GMR}=36,6 \text{ cm}$.

Figura 15 – Localização dos condutores e dos para-raios - torre cara-de-gato, feixe 95cm
500kV Monomastro Cara de Gato - 4x954MCM 45/7 - FEX 95cm
Geometria da linha - Altura mínima: 11.5m + 1/3 flecha 20m.



Fonte: autor

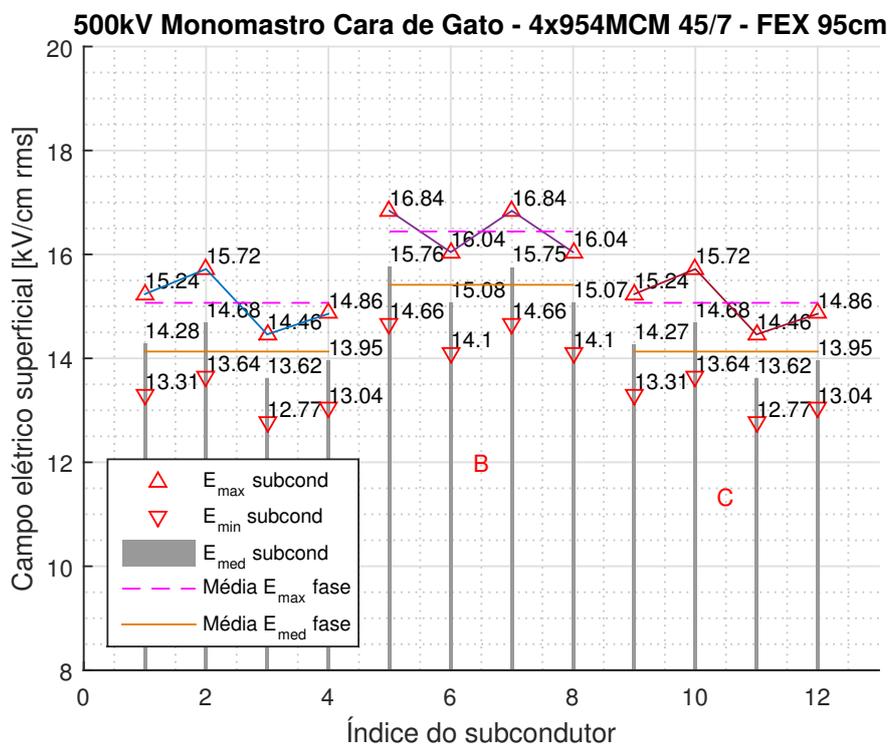
A Figura 16 mostra os valores dos campos elétricos superficiais nos subcondutores da configuração apresentada na Figura 15. Para cada um dos subcondutores, é apresentado o campos elétricos máximo, mínimo e médio, representados pelos triângulos virado para cima, para baixo e pela barra cinza, respectivamente. A linha tracejada rosa representa a média dos campos superficiais máximos dos subcondutores de uma fase e a linha amarela representa a média dos campos superficiais médios. Em função da simetria, os resultados das fases A e C são iguais, como esperado.

A média dos valores máximos de campo elétrico superficial considerando todos os condutores é $15,53 \text{ kV}/\text{cm}$. A média dos campos máximos nas fases A e C é $15,07 \text{ kV}/\text{cm}$ e na fase B é $16,44 \text{ kV}/\text{cm}$. Os subcondutores com maiores campos elétricos superficiais são B5 e B7 ($16,84 \text{ kV}/\text{cm}$). O coeficiente de variação dos campos superficiais máximos de todos os condutores é $5,05\%$.

5.1.2 Torre estaiada monomastro cara-de-gato 500kV - Feixe 45,7 cm

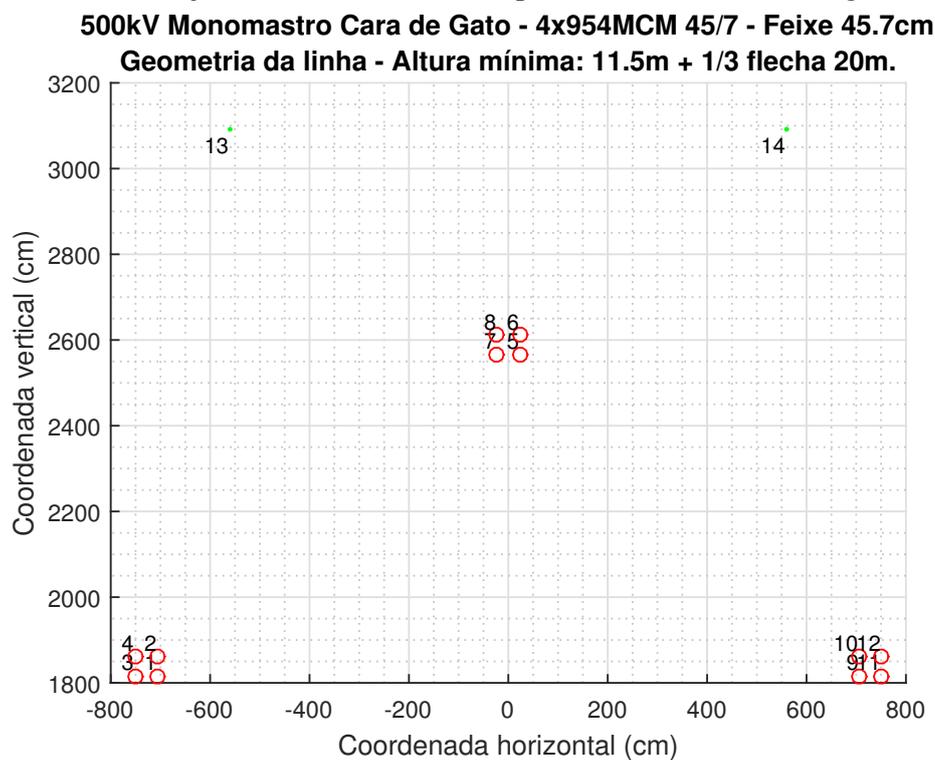
Neste caso, os cálculos elétricos foram realizados para a mesma torre estaiada monomastro cara-de-gato da Figura 14, porém considerando um feixe de lado quadrado de $45,7 \text{ cm}$. A Figura 17 apresenta a configuração geométrica dos condutores e dos para-raios na altura média. Essa configuração resulta nos seguintes valores:

Figura 16 – Campo elétrico superficial nos condutores: cara-de-gato 95 cm



Fonte: autor

Figura 17 – Localização dos condutores e dos para-raios - torre cara-de-gato, feixe 45cm

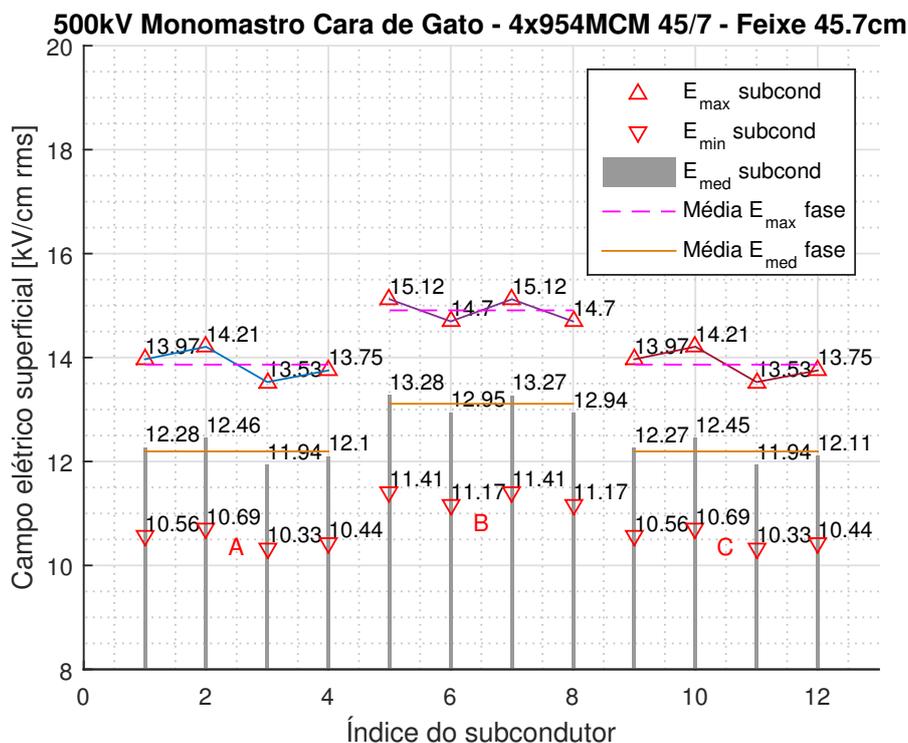


Fonte: autor

- potência natural, $SIL=1031,2$ MW ($Z_c=242,4 \Omega$);
- reatância série de sequência positiva, $X_L=0,3072 \Omega/\text{km}$;
- capacitância em derivação, $C=13,87$ nF/km;
- distância média geométrica entre fases, $GMD=11,68$ m;
- raio médio geométrico, $GMR=21,1$ cm.

A Figura 18 mostra os valores dos campos elétricos superficiais nos subcondutores da configuração apresentada na Figura 17. A média dos valores máximos de campo elétrico superficial nos condutores é 14,21 kV/cm. A média dos campos máximos nas fases A e C é 13,86 kV/cm e na fase B é 14,91 kV/cm. Novamente, os subcondutores com maiores campos elétricos superficiais são B5 e B7 (15,12 kV/cm). O coeficiente de variação dos campos superficiais máximos de todos os condutores é 3,86%.

Figura 18 – Distribuição campo elétrico superficial: torre cara de gato 45 cm



Fonte: autor

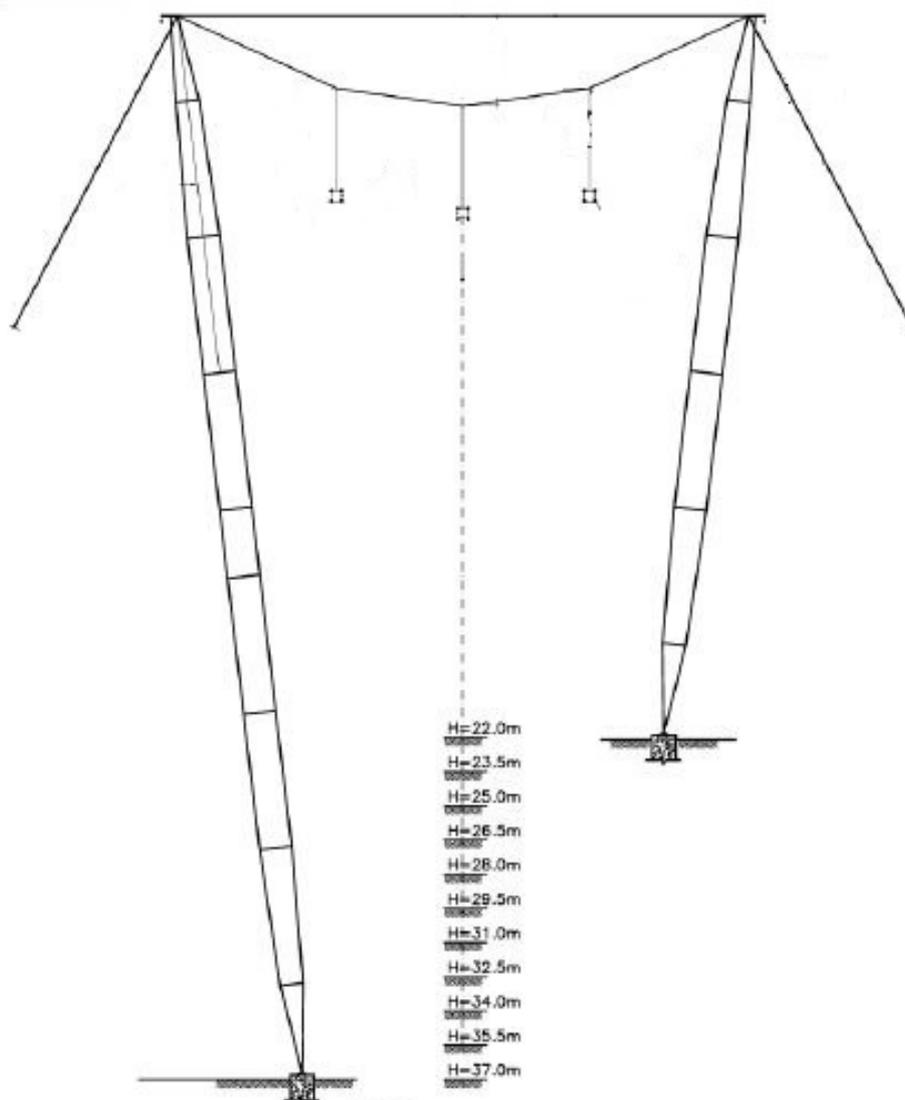
Comparando-se os resultados da configuração que utiliza feixe de 45 cm com os da que utiliza 95 cm, fica claro o efeito da expansão do feixe na potência natural, nos campos elétricos superficiais e nas suas dispersões relativas. A diminuição desses valores pela compactação do feixe se deve ao aumento da reatância série de sequência positiva e diminuição da capacitância.

5.1.3 Torre estaiada compacta tipo cross Rope 500kV

A solução estrutural da torre estaiada compacta tipo cross-rope (CCRS) foi desenvolvida no final da década de 90, tendo em vista a previsão de grandes linhas e transmissão na região Norte do Brasil. A LT 500 kV Tucuruí - Vila do Conde foi construída utilizando

essa solução estrutural e obteve desempenho plenamente satisfatório do ponto de vista elétrico e mecânico (MACHADO *et al.*, 2007). O projeto considera feixe com quatro subcondutores 954 MCM RAIL simétricos espaçados 457 mm. A Figura 19 mostra a silhueta da torre estaiada cross-rope tipo CR52.

Figura 19 – Silhueta Torre Cross Rope 500kV

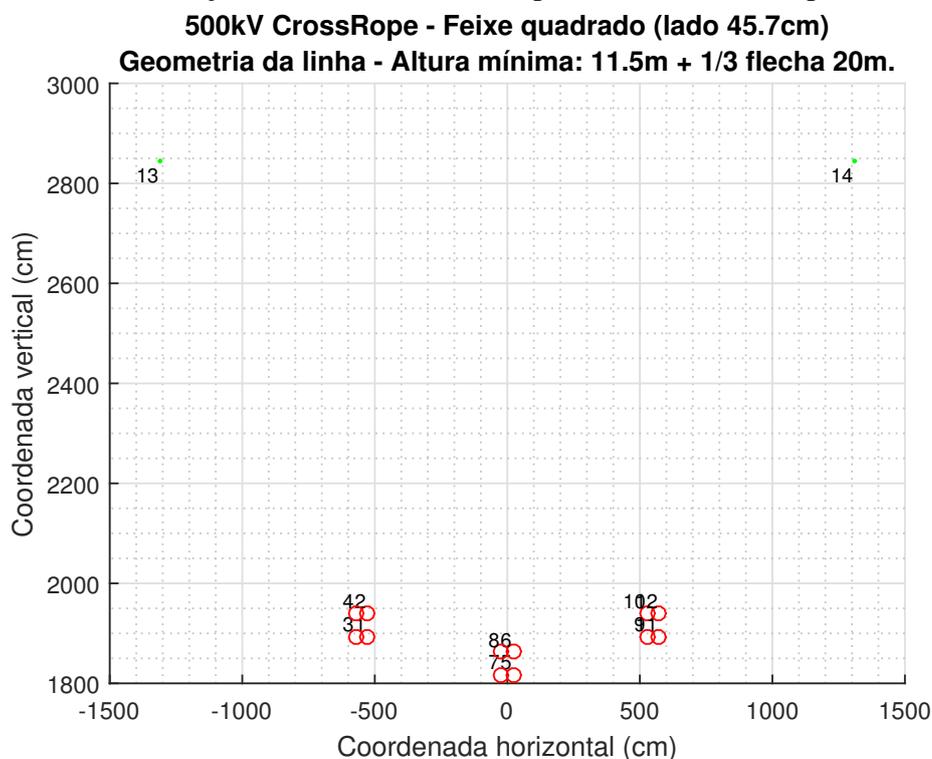


Fonte: adaptado de (MACHADO *et al.*, 2007)

A Figura 20 apresenta a configuração geométrica dos condutores e dos para-raios na altura média da torre CCRS da Figura 19. Essa configuração resulta nos seguintes valores:

- potência natural, $SIL=1182,0$ MW ($Z_c=211,5 \Omega$);
- reatância série de sequência positiva, $X_L=0,2683 \Omega/\text{km}$;
- capacitância em derivação, $C=15,91$ nF/km;
- distância média geométrica entre fases, $GMD=6,98$ m;
- raio médio geométrico, $GMR=21,1$ cm.

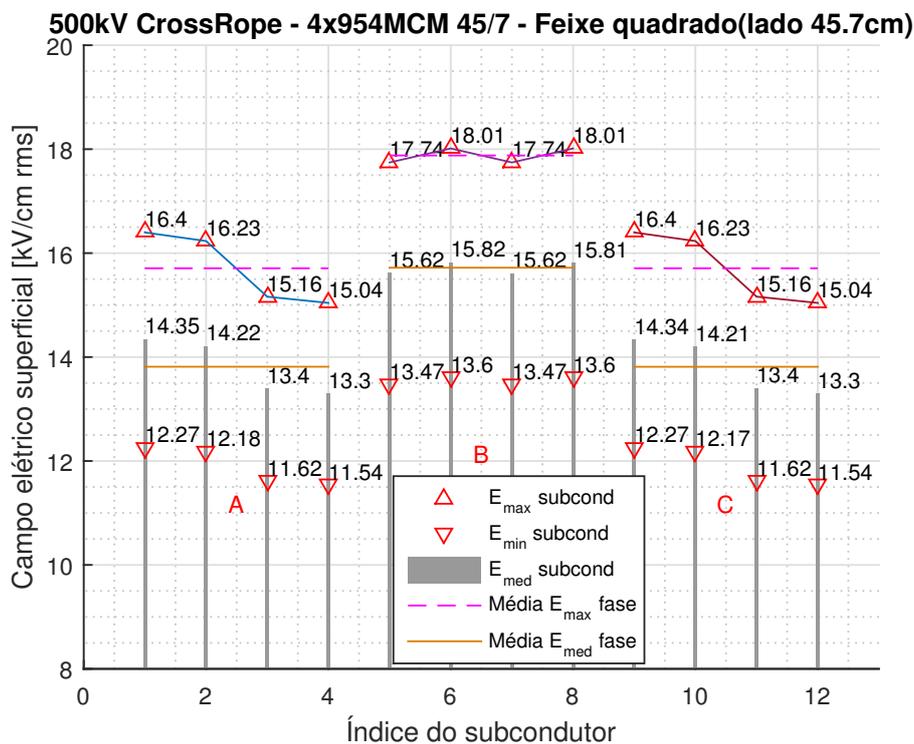
Figura 20 – Localização dos condutores e dos para-raios - Cross Rope - feixe 45.7 cm



A Figura 21 mostra os valores dos campos elétricos superficiais nos subcondutores da configuração apresentada na Figura 20. A média dos valores máximos de campo elétrico superficial nos condutores é 16,43 kV/cm. A média dos campos máximos nas fases A e C é 15,71 kV/cm e na fase B é 17,88 kV/cm. Os subcondutores com maiores campos elétricos superficiais são B6 e B8 (15,12 kV/cm). O coeficiente de variação dos campos superficiais máximos de todos os condutores é 6,94%.

Comparando-se os resultados da configuração da torre CCRS que utiliza feixe de 45 cm com a torre monomastro cara-de-gato com feixe 95 cm, observa-se que as soluções possuem valores de potência natural relativamente próximos. A geometria da torre CCRS utiliza um feixe mais compacto do que o da cara-de-gato, porém a compactação da torre CCRS é maior. Este compromisso entre compactação de fases e expansão do feixe faz as duas soluções apresentarem parâmetros elétricos relativamente parecidos.

Figura 21 – Distribuição campo elétrico superficial: Cross Rope



5.1.4 Torre VX 500kV - Feixe expandido assimétrico

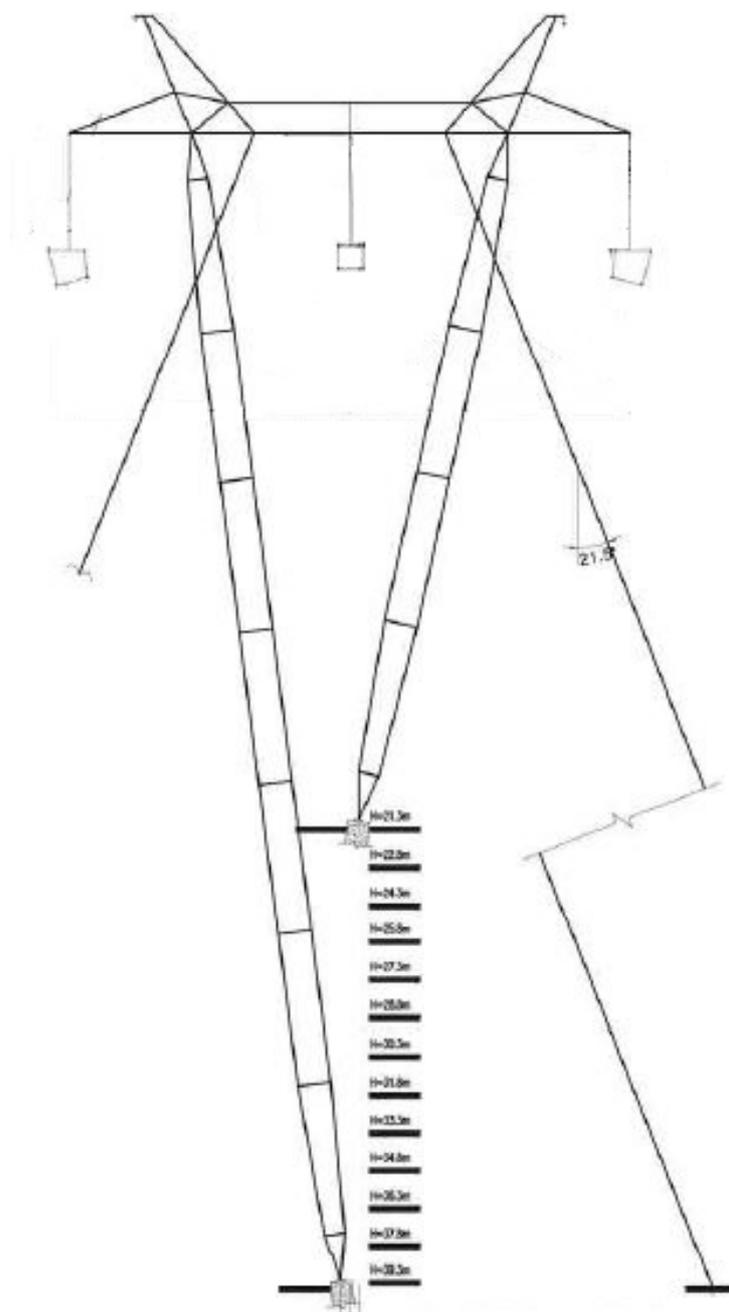
Em meados dos anos 90, com o desenvolvimento dos conceitos de linha de potência natural elevada, verificou-se que a expansão do feixe através do aumento do espaçamento dos subcondutores resultaria em configurações eficazes para o aumento da capacidade de transmissão das linhas. Com isso, a CHESF desenvolveu uma solução estrutural conhecida como Torre VX, utilizando feixe expandido assimétrico de 4 subcondutores CAA 954 MCM RAIL, com fases dispostas horizontalmente sem compactação. A solução estrutural foi utilizada na construção da LT 500 kV Presidente Dutra / Teresina / Sobral / Fortaleza (MACHADO *et al.*, 2007).

A Figura 22 mostra a geometria da torre VX, sendo os detalhes das posições dos condutores e dos para-raios na altura média da torre mostrados na Figura 23. Essa configuração resulta nos seguintes valores:

- potência natural, $SIL=1180,2$ MW ($Z_c=211,8 \Omega$);
- reatância série de sequência positiva, $X_L=0,2690 \Omega/\text{km}$;
- capacitância em derivação, $C=15,90$ nF/km;
- distância média geométrica entre fases, $GMD=13,99$ m;
- raio médio geométrico fases laterais, $GMR=46,6$ cm;
- raio médio geométrico da fase central, $GMR=34,3$ cm.

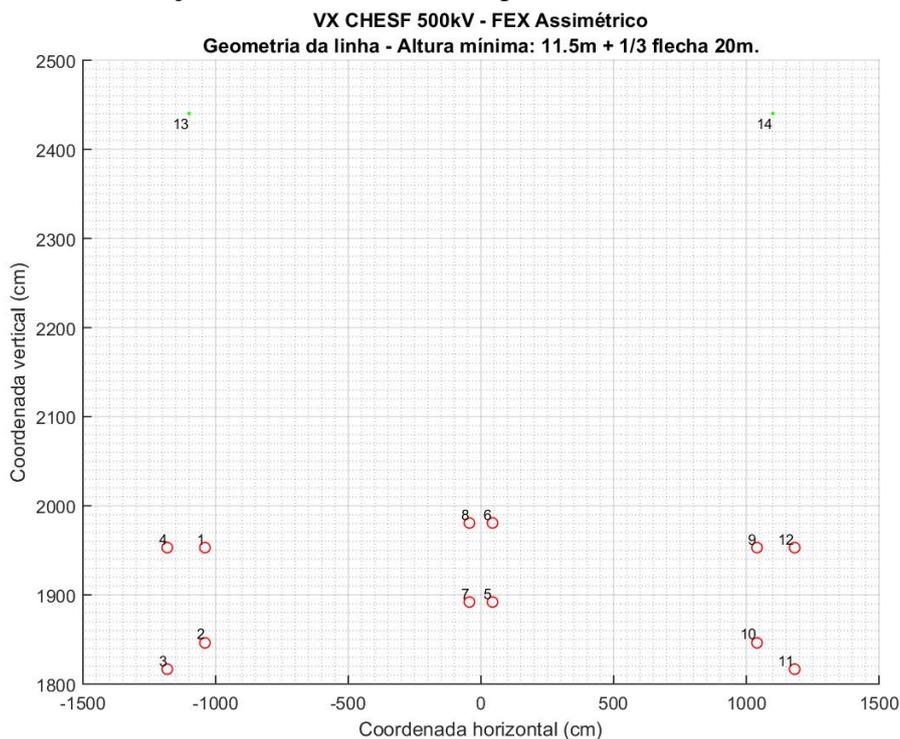
A Figura 24 mostra os valores dos campos elétricos superficiais nos subcondutores da configuração apresentada na Figura 23.

Figura 22 – Silhueta Torre VX 500kV



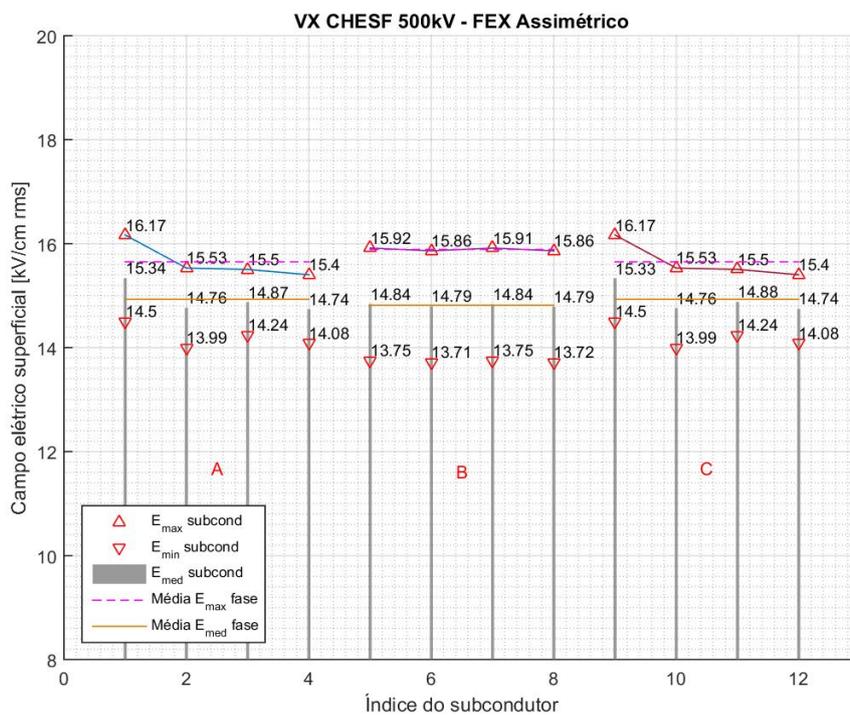
Fonte: (MACHADO *et al.*, 2007)

Figura 23 – Localização dos condutores e dos para-raios - Torre VX - FEX assimétrico



Fonte: autor

Figura 24 – Distribuição campo elétrico superficial: VX FEX assimétrico



Fonte: autor

Para esta estrutura, a média dos valores máximos de campo elétrico superficial nos condutores é 15,73 kV/cm. A média dos campos máximos nas fases laterais é 15,65 kV/cm e na fase central é 15,89 kV/cm. Os subcondutores com maiores campos elétricos superficiais são (1) e (9) com 16,17 kV/cm. O coeficiente de variação dos campos superficiais máximos de todos os condutores é 1,72%.

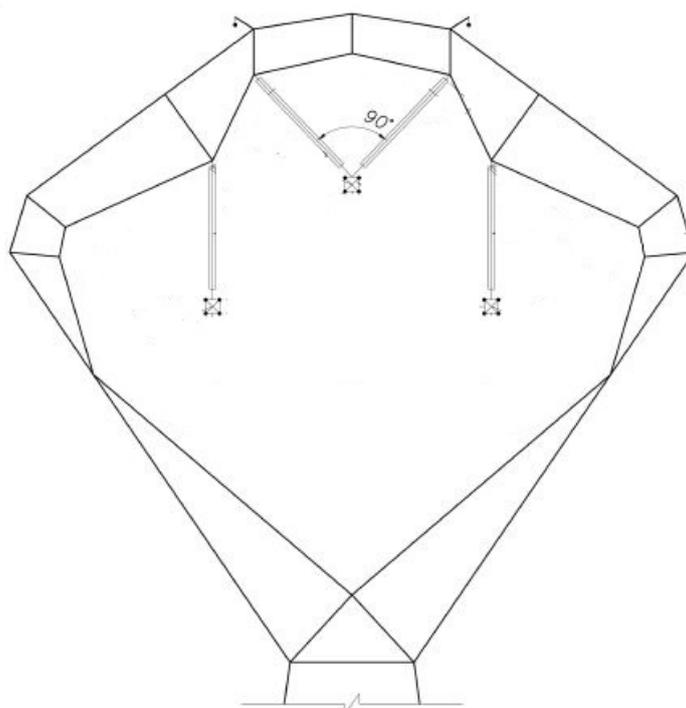
Observa-se que a configuração de condutores da torre VX apresenta valores de campos elétricos superficiais mais baixos e muito mais equalizados que os das configurações das soluções cross-rope e cara-de-gato. A distribuição assimétrica dos condutores no feixe possibilita a equalização dos campos elétricos superficiais. Apesar de não ter qualquer tipo de compactação (devido à disposição horizontal de fases), a expansão assimétrica do feixe da torre VX resultou em valores de potência natural, reatância e capacitância relativamente muito próximos aos das soluções cross-rope e cara-de-gato.

5.1.5 Torre autoportante tipo raquete compacta 500kV

O projeto de estrutura autoportante compacta tipo raquete com disposição triangular de fases foi desenvolvido na década de 80 pela então empresa pública de geração e transmissão da região Norte do Brasil, a ELETRONORTE. O projeto dessa estrutura compacta foi desenvolvido para as linhas de transmissão em 500 kV da UHE Tucuruí, tendo em vista os ganhos econômicos que a compactação de fases propicia (MACHADO *et al.*, 2007). O projeto utiliza feixe simétrico com 4 subcondutores CAA 954 MCM RAIL, espaçados de 457 mm.

A Figura 25 apresenta a silhueta da cabeça de torre da solução estrutural da torre autoportante da raquete compacta tipo sS.

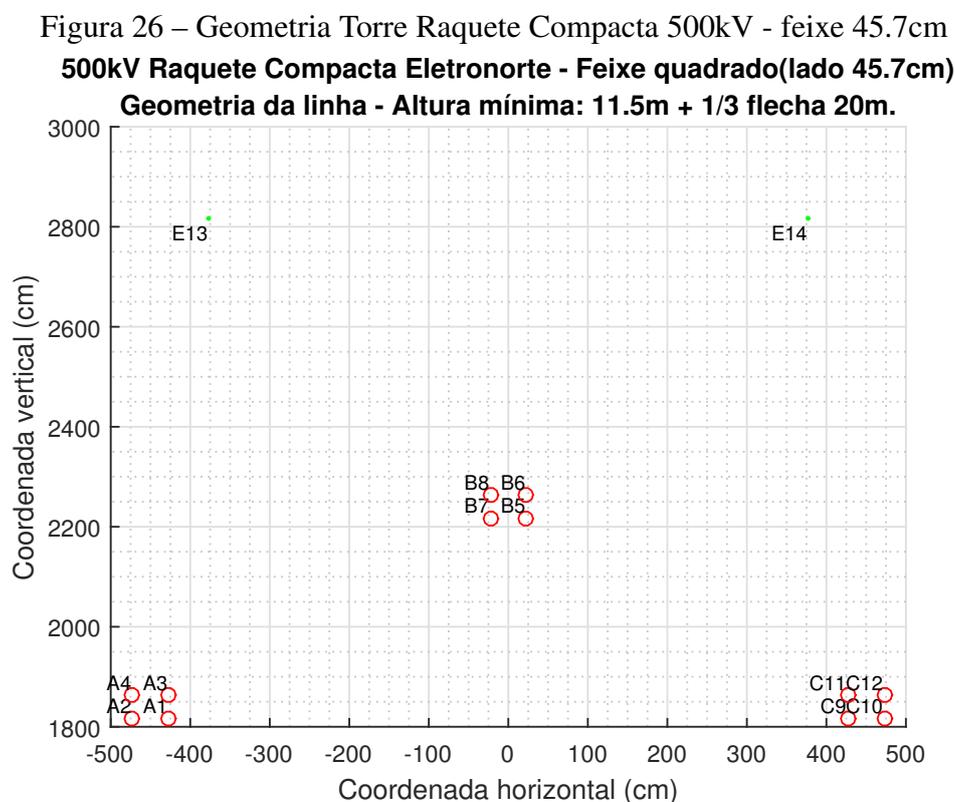
Figura 25 – Silhueta da configuração elétrica da torre raquete compacta 500kV



Fonte: (MACHADO *et al.*, 2007)

A Figura 26 apresenta a configuração geométrica dos condutores e dos para-raios na altura média da torre autoportante tipo raquete compacta da Figura 25. Essa configuração resulta nos seguintes valores:

- potência natural, $SIL=1186,4 \text{ MW}$ ($Z_c=210,7 \Omega$);
- reatância série de sequência positiva, $X_L=0,2673 \Omega/\text{km}$;
- capacitância em derivação, $C=15,97 \text{ nF}/\text{km}$;
- distância média geométrica entre fases, $GMD=6,88 \text{ m}$;
- raio médio geométrico das fases, $GMR=21,1 \text{ cm}$;

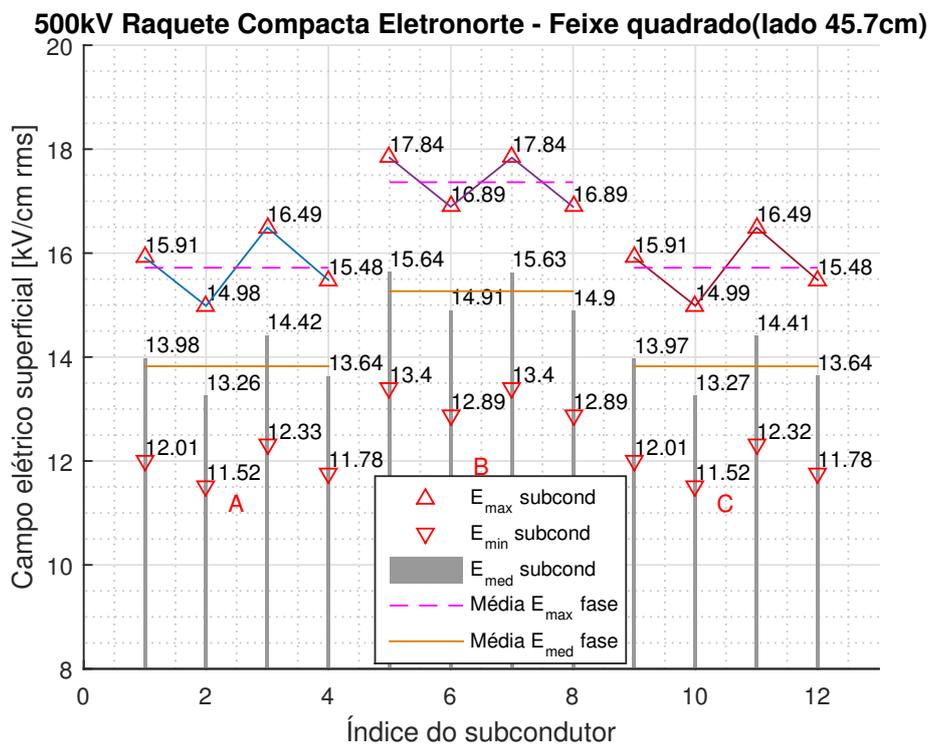


Fonte: autor

A Figura 27 mostra os valores dos campos elétricos superficiais nos subcondutores da configuração apresentada na Figura 26. A média dos valores máximos de campo elétrico superficial nos condutores é $16,27 \text{ kV}/\text{cm}$. A média dos campos máximos nas fases laterais é $15,72 \text{ kV}/\text{cm}$ e na fase central é $17,36 \text{ kV}/\text{cm}$. Os subcondutores com maiores campos elétricos superficiais são B7 e B5 com $17,84 \text{ kV}/\text{cm}$. O coeficiente de variação dos campos superficiais máximos de todos os condutores é $5,77\%$.

A configuração elétrica da torre autoportante tipo raquete compacta resulta em valores de parâmetros elétricos relativamente próximos das configurações tipo cross-ropo e cara-de-gato.

Figura 27 – Distribuição campo elétrico superficial: Raquete Compacta

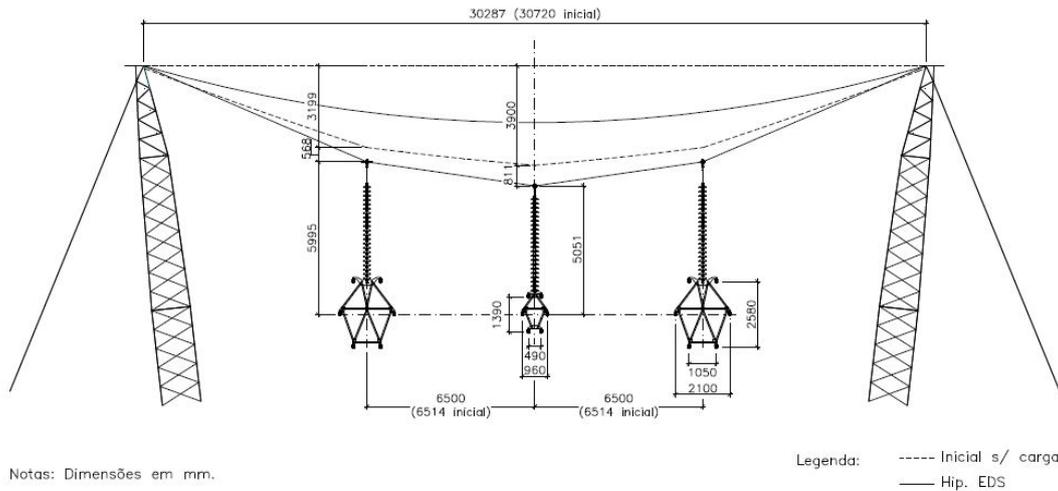


5.1.6 Projeto Paranaíba - Cross Rope FEXCOM

A construção da usina hidroelétrica de Belo Monte na região Norte do Brasil, com capacidade de geração da ordem de 11000 MW, requereu uma série de reforços no sistema interligado nacional para escoar sua geração. O principal exemplo de reforço é a construção de um robusto sistema de transmissão em corrente contínua composto por 2 bipolos ± 800 kV interligando a subestação de Xingu (PA) às subestações de Estreito (MG) e Nova Iguaçu (RJ) (SILVA; HIRUMA, 2017). O escoamento para a região Norte e a interligação Nordeste e Centro/Centro Oeste foi feito por um sistema em 500 kV em corrente alternada que interliga as subestações Barreiras 2 / Rio das Éguas / Luziânia / Pirapora 2.

A interligação entre as subestações Barreiras II e Luziânia necessitou uma elevada capacidade de transmissão (1670 MW) e é conhecido como Projeto Paranaíba. A solução de configuração elétrica adotada no projeto original foi uma linha com fases compactas e feixes super expandidos de 6 condutores CAA 795 MCM TERN dispostos em elipses (SILVA; HIRUMA, 2017). A Figura 28 mostra a silhueta da solução estrutural implementada e sua disposição elétrica.

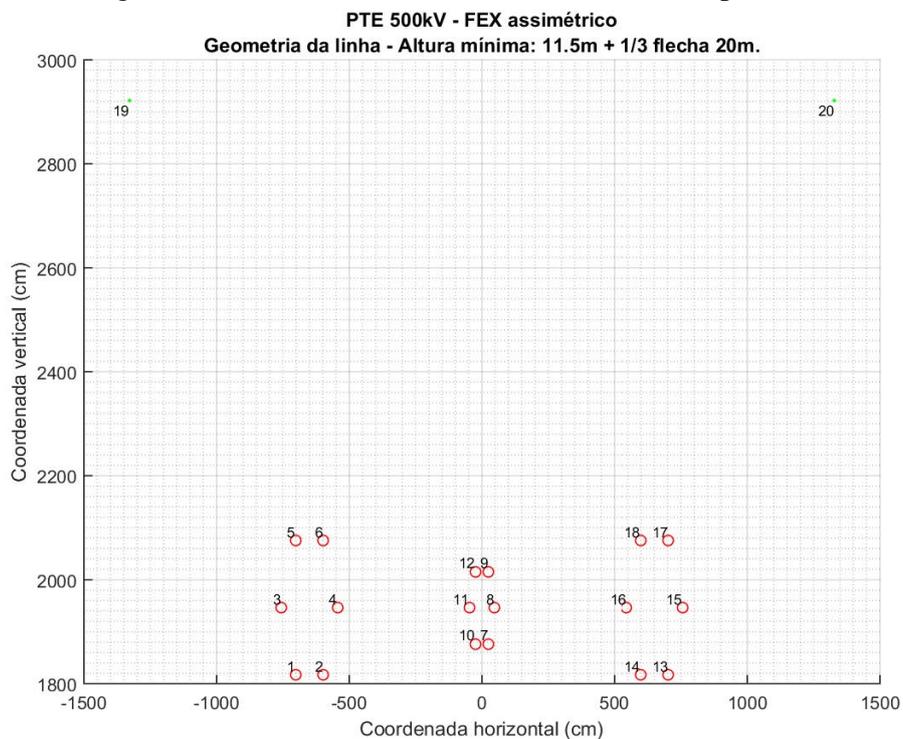
Figura 28 – Silhueta cross-ropo FEXCOM 500kV



Fonte: adaptado de (SILVA; HIRUMA, 2017)

Diferentemente do projeto original, os cálculos apresentados nessa seção consideram os condutores tipo CAA 954 MCM RAIL, para fins de comparação com outras geometrias apresentadas nesse trabalho. A Figura 29 apresenta a configuração geométrica dos condutores e dos para-raios na altura média da torre do Projeto Paranaíba da Figura 28.

Figura 29 – Geometria condutores PTE Cross Rope 500kV



Fonte: autor

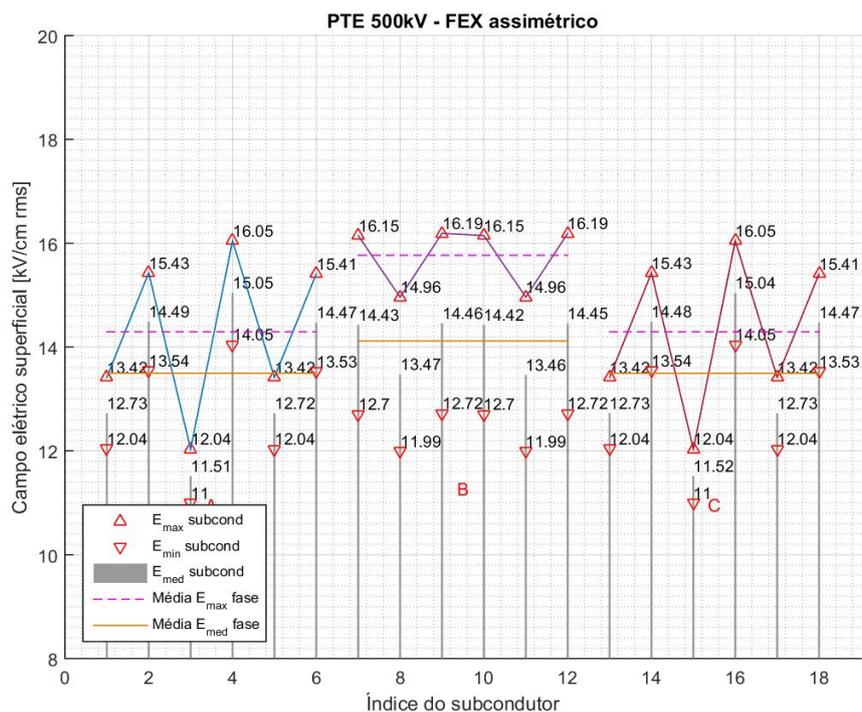
Esta configuração resulta nos seguintes valores:

- potência natural, $SIL=1660,5$ MW ($Z_c=150,6 \Omega$);

- reatância série de sequência positiva, $X_L=0,1919 \Omega/\text{km}$;
- capacitância em derivação, $C=22,46 \text{ nF}/\text{km}$;
- distância média geométrica entre fases, $\text{GMD}=8,25 \text{ m}$;
- raio médio geométrico das fases laterais, $\text{GMR}=81,5 \text{ cm}$;
- raio médio geométrico da fase central, $\text{GMR}=46,2 \text{ cm}$.

A Figura 30 mostra os valores dos campos elétricos superficiais nos subcondutores da configuração apresentada na Figura 29. A média dos valores máximos de campo elétrico superficial nos condutores é $14,78 \text{ kV}/\text{cm}$. A média dos campos máximos nas fases laterais é $14,29 \text{ kV}/\text{cm}$ e na fase central é $15,77 \text{ kV}/\text{cm}$. Os subcondutores com maiores campos elétricos superficiais são 9 e 12 com $16,19 \text{ kV}/\text{cm}$. O coeficiente de variação dos campos superficiais máximos de todos os condutores é $9,45\%$.

Figura 30 – Distribuição campo elétrico superficial: PTE



Fonte: autor

Comparando-se com as configurações que utilizam 4 subcondutores por fase, observa-se que a solução do projeto Paranaíba tem uma potência natural significativamente maior (aproximadamente 490 MW). Tal aumento se deve ao maior número de subcondutores, que possibilita a expansão do feixe mantendo-se os campos elétricos superficiais abaixo do limite em que começariam a apresentar corona visual.

Comparando a distribuição dos campos elétricos superficiais nos condutores do projeto Paranaíba com as distribuições das configurações de 4 subcondutores apresentadas nas seções anteriores, observa-se que os campos da configuração do projeto Paranaíba estão mais desbalanceados. Isso ocorre devido aos baixos campos superficiais dos condutores mais externos das fases laterais (1-3-5 e 13-15-17). Os campos poderiam ser

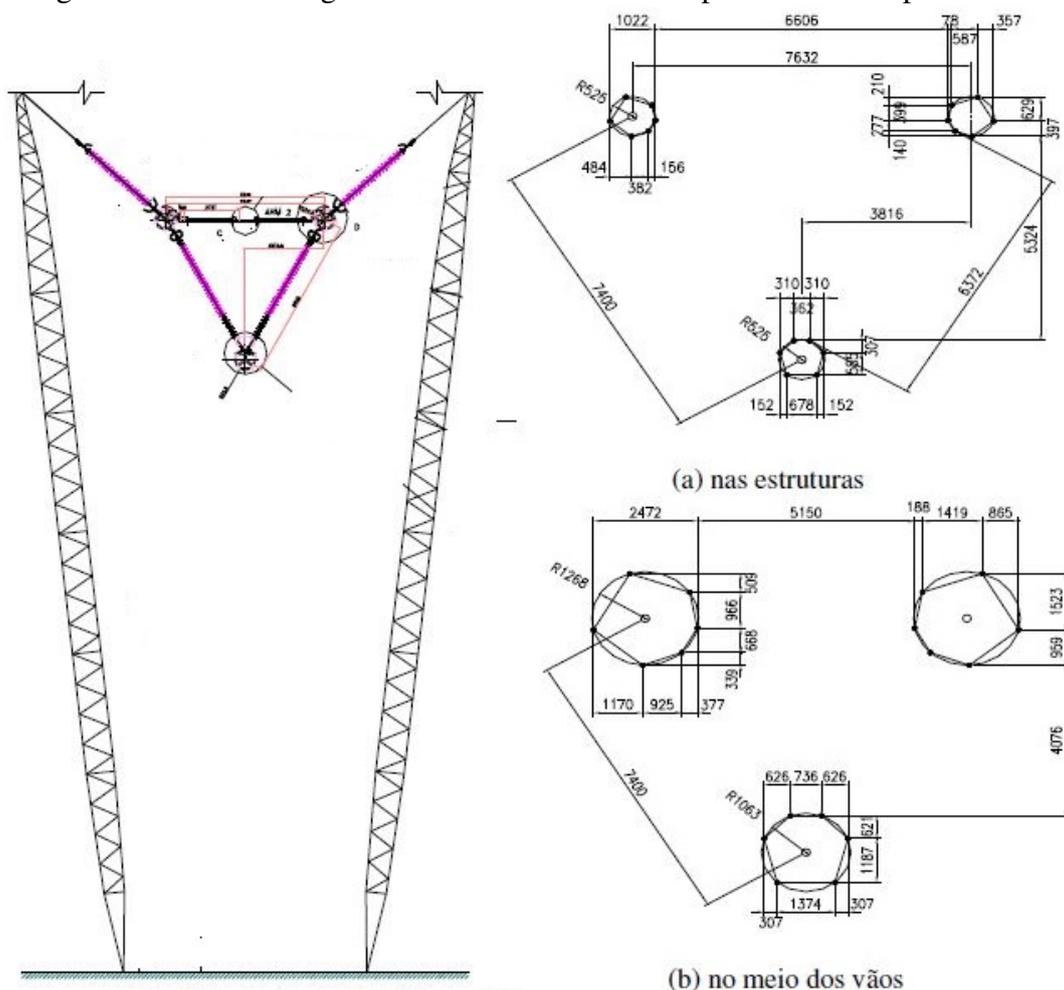
mais equalizados caso esses condutores fossem mais afastados entre si. Além de reduzir a dispersão, tal ação aumentaria a potência natural e a média dos campos superficiais da configuração. Entretanto na prática, essa ação dificulta a estabilidade mecânica do feixe, aumentando muito o custo e os desafios associados a amortecimento e espaçamento dos feixes.

5.1.7 Cross-ropes experimental FURNAS

Um projeto de pesquisa e desenvolvimento coordenado por FURNAS em meados dos anos 2000 teve como objetivo desenvolver e testar uma nova concepção de linha de transmissão de alta capacidade que servisse como base para viabilizar linhas de transmissão que transportassem grandes blocos de potência. Para isso, o projeto construiu e energizou um trecho experimental de 2,3 km na antiga LT 500 kV Angra / Adrianópolis, utilizando uma geometria de feixe e de fases assimétrica inédita e não convencional. Foram utilizadas estruturas do tipo cross-ropes com fases dispostas em triângulo invertido. Os 6 subcondutores CAA 954 MCM RAIL estão dispostos de forma assimétrica no feixe expandido (AMON *et al.*, 2009).

A silhueta da estrutura e a geometria das fases são apresentadas na Figura 31.

Figura 31 – Silhueta e geometria das fases - cross-ropes FURNAS experimental

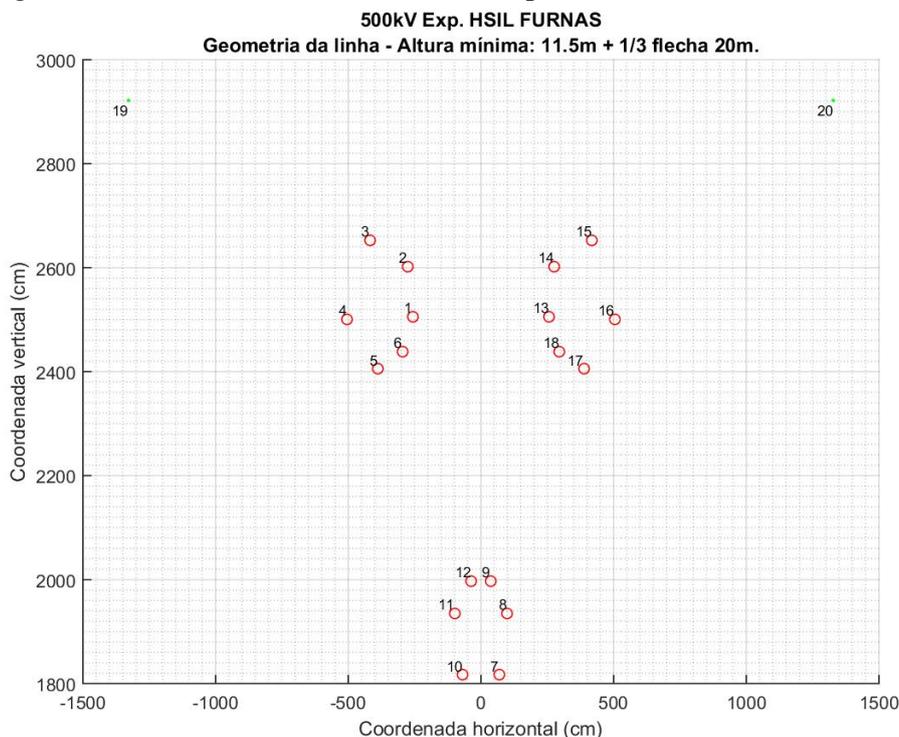


Fonte: adaptado de (AMON *et al.*, 2009)

A Figura 32 apresenta a configuração geométrica dos condutores e dos para-raios na altura média da torre tipo cross-robe experimental da Figura 31. Essa configuração resulta nos seguintes valores:

- potência natural, $SIL=1840,7$ MW ($Z_c=135,8 \Omega$);
- reatância série de sequência positiva, $X_L=0,1724 \Omega/\text{km}$;
- capacitância em derivação, $C=24,79$ nF/km;
- distância média geométrica entre fases, $GMD=7,03$ m;
- raio médio geométrico das fases laterais, $GMR=77,7$ cm;
- raio médio geométrico da fase central, $GMR=68,4$ cm.

Figura 32 – Geometria das fases trecho experimental em 500 kV de Furnas

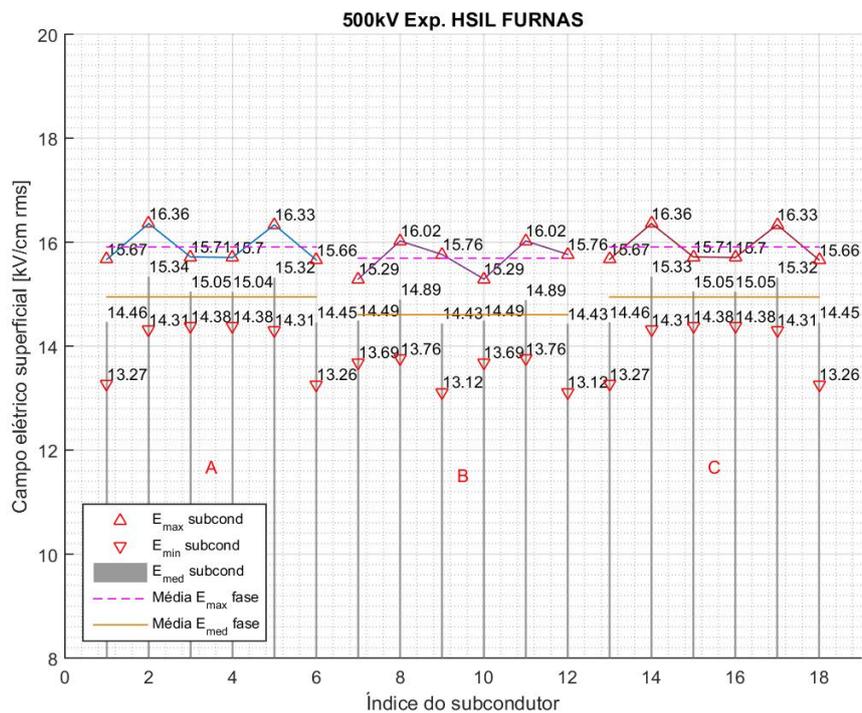


Fonte: autor

A Figura 33 mostra os valores dos campos elétricos superficiais nos subcondutores da configuração apresentada na Figura 32. A média dos valores máximos de campo elétrico superficial nos condutores é $15,84$ kV/cm. A média dos campos máximos nas fases laterais é $15,91$ kV/cm e na fase central é $15,69$ kV/cm. Os subcondutores com maiores campos elétricos superficiais são 2 e 14 com $16,36$ kV/cm. O coeficiente de variação dos campos superficiais máximos de todos os condutores é $2,05\%$.

Comparando-se os resultados do projeto Paranaíba com os do projeto de FURNAS, observa-se que a configuração de FURNAS é mais otimizada do ponto de vista de distribuição de campos elétricos superficiais e potência natural. A configuração do trecho experimental de furnas apresenta uma potência natural 180 MW maior que o projeto Paranaíba e um desbalanceamento de campos elétricos bem menor ($2,05\%$ contra $9,45\%$).

Figura 33 – Distribuição campo elétrico superficial: trecho experimental de Furnas



Fonte: autor

No entanto, a dificuldade de execução das ferragens e a incerteza associada ao comportamento mecânico de longo prazo dos sistemas de amortecimento e espaçadores faz com que a solução de uma linha de transmissão de 500 kV com tal configuração seja arriscada para um empreendimento comercial de transmissão ou até mesmo economicamente inviável.

5.2 Diretrizes de otimização

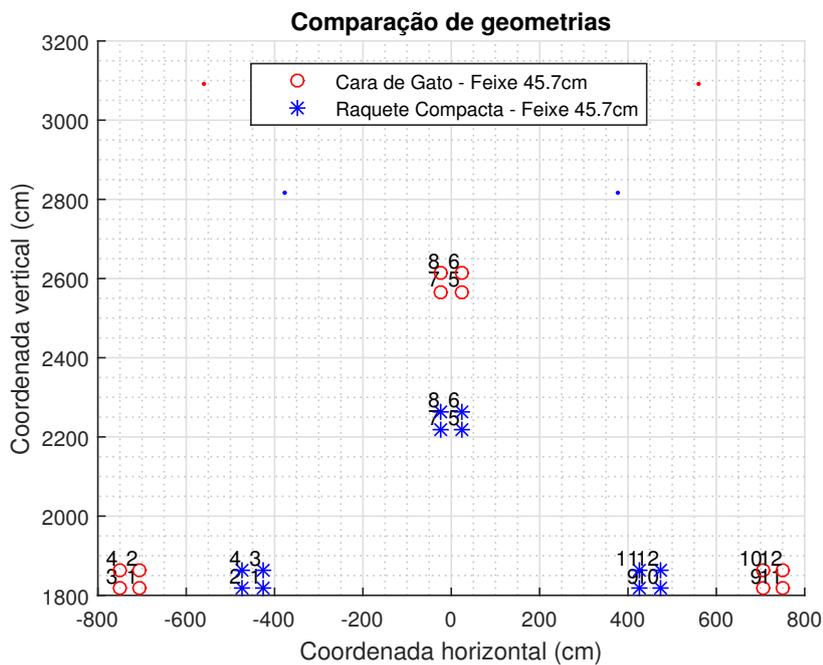
Esta seção apresenta os resultados dos cálculos elétricos realizados para identificar o efeito das modificações geométricas do feixe de fases sobre os parâmetros elétricos da LT. São avaliados os efeitos da compactação das fases, expansão do feixe e modificações na simetria da disposição dos subcondutores.

5.2.1 Compactação das fases

A compactação das fases tem efeito sobre o *SIL*, campo elétrico e sua dispersão. A Figura 34 apresenta duas geometrias de LTs com o mesmo condutor e espaçamento. A LT em vermelho representa a geometria tipo cara de gato apresentada na Figura 35. A LT em azul representa uma geometria conhecida como raquete compacta, apresentada na Figura 36, com o mesmo condutor e geometria de feixes.

A Tabela 2 apresenta a comparação dos resultados para as duas geometrias. Observa-se que a compactação das fases aumenta a potência natural da LT, diminui a indutância de sequência positiva através do aumento da indutância mútua entre fases. Isso propicia um aumento da potência natural por área de alumínio. A compactação de fases também

Figura 34 – Compactação de fases LT 500kV - geometrias



aumenta os campos elétricos na superfície dos condutores e sua dispersão ³.

Tabela 2 – Efeito da compactação de fases em LT 500kV

Tipo de torre	Cara de gato	Raquete compacta
Distância média geométrica (GMD) [m]	11,68	6,88
SIL - 500kV [MW]	1031	1186
kW SIL por área de Al [kW/mm ²]	177,8	204,6
Reatância [Ω /km]	0,3072	0,2673
Capacitância [nF/km]	13,87	15,97
Média dos campos elétricos máximos (fase central) [kV/cm]	14,89	17,33
Dispersão campo elétrico [%]	3,79	5,74

5.2.2 Expansão do feixe

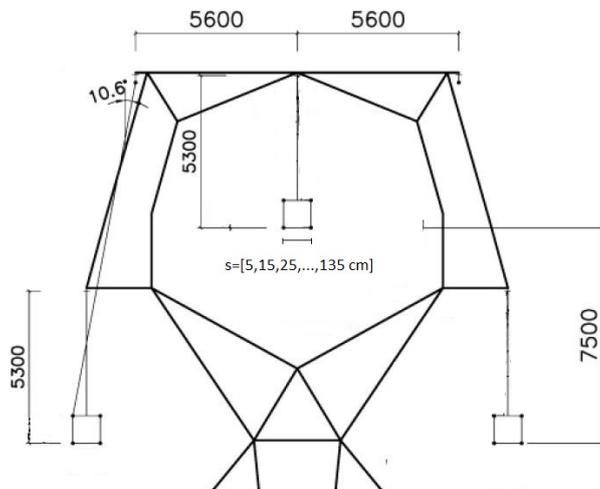
A expansão do feixe tem efeito significativo sobre a potência natural da LT e sobre a magnitude do campo elétrico superficial nos condutores. O efeito da expansão do feixe foi avaliado calculando os parâmetros elétricos para diversos afastamentos de um feixe quadrado. Duas LTs foram avaliadas e comparadas: a torre tipo cara de gato e a torre tipo raquete compacta.

As Figuras 35 e 36 apresentam as geometrias da cabeça de torre do tipo cara de gato e raquete compacta, respectivamente.

A Figura 37 mostra o efeito da expansão do feixe sobre a potência natural das duas linhas.

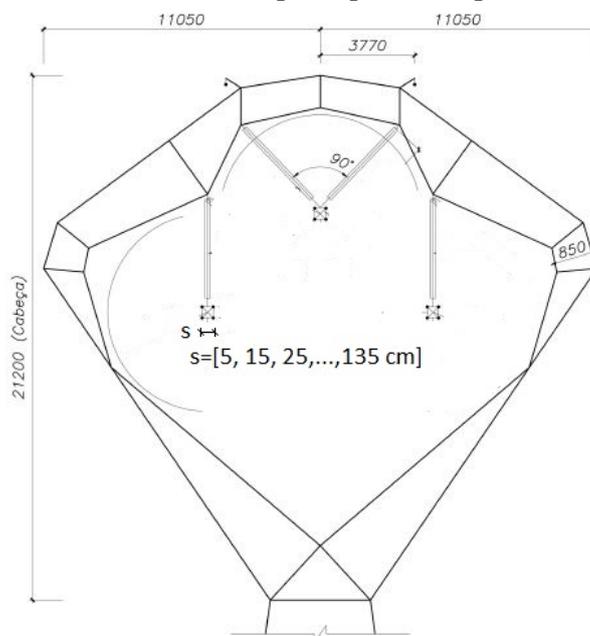
³Coefficiente de variação, conforme definido na Seção 4.1

Figura 35 – Geometria LT 500kV tipo cara de gato - Expansão do feixe



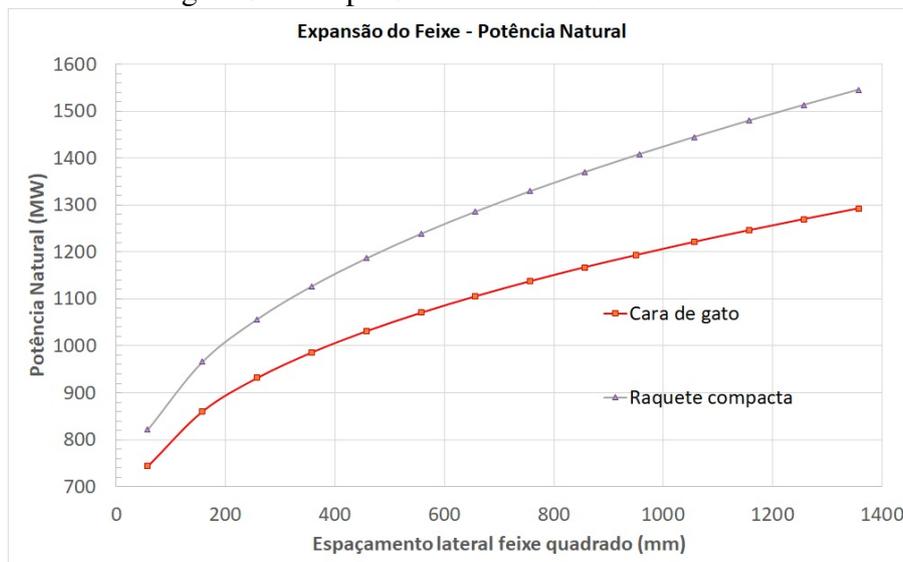
Fonte: adaptado de (FERNANDES *et al.*, 2008)

Figura 36 – Geometria LT 500kV tipo raquete compacta - Expansão do feixe



Fonte: adaptado de (FERNANDES *et al.*, 2008)

Figura 37 – Expansão do feixe - Potência natural

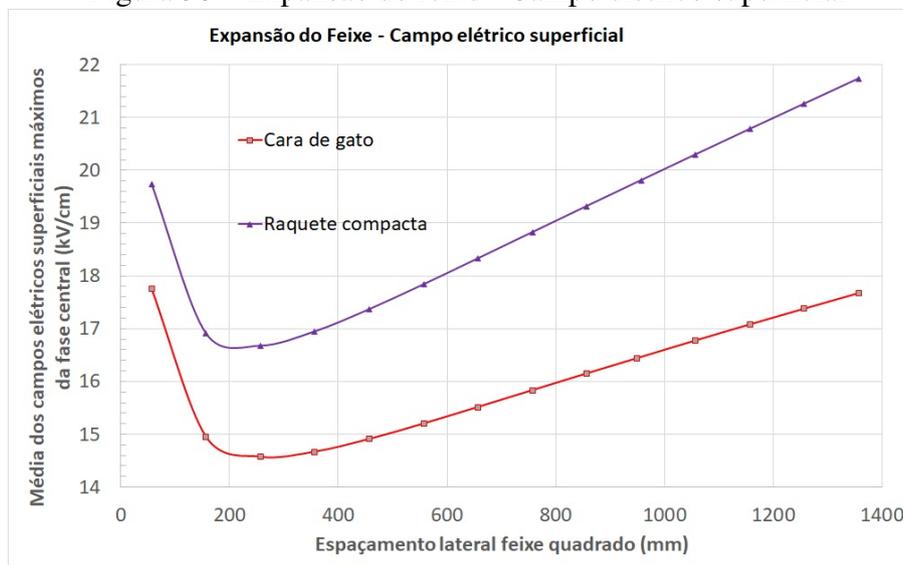


Fonte: autor

Observa-se que a expansão do feixe aumenta a potência natural das duas linhas. Na torre raquete compacta, o aumento potência natural é mais acentuado que na torre tipo cara de gato, pois esta última tem fases mais afastadas.

A Figura 38 apresenta o efeito da expansão do feixe sobre a média dos campos elétricos superficiais máximos da fase central.

Figura 38 – Expansão do feixe - Campo elétrico superficial



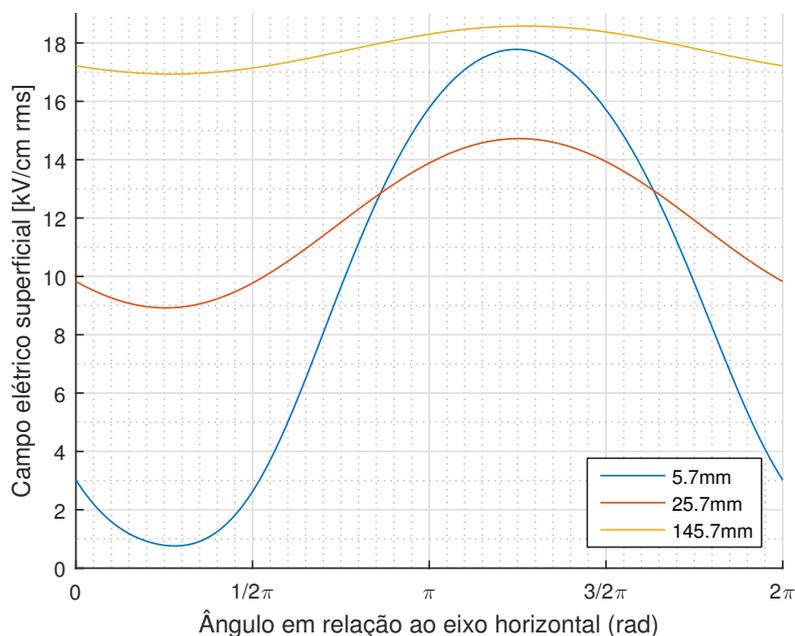
Fonte: autor

Observa-se que em ambas as geometrias, a expansão do feixe aumenta significativamente o campo elétrico superficial dos condutores. Na torre mais compacta, o aumento é mais acentuado. Quando se expande o feixe, aumenta-se a capacitância e, portanto, a quantidade de carga acumulada em cada subcondutor. Esse aumento causa o aumento do campo na superfície dos condutores. Por outro lado, conforme o feixe é compactado, o campo elétrico na superfície dos condutores diminui pela redução da capacitância. A

tendência de diminuição do campo elétrico máximo em um subcondutor se mantém até um determinado afastamento, a partir do qual a compactação do feixe passa a aumentar o campo elétrico máximo nos condutores. Esse aumento ocorre, pois a proximidade das cargas de um subcondutor com as do outro causa distorção na distribuição de cargas na superfície dos subcondutores. Essa distorção aumenta a amplitude de valores de campos superficiais em um subcondutor, diminuindo os campos nas regiões mais internas ao feixe e aumentando nas regiões mais externas. Observa-se também que, em feixes mais expandidos, a influência das cargas dos subcondutores vizinhos da mesma fase é menor. Isso faz com que a distribuição das cargas ao redor de um subcondutor seja mais uniforme e, conseqüentemente, a amplitude da variação do perfil campo elétrico também seja menor.

A Figura 39 mostra o perfil do campo elétrico na superfície do subcondutor 7 da torre cara de gato (vide Figura 34) de acordo com o espaçamento do feixe. São representadas as situações em que o espaçamento é 5,7 cm, 25,7 cm e 145,7 cm. É possível observar que a amplitude entre o campo máximo e o mínimo em um mesmo condutor aumenta conforme diminui o espaçamento. Para afastamentos pequenos, a região do condutor mais interna do feixe tem um campo muito pequeno (aproximadamente 1 kV/cm). Porém, a região mais externa tem um campo elétrico bem mais alto, que se aproxima do campo elétrico máximo encontrado para a situação em que o afastamento é de 145 cm.

Figura 39 – Expansão do feixe - efeito sobre perfil do campo elétrico superficial

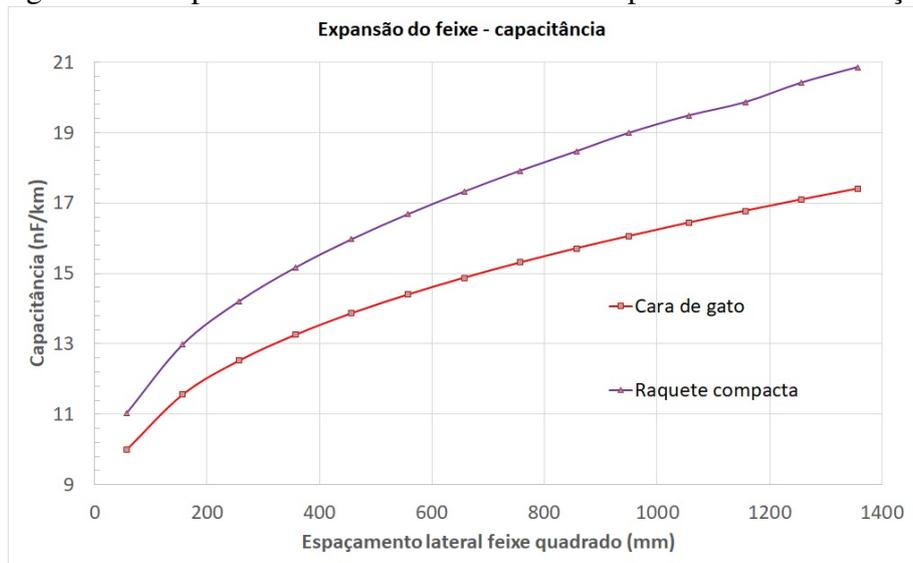


Fonte: autor

A Figura 40 mostra o efeito da expansão do feixe sobre a capacitância das linhas. Para ambas as geometrias de LTs, a expansão do feixe aumenta a capacitância de sequência positiva. Observa-se que a torre mais compacta tem maior capacitância. A Figura 40 deixa claro que o aumento da capacitância em derivação da linha pode ser obtido não apenas pela expansão do feixe, mas também pela compactação das fases.

A Figura 41 mostra o efeito da expansão do feixe sobre a reatância série da linha. A expansão do feixe aumenta a parcela imaginária da impedância mútua entre as fases da LT, portanto a reatância de sequência positiva diminui. Dessa forma, a reatância série de

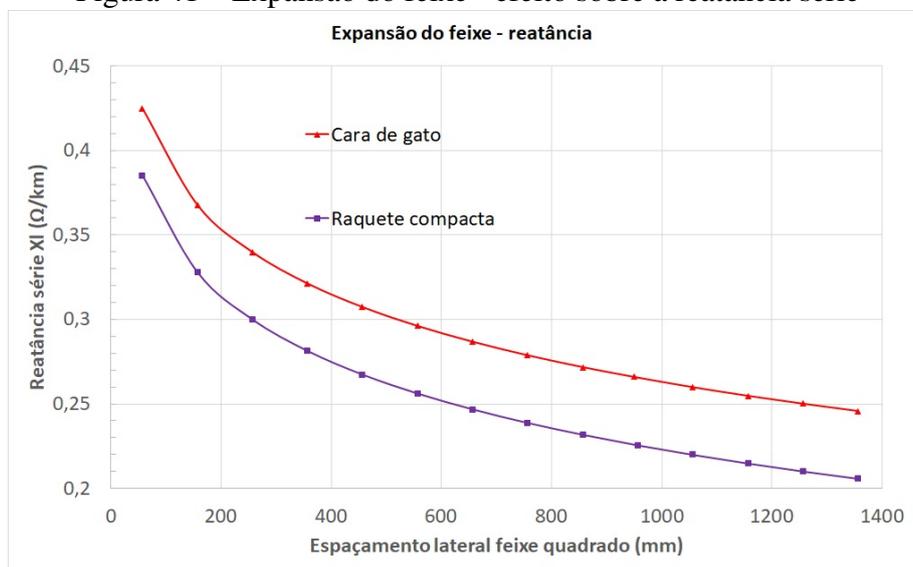
Figura 40 – Expansão do feixe - efeito sobre a capacitância em derivação



Fonte: autor

sequência positiva de uma linha é tão menor quando mais expandido for o feixe e mais compactas forem as fases.

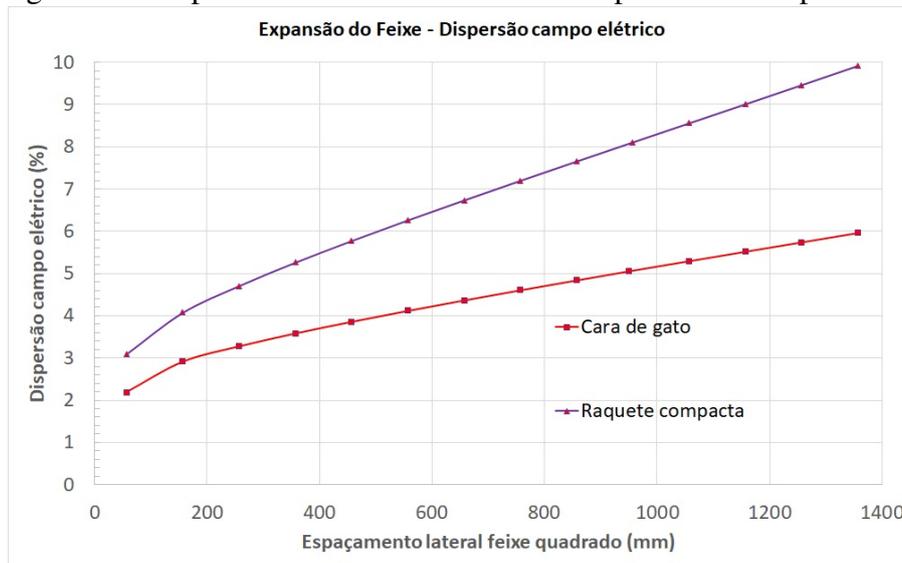
Figura 41 – Expansão do feixe - efeito sobre a reatância série



Fonte: autor

A Figura 42 apresenta o efeito da expansão do feixe na dispersão do campo elétrico superficial para o feixe quadrado simétrico. No caso de um feixe quadrado simétrico, cuja distância média geométrica entre fases permanece constante, a expansão do feixe aumenta a dispersão do campo elétrico. Observa-se que o aumento é mais acentuado na geometria mais compacta. Conforme apresentado na Seção 5.1, é possível expandir o feixe (aumentar o seu raio médio geométrico) e reduzir a dispersão do campo elétrico superficial. Isso é possível quando se afasta as fases e/ou se utilizam geometrias de feixe assimétricas.

Figura 42 – Expansão do feixe - efeito sobre dispersão do campo elétrico



Fonte: autor

5.2.3 Número de subcondutores

Esta seção analisa o efeito do número de subcondutores no feixe, mantendo o afastamento entre fases e a expansão do feixe. Procura-se interpretar como o número de subcondutores por fase afeta os parâmetros elétricos e os campos superficiais dos condutores. Para analisar apenas a influência do número de subcondutores, foi considerado um círculo de raio fixo nos quais os subcondutores são posicionados nos vértices de um polígono regular inscrito. Dessa forma, os condutores de um feixe triplo são posicionados nos vértices de um triângulo equilátero, no feixe duplo nas extremidades de um segmento de reta, no feixe quádruplo nos vértices de um quadrado. Em outras palavras, todas as geometrias são polígonos regulares cujos condutores estão igualmente espaçados e inscritos em um círculo de raio 67,2 cm. Este raio de círculo foi escolhido pois é o raio do círculo cujo quadrado inscrito tem lado 95 cm.

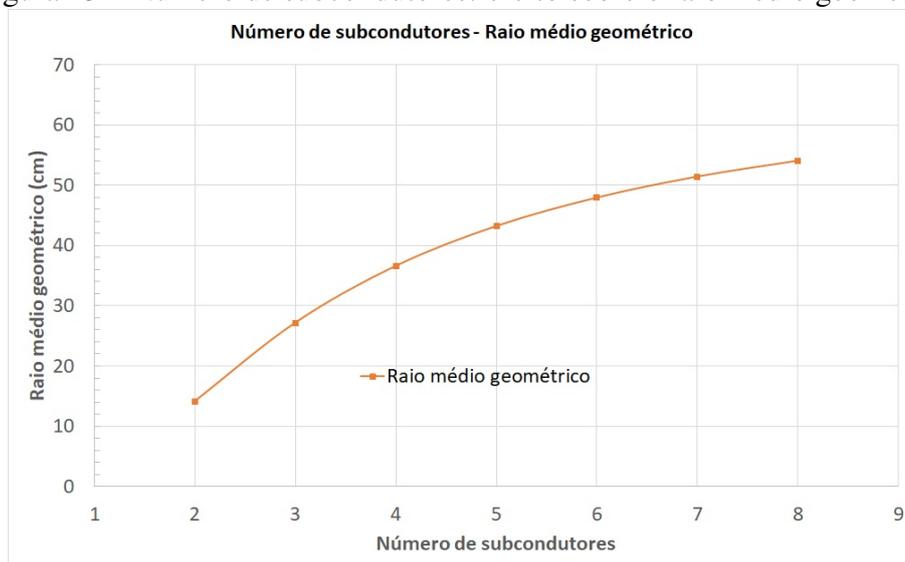
A Figura 43 apresenta o efeito que o aumento do número de subcondutores tem sobre o raio médio geométrico do feixe. Conforme o número de subcondutores aumentam, observa-se uma tendência de convergência assintótica para valores próximos ao raio do círculo (67,2 cm). Tal resultado é esperado uma vez que, conforme mais vértices têm um polígono inscrito em um círculo, mais o polígono se aproxima da forma do círculo⁴.

O número de subcondutores influencia na potência natural resultante da configuração. A Figura 44 apresenta a variação da potência natural e da impedância característica de acordo com o número de subcondutores por fase dispostos em um polígono regular inscrito em um círculo de raio 67,2 cm.

Assim como mostrado na Figura 44, observa-se uma tendência de convergência para a potência natural e para a impedância característica. Tal tendência se deve ao fato de que conforme o número de subcondutores aumenta, o raio médio geométrico do feixe aumenta cada vez menos. Desta forma, a partir de um determinado número de subcondutores

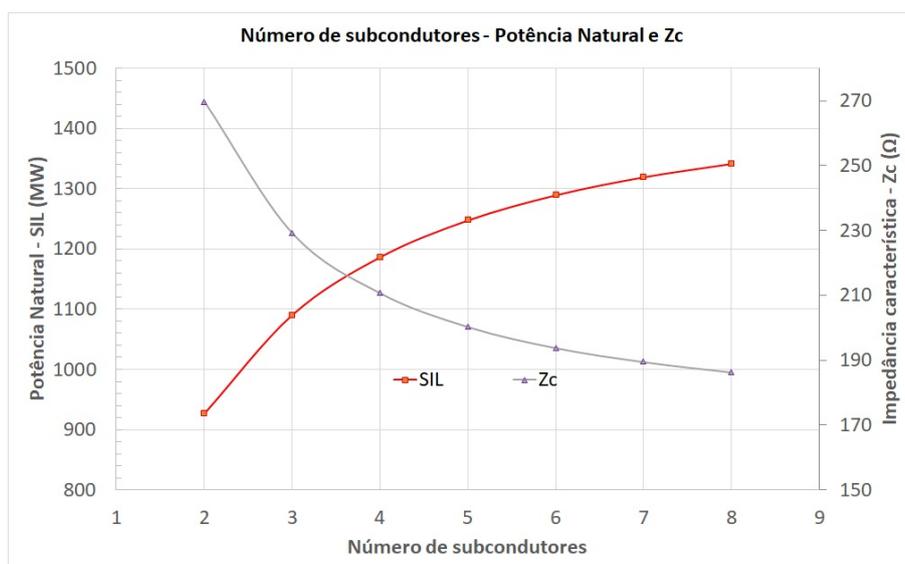
⁴A análise matemática da convergência da curva da Figura 43 ou a obtenção de uma equação que correlacione o número e diâmetro dos subcondutores com o raio médio geométrico do feixe não faz parte do escopo deste trabalho. Dessa forma, o autor se permite comentar o resultado observado e utilizar o termo “convergência” sem o rigor formal matemático. Eventuais imprecisões conceituais matemáticas aqui cometidas não invalidam a análise de engenharia à qual este trabalho se propõe.

Figura 43 – Número de subcondutores: efeito sobre o raio médio geométrico



Fonte: autor

Figura 44 – Número de subcondutores: efeito sobre potência natural e impedância característica

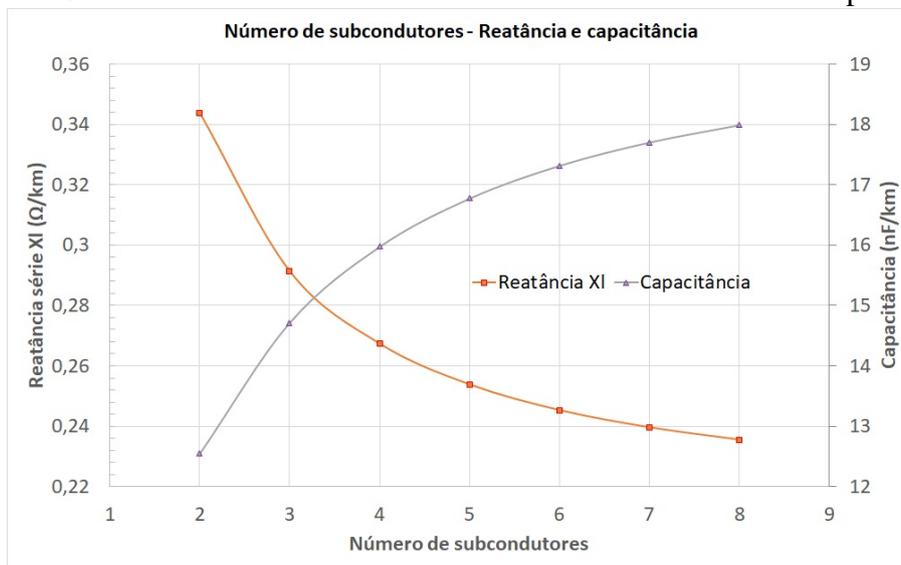


Fonte: autor

tores, a impedância característica não diminui significativamente e, portanto, a potência natural não aumenta. O aumento cada vez menor da potência natural conforme se aumenta o número de subcondutores do feixe pode ser interpretado a partir da observação do comportamento da reatância e da capacitância resultante.

A Figura 45 mostra a evolução da reatância e da capacitância conforme se aumenta o número de subcondutores no feixe. A capacitância e a reatância tendem a se estabilizar conforme o número de subcondutores cresce. Isso significa que a razão entre a indutância e a capacitância tende a ficar constante resultando em uma impedância característica que diminui cada vez menos.

Figura 45 – Número de subcondutores: efeito sobre a reatância e a capacitância



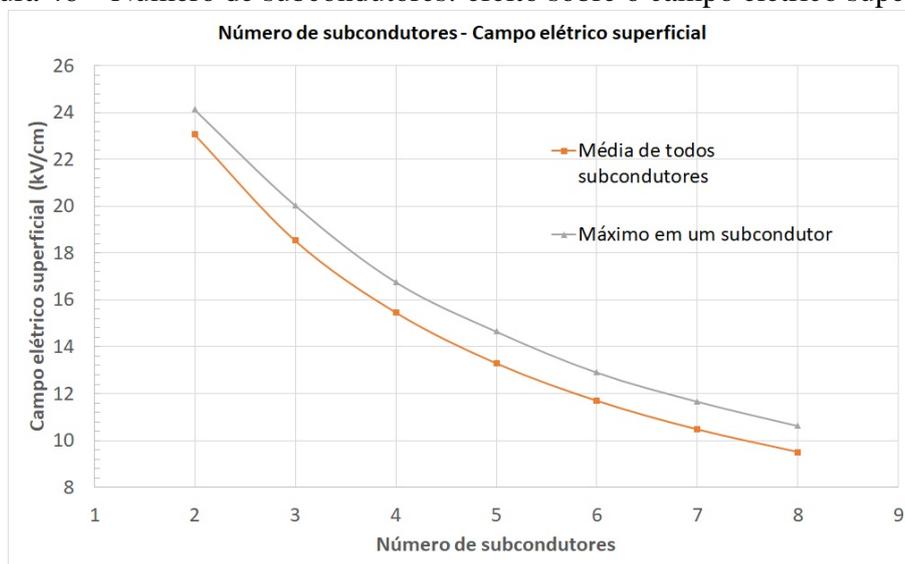
Fonte: autor

O aumento do número de subcondutores tem influência direta sobre a magnitude dos campos elétricos superficiais nos condutores de uma configuração. A Figura 46 apresenta o efeito do aumento do número de subcondutores sobre o campo elétrico superficial. Nesta figura, são apresentadas duas curvas: (i) a média do campo elétrico superficial máximo em todos os condutores e (ii) o valor máximo de campo elétrico superficial observado na configuração.

A Tabela 3 resume os resultados dos parâmetros elétricos e geométricos apresentados sobre a influência do número de subcondutores no feixe. O aumento no número de subcondutores reduz significativamente os valores de campos superficiais e aumenta a potência natural por meio da redução da reatância e aumento da capacitância. O aumento do número de subcondutores, por si só, não provoca um grande aumento na potência natural. Desta forma, se conclui que, devido à redução significativa dos campos superficiais, o aumento do número de subcondutores permite a expansão do feixe sem violar limites pré estabelecidos de campos superficiais.

O aumento do número de subcondutores também reduz muito a resistência de sequência positiva da linha, reduzindo, portanto, perdas ôhmicas ao longo da vida útil da linha. Entretanto, o número de subcondutores por fase tem um peso econômico significativo sobre os custos materiais e construtivos de uma linha de transmissão, pois influencia o peso das estruturas, fundações e serviços associados.

Figura 46 – Número de subcondutores: efeito sobre o campo elétrico superficial



Fonte: autor

Tabela 3 – Efeito do número de subcondutores.

Nº de subcondutores	2	3	4	5	6	7	8
Méd. E_{sup} (kV/cm)	23,06	18,53	15,46	13,29	11,69	10,46	9,49
Máx. E_{sup} (kV/cm)	24,13	20,04	16,77	14,66	12,91	11,67	10,63
Disp. E_{sup} (%)	3,64	4,48	5,09	5,55	5,92	6,21	6,45
Z_C (Ω)	269,7	229,2	210,7	200,3	193,8	189,4	186,3
SIL (MW)	927,1	1090,9	1186,8	1248,0	1289,7	1319,6	1341,8
GMD (m)	11,91	11,91	11,91	11,91	11,91	11,91	11,91
$GMR_{A,B,C}$ (cm)	14,10	27,16	36,60	43,21	47,94	51,43	54,07
X_L (Ω /km)	0,3438	0,2913	0,2673	0,2538	0,2453	0,2396	0,2355
C (nF/km)	12,5427	14,7155	15,9763	16,7765	17,3193	17,7063	17,9931

5.2.4 Assimetria da geometria do feixe

O feixe simétrico é aquele que os subcondutores estão posicionados nos vértices de um polígono regular. Nesta seção, são apresentados os efeitos da modificação da simetria do feixe sobre os parâmetros elétricos das linhas de transmissão.

Para identificar o efeito isolado da assimetria, a posição dos subcondutores no feixe foi considerada apenas sobre um círculo de raio fixo nas três fases. A distância entre os centros dos círculos de cada fase foi mantida constante, de forma tal que apenas a modificação na disposição dos subcondutores influenciasse os parâmetros elétricos. Duas geometrias de referência foram analisadas: (i) a geometria com torre tipo cara de gato com feixe quadrado de lado 95 cm e (ii) a geometria horizontal compacta com feixe quadrado 45,7 cm. A segunda geometria é a que mais se aproxima da geometria real de uma torre tipo cross rope. A análise comparativa detalhada da assimetria do feixe está nas Seções B.1.3 e B.1.4 do Apêndice B.

As Subseções 5.2.4.1 e 5.2.4.2 apresentam apenas os resultados das geometrias simétricas de referência, que tiveram suas simetrias modificadas a fim de gerar os resultados comparativos. A Subseção 5.2.4.3 apresenta o resumo das análises em forma de tabelas e pontos importantes de observação.

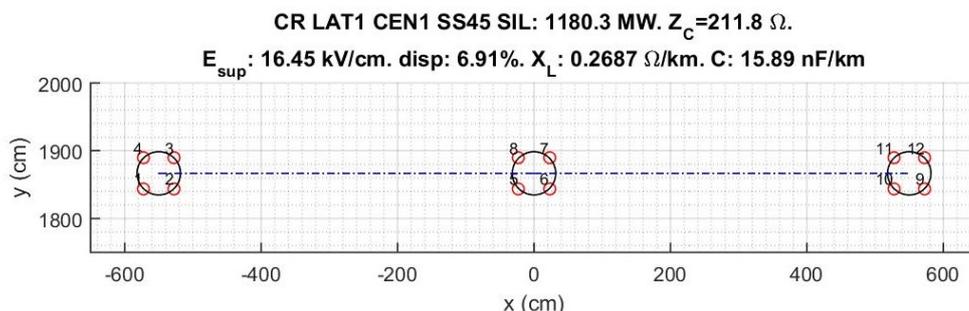
O código das soluções analisadas segue a seguinte convenção: uma geometria LXCXY tem o feixe das fases laterais dispostos conforme configuração X e feixe das fases centrais conforme Y. As configurações de todas os arranjos estudados são apresentadas no Apêndice B, Seções B.1.1 e B.1.2.

5.2.4.1 Geometria de referência em circuito horizontal compacto

A configuração L1C1 é definida como a de referência, pois os subcondutores estão dispostos de forma equidistante, formando um quadrado com lado 45,7 cm. A Figura 47 apresenta a configuração L1C1 do circuito horizontal compacto com quatro subcondutores por fase.

A configuração L1C1 resulta em uma potência natural de 1180,3 MW, uma média de campos elétricos superficiais máximos de 16,45 kV/cm e uma dispersão relativa dos campos de 6,93%.

Figura 47 – Circuito horizontal compacto - L1C1

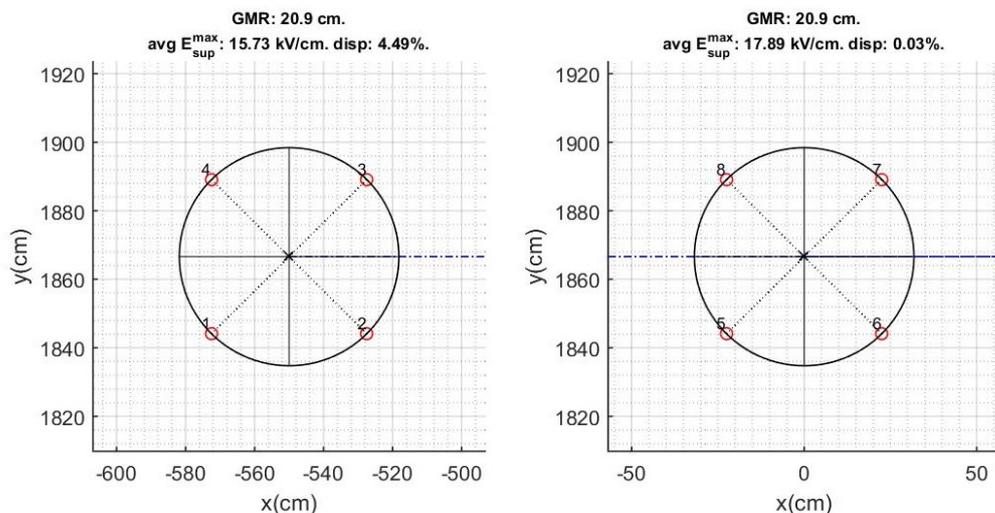


Fonte: autor

A Figura 48 mostra os detalhes da geometria dos feixes lateral e central. Em cima de cada feixe, é apresentado o valor do raio médio geométrico do feixe (GMR), a média dos campos elétricos superficiais máximos e a sua dispersão relativa.

A Figura 49 apresenta o detalhe dos cálculos dos campos elétricos superficiais em cada

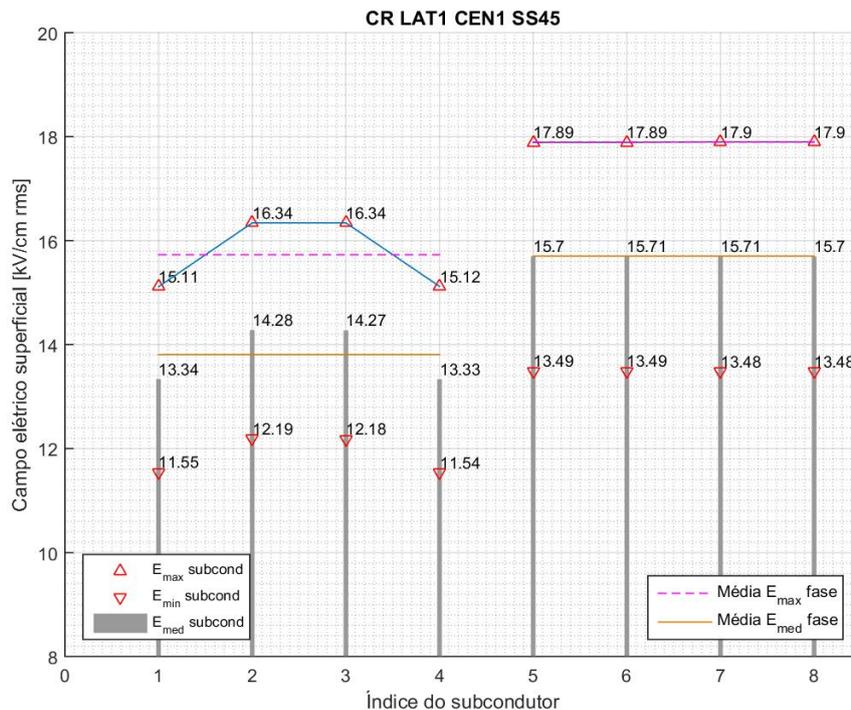
Figura 48 – Circuito horizontal compacto detalhe do feixe - L1C1



Fonte: autor

um dos subcondutores representados na Figura 48. Observa-se que os subcondutores mais externos (1 e 4) possuem os menores campos elétricos superficiais, pois estão mais longe do feixe central. Os subcondutores mais internos (2 e 3) estão mais próximos do feixe central e, portanto, possuem um campo elétrico superficial maior. Devido à simetria da configuração, os subcondutores da fase central possuem o mesmo campo elétrico.

Figura 49 – Campos superficiais configuração L1C1 - horizontal compacto

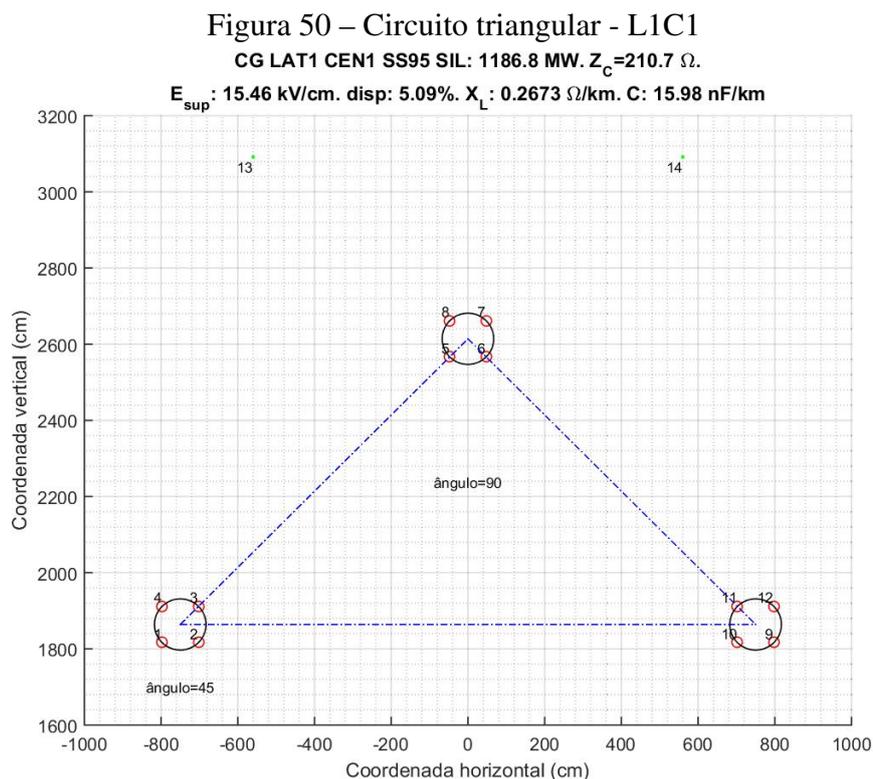


Fonte: autor

5.2.4.2 Geometria de referência circuito triangular

A configuração L1C1 é definida como a de referência, pois os subcondutores estão dispostos de forma equidistante, formando um quadrado com lado 45,7 cm. A Figura 50 apresenta a configuração L1C1 do circuito horizontal compacto com quatro subcondutores por fase.

A configuração L1C1 resulta em uma potência natural de 1186,8 MW, uma média de campos elétricos superficiais máximos de 15,46 kV/cm e uma dispersão relativa dos campos de 5,09%.

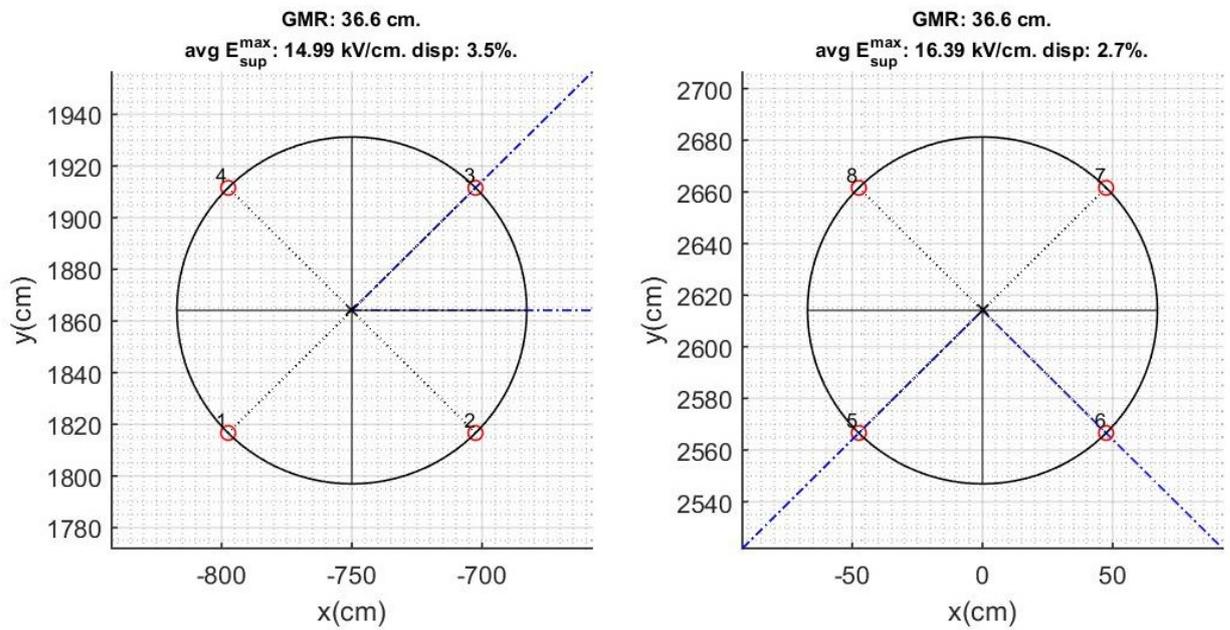


Fonte: autor

A Figura 51 mostra os detalhes da geometria dos feixes lateral e central. Em cima de cada feixe, é apresentado o valor do raio médio geométrico do feixe (GMR), a média dos campos elétricos superficiais máximos e a sua dispersão relativa.

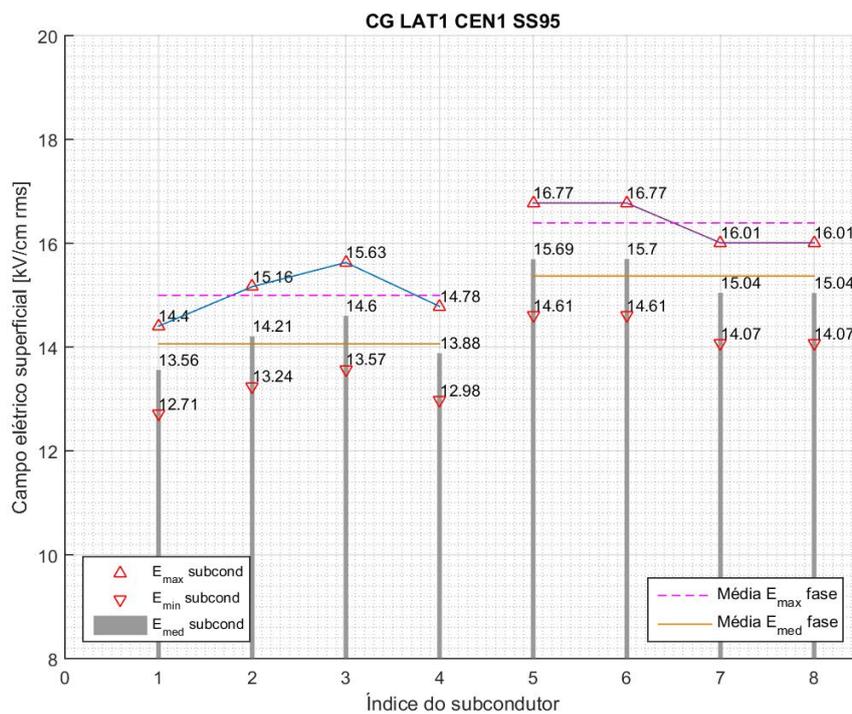
A Figura 52 apresenta os campos elétricos superficiais em cada um dos subcondutores representados na Figura 51. Observa-se que os subcondutores mais externos (1 e 4) possuem os menores campos elétricos superficiais, pois estão mais longe dos outros feixes. O subcondutor 3 está mais próximo do feixe central e, portanto, possui o maior campo elétrico superficial. O subcondutor 2 é o segundo mais carregado, devido a sua orientação direcionada para o feixe lateral oposto e mais próximo do feixe central.

Figura 51 – Circuito triangular detalhe do feixe - L1C1



Fonte: autor

Figura 52 – Campos superficiais configuração L1C1 - circuito triangular



Fonte: autor

5.2.4.3 Assimetria do feixe: discussão e resumo

A Tabela 4 apresenta um resumo dos resultados a respeito do efeito da assimetria do feixe no desempenho elétrico de uma LT com circuito horizontal compacto. Para cada uma das geometrias, tanto para as fases laterais quanto para a fase central, são apresentados o raio médio geométrico (GMR), a média do campo elétrico superficial e seus coeficientes de variação percentuais. As quatro colunas mais à direita mostram os valores resultantes da composição das fases laterais com a central. Nas duas colunas mais à direita, são mostrados a potência natural e a distância média geométrica da geometria em questão. A geometria L1C1 é considerada como a de referência. Para as demais geometrias, as quatro colunas mais à direita apresentam apenas a diferença absoluta se comparada com a referência.

Tabela 4 – Comparação: efeito da assimetria do feixe em circuito horizontal compacto

Solução	Fases Laterais			Fase Central			Total			
	GMR (cm)	E_{sup}^{avg} (kV/cm)	Disp. (%)	GMR (cm)	E_{sup}^{avg} (kV/cm)	Disp. (%)	E_{sup}^{avg} (kV/cm)	Disp. (%)	SIL (MW)	GMD (m)
L1C1	20,9	15,73	4,49	20,9	17,89	0,03	16,45	6,91	1180,3	6,93
							Δ	Δ	Δ	Δ
L1C2	20,9	15,73	4,50	20,9	17,89	0,61	0,00	0,01	0,0	0,00
L10C1	18,4	15,74	3,80	20,9	17,82	0,02	-0,01	-0,41	-21,8	-0,14
L12C1	20,1	15,77	1,30	20,9	17,87	0,03	0,02	-0,83	-6,8	-0,05
L12C7	20,1	15,69	1,39	19,2	17,87	0,04	-0,03	-0,58	-16,5	-0,04
L12C9	20,1	15,71	1,36	19,2	17,93	0,02	0,00	-0,49	-16,0	-0,05
L14C1	18,4	15,53	10,47	20,9	17,60	0,02	-0,23	2,39	-34,8	0,15
L14C7	18,4	15,45	10,42	19,2	17,61	0,03	-0,28	2,52	-44,2	0,15

A Tabela 5 apresenta um resumo dos resultados a respeito do efeito da assimetria do feixe no desempenho elétrico de uma LT com circuito horizontal compacto.

Tabela 5 – Comparação: efeito da assimetria do feixe em circuito triangular

Solução	Fases Laterais			Fase Central			Total			
	GMR (cm)	E_{sup}^{avg} (kV/cm)	Disp. (%)	GMR (cm)	E_{sup}^{avg} (kV/cm)	Disp. (%)	E_{sup}^{avg} (kV/cm)	Disp. (%)	SIL (MW)	GMD (m)
L1C1	36,6	14,99	3,50	36,6	16,39	2,70	15,46	5,09	1186,8	11,91
							Δ	Δ	Δ	Δ
L3C1	32,1	14,79	10,89	36,6	16,37	2,71	-0,14	3,91	-20,9	-0,28
L4C1	27,6	14,43	12,02	36,6	16,31	2,73	-0,41	5,06	-46,3	-0,51
L4C3	27,6	14,40	12,01	32,1	16,05	4,01	-0,51	4,84	-56,8	-0,64
L6C1	32,1	14,66	17,53	36,6	16,24	2,57	-0,27	7,91	-35,3	0,26
L6C5	32,1	14,57	17,39	32,1	15,86	7,70	-0,46	8,16	-52,3	0,38
L8C1	35,1	14,95	2,60	36,6	16,38	2,70	-0,03	-0,15	-6,6	-0,09
L8C7	35,1	14,91	2,66	35,1	16,21	2,93	-0,12	-0,43	-16,2	-0,09
L8C8	35,1	14,94	2,61	35,1	16,32	3,18	-0,06	-0,20	-10,1	-0,13

A análise dos resultados das Tabelas 4 e 5 possibilita conclusões importantes a respeito

do efeito do posicionamento dos condutores sobre um círculo de raio fixo. Os resultados mostrados nas Seções B.1.3 e B.1.4 podem ser resumidos nos seguintes pontos:

- o feixe central, via de regra, tem subcondutores cujos campos elétricos superficiais são superiores aos das fases laterais;
- a condição de simetria (em que todos os subcondutores estão dispostos em um polígono regular) é a condição que maximiza o raio médio geométrico de um feixe;
- qualquer ação de reposicionamento de subcondutores equidistantes entre si, reduzirá o raio médio geométrico e, portanto, reduzirá a potência natural de uma configuração;
- a aproximação de subcondutores reduz seus campos elétricos superficiais;
- o afastamento de subcondutores aumenta seus campos elétricos superficiais;
- nos feixes simétricos, os subcondutores que estão direcionados para as fases vizinhas têm campos superficiais maiores;
- nos feixes simétricos, os subcondutores que estão na direção oposta das fases vizinhas têm campos superficiais menores;
- a aproximação dos subcondutores voltados para as fases vizinhas reduz seus campos superficiais e aumenta o campo dos subcondutores voltados para a direção oposta, equalizando o carregamento dos subcondutores no feixe;
- sobre um círculo de raio fixo, a aproximação dos subcondutores direcionados para as fases vizinhas reduz a distância média geométrica (GMD) entre fases, tendo dois possíveis efeitos: (i) o aumento dos campos nos condutores das outras fases devido à redução da GMD e (ii) a redução de seus próprios campos elétricos superficiais.

A análise das configurações assimétricas indicam que a assimetria do feixe não possibilita aumentar a potência natural das linhas. Porém, o reposicionamento dos subcondutores no feixe pode melhorar significativamente a distribuição das cargas elétricas no feixe. Desta forma é possível equalizar e reduzir os valores do campos superficiais nos condutores.

5.2.5 Discussão sobre ações de otimização

A análise dos resultados das Subseções 5.2.1, 5.2.2, 5.2.3 e 5.2.4 possibilitou identificar combinações de ações que possibilitam melhorar os parâmetros elétricos de configurações de linhas de transmissão. Esta discussão foi baseada principalmente nos resultados obtidos para configurações que utilizam quatro subcondutores por fase, que é a situação mais frequente para linhas em 500 kV. Entretanto, as diretrizes de otimização discutidas valem também para configurações que utilizam 3, 5, 6 ou mais subcondutores.

A expansão do feixe em conjunto com a compactação das fases pode levar a um aumento dos campos elétricos superficiais nos condutores, excedendo os limites dos efeitos de corona. Uma vez que os condutores das fases centrais (ou intermediárias) têm maiores campos superficiais que os das fases laterais, a expansão dos feixes laterais mantendo o espaçamento expandido do feixe central pode aumentar a potência natural de uma LT, mantendo os valores de campos dentro dos limites aceitáveis.

A expansão simétrica de um feixe simétrico pode sobrecarregar os subcondutores voltados para as fases vizinhas. Desta forma, a aproximação destes subcondutores com seus vizinhos pode evitar essa sobrecarga, permitindo a expansão com uma equalização das cargas entre os outros subcondutores do feixe. De forma análoga, o afastamento dos subcondutores que estão na direção oposta das fases vizinhas aumenta o raio médio geométrico, possibilitando o aumento da potência natural e uma melhor equalização dos campos superficiais. Portanto, modificações na simetria do feixe expandido têm como principal vantagem equalizar os campos elétricos superficiais em seus condutores, permitindo que os campos das fases laterais sejam equalizados com o da fase central.

5.3 Geometrias obtidas do processo de otimização e comparação com LTs típicas

Nesta seção, são apresentadas algumas das geometrias obtidas através do algoritmo de otimização e estas são comparadas com as geometrias de referência apresentadas na Seção 5.1. As soluções geométricas apresentadas dominam as geometrias das LTs apresentadas na Seção 5.1, isto é, são melhores que a solução de referência em pelo menos um dos objetivos e não são piores em nenhum. Para cada uma das LTs apresentadas na Seção 5.1, são apresentadas três soluções que a dominam. A discussão detalhada sobre os valores e a interpretação dos resultados é feita na Seção 5.3.8. Cada uma das soluções dominantes apresentadas possui o melhor valor de um dos objetivos: impedância característica, média e dispersão do campo elétrico.

As Tabelas 6, 7, 8, 9 e 10 apresentam as comparações com os resultados das soluções dominantes das LTs apresentadas na Seção 5.1. Cada coluna representa uma geometria. A coluna “Referência” apresenta os valores calculados para a LT típica da Seção 5.1. A coluna “min Z_c ” apresenta os valores da solução dominante que minimiza a impedância característica da LT (ou seja, maximiza a potência natural). As colunas “min E_{sup} ” e “min disp” apresentam os cálculos para as soluções dominantes que minimizam a média dos campos superficiais e a sua dispersão, respectivamente. Nas linhas destas tabelas, são apresentados os valores dos três objetivos: média dos campos elétricos superficiais, dispersão dos campos, impedância característica e SIL da LT. Também são apresentados: a distância média geométrica (GMD), os raios médios geométricos (GMR) das fases laterais A e C e da fase central B, a reatância série X_L e a capacitância C . Nas três linhas finais, é apresentada uma comparação entre os objetivos de cada uma das soluções dominantes e os objetivos da solução de referência. O nome de cada solução resultante é código no formato NXXXFYYYGZZZ, que significa o elemento número XXX, que aparece na fronteira da geração YYY e foi originado na geração ZZZ.

A geometria de cada uma das soluções dominantes é comparada com geometria das LTs de referência da Seção 5.1 e a distribuição dos campos elétricos superficiais é apresentada. A avaliação das relações de dominância para as soluções de referência é apresentada na Seção 5.4.5.

A apresentação e comparação destas geometrias têm como objetivo ilustrar e entender a razão pelas quais os resultados têm desempenho elétrico superior. A discussão detalhada dos resultados é feita na Seção 5.3.8.

5.3.1 Comparação: cara-de-gato 45 cm

A Tabela 6 apresenta a comparação entre resultados da geometria da LT tipo cara de gato com feixe 45 cm e de algumas das soluções que a dominam. As soluções apresenta-

das na Tabela 6 são as soluções dominantes que possuem os melhores valores de cada um dos objetivos otimizados.

Tabela 6 – Comparação geometrias otimizadas - referência cara de gato 45 cm

Solução	Referência	1- min Z_c	2- min E_{sup}	3- min disp
	CG45	N810F69G67	N504F195G195	N368F22G13
Média E_{sup} (kV/cm)	14,21	14,16	13,94	14,04
Dispersão E_{sup} (%)	3,86	2,95	2,97	2,30
Z_c (Ω)	242,4	235,2	242,3	241,7
SIL (MW)	1031,2	1063,1	1031,8	1034,2
GMD (m)	11,68	13,77	13,66	13,48
$GMR_{A,C}$	21,14	30,29	24,46	28,56
GMR_B	21,14	24,13	25,39	18,12
X_L (Ω /km)	0,3072	0,2982	0,3071	0,3068
C (nF/km)	13,8654	14,3028	13,8738	13,9253
Comparação	Δ SIL	31,9	0,6	3,0
	Δ E_{sup}	-0,05	-0,27	-0,17
	Δ disp.	-0,91	-0,89	-1,56

As Figuras 53, 54 e 55 apresentam a comparação entre a geometria da torre tipo cara de gato com feixe 45 cm e as geometrias que minimizam a impedância característica, a média dos campos elétricos superficiais e a dispersão, respectivamente.

Figura 53 – Cara de gato 45 cm - minimização Z_c

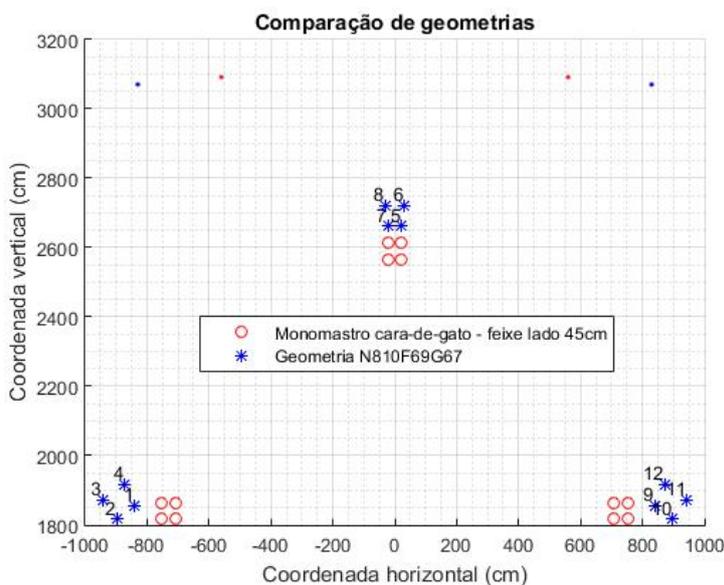


Figura 54 – Cara de gato 45 cm - minimização campo elétrico superficial

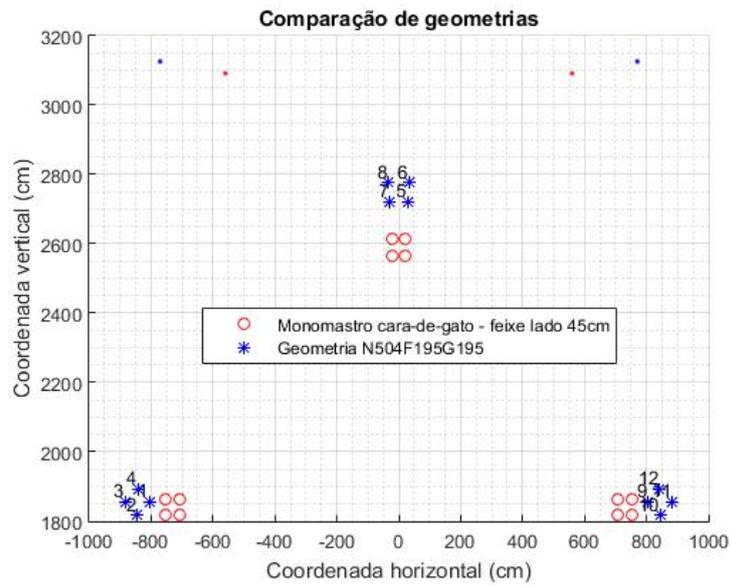
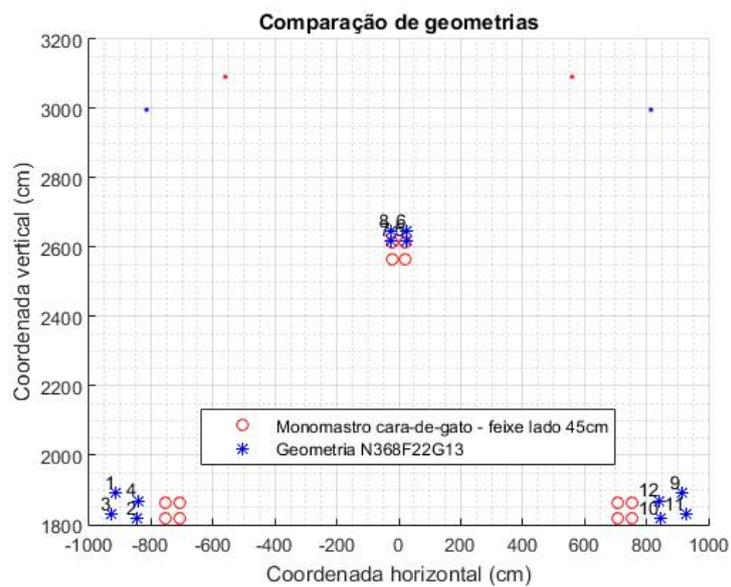
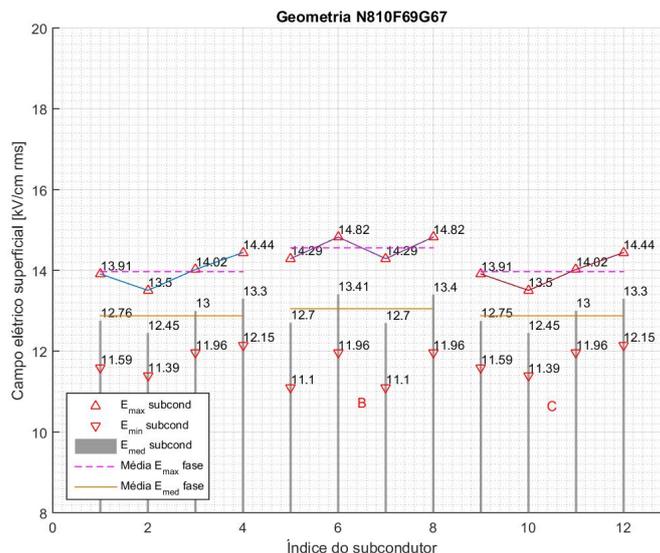


Figura 55 – Cara de gato 45 cm - minimização da dispersão



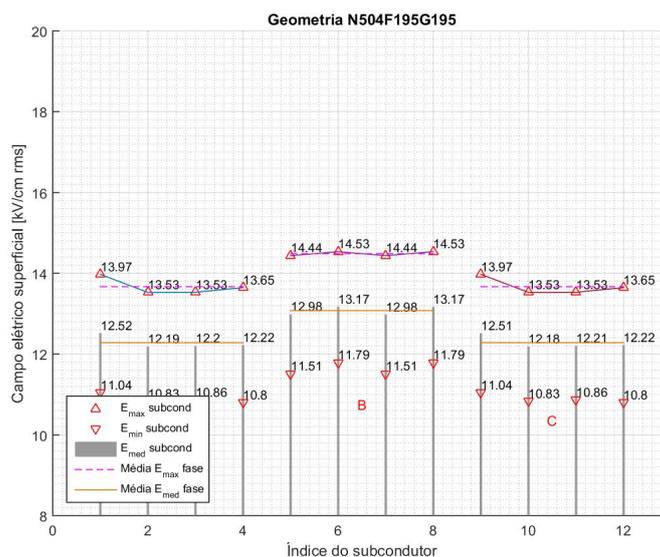
As Figuras 56, 57 e 58 apresentam a distribuição dos campos elétricos superficiais das soluções que dominam a geometria da torre tipo cara de gato com feixe 45 cm e que minimizam a impedância característica, a média dos campos elétricos superficiais e sua dispersão, respectivamente.

Figura 56 – Campo elétrico sup. otimizado para Z_c - ref. cara de gato 45 cm



Fonte: autor

Figura 57 – Campo elétrico sup. otimizado para E_{sup} - ref. cara de gato 45 cm

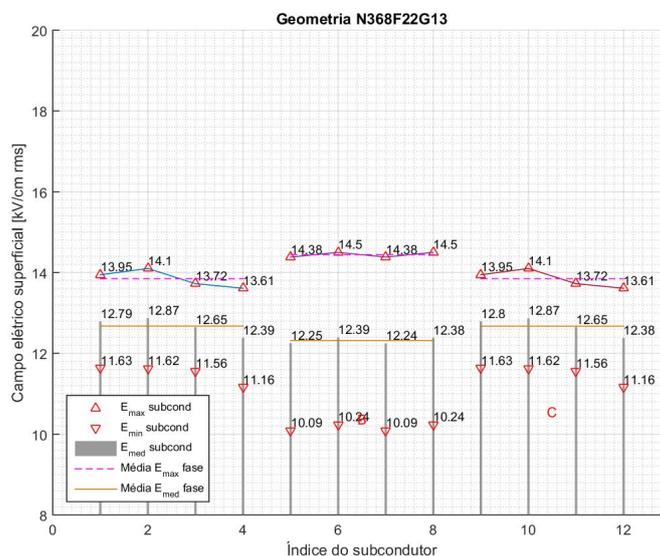


Fonte: autor

5.3.2 Comparação: Cara de gato 95 cm

A Tabela 7 apresenta a comparação entre resultados da geometria da LT tipo cara de gato com feixe 95 cm e das soluções que a dominam.

Figura 58 – Campo elétrico sup. otimizado para dispersão - ref. cara de gato 45 cm



Fonte: autor

Tabela 7 – Comparação geometrias otimizadas - referência cara de gato 95 cm

Solução	Referência	1- min Z_c	2- min E_{sup}	3- min disp
	CG95	N255F178G178	N700F105G105	N566F190G190
Média E_{sup} (kV/cm)	15,53	15,50	15,38	15,48
Dispersão E_{sup} (%)	5,05	3,64	3,53	0,28
Z_c (Ω)	209,6	207,6	209,6	209,5
SIL (MW)	1192,9	1204,3	1192,8	1193,4
GMD (m)	11,69	12,73	12,74	12,14
$GMR_{A,C}$ (cm)	36,6	46,8	44,9	46,4
GMR_B (cm)	36,6	31,4	31,0	24,6
X_L (Ω /km)	0,2659	0,2638	0,2663	0,2667
C (nF/km)	16,0588	16,2370	16,0775	16,1217
Comparação	Δ SIL	11,4	-0,1	0,5
	ΔE_{sup}	-0,03	-0,15	-0,04
	Δ disp.	-1,4	-1,5	-4,8

As Figuras 59, 60 e 61 apresentam a comparação entre a geometria da torre tipo cara de gato com feixe 95 cm e as geometrias que minimizam a impedância característica, a média dos campos elétricos superficiais e a dispersão, respectivamente.

Figura 59 – Cara de gato 95 cm - minimização Z_c

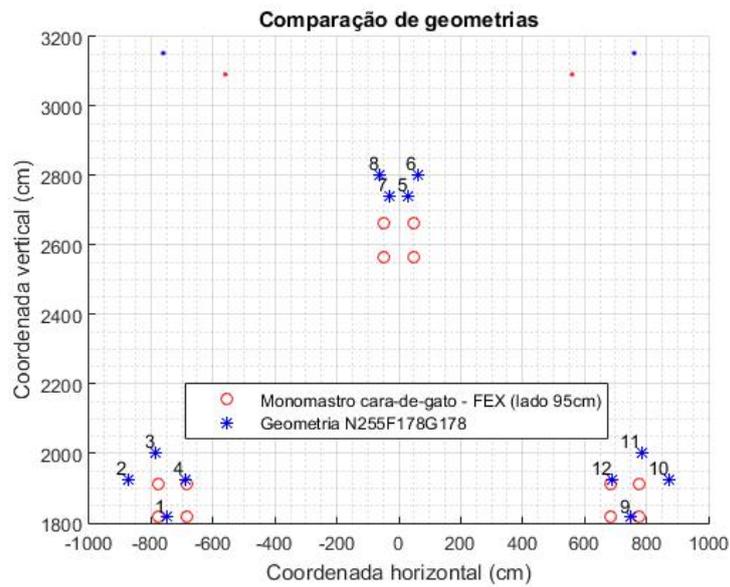


Figura 60 – Cara de gato 95 cm - minimização campo elétrico superficial

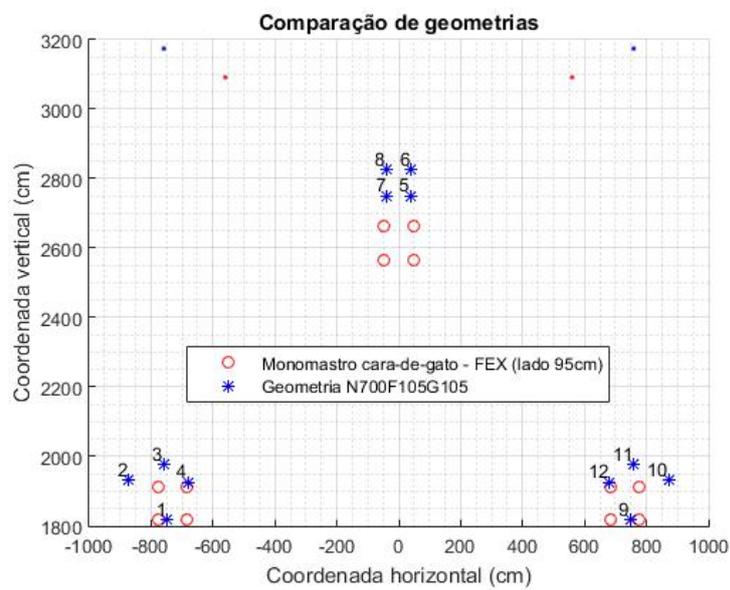
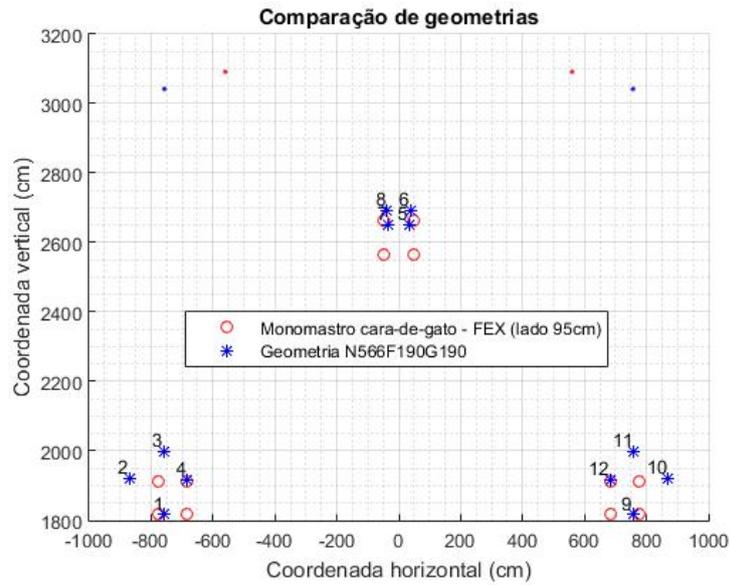


Figura 61 – Cara de gato 95 cm - minimização da dispersão



As Figuras 62, 63 e 64 apresentam a distribuição dos campos elétricos superficiais das soluções que dominam a geometria da torre tipo cara de gato com feixe 95 cm e que minimizam a impedância característica, a média dos campos elétricos superficiais e sua dispersão, respectivamente.

Figura 62 – Campo elétrico sup. otimizado para Z_c - ref. cara de gato 95 cm

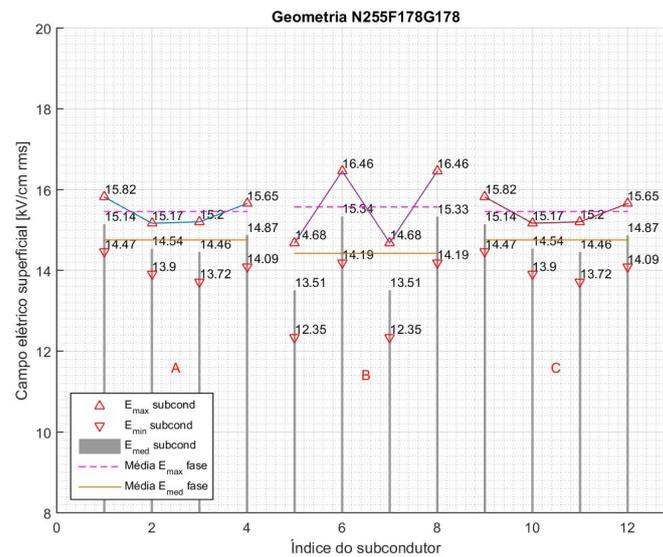
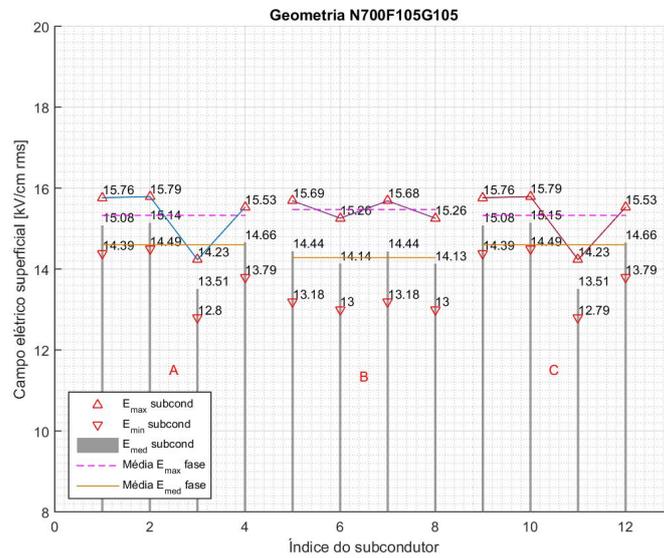
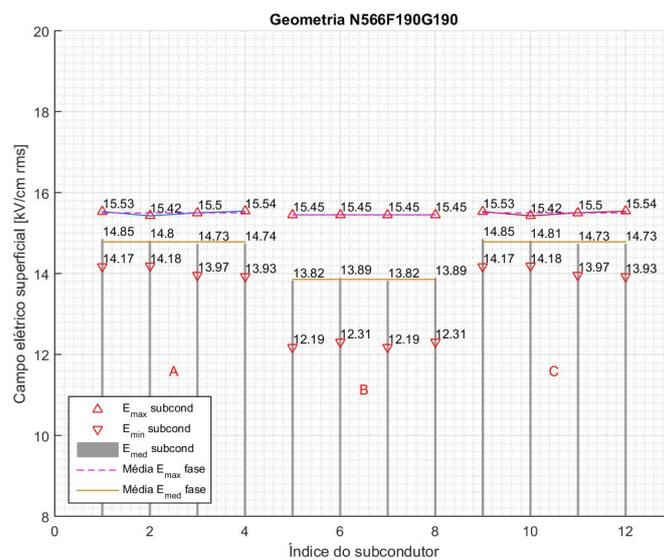


Figura 63 – Campo elétrico sup. otimizado para E_{sup} - ref. cara de gato 95 cm



Fonte: autor

Figura 64 – Campo elétrico sup. otimizado para dispersão - ref. cara de gato 95 cm



Fonte: autor

5.3.3 Comparação: Raquete compacta

A Tabela 8 apresenta a comparação entre resultados da geometria da LT com torre tipo raquete compacta com feixe quadrado de lado 45 cm e das soluções que a dominam.

Tabela 8 – Comparação geometrias otimizadas - referência raquete compacta 45 cm

Solução	Referência	1- min Z_c	2- min E_{sup}	3- min disp
	RC45	N474F26G26	N884F95G95	N435F40G40
Média E_{sup} (kV/cm)	16,27	16,22	15,88	16,21
Dispersão E_{sup} (%)	5,77	4,75	4,77	2,95
Z_c (Ω)	210,7	204,0	210,6	208,2
SIL (MW)	1186,4	1225,4	1186,9	1200,5
GMD (m)	6,88	8,44	8,27	8,10
$GMR_{A,C}$ (cm)	21,14	34,49	27,62	32,78
GMR_B (cm)	21,14	19,89	21,43	15,40
X_L (Ω /km)	0,2673	0,2596	0,2674	0,2655
C (nF/km)	15,9715	16,5473	15,9870	16,2423
Comparação	Δ SIL	39,0	0,5	14,1
	Δ E_{sup}		-0,05	-0,39
	Δ disp.		-1,02	-1,00

As Figuras 65, 66 e 67 apresentam a comparação entre a geometria da torre tipo raquete compacta com feixe 45 cm e as geometrias que minimizam a impedância característica, a média dos campos elétricos superficiais e a dispersão, respectivamente.

Figura 65 – Raquete compacta 45 cm - minimização Z_c

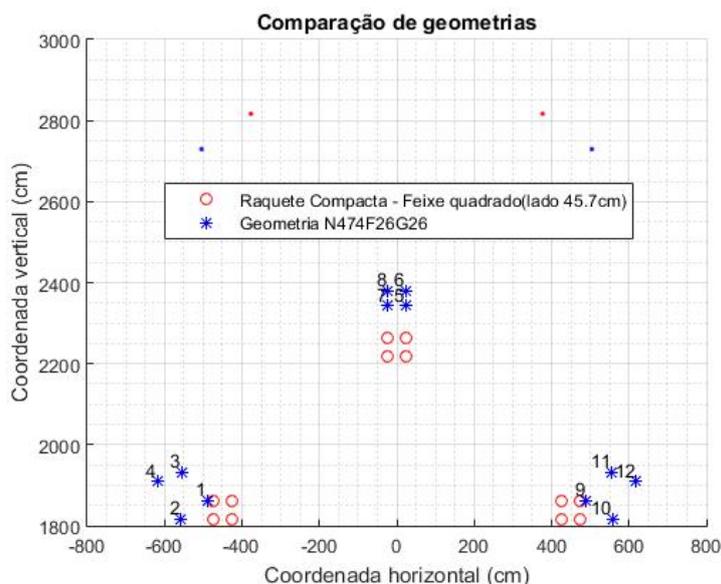
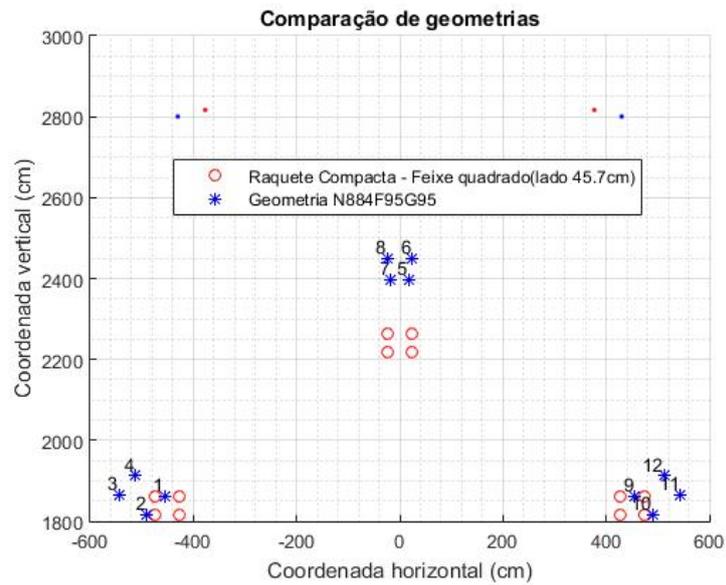
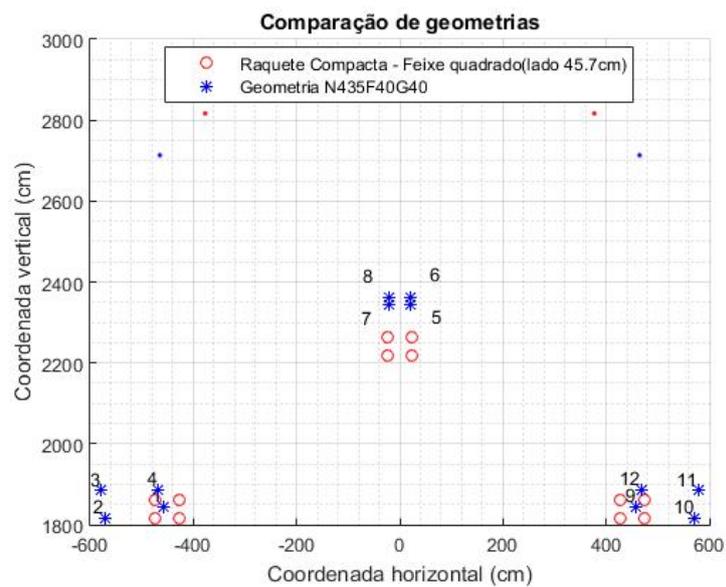


Figura 66 – Raquete compacta 45 cm - minimização campo elétrico superficial



Fonte: autor

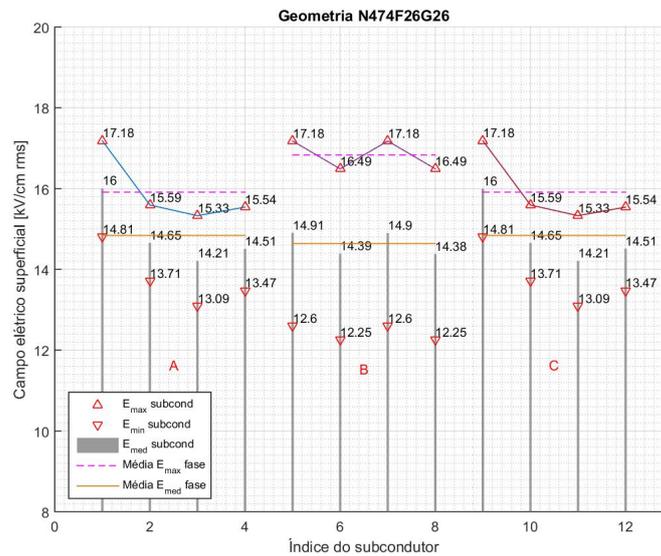
Figura 67 – Raquete compacta 45 cm - minimização da dispersão



Fonte: autor

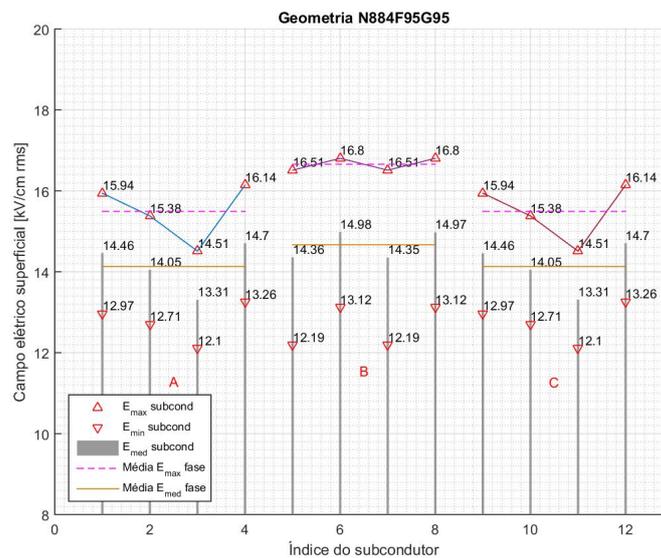
As Figuras 68, 69 e 70 apresentam a distribuição dos campos elétricos superficiais das soluções que dominam a geometria da torre tipo raquete compacta com feixe quadrado de 45 cm e que minimizam a impedância característica, a média dos campos elétricos superficiais e sua dispersão, respectivamente.

Figura 68 – Campo elétrico sup. otimizado para Z_c - ref. raquete compacta 45 cm



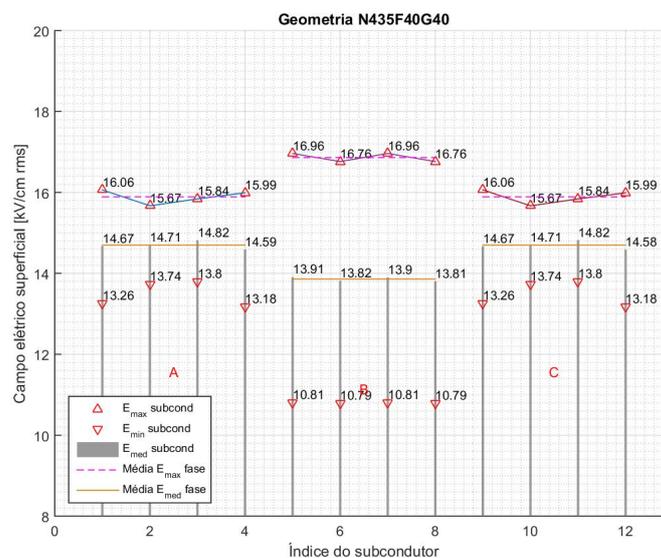
Fonte: autor

Figura 69 – Campo elétrico sup. otimizado para E_{sup} - ref. raquete compacta 45 cm



Fonte: autor

Figura 70 – Campo elétrico sup. otimizado para dispersão - ref. raquete compacta 45 cm



Fonte: autor

5.3.4 Comparação: Cross Rope Eletronorte

A Tabela 9 apresenta a comparação entre resultados da geometria da LT com torre tipo cross rope com feixe quadrado de lado 45 cm e das soluções que a dominam.

Tabela 9 – Comparação geometrias otimizadas - referência cross rope 45 cm

Solução	Referência	1- min Z_c	2 - min E_{sup}	3- min disp
	CR45	N978F109G109	N35F45G43	N429F28G24
Média E_{sup} (kV/cm)	16,43	16,37	16,25	16,37
Dispersão E_{sup} (%)	6,94	6,14	6,21	3,56
Z_c (Ω)	211,5	209,1	211,3	210,1
SIL (MW)	1182,0	1195,9	1183,0	1190,0
GMD (m)	6,98	8,19	8,22	8,09
$GMR_{A,C}$ (cm)	21,1	28,3	28,4	28,3
GMR_B (cm)	21,1	21,3	19,1	19,5
X_L (Ω /km)	0,2683	0,2654	0,2685	0,2669
C (nF/km)	15,9113	16,1113	15,9464	16,0393
Comparação	Δ SIL	13,9	1,0	8,0
	ΔE_{sup}	-0,06	-0,18	-0,06
	Δ disp.	-0,81	-0,73	-3,39

As Figuras 71, 72 e 73 apresentam a comparação entre a geometria da torre tipo cross rope com feixe quadrado de 45 cm e as geometrias que minimizam a impedância característica, a média dos campos elétricos superficiais e a dispersão, respectivamente.

Figura 71 – Cross rope 45 cm - minimização Z_c

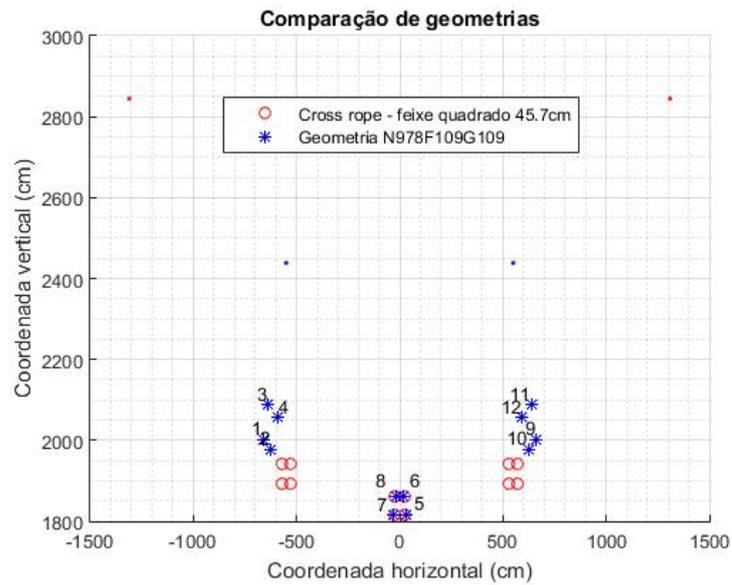


Figura 72 – Cross rope 45 cm - minimização campo elétrico superficial

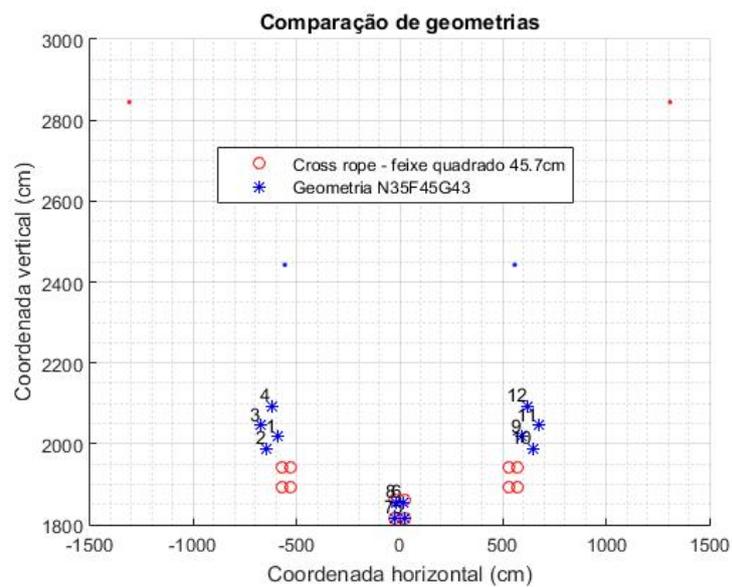
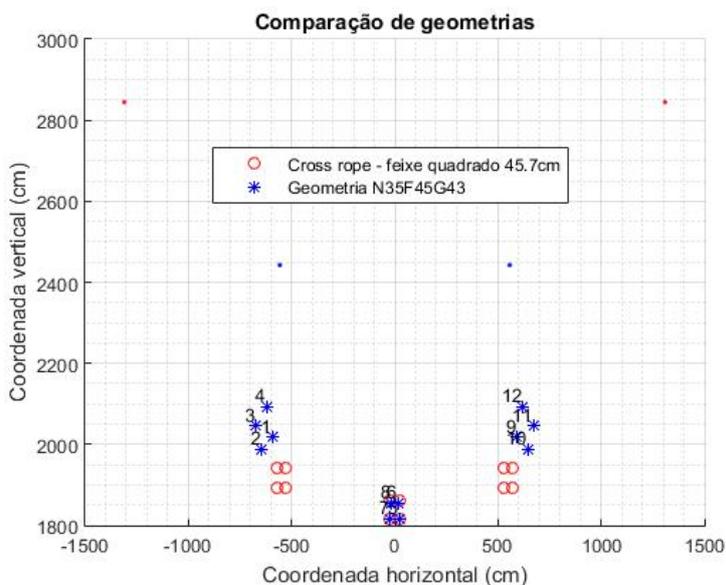


Figura 73 – Cross rope 45 cm - minimização da dispersão



As Figuras 74, 75 e 76 apresentam a distribuição dos campos elétricos superficiais das soluções que dominam a geometria da torre tipo cross rope com feixe quadrado de 45 cm e que minimizam a impedância característica, a média dos campos elétricos superficiais e sua dispersão, respectivamente.

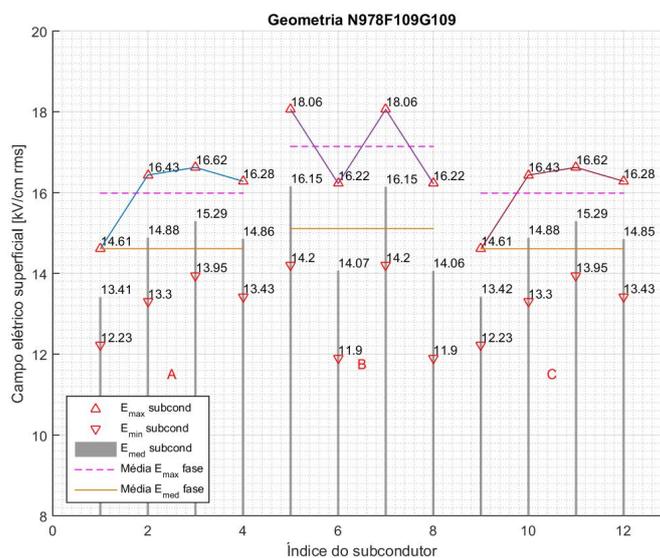
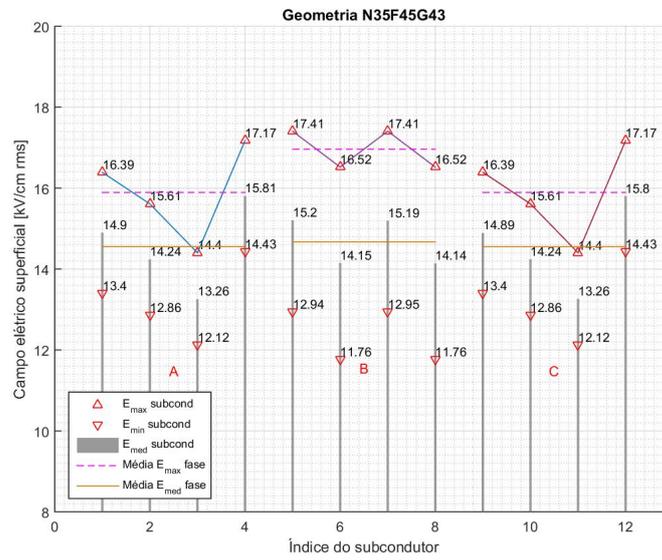
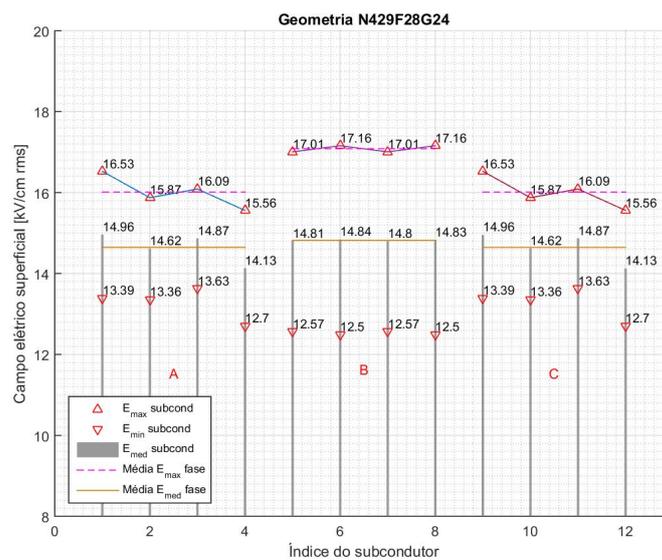
Figura 74 – Campo elétrico sup. otimizado para Z_c - ref. cross rope 45 cm

Figura 75 – Campo elétrico sup. otimizado para E_{sup} - ref. cross rope 45 cm



Fonte: autor

Figura 76 – Campo elétrico sup. otimizado para dispersão - ref. cross rope 45 cm



Fonte: autor

5.3.5 Comparação: VX CHESF

A Tabela 10 apresenta a comparação entre resultados da geometria da LT com torre tipo VX CHESF com feixe expandido trapezoidal assimétrico e das soluções que a dominam.

Tabela 10 – Comparação geometrias otimizadas - referência VX Chesf

Solução	Referência	1 - min Zc	2- min E_{sup}	3- min disp
	VXCHESF	N703F40G34	N460F322G322	N641F74G74
Média E_{sup} (kV/cm)	15,73	15,58	15,08	15,33
Dispersão E_{sup} (%)	1,72	1,31	1,54	0,82
Zc (Ω)	211,8	205,3	211,3	211,0
SIL (MW)	1180,2	1217,5	1183,0	1184,9
GMD (m)	13,99	16,71	14,34	14,32
GMR _{A,C} (cm)	46,58	59,78	48,66	50,70
GMR _B (cm)	34,30	49,26	30,16	32,50
X_L (Ω /km)	0,2690	0,2607	0,2697	0,2678
C (nF/km)	15,9004	16,3986	16,5545	16,0001
Comparação	Δ SIL	37,2	2,8	4,6
	ΔE_{sup}	-0,15	-0,65	-0,40
	Δ disp.	-0,41	-0,19	-0,90

As Figuras 77, 78 e 79 apresentam a comparação entre a geometria da torre tipo VX CHESF com feixe expandido trapezoidal assimétrico e as geometrias que minimizam a impedância característica, a média dos campos elétricos superficiais e a dispersão, respectivamente.

Figura 77 – VX Chesf - minimização Zc

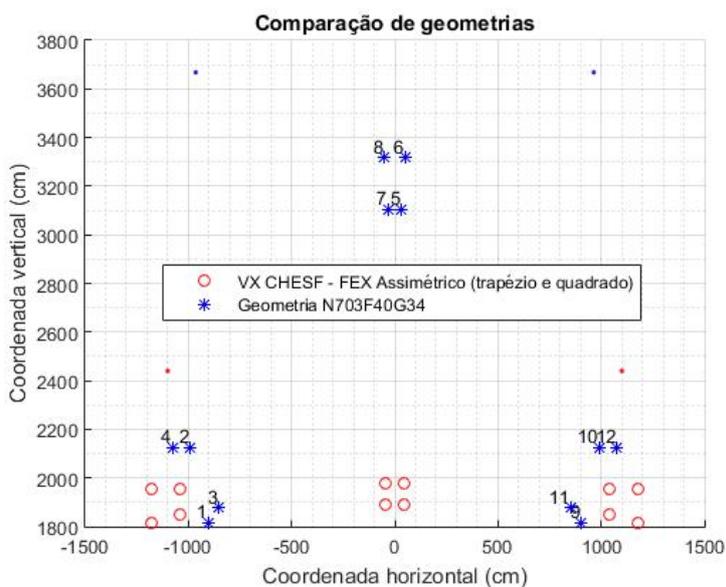
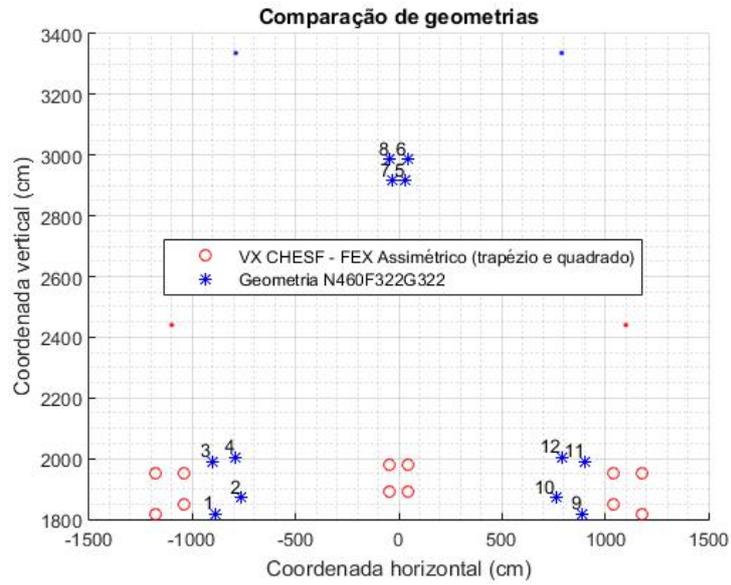
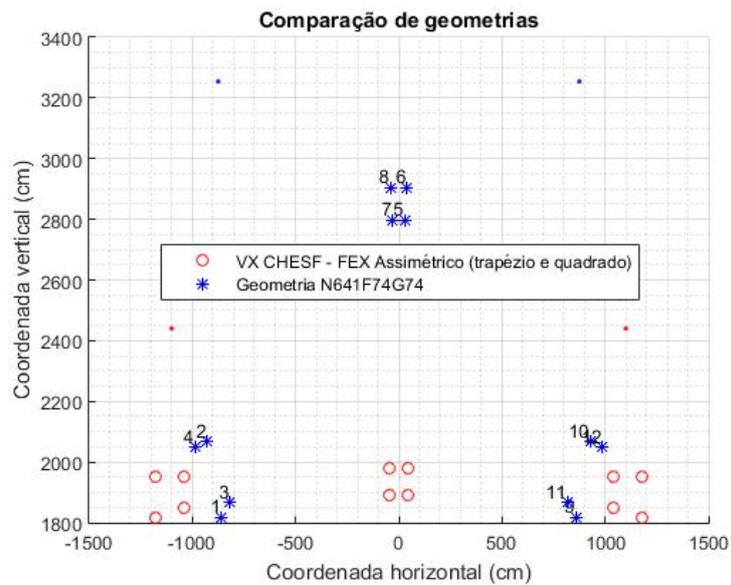


Figura 78 – VX Chesf - minimização campo elétrico superficial



Fonte: autor

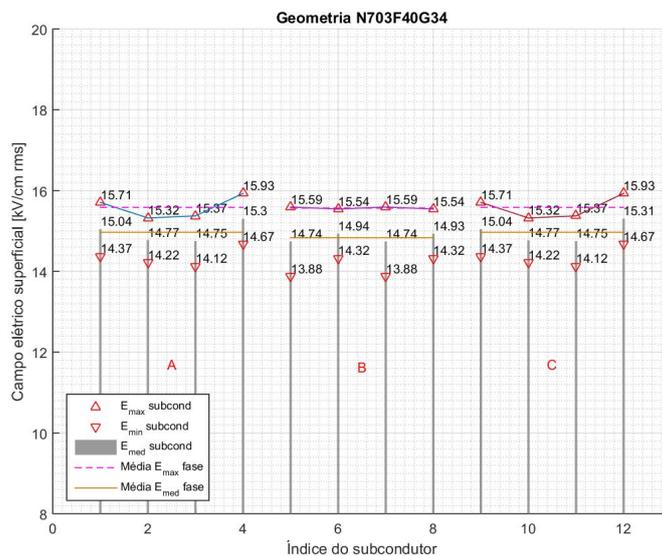
Figura 79 – VX Chesf - minimização da dispersão



Fonte: autor

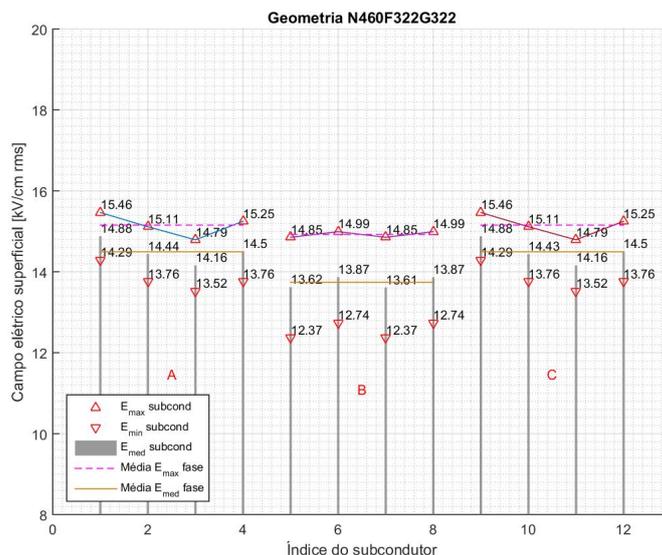
As Figuras 80, 81 e 82 apresentam a distribuição dos campos elétricos superficiais das soluções que dominam a geometria da torre tipo VX CHESF com feixe expandido trapezoidal assimétrico e que minimizam a impedância característica, a média dos campos elétricos superficiais e sua dispersão, respectivamente.

Figura 80 – Campo elétrico sup. otimizado para Z_c - ref. VX Chesf



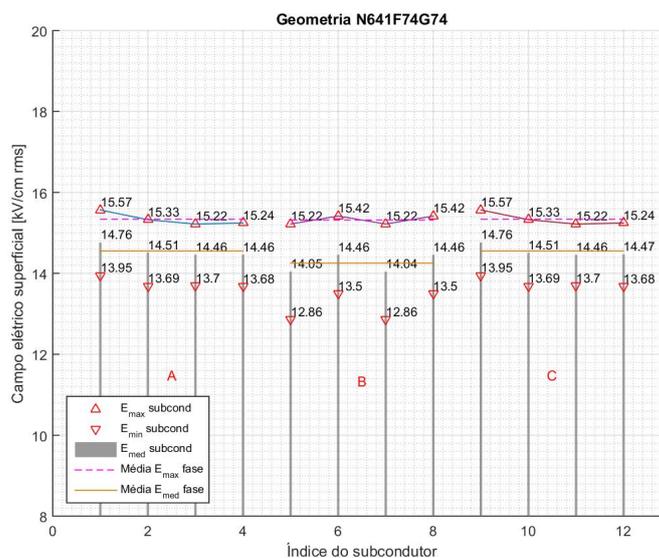
Fonte: autor

Figura 81 – Campo elétrico sup. otimizado para E_{sup} - ref. VX Chesf



Fonte: autor

Figura 82 – Campo elétrico sup. otimizado para dispersão - ref. VX Chesf



Fonte: autor

5.3.6 Comparação: Cross-rope PTE

A Tabela 11 apresenta a comparação entre resultados da geometria da LT com torre tipo cross-rope do projeto Paranaíba com algumas soluções que otimizam prioritariamente a potência natural, a minimização dos campos superficiais e a sua equalização.

Tabela 11 – Comparação geometrias otimizadas - referência Projeto Paranaíba

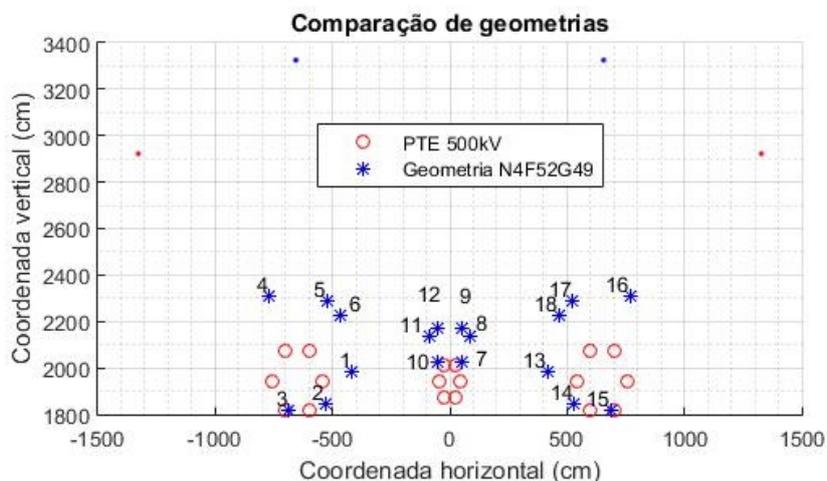
Solução	Referência	1- min Z_c	2- min E_{sup}	3- min disp
	PTE	N4F52G49	N1F52G51	N5F52G38
Média E_{sup} (kV/cm)	14,78	18,32	11,14	15,57
Dispersão E_{sup} (%)	9,45	10,26	25,31	3,22
Z_c (Ω)	150,6	119,7	208,7	139,9
SIL (MW)	1660,5	2087,8	1197,8	1787,1
GMD (m)	8,25	7,34	11,47	8,68
$GMR_{A,C}$ (cm)	81,48	126,89	43,72	112,60
GMR_B (cm)	46,21	60,02	23,73	44,92
X_L (Ω /km)	0,1919	0,1543	0,2649	0,1802
C (nF/km)	22,4577	28,5406	16,1319	24,4256
Comparação	Δ SIL	427,3	-462,6	126,6
	ΔE_{sup}	3,53	-3,64	0,79
	Δ disp.	0,81	15,86	-6,23

Observa-se, na Tabela 11, que não há relação de dominância entre a geometria de referência e as geometrias oriundas do método de otimização aplicado. Portanto são apresentadas nessa seção geometrias que otimizam um dos objetivos, mas que tem um ou outros dois objetivos piores que a solução de referência. Nas simulações, foram encontradas soluções com valores de objetivo muito próximos dos da referência, porém nenhuma dominante. Isso indica que a geometria de referência já é uma geometria eletricamente bastante otimizada.

Cabe observar na Tabela 11 que a solução N5F52G38 minimiza consideravelmente a dispersão do campo elétrico superficial aumentando relativamente pouco o campo elétrico superficial e ainda tendo ganhos significativos de potência natural. A solução N4F52G49 fornece ganhos muito altos de potência natural e o custo disso é um aumento significativo dos campos elétricos superficiais. A dispersão aumenta relativamente pouco, porém, dado ao valor elevado da média dos campos superficiais, alguns condutores ficam eletricamente sobrecarregados com campos superiores a 21 kV/cm. A solução N1F52G51 por sua vez é a solução que apresenta menor campo elétrico superficial

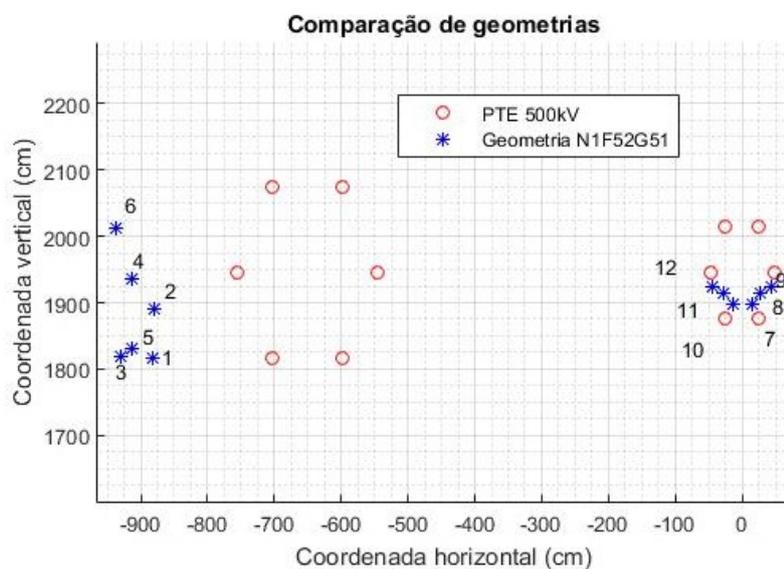
As Figuras 83, 84 e 85 apresentam a comparação entre a geometria da torre tipo cross-rope do projeto Paranaíba com feixe lateral hexagonal superexpandido e as geometrias que minimizam a impedância característica, a média dos campos elétricos superficiais e a dispersão, respectivamente.

Figura 83 – Projeto Paranaíba - minimização Z_c



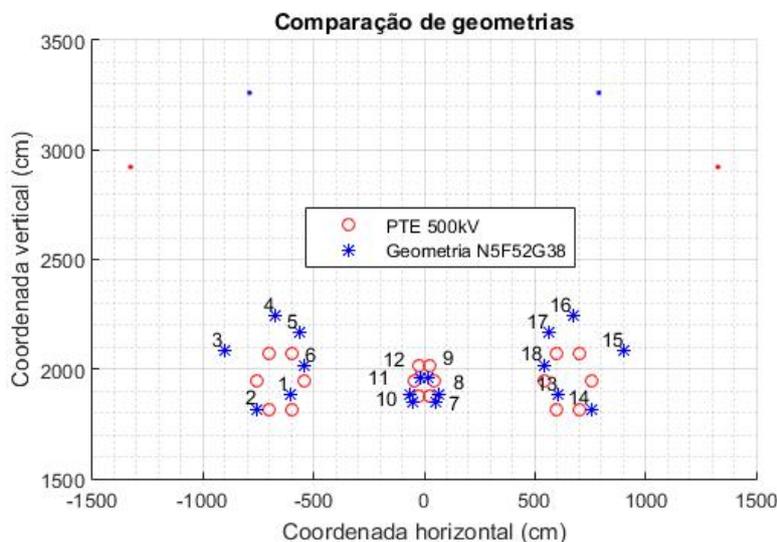
Fonte: autor

Figura 84 – Projeto Paranaíba - minimização campo elétrico superficial



Fonte: autor

Figura 85 – Projeto Paranaíba - minimização da dispersão

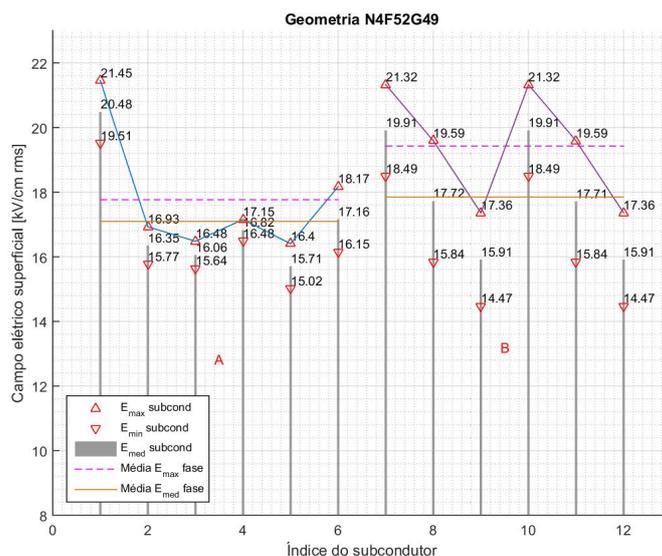


Fonte: autor

A Figura 84 apresenta apenas a fase central e a lateral esquerda, pois, por conta da compactação dos subcondutores, a visualização das três fases juntas ficaria prejudicada.

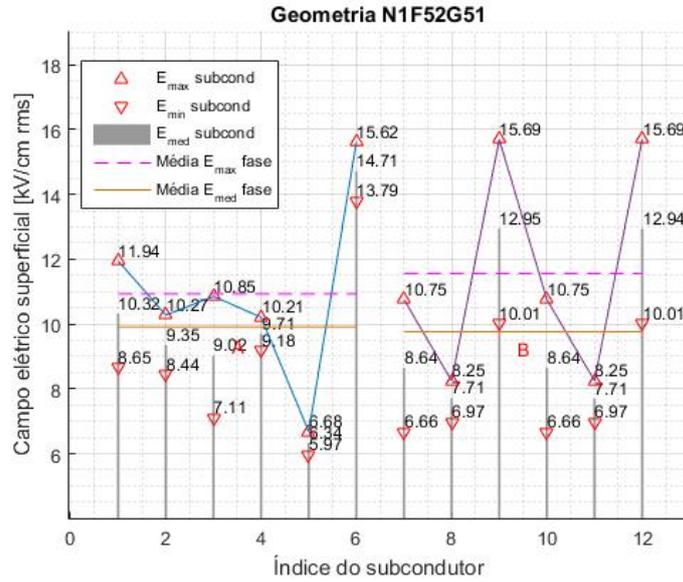
As Figuras 86, 87 e 88 apresentam a distribuição dos campos elétricos superficiais das soluções que dominam a geometria da torre tipo cross rope PTE com feixe expandido trapezoidal assimétrico e que minimizam a impedância característica, a média dos campos elétricos superficiais e sua dispersão, respectivamente.

Figura 86 – Campo elétrico sup. otimizado para Zc - ref. Projeto Paranaíba



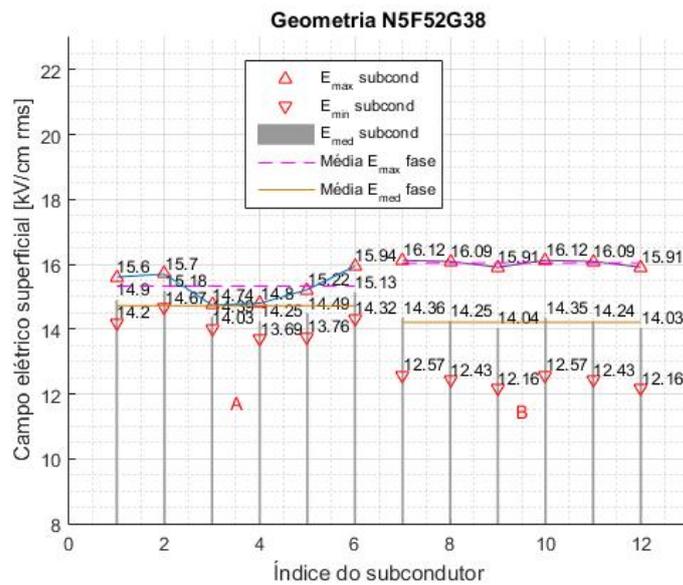
Fonte: autor

Figura 87 – Campo elétrico sup. otimizado para E_{sup} - ref. Projeto Paranaíba



Fonte: autor

Figura 88 – Campo elétrico sup. otimizado para dispersão - ref. Projeto Paranaíba



Fonte: autor

5.3.7 Comparação: Cross-ropes experimental Furnas

A Tabela 12 apresenta a comparação entre resultados da geometria da LT com torre tipo cross-ropes experimental de Furnas com algumas soluções que otimizam prioritariamente a potência natural, a minimização dos campos superficiais e a sua equalização.

Tabela 12 – Comparação geometrias otimizadas - referência P&D Furnas

Solução	Referência	1- min Zc	2- min E_{sup}	3- min disp
	FURNAS	N681F73G73	N150F58G55	N3F100G93
Média E_{sup} (kV/cm)	15,85	18,71	12,75	15,51
Dispersão E_{sup} (%)	2,05	6,01	6,08	2,54
Zc (Ω)	135,8	113,6	171,8	138,0
SIL (MW)	1840,7	2200,4	1455,5	1811,0
GMD (m)	7,03	7,30	10,11	7,94
$GMR_{A,C}$ (cm)	77,73	115,91	61,35	83,36
GMR_B (cm)	68,37	104,43	53,99	76,71
X_L (Ω /km)	0,1724	0,1445	0,2176	0,1752
C (nF/km)	24,7948	29,6941	19,5661	24,3870
Comparação	Δ SIL	359,7	-385,2	-29,7
	ΔE_{sup}	2,86	-3,10	-0,34
	Δ disp.	3,96	4,03	0,49

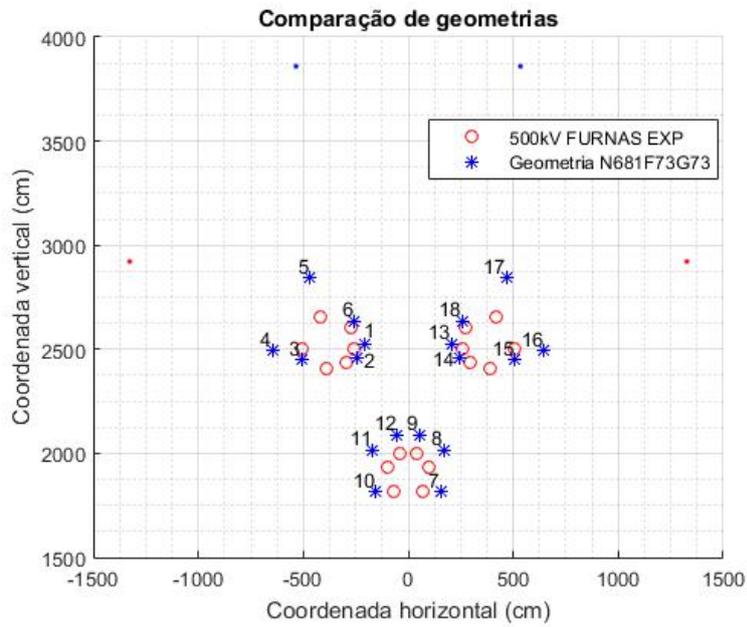
Observa-se, novamente, na Tabela 12 que não há relação de dominância entre a geometria de referência e as geometrias oriundas do método de otimização aplicado. Portanto, são apresentadas nessa seção geometrias que otimizam um dos objetivos, mas que tem um ou os outros dois objetivos piores que a solução de referência. Nas simulações, foram encontradas soluções com valores de objetivo muito próximos dos da referência, porém nenhuma dominante. Isso indica que a geometria de referência já é uma geometria eletricamente otimizada.

Cabe observar, na Tabela 12, que a solução N150F58G55 minimiza consideravelmente a média do campo elétrico superficial, porém diminui bastante a potência natural, se comparado com as outras soluções. A solução N681F73G73 fornece altos ganhos de potência natural ao custo de um aumento considerável dos campos elétricos superficiais e de suas dispersões. A solução N3F100G93 é solução fornecida pelo método de otimização que apresenta a maior equalização do campo elétrico superficial, porém ela ainda é menos equalizada que a solução de referência.

As Figuras 89, 90 e 85 apresentam a comparação entre a geometria da torre tipo cross-ropes experimental de Furnas com feixe expandido assimétrico e as geometrias que minimizam a impedância característica, a média dos campos elétricos superficiais e a dispersão, respectivamente.

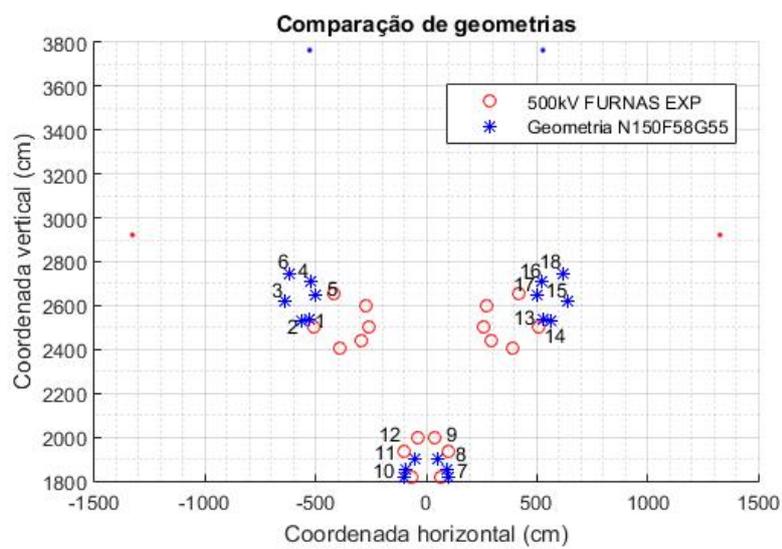
As Figuras 92, 93 e 94 apresentam a distribuição dos campos elétricos superficiais das soluções que dominam a geometria da torre cross rope experimental de Furnas com feixe expandido assimétrico e que minimizam a impedância característica, a média dos campos elétricos superficiais e sua dispersão, respectivamente.

Figura 89 – P&D Furnas - minimização Zc



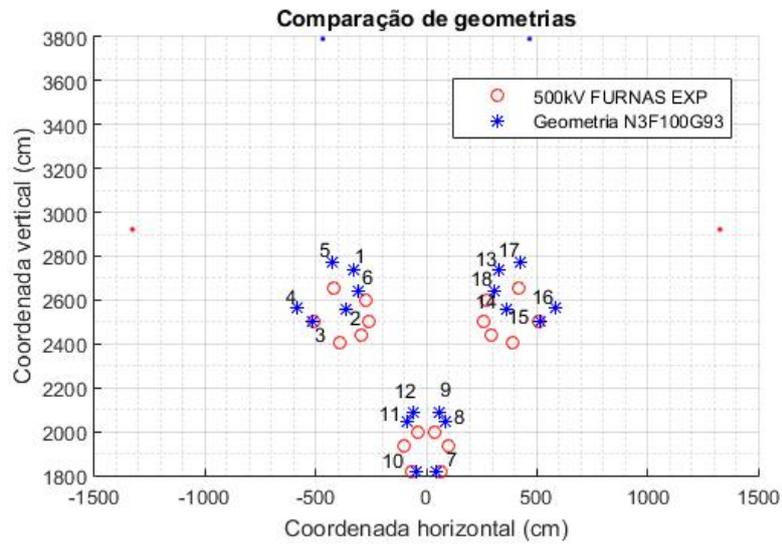
Fonte: autor

Figura 90 – P&D Furnas - minimização campo elétrico superficial



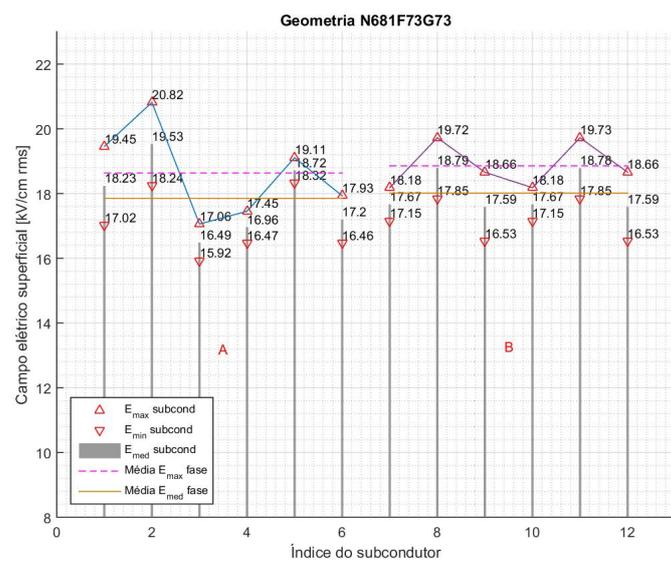
Fonte: autor

Figura 91 – P&D Furnas - minimização da dispersão



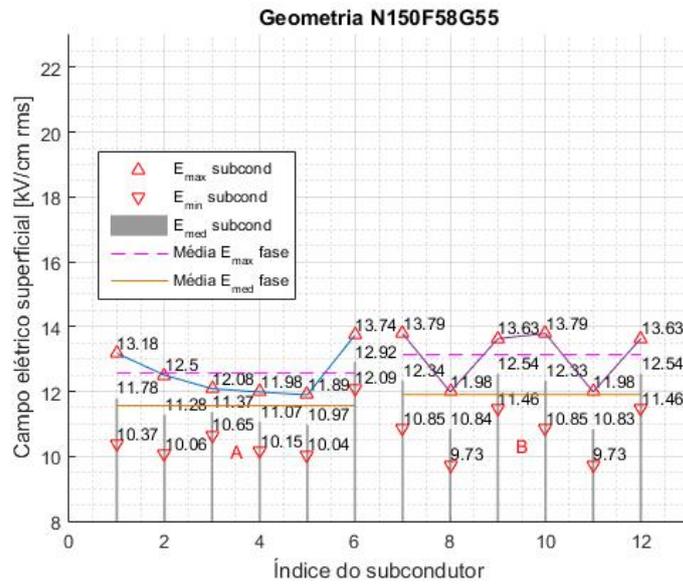
Fonte: autor

Figura 92 – Campo elétrico sup. otimizado para Zc - ref. P&D Furnas



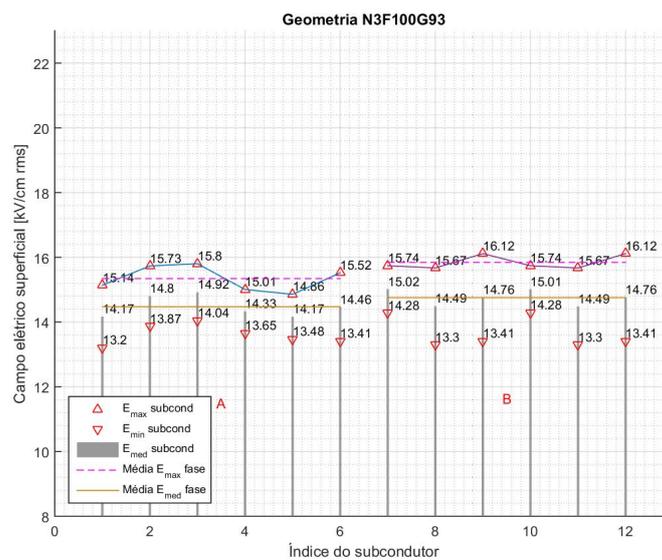
Fonte: autor

Figura 93 – Campo elétrico sup. otimizado para E_{sup} - ref. P&D Furnas



Fonte: autor

Figura 94 – Campo elétrico sup. otimizado para dispersão - ref. P&D Furnas



Fonte: autor

5.3.8 Discussão a respeito das geometrias fornecidas pelo método de otimização

O algoritmo de otimização implementado obteve sucesso em determinar geometrias de feixe e de fases que dominam as geometrias de linhas de transmissão típicas em 500 kV de quatro subcondutores por fase. As geometrias obtidas com seis condutores por fase também foram otimizadas com sucesso, isto é, forneceram soluções que não são dominadas pelas geometrias de referência. Entretanto, os resultados fornecidos pelo algoritmo não dominaram as soluções de referência. Esta seção comenta os diversos pontos de interesse nos resultados das seções anteriores.

5.3.8.1 *Diferença entre os objetivos da otimização em relação à configuração de referência*

Observando as diferenças entre os valores dos objetivos das geometrias resultantes e das LT de referência com quatro subcondutores por fase, verifica-se que a potência natural e o campo elétrico superficial das soluções otimizadas são melhores que os valores da referência. Porém, a diferença é relativamente pequena para estes dois objetivos. Isto ocorre pois os limites geométricos dos resultados do processo de otimização foram pré-estabelecidos para cada experimento comparativo desta seção. Assim as geometrias resultantes são as mais próximas possíveis das geometrias de referência dentro dos seus limites. Resultados ainda melhores poderiam ser alcançados caso fosse permitido distâncias entre fases e expansão do feixe maiores.

Quando se observa a equalização dos campos superficiais, verifica-se que a otimização fornece resultados muito melhores que os da referência. Isto se deve à disposição assimétrica dos subcondutores nos feixes e à compactação do feixe central em relação aos feixes laterais. Portanto, no que diz respeito ao objetivo específico de equalização dos campos, o algoritmo implementado tem mais liberdade para encontrar soluções melhores, mesmo que hajam limitações geométricas rígidas da modelagem apresentada na Seção 4.3.2.

Os resultados das geometrias com seis subcondutores por fase não dominaram as geometrias de referência. Isto ocorreu pois as próprias geometrias de referência apresentadas são fruto de pesquisa e desenvolvimento industrial na área de cálculo elétrico de linhas com seis subcondutores por fase. As geometrias resultantes da otimização com seis subcondutores também não são dominadas pelas geometrias de referência. Desta forma, fica evidente a existência de conflito entre os objetivos otimizados. Portanto, do ponto de vista elétrico, a escolha por uma ou outra solução implementada se deve ao compromisso estabelecido entre os objetivos. Além desse compromisso, há fatores mecânicos, logísticos e econômicos que são fundamentais para a viabilidade prática das soluções.

5.3.8.2 *Distância média geométrica entre fases*

Em todos os casos apresentados, observou-se que distância média geométrica entre as fases das soluções resultantes é maior que as das geometrias de referência. Observando apenas a característica da distância geométrica entre fases, este resultado é inesperado, uma vez que a aproximação das fases resulta em uma potência natural maior. Porém, deve-se considerar que também o campo elétrico superficial e a sua dispersão também são parâmetros avaliados. Desta forma, o afastamento das fases é benéfico. Para compensar o afastamento das fases, o algoritmo de otimização aumentou significativamente o raio médio geométrico dos feixes laterais, mantendo o raio médio geométrico do feixe central próximo ao da solução de referência. Tais diferenças entre as fases reforçam a necessidade de transposição da linha.

5.3.8.3 Geometria de fases triangular

As geometrias resultantes tendem a formar triângulos, conforme se observa nos resultados comparativos com as torres cross-rope e VX-CHESF, que possuem disposição horizontal das fases. Geometrias triangulares de fases permitem a aproximação mútua entre as fases laterais mantendo afastamento da fase central. A tendência de formar um triângulo nas fases é uma forma de otimizar que possibilita, para as mesmas distâncias geométricas, obter uma melhor distribuição de campos elétricos superficiais.

5.3.8.4 Diferenças entre soluções obtidas

Comparando entre si as soluções obtidas pelo método de otimização, observam-se diferenças importantes que justificam um melhor desempenho para um determinado objetivo.

Observando as soluções que forneceram a maior potência natural, verifica-se que elas possuem, na maioria dos casos, a maior relação entre raio médio geométrico e distância entre fases. Isso indica a maior expansão relativa do feixe. Também se observa que estas soluções são as que têm a menor reatância. Por outro lado, as soluções que forneceram os menores valores de campo elétrico superficial são aquelas que têm menor expansão relativa do feixe e, portanto, possuem a menor capacitância.

As soluções que fornecem as melhores equalizações de campo elétrico superficial são aquelas que possuem a maior diferença entre a expansão dos feixes laterais e do feixe central. Tal constatação já é esperada, uma vez que se verifica que a fase central é a fase eletricamente mais carregada e, portanto, deve ter seus campos reduzidos para equalizar com os das fases laterais. Observando a assimetria das geometrias dos feixes, verifica-se os subcondutores se aproximam do centro geométrico do arranjo da linha, com a finalidade de distribuir melhor as cargas entre os condutores mais internos e os mais externos.

5.3.8.5 Comentários sobre viabilidade executiva das soluções resultantes

As geometrias resultantes do processo de otimização foram analisadas exclusivamente do ponto de vista elétrico com base nas funções objetivo do modelo de otimização. As limitações impostas na modelagem do problema, como por exemplo distância mínima entre subcondutores e dimensões máximas de distâncias entre fases, colaboram a favor da viabilidade executiva das soluções resultantes, mas de forma nenhuma são suficientes para garanti-la.

Para estudar a viabilidade técnica-econômica das soluções resultantes em um empreendimento comercial de transmissão diversos fatores que fogem ao escopo deste trabalho devem ser avaliados. Entre os principais fatores, se pode citar:

1. projeto de estruturas compatíveis com a geometria da cabeça de torre proposta;
2. realização de estudo sobre a estabilidade mecânica relativa à torsão dos feixes;
3. estudo e projeto de sistema de amortecedores e espaçadores para mitigar efeitos da vibração eólica nos condutores;
4. viabilidade de projeto e de fabricação em escala comercial das ferragens das cadeias;
5. viabilidade técnica e treinamento de equipe para lançamento dos condutores;
6. avaliação logística e econômica de todos os pontos acima.

5.4 Desempenho do NSGAI

Esta seção apresenta os resultados que permitem a análise do desempenho do método heurístico utilizado neste trabalho, no que se refere à definição dos parâmetros do algoritmo genético e a natureza multi-objetivo do problema.

A análise desta seção tem como objetivos principais:

- a investigação sobre a natureza multi-objetivo do problema;
- avaliar a seletividade do método (renovação da fronteira, renovação da população) e como esta é influenciada pelos parâmetros de cruzamento e mutação;
- investigar a evolução das soluções na fronteira (superfície de) Pareto e compará-las com soluções de referência.

5.4.1 Representação das soluções no espaço dos objetivos

A natureza multi-objetivo do problema pode ser investigada pela correlação dos objetivos. Nas seções subsequentes são apresentados resultados no espaço dos objetivos de um experimento de otimização realizado com população de tamanho 1000, 250 gerações, cuja geração de novos elementos é feita 60% por recombinação e 40% por mutação.

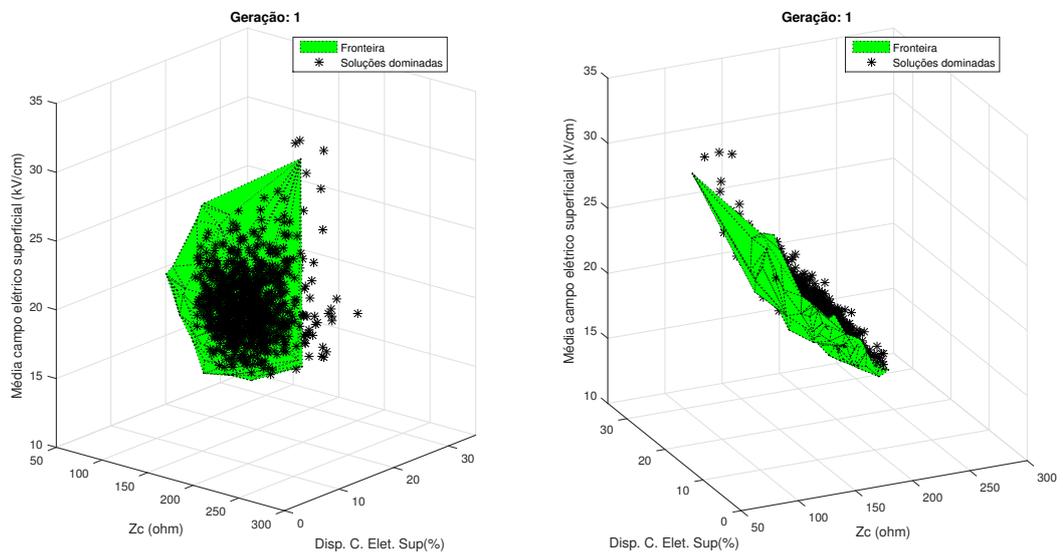
5.4.1.1 Fronteiras de Pareto no espaço tridimensional

As Figuras 95 e 96 apresentam as soluções no espaço dos objetivos das gerações 1 e 8, respectivamente. Em ambas as figuras, observa-se que a fronteira de Pareto é uma superfície que divide o espaço. Observa-se que no lado côncavo estão as soluções dominadas.

A fronteira de Pareto da primeira geração é um conjunto composto por 73 soluções. As outras 927 soluções são dominadas pela fronteira. Na oitava geração, a fronteira de Pareto é um conjunto composto por 525 soluções e as outras 475 soluções dessa geração são dominadas por este conjunto. Conforme as gerações avançam, as soluções passam a integrar a fronteira e o número de soluções dominadas diminui. Isso pode ser observado na diferença de densidade espacial de soluções dominadas entre as Figuras 95 e 96.

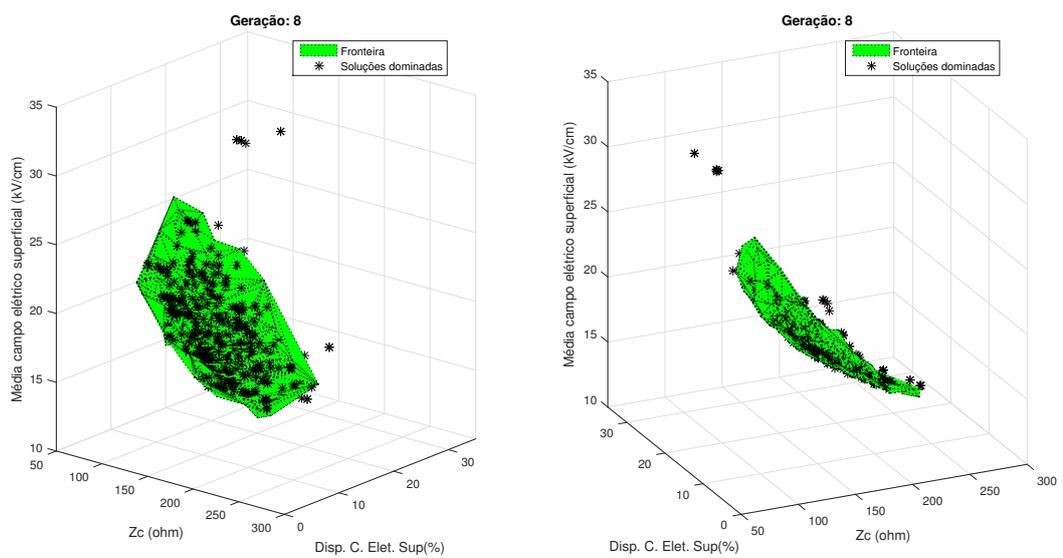
A partir da geração 10 todas as soluções passam a pertencer ao conjunto da Fronteira de Pareto. Nas iterações subsequentes o critério de seleção para ir a uma geração futura passa a ser apenas a *Crowding Distance*, uma vez que não há mais distinção entre fronteiras. Assim a evolução do algoritmo passa a priorizar soluções cujos objetivos estejam mais afastados entre si. O resultado disso é um aumento da área da superfície que forma a fronteira de Pareto. Esse aumento é decorrente do espalhamento das soluções no espaço dos objetivos de forma a ocupar a superfície com maiores afastamentos. As Figuras 97, 98 e 99 apresentam a fronteira de Pareto das gerações 10, 25 e 250 respectivamente. Observa-se que, a medida que as gerações aumentam, a fronteira se espalha no espaço aumentando a área da superfície.

Figura 95 – Soluções no espaço dos objetivos: Geração 1



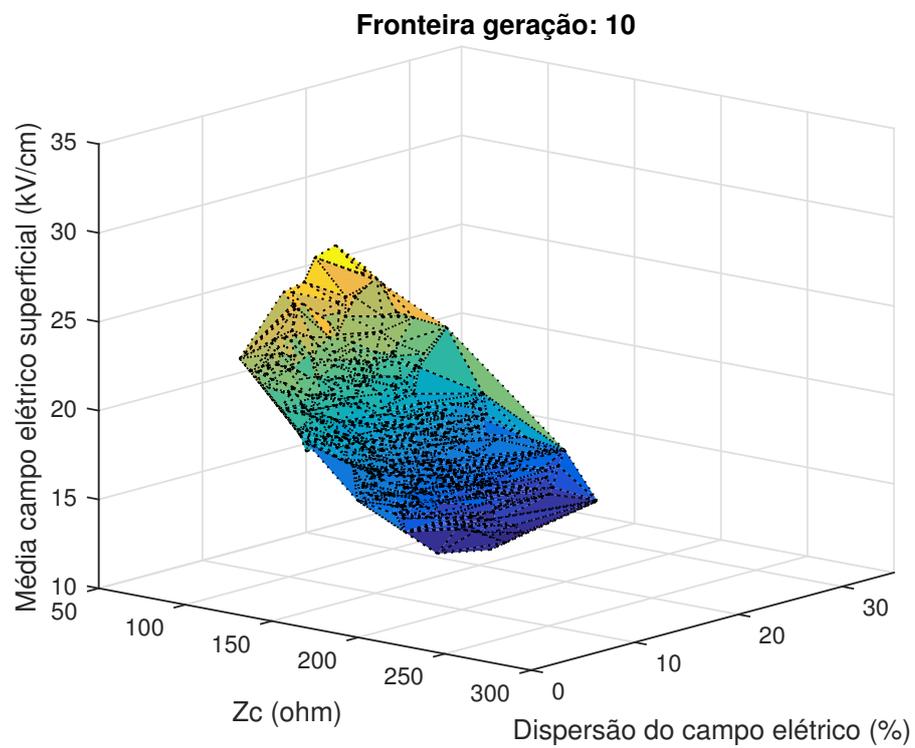
Fonte: autor

Figura 96 – Soluções no espaço dos objetivos: Geração 8



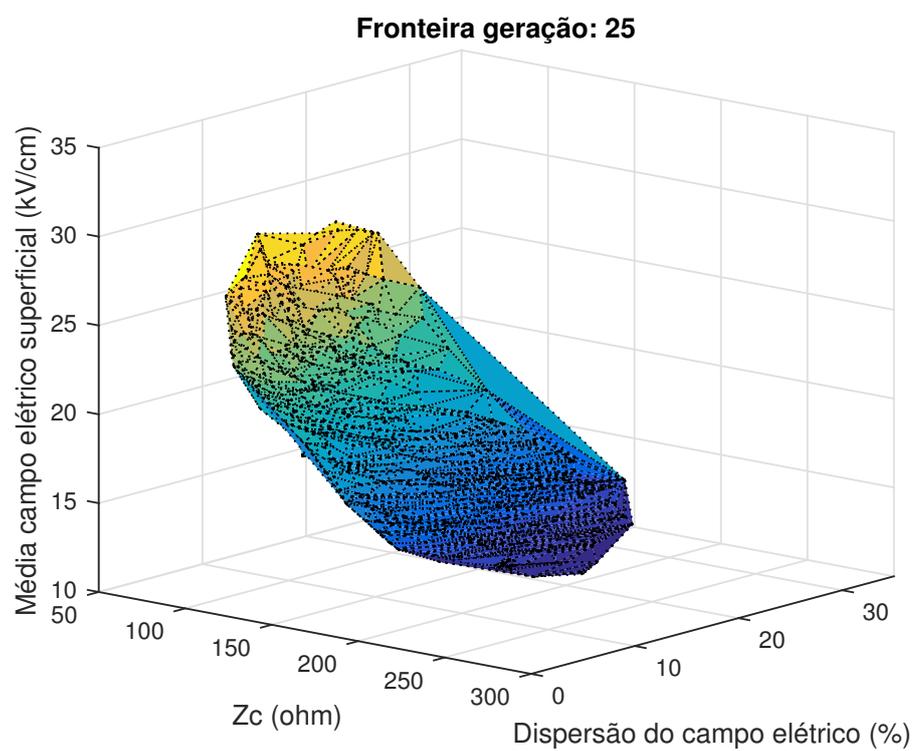
Fonte: autor

Figura 97 – Soluções no espaço dos objetivos: Geração 10



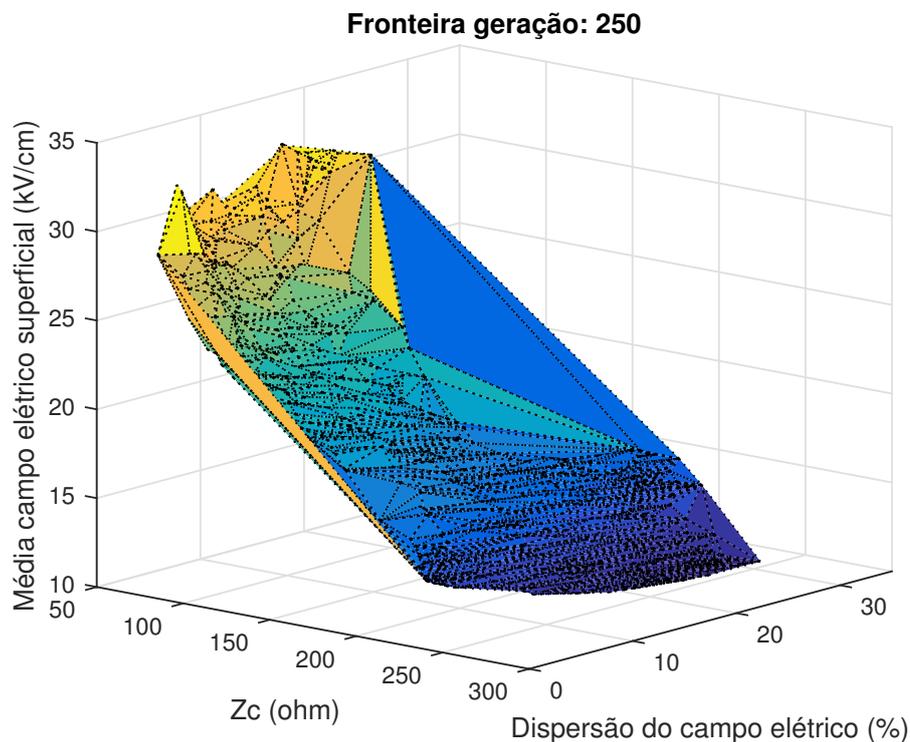
Fonte: autor

Figura 98 – Soluções no espaço dos objetivos: Geração 25



Fonte: autor

Figura 99 – Fronteira da geração 250



5.4.1.2 Impedância característica versus Média do campo elétrico superficial

De forma geral, a aproximação das fases aumenta o campo elétrico na superfície dos condutores e reduz a impedância característica de uma LT. Isso caracteriza um conflito nos objetivos, uma vez que deseja-se reduzir ambos. A Figura 100 apresenta as soluções das fronteiras de pareto nas gerações 1 e 250 no espaço de dois objetivos: a impedância característica Z_C e a média dos campos elétricos superficiais máximos.

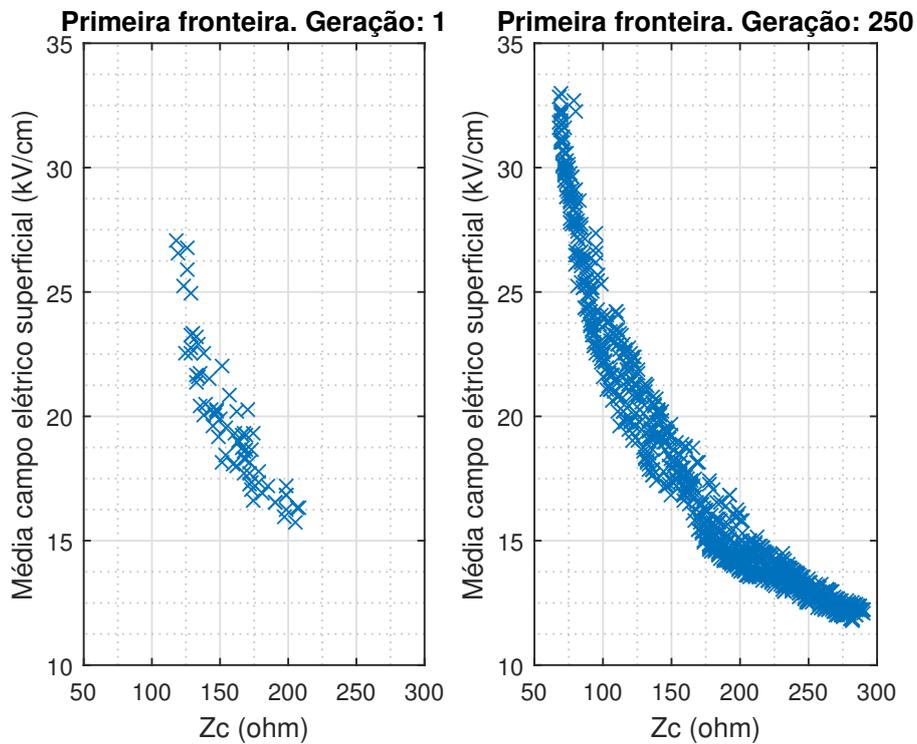
A Figura 100 evidencia o conflito entre a redução da impedância característica e a redução do campo elétrico superficial. Isto é, para reduzir a média dos campos elétricos superficiais máximos de uma LT deve-se abrir mão de um aumento na potência natural. Na primeira geração, existem soluções dominadas, que não estão representadas na Figura 100. Porém, as soluções não-dominadas da primeira geração já apresentam uma correlação conflitante. Conforme o algoritmo de otimização avança, observa-se a correlação se mantém conflituaosa, conforme a representação do conjunto das soluções não dominadas na geração 250, que é igual à população total. Isso evidencia a natureza multi-objetivo do problema.

5.4.1.3 Dispersão do campo elétrico versus Média do campo elétrico superficial

A Figura 101 apresenta as soluções das fronteiras de pareto nas gerações 1 e 250 no espaço de dois objetivos: média dos campos elétricos superficiais máximos e dispersão dos campos. A primeira geração possui apenas 76 soluções na fronteira de pareto e estas estão distribuídas no plano da Figura 101. A geração 250, que tem todos seus elementos na fronteira de pareto, tem soluções espalhadas no plano sem nenhuma correlação evidente.

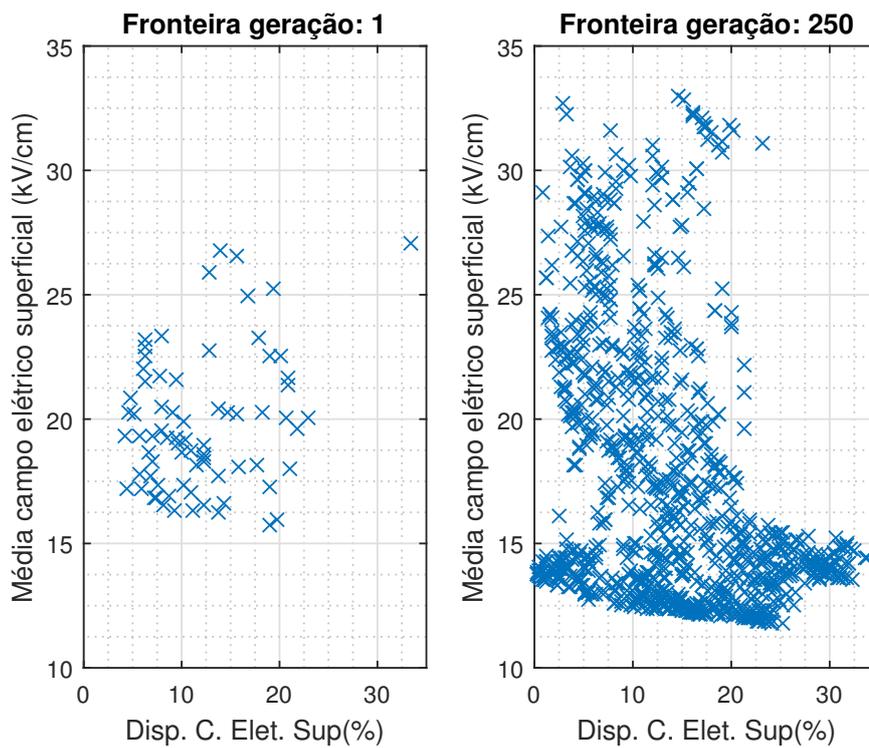
Tal resultado mostra que existem geometrias que podem ter médias de campo elétrico

Figura 100 – Soluções no espaço dos objetivos: Z_c versus Méd. Campo Sup. - Ger: 1 e 250



Fonte: autor

Figura 101 – Espaço dos objetivos: Méd. C. Elétrico Sup. versus Dispersão - Ger: 1 e 250



Fonte: autor

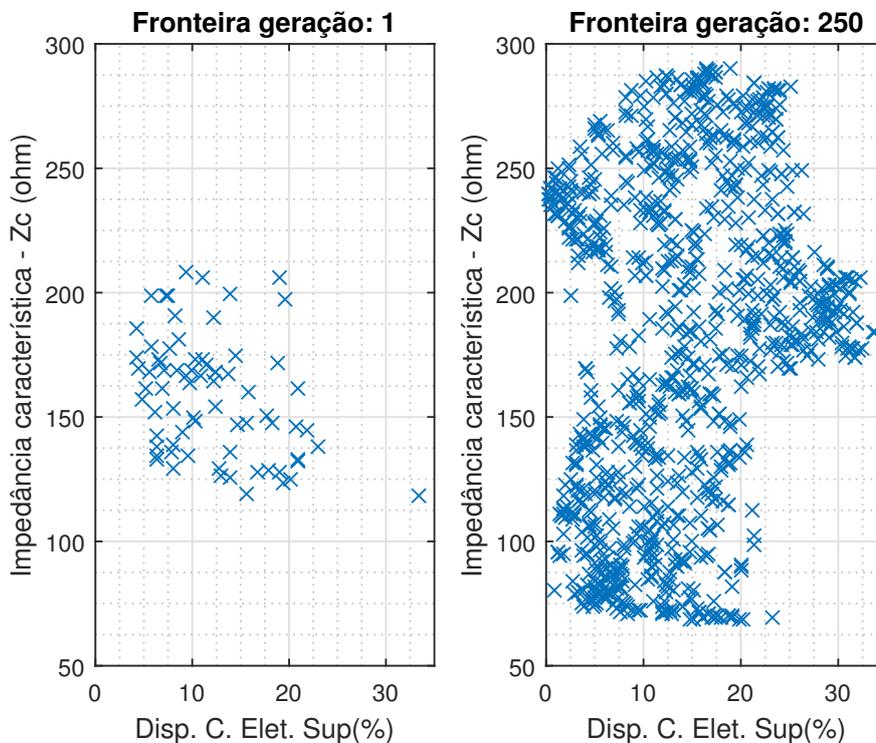
baixas com dispersões altas e baixas. Da mesma forma, existem geometrias que possuem médias de campo elétrico altas e dispersões baixas e altas. Com a Figura 101 fica evidente a natureza multi-objetivo do problema formulado.

5.4.1.4 Dispersão do campo elétrico versus impedância característica

A Figura 102 apresenta as soluções das fronteiras de pareto nas gerações 1 e 250 no plano de dois objetivos: média dos campos elétricos superficiais máximos e impedância característica.

A Figura 102 evidencia a ausência de correlação entre impedância característica e dispersão do campo elétrico. Em outras palavras, independente da impedância característica, geometrias podem ter dispersões altas ou baixas para os mesmos campos superficiais.

Figura 102 – Espaço dos objetivos: Dispersão *versus* Z_C - Ger: 1 e 250



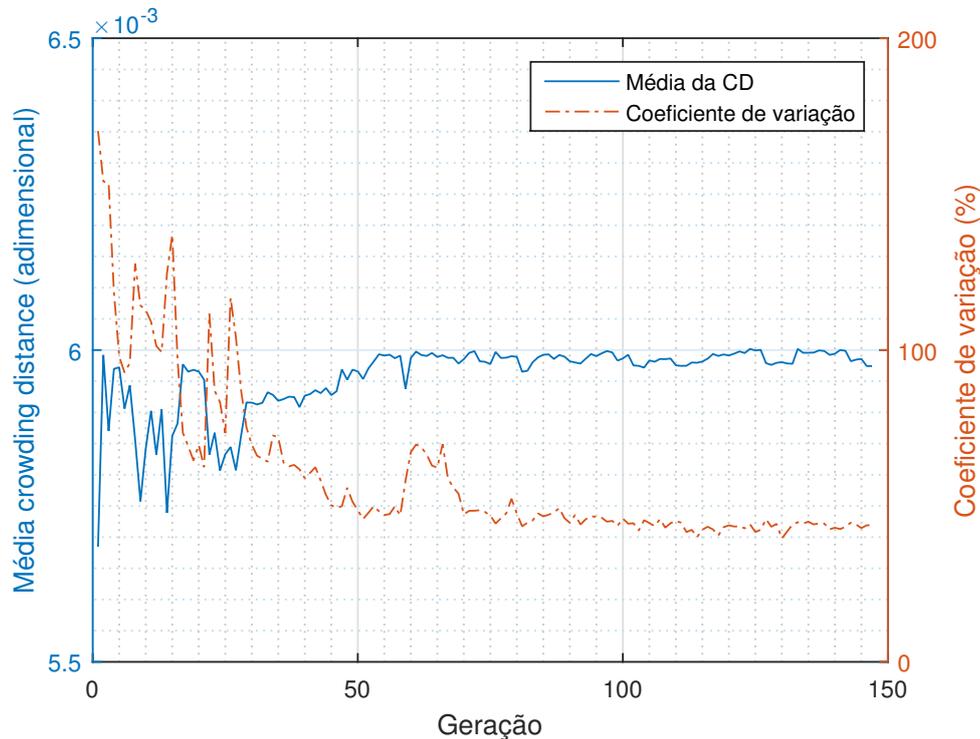
Fonte: autor

5.4.2 Evolução da *crowding distance* ao longo da evolução

Como o método NSGAIII converge rápido para que todas as soluções façam parte da fronteira de pareto em até 20 gerações, é conveniente analisar a evolução da *crowding distance*. A Figura 103 mostra a evolução da *crowding distance* ao longo do processo evolutivo.

A curva azul contínua mostra a média global das *crowding distances* de cada população, excluindo os valores infinitos por definição. No experimento apresentado na Figura 103, todas as soluções fazem parte da fronteira de pareto a partir da nona geração. Observa-se que as *crowding distances* tendem e se estabilizam em torno do valor 6×10^{-3} .

O coeficiente de variação é o desvio padrão das *crowding distances* sobre a média delas. Este segue uma tendência decrescente. Esta tendência indica que o processo evolutivo continua no sentido de equalizar as *crowding distances*, distribuindo de forma mais

Figura 103 – *Crowding distances* da população e suas dispersões

Fonte: autor

uniforme as soluções nos espaços dos objetivos.

Essa uniformização é desejável, pois possibilita que sejam formadas novas soluções cujos compromissos entre os objetivos sejam mais evidentes. Em outras palavras, se for desejado encontrar uma solução que minimize ao máximo um dos objetivos, mantendo os outros objetivos pelo menos iguais ao de uma determinada referência, a uniformização das *crowding distances* permite que se encontre a solução dominante que mais se afasta da minimização do objetivo alvo através da aproximação dos limites com a solução de referência.

5.4.3 Influência dos parâmetros e seletividade do método.

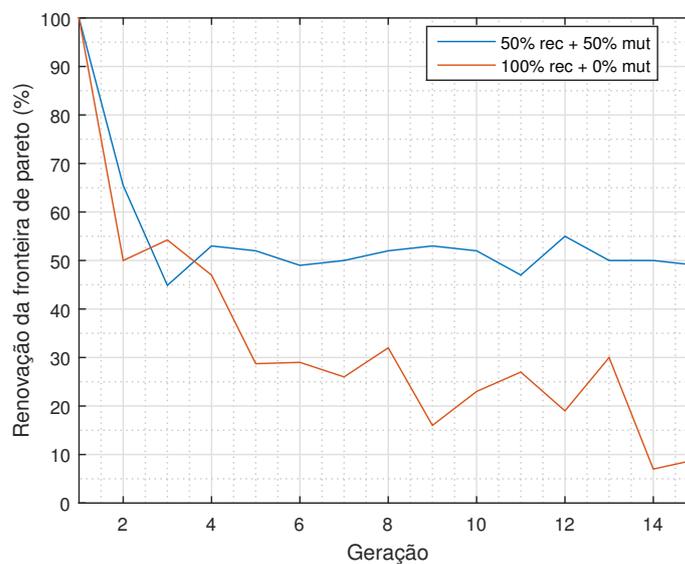
Fatores como tamanho da população e percentual de mutação influenciam diretamente a seletividade e o desempenho do algoritmo de otimização. Esta seção apresenta os resultados que possibilitam entender a influência desses fatores no funcionamento do algoritmo NSGAI implementado.

5.4.3.1 Influência do percentual de recombinação e mutação

O percentual de recombinação e mutação na formação das novas gerações influencia a renovação das fronteiras de pareto de cada geração. A renovação da fronteira de pareto de uma geração é o percentual de indivíduos que pertencem à fronteira de uma determinada geração que efetivamente foram gerados na própria geração. A Figura 104 apresenta a renovação da fronteira ao longo de 15 gerações para dois experimentos: (i) novas gerações são formadas 50% por recombinação e 50% por mutação e (ii) novas gerações são formadas 100% por recombinação, sem mutação. Em ambos os experimentos, a população tem 100 indivíduos.

A Figura 104 torna clara a influência do percentual de recombinação e mutação sobre a composição da fronteira de Pareto das novas gerações. Para a composição de novos elementos utilizando 50% mutação e 50% recombinação, a renovação da fronteira é em média aproximadamente 50%. Isto é, por exemplo, 50% dos elementos que estão na fronteira da geração 6 foram gerados na própria geração 6 e não nas anteriores. Já a composição de novos elementos com 100% de recombinação produz uma renovação da fronteira que oscila aproximadamente em 20%. Esses resultados ilustram a importância do operador de mutação no desempenho do algoritmo, uma vez que soluções novas na fronteira de Pareto significam uma diversidade maior de tipos de soluções.

Figura 104 – Influência dos parâmetros sobre renovação da fronteira



Fonte: autor

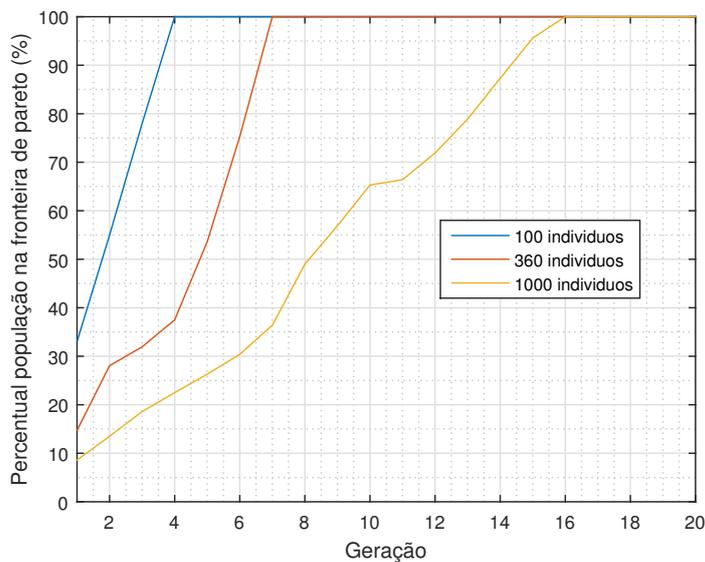
5.4.3.2 Número de gerações e composição da fronteira de Pareto

O tamanho da população influencia o número de gerações necessárias para que todos os elementos pertençam à fronteira das soluções não dominadas. A Figura 105 apresenta o percentual de indivíduos que fazem parte da fronteira de Pareto em função da geração. As três curvas são para três populações com tamanhos diferentes. Em todas elas a população inicial foi gerada aleatoriamente e foi usado um percentual de 60% de recombinação e 40% de mutação na geração de novos indivíduos.

Observa-se que o método do NSGAI converge rapidamente para que todas as soluções pertençam à fronteira das soluções não dominadas. Em todos os experimentos realizados, para tamanhos de população entre 50 e 1000, o número necessário de gerações para que 100% da população pertença à fronteira de Pareto nunca foi superior a 20.

É importante ressaltar que o número de gerações necessário para que 100% das soluções sejam não dominadas não significa que a otimização fornece bons resultados. A partir do ponto em que toda a população faz parte da fronteira de Pareto, a *crowding distance* dos elementos passa a ser o principal critério de classificação para serem selecionados para as próximas gerações. A seleção pela *crowding distance* permite “povoar” de forma mais uniforme a fronteira de Pareto de modo tal que o compromisso aceitado entre os objetivos possa ser investigado de forma mais precisa.

Figura 105 – Influência do tamanho da população na fronteira



Fonte: autor

5.4.4 Compromisso das soluções de fronteira

Em um problema de otimização multi-objetivo, o principal resultado é o estabelecimento de um compromisso entre objetivos.

Deseja-se minimizar a impedância característica de uma LT, por exemplo. Porém deve-se estabelecer limites superiores para a média dos campos elétricos e a dispersão. Dois critérios de limite são estabelecidos:

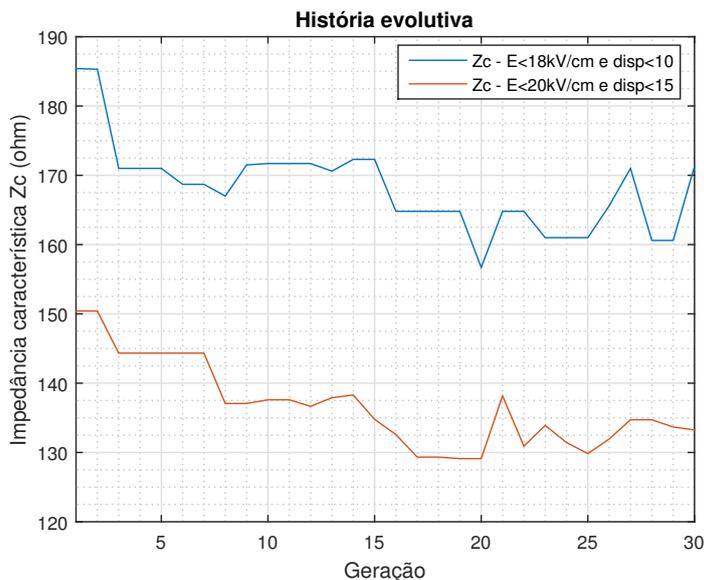
- (i) Média do campo superficial <18 kV/cm e dispersão relativa <10%
- (ii) Média do campo superficial <20 kV/cm e dispersão relativa <15%

O critério de limite (i) é mais restritivo que o (ii), pois permite campos e dispersões máximas inferiores aos permitidos em (ii). A Figura 106 apresenta os menores valores da impedância característica Z_C que atendem às restrições de cada critério em cada geração.

Observando-se a Figura 106 conclui-se que, quanto menos restritivos são os critérios, menores os valores de impedância resultantes. Observa-se, também, que as gerações mais avançadas nem sempre forneceram a solução ótima para um determinado conjunto de restrições. Para ambos os critérios de restrições, observa-se que a menor impedância característica Z_C ocorre na geração 20 e não na 30. Isso evidencia a necessidade de armazenar os dados da história evolutiva das soluções. Ao longo do processo evolutivo, soluções são selecionadas baseadas na sua *crowding distance*. Por isso, algumas soluções não-dominadas são descartadas em detrimento de outras que possuam uma *crowding distance* maior, mas que não necessariamente tem o valor da função objetivo melhor que a solução descartada.

Se for usado por si só, o critério de seleção pela *crowding distance* pode descartar soluções com valores melhores de um objetivo específico. Isso não deve ser entendido como uma desvantagem, pois o algoritmo NSGAIII trabalha com múltiplos objetivos. Desta forma, a principal função do método é apresentar o compromisso entre todos os objetivos a serem otimizados por todo espaço das soluções. Dessa forma, o fato de o método

Figura 106 – Compromisso entre soluções da fronteira



Fonte: autor

descartar uma solução para incorporar outra com valor pior de um objetivo específico significa que ele está “explorando” a fronteira de pareto em regiões vizinhas e tornando mais claro o compromisso do conjunto de soluções como um todo.

5.4.5 Avaliação das relações de dominância para soluções de referência

As soluções de referência cujos cálculos de parâmetros elétricos foram apresentados na Seção 5.1 foram comparadas com as soluções encontradas ao longo de um processo evolutivo com 395 gerações. Nessa comparação, foi avaliada a relação de dominância entre as soluções geradas e as soluções de referência. Assim avaliou-se em cada geração quantas soluções dominam uma determinada referência.

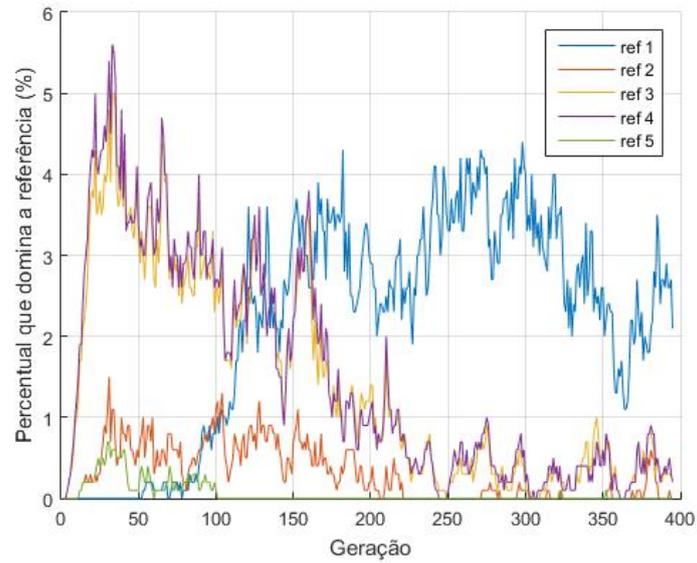
A Figura 107 apresenta o percentual de uma população de 1000 elementos que domina as soluções de referência da Seção 5.1. As referências 1, 2, 3, 4 e 5 correspondem às geometrias das estruturas cara de gato 45 e 95 cm, raquete compacta, cross-rope e VX assimétrica, respectivamente.

O experimento apresentado na Figura 107 foi realizado com limites geométricos mencionados na Seção 4.3.2. Isto significa que as geometrias resultantes permitem uma grande variedade de soluções e espaçamentos de feixe e de fases.

Observa-se que o percentual das soluções que dominam uma determinada solução de referência é pequeno e varia ao longo das gerações. Em algumas gerações, não há solução que domine a referência, enquanto em outras, há um conjunto de soluções dominantes. Algumas soluções são mais facilmente dominadas do que outras ao longo do processo evolutivo, como, por exemplo as referências 1, 3 e 4. Por outro lado, soluções como a referência 5, correspondente à geometria previamente otimizada do feixe da torre VX, é mais dificilmente dominada. O fato de existirem elementos gerados no processo evolutivo que dominam as soluções de referência significa que o algoritmo de otimização obteve sucesso.

A Figura 108 apresenta o percentual de elementos ao longo das gerações que é dominado pelas soluções de referência. Observa-se que no início do processo, há um pequeno percentual que é dominado pelas geometrias de referências. Porém, logo esse percentual

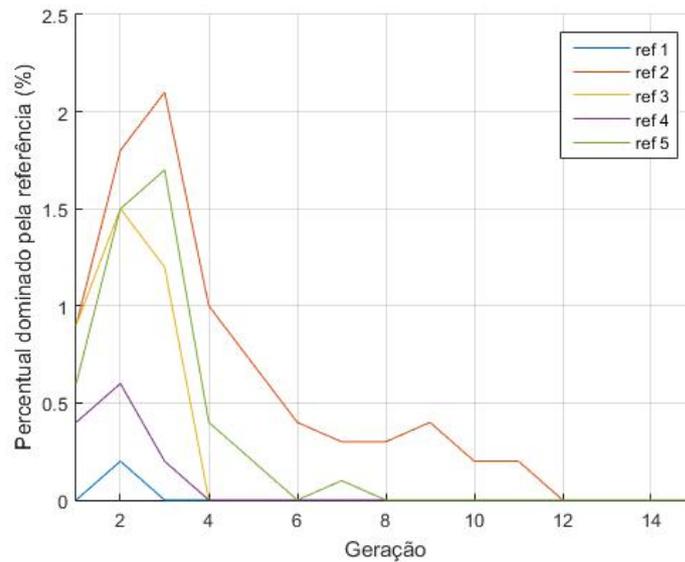
Figura 107 – Percentual de soluções dominantes nas gerações



Fonte: autor

diminui e passa a ser zero. Mesmo sem que as soluções de referência façam parte do processo evolutivo, tal resultado é esperado uma vez que o processo pelo NSGA II converge rapidamente para a condição de todas as soluções estarem contidas no conjunto da fronteira de Pareto. Esta condição implica a não existência de soluções dominadas.

Figura 108 – Percentual de soluções dominadas pela referência



Fonte: autor

6 CONCLUSÕES

Conforme descrito na Seção 1.5, o objetivo central desse trabalho é estudar a otimização multi-objetivo de parâmetros elétricos de linhas de transmissão. Para isso, foram implementadas ferramentas computacionais de cálculo de parâmetros elétricos que permitissem não apenas a análise de geometrias de fases e de feixe, como também possibilitassem seu uso dentro do algoritmo de otimização escolhido para fazer o estudo.

O cálculo dos parâmetros elétricos de capacitância e reatância de sequência positiva é relativamente simples e sua implementação não apresentou dificuldades, sendo facilmente validado através de resultados disponíveis na bibliografia. O cálculo do perfil do campo elétrico na superfície de cada condutor em qualquer geometria requereu um estudo mais aprofundado dos conceitos do método das imagens sucessivas apresentados por (SARMA; JANISCHEWSKYJ, 1969). A implementação computacional do método das imagens sucessivas foi validada com sucesso, conforme mostrado no Apêndice A.3.4. Essa ferramenta poderosa permitiu uma análise detalhada de como os principais fatores geométricos da linha influenciam as magnitudes dos campos elétricos superficiais em geometrias de fases compactas e assimétricas.

O uso das ferramentas computacionais permitiu identificar como e porque diferentes concepções estruturais de linhas de transmissão típicas em 500 kV apresentam desempenhos elétricos semelhantes. Verificou-se, na Seção 5.1, que as linhas com quatro subcondutores por fase apresentam resultados de parâmetros elétricos semelhantes, por diferentes combinações dos efeitos de compactação das fases e/ou expansão do feixe. A análise dos parâmetros elétricos de linhas de transmissão existentes e operantes no Sistema Interligado Nacional já possibilitou identificar que as diretrizes de otimização elétrica de geometrias de LTs consistem em uma ponderação entre a compactação das fases e a expansão do feixe. Quando se tem fases compactas, a expansão do feixe deve ser cuidadosamente avaliada, de forma tal que não sejam ultrapassados os limites estabelecidos para campos elétricos superficiais.

A análise detalhada dos efeitos da expansão do feixe, da compactação das fases, do número de subcondutores e da distribuição assimétrica de subcondutores no feixe foi feita na Seção 5.2. Verificou-se que a compactação das fases e a expansão do feixe aumentam tanto a potência natural quanto o campo elétrico na superfície dos subcondutores. O aumento do número de subcondutores, por si só, também aumenta a potência natural diminuindo a magnitude dos campos superficiais. Devido ao alto custo de se aumentar o número de subcondutores, esta alternativa é utilizada somente quando são necessários valores altos de potência natural que seriam impossíveis de serem alcançados sem exceder os limites de campo elétrico superficial. As disposições assimétricas dos subcondutores em um feixe podem ser a solução para equalizar os campos elétricos superficiais, permitindo que cargas se distribuam de forma mais uniforme e evitando que alguns subcondutores

fiquem subcarregados enquanto outros ficam sobrecarregados.

A implementação do algoritmo de otimização NSGA II requereu o estabelecimento de premissas que simplificassem o cálculo das funções objetivo e sua avaliação dentro do algoritmo genético. A codificação apresentada na Seção 4.3 foi cuidadosamente implementada a fim de permitir que todas as premissas da Seção 4.2 pudessem ser cumpridas. Desde o ponto de vista do estudo de otimização multi-objetivo, os resultados do algoritmo NSGA II possibilitaram ilustrar conceitos interessantes a respeito do tema. A representação das soluções no espaço tridimensional dos objetivos ilustrou a fronteira de Pareto, que é uma superfície que se expande conforme o processo de otimização avança. A variação do tamanho da população e do percentual de recombinação e mutação na formação de novos indivíduos possibilitou fazer uma breve análise do efeito desses parâmetros sobre a renovação da fronteira e seletividade do método. Tal análise ilustra conceitos básicos sobre a importância da diversidade genética trazida pelo operador de mutação na otimização com algoritmos genéticos.

Os resultados gráficos da representação das soluções nos espaços dos objetivos evidenciaram a característica multi-objetivo do problema. Isso fica claro quando não se observa correlação significativa entre a média dos valores de campos elétricos superficiais máximos e suas equalizações, tampouco se observa correlação significativa entre a impedância característica e a dispersão do campo elétrico superficial. A natureza conflitante entre o aumento da potência natural e a diminuição do campo elétrico superficial também é evidente a partir da representação das soluções no espaço dos objetivos.

Em relação às geometrias resultantes do processo de otimização, verifica-se que o algoritmo implementado obteve êxito em fornecer geometrias com maior potência natural, campos elétricos superficiais mais baixos e mais equalizados que das geometrias típicas das LTs do sistema brasileiro. As análises das geometrias fornecidas pelo algoritmo de otimização implementado apresentadas na Seção 5.3 e os estudos detalhados sobre modificações geométricas nas fases e no feixe na Seção 5.2 possibilitaram uma análise detalhada e assertiva sobre como se pode otimizar parâmetros elétricos de linhas de transmissão mantendo o compromisso com requisitos mínimos de desempenho previamente estabelecidos.

Cabe ressaltar que as geometrias de feixe e de fases resultantes não têm sua viabilidade técnico-econômica garantida e a aplicação prática de tais geometrias depende de diversos fatores, conforme comentado na Seção 5.3.8. Ainda assim, os resultados obtidos do processo de otimização representam diretrizes reais e práticas de otimização elétrica de linhas de transmissão.

6.1 Trabalhos futuros

O alto investimento necessário a um empreendimento comercial de transmissão faz com que alternativas ditas “não convencionais” sejam geralmente descartadas pelas concessionárias transmissoras devido às incertezas e riscos associados ao uso de novas tecnologias.

Entende-se que a pesquisa e a motivação na busca de alternativas de transmissão otimizadas deve ser feita na fase de estudos e planejamento de sistema. Desta forma, um estudo integrado de sistema, que avalie as vantagens econômicas e operacionais de linhas de transmissão com configurações elétricas otimizadas, pode motivar as autoridades regulatórias a oferecer alternativas técnicas de referência que levem conta os benefícios de geometrias otimizadas e remunerem concessionárias de acordo.

Geometrias “não convencionais” de linha também requerem o projeto e desenvolvimento de estruturas, cadeias e ferragens especiais bem como equipamentos de construção especiais. O desenvolvimento de espaçadores e amortecedores que possibilitem geometrias eletricamente otimizadas é fundamental para a aplicação prática. Para tanto são necessários não apenas estudos de otimização elétrica mais específicos de uma determinada geometria de fases e de feixe, mas também intensos trabalhos associados ao comportamento mecânico dos feixes, que são submetidos a diversas solicitações ao longo de sua vida útil (forças de vento, vibração eólica, fluência, etc).

Conforme discutido no trabalho, há diversos aspectos que podem ser otimizados ao longo do projeto de uma linha de transmissão. Do ponto de vista sócio-ambiental, os custos fundiários são fatores muito importantes da viabilidade de corredores de transmissão. Portanto, o efeito que geometrias eletricamente otimizadas têm sobre redução da faixa pela minimização dos efeitos de corona e efeitos de campo também deve ser constantemente estudado e aprofundado.

Desde o ponto de vista do estudo de otimização em si, o presente trabalho se restringiu a aplicar somente um método. Uma avaliação mais profunda de como diferentes métodos poderiam ser aplicados ao problema pode trazer resultados interessantes, de forma a otimizar localmente soluções para objetivos diferentes.

REFERÊNCIAS

01 OF SC.36, W. G. **Interferences produced by corona effect of electric systems: description of phenomena and practical guide for calculation.** [S.l.]: CIGRÉ, 1974.).

01 OF SC.36, W. G. **ADDENDUM to CIGRÉ TB20 (1974): interferences produced by corona effect of electric systems: description of phenomena and practical guide for calculation.** [S.l.]: CIGRÉ, 1976.).

ABNT, N. 5422: projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica. **Rio de Janeiro**, [S.l.], 1985.

ACOSTA, J. S.; TAVARES, M. C. Methodology for optimizing the capacity and costs of overhead transmission lines by modifying their bundle geometry. **Electric Power Systems Research**, [S.l.], v. 163, p. 668 – 677, 2018. *Advances in HV Transmission Systems*.

ACOSTA, J. S.; TAVARES, M. C. Optimal selection and positioning of conductors in multi-circuit overhead transmission lines using evolutionary computing. **Electric Power Systems Research**, [S.l.], v. 180, p. 106174, 2020.

ACOSTA, J.; TAVARES, M. C. Transient Behavior of High Surge Impedance Loading Transmission Lines. *In: 2017. Proceedings [...]* [S.l.: s.n.], 2017.

AMON, J. F. *et al.* Otimização de Linha de Transmissão não Convencional de Alta Capacidade em 500 kV. *In: XIII ERIAC ENCUESTRO REGIONAL IBEROAMERICANO DE CIGRÉ*, 2009. **Proceedings [...]** CIGRÉ, 2009.

ANDERSON, P. M.; ANDERSON, P. M. **Analysis of faulted power systems.** [S.l.]: IEEE press New York, 1995. v. 445.

ANEEL. **Manual de Controle Patrimonial do Setor Elétrico.** [S.l.]: Agência Nacional de Energia Elétrica, 2015.

ANEEL. **Leilões de transmissão - editais.** 2020.

B2.06, W. G. **Tower top geometry and mid span clearances.** [S.l.]: CIGRÉ, 2008.).

B2.11.04, W. G. **Overhead conductor safe design tension with respect to Aeolian Vibrations.** [S.l.]: CIGRÉ, 2005.).

BERGEN, A. R.; VITTAL, V. **Power system analysis.** 2a. ed. [S.l.]: Pearson, 2000. 619 p.

BHATTACHARYA, S.; DOMMEL, H. **EMTP Theory Book**. [S.l.]: Microtran Power System Analysis Corporation, 1992.

BURIN, F. d. S. **Modelagem do comportamento de cabos suspensos através de métodos analíticos e numéricos**. Trabalho de Diplomação - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010.

DEB, K. *et al.* A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: nsga-ii. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PARALLEL PROBLEM SOLVING FROM NATURE*, 2000. **Proceedings [...]** [S.l.: s.n.], 2000. p. 849–858.

ELGERD, O. L. **Introdução à teoria de sistemas de energia elétrica**. [S.l.]: Mc Graw Hill, 1978. 604 p.

ESMERALDO, P. C. V. *et al.* A proposed design for the new Furnas 500 kV transmission lines-the High Surge Impedance Loading Line. **IEEE Transactions on Power Delivery**, [S.l.], v. 14, n. 1, p. 278–286, Jan 1999.

FERNANDES, J. H. M. *et al.* Eletronorte and the Challenge of Long-distance transmission in Brazil. *In: CIGRÉ SESSION 2008 WG B2-111*, 2008. **Proceedings [...]** CIGRÉ, 2008.

GHASSEMI, M. High Surge Impedance Loading (HSIL) Lines: a review identifying opportunities, challenges, and future research needs. **IEEE Transactions on Power Delivery**, [S.l.], p. 1–1, 2019.

GONEN, T. **Modern power system analysis**. 2a. ed. [S.l.]: CRC Press, 2013. 734 p.

GRAINGER, J. J.; STEVENSON Jr., W. D. **Power system analysis**. 1a. ed. [S.l.]: Mc Graw Hill, 1994. 784 p.

IEEE, W. G. A Survey of Methods for Calculating Transmission Line Conductor Surface Voltage Gradients. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, [S.l.], v. PAS-98, n. 6, p. 1996–2014, Nov 1979.

KIESSLING, F. *et al.* **Overhead Power Lines: planning design and construction**. Berlin: Springer Verlag, 2003. (ISBN: 3-540-00297-9).

MACHADO, V. G. *et al.* LT 500 kV Interligação Norte/Sul III-Trecho 2-Solução estrutural com torre estaiada monomastro e feixe expandido. **XIX SNPTEE**, [S.l.], 2007.

MONTICELLI, A.; GARCIA, A. **Introdução a Sistemas de Energia Elétrica**. 2a. ed. [S.l.]: Editora da Unicamp, 2011. 264 p.

NEXANS. **Catálogo e especificações de condutores nus**. [S.l.: s.n.], 2009.

ONS. **Mapa do Sistema de Informações Geográficas Cadastrais do SIN**. [S.l.]: Operados Nacional do Sistema Elétrico, 2020.

PAPAILIOU, K. **Overhead Lines**. [S.l.]: Springer International Publishing, 2016. (CIGRE Green Books).

PARK, J. K.; MIN, S. W.; KIM, J. B. Conductor Bundle Geometry Optimization in View of Conductor Surface Gradient. **IEEJ Transactions on Power and Energy**, [S.l.], v. 111, n. 10, p. 1065–1072, 1991.

PEYROT, A. H.; PEYROT, E. M.; SENOUCI, A. Optimization methods for transmission line design. **Engineering Structures**, [S.l.], v. 15, n. 4, p. 239–246, 1993.

PISCHLER, O.; SCHICHLER, U. **Bundle Conductor Geometry Optimization for Reducing Audible Noise of Overhead Power Lines**. 20th International Symposium on High Voltage Engineering, ISH 2017 ; Conference date: 27-08-2017 Through 01-09-2017.

PORTELA, C. Um sistema computacional de otimização de linhas de transmissão não convencionais. **XIV SNPTEE**, [S.l.], 1997.

RÉGIS, O.; DART, F.; CRUZ, A. L. Avaliação comparativa das concepções de linhas de potência natural elevada em 500kV utilizadas no Brasil. *In*: XIII ERIAC ENCUESTRO REGIONAL IBEROAMERICANO DE CIGRÉ, 2009. **Proceedings [...]** CIGRÉ, 2009.

SAADAT, H. **Power system analysis**. [S.l.]: WCB/McGraw-Hill, 1999.

SALARI, J. C.; BARBOSA, C. R. **Manual do Usuário do Sistema Computacional SIGA - Blocos DESCOR, CAMPMAG e ELESTAT**. [S.l.]: CEPEL, 1996.).

SARMA, M. P.; JANISCHEWSKYJ, W. Electrostatic field of a system of parallel cylindrical conductors. **IEEE transactions on power apparatus and systems**, [S.l.], n. 7, p. 1069–1079, 1969.

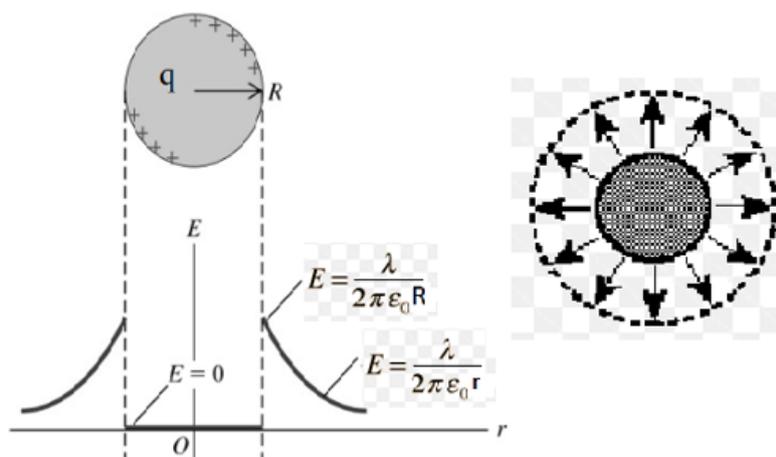
SILVA, J. B. G. F.; HIRUMA, E. K. Projeto Paranaíba - Uma linha com elevada capacidade de transmissão. *In*: XVII ERIAC ENCUESTRO REGIONAL IBEROAMERICANO DE CIGRÉ, 2017. **Proceedings [...]** CIGRÉ, 2017.

APÊNDICE A

A.1 Fundamentos sobre campo elétrico na superfície dos condutores

Um condutor cilíndrico de raio R carregado com densidade de carga linear λ longe de quaisquer outras cargas tem campo elétrico nulo em seu interior e um valor $E(R)$ na sua superfície. A Figura 109 ilustra a distribuição do campo elétrico na superfície do condutor.

Figura 109 – Campo elétrico em condutor cilíndrico



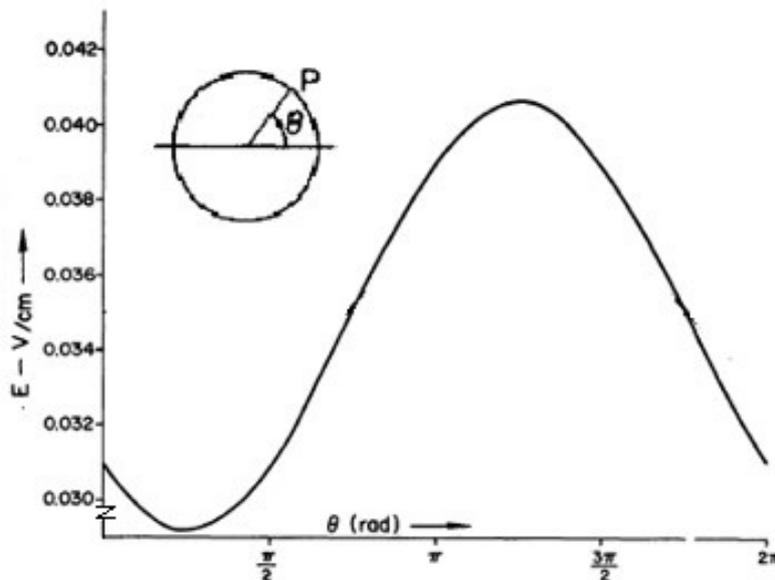
Fonte: adaptado de Google Imagens

Observa-se que, quando o condutor está longe de quaisquer cargas, a magnitude do campo elétrico é uniforme ao longo de sua superfície. Isto é, o perfil angular de campo elétrico na superfície do condutor é constante, como ilustram as setas de mesma magnitude da Figura 109. Isso ocorre pois as cargas se distribuem uniformemente ao longo de sua superfície.

Por outro lado, caso o condutor cilíndrico esteja próximo a outros condutores carregados, as cargas dos condutores influenciam mutuamente a distribuição de cargas dos condutores vizinhos. Nesse caso, cada posição angular da superfície de um condutor terá uma magnitude de campo elétrico diferente, formando um perfil angular não uniforme, conforme ilustra a Figura 110.

Observa-se que, no caso da Figura 110, o campo elétrico é variável, podendo ser caracterizados seus valores mínimo, médio e máximo. O método das imagens sucessivas é capaz de calcular esse perfil. Nas expressões empíricas para cálculo de ruído audível emitido por uma LT, a contribuição de cada sub-condutor é avaliada pelo campo elétrico máximo por CIGRÉ (01 OF SC.36, 1976).

Figura 110 – Campo elétrico na superfície de um cilindro condutor



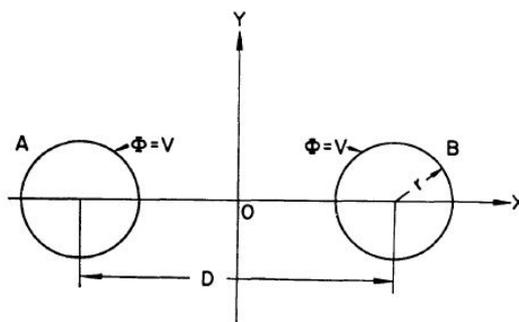
Fonte: adaptado de (SARMA; JANISCHEWSKYJ, 1969)

A.2 Fundamentos do método das imagens sucessivas

O método das imagens sucessivas cria um sistema de cargas equivalentes que representa um sistema de condutores cilíndricos em paralelo. Esse método utiliza imagens no interior de um cilindro para representar o campo elétrico em sua superfície e fora dele.

Considere um sistema de dois condutores cilíndricos paralelos com raio r , afastados por uma distância D e com potencial V , conforme ilustrado na Figura 111. Em uma primeira aproximação, pode-se considerar que $D \gg r$ e, portanto, o condutor B enxerga o condutor A como uma linha de carga com densidade de carga λ e vice-versa.

Figura 111 – Dois condutores cilíndricos paralelos

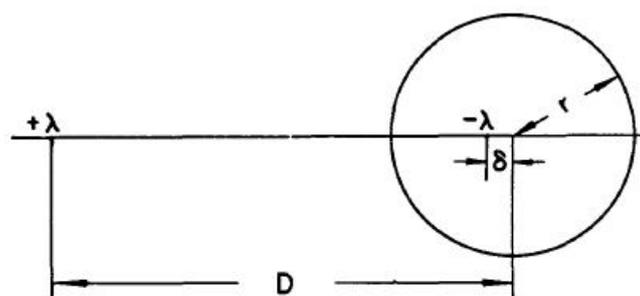


Fonte: adaptado de (SARMA; JANISCHEWSKYJ, 1969)

Para que o condutor B tenha uma superfície equipotencial, uma imagem da carga $+\lambda$ do condutor A é inserida a uma distância δ do centro do condutor B com sinal oposto, conforme ilustra a Figura 112.

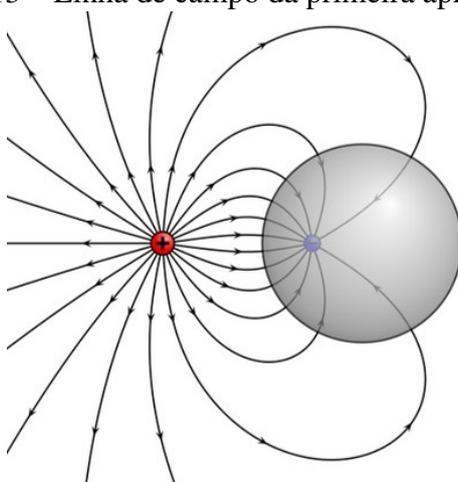
O efeito da primeira aproximação, por imagens nas linhas de campo elétrico, está ilustrado na Figura 113. Como cada condutor deve possuir uma densidade linear de carga líquida $+\lambda$, a carga linear em seu centro após a primeira aproximação deve ser 2λ , con-

Figura 112 – Linha de carga da primeira aproximação



Fonte: adaptado de (SARMA; JANISCHEWSKYJ, 1969)

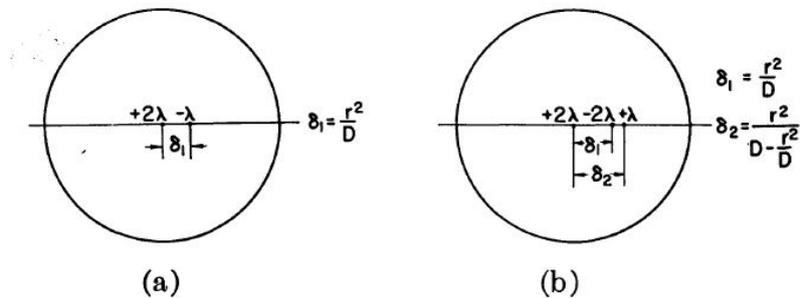
Figura 113 – Linha de campo da primeira aproximação



Fonte: adaptado de Google Imagens

forme mostrado na Figura 114(a).

Figura 114 – Sistema de carga equivalente após (a) 1ª aproximação e (b) 2ª aproximação

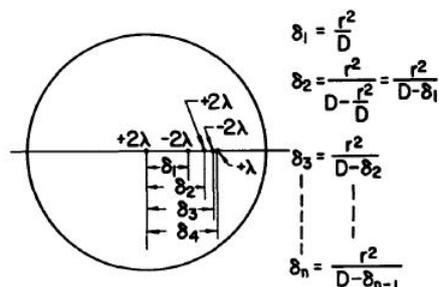


Fonte: (SARMA; JANISCHEWSKYJ, 1969)

Agora ambos os condutores podem ser representados por uma distribuição de cargas conforme a Figura 114(a). Dessa forma, a representação por linhas de carga oriunda da primeira aproximação pode ser utilizada novamente para gerar uma aproximação de segunda ordem, conforme ilustrado na Figura 114(b).

O processo pode ser repetido n vezes até que as distâncias δ_n tornem-se desprezíveis. A Figura 115 apresenta o sistema de cargas resultantes após n aproximações.

Figura 115 – Sistema de carga equivalente após n aproximações



Fonte: (SARMA; JANISCHEWSKYJ, 1969)

O método das imagens sucessivas gera um sistema de cargas lineares posicionados no espaço. A superfície dos condutores tem potencial elétrico Φ e posição conhecidos. Portanto, a solução do sistema de linhas de cargas equivalentes é obtida solucionando-se o sistema da Equação 27. O campo elétrico em qualquer ponto externo aos condutores é dado por:

$$\mathbf{E} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^m \frac{\lambda_i}{|\mathbf{r}_i|^2} \mathbf{r}_i, \quad (26)$$

sendo λ obtido resolvendo-se o seguinte sistema:

$$\Phi = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^m \lambda_i \ln \frac{|\mathbf{r}_{gi}|}{|\mathbf{r}_i|}, \quad (27)$$

onde m é o número total de imagens utilizado, \mathbf{r}_i é o vetor distância entre o ponto da linha de carga e o ponto onde Φ e/ou \mathbf{E} estão sendo calculados e \mathbf{r}_{gi} é a distância de cada linha de carga até o plano de terra (i.e., o potencial de referência).

A.3 Implementação computacional: método das imagens sucessivas

O cálculo do campo elétrico superficial pelo método das imagens sucessivas foi implementado utilizando a ferramenta MATLAB[®]. A implementação foi feita com uma série de funções utilizadas para executar a sequência de passos necessária para calcular o campo elétrico superficial de acordo com o apresentado na Seção A.2. O resumo das funções utilizadas pelo programa é apresentado na Seção A.3.1.

Para a aplicação do programa no algoritmo de otimização codificado conforme Seção 4, foi feita a adaptação tal que o programa recebe um código conforme apresentado na Seção 4.3.2 e transforma essas informações tal que o programa principal aqui apresentado possa fornecer os resultados para o algoritmo de otimização.

A.3.1 Script com sequência de funções

Os comandos seguidos pelo programa para executar uma análise pelo método das imagens sucessivas são apresentados na ilustração do script a seguir:

```
%%DADOS DE ENTRADA DO PROGRAMA
line=10; %Seleciona a linha do banco de dados
[InDat]=linDat(line); %Gera dados de entrada para o programa.
nIm=3; %Define o número de imagens usados
%%CRIAÇÃO DO SISTEMA EQUIVALENTE POR IMAGENS SUCESSIVAS
[sys]=sysCoord(InDat); %Gera coord dos condutores no sistema
[sys]=imagePoints(sys,nIm); %Gera coord das imagens no sistema
[sys]=ccPoints(sys,InDat); %Gera coord das cond. de contorno.
[sys]=coefPotlMatrix(sys); %Gera matriz de coef. de potencial
[sys]=potVector(InDat,sys); %Gera vetor de potenciais elétricos
%%CALCULOS
[res]=eSurfField(sys,InDat); %Resolve o SL, calcula o campo sup.
[efGnd]=efieldGround(lin); %Calcula campo no solo
LCSIL(sys, InData); %Calcula parâmetros elétricos
%%SEÇÃO DE IMAGENS
[geoLT]=plotSysConfig(sys); %Fig da geometria da LT
[Analysis]=eSupAnalysis(res); %Fig da análise de resultados
plotEqImage(sys,cond); %Fig de imagens dentro do condutor
[eFProf]=eFCond(cond,res); %Perfil de campo superficial
[Mag]=plotMag(cond,res); %Magnitude campo sup. em um ciclo
[eFGndProf]=plotEFGnd(efGnd); %Perfil de campo elétrico no solo
%%VERIFICAÇÕES DE RESULTADOS
run potentialGroundLevel.m %Calcula potencial nível do solo
run potentialSurfCond.m %Calcula potencial nos condutores
%%GERA RELATÓRIO
[metrics]=eSFMetrics(res); %Estatísticas de resultados
%%FIM
```

O código de cada uma das funções foi omitido pois é demasiado extenso, sendo desnecessário para entendimento dos passos executados pelo programa no algoritmo de otimização.

A.3.2 Inserção de dados e resultados fornecidos

Nesta seção são apresentadas as principais janelas fornecidas pelo programa implementado. Uma geometria típica de uma LT de 500 kV com quatro subcondutores por fase e feixe expandido 95 cm é utilizada como exemplo.

A Figura 116 apresenta a tela de inserção dos dados geométricos da LT. Os pontos dos condutores são referenciados na cota zero. Assim o programa posiciona posteriormente os condutores a partir das informações de flecha de fase e altura mínima cabo-solo.

Figura 116 – Inserção dos dados geométricos da linha

```

nome=['500kV Monomaistro Cara de Gato - 4x954MCM 45/7 - BEX square(side 95cm)'];
condutor=['ACSR-Rail MCM945 45/7'];
Vline=500; % Tensão máxima operativa de linha rms em kV
n=4; %Número de subcondutores por fase.
a=95;
Dcond=29.59; %Diâmetro (mm) do condutor
De1=9.75; De2=9.75; %Diâmetro (mm) do para raio 1 e 2
sag=20; %flecha de fase (m)
hmin=1250; %altura mínima sobre o solo (cm)
Ra=(0.5*a)/sin(3.14159265359/n); Rb=Ra;Rc=Ra;
%%%Coordenadas dos subcondutores das fases (cm)
%%%Inserir valores em centímetros, sendo a cota mínima igual a zero.
%%%Fase1 (centro geométrico dos condutores da f circl)
F11=[-682.5 0; -682.5 95; -777.5 0; -777.5 95];
%%%Fase2 (centro geométrico dos condutores da fase circl)
F12=[47.5 750; 47.5 845 ; -47.5 750; -47.5 845];
%%%Fase3 (centro geométrico dos condutores da fas circl)
F13=[682.5 0; 682.5 95; 777.5 0; 777.5 95];
%%%Para raio 1 (centro geométrico do para raio)
E1=[-560 1275];
%%%Para raio 2 (centro geométrico do para raio)
E2=[560 1275];
%%%Sequencia de fase F11=A, F12=B, F13=C
phaseSeq='ABC';
folderName='CG500kV_950mm';
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

Fonte: autor

A Figura 117 apresenta a geometria resultante dos dados inseridos, incluindo o nome da LT e o rótulo de identificação dos subcondutores. Os pontos vermelhos são condutores e os verdes os cabos para-raios.

Para cada um dos subcondutores, é possível verificar a posição das imagens em seu interior. A Figura 118 apresenta o sistema de imagens no interior do subcondutor B5. A linha azul representa a superfície do condutor e o X o seu centro geométrico. Os círculos vermelhos são as imagens dos outros condutores do sistema. Os círculos pretos são os pontos do espaço em que o potencial elétrico do condutor B5 é fixado como condição de contorno para resolver o sistema de equações criado a partir da Equação 27.

A Figura 119. apresenta uma vista mais próxima dos pontos das imagens.

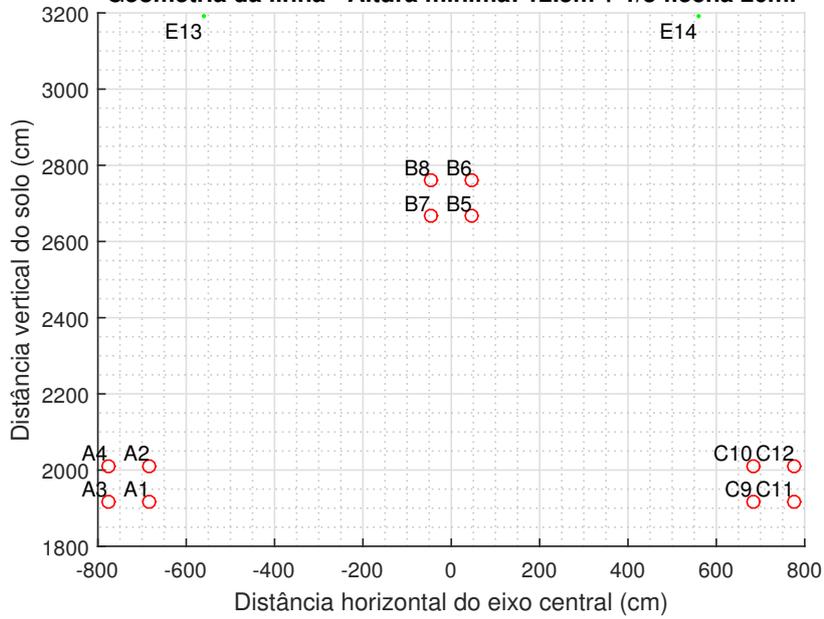
Observa-se que as imagens dos condutores do mesmo feixe (B6,B7 e B8) e dos cabos para-raios (E1 e E2)estão mais afastadas do centro. Isso ocorre pois estes são os condutores mais próximos do subcondutor B5.

A Figura 120 apresenta uma aproximação ainda maior do centro geométrico. Observa-se claramente a posição das imagens dos condutores das fases A e C. Os demais pontos em vermelho, ainda mais próximos do centro do condutor, correspondem aos pontos de imagem que são inseridos abaixo do plano de terra para torna-lo equipotencial.

O programa fornece o perfil angular do campo elétrico na superfície de cada subcondutor, conforme apresentado na Figura 121. Identifica-se portanto os valores mínimo, médio e máximo dos campos bem como as direções para as quais eles ocorrem.

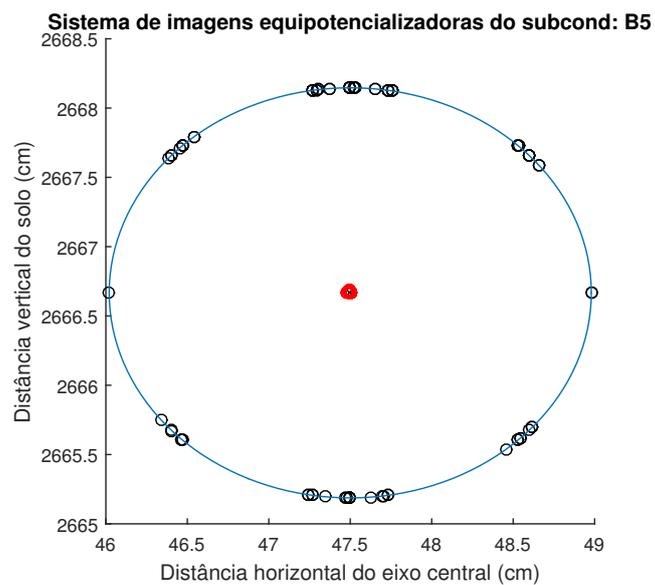
A magnitude do campo elétrico superficial nos subcondutores ao longo de um ciclo de tensão também pode ser apresentada em forma gráfica, conforme apresenta a Figura 122.

Figura 117 – Geometria e rótulo dos subcondutores
 500kV Monomastro Cara de Gato - 4x954MCM 45/7 - BEX square(side 95cm)
 Geometria da linha - Altura mínima: 12.5m + 1/3 flecha 20m.



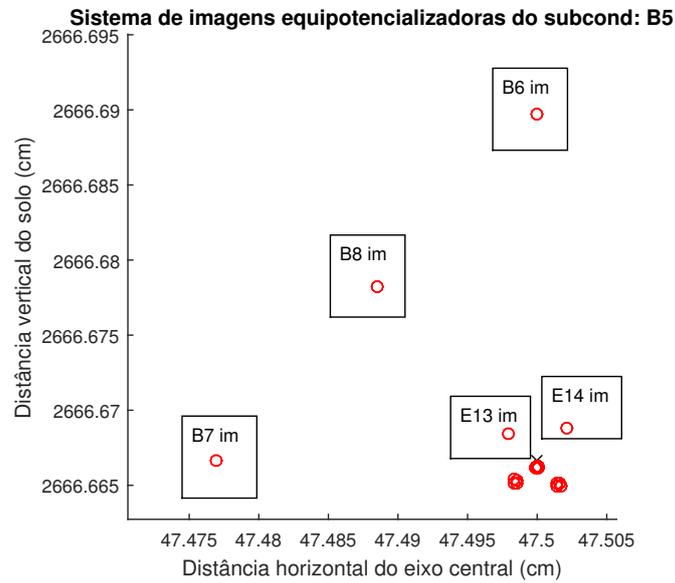
Fonte: autor

Figura 118 – Imagens no interior do subcondutor B5 e pontos na superfície



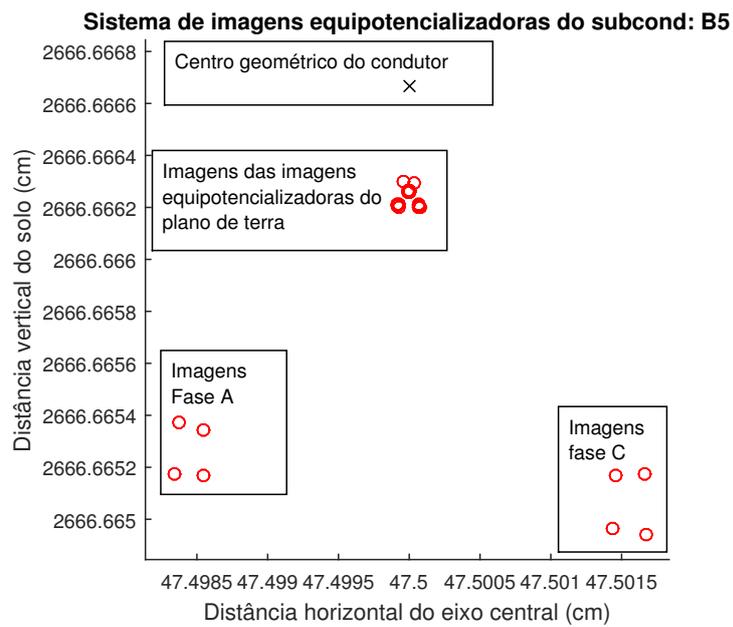
Fonte: autor

Figura 119 – Aproximação 01: Imagens no interior do subcondutor B5



Fonte: autor

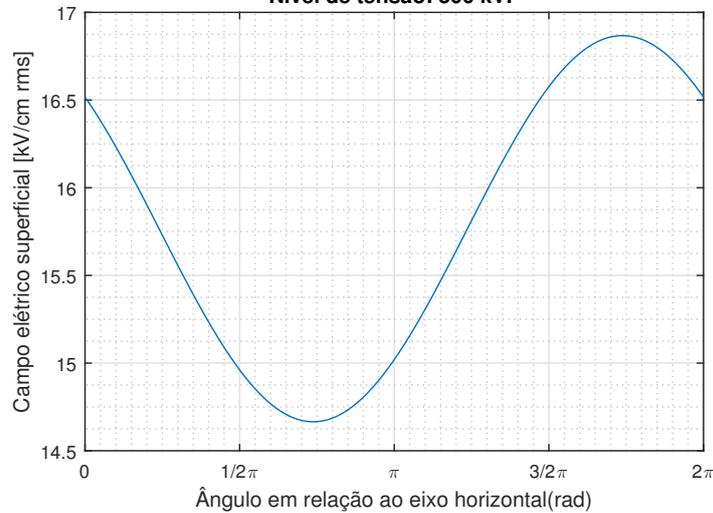
Figura 120 – Aproximação 02: Imagens no interior do subcondutor B5



Fonte: autor

Figura 121 – Perfil angular de campo elétrico superficial - condutor B5

500kV Monomastro Cara de Gato - 4x954MCM 45/7 - BEX square(side 95cm)
 Perfil angular de campo elétrico do subcond: B5. Máx: 16.87. Médio: 15.77 kV/c
 Nível de tensão: 500 kV.

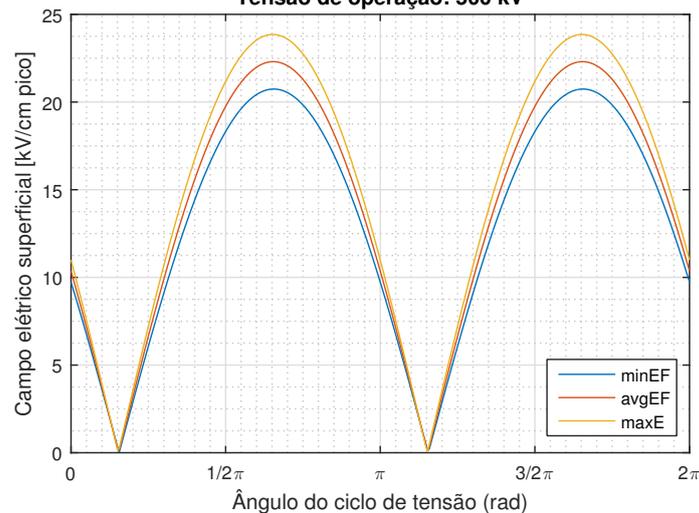


Fonte: autor

Três curvas são apresentadas na Figura 122: A curva azul apresenta a magnitude do campo elétrico ao longo do tempo no ponto onde este tem o seu valor mínimo. A curva amarela apresenta a magnitude do campo elétrico ao longo do tempo no ponto onde este tem o seu valor máximo. A curva vermelha é a média de todos os pontos da superfície do condutor.

Figura 122 – Magnitude do campo elétrico superficial em um ciclo de rede - condutor B5

500kV Monomastro Cara de Gato - 4x954MCM 45/7 - BEX square(side 95cm)
 Magnitude do campo elétrico superficial do cond: B5
 Tensão de operação: 500 kV



Fonte: autor

O sumário de resultados pode ser apresentado na forma de tabela ou gráfica. A Tabela 13 apresenta a imagem da tabela de resultados fornecida. A coluna 2 fornece a posição de cada condutor; a coluna 3, os valores de campo elétrico em cada posição dos condutores em 360° ; a coluna 4, o campo máximo; coluna 5, o campo médio; coluna 6, o campo mínimo; a coluna 7 é o ângulo em graus em que ocorre o campo máximo.

Tabela 13 – Sumário de resultados - Tabela

Condutor	Coordenada X Y (cm)	Pontos	E máx (kV/cm)	E med (kV/cm)	E min (kV/cm)	Ângulo E máx (°)
A1	[-682,5 1916,7]	1x360 double	15,21	14,24	13,26	320,9
A2	[-682,5 2011,7]	1x360 double	15,70	14,66	13,61	43,1
A3	[-777,5 1916,7]	1x360 double	14,43	13,58	12,72	226,6
A4	[-777,5 2011,7]	1x360 double	14,83	13,92	13,00	130,4
B5	[47,5 2666,7]	1x360 double	16,87	15,77	14,67	312,9
B6	[47,5 2761,7]	1x360 double	16,07	15,09	14,10	41,1
B7	[-47,5 2666,7]	1x360 double	16,87	15,77	14,67	227,6
B8	[-47,5 2761,7]	1x360 double	16,07	15,08	14,10	138,4
C9	[682,5 1916,7]	1x360 double	15,21	14,24	13,26	219,6
C10	[682,5 2011,7]	1x360 double	15,70	14,65	13,61	136,4
C11	[777,5 1916,7]	1x360 double	14,43	13,58	12,72	313,9
C12	[777,5 2011,7]	1x360 double	14,83	13,92	13,00	50,1
E13	[-560 3191,7]	1x360 double	14,85	14,71	14,57	326,9
E14	[560 3191,7]	1x360 double	14,85	14,71	14,57	213,6

Os resultados também são resumidos de forma gráfica, conforme apresentado na Figura 123. A Figura apresenta 123 o detalhe dos resultados para a fase A.

Os triângulos vermelhos são os valores máximos e mínimos dos campos em cada subcondutor. A barra cinza é o valor médio. A linha amarela corresponde à média dos subcondutores da fase A e a linha rosa pontilhada à média dos valores máximos.

A partir da distribuição de cargas resultante, é possível calcular também o perfil de campo elétrico ao nível do solo. A Figura 124 apresenta o perfil de campo elétrico ao nível do solo. Este perfil é calculado no ponto onde os condutores estão mais baixos, ou seja, na altura mínima cabo-solo estabelecida.

O programa também fornece uma tabela através da qual é possível verificar a qualidade dos resultados obtidos através do cálculo do potencial elétrico na superfície dos condutores e ao nível do solo. A Tabela 14 mostra como e quais os resultados que ficam armazenados para verificação dos cálculos.

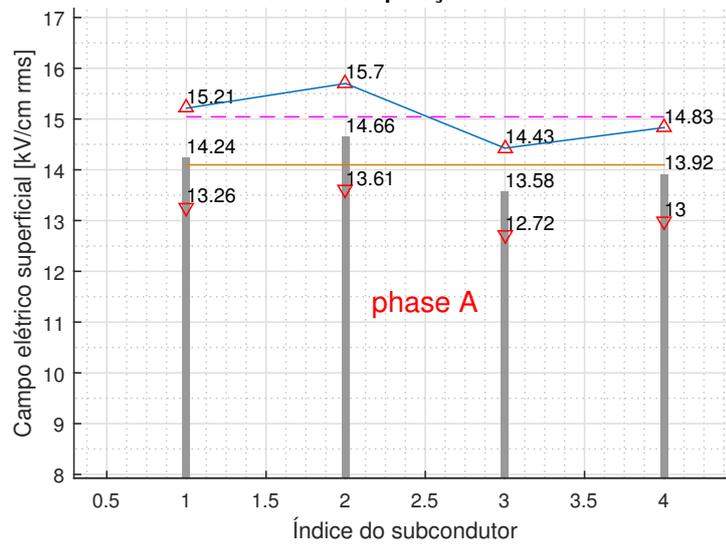
A célula (1,1) armazena o perfil potencial elétrico ao nível do solo ao longo da faixa. Em tese, todos os pontos deveriam ter potencial zero, porém, como se trata de uma aproximação, há valores que não são nulos. A célula (2,1) registra o valor máximo em volts.

A coluna 2 armazena os valores de potencial elétrico calculados em 180 pontos da superfície dos condutores. A coluna 3 fornece a média desses valores. A coluna 4 contém a diferença máxima de potencial elétrico calculado na superfície do mesmo condutor em volts. A coluna 5 armazena a média dos ângulos de fase do potencial. A coluna 6 armazena a defasagem angular máxima entre os potenciais calculados de um mesmo subcondutor.

A.3.3 Auto-avaliação dos resultados

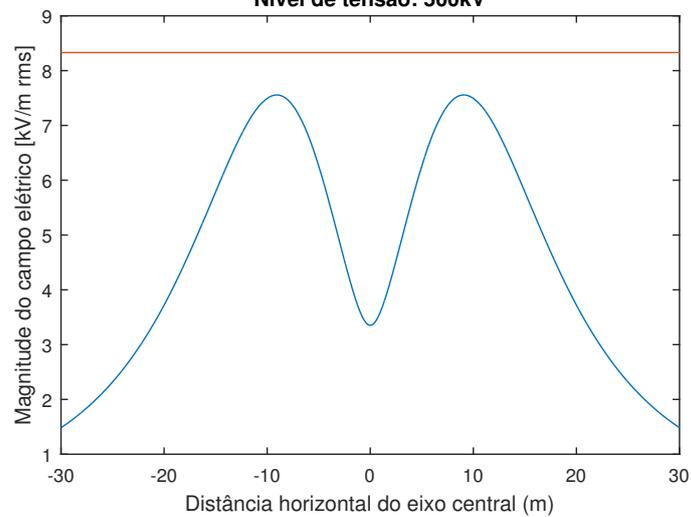
O sistema de linhas de carga gerado pelo método das imagens sucessivas deve fornecer os mesmos resultados que um sistema de condutores perfeitos cilíndricos. Isto é, o potencial elétrico calculado a partir das linhas de carga deve ser o mesmo em cada ponto da superfície de um mesmo subcondutor. Este valor deve ser também igual ao potencial elétrico correspondente utilizado para resolver o sistema gerado pela Equação (27).

Figura 123 – Sumário de resultados - Forma gráfica
500kV Monomastro Cara de Gato - 4x954MCM 45/7 - BEX square(side 95cm)
Campo elétrico nos subcondutores. Altura mínima: 12.5m. 1/3 flecha: 6.67m.
Tensão de operação: 500kV.



Fonte: autor

Figura 124 – Perfil campo elétrico nível do solo
500kV Monomastro Cara de Gato - 4x954MCM 45/7 - BEX square(side 95cm)
Perfil de campo elétrico a 1.5m do nível do solo. Altura mínima: 12.5m.
Nível de tensão: 500kV



Fonte: autor

Tabela 14 – Tabela com dados para verificação dos resultados

Campo no solo	Pontos	Média potencial (kV)	Diferença (V)	Média fase(°)	Defasagem máx (°)
2x1000 double	180x2 double	288,6846	55,4	-0,00010	0,0004
3.6505e-05mV	180x2 double	288,6640	41,6	-0,00038	0,0009
□	180x2 double	288,6838	29,5	-0,00010	0,0006
□	180x2 double	288,6634	49,0	-0,00035	0,0010
□	180x2 double	288,6880	57,0	-120,00002	0,0022
□	180x2 double	288,6643	60,0	-120,00001	0,0020
□	180x2 double	288,6878	57,0	-119,99997	0,0022
□	180x2 double	288,6640	60,0	-119,99998	0,0020
□	180x2 double	288,6843	55,4	120,00010	0,0004
□	180x2 double	288,6638	41,6	120,00038	0,0009
□	180x2 double	288,6839	29,5	120,00010	0,0006
□	180x2 double	288,6636	49,0	120,00035	0,0010
□	180x2 double	0,0020	3,7	-45,87001	358,2317
□	180x2 double	0,0020	3,7	-18,39576	199,7421

Portanto, quanto menor for a diferença de potencial elétrico nos pontos da superfície do mesmo subcondutor, mais satisfatório é o resultado.

O programa implementado tem uma rotina para fazer uma auto-avaliação dos resultados gerados. Como o número de imagens utilizado é finito, o potencial calculado em diferentes pontos da superfície de um mesmo condutor não é igual. A Tabela 15 apresenta um exemplo de avaliação da qualidade dos resultados obtidos para uma LT 500 kV com quatro subcondutores por fase espaçados regularmente em um feixe quadrado de 157 mm. O diâmetro do condutor é 29,59 mm. O número de imagens é 12, gerando uma aproximação de 13^a ordem.

Tabela 15 – Avaliação dos resultados - aproximação 13^a ordem

Condutor	Potencial médio	Diferença (%)	Diferença máxima	Diferença (%)
	$V_{med}(kV) * \sqrt{3}$	$\frac{V_{med} * \sqrt{3} - 500}{500}$	$V_{mx} - V_{min}(V)$	$\frac{V_{mx} - V_{min}}{V_{med}}$
A1	500,019	0,004	71,3	0,025
A2	499,965	-0,007	90,2	0,031
A3	499,998	0,000	53,8	0,019
A4	499,982	-0,004	89,5	0,031
B5	500,038	0,008	67,4	0,023
B6	499,961	-0,008	84,0	0,029
B7	500,038	0,008	67,4	0,023
B8	499,961	-0,008	84,0	0,029
C9	500,018	0,004	71,3	0,025
C10	499,965	-0,007	90,2	0,031
C11	499,998	0,000	53,8	0,019
C12	499,982	-0,004	89,5	0,031

Observa-se que, para o espaçamento de 157 mm, a aproximação de 13^a ordem é plenamente satisfatória pois gera diferenças relativas de potencial nos condutores muito pequenas e, portanto, desprezáveis. Tal resultado também indica que os vetores de campo

elétrico na superfície dos condutores estão razoavelmente ortogonais à suas superfícies e portanto fornecem resultados satisfatórios.

A.3.4 Validação de resultados

A implementação computacional do método das imagens sucessivas foi validada comparando o resultados dos campos elétricos superficiais com os resultados fornecidos pelo SIGA (Sistema Integrado de Gerenciamento de Arquivos), programa consagrado para esse tipo de cálculo desenvolvido pelo CEPTEL (SALARI; BARBOSA, 1996).

As Tabelas 16, 17, 18 apresentam a comparação entre os resultados obtidos com a implementação computacional e o programa SIGA do CEPTEL. Os valores apresentados foram obtidos com uso de uma aproximação de décima terceira ordem.

Tabela 16 – Validação dos resultados - Projeto Paranaíba
Projeto Paranaíba - Cálculo E_{sup} (kV/cm)

	MIS implementado		SIGA -CEPEL		Diferença (%)	
	Médio	Máximo	Médio	Máximo	Médio	Máximo
A1	13,858	14,54	13,86	14,54	0,01	0,00
A2	15,742	16,677	15,74	16,69	-0,01	0,08
A3	12,56	13,078	12,56	13,07	0,00	-0,06
A4	16,343	17,336	16,34	17,35	-0,02	0,08
A5	13,859	14,545	13,86	14,54	0,01	-0,03
A6	15,728	16,662	15,73	16,67	0,01	0,05
B7	15,691	17,398	15,69	17,39	-0,01	-0,05
B8	14,669	16,147	14,67	16,15	0,01	0,02
B9	15,722	17,44	15,73	17,45	0,05	0,06
B10	15,685	17,398	15,69	17,39	0,03	-0,05
B11	14,661	16,147	14,67	16,15	0,06	0,02
B12	15,716	17,44	15,73	17,45	0,09	0,06
C13	13,86	14,541	13,86	14,54	0,00	-0,01
C14	15,738	16,677	15,74	16,69	0,01	0,08
C15	12,563	13,078	12,56	13,07	-0,02	-0,06
C16	16,337	17,337	16,34	17,35	0,02	0,07
C17	13,861	14,546	13,86	14,54	-0,01	-0,04
C18	15,724	16,662	15,73	16,67	0,04	0,05

Observa-se que, para os espaçamentos e diâmetros de condutor considerados, as diferenças entre os valores obtidos com a ferramenta implementada e com o programa do CEPTEL são desprezáveis. Portanto, considera-se que a ferramenta implementada fornece resultados plenamente satisfatórios quando um número adequado de imagens é utilizado.

Tabela 17 – Validação dos resultados - VX CHESF
 VX CHESF - Cálculo E_{sup} (kV/cm)

	MIS implementado		SIGA -CEPEL		Diferença (%)	
	Médio	Máximo	Médio	Máximo	Médio	Máximo
A1	15,3029	16,1326	15,29	16,10	-0,08	-0,20
A2	14,7218	15,4867	14,71	15,50	-0,08	0,09
A3	14,8123	15,438	14,81	15,46	-0,02	0,14
A4	14,6959	15,3534	14,69	15,31	-0,04	-0,28
B5	14,8431	15,9186	14,85	15,91	0,05	-0,05
B6	14,7974	15,8667	14,78	15,86	-0,12	-0,04
B7	14,8389	15,9183	14,85	15,91	0,07	-0,05
B8	14,7932	15,8664	14,78	15,86	-0,09	-0,04
C9	15,2997	16,1324	15,29	16,10	-0,06	-0,20
C10	14,7182	15,4864	14,71	15,50	-0,06	0,09
C11	14,8145	15,4383	14,81	15,46	-0,03	0,14
C12	14,6985	15,3535	14,69	15,31	-0,06	-0,28

Tabela 18 – Validação dos resultados - Raquete Compacta
 Raquete Compacta - Cálculo E_{sup} (kV/cm)

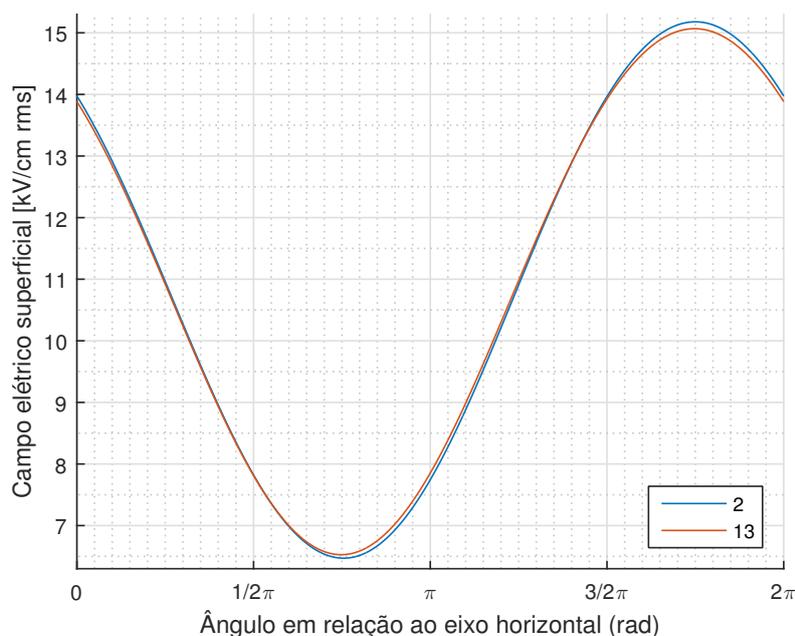
	MIS implementado		SIGA - CEPEL		Diferença (%)	
	Médio	Máximo	Médio	Máximo	Médio	Máximo
A1	14,007	15,9469	14,01	15,93	0,02	-0,11
A2	13,2949	15,0248	13,3	15,01	0,04	-0,10
A3	15,4438	16,52	15,45	16,53	-0,04	0,06
A4	13,6652	15,5159	13,67	15,51	0,04	-0,04
B5	15,6212	17,8192	15,65	17,83	0,18	0,06
B6	14,8916	16,876	14,91	16,85	0,12	-0,15
B7	15,6128	17,8188	15,65	17,83	0,24	0,06
B8	14,8832	16,8757	14,91	16,85	0,18	-0,15
C9	13,9988	15,947	14,01	15,93	0,08	-0,11
C10	13,3017	15,0252	13,3	15,01	-0,01	-0,10
C11	14,4355	16,5202	14,45	16,53	0,10	0,06
C12	13,672	15,5155	13,67	15,51	-0,01	-0,04

A.3.5 Número de imagens no algoritmo de otimização

No algoritmo de otimização descrito no capítulo 4, adota-se 1(um) para o número de imagens utilizadas, ou seja, uma aproximação de segunda ordem. O programa implementado utiliza portanto duas linhas de carga para representar cada subcondutor pelas razões descritas a seguir.

A Figura 125 apresenta o perfil de campo elétrico de uma LT calculada utilizando aproximação de 2ª ordem e 13ª ordem. A linha tem quatro subcondutores por fase dispostos em um feixe quadrado de lado 15,7 cm. Esse pequeno afastamento foi escolhido para a verificação do número mínimo de imagens a ser utilizado, pois é um afastamento bem pequeno, que representa a maior influência dos subcondutores de uma mesma fase sobre seus vizinhos. Desta forma, é possível comparar a diferença entre os resultados com o uso de diferentes números de imagens em uma condição pessimista, onde a proximidade dos condutores implica erros maiores. O diâmetro do condutor é 29,59 mm. A tensão de operação da LT é 500 kV.

Figura 125 – Perfil angular de campo elétrico: 2 vs 13 linhas de carga



Fonte: autor

Verifica-se que ambas aproximações fornecem resultados muito parecidos. O valor de campo elétrico máximo obtido com a aproximação de 2ª ordem é 15,18 kV/cm. A aproximação de 13ª ordem resulta em um campo máximo de 15,07 kV/cm. Isso corresponde a uma diferença relativa de 0,74%.

Conforme apresentado na Seção 4.2, a distância mínima permitida entre subcondutores é 20 cm. Como o erro da aproximação será tão maior quanto menor for a distância entre os subcondutores, a distância mínima de 20 cm garante que o erro máximo da avaliação dos campos elétricos seja inferior à 0,74%, se comparado a usar aproximação de 13ª ordem.

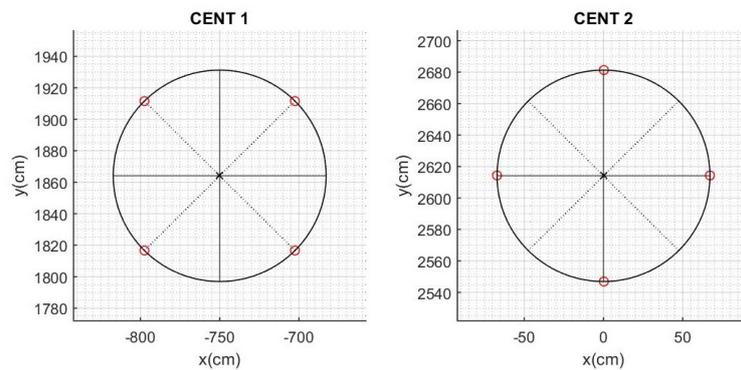
APÊNDICE B

B.1 Análise de geometria de feixe assimétrico

Este apêndice contém as geometrias de feixe consideradas para o estudo dos efeitos da assimetria do feixe sobre os parâmetros elétricos das linhas de transmissão. Em todas as figuras, o marcador 'X' representa o centro geométrico do feixe.

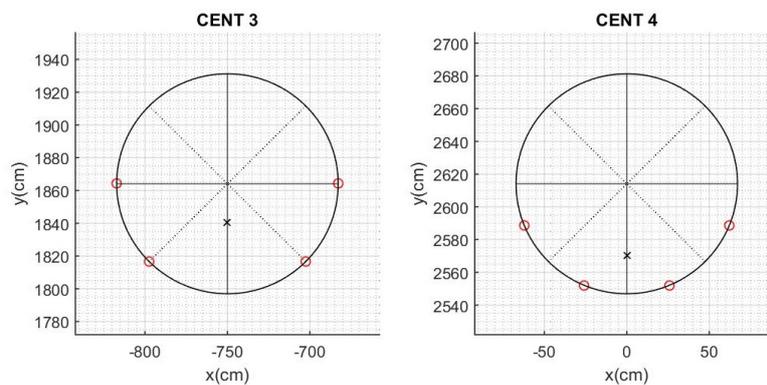
B.1.1 Geometrias de feixe central consideradas

Figura 126 – Geometrias C1 e C2



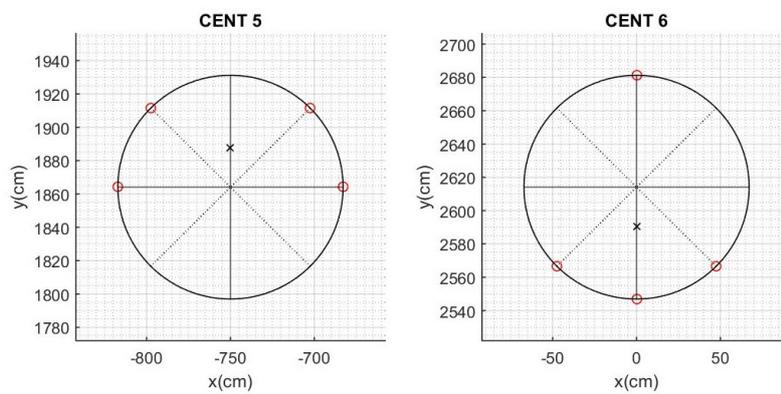
Fonte: autor

Figura 127 – Geometrias C3 e C4



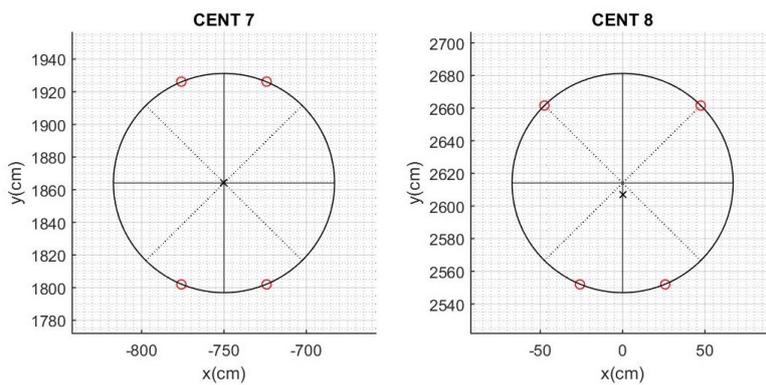
Fonte: autor

Figura 128 – Geometrias C5 e C6



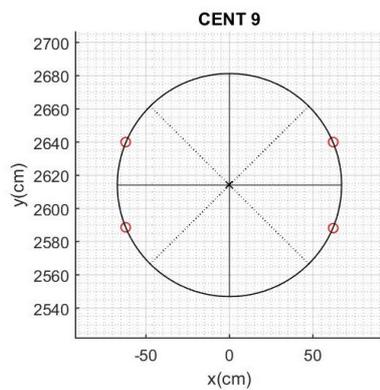
Fonte: autor

Figura 129 – Geometrias C7 e C8



Fonte: autor

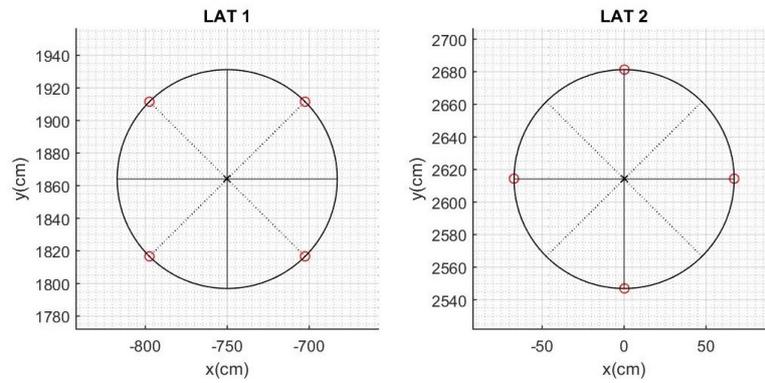
Figura 130 – Geometria C9



Fonte: autor

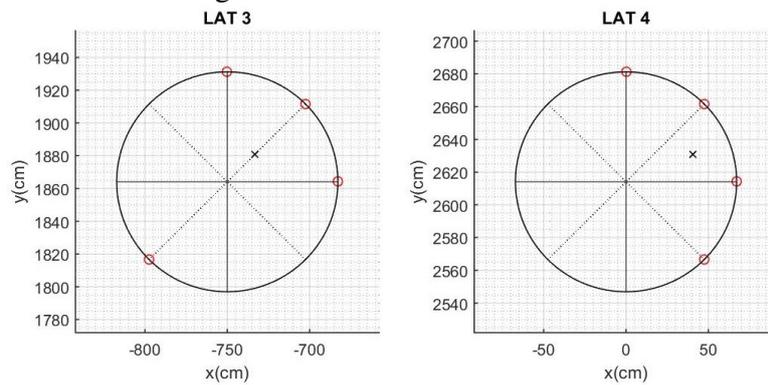
B.1.2 Geometrias de feixe lateral consideradas

Figura 131 – Geometrias L1 e L2



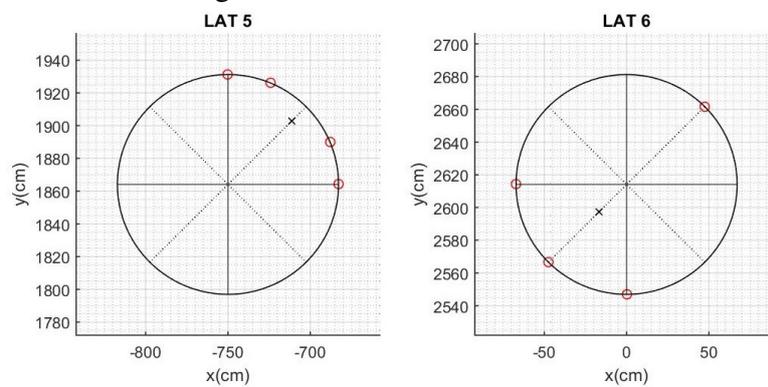
Fonte: autor

Figura 132 – Geometrias L3 e L4



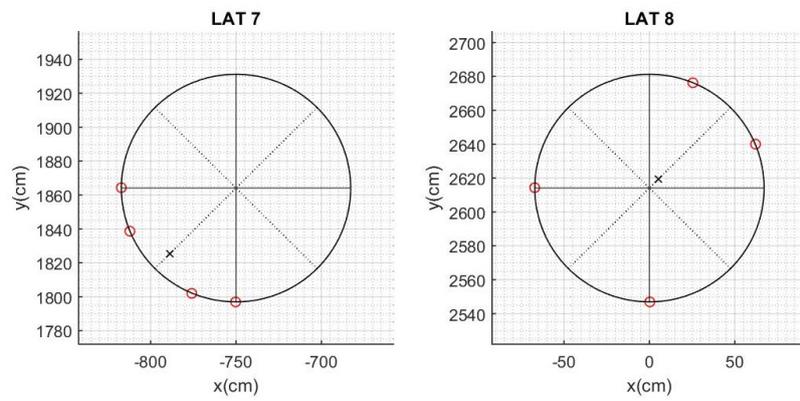
Fonte: autor

Figura 133 – Geometrias L5 e L6



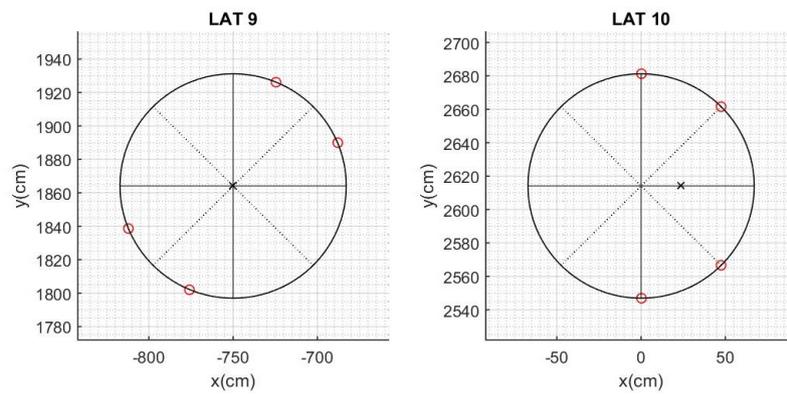
Fonte: autor

Figura 134 – Geometrias L7 e L8



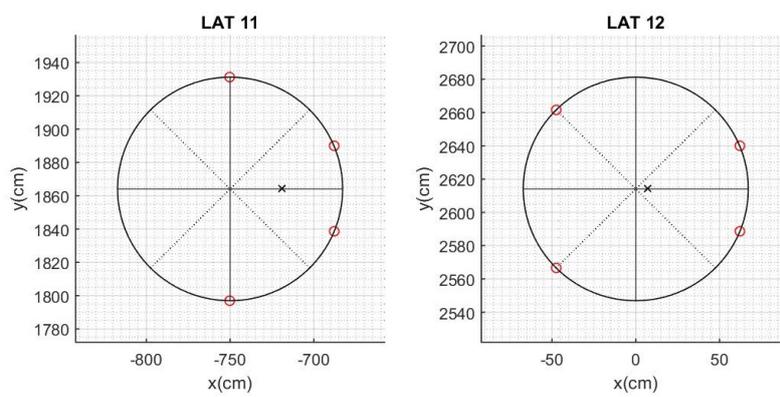
Fonte: autor

Figura 135 – Geometrias L9 e L10



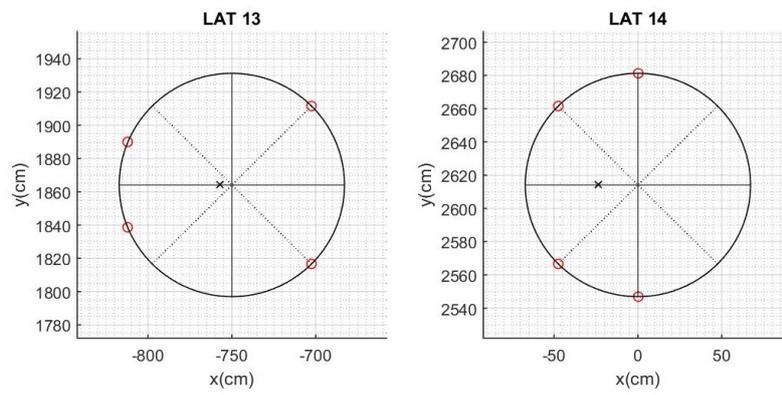
Fonte: autor

Figura 136 – Geometrias L11 e L12



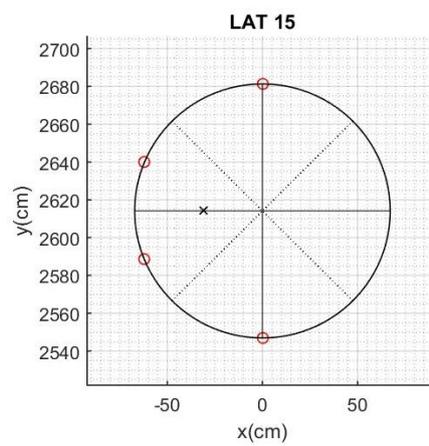
Fonte: autor

Figura 137 – Geometrias L13 e L14



Fonte: autor

Figura 138 – Geometria L15



Fonte: autor

B.1.3 Geometria horizontal compacta

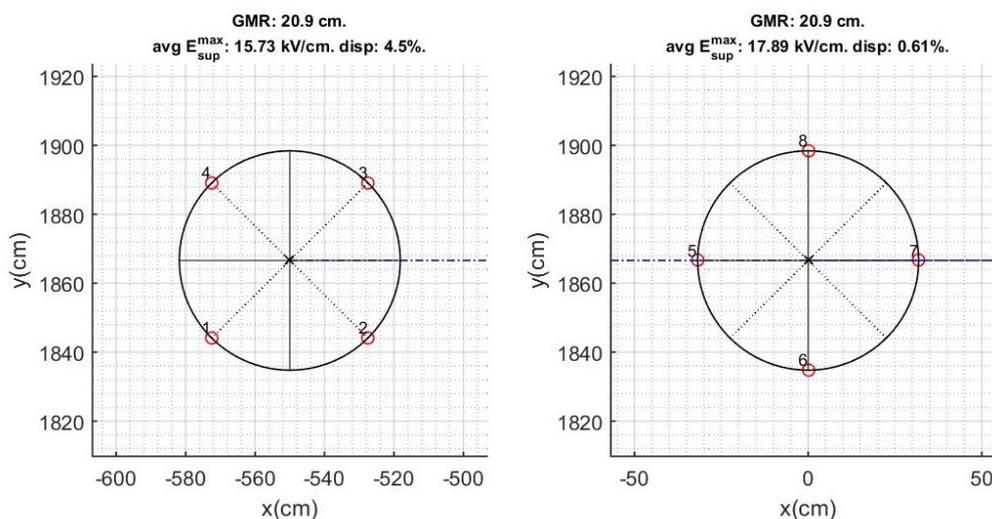
Esta subsecção apresenta os efeitos da assimetria do feixe em um circuito horizontal compacto. Cada item apresentado a seguir diz respeito a uma modificação na distribuição dos condutores dentro do círculo que circunscreve um quadrado de lado 45,7 cm.

- L1C2: Rotação de 90° no feixe central

A configuração L1C2 consiste na simples rotação do feixe de fase central 90°, em relação à geometria L1C1.

A Figura 139 mostra os detalhes da geometria dos feixes lateral e central, da configuração L1C2. Em cima de cada feixe, é apresentado o valor do raio médio geométrico do feixe (GMR), a média dos campos elétricos superficiais máximos e a sua dispersão relativa.

Figura 139 – Circuito horizontal compacto detalhe do feixe - L1C2

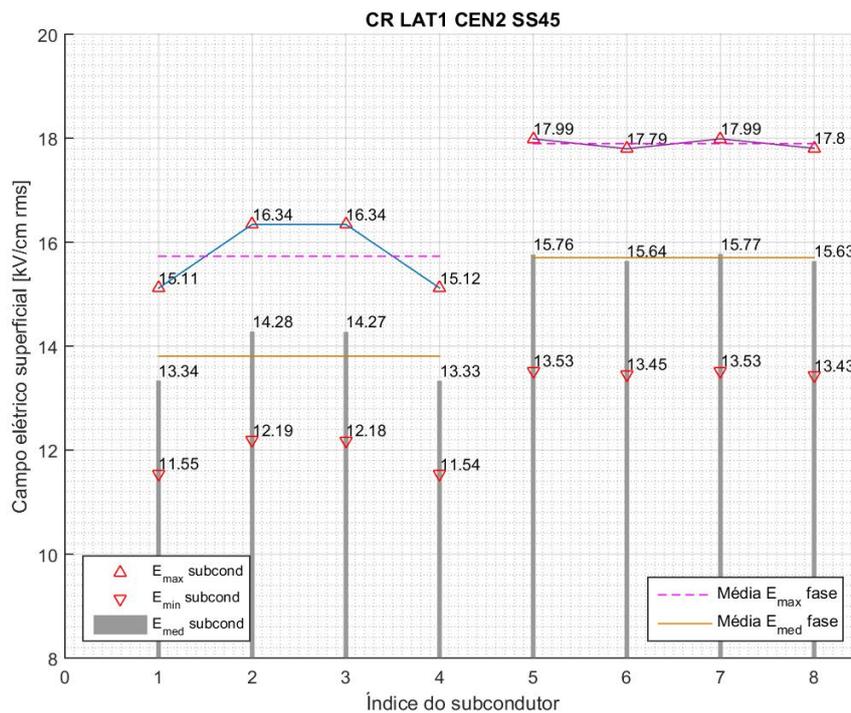


Fonte: autor

A Figura 140 apresenta o detalhe dos cálculos dos campos elétricos superficiais em cada um dos subcondutores representados na Figura 139.

A configuração L1C2 resulta em uma potência natural de 1180,3 MW, uma média de campos elétricos superficiais máximos de 16,45 kV/cm e uma dispersão relativa dos campos de 6,92%. A pequena diferença entre a dispersão da configuração L1C2 e L1C1 se deve ao desequilíbrio dos condutores da fase central. Os subcondutores 5 e 7 se aproximam das fases laterais, aumentando seu campo. Por outro lado, os condutores 6 e 8 se afastam das fases laterais, diminuindo o campo elétrico em sua superfície. Ambos os efeitos se anulam quando se computa a média do feixe central.

Figura 140 – Assimetria do feixe: campos elétricos superficiais configuração L1C2



Fonte: autor

- L10C1: Aproximação dos condutores mais externos dos feixes laterais

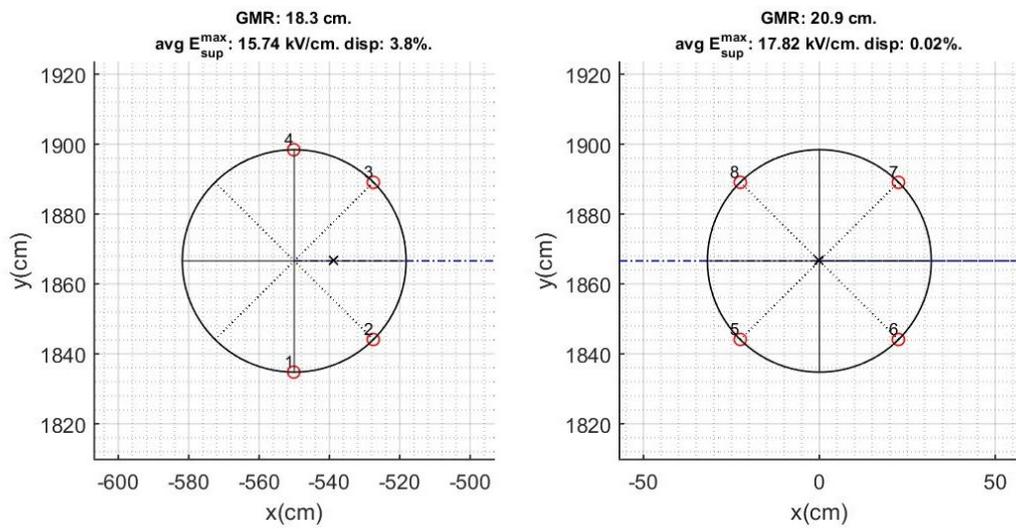
A configuração L10C1 consiste na aproximação dos subcondutores mais externos das fases laterais com os subcondutores mais internos. A configuração do feixe central permanece igual à solução de referência C1.

A Figura 141 mostra os detalhes da geometria dos feixes lateral e central, da configuração L10C1. O marcador preto em X representa a localização do centro geométrico do feixe. Em cima de cada feixe, é apresentado o valor do raio médio geométrico do feixe (GMR), a média dos campos elétricos superficiais máximos e a sua dispersão relativa. A aproximação dos condutores causa a redução do raio médio geométrico do feixe lateral, se comparado a geometria de referência L1C1.

A Figura 142 apresenta o detalhe dos cálculos dos campos elétricos superficiais em cada um dos subcondutores representados na Figura 141. A aproximação dos subcondutores 1 e 4 com o feixe de fases central provoca um aumento dos seus campos superficiais, se comparado à solução de referência. Por outro lado, a aproximação dos subcondutores 1 e 4 com os subcondutores 3 e 2 provoca a diminuição dos campos elétricos dos subcondutores 3 e 2, se comparado à configuração de referência simétrica. Observa-se que os campos superficiais dos subcondutores do feixe central diminuem sensivelmente. Tal diminuição ocorre devido à diminuição da capacitância entre as fases, causada pela diminuição do raio médio geométrico do feixe lateral.

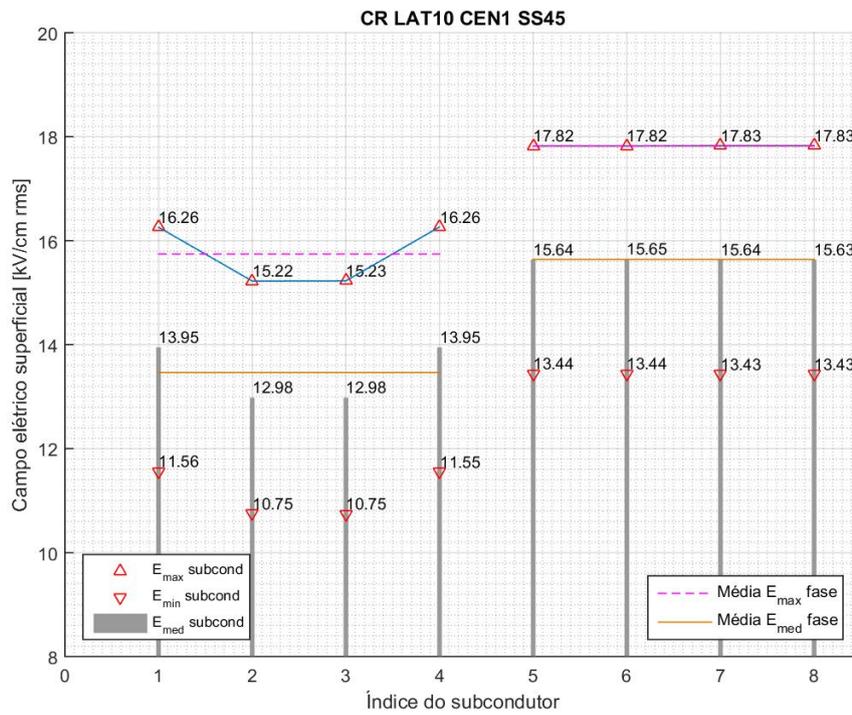
A configuração L10C1 resulta em uma potência natural de 1158,6 MW, uma média de campos elétricos superficiais máximos de 16,44 kV/cm e uma dispersão relativa dos campos de 6,79%. A diminuição de potência natural é logicamente esperada, uma vez que o raio médio geométrico dos feixes laterais diminuiu. A diminuição da média dos campos superficiais dos condutores mais internos dos feixes laterais e dos subcondutores do feixe

Figura 141 – Circuito horizontal compacto detalhe do feixe - L10C1



Fonte: autor

Figura 142 – Assimetria do feixe: campos elétricos superficiais configuração L10C1



Fonte: autor

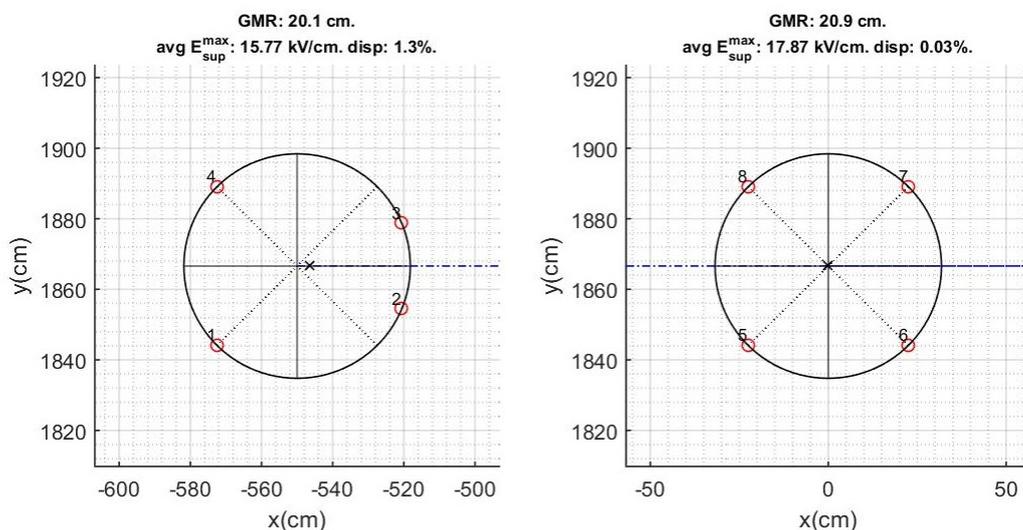
central provocam uma sensível diminuição da média total dos campos bem como de suas dispersões.

- L12C1: Compactação dos subcondutores mais internos do feixe lateral.

A configuração L12C1 consiste na aproximação dos subcondutores mais internos das fases laterais. A configuração do feixe central permanece igual à solução de referência C1.

A Figura 143 mostra os detalhes da geometria dos feixes lateral e central, da configuração L12C1. O marcador X preto representa a localização do centro geométrico do feixe. Em cima de cada feixe, é apresentado o valor do raio médio geométrico do feixe (GMR), a média dos campos elétricos superficiais máximos e a sua dispersão relativa. A aproximação dos condutores 2 e 3 causa uma pequena redução do raio médio geométrico do feixe lateral, se comparado à configuração simétrica.

Figura 143 – Circuito horizontal compacto detalhe do feixe - L12C1



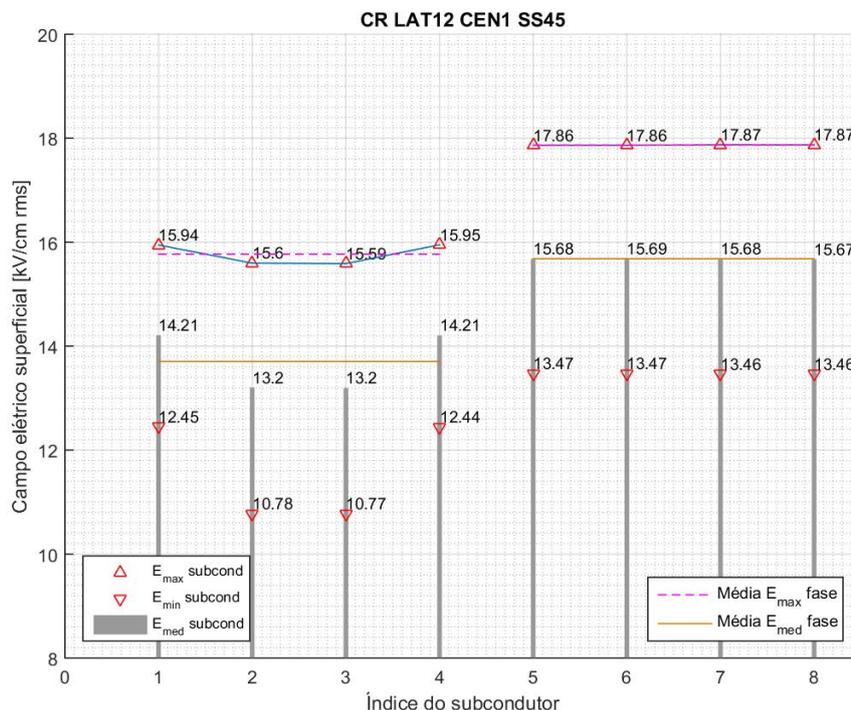
Fonte: autor

A Figura 144 apresenta os resultados dos cálculos de campos elétricos superficiais em cada um dos subcondutores representados na Figura 143. A aproximação dos subcondutores 2 e 3 com o feixe de fases central reduz seus campos superficiais, aproximando os seus valores aos dos subcondutores mais externos (1 e 4). Com isso, a dispersão dos campos elétricos nos feixes laterais diminui, se comparado à solução simétrica de referência.

Por outro lado, a aproximação dos dos subcondutores 1 e 4 com os subcondutores 3 e 2 provoca a diminuição dos campos elétricos dos subcondutores 3 e 2, se comparado à configuração de referência simétrica.

A configuração L12C1 resulta em uma potência natural de 1173,5 MW, uma média de campos elétricos superficiais máximos de 16,47 kV/cm e uma dispersão relativa dos campos de 6,88%. A redução na dispersão relativa se deve à redução da dispersão dos feixes laterais. O sensível aumento na média dos campos elétricos superficiais pode ser explicada devido a dois fatores: (i) a aproximação dos condutores 2 e 3 do feixe central e (ii) a sensível redução da distância média geométrica causada por essa aproximação. A diminuição de potência natural é pequena e logicamente esperada devido à redução do raio médio geométrico dos feixes laterais.

Figura 144 – Assimetria do feixe: campos elétricos superficiais configuração L12C1



Fonte: autor

- L12C7: Aproximação dos subcondutores do feixe central com o eixo vertical.

A configuração L12C1 consiste na aproximação dos subcondutores mais internos das fases laterais e a aproximação dos subcondutores do feixe central com o eixo vertical.

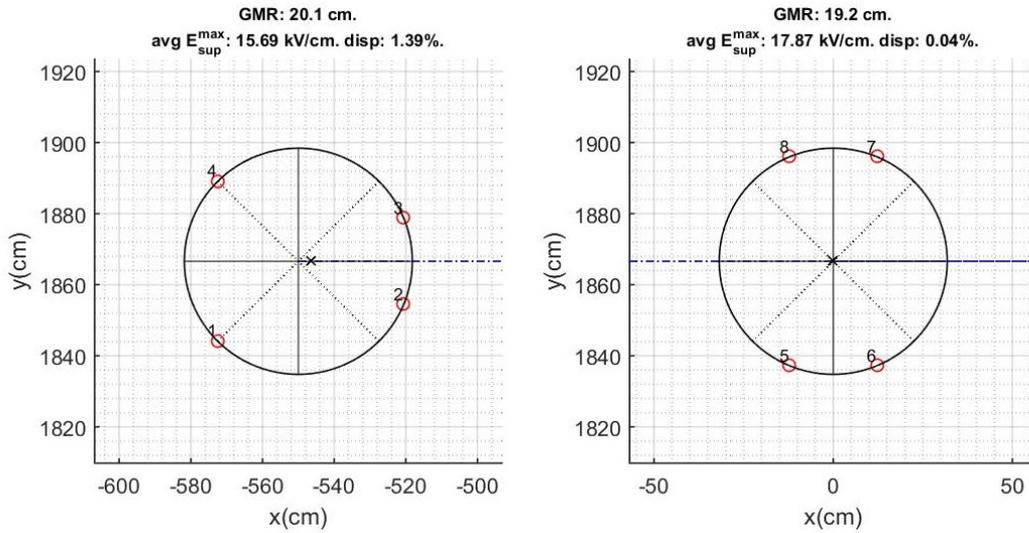
A Figura 145 mostra os detalhes da geometria dos feixes lateral e central da configuração L12C7. O marcador X preto representa a localização do centro geométrico do feixe. Em cima de cada feixe, é apresentado o valor do raio médio geométrico do feixe (GMR), a média dos campos elétricos superficiais máximos e a sua dispersão relativa. A aproximação de todos os subcondutores do feixe central com o eixo vertical reduz o raio médio geométrico do feixe central.

A Figura 146 apresenta os resultados dos cálculos de campos elétricos superficiais em cada um dos subcondutores representados na Figura 145.

A aproximação dos subcondutores do feixe central com o eixo vertical pouco afeta a média dos campos elétricos superficiais do feixe. Devido à simetria da configuração, a redução de campo elétrico do subcondutor 8 causada pela sua aproximação com o condutor 7 é compensada pelo aumento do campo causado pelo seu afastamento do condutor 5. Por outro lado, observa-se uma sensível redução nos campos elétricos dos feixes laterais, se comparado à configuração L12C1. Tal redução pode ser explicada pelo aumento da distância média geométrica entre os subcondutores do feixe central e os subcondutores do feixe lateral.

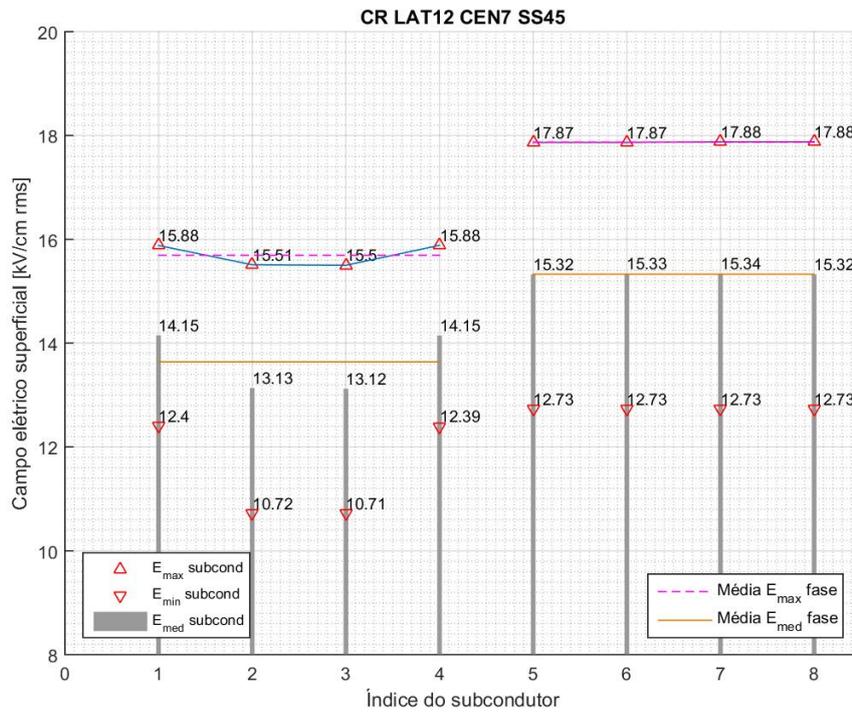
A configuração L12C7 resulta em uma potência natural de 1163,8 MW, uma média de campos elétricos superficiais máximos de 16,42 kV/cm e uma dispersão relativa dos campos de 6,33%. Se comparado à configuração L12C1, a diminuição da potência natural é explicada pelo aumento da distância média geométrica e pela redução do raio médio geométrico do feixe central. Por esta mesma razão, ocorre uma redução da média dos campos

Figura 145 – Circuito horizontal compacto detalhe do feixe - L12C7



Fonte: autor

Figura 146 – Assimetria do feixe: campos elétricos superficiais configuração L12C7



Fonte: autor

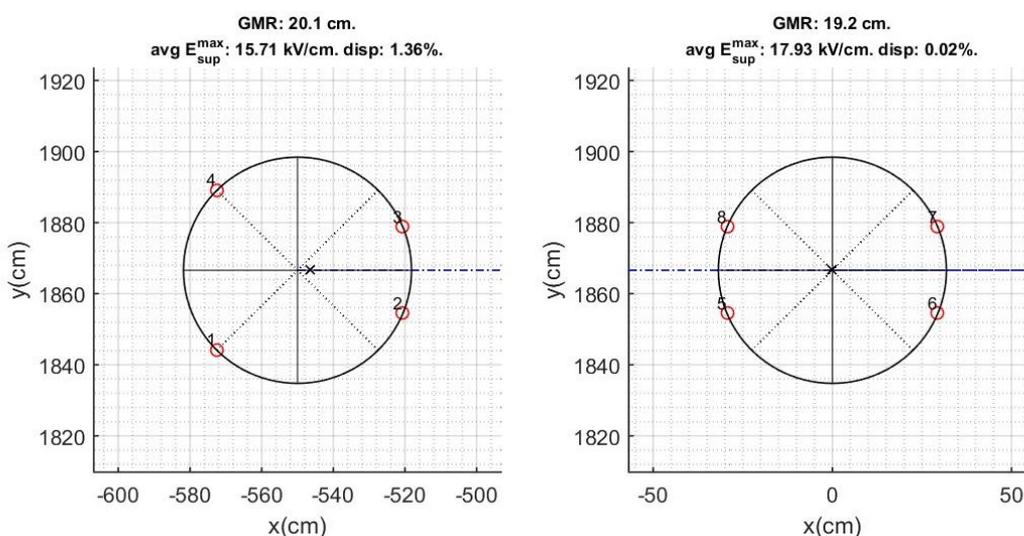
elétricos superficiais. Como essa redução ocorre praticamente apenas nos feixes laterais, a dispersão relativa dos campos superficiais aumenta, se comparado à configuração L12C1.

- L12C9: Aproximação dos subcondutores do feixe central com o eixo horizontal.

A configuração L12C9 consiste na aproximação dos subcondutores mais internos das fases laterais e na aproximação dos subcondutores do feixe central com o eixo horizontal.

A Figura 147 mostra os detalhes da geometria dos feixes lateral e central da configuração L12C9. O marcador X preto representa a localização do centro geométrico do feixe. Em cima de cada feixe, é apresentado o valor do raio médio geométrico do feixe (GMR), a média dos campos elétricos superficiais máximos e a sua dispersão relativa.

Figura 147 – Circuito horizontal compacto detalhe do feixe - L12C9



Fonte: autor

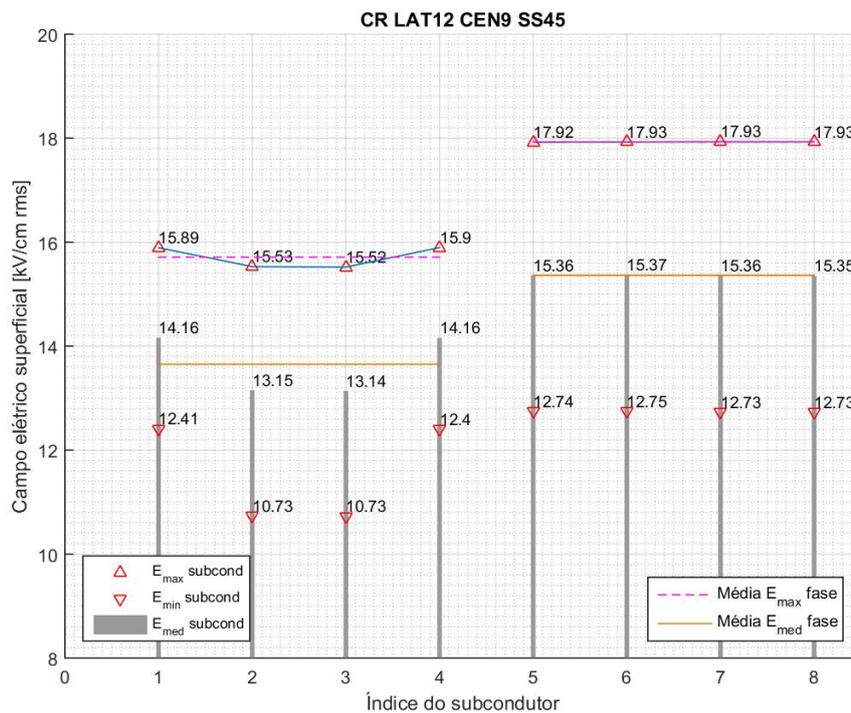
A Figura 148 apresenta os resultados dos cálculos de campos elétricos superficiais em cada um dos subcondutores representados na Figura 147.

A configuração L12C7 resulta em uma potência natural de 1164,3 MW, uma média de campos elétricos superficiais máximos de 16,45 kV/cm e uma dispersão relativa dos campos de 6,43%.

A aproximação dos subcondutores do feixe central com o eixo horizontal tem dois efeitos geométricos: (i) redução do raio médio geométrico e (ii) aproximação dos subcondutores do feixe central com os dos feixes laterais.

Comparando-se com a configuração L12C1, observa-se um aumento na média dos campos superficiais dos subcondutores do feixe central. Isso se deve à aproximação dos subcondutores do feixe central com os subcondutores dos feixes laterais. Ainda comparando com a configuração L12C1, observa-se que a potência natural da configuração L12C9 é menor. A redução na potência natural causada pela redução do raio médio geométrico é maior que o pequeno aumento causado pela aproximação dos subcondutores. Entretanto, quando se compara a configuração L12C9 com L12C7, observa-se que a potência natural da configuração L12C9 é sensivelmente maior que a da configuração L12C7, pois distância média geométrica entre fases da primeira é sensivelmente menor que a da segunda.

Figura 148 – Assimetria do feixe: campos elétricos superficiais configuração L12C9



Fonte: autor

- L14C1: Aproximação dos subcondutores internos do feixe lateral com os externos.

A configuração L14C1 consiste na aproximação dos subcondutores mais internos das fases laterais com os condutores mais externos.

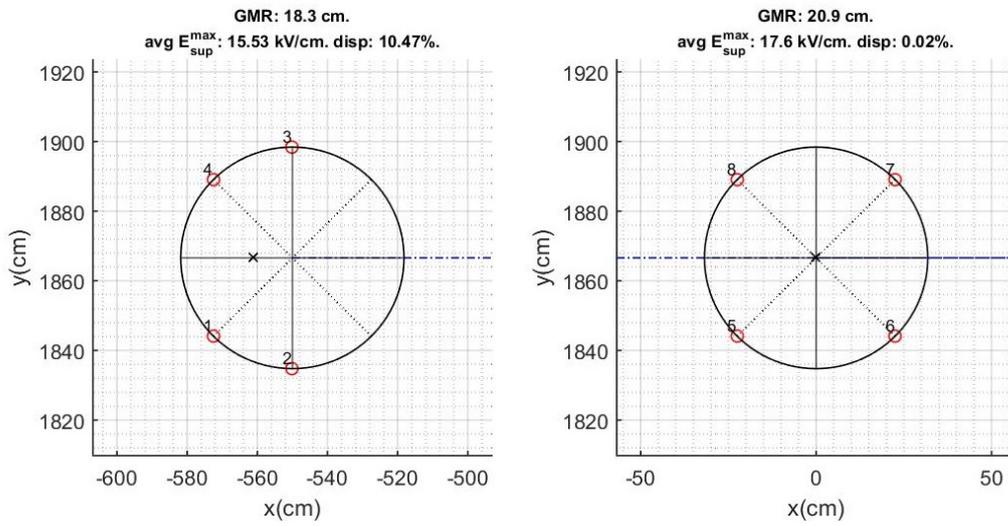
A Figura 149 mostra os detalhes da geometria dos feixes lateral e central da configuração L14C1. O marcador X preto representa a localização do centro geométrico do feixe. Em cima de cada feixe, é apresentado o valor do raio médio geométrico do feixe (GMR), a média dos campos elétricos superficiais máximos e a sua dispersão relativa.

A Figura 150 apresenta os resultados dos cálculos de campos elétricos superficiais em cada um dos subcondutores representados na Figura 149.

A aproximação dos subcondutores 2 e 3 dos subcondutores 1 e 4 provoca uma redução dos campos superficiais dos subcondutores 1 e 4, que, devido a sua localização, têm campos elétricos superficiais menores. Tal aproximação tem dois efeitos geométricos: (i) o afastamento dos subcondutores da 2 e 3 da fase central e (ii) o afastamento mútuo entre os subcondutores 2 e 3. O efeito (i) implica uma redução dos campos superficiais dos subcondutores 2 e 3. No entanto, o efeito (ii) provoca um aumento dos campos superficiais. Comparando os resultados da configuração L14C1 da Figura 150 com os resultados da solução de referência L1C1, observa-se que o resultado do efeito (ii) é dominante, uma vez que os campos elétricos dos condutores 2 e 3 na configuração L14C1 são maiores que na configuração de referência L1C1.

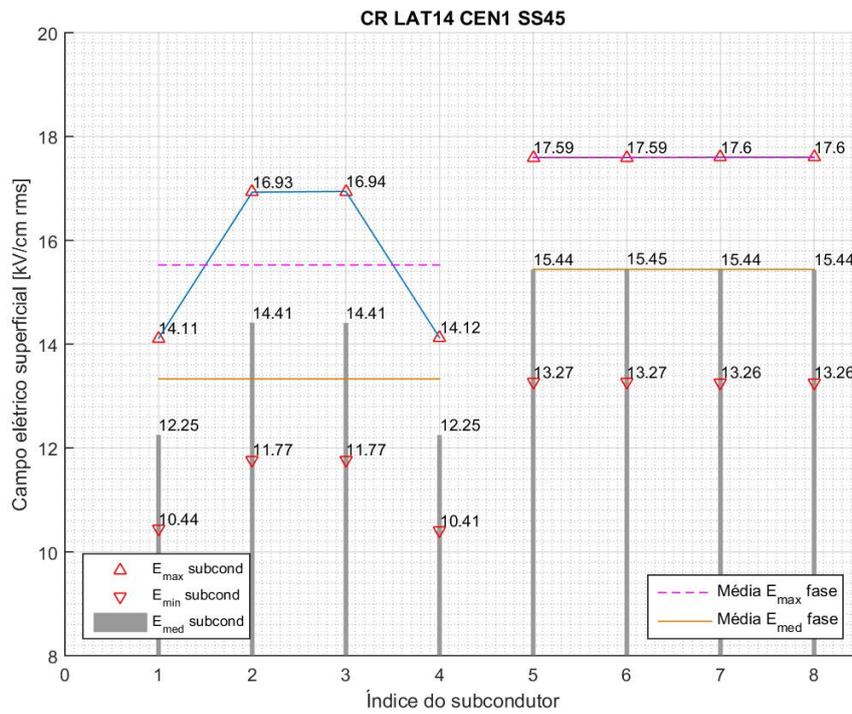
A configuração L14C1 resulta em uma potência natural de 1145,6 MW, uma média de campos elétricos superficiais máximos de 16,22 kV/cm e uma dispersão relativa dos campos de 9,30%.

Figura 149 – Circuito horizontal compacto detalhe do feixe - L14C1



Fonte: autor

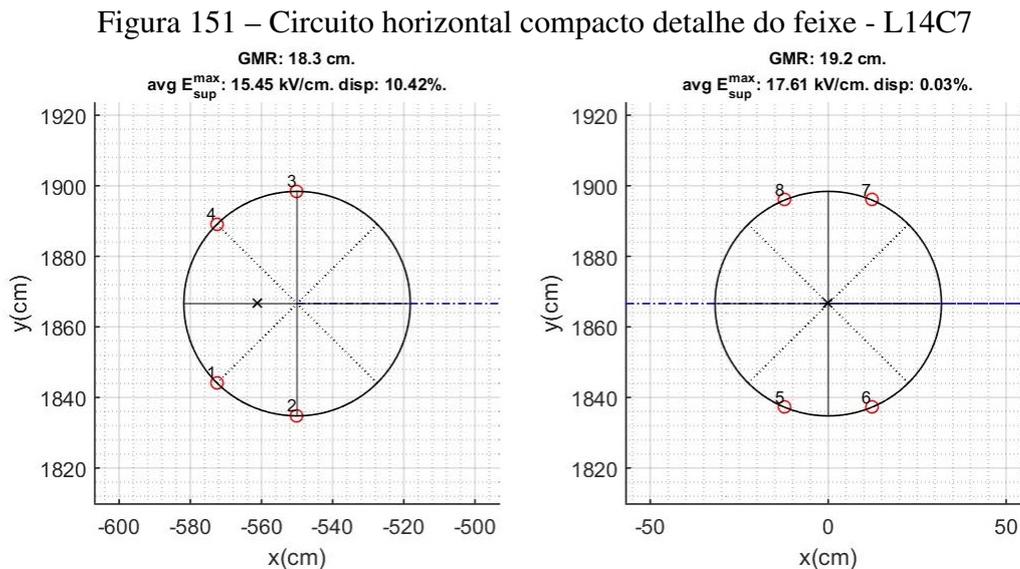
Figura 150 – Assimetria do feixe: campos elétricos superficiais configuração L14C1



Fonte: autor

- L14C7: Aproximação dos subcondutores internos do feixe lateral com os externos e na aproximação dos condutores do feixe central com o eixo vertical

A Figura 151 mostra os detalhes da geometria dos feixes lateral e central da configuração L14C7. O marcador X preto representa a localização do centro geométrico do feixe. Em cima de cada feixe, é apresentado o valor do raio médio geométrico do feixe (GMR), a média dos campos elétricos superficiais máximos e a sua dispersão relativa.



Fonte: autor

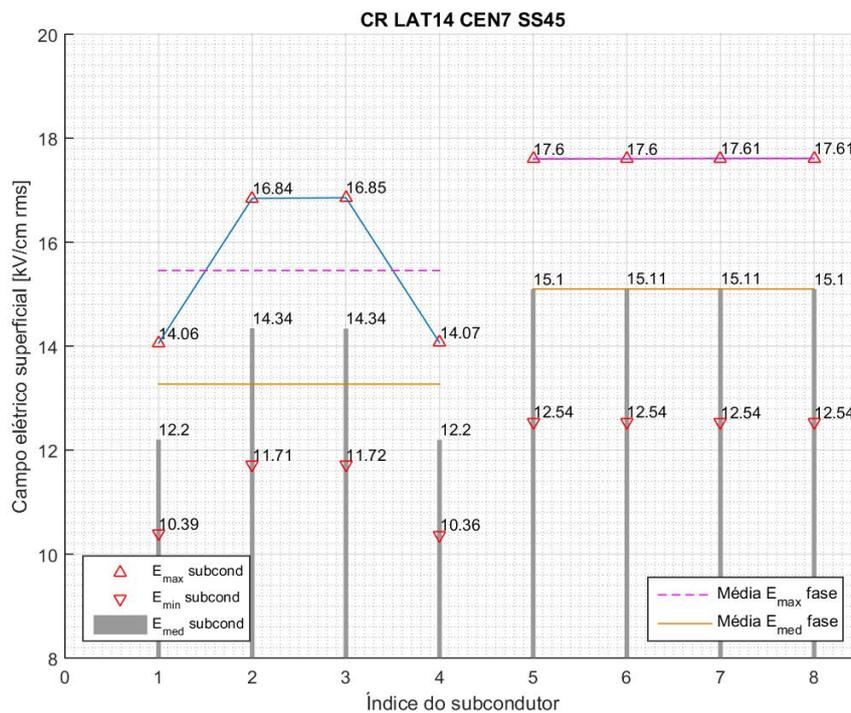
A Figura 152 apresenta os resultados dos cálculos de campos elétricos superficiais em cada um dos subcondutores representados na Figura 151.

Assim como apresentado para a configuração L14C1, a aproximação dos subcondutores 2 e 3 dos subcondutores 1 e 4 provoca uma redução dos campos superficiais dos subcondutores 1 e 4, que, devido a sua localização, têm campos elétricos superficiais menores. Tal aproximação tem dois efeitos geométricos: (i) o afastamento dos subcondutores da 2 e 3 da fase central e (ii) o afastamento mútuo entre os subcondutores 2 e 3. O efeito (i) implica uma redução dos campos superficiais dos subcondutores 2 e 3. No entanto, o efeito (ii) provoca um aumento dos campos superficiais.

A configuração L14C7 resulta em uma potência natural de 1136,2 MW, uma média de campos elétricos superficiais máximos de 16,17 kV/cm e uma dispersão relativa dos campos de 9,42%.

Comparando os resultados da configuração L14C7 da Figura 152 com os resultados da solução de referência L1C1, observa-se que o resultado do efeito (ii) é dominante, uma vez que os campos elétricos dos condutores 2 e 3 na configuração L14C1 são maiores que na configuração de referência L1C1. Comparando-se os resultados da configuração L14C7 com os da L14C1, observa-se que o aumento nos campos superficiais dos condutores 2 e 3 é menor na configuração L14C7. Isso ocorre pois a aproximação dos subcondutores do feixe central com o eixo vertical tem efeito de aumentar a distância média geométrica entre fases. O efeito desse afastamento nos campos superficiais do feixe central é desprezável.

Figura 152 – Assimetria do feixe: campos elétricos superficiais configuração L14C7



Fonte: autor

B.1.4 Geometria triangular

Esta subseção apresenta os efeitos da assimetria do feixe em um circuito triangular. Cada item apresentado a seguir diz respeito a uma modificação na distribuição dos condutores dentro do círculo que circunscreve um quadrado de lado 95 cm.

- L3C1: Aproximação dos subcondutores 2 e 4 com o subcondutor 3.

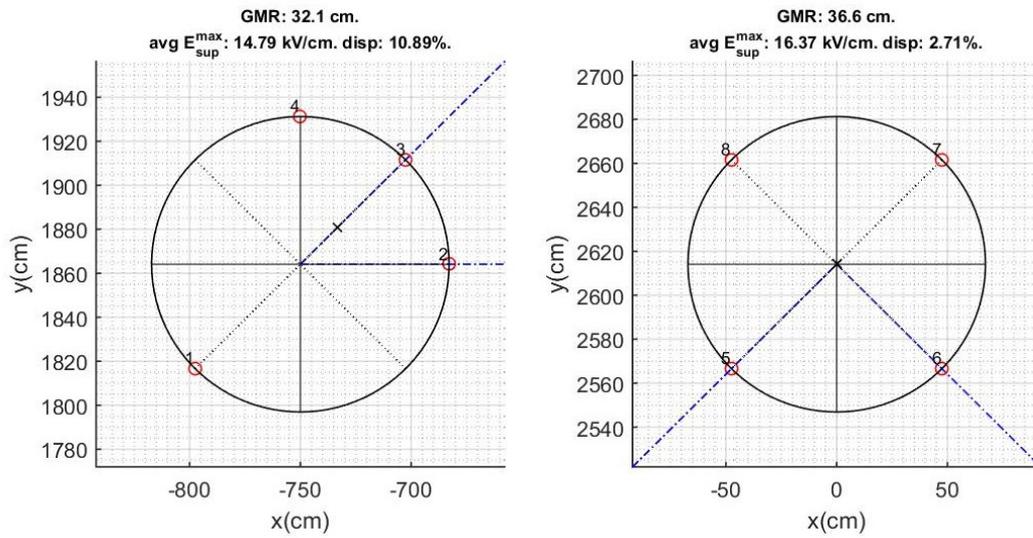
A Figura 153 mostra os detalhes da geometria dos feixes lateral e central, da configuração L3C1. Em cima de cada feixe, é apresentado o valor do raio médio geométrico do feixe (GMR), a média dos campos elétricos superficiais máximos e a sua dispersão relativa.

A configuração L3C1 resulta em uma potência natural de 1165,9 MW, uma média de campos elétricos superficiais máximos de 15,32 kV/cm e uma dispersão relativa dos campos de 9,00%.

A Figura 154 mostra os valores dos campos elétricos superficiais em cada um dos subcondutores representados na Figura 153.

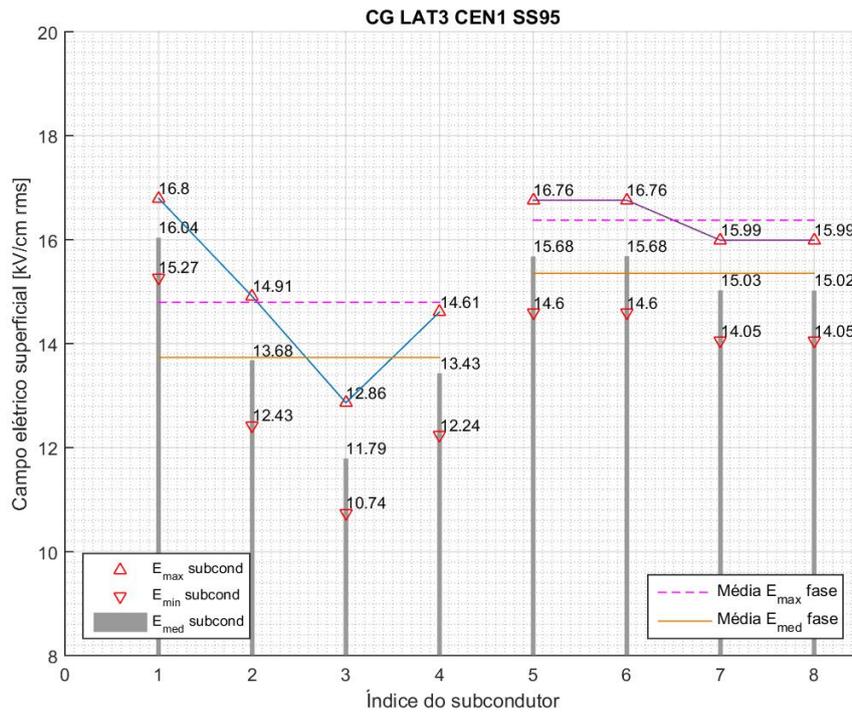
A aproximação dos subcondutores 2 e 4 do subcondutor 3 reduz muito o campo elétrico no subcondutor 3. Isso faz com que os campos dos subcondutores 2,3 e 4 diminuam. A maior redução ocorre no subcondutor 3, que passa da condição de mais carregado para a de menos carregado do feixe. Em relação à configuração de referência, o subcondutor dois sofre uma rotação de 45° no sentido anti-horário. Essa rotação tem dois efeitos: (i) a aproximação do subcondutor 2 com o 3 e (ii) a aproximação do subcondutor 2 com os feixes central e lateral. O efeito (ii) causa o aumento dos campos elétricos no subcondutor 2. Por outro lado, o efeito (ii) causa a redução do seu campo elétrico. Comparando-se a

Figura 153 – Circuito triangular detalhe do feixe - L3C1



Fonte: autor

Figura 154 – Assimetria do feixe: campos elétricos superficiais configuração L3C1



Fonte: autor

Figura 158 com a Figura 52, conclui-se que o a redução causada pelo efeito (ii) é maior que o aumento causado pelo efeito (i).

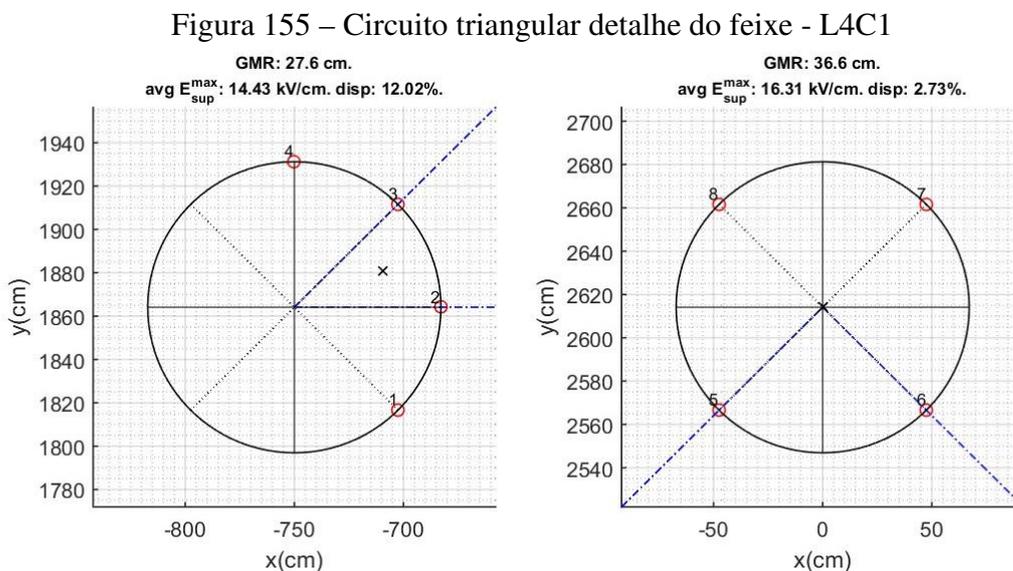
O afastamento dos subcondutores 2 e 4 do subcondutor 1 eleva o campo elétrico no subcondutor 1, tornando este o mais carregado e com maior campo do feixe. Essa reconfiguração elétrica aumenta a dispersão do campo elétrico, tornando os feixes laterais mais desequilibrados.

- L4C1: Aproximação do subcondutor 4 do 3 e aproximação do subcondutor 1 do 2.

A configuração L4C1 consiste na aproximação dos subcondutores mais externos das fases laterais com os subcondutores mais internos. Na configuração L4C1 ocorre um agrupamento dos subcondutores do feixe lateral na direção das outras fases. A configuração do feixe central permanece igual à solução de referência C1.

A Figura 155 mostra os detalhes da geometria dos feixes lateral e central da configuração L4C1. O marcador preto em X representa a localização do centro geométrico do feixe. Em cima de cada feixe, é apresentado o valor do raio médio geométrico do feixe (GMR), a média dos campos elétricos superficiais máximos e a sua dispersão relativa. A aproximação dos condutores causa a redução do raio médio geométrico dos feixes laterais se comparado à geometria de referência L1C1 e também à geometria L3C1.

A configuração L4C1 resulta em uma potência natural de 1140,5 MW, uma média de campos elétricos superficiais máximos de 15,05 kV/cm e uma dispersão relativa dos campos de 10,15%.



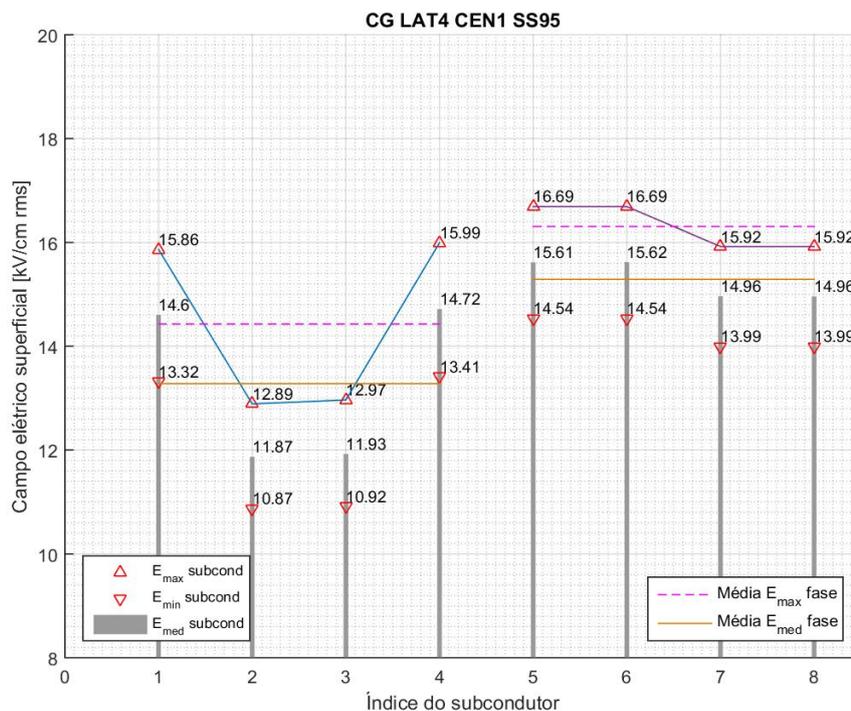
Fonte: autor

A Figura 156 apresenta os valores dos campos elétricos superficiais em cada um dos subcondutores representados na Figura 155.

Comparando-se com a configuração de referência L1C1, a aproximação dos subcondutores 1 e 4 com os subcondutores 2 e 3, respectivamente, provoca duas ações: (i) uma redução dos campos elétricos superficiais dos subcondutores 2 e 3 e (ii) um aumento dos campos dos subcondutores 1 e 4. A ação (i) faz com que os subcondutores 1 e 4 tornem-se os mais carregados e a ação (ii) torna os subcondutores 2 e 3, que eram anteriormente os mais carregados, nos menos carregados.

No que se refere ao feixe central, ocorre uma pequena diminuição nos campos elétricos dos seus subcondutores. Isso ocorre devido à diminuição da capacitância entre fases, causada pela redução do raio geométrico dos feixes laterais.

Figura 156 – Assimetria do feixe: campos elétricos superficiais configuração L4C1



Fonte: autor

A diminuição de potência natural é logicamente esperada, uma vez que o raio médio geométrico dos feixes laterais diminui. Comparando-se com configuração de referência L1C1, a redução da média dos campos superficiais se deve a diminuição significativa do carregamento elétrico dos subcondutores 3 e 4. Tal redução provoca também o aumento da dispersão relativa dos campos.

- L4C3: Agrupamentos dos subcondutores das fases laterais na direção da fase central. Aproximação do subcondutor 5 e 8 com os subcondutores 6 e 7, respectivamente.

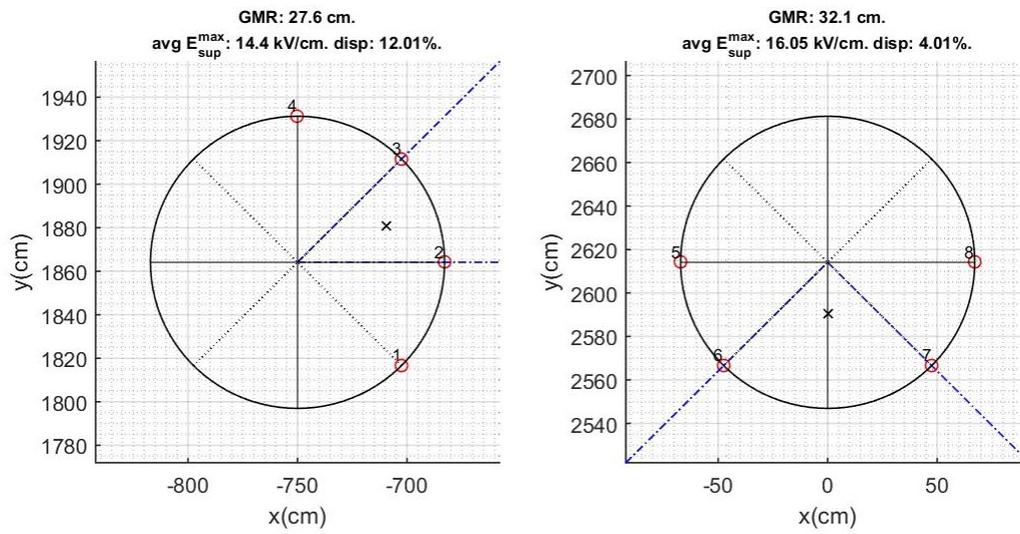
A Figura 157 mostra os detalhes da geometria dos feixes lateral e central da configuração L4C3. O marcador preto em X representa a localização do centro geométrico do feixe. Em cima de cada feixe é apresentado o valor do raio médio geométrico do feixe (GMR), a média dos campos elétricos superficiais máximos e a sua dispersão relativa.

A configuração L4C3 resulta em uma potência natural de 1130,0 MW, uma média de campos elétricos superficiais máximos de 14,95 kV/cm e uma dispersão relativa dos campos de 9,93%.

A aproximação dos condutores, tanto nos feixes laterais quanto no feixe central, provoca a redução de seus raios médios geométricos. Isso causa a redução da potência natural, se comparado às geometrias L4C1 e L1C1.

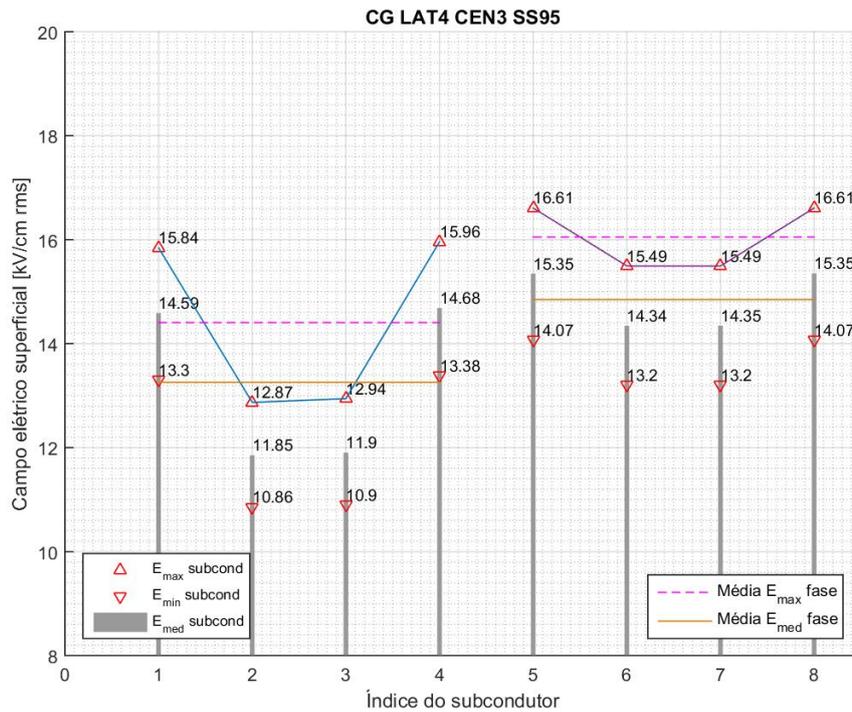
A Figura 158 mostra os valores dos campos elétricos superficiais em cada um dos subcondutores representados na Figura 157.

Figura 157 – Circuito triangular detalhe do feixe - L4C3



Fonte: autor

Figura 158 – Assimetria do feixe: campos elétricos superficiais configuração L4C3



Fonte: autor

A análise dos campos elétricos superficiais do feixe lateral para a configuração L4C3 é essencialmente a mesma que a da configuração da L4C1.

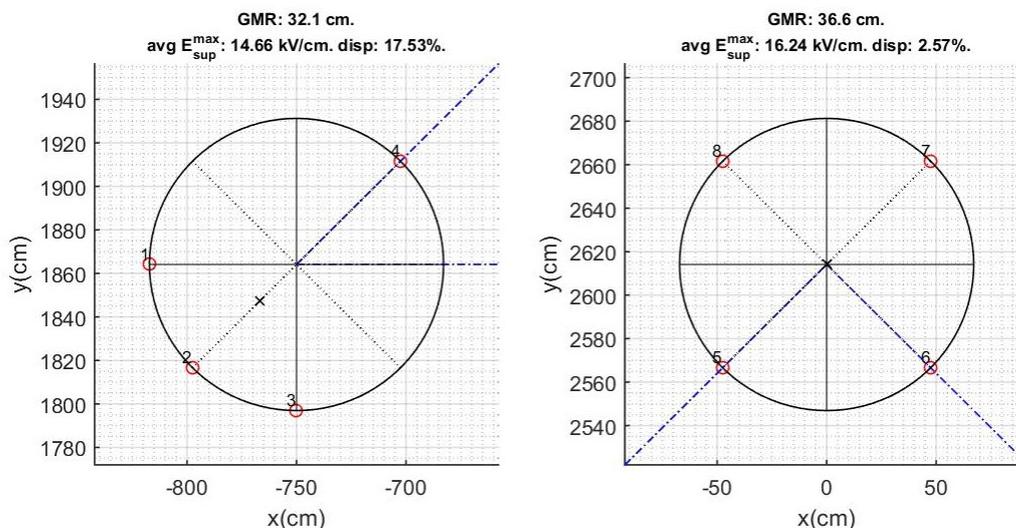
Em relação ao ao feixe central, observa-se que os subcondutores mais externos e mais afastados das fases laterais (5 e 8) aumentam seus campos elétricos superficiais se comparados aos condutores mais externos da configuração L4C1 (7 e 8). Esse aumento se deve à aproximação desses com as fases laterais. Por outro lado, tal aproximação dos condutores mais externos reduz bastante os campos nos condutores mais internos (6 e 7). É esta razão que causa a diminuição na média global dos campos superficiais da configuração L4C3.

- L6C1: Aproximação dos subcondutores mais externos do feixe lateral, mantendo a posição do condutor mais interno.

A Figura 159 mostra os detalhes da geometria dos feixes lateral e central da configuração L6C6. O marcador preto em X representa a localização do centro geométrico do feixe. Em cima de cada feixe é apresentado o valor do raio médio geométrico do feixe (GMR), a média dos campos elétricos superficiais máximos e a sua dispersão relativa.

A configuração L6C1 resulta em uma potência natural de 1151,5 MW, uma média de campos elétricos superficiais máximos de 15,19 kV/cm e uma dispersão relativa dos campos de 13,01%.

Figura 159 – Circuito horizontal compacto detalhe do feixe - L6C1

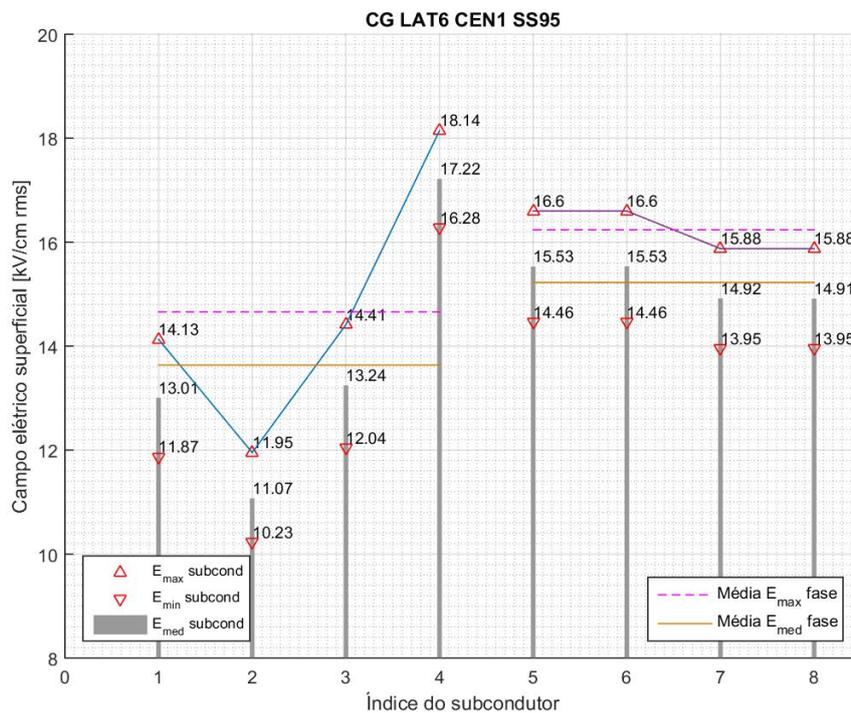


Fonte: autor

A Figura 160 mostra os valores dos campos elétricos superficiais em cada um dos subcondutores representados na Figura 159.

O afastamento dos dos subcondutores mais externos (1 e 3) do subcondutor mais interno e mais carregado (4), faz com que o valor do campo elétrico superficial no subcondutor (4) aumente muito, tornando este o subcondutor mais carregado da configuração. Por outro lado, a aproximação dos subcondutores 1 e 3 com os subcondutor 2 provoda uma diminuição dos campos nos condutores 1,2 e 3. Isso provoca um grande desequilíbrio do carregamento elétrico nos feixes laterais. Dessa forma, ainda que a média dos campos elétricos dos feixes laterais seja inferior à configuração de referência, o carregamento do subcondutor 4 é muito superior à média da da configuração.

Figura 160 – Assimetria do feixe: campos elétricos superficiais configuração L6C1



Fonte: autor

- L6C5: Aproximação dos subcondutores mais internos do feixe central com os condutores mais externos, mantendo a posição dos subcondutores mais externos.

A Figura 161 mostra os detalhes da geometria dos feixes lateral e central da configuração L6C6. O marcador preto em X representa a localização do centro geométrico do feixe. Em cima de cada feixe é apresentado o valor do raio médio geométrico do feixe (GMR), a média dos campos elétricos superficiais máximos e a sua dispersão relativa.

A configuração L6C5 resulta em uma potência natural de 1134,5 MW, uma média de campos elétricos superficiais máximos de 14,99 kV/cm e uma dispersão relativa dos campos de 13,25%.

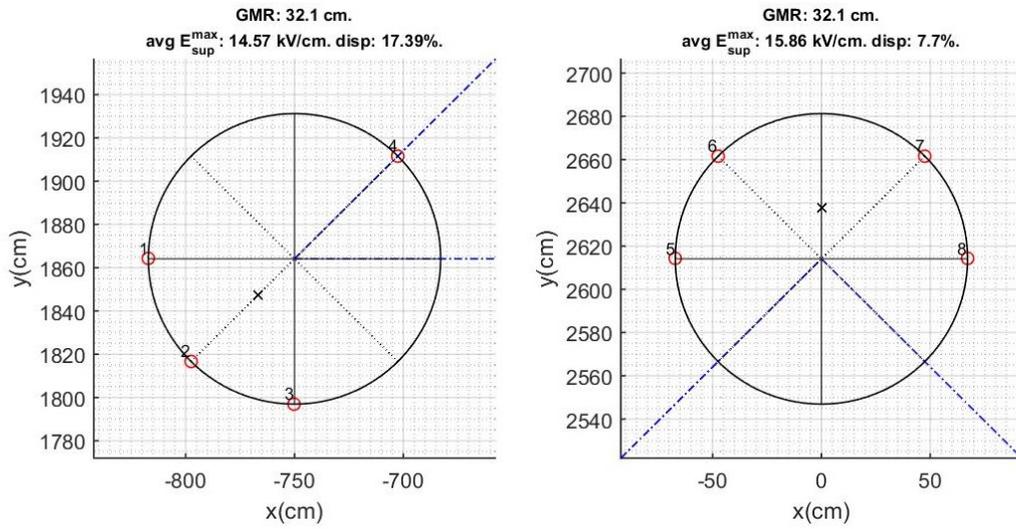
A Figura 162 mostra os valores dos campos elétricos superficiais em cada um dos subcondutores representados na Figura 161.

A análise da distribuição dos campos elétricos do feixe lateral na configuração L6C5 é essencialmente a mesma que a da configuração L6C1.

Em relação à fase central, a aproximação dos subcondutores 5 e 8 dos subcondutores 6 e 7 provoca uma redução dos campos elétricos dos subcondutores 6 e 7, que são mais externos. Esse reposicionamento tem dois efeitos: (i) afastamentos dos subcondutores 5 e 8 das fases laterais e (ii) afastamento mútuo dos subcondutores 5 e 8. O efeito (i) provoca uma redução dos campos superficiais dos subcondutores 5 e 8. Por outro lado, o efeito (ii) causa um aumento dos campos superficiais dos subcondutores 5 e 8. Observando-se os valores dos campos na Figura 162, conclui-se que o aumento causado pelo efeito (ii) é maior que a diminuição causada pelo efeito (i). Tal configuração é a que possui o maior desequilíbrio percentual entre os campos elétricos de todos os subcondutores.

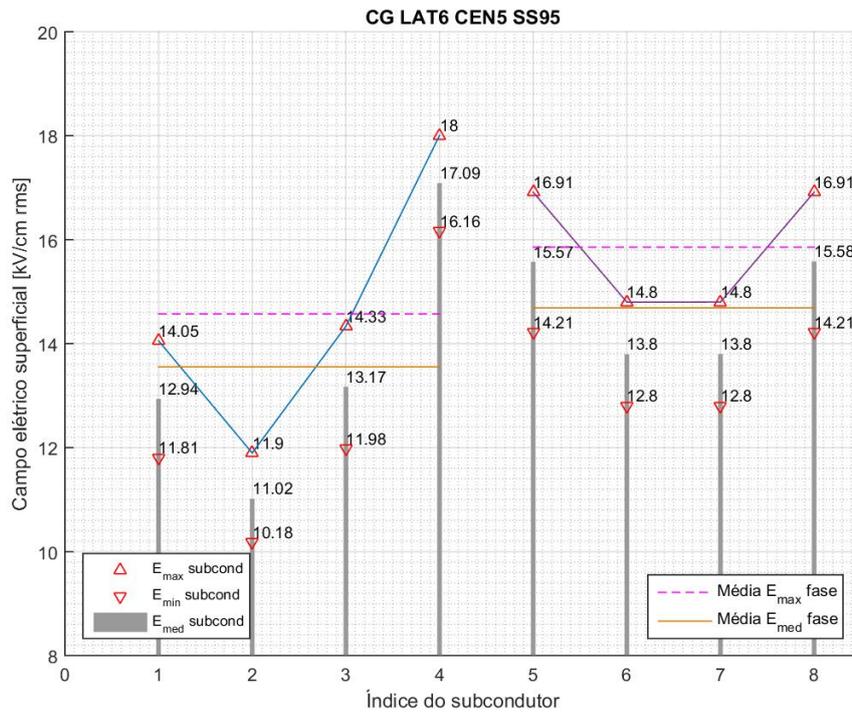
Além disso, o afastamento mútuo dos subcondutores das fases laterais e central provoca um aumento da distância média geométrica entre fases. As ações de redução do

Figura 161 – Circuito horizontal compacto detalhe do feixe - L6C5



Fonte: autor

Figura 162 – Assimetria do feixe: campos elétricos superficiais configuração L6C5



Fonte: autor

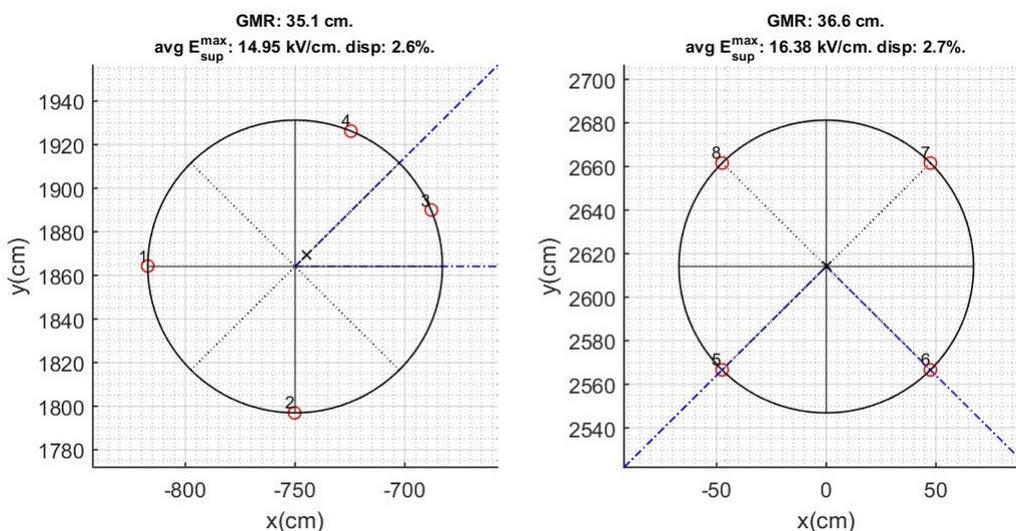
raio médio geométrico e aumento da distância média geométrica entre fases causa uma redução na potência natural da configuração L6C5.

- L8C1: Aproximação dos subcondutores mais internos do feixe lateral com o eixo que liga o dentro das fases laterais ao centro da fase central. Afastamento simétrico dos condutores mais externos em relação ao mesmo eixo.

A Figura 163 mostra os detalhes da geometria dos feixes lateral e central da configuração L8C1. O marcador preto em X representa a localização do centro geométrico do feixe. Em cima de cada feixe é apresentado o valor do raio médio geométrico do feixe (GMR), a média dos campos elétricos superficiais máximos e a sua dispersão relativa.

A configuração L6C5 resulta em uma potência natural de 1180,2 MW, uma média de campos elétricos superficiais máximos de 15,43 kV/cm e uma dispersão relativa dos campos de 4,94%.

Figura 163 – Circuito triangular detalhe do feixe - L8C1



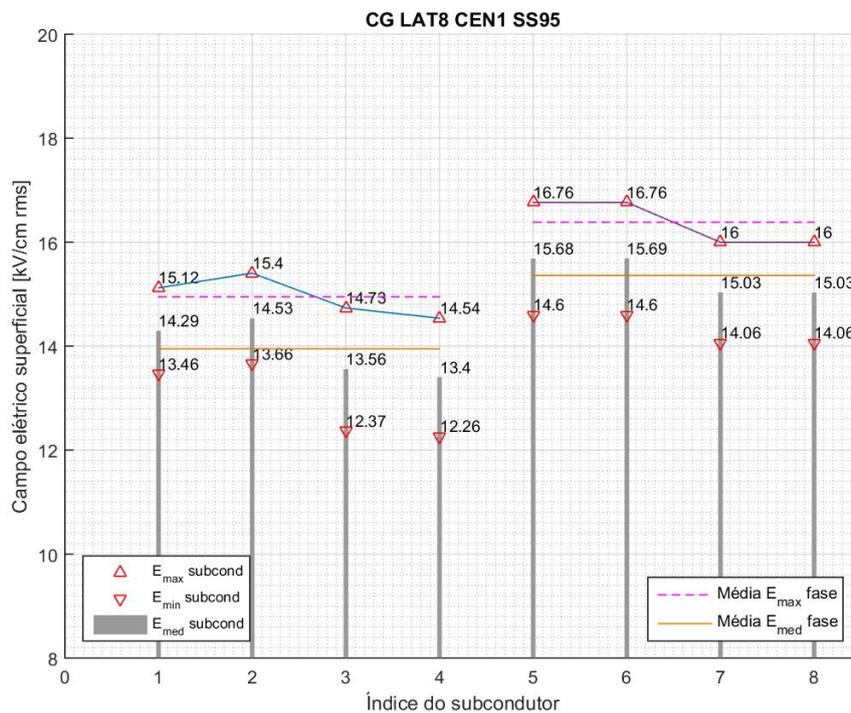
Fonte: autor

A Figura 164 mostra os valores dos campos elétricos superficiais em cada um dos subcondutores representados na Figura 163.

A aproximação simétrica dos condutores 3 e 4 com o eixo que conecta o centro das fases laterais com o centro da fase central, causa a redução dos seus campos elétricos. Os subcondutores 3 e 4 da configuração L8C1 são os mais internos do feixe lateral. Como foi apresentado para configuração de referência L1C1, os subcondutores mais internos mais carregados que os condutores mais externos. Porém essa aproximação transforma os subcondutores 3 e 4 nos subcondutores menos carregados do feixe. Tal aproximação dos subcondutores 3 e 4 provoca seus afastamentos dos subcondutores 1 e 2, causando um aumento dos campos superficiais, se comparado aos condutores mais externos da configuração de referência L1C1v(4 e 1).

Esse reposicionamento melhora a equalização dos campos superficiais no feixe lateral e tem pouco efeito sobre a magnitude e a distribuição dos campos elétricos no feixe central.

Figura 164 – Assimetria do feixe: campos elétricos superficiais configuração L8C1



Fonte: autor

- L8C7: Aproximação dos subcondutores mais internos do feixe lateral com o eixo que liga o dentro das fases laterais ao centro da fase central. Afastamento simétrico dos subcondutores mais externos dos feixes laterais em relação ao mesmo eixo. Aproximação dos subcondutores do feixe central com o eixo vertical.

A Figura 165 mostra os detalhes da geometria dos feixes lateral e central da configuração L8C1. O marcador preto em X representa a localização do centro geométrico do feixe. Em cima de cada feixe é apresentado o valor do raio médio geométrico do feixe (GMR), a média dos campos elétricos superficiais máximos e a sua dispersão relativa.

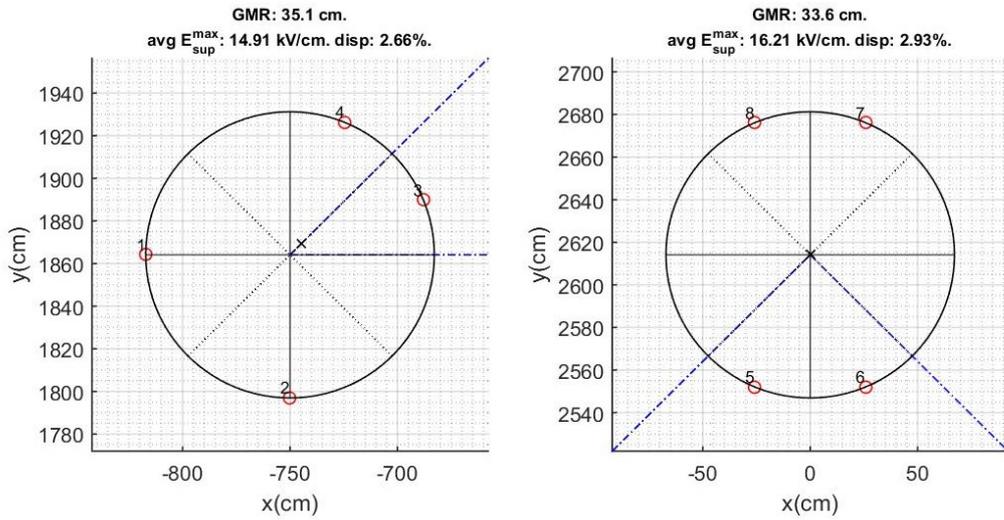
A configuração L6C5 resulta em uma potência natural de 1170,6 MW, uma média de campos elétricos superficiais máximos de 15,34 kV/cm e uma dispersão relativa dos campos de 4,66%.

A Figura 166 mostra os valores dos campos elétricos superficiais em cada um dos subcondutores representados na Figura 163.

A análise da distribuição dos campos elétricos superficiais nos subcondutores dos feixes laterais é essencialmente igual à análise da configuração L8C1. Os valores dos campos nos subcondutores dos feixes laterais tem uma pequena redução devido ao maior afastamento com os subcondutores da fase central.

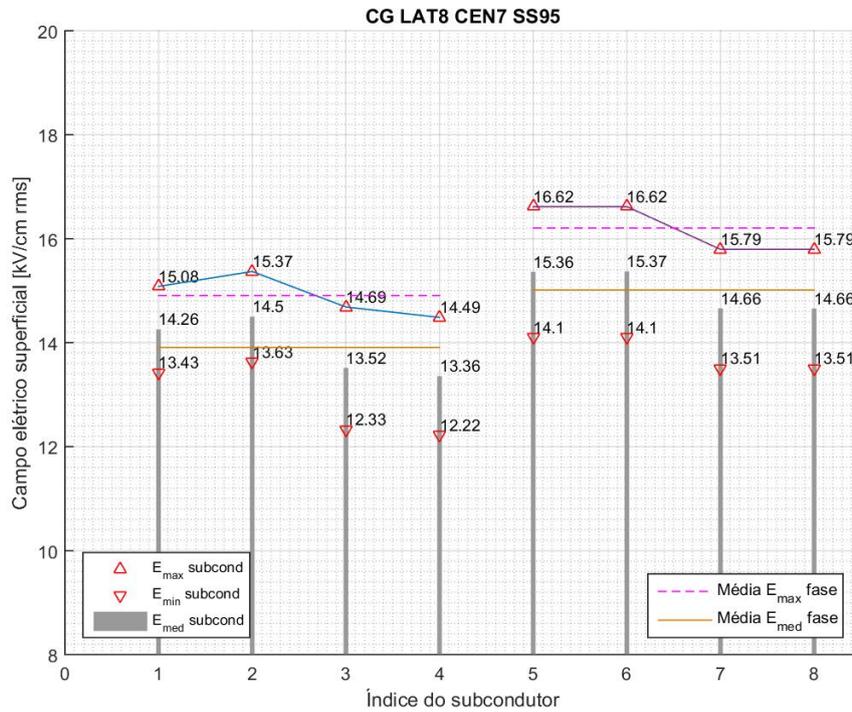
A aproximação dos subcondutores do eixo central com o eixo vertical reduz sensivelmente os campos superficiais de todos seus condutores, se comparado à configuração L8C1. Tal aproximação em conjunto com a configuração L8 do feixe lateral, resulta em uma desequilíbrio entre campos superficiais menor que o da configuração L8C1.

Figura 165 – Circuito triangular detalhe do feixe - L8C7



Fonte: autor

Figura 166 – Assimetria do feixe: campos elétricos superficiais configuração L8C7



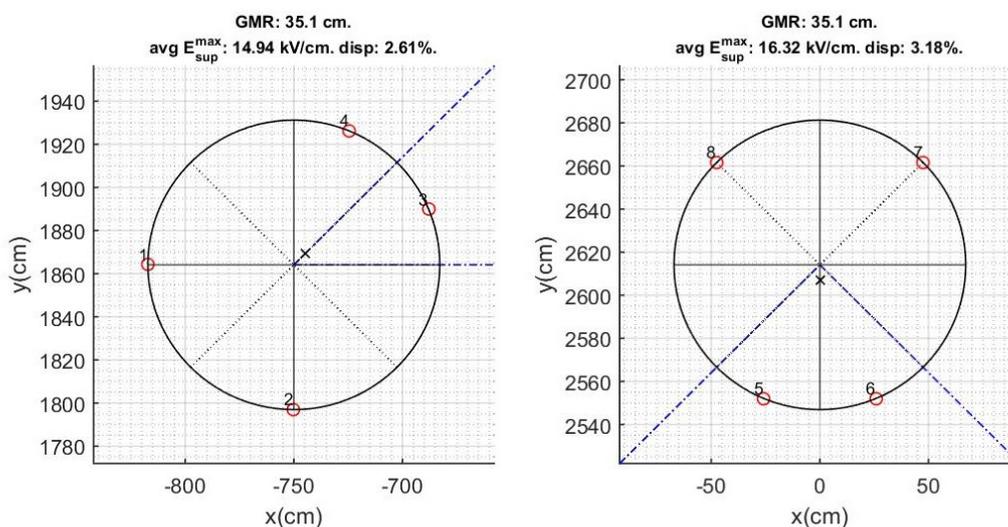
Fonte: autor

- L8C8: Aproximação dos subcondutores mais internos do feixe lateral com o eixo que liga o dentro das fases laterais ao centro da fase central. Aproximação dos subcondutores mais internos do feixe central com o eixo vertical

A Figura 167 mostra os detalhes da geometria dos feixes lateral e central da configuração L8C1. O marcador preto em X representa a localização do centro geométrico do feixe. Em cima de cada feixe é apresentado o valor do raio médio geométrico do feixe (GMR), a média dos campos elétricos superficiais máximos e a sua dispersão relativa.

A configuração L6C5 resulta em uma potência natural de 1176,7 MW, uma média de campos elétricos superficiais máximos de 15,40 kV/cm e uma dispersão relativa dos campos de 4,89%.

Figura 167 – Circuito triangular detalhe do feixe - L8C8



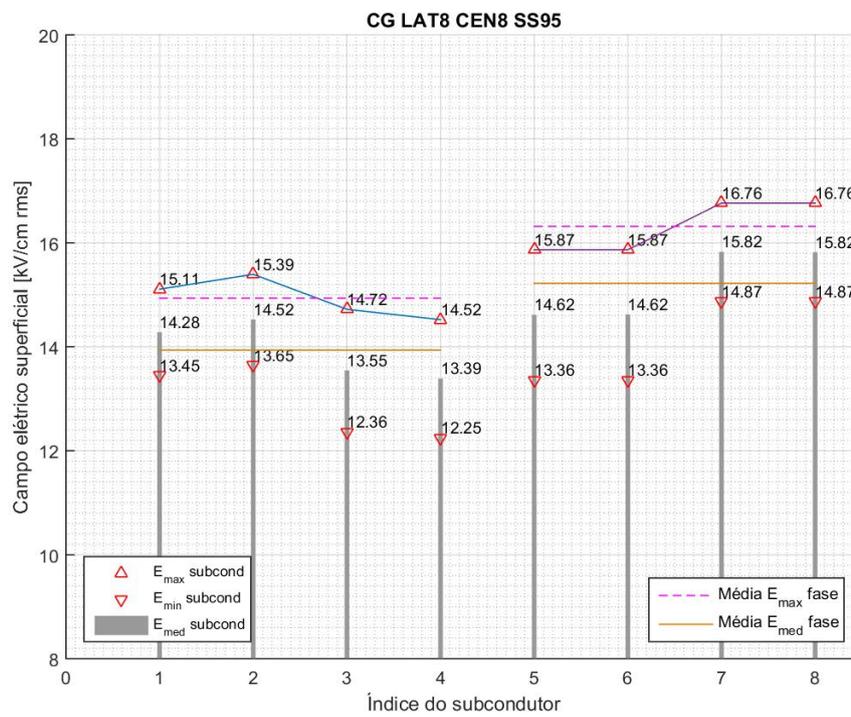
Fonte: autor

A Figura 168 mostra os valores dos campos elétricos superficiais em cada um dos subcondutores representados na Figura 167.

A análise da distribuição dos campos elétricos superficiais nos subcondutores dos feixes laterais é essencialmente igual à análise das configurações L8C1 e L8C7. Os valores dos campos nos subcondutores dos feixes laterais tem uma pequena redução devido ao maior afastamento com os subcondutores da fase central.

No feixe central, a aproximação dos subcondutores 5 e 6 com o eixo vertical causa a redução de seus campos superficiais. Desta forma, os subcondutores 5 e 6 passam a ser os menos carregados do feixe central e os condutores 7 e 8 tem seus campos superficiais elevados.

Figura 168 – Assimetria do feixe: campos elétricos superficiais configuração L8C7



Fonte: autor

APÊNDICE C

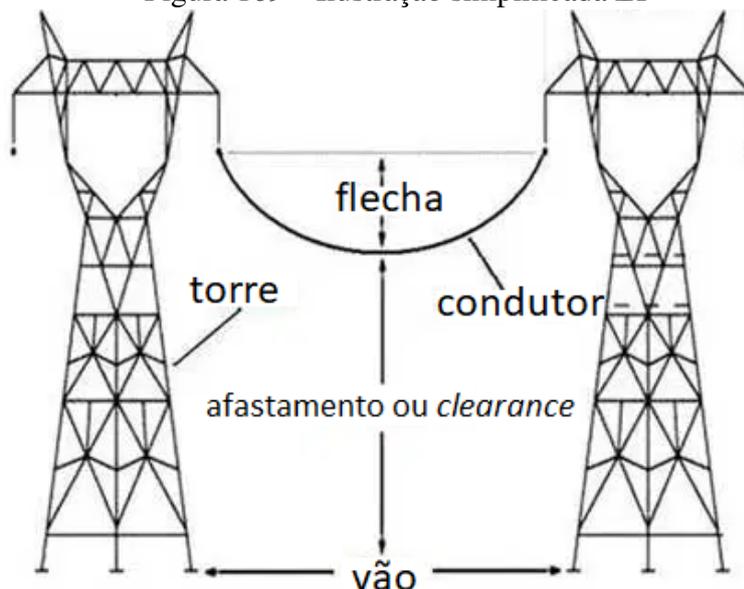
C.1 Conceitos elementares de linhas aéreas de transmissão

Esta seção tem como objetivo apresentar conceitos fundamentais sobre linhas aéreas de transmissão da forma mais simplificada possível e assim facilitar o entendimento de algumas ideias apresentadas nesse trabalho.

Uma linha aérea de transmissão consiste em cabos condutores suspensos no ar por estruturas. Tais estruturas podem ser torres metálicas treliçadas ou postes de metal, madeira ou concreto. A Figura 169 apresenta um desenho simples de uma linha de transmissão.

Na Figura 169 estão representadas duas torres metálicas treliçadas. A distância entre essas estruturas é denominado como vão (em inglês *span*). Como os cabos são suportados por estas estruturas, estes apresentam uma flecha (em inglês *sag*). A flecha depende da regulagem do cabo e também de sua temperatura, pois estes fatores podem fazer os condutores ficarem mais ou menos tracionados. Uma condição básica de projeto de linha de transmissão é regular o tracionamento dos condutores tal que estes sempre mantenham um afastamento (em inglês *clearance*) mínimo do ponto mais baixo até o solo.

Figura 169 – Ilustração simplificada LT

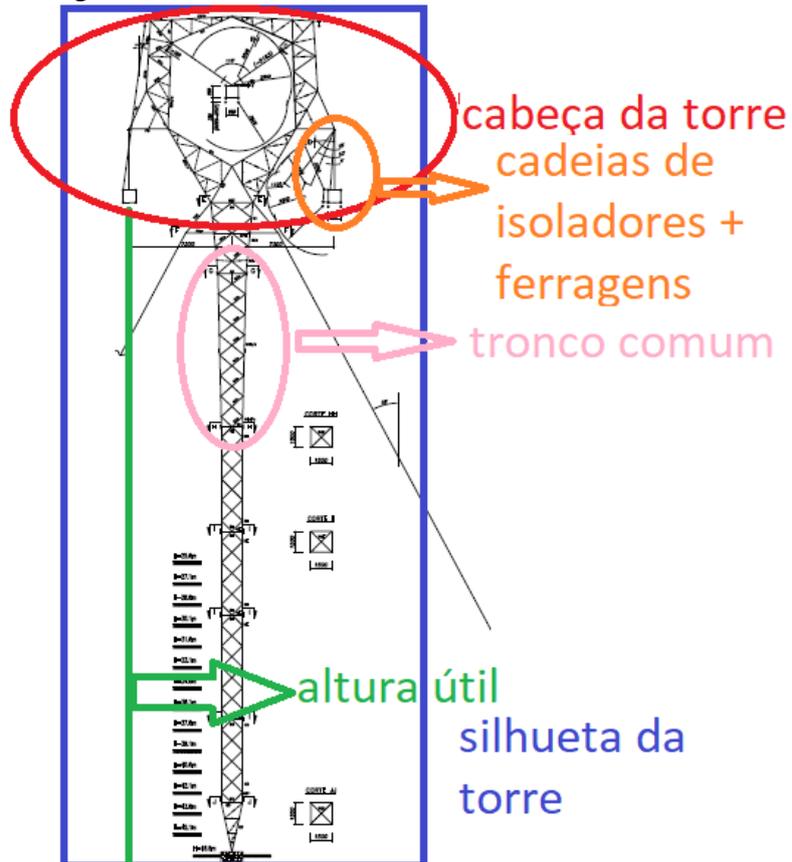


Fonte: adaptado de Google Imagens

Linhas de transmissão da rede básica são normalmente construídas em torres metálicas treliçadas. A Figura 170 apresenta de forma ilustrativa as principais partes de uma torre

metálica treliçada. No projeto da geometria da cabeça de torre, devem ser considerados os balanços das cadeias para manter o afastamento mínimo dos condutores energizados à partes aterradas. Uma torre treliçada é composta basicamente pela sua cabeça, tronco comum e extensões. As extensões determinam a altura útil dos condutores, que é definida como a altura desde o solo até o ponto de fixação do condutor mais baixo da fase de baixo. A determinação da extensão a ser utilizada é função do relevo e da distância mínima cabo-solo necessária.

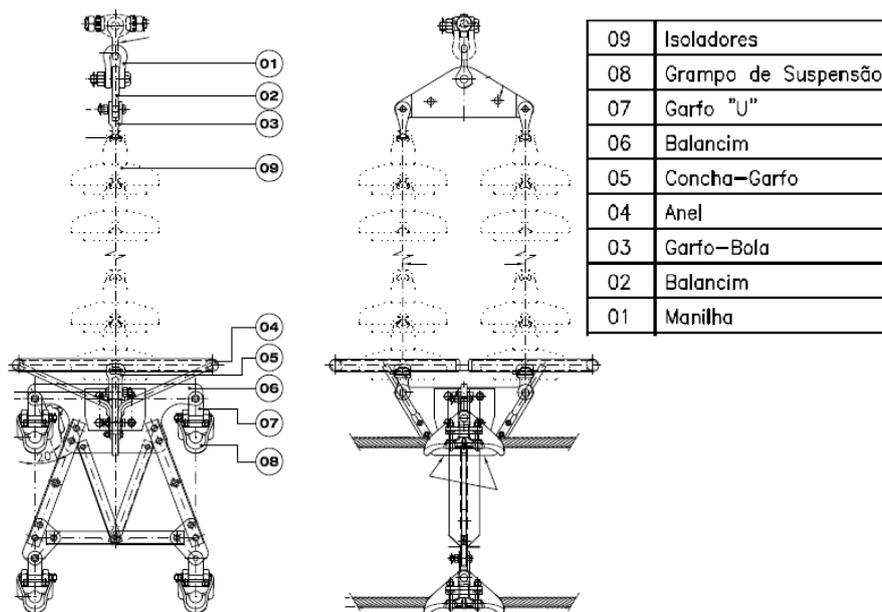
Figura 170 – Silhueta de torre de linha de transmissão



Fonte: acervo autor

Os cabos energizados são suspensos ou ancorados nas estruturas através de cadeias de isoladores, que tem como função fornecer distâncias de isolamento e suporte mecânico dos condutores. O projeto das cadeias depende dos condutores e da geometria dos feixes condutores e das fases e a partir disso são determinadas todas as ferragens necessárias para conexão dos cabos nos isoladores.

Figura 171 – Cadeia de isoladores



Fonte: acervo autor

Além das cadeias, feixes de condutores requerem espaçadores, que mantêm o afastamento entre subcondutores de um mesmo feixe. Espaçadores também podem cumprir a função de amortecer a vibração causada pelo vento, que danifica condutores ao longo de sua vida útil. A Figura 172 apresenta a foto de um espaçador amortecedor para feixe de quatro subcondutores por fase.

Figura 172 – Espaçador amortecedor



Fonte: catálogo fabricante PLP

APÊNDICE D

D.1 Implementação computacional NSGAI

A Figura 13 representa o passo a passo dos NSGAI. No entanto, cada etapa pode ser composta de diversas funções ou rotinas.

Este apêndice tem como objetivo descrever a implementação computacional do NSGAI. Todas as rotinas e funções foram implementadas desde o início usando MATLAB, sem lançar mão de quaisquer bibliotecas pré-existentes.

D.1.1 Geração da população inicial - *geraPop*

A geração da população inicial é feita através de uma função *geraPop*, cujos argumentos de entrada são o tamanho da população inicial e as dimensões das geometrias de referência.

A função *geraPop* executa N vezes (sendo N o tamanho desejado para população) a geração de um cromossomo (*geraCrom*), a verificação da viabilidade do cromossomo (*genCheck*) e, caso o cromossomo seja inviável o seu ajuste (*fixGen*). O ajuste *fixGen* arruma da forma menos invasiva eventuais soluções que tenham sido geradas com características inviáveis, ou seja, que não obedecem às geometrias e afastamentos de referência. O ajuste *fixGen* age um número limitado de vezes e caso a solução permaneça inviável, uma nova solução aleatória é gerada pela função *geraCrom*.

D.1.2 Avaliação dos indivíduos - *evalElement*

Após a certificação de que todos os indivíduos da população inicial gerados são viáveis do ponto de vista geométrico., os cromossomos são transformados em código de solução pela função *crom2code*. Esta função incorpora as características do modelo tais como altura dos condutores, diâmetro e nível de tensão e incorpora em um código que serve de argumento de entrada para a função *evalElement*. A função *evalElement* usa o método das imagens sucessivas e as expressões para cálculo de parâmetros e retorna com os objetivos individuais de cada elemento.

Os valores dos objetivos de cada solução, juntamente com seu código e cromossomo são armazenados na variável *pop*, que corresponde aos dados de toda população de uma determinada geração.

D.1.3 Classificação das soluções dentro da população - *buildFront* e *buildCDS*

Com os indivíduos já com seus valores de objetivos avaliados, as funções *buildFront* e *buildCDS* fazem a avaliação das relações de dominância e avaliação da *crowding distance*.

A função *buildFront* identifica cada solução por um índice e faz, para cada uma das

soluções, uma lista de elementos que são dominados. Assim também é possível listar quais são os elementos que dominam uma determinada solução. Isso possibilita classificar a pertinência de cada solução a um determinado grupo de fronteira. As soluções que não são dominadas por nenhuma outra, pertencem à primeira fronteira. As soluções que são dominadas apenas pelas soluções que estão na primeira fronteira são classificadas na fronteira dois. E assim é feito sucessivamente.

A função *buildCDS* faz a classificação das soluções de uma população de acordo com a sua *crowding distance*. Ela organiza a população de acordo com cada o valor da função de cada um dos três objetivos, anota os valores máximos e mínimos para normalizar as distâncias. Dessa forma, se pode somar a *crowding distance* de cada um dos objetivos para obter a *crowding distance* total, sem que um dos objetivos tenha um peso maior que outro.

D.1.4 Seleção, recombinação e mutação - *selectParent*, *crossGen* e *mutatePop*

O percentual da população que será recombinado ou “mutado” é definido no início do experimento nas configurações iniciais.

A seleção para recombinação ocorre por sorteio simples com dois indivíduos. Sorteiam-se dois indivíduos para concorrer a uma vaga para a recombinação. A concorrência é por torneio simples, isto é: a sua fronteira é comparada e aquele que tiver na fronteira mais próxima da primeira ganha e será um cromossomo ‘pai’. Caso ambos concorrentes pertençam à mesma fronteira, então é avaliada a sua *crowding distance*. Aquele que tiver a maior *crowding distance* ganha a vaga. Para obter duas “soluções pais”, são necessários dois torneios. Os torneios são feitos apenas com dois participantes para dar mais chance para todas as soluções, pois, se o número de indivíduos no torneio aumentasse, haveria a tendência de que apenas as melhores soluções de uma geração tivessem a oportunidade de gerar descendentes e isso poderia causar convergência prematura para mínimos locais. Os pais se recombinam através de uma máscara aleatória. Os filhos são verificados pela função *genCheck* e, caso necessário, *fixGen*. Se a função *fixGen* for executada mais que um determinado número de vezes, o filho é descartado e um novo filho é gerado a partir de um novo cruzamento com os mesmos pais.

As soluções que sofrerão mutação também são sorteadas, porém isso é feito apenas uma vez, em que uma lista aleatória é gerada para selecionar os indivíduos que vão gerar filhos por mutação. Isso é feito pela função *mutatePop*, que utiliza a rotina *mutateGen* para fazer a mutação em um indivíduo especificamente.

A rotina *mutateGen* faz um sorteio para pegar apenas uma célula do código representado na Figura 173 para exercer a mutação. A rotina *mutateGen* tem como argumento de entrada os limites da solução de referência, além do próprio cromossomo que sofrerá a mutação.

Figura 173 – Código genético de uma solução

distância entre fases	feixe central	feixe lateral
dp, σ	rc1, θ c1	r1, θ 1
	rc2, θ c2	r2, θ 2
		r3, θ 3
		r4, θ 4

Fonte: autor

A mutação de um cromossomo ocorre da seguinte forma:

1. realiza um sorteio para determinar se a mutação ocorrerá na distância entre fases, feixe central ou lateral;
2. verifica a posição relativa da célula a ser modificada em relação aos limites, medindo a distância até o limite superior e inferior
3. sorteia um valor entre $\pm 20\%$ da distância até os limites superior ou inferior
4. reposiciona o subcondutor ou o centro do feixe em questão;
5. verifica se a mutação manteve o indivíduo viável. Se sim, o indivíduo mutado é considerado um filho válido. Se não, uma nova mutação é feita.

D.1.5 Registro histórico

Cada um dos indivíduos é rotulado com a geração em que foi criado para viabilizar a análise do desempenho do método e verificar as medidas de renovação das fronteiras. Além disso o método armazena toda evolução histórica da população e de suas fronteiras.