

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais  
*Campus* Divinópolis  
Graduação em Engenharia Mecatrônica

Gabriel Cabral Gomes

**Análise da Capacidade de Transmissão de Energia de Linhas de Transmissão  
Aéreas com Geometrias Não Convencionais**



Divinópolis  
2022

Gabriel Cabral Gomes

**Análise da Capacidade de Transmissão de Energia de Linhas de Transmissão  
Aéreas com Geometrias Não Convencionais**

Relatório final de Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à comissão avaliadora do curso de Graduação em Engenharia Mecatrônica como parte dos requisitos exigidos para a obtenção da aprovação na disciplina de TCC II.

Áreas de integração: Elétrica, Computação.

Orientador: Prof. Ms. André Luiz Paganotti



Divinópolis  
2022

# Resumo

Este trabalho propõe um estudo baseado em simulações computacionais, envolvendo um conceito viável de recapacitação não convencional de linhas de transmissão (LT), denominado Linha de Potência Natural Elevada (LPNE) e utilizando o método de otimização diferencial evolutivo para criação de modelos de linhas de transmissão compactas (LTC). Essa técnica é baseada no entendimento da variação da potência natural da LT em função da posição dos subcondutores de cada feixe e da distância entre fases diferentes. Sabe-se ainda que mudanças na configuração geométrica dos feixes de condutores da LT podem provocar alterações nos parâmetros elétricos do sistema, como a capacitância e a indutância envolvidos. Propõe-se então, por meio de modelos matemáticos e da otimização, uma alteração da posição dos condutores de cada fase resultando em uma configuração de Linha de Transmissão Compacta onde se busca maximizar a capacidade de transmissão dentro das restrições aplicadas e com a redução da faixa de passagem da LT. São consideradas as restrições como distâncias mínimas entre os componentes da LT e o solo, determinadas pela NBR 5422, bem como a magnitude dos campos elétricos para exposição humana do público em geral ao nível do solo, estabelecidas pela NBR 25415. Também serão considerados os limites de campo elétrico crítico na superfície dos condutores, a partir do qual pode ocorrer o efeito Corona. Obtém-se proposições de modificações nas configurações geométricas de linhas de transmissão que possam resultar em linhas de transmissão com maior capacidade de transmissão de energia. Com este trabalho observa-se a variação da potência característica da linha para a variação das posições entre as fases, e define-se novos modelos geométricos para LTs de 2,3 e 4 cabos por fase onde, utilizando uma ferramenta desenvolvida, obtém-se aumento do SIL respeitando limites impostos.

**Palavras-chave:** Linhas de transmissão; Recapacitação; Linha de potência natural elevada; Otimização; Campo Elétrico.

# Sumário

|  |             |
|--|-------------|
| <b>Lista de Figuras</b>  | <b>vii</b>  |
| <b>Lista de Tabelas</b>  | <b>viii</b> |
| <b>Lista de Acrônimos e Notação</b>                                    | <b>ix</b>   |
| <b>1 Introdução</b>  | <b>1</b>    |
| 1.1 Definição do problema . . . . .                                    | 2           |
| 1.2 Motivação . . . . .  | 2           |
| 1.3 Objetivos do trabalho . . . . .                                    | 2           |
| 1.3.1 Objetivos Gerais . . . . .                                       | 2           |
| 1.3.2 Objetivos Específicos . . . . .                                  | 3           |
| 1.4 Organização do texto . . . . .                                     | 3           |
| <b>2 Fundamentos</b>   | <b>4</b>    |
| 2.1 Revisão Bibliográfica . . . . .                                    | 4           |
| 2.2 Estado da Arte . . . . .   | 5           |
| 2.3 Fundamentação Teórica . . . . .                                    | 6           |
| 2.3.1 Sistema Elétrico de Potência . . . . .                           | 6           |
| 2.3.2 Linhas de Transmissão . . . . .                                  | 6           |
| 2.3.3 Condutores . . . . .   | 7           |
| 2.3.4 Isoladores . . . . .   | 9           |
| 2.3.5 Estrutura de Suporte da LT . . . . .                             | 9           |
| 2.3.6 Cabos Para-raios . . . . .                                       | 10          |
| 2.3.7 Recapitação de Linhas de Transmissão . . . . .                   | 11          |
| <b>3 Metodologia</b>   | <b>14</b>   |
| 3.1 Cálculo da Carga Elétrica nos Condutores . . . . .                 | 14          |
| 3.2 Cálculo da Potência Característica de Sequência Positiva . . . . . | 17          |
| 3.3 Cálculo do Campo Elétrico ao Nível do Solo . . . . .               | 20          |
| 3.4 Campo Elétrico na Superfície dos Condutores . . . . .              | 24          |
| 3.5 Determinação do Campo Elétrico Crítico . . . . .                   | 27          |
| 3.6 Ferramenta de Otimização . . . . .                                 | 28          |
| 3.6.1 Algoritmo de Evolução Diferencial . . . . .                      | 29          |

---

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>4</b> | <b>Resultados e Discussões</b>   | <b>34</b> |
| 4.1      | Validação do Campo Elétrico Pontual Adotando Diâmetro Equivalente dos Feixes de Condutores . . . . . | 34        |
| 4.2      | Validação do Campo Elétrico ao Nível do Solo . . . . .   | 35        |
| 4.3      | Validação do campo elétrico superficial . . . . .  | 37        |
| 4.4      | Obtenção do SIL Aproximado . . . . .   | 39        |
| 4.4.1    | Validação do cálculo do valor do SIL . . . . .   | 39        |
| 4.5      | Análise do Efeito da Geometria das Fases no SIL Aproximado . . . . .                                 | 43        |
| 4.6      | Maximização do SIL . . . . .   | 45        |
| 4.6.1    | Cenário 1: LT 2 Cabos por Fase . . . . .   | 46        |
| 4.6.2    | Cenário 2: LT 3 Cabos por Fase . . . . .   | 50        |
| <b>5</b> | <b>Considerações Finais</b>  | <b>58</b> |
| 5.1      | Conclusões . . . . .   | 58        |
| 5.2      | Continuidade . . . . .   | 59        |
|          | <b>Referências</b>   | <b>60</b> |

# Lista de Figuras

|      |  |    |
|------|--|----|
| 1.1  | Sequência de Objetivos a Serem Cumpridos - Do Autor (2022) . . . . .   | 3  |
| 2.1  | Principais elementos das Linhas de Transmissão - LABEGALINI et al. (1992, p. 19). . . . .  | 7  |
| 2.2  | Exemplo do efeito de catenária no cabo da linha - (ALMEIDA, 2020) . . . . .  | 8  |
| 2.3  | Exemplo de isoladores compactos. - PAGANOTTI (2012). . . . .   | 9  |
| 2.4  | Exemplos de torres de diferentes materiais: da esquerda para a direita, uma torre de madeira, de estrutura metálica e de concreto. - ALMEIDA (2020). . . | 10 |
| 2.5  | Exemplo de LT convencional(a) e LPNEs chinesas (b e c) - GHASSEMI (2020)   | 12 |
| 3.1  | Sistema real (lado esquerdo) e sistema equivalente (lado direito) proposto pelo Método das Imagens para uma carga puntiforme positiva. - SANTOS (2017) . | 14 |
| 3.2  | Diagrama fasorial das tensões e cargas de um sistema trifásico balanceado. - SANTOS (2017) . . . . .   | 16 |
| 3.3  | Representação dos termos usados para cálculo de $L_1$ e $C_1$ - Do Autor (2022) .  | 19 |
| 3.4  | Superfície Gaussiana em torno de uma linha de cargas - ALMEIDA (2020) . .  | 21 |
| 3.5  | Visão lateral dos cortes transversais.- SANTOS (2017) . . . . .  | 22 |
| 3.6  | Visão frontal dos cortes transversais. - SANTOS (2017) . . . . .   | 22 |
| 3.7  | Sistema Físico Trifásico Real Equivalente - PAGANOTTI (2012) . . . . .   | 23 |
| 3.8  | Exemplo de utilização do Método das Imagens Sucessivas - PAGANOTTI (2012)  | 24 |
| 3.9  | Efeito das Cargas Imagem no Condutor - PAGANOTTI (2012) . . . . .  | 25 |
| 3.10 | Representação das cargas imagens no condutor $A$ (segundo estágio ou segunda ordem) - SANTOS (2017) . . . . .  | 25 |
| 3.11 | Representação das cargas imagens par ao caso de 4ª ordem - SANTOS (2017)   | 26 |
| 3.12 | Relação entre as ordens de imagem sucessivas - (SARMA; JANISCHEWSKYJ, 1969) . . . . .  | 26 |
| 3.13 | Diagrama do fluxo de operações no DE - Do Autor (2022) . . . . .   | 30 |
| 3.14 | Processo de gerar o vetor doador $V^{(q+1)}$ para uma função objetivo bidimensional - (SILVA OLIVEIRA; SARAMAGO, 2005) . . . . .                         | 31 |
| 3.15 | Aplicação dos limites de cálculo na mutação - Do Autor (2022) . . . . .  | 32 |
| 4.1  | Representação da configuração geométrica da LT. . . . .  | 36 |
| 4.2  | Representação comparativa entre o campo elétrico encontrado utilizando a metodologia proposta e o encontrado por PAGANOTTI (2012) . . . . .              | 36 |
| 4.3  | Representação da configuração dos condutores . . . . .   | 38 |
| 4.4  | Campo elétrico superficial no cabo 1 da fase A . . . . .   | 38 |

|      |  |    |
|------|--|----|
| 4.5  | Campo elétrico superficial no cabo 2 da fase B . . . . .   | 38 |
| 4.6  | Campo elétrico superficial no cabo 3 da fase C . . . . .   | 39 |
| 4.7  | Representação da configuração geométrica da LT de 2 cabos por fase . . . . .                               | 40 |
| 4.8  | Representação da configuração geométrica da LT de 3 cabos por fase . . . . .                               | 41 |
| 4.9  | Representação da configuração geométrica da LT de 4 cabos por fase . . . . .                               | 42 |
| 4.10 | Representação da configuração geométrica da LT de 2 cabos por fase para as configurações citadas . . . . . | 43 |
| 4.11 | Representação da configuração geométrica da LT de 3 cabos por fase para as configurações citadas . . . . . | 44 |
| 4.12 | Representação da configuração geométrica da LT de 4 cabos por fase para as configurações citadas . . . . . | 44 |
| 4.13 | Representação da configuração geométrica da LT de 2 cabos por fase . . . . .                               | 46 |
| 4.14 | Comparativo entre os casos de mutação . . . . .  | 47 |
| 4.15 | Campo elétrico superficial do melhor indivíduo com 2 condutores por fase . . .                             | 47 |
| 4.16 | Campo elétrico ao nível do solo do melhor indivíduo com 2 condutores por fase                              | 47 |
| 4.17 | Comparativo posições originais e otimizadas para o caso 1 com 2 condutores .                               | 48 |
| 4.18 | Comparativo posições originais e otimizadas para o caso 2 com 2 condutores .                               | 48 |
| 4.19 | Comparativo posições originais e otimizadas para o caso 3 com 2 condutores .                               | 48 |
| 4.20 | Comparativo posições originais e otimizadas para o caso 4 com 2 condutores .                               | 48 |
| 4.21 | Comparativo posições originais e otimizadas para o caso 5 com 2 condutores .                               | 48 |
| 4.22 | Comparativo posições originais e otimizadas para o caso 6 com 2 condutores .                               | 48 |
| 4.23 | Representação da configuração geométrica da LT de 3 cabos por fase . . . . .                               | 50 |
| 4.24 | Comparativo entre os casos de mutação . . . . .  | 51 |
| 4.25 | Campo elétrico superficial do melhor indivíduo com 3 condutores por fase . . .                             | 51 |
| 4.26 | Campo elétrico ao nível do solo do melhor indivíduo com 3 condutores por fase                              | 51 |
| 4.27 | Comparativo posições originais e otimizadas para o caso 1 com 3 condutores .                               | 52 |
| 4.28 | Comparativo posições originais e otimizadas para o caso 2 com 3 condutores .                               | 52 |
| 4.29 | Comparativo posições originais e otimizadas para o caso 3 com 3 condutores .                               | 52 |
| 4.30 | Comparativo posições originais e otimizadas para o caso 4 com 3 condutores .                               | 52 |
| 4.31 | Comparativo posições originais e otimizadas para o caso 5 com 3 condutores .                               | 52 |
| 4.32 | Comparativo posições originais e otimizadas para o caso 6 com 3 condutores .                               | 52 |
| 4.33 | Representação da configuração geométrica da LT de 4 cabos por fase . . . . .                               | 54 |
| 4.34 | Comparativo entre os casos de mutação . . . . .  | 55 |
| 4.35 | Campo elétrico superficial do melhor indivíduo com 4 condutores por fase . . .                             | 55 |
| 4.36 | Campo elétrico ao nível do solo do melhor indivíduo com 4 condutores por fase                              | 55 |
| 4.37 | Comparativo posições originais e otimizadas para o caso 1 com 4 condutores .                               | 56 |
| 4.38 | Comparativo posições originais e otimizadas para o caso 2 com 4 condutores .                               | 56 |
| 4.39 | Comparativo posições originais e otimizadas para o caso 3 com 4 condutores .                               | 56 |
| 4.40 | Comparativo posições originais e otimizadas para o caso 4 com 4 condutores .                               | 56 |
| 4.41 | Comparativo posições originais e otimizadas para o caso 5 com 4 condutores .                               | 56 |
| 4.42 | Comparativo posições originais e otimizadas para o caso 6 com 4 condutores .                               | 56 |

# Lista de Tabelas

|      |  |    |
|------|--|----|
| 3.1  | Determinação do parâmetro $f_s$ - (SARMIENTO, 2016) . . . . .  | 28 |
| 4.1  | Características Dimensionais da LT consideradas . . . . .  | 36 |
| 4.2  | Resultados encontrados na comparação entre os campos elétricos . . . . .   | 37 |
| 4.3  | Características do caso com 2 condutores por fase . . . . .  | 40 |
| 4.4  | Características do caso com 3 condutores por fase . . . . .  | 40 |
| 4.5  | Características do caso com 4 condutores por fase . . . . .  | 41 |
| 4.6  | Resultado de SIL encontrado utilizando a aproximação por sequência positiva, por sequência positiva considerando velocidade de fase constante e os valores esperados de SIL encontrados por PAGANOTTI <i>et al.</i> (2016) . . . . . | 42 |
| 4.7  | Resultados obtidos após variação de posição das fases . . . . .  | 43 |
| 4.8  | Resultados obtidos após variação de posição das fases . . . . .  | 44 |
| 4.9  | Resultados obtidos após variação de posição das fases . . . . .  | 45 |
| 4.10 | Características do caso com 2 condutores por fase . . . . .  | 46 |
| 4.11 | Resultados obtidos do cenário 1: LT 2 Cabos por Fase . . . . .   | 49 |
| 4.12 | Características do cenário 2: LT 3 Cabos por Fase . . . . .  | 50 |
| 4.13 | Resultados encontrados para cada caso simulado . . . . .   | 53 |
| 4.14 | Características do Cenário 2: LT 3 Cabos por Fase . . . . .  | 53 |
| 4.15 | Características do caso com 4 condutores por fase . . . . .  | 54 |
| 4.16 | Resultados encontrados para cada caso simulado . . . . .   | 57 |
| 4.17 | Características do cenário 3: LT 4 Cabos por Fase . . . . .  | 57 |

# Lista de Acrônimos e Notação

|      |  |
|------|--|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| LT   | Linha de Transmissão                     |
| LTC  | Linha de Transmissão Compacta            |
| LPNE | Linha de Potência Natural Elevada        |
| SIL  | <i>Surge Impedance Loading</i>           |
| TCC1 | Trabalho de Conclusão de Curso 1         |
| TCC2 | Trabalho de Conclusão de Curso 2         |
| DE   | Evolução Diferencial                     |
| SEP  | Sistema Elétrico de Potência             |
| CEP  | Condutor Elétrico Perfeito               |
| MIS  | Método das imagens sucessivas            |

## Introdução

A energia elétrica desde meados dos séculos XIX e XX, tem transformado o cenário mundial, sendo o principal catalisador para a segunda revolução industrial, como a principal fonte de energia em conjunto com o petróleo (DATHEIN, 2003). A partir desse momento, a energia elétrica se tornou um insumo essencial para os avanços tecnológicos e sustentabilidade da indústria. Perante a isso, as linhas de transmissão tem uma importância igualmente elevada uma vez que fazem o intermédio entre as usinas de produção e os consumidores finais.

Um país de dimensões continentais como o Brasil, cuja principal matriz energética é de origem hidrelétrica, gera a necessidade da construção de linhas de transmissão (LT's) muito extensas. Estes elementos do sistema elétrico de potência interligam os centros de geração aos centros de consumo PAGANOTTI (2012). A crescente demanda por energia elétrica entregue aos consumidores de maneira eficiente e confiável, gera a necessidade de estudos relacionados ao desenvolvimento de métodos mais eficientes de transmissão de energia elétrica.

Outro fator determinante para a opção do tema de estudo é a dificuldade e custo envolvidos na aquisição de novas faixas de passagem para a construção de novas linhas de transmissão. Para contornar estas dificuldades as concessionárias de energia elétrica tem usado como alternativas: aumento do limite térmico da linha, aumento da tensão de operação com compensadores e/ou incremento do número de condutores por fase DUANE *et al.* (2020). Há também uma alternativa não convencional chamada Linhas de Potência Natural Elevada, essa é altamente viável e representa uma das alternativas mais atuais para o aumento da capacidade de transmissão de energia elétrica e é abordada neste projeto (DUANE *et al.*, 2020; PAGANOTTI, 2012; SARMIENTO, 2016). Por meio do rearranjo dos feixes de condutores, mantendo-se a topologia original de cada fase, espera-se obter LT's com a mesma topologia da original, mas com distâncias entre fases diferentes reduzidas.

A abordagem usada para a otimização da posição do conjunto de condutores adota o método diferencial evolutivo a fim de minimizar o campo elétrico no nível do solo, maximizar o *Surge Impedance Loading*(SIL) da linha e respeitando os limites relacionados ao campo

elétrico na superfície dos cabos para que a LT tenha um comportamento satisfatório em relação a ocorrência do efeito corona. Sendo assim, neste trabalho são abordadas as áreas de Elétrica e Computação. A primeira área está relacionada com o material de análise, seu equacionamento, e entendimento enquanto a outra está relacionada com as ferramentas a serem utilizadas para a validação e otimização.

## 1.1 Definição do problema

Este trabalho modela uma LT de maneira analítica, entendendo o efeito da variação da posição dos cabos condutores na determinação da carga elétrica do sistema. Além disso, pretende-se entender a relação entre a capacidade de transmissão de energia (SIL, do inglês *Surge Impedance Loading*) com a carga elétrica de sequência positiva do sistema.

Uma vez definido o modelo analítico da LT, a relação existentes entre as grandezas de interesse e a geometria dos feixes, um processo de otimização geométrica dos cabos será implementado.

## 1.2 Motivação

Com este trabalho pretende-se alcançar novas disposições de condutores para uma LT que seja mais otimizada para o transporte de energia. Com esse resultado as concessionárias seriam muito beneficiadas, uma vez que poderiam fornecer mais potência com linhas de transmissão compactas, que possuem dimensões menores e menos material estrutural. Além das concessionárias esse resultado pode trazer um maior desenvolvimento econômico local, pois com uma capacidade de transmissão elevada, os centros urbanos e industriais poderiam se desenvolver mais, antes de se preocuparem com problemas relacionados com demanda energética e surtos de sobrecarga na rede. E ainda considerando as influências do campo elétrico em aparelhos eletrônicos, ondas de rádio e animais dentro de valores seguros estabelecidos pelos órgãos regulamentadores.

## 1.3 Objetivos do trabalho

São objetivos do trabalho a ser desenvolvidos:

### 1.3.1 Objetivos Gerais

Entender os parâmetros físicos e elétricos que afetam a capacidade de transmissão de energia elétrica e propor mudanças nas geometrias dos feixes visando obter linhas de potências natural elevadas (LPNE).

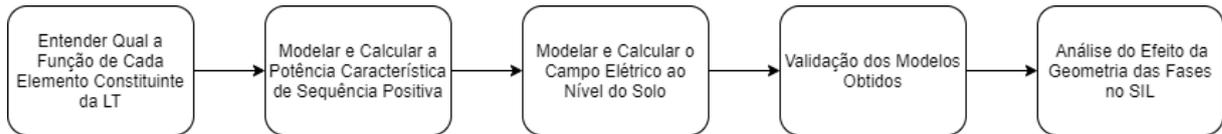


Figura 1.1: Sequência de Objetivos a Serem Cumpridos - Do Autor (2022)

### 1.3.2 Objetivos Específicos

- Realizar pesquisa bibliográfica relacionada aos componentes de LTs, à influência da configuração geométrica de condutores sobre o SIL, no campo elétrico ao nível do solo e na superfície dos cabos, e aos requisitos de segurança e de exposição humana estipulados pelas disposições legais nas normas NBR 5422 (1985), NBR 25415 (2016) e a lei 11.934/2009;
- Entender e implementar um modelo analítico para cálculo da potência natural da LT (SIL);
- Entender e calcular o campo elétrico a 1 metro do nível do solo gerado pelas LT's;
- Entender e calcular o campo elétrico superficial em cada um dos cabos das LT's analisadas;
- Estudo e implementação de uma estratégia de otimização evolutiva para o modelo analítico da LT considerado;
- Propor novas configurações geométricas de conjunto de condutores aderentes aos requisitos de distâncias mínimas de segurança, de prevenção à ocorrência do efeito Corona e de níveis máximos de exposição humana a campos elétricos;
- Analisar os resultados obtidos.

## 1.4 Organização do texto

O presente texto é dividido em cinco capítulos. No corrente capítulo são apresentados a definição do problema e a motivação para o desenvolvimento do trabalho. Além disso, são listados os objetivos gerais e específicos do projeto. No segundo capítulo é apresentada a fundamentação do trabalho. Constam neste trecho a revisão bibliográfica e o estado da arte. Em seguida, no terceiro capítulo, é apresentada a metodologia. Essa parte do trabalho é dedicada a justificar as escolhas de projeto, além de apresentar cada etapa do desenvolvimento do mesmo. Por fim, o último capítulo apresenta as considerações finais do trabalho, além de apresentar ideias para trabalhos futuros.

## Fundamentos

Este capítulo apresenta os conceitos necessários para a fundamentação teórica deste trabalho. Inicia-se por uma revisão bibliográfica e por um breve estudo do estado da arte para que se tenha os elementos necessários para o estudo da otimização geométrica dos feixes de condutores pretendido neste texto de conclusão de curso.

### 2.1 Revisão Bibliográfica

A tentativa de se obter linhas de transmissão mais eficientes alterando a geometria dela não é um problema recente e já foi abordado por diferentes pesquisadores com o passar dos anos, ainda assim, continua um problema pertinente e de amplo interesse para centros de pesquisa e concessionárias de energia no Brasil e no mundo, como é demonstrado a seguir.

Em 1999, Esmeraldo propôs a implementação de uma linha de transmissão compacta usando a tecnologia da Linha de Transmissão de Potência Natural Elevada (LPNE) como uma alternativa para o novo sistema de transmissão de 500 kV de Furnas. Esse autor mostra que utilizando estes métodos é possível definir tamanhos de torres até 50 % menores e potência natural (SIL) maiores, resultando em um aumento de até 30 % da capacidade de transmissão da linha. Os dados deste sistema foram coletados experimentalmente e empregadas técnicas matemáticas, semi-determinística e estatística, para implementação da configuração ótima desejada (ESMERALDO *et al.*, 1999).

Em 2005, NAYAK; SEHGAL; SEN (2006) abordam novamente o tema de melhora na capacidade de transmissão de LTs por meio de aumento do SIL por meio de modelos matemáticos além de mostrar a relação de sensibilidade do SIL em relação a configuração geométrica de sub condutores, a estrutura das torres e ao espaçamento entre as fases.

Os algoritmos para a otimização geométrica de feixes de condutores utilizados encontrados na literatura são: algoritmos baseados em direção de busca como o método do Gradiente (PAGANOTTI, 2012) e o algoritmo Elipsoidal (DUANE *et al.*, 2020); e algoritmos baseados em estratégias evolutivas como o algoritmo de Evolução Diferencial (DE) (RESENDE, 2019;

ALMEIDA, 2020), entre outros métodos. O algoritmo de evolução citado é caracterizado por ser uma técnica de otimização evolucionária, metaheurística e de população estocástica. O algoritmo DE se mostrou eficiente em encontrar soluções para problemas não-lineares, não-diferenciáveis, descontínuos, multimodais, conservando seu alto desempenho, confiabilidade e rápida convergência (RESENDE, 2019)

Uma vez conhecida a maneira como os feixes de condutores tem sido otimizados para o aumento da capacidade de transmissão (ESMERALDO *et al.*, 1999; NAYAK; SEHGAL; SEN, 2006; RESENDE, 2019), este trabalho visa obter linhas de potência natural elevadas a partir da otimização geométrica das feixes originais usando o método de otimização diferencial evolutivo.

## 2.2 Estado da Arte

Em sua dissertação RESENDE (2019) propõe a utilização do Algoritmo Evolutivo Diferencial para obtenção de um conjunto de soluções ótimas pertencentes à fronteira Pareto-ótima entre a minimização do campo elétrico e magnético ao nível do solo e maximização da potência da LT alterando a geometria de condutores em LNPEs de 500 kV com 3 condutores por fase, além de implementar métodos de tomada de decisão.

Outro trabalho publicado no ano seguinte por GHASSEMI (2020), apresenta e discute os desafios e perspectivas da aplicação das Linhas de Potência Natural Elevada em diversos países do mundo. Os países pioneiros nessa tecnologia são Rússia, Brasil e China, com uma extensão total de 1100 km, 744 km e 112 km de trechos já em operação, respectivamente. Em seu trabalho cita ainda as consequências de se ignorar o aumento na demanda energética, como a sobrecarga ocorrida em 2012 em Ontário, que causou um prejuízo de 6 bilhões de dólares em equipamentos queimados e serviços inviabilizados por conta do black-out, um colapso do sistema de transmissão devido a um surto de tensão (FORCE, 2004). Por fim, expõe dados científicos para formar uma estrutura útil e ponto de referência no desenvolvimento futuro de LT's que superam os projetos tradicionais em potência natural e tem perdas por efeito Corona reduzidas.

No mesmo ano, ALMEIDA (2020) desenvolve em seu trabalho de conclusão de curso, onde tem-se uma abordagem ao problema de otimização com utilização do método do algoritmo de Evolução Diferencial com o objetivo de se obter a melhor relação de distância entre feixes de sub condutores de uma mesma fase em uma LNPE considerando as limitações impostas pelas normas NBR 5422 (ABNT, 1985) que estabelece as distâncias a serem respeitadas em um projeto de LT, a Lei 11.934/2009 e a NBR 25415 (ABNT, 2016) que estabelecem os limites de campos eletromagnéticos ao nível do solo. Além disso, os níveis de campos elétricos superficiais também são determinados para que as LTs tenham um comportamento satisfatório

em relação ao efeito Corona.

No mesmo ano DUANE *et al.* (2020) apresenta em seu trabalho uma metodologia de recapitação das LT's e utiliza o algoritmo Elipsoidal para encontrar soluções por meio da variação da posição de cada feixe de subcondutores, para 3 e 4 cabos por fase, propondo ainda um novo método de otimização que alcançou resultados até 27 vezes mais rápido que o método convencional e diminuição do campo elétrico ao nível do solo.

Em 2021 SILVA (2021) propôs em seu trabalho de conclusão de curso uma ferramenta para recapitação das LT's buscando diminuição do campo elétrico ao nível do solo e superficial, por meio das interações físicas e elétricas entre os elementos, além dos efeitos Joule e Corona. Essas características foram analisadas com o método das Imagens e Imagens Sucessivas para então por meio do algoritmo de Evolução Diferencial alcançar geometrias otimizadas com campos elétricos ao nível do solo minimizados.

Para este trabalho pretende-se atingir resultados similares aos obtidos no trabalho de RESENDE (2019). No entanto, pretende-se levar em conta os campos elétricos superficiais e ao nível do solo, similarmente ao desenvolvimento feito por SILVA (2021). Além disso, a formulação do problema de otimização em função do SIL calculado de maneira aproximada e que poderá conduzir a resultados diferentes dos obtidos por ALMEIDA (2020). Dessa forma ao variar a distância entre as fases visando maximizar o SIL, respeitando o campo elétrico ao nível do solo e superficial e preservando os formatos originais dos feixes poderá ser encontrado um resultado ainda mais otimizado para o problema.

## 2.3 Fundamentação Teórica

### 2.3.1 Sistema Elétrico de Potência

O Sistema Elétrico de Potência (SEP) é o conjunto de instalações e equipamentos responsáveis pela produção, transmissão e distribuição da energia elétrica dos centros geradores até os pontos de consumo. Para isso, o SEP é composto por três subsistemas principais: geração, transmissão e distribuição SERGIO (1995). Em seguida é discutido mais a cerca do sistema de transmissão, composto pelas linhas de transmissão e que consistem no objeto de interesse deste trabalho.

### 2.3.2 Linhas de Transmissão

Os componentes principais de uma linha de transmissão são mostrados na Figura 2.1: cabos condutores de energia, isoladores, estruturas de suporte, fundações, cabos de guarda e para-raios. Cada um destes elementos são descritos a seguir.

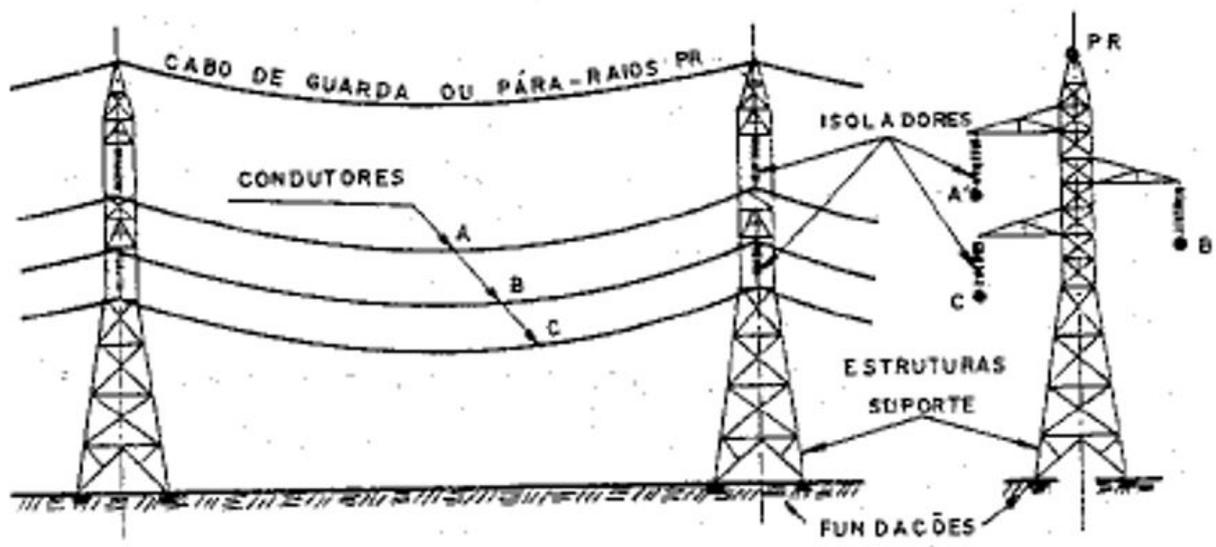


Figura 2.1: Principais elementos das Linhas de Transmissão - LABEGALINI et al. (1992, p. 19).

### 2.3.3 Condutores

Os condutores, principais elementos de estudos desse trabalho, são os componentes ativos das linhas de transmissão e são responsáveis pelo transporte da energia, pois possibilitam o fluxo de corrente elétrica pelo sistema. Sua escolha, dimensionamento e posicionamento corretos são decisivos na contenção de perdas de energia da LT, por efeito Joule ou por efeito Corona, bem como o controle de níveis de radiointerferência, ruídos acústicos e na definição dos limites de solicitações mecânicas suportáveis (LABEGALINI et al., 1992).

O comportamento mecânico dos condutores é importante para a segurança e estabilidade da LT. Um fio estendido entre dois pontos distantes, devido a sua flexibilidade sofre uma deflexão apresentando a forma de uma cossenoide hiperbólica, esse efeito pode ser visto na figura 2.2. A maior distância vertical entre a linha que liga os pontos de apoio do cabo e um ponto da curva do mesmo recebe o nome de flecha. Tal medida pode sofrer variações durante o funcionamento da LT, em função da dilatação, da contração e da tração aplicada ao condutor. A altura cabo solo ou altura de segurança é dada pela menor distância entre o condutor e o solo, além de ser o principal parâmetro de precaução, regido pela NBR 5422 (ABNT, 1985) (CAVASSIN, 2011).

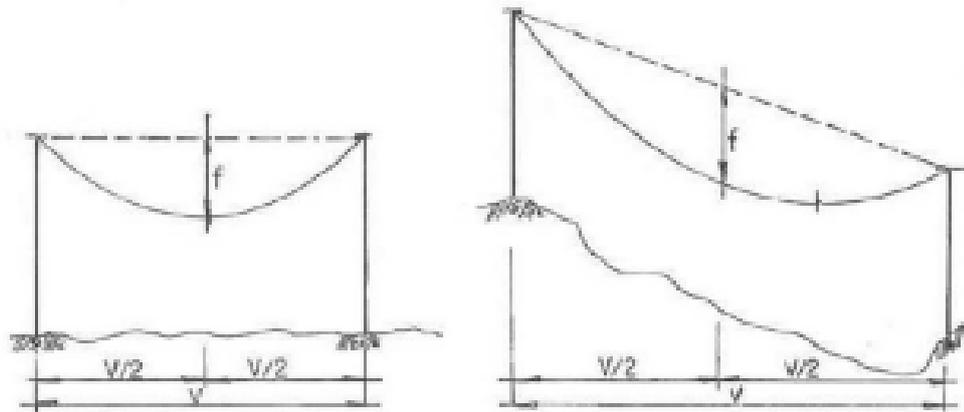


Figura 2.2: Exemplo do efeito de catenária no cabo da linha - (ALMEIDA, 2020)

Os condutores ideais apresentam: alta permeabilidade elétrica, permitindo uma menor resistência à passagem de energia; baixo custo; baixo peso específico; alta resistência à oxidação e corrosão, pois são peças fundamentais e ficam expostas ao tempo. No entanto, os cabos condutores não são ideais e sua escolha e dimensionamento corretos são decisivos para o projeto (LABEGALINI et al., 1992). Dessa forma, os condutores de linhas aéreas de transmissão são compostos por cabos produzidos pelo encordoamento de fios metálicos. Dessa forma, sobre um fio central são enroladas camadas de outros fios, em forma espiral. A cada camada, inverte-se o sentido de enrolamento, de forma que a camada mais externa seja torcida no sentido horário da seção transversal. Internamente em um cabo, os fios podem variar em diâmetro e material, desde que sejam compatíveis eletroliticamente (LABEGALINI et al., 1992).

Os materiais mais utilizados na fabricação são o cobre e o alumínio. O primeiro mesmo possuindo uma condutividade alta, não é economicamente viável e vem sendo substituído pelo segundo, este por sua vez possui uma condutividade maior por unidade de peso e seu custo é mais baixo. Sua inviabilidade ocorre quando se leva em consideração a resistência mecânica e resistência à corrosão, mas podendo ser sanadas na sua associação com ligas adotadas para cada tipo de situação (LABEGALINI et al., 1992).

A especificação de cabos ocorre em função do diâmetro nominal, da área da seção transversal, do número de fios e do material de fabricação. As normas brasileiras para fios e cabos nus de cobre, de alumínio ou de ligas de alumínio adotam a escala American Wire Gage, que conta com tamanhos padronizados de cabos, em ordem crescente de diâmetro, mantendo constante a relação entre o diâmetro de dois tamanhos sucessivos (MATZENBACHER, 2015). Cada fase do sistema trifásico pode apresentar ainda uma variação na quantidade de cabos, variando de 1, 2, 3 a 12 cabos por fase.

### 2.3.4 Isoladores

Os condutores das linhas de transmissão devem ser isolados eletricamente de seus suportes e do solo, por grande parte da sua extensão eles estão envoltos em ar, um isolante natural, porém nos pontos de sustentação eles necessitam de um material para isolá-los da estrutura e para isso utiliza-se um material dielétrico chamado de isolador. (LABEGALINI et al., 1992).

Tais componentes devem suportar solicitações elétricas de curtíssima duração e alta amplitude, como sobretensões causadas por descargas elétricas; sobretensões internas, provocadas por alterações do estado do sistema; e sobretensões de frequência industrial, com alta duração e baixa amplitude. Além disso, os isoladores também são solicitados mecanicamente por comporem parte da estrutura de sustentação dos condutores (LABEGALINI et al., 1992). Eles tem o papel de suportar os cabos, sendo o único ponto de contato entre eles e a estrutura de suporte, são também, os únicos a suportar as demandas mecânicas.

Nas linhas aéreas de transmissão são empregados isoladores confeccionados com porcelana vitrificada, vidro temperado e material sintético composto. Além do material a ser empregado, a escolha do tipo de isolador a ser adotado na LT também é um fator importante, são três tipos básicos: isoladores de pino, isoladores tipo pilar ou coluna e isoladores de suspensão (LABEGALINI et al., 1992), sendo o de suspensão mostrado na figura 2.3 .

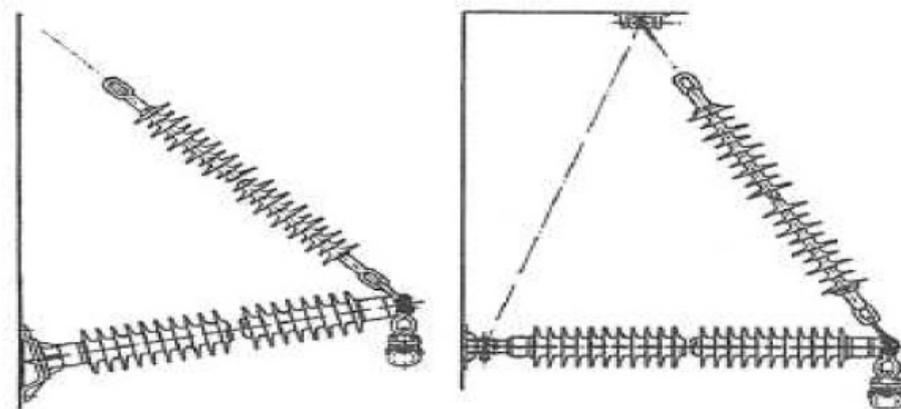


Figura 2.3: Exemplo de isoladores compactos. - PAGANOTTI (2012).

### 2.3.5 Estrutura de Suporte da LT

Também chamadas de torres, as estruturas de suporte são responsáveis pela sustentação de todo o conjunto da LT, bem como a fixação da linha ao chão. Elas garantem o distanciamento de segurança dos condutores energizados entre si e o solo. Além disso, transmitem as forças resultantes das solicitações mecânicas dos elementos do suporte para os condutores. Dessa

forma, o seu dimensionamento deve ocorrer por critérios elétricos e mecânicos (LABEGALINI et al., 1992).

Suas dimensões e formas dependem principalmente da: disposição dos condutores; dimensões e formas dos isoladores; distância entre condutores; flechas dos condutores; altura de segurança; função mecânica; materiais estruturais; número de circuitos; forma de resistir; etc. A composição do material da estrutura pode ser de madeira, concreto armado ou metais (aço e ligas de alumínio), levando em consideração a forma da estrutura a ser empregada, custo de fabricação e transporte, nível de tensão que serão submetidas e resistência ao ambiente (LABEGALINI et al., 1992).

O material de formação das torres pode ser metálico, concreto ou madeira, conforme mostrados na figura 2.4, este último com a desvantagem de possuir baixa resistência mecânica. Torres de madeira ou de concreto são aplicáveis em níveis de tensão mais baixos. As torres de metal geralmente são fabricadas com treliças de aço-carbono, ocupando uma larga faixa de servidão e podendo ser montadas por peças. As estruturas em concreto são fabricadas com o corpo inteiro (WAZEN, 2011).

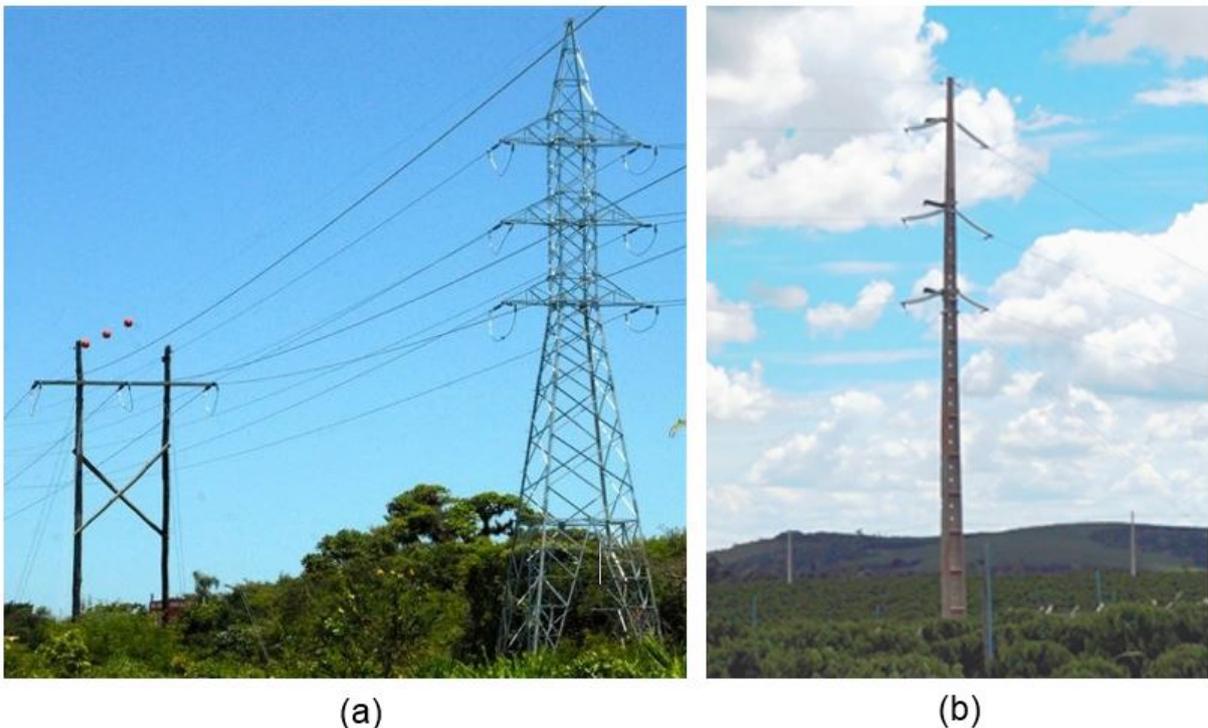


Figura 2.4: Exemplos de torres de diferentes materiais: da esquerda para a direita, uma torre de madeira, de estrutura metálica e de concreto. - ALMEIDA (2020).

### 2.3.6 Cabos Para-raios

É a estrutura responsável por absorver as descargas elétricas atmosféricas, raios, evitando que atinjam os cabos condutores. Os cabos para-raios são metálicos e estão em curto-circuito

com o solo por meio da estrutura metálica de forma que qualquer descarga é direcionada para o solo sem influenciar na condução adequada da energia da LT.

Apresentados os elementos que compõem a LT, será abordado em sequência a recapacitação de linhas de transmissão, uma vez que este trabalho visa estudar os efeitos da alteração das posições dos cabos em relação a capacidade de transmissão e em relação aos campos elétricos envolvidos, e a recapacitação consiste basicamente na alteração de parâmetros construtivos visando o aumento na capacidade de transmissão e melhoria das condições operativas da LT.

### **2.3.7 Recapacitação de Linhas de Transmissão**

A recapacitação de uma LT é o processo pelo qual alterando algumas características construtivas da linha deseja-se aumentar a capacidade de transmissão sem a necessidade da construção de linhas inteiramente novas. As principais técnicas em uso na atualidade pelas concessionárias são: (I) recapacitação de corrente, que consiste no aumento do limite térmico da linha; (II) recondutoramento, que consiste na troca dos condutores por outros de maior diâmetro ou diferentes padrões construtivos; (III) recapacitação de tensão, que consiste no aumento do valor nominal da tensão de operação e demais alterações no sistema (FRONTIN, 2010).

Em virtude do elevado custo de construção, alocação de novas áreas e do crescimento contínuo da demanda de energia elétrica a recapacitação se tornou uma forma econômica e eficiente de solucionar essa situação. Entre essas técnicas existe a recapacitação por linha de potência natural elevada, que será abordada neste trabalho

#### **Linha de Potência Natural Elevada (LPNE)**

O conceito do LPNE consiste no rearranjo da posição dos cabos ou no aumento da quantidade de subcondutores por fase. O objetivo é promover uma equalização do campo elétrico superficial entre os subcondutores de cada fase, a partir da análise da sensibilidade deste campo em relação à variação de parâmetros físicos e geométricos dos condutores da LT (PAGANOTTI, 2012). Ao mesmo tempo é necessário que a linha se enquadre dentro nos requisitos de segurança impostos pelas leis e normas locais, principalmente em relação à intensidade do campo eletromagnético ao nível do solo. Assim, o LPNE é um problema relacionado com dois objetivos distintos, classificado como multiobjetivo, que busca encontrar um ponto de equilíbrio entre a alta capacidade de transmissão e o baixo campo eletromagnético ao nível do solo. Altera-se as coordenadas horizontais e verticais dos feixes de condutores e disso resulta em configurações geométricas assimétricas.

ARRUDA et al. (2020) explicam que dois fatores principais impactam na maximização do SIL: a aproximação entre as fases e a expansão dos feixes de condutores, sendo estas ações as principais alterações necessárias para a obtenção das LPNE's. A aproximação entre as fases

está diretamente ligada à estrutura da torre e portanto é melhor implementada na fase de projeto da linha pois não há a necessidade de alterações estruturais. Já o outro método, pode ser implantando em linhas já existentes.

Um exemplo concreto da eficiência do método é de uma linha de 500 kV construída na China, onde aplicando as técnicas de aumentar o número de sub condutores, aproximar as fases e aumentar o espaço entre os feixe de sub condutores, alcançou uma capacidade de transmissão de 1328 MW, uma quantidade 1,38 vezes maior, ou seja 38 % a mais, que uma LT convencional de feixes horizontais, e com um espaçamento entre fases de 6,7 m enquanto na convencional é de 12,3 m (GHASSEMI, 2020). Esse exemplo pode ser visto na imagem 2.5 onde a figura [a] representa a LT convencional e as figuras [b] e [c] são referentes à LPNE chinesa.

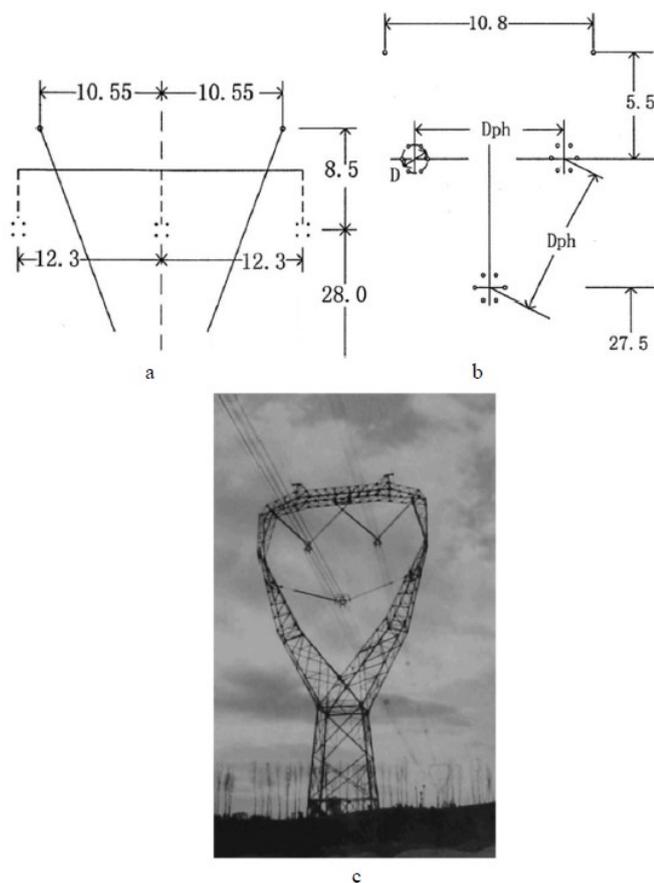


Figura 2.5: Exemplo de LT convencional(a) e LPNEs chinesas (b e c) - GHASSEMI (2020)

Além disso, a maturidade alcançada no mercado de material de isoladores de postes, de linha e cruzetas, permitiu a combinação de materiais com baixo peso e alta resistência mecânica. Isso tem contribuído para dar mais liberdade aos projetistas de linhas de forma que facilitou a criação de novas LPNEs com a utilização de novas estruturas.(GHASSEMI, 2019)

Uma vez conhecida a metodologia LPNE necessita-se entender a relação da geometria de cada uma das fase na determinação da capacidade de transmissão e dos campos elétricos

envolvidos, abordados no capítulo a seguir.

## Metodologia

Neste capítulo são abordados os equacionamentos e a teoria necessária para o cálculo da carga elétrica, obtenção da potência característica e do campo elétrico ao nível do solo e superficial de linhas de transmissão aéreas trifásicas.

### 3.1 Cálculo da Carga Elétrica nos Condutores

Os condutores não estão presentes em um ambiente composto apenas por ar, também existe o solo que influencia no sistema físico resultante e pode ser, para a LT, considerado como um plano infinito condutor elétrico perfeito (CEP) (SANTOS, 2017). Desse modo, para facilitar os cálculos utiliza-se o método das imagens, que estabelece que uma dada configuração de carga próxima a um plano infinito condutor elétrico perfeito pode ser substituída pela própria configuração de carga, por sua imagem e por uma superfície equipotencial no lugar do plano condutor (SHADIKU, 2000). Essa carga se encontra a uma mesma distância  $h$  do solo, como pode ser visto na figura 3.1

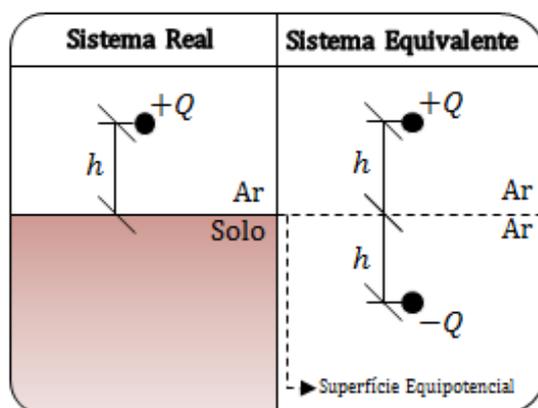


Figura 3.1: Sistema real (lado esquerdo) e sistema equivalente (lado direito) proposto pelo Método das Imagens para uma carga pontiforme positiva. - SANTOS (2017)

Para o cálculo da carga elétrica nos condutores utiliza-se a matriz dos coeficientes potenciais de Maxwell. A tensão aplicada em cada uma das fases da LT é considerada na forma fasorial, sendo equivalente a  $V_{linha}/\sqrt{3}$  e pode ser escrita como uma decomposição entre suas partes reais e imaginárias (SADIKU, 2004):

$$V = V_r + jV_i \quad (3.1)$$

Os coeficientes potenciais dependem diretamente das características geométricas da linha, ou seja da posição dos cabos no espaço. A relação desses itens com a carga elétrica é dada segundo SADIKU (2004) como:

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{aa} & P_{ab} & P_{ac} \\ P_{ba} & P_{bb} & P_{bc} \\ P_{ca} & P_{cb} & P_{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} q_a \\ q_b \\ q_c \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

onde os elementos  $P_{ij}$  da matriz dos coeficientes potenciais de Maxwell são dados, segundo PAGANOTTI (2012) por:

$$P_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \cdot \ln \left( \frac{H_{ij}}{D_{ij}} \right) [m/F] \quad (3.3)$$

Na equação 3.3, para os casos em que  $i = j$ ,  $H_{ij}$  é duas vezes a distância entre o condutor  $i$  e a sua imagem e  $D_{ij}$  é o raio do condutor, já para os casos onde  $i \neq j$ ,  $D_{ij}$  é a distância entre os condutores  $i$  e  $j$  e  $H_{ij}$  é a distância entre o condutor  $i$  e a imagem do  $j$ . (PAGANOTTI, 2012)

Partindo da equação 3.2 e multiplicando ambos os lados por  $[P]^{-1}$  obtém-se a equação:

$$[Q] = [P]^{-1}[V] \quad (3.4)$$

Onde  $[Q]$  é o vetor densidade de carga,  $[P]$  é a matriz dos coeficientes potenciais de Maxwell e  $[V]$  é o vetor de tensões.

É possível, ao analisar a equação 3.4 e a definição de capacitância vista a seguir na equação 3.5 que a capacitância de sequência positiva é equivalente ao inverso da matriz  $P$ .

$$q = CV \quad (3.5)$$

Tanto a carga quanto a tensão são grandezas de natureza complexas, dessa forma é necessário calculá-las separadamente, parte real e imaginária, como pode ser visto nas equações 3.6 e 3.7 a seguir

$$[Q_r] = [P]^{-1}[V_r] \quad (3.6)$$

$$[Q_j] = [P]^{-1}[V_j] \quad (3.7)$$

de modo que:

$$[Q] = [Q_r] + j[Q_j] \quad (3.8)$$

$Q_r$  e  $Q_j$  são, respectivamente, a parcela real e imaginária da carga elétrica. Por fim resolvendo o sistema linear dado por 3.2 é possível encontrar a carga elétrica a partir somente de características geométricas da LT e da tensão trifásica equilibrada aplicada.

Este trabalho utiliza todas as variáveis considerando um sistema de sequência positiva, ou seja, um sistema com tensões de fases de igual magnitude, defasadas de  $120^\circ$  e que giram no sentido anti-horário com uma frequência fixa em regime permanente senoidal em 60 Hz (EPRI, 2005). Dessa forma teremos uma carga elétrica em cada uma das fases, relacionadas a tensão de cada fase (tensão  $V_a$ ,  $V_b$ ,  $V_c$ ), com componentes reais e imaginárias, representado pela figura abaixo (3.2).

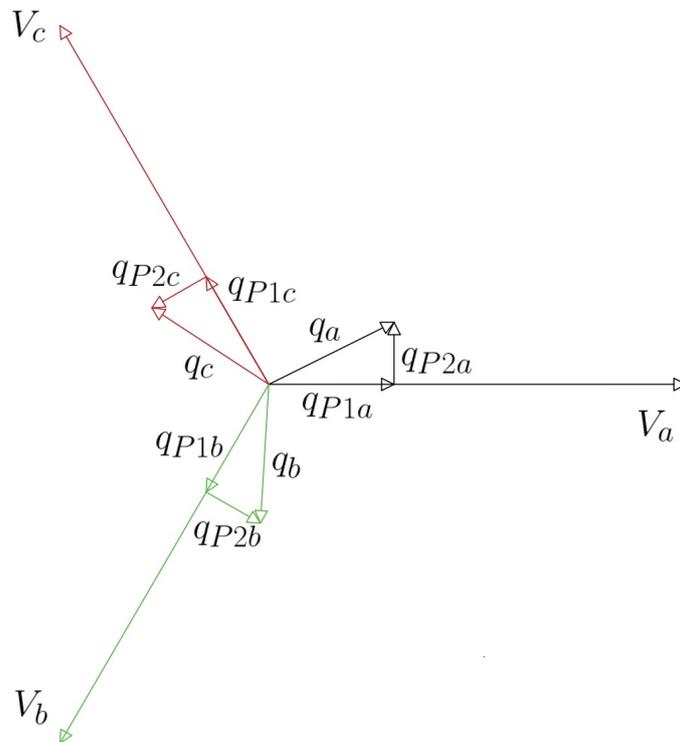


Figura 3.2: Diagrama fasorial das tensões e cargas de um sistema trifásico balanceado. - SANTOS (2017)

Pela Figura 3.2 afirma-se que para um sistema balanceado a carga  $q_j$  do subcondutor  $j$  da fase  $f$  se relaciona com as suas respectivas projeções  $P1$  e  $P2$  da seguinte forma (SANTOS, 2017):

$$q_{p1j} + jq_{p2j} = q_j \frac{V_f^*}{|V_f|} \quad (3.9)$$

Onde  $V_f$  é a tensão da fase  $f$ , e  $V_f^*$  é seu conjugado.

Considerando que a carga total das projeções na fase  $f$  é dada pelo somatório das projeções das cargas de cada subcondutor nessa mesma fase (SANTOS, 2017) percebe-se que:

$$Q_{p1f} + jQ_{p2f} = \sum_{j \in f} q_{p1j} + jq_{p2j} \quad (3.10)$$

Uma vez que o sistema considerado é balanceado, tem-se que a carga de sequência positiva da linha é dada pela média da soma das projeções (SANTOS, 2017), desconsiderando-se a contribuição da parte imaginária, uma vez que são perpendiculares ao fasor de tensão da fase considerada, das cargas obtidas, como pode ser visto na equação a seguir:

$$q_1 = \frac{\sum_{f=1}^{n_f} Q_{rf}}{n_f} \quad (3.11)$$

onde na equação (3.11)  $Q_{rf}$  é a componente real da carga elétrica em fase com a fase  $f$  e  $n_f$  é o número de fases, que neste trabalho será 3 por se tratar de sistemas trifásicos.

Após o equacionamento da carga elétrica e da carga elétrica de sequência positiva, são discutidos na próxima seção como calcular a potência característica de sequência positiva da linha.

## 3.2 Cálculo da Potência Característica de Sequência Positiva

A potência característica é uma medida da capacidade da linha de transmitir energia, e é o principal objeto de interesse desse trabalho no qual busca-se uma otimização geométrica dos feixes de condutores para a sua maximização.

A potência característica da linha também pode ser chamada de SIL (*Surge Impedance Loading*) [MW] expressa a potência transmitida pela LT na condição de equilíbrio entre as potências reativas gerada e consumida pela linha (PAGANOTTI, 2012). Na literatura encontra-se a seguinte definição para a potência característica SANTOS (2017):

$$P_c = \frac{V^2}{Z_c} \quad (3.12)$$

Nessa equação  $V$  representa a tensão de linha, e  $Z_c$  a impedância característica, que é definida como a razão entre a tensão de linha e a corrente da linha (EPRI, 2005). Para essa representação no entanto não há variação de potência reativa ao longo da linha (SANTOS, 2017), portanto será utilizado uma técnica de cálculo do SIL por sequência positiva, que varia, com a carga elétrica da sequência positiva ( $q_1$ ), com a velocidade de fase ( $s_1$ ), com o valor de tensão de fase ( $V_1$ ) e com o número de fases no sistema ( $n_f$ ).

A velocidade de fase do sistema, expressa a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas durante a transmissão de energia pelos cabos condutores e essa está relacionada com as perdas indutivas e capacitivas da linha e pode ser calculada por meio da equação (PAGANOTTI, 2012) 3.13:

$$s_1 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} \quad (3.13)$$

Onde  $L_1$  e  $C_1$  são respectivamente a indutância da linha e a capacitância, ambas de sequência positiva e considerando o solo com condutividade tendendo ao infinito (sendo um condutor elétrico perfeito(CEP)). Pode-se utilizar as seguintes equações para determinar os parâmetros de sequência positiva ( $L_1$  e  $C_1$ ) (SERGIO, 1995):

$$L_1 = \frac{\mu}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left( \frac{DMG}{RMG'} \cdot \frac{HMG}{HMG'} \right) \quad (3.14)$$

$$C_1 = \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon}{\ln \left( \frac{DMG}{RMG'} \cdot \frac{HMG}{HMG'} \right)} \quad (3.15)$$

Por sua vez, os termos  $DMG$  é a média geométrica de todas as distâncias entre condutores de fases distintas;  $RMG$  é a média geométrica de todas as distâncias entre subcondutores de mesma fase, incluindo o raio dos subcondutores;  $RMG'$  é calculado como o  $RMG$ , porém substituindo o raio pelo raio médio (pode ser estimado como 0,78 vezes o raio);  $HMG$  é a média geométrica de todas as distâncias entre os condutores e as imagens de condutores da mesma fase; e  $HMG'$  é a média geométrica de todas as distâncias entre os condutores e as imagens de condutores de outras fases (SERGIO, 1995). Esses termos são vistos com mais detalhes na figura 3.3

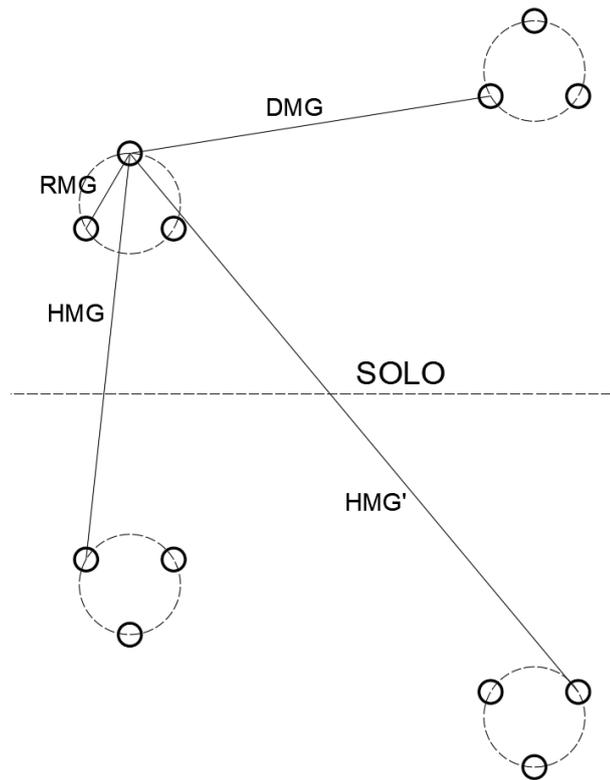


Figura 3.3: Representação dos termos usados para cálculo de  $L_1$  e  $C_1$  - Do Autor (2022)

Ao considerar a perda de energia referente ao efeito do solo nula e desprezar a indutância interna nos condutores da LT ( $RMG' \rightarrow RMG$ ) (SERGIO, 1995) e realizar algumas operações matemáticas observa-se que  $s_1$  é igual à velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas no espaço livre ( $3 \cdot 10^8 m/s$ ):

$$s_1 = \frac{1}{\sqrt{\mu \cdot \varepsilon}} = 3 \cdot 10^8 m/s \quad (3.16)$$

Por fim, ao considerar as linhas sendo trifásicas, com  $N_f = 3$ , e sabendo a tensão aplicada nelas, em conjunto com o equacionamento de  $s_1$  e  $q_1$ , mostrados anteriormente é possível calcular o valor da potência característica de sequência positiva, ou SIL, da LT por meio da aproximação dada por (SERGIO, 1995) 3.17

$$P_c = n_f \cdot V_1 \cdot s_1 \cdot q_1 \quad (3.17)$$

Uma vez determinado o SIL que consiste no parâmetro da LT a ser melhorado por este trabalho, necessita-se levar em consideração os campos elétricos envolvidos na transmissão de energia pela LT.

### 3.3 Cálculo do Campo Elétrico ao Nível do Solo

Nesta sessão é descrito a formulação matemática para a obtenção do campo elétrico ao nível do solo de uma linha de transmissão aérea de energia. Para isso são necessárias três variáveis, o valor de carga da linha, a distância entre a carga e o ponto analisado e da característica do meio elétrico em que eles estão inseridos. Para o cálculo na LT são considerados ainda que o condutor é perfeitamente cilíndrico, possui um comprimento infinito e é composto por cargas positivas uniformemente espalhadas por sua extensão (SANTOS, 2017) dessa forma não é necessário considerar a influência das pontas. Pela uniformidade das cargas, podemos considerar a densidade de cargas ( $\rho l$ ) sendo a carga total ( $Q$ ) dividida pelo comprimento do vão ( $l$ ). Para o cálculo do campo são considerados também o diâmetro médio dos condutores, ou seja um condutor que tenha a mesma carga que o feixe substituído quando aplicada a mesma tensão, e ainda, tenha a mesma capacitância em relação ao solo. Ele pode ser calculado como (EPRI, 2005):

$$d_{eq} = d_b \cdot \sqrt[n]{\frac{nd}{d_b}} \quad (3.18)$$

e

$$d_b = \frac{s}{\sin(\pi/n)} \quad (3.19)$$

Onde,  $d_b$  é o diâmetro do feixe;  $n$  é o número de subcondutores por fase;  $d$  é o diâmetro dos subcondutores; e  $s$  é o espaçamento entre os subcondutores.

A obtenção do campo elétrico é baseado na Lei de Gauss. Para aplicação desta lei é necessário estabelecer uma superfície gaussiana. Esta superfície é definida segundo a informação de que a resultante de campo elétrico é perpendicular aos condutores da LT (PAGANOTTI, 2012). Assim, propõe-se uma superfície cilíndrica que acompanha o condutor e possui a mesma distância ( $\rho$ ) que o ponto a ser calculado como pode ser visto na figura 3.4.

Em seguida considerando  $\Psi$  como a integral da densidade de fluxo e a Lei de Gauss aplicada a uma superfície fechada obtém-se a relação (ALMEIDA, 2020):

$$\Psi = Q_{encerrada} = \oint \vec{D} \cdot \vec{d}_s \quad (3.20)$$

A Lei de Gauss ainda determina que para casos onde a gaussiana é simétrica as densidades de fluxo tangenciais à ela são iguais a 0, sendo necessário o cálculo somente na superfície lateral. Para a superfície criada anteriormente, após realizar uma conversão para coordenadas cilíndricas é obtido que (ALMEIDA, 2020):

$$Q_{encerrada} = \oint \vec{D} \cdot \vec{d}_s = \int_0^l \int_0^{2\pi} D \rho d_\phi dz = D \rho 2\pi l \quad (3.21)$$

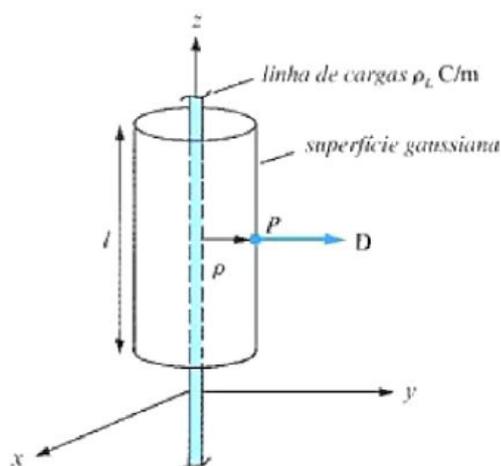


Figura 3.4: Superfície Gaussiana em torno de uma linha de cargas - ALMEIDA (2020)

em seguida ao isolar  $D$  obtém-se (ALMEIDA, 2020):

$$\vec{D} = \frac{\rho l}{\rho 2\pi} \vec{a}_\rho \quad (3.22)$$

Considerando que o campo vetorial  $\vec{E}$  se relaciona com a densidade de fluxo elétrico  $\vec{D}$  por (ALMEIDA, 2020):

$$\vec{E} = \frac{\vec{D}}{\epsilon_0} \quad (3.23)$$

sendo  $\epsilon_0$  a constante de permissividade do ar ( $8,854 \cdot 10^{-12} [F/m]$ ) (EPRI, 2005). Portanto, conclui-se:

$$\vec{E} = \frac{\rho l}{\rho 2\pi \epsilon_0} \vec{a}_\rho \quad (3.24)$$

Com a equação 3.24 é possível encontrar o campo elétrico a qualquer distância  $\rho$  de um condutor, utilizando variáveis conhecidas como, a distância até o condutor e a carga total do condutor. Porém para determinar o campo ao nível do solo, é necessário considerar a influência do solo e para isso, será utilizado o método das imagens. Para utiliza-lo é necessário considerar a terra como um condutor elétrico perfeito (CEP). Isso implica em considerar campo elétrico nulo em seu interior e que ele se comporte como uma superfície equipotencial, ou seja, não há diferença de potencial entre dois pontos sobre este condutor (SADIKU, 2004). Dessa forma é possível tratar a interferência causada pelo solo como uma carga de magnitude inversa e espelhada em relação à linha de fronteira entre os dois meios da carga original, isso pode ser visto na figura 3.1.

Outra consideração a ser feita é de que o campo elétrico ao nível do solo é medido a uma altura fixa de 1 metro e ele é determinado para toda uma faixa de servidão, porém a catenária

não é considerada e para o cálculo do campo é considerado um ponto intermediário onde sua altura é a altura máxima menos 1/3 da flecha. As figuras 3.5 e 3.6 mostram os pontos analisados e o corte transversal por meio dos quais são calculados os campos.

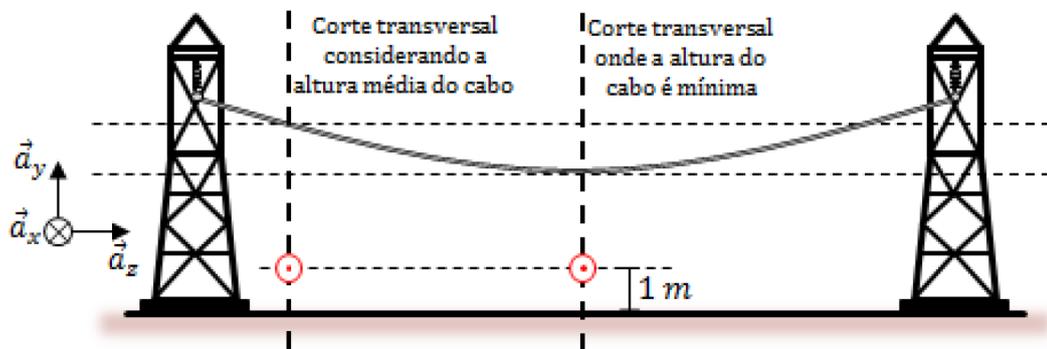


Figura 3.5: Visão lateral dos cortes transversais.- SANTOS (2017)

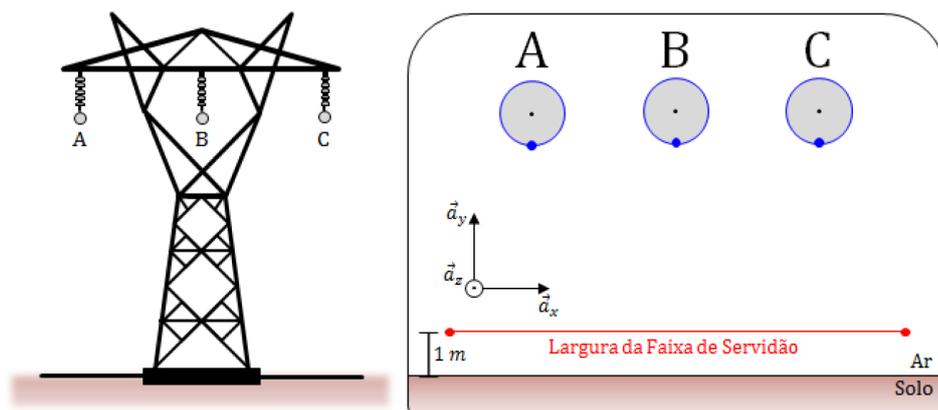


Figura 3.6: Visão frontal dos cortes transversais. - SANTOS (2017)

Para uma LT, em especial as abordadas neste trabalho, que possuem 3 fases e mais de um condutor por fase, caso que pode ser observado na figura 3.7

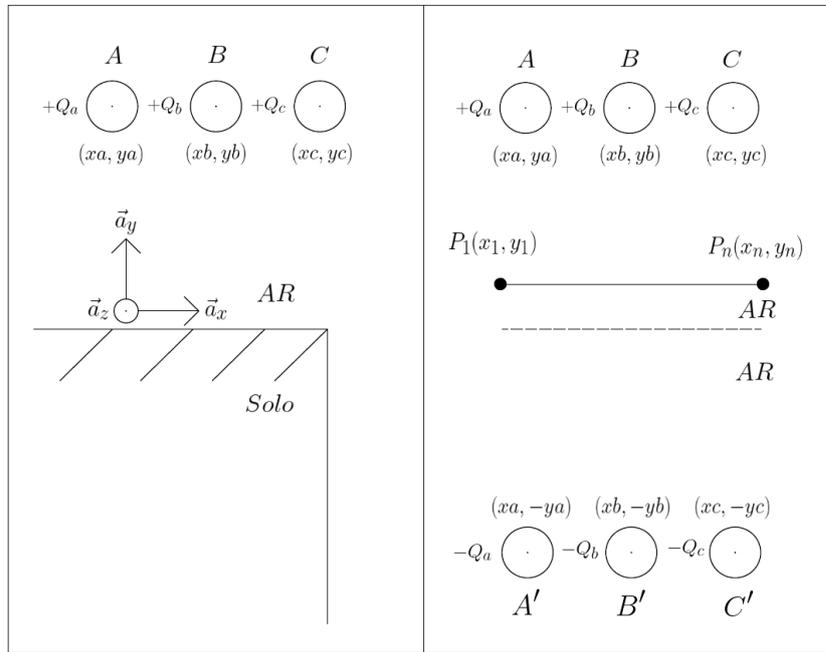


Figura 3.7: Sistema Físico Trifásico Real Equivalente - PAGANOTTI (2012)

Aplica-se o princípio da superposição ao sistema apresentado em 3.7, e o campo elétrico resultante passa a ser um somatório das contribuições de cada uma das cargas e de suas imagens. Neste caso os pontos de interesse  $P_n$  são posicionados ao longo de uma faixa que vai desde a localização do condutor mais a esquerda até a localização do condutor mais a direita. A expressão para o campo elétrico para cada um dos pontos de interesse  $P_n$  é dada por:

$$\vec{E}_p = \sum_{i=a}^c \frac{Q_i}{2\pi\epsilon_0} \left( \frac{(x_p - x_i)\vec{a}_x + (y_p - y_i)\vec{a}_y}{(x_p - x_i)^2 + (y_p - y_i)^2} - \frac{(x_p - x_i)\vec{a}_x + (y_p + y_i)\vec{a}_y}{(x_p - x_i)^2 + (y_p + y_i)^2} \right) \quad (3.25)$$

Na equação anterior 3.25  $x_p$  e  $y_p$  representam as coordenadas geométricas do ponto de interesse analisado,  $x_i$  e  $y_i$  representam as coordenadas geométricas do subcondutor  $i$  e  $Q_i$  é a carga da linha  $i$ , os termos mais à esquerda são a contribuição do condutor real, e os termos à direita referentes à imagem do condutor e os vetores  $\vec{a}_x$  e  $\vec{a}_y$  são respectivamente os que determinam as contribuições em  $x$  e em  $y$ . Em seguida é calculado o campo elétrico resultante, para isso, são consideradas as contribuições na direção  $\vec{a}_x$  e  $\vec{a}_y$  das partes reais e imaginárias separadamente da seguinte forma PAGANOTTI (2012):

$$\vec{E}_{rms} = \sqrt{E_{xReal}^2 + E_{xImag}^2 + E_{yReal}^2 + E_{yImag}^2} \quad (3.26)$$

### 3.4 Campo Elétrico na Superfície dos Condutores

O cálculo do campo elétrico superficial é de suma importância para a construção de uma LT, uma vez que é o fator determinante para ocorrência do efeito Corona (EPRI, 2005). Para o cálculo dessa grandeza, será utilizado o Método das Imagens Sucessivas, que consiste em um sistema de condutores cilíndricos paralelos, de raios finitos e com níveis de tensão conhecidos (PAGANOTTI, 2012). Essa metodologia é similar à apresentada para o cálculo do campo elétrico ao nível do solo, uma vez que utiliza da inserção de condutores imagem refletidos em relação à linha de nível do solo e com carga inversa como representação do efeito do solo. Inicialmente defini-se todos os condutores com uma carga interna  $+Q$  centrada. Em seguida, para cada condutor, calcula-se o efeito das cargas dos outros cabos sobre ele, que irá gerar uma carga de polarização inversa a uma distância  $\delta_i$ . Por fim, caso a carga total do condutor seja diferente da adotada inicialmente inseri cargas no centro (SANTOS, 2017). A aplicação dessa técnica é vista na figura 3.8

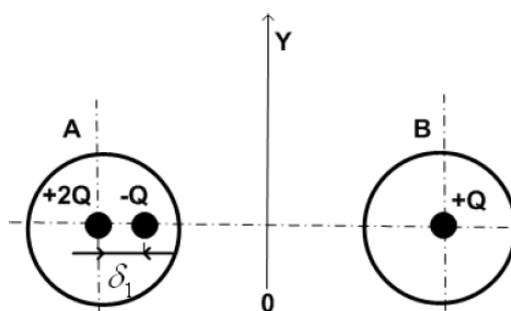


Figura 3.8: Exemplo de utilização do Método das Imagens Sucessivas - PAGANOTTI (2012)

Onde  $\delta_i = r^2/s$ ,  $r$  sendo o raio do condutor e  $s$  a distância entre os centros dos condutores (PAGANOTTI, 2012). Aplicando o princípio da superposição e levando-se em conta o efeito do solo, o método de imagens sucessivas resulta no sistema mostrado na figura 3.9.

Porém, quando os condutores estão muito próximos, isso é, quando  $s/r < 10$  o procedimento utilizado a cima se torna insuficiente. Nesse caso é utilizado o Método das Imagens Sucessivas de ordem superior: são posicionadas cargas imagens em sequência até que as condições de contorno impostas pelas equipotenciais sejam atendidas. Considera-se novamente o sistema apresentado na figura 3.8, mas desta vez são introduzidas duas cargas lineares  $+2Q$  e  $-2Q$  no condutor  $A$  além disso as cargas imagens no condutor  $B$  são posicionadas da maneira como apresentada na figura 3.10. Este processo descrito acima se repete até que se alcance uma distribuição de cargas satisfatória (SANTOS, 2017)

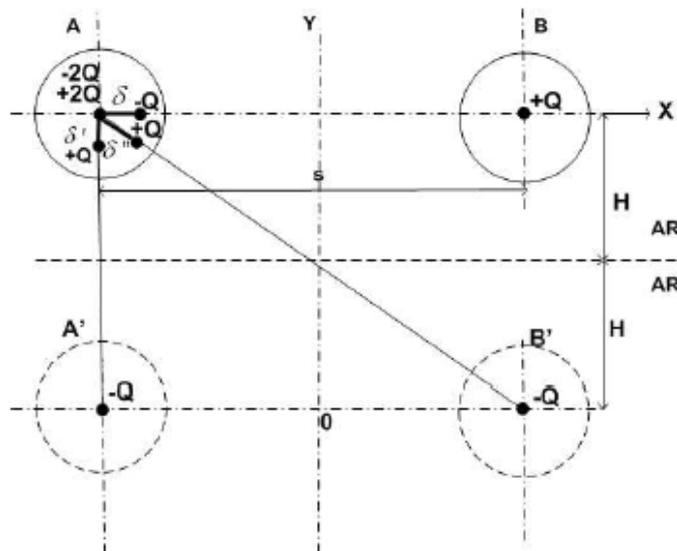


Figura 3.9: Efeito das Cargas Imagem no Condutor - PAGANOTTI (2012)

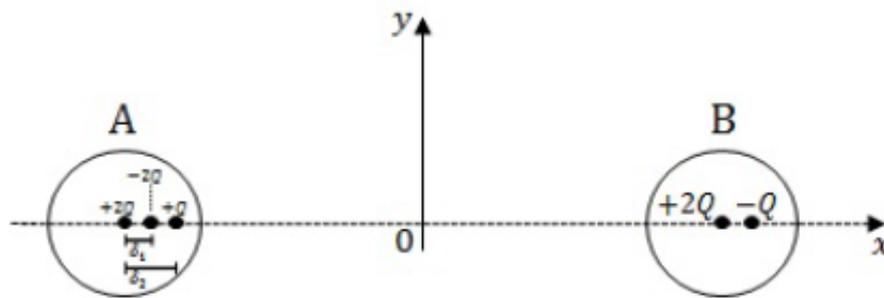


Figura 3.10: Representação das cargas imagens no condutor A (segundo estágio ou segunda ordem) - SANTOS (2017)

O valor da distância entre as cargas imagens sucessivas e o centro do condutor é obtido através da equação 3.27, sendo  $K$  a ordem do Método das Imagens Sucessivas (SARMA; JANISCHEWSKYJ, 1969).

$$\delta_i = \frac{r^2}{s - \delta_{i-1}}, \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (3.27)$$

A figura 3.11 representa a aplicação do método MIS de 4<sup>ª</sup> ordem (SANTOS, 2017).

Dessa forma, para uma LT de  $n$  cabos sem considerar o efeito do solo, o número de cargas imagens em cada condutor será igual a  $n^k$ . E considerando o efeito do solo este valor será igual a  $(2n - 1)k$ . (PAGANOTTI, 2012)

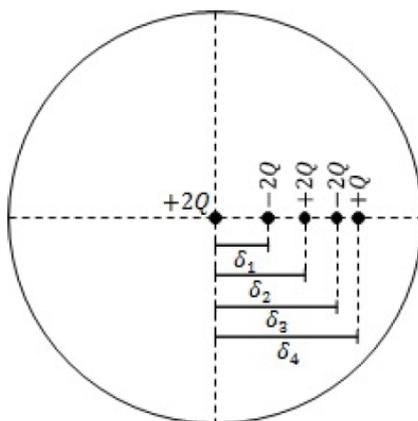


Figura 3.11: Representação das cargas imagens par ao caso de 4<sup>a</sup> ordem - SANTOS (2017)

Para feixe de dois ou mais condutores, o número de imagens sucessivas necessárias para representar os condutores adequadamente depende da sua proximidade relativa. Se a distância entre quaisquer dois condutores do sistema é grande, o processo de imagens sucessivas de primeira ordem é suficiente. Já para condutores com elevada proximidade, pode ser necessário prosseguir com o processo de imagens para estágios superiores. Na figura 3.12 é possível observar o número de ordens necessárias para se alcançar a aproximação correta da distribuição da carga em função da distância entre os centros dos cabos condutores e dos raios envolvidos.

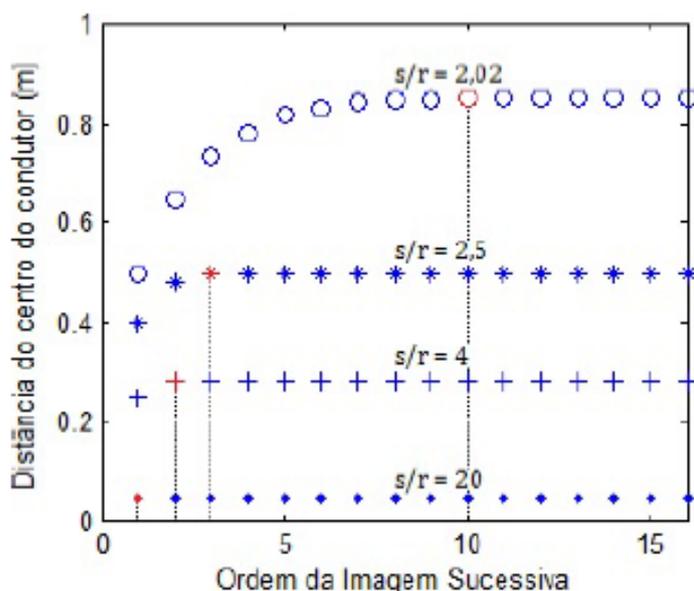


Figura 3.12: Relação entre as ordens de imagem sucessivas - (SARMA; JANISCHEWSKYJ, 1969)

Analisando a figura 3.12 observa-se que para valores  $s/r > 10$  uma única ordem é suficiente para se alcançar resultados satisfatórios no cálculo do campo elétrico superficial (PAGANOTTI, 2012) e consiste na aproximação utilizada nesse trabalho

De acordo com SANTOS (2017), partindo da distribuição de cargas obtida e aplicando o princípio da superposição, o campo elétrico na superfície do condutor é dado pela equação 3.29

$$\vec{E} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^m \frac{\rho_{li}}{r_i^2} \vec{r}_i \quad (3.28)$$

Sendo,  $m$  o número total de cargas imagem no sistema,  $\rho_{li}$  a densidade de carga elétrica das cargas imagem,  $r_i$  a distância das cargas imagens ao ponto de avaliação e  $\vec{r}_i$  o vetor de módulo  $r_i$  que aponta da carga imagem  $i$  ao ponto avaliado. Após a definição do campo elétrico superficial nos condutores, é importante a definição e cálculo do campo elétrico superficial crítico a partir do qual tem-se o efeito corona.

### 3.5 Determinação do Campo Elétrico Crítico

Esse valor determina os limites superiores do campo elétrico superficial para a ocorrência do efeito Corona e varia com o meio e com características da LT. Sabe-se que o gradiente crítico disruptivo do ar atmosférico é da ordem de  $30,5 \text{ kV/cm}$ , em atmosfera padrão de  $20^\circ\text{C}$  e pressão barométrica de  $760 \text{ mmHg}$  (PAGANOTTI, 2012). O efeito Corona se dá quando o campo elétrico superficial é tão intenso que rompe a rigidez dielétrica do ar e cria arcos elétricos, reduzindo a eficiência da linha por meio do calor, luz, energia acústica e radiações eletromagnéticas. A energia liberada pelo efeito interfere diretamente em transmissões de rádio e TV, por meio dos campos eletromagnéticos; e interfere diretamente na qualidade de vida dos indivíduos que residem nas proximidades do sistema de transmissão por meio dos ruídos causados pela expansão do ar ao se aquecer rapidamente (PAGANOTTI, 2012).

Dessa forma, deve-se garantir que o campo elétrico na superfície dos condutores seja inferior ao valor do gradiente crítico visual ou seja:

$$E_{sup} < E_{CRV} \quad (3.29)$$

Para o cálculo do valor do campo crítico, existem diversas formulações, como a usada por PAGANOTTI (2012); EPRI (2005) mostrada a seguir 3.30 e 3.31.

$$E_{CRVmax} = 30,5 \left( 1 + \frac{0,301}{\sqrt{r}} \right) \quad (3.30)$$

considerando os valores máximos de tensão da linha e

$$E_{CRVrms} = 21,6 \left( 1 + \frac{0,301}{\sqrt{r}} \right) \quad (3.31)$$

considerando os valores de tensão rms, tensão alternada equivalente a uma tensão contínua para um circuito cuja potência média gasta é a mesma. Porém novas abordagens surgiram com o tempo, uma muito importante foi a identificada por SARMIENTO (2016) que relaciona

o campo elétrico superficial, além do raio dos condutores, com características como altura da LT em relação ao nível do mar, temperatura de operação além de um fator de serviço. Essa pode ser vista nas equações 3.32 e 3.33 (SARMIENTO, 2016).

$$E_{CRVMAX} = 18,11 \cdot f_s \cdot \delta_{ik} \left(1 + \frac{0,54187}{\sqrt{r \cdot \delta_{ik}}}\right) \quad (3.32)$$

Onde  $r$  é o raio do condutor em centímetros;  $f_s$  é um fator de serviço que pode ser identificado na tabela 3.1 com base nas características de operação da linha; e  $\delta_{ik}$  é definido pela equação abaixo:

$$\delta_{ik} = 0,386 \frac{750 - 0,086 \cdot h_{mar}}{273 + T_{amb}} \quad (3.33)$$

Tabela 3.1: Determinação do parâmetro  $f_s$  - (SARMIENTO, 2016)

| Condições superficiais dos condutores                   | Fator de superfície ( $f_s$ ) |
|---|-------------------------------|
| Cilindros, polidos e secos                              | 1                             |
| Novos, secos, limpos e sem abrasão                      | 0,92                          |
| Cabos de cobre expostos ao tempo em atmosfera limpa     | 0,82                          |
| Cabos de cobre expostos ao tempo em atmosfera agressiva | 0,72                          |
| Novos e secos com superfícies decorrentes               | 0,53 - 0,73                   |
| Molhados, novos ou usados                               | 0,16 - 0,25                   |

Em que  $h_{mar}[m]$  é a altura do condutor em relação ao nível do mar, e  $T_{amb} [^{\circ} C]$  é a temperatura ambiente de operação da linha. Percebe-se que essa nova metodologia de cálculo do campo elétrico superficial é muito mais completa e robusta que a que vinha sendo utilizada, e portanto essa última será utilizada neste trabalho.

Até o momento, é possível perceber que com as características geométricas, elétricas e do meio da LT já é possível calcular: a potência característica da linha; o campo elétrico ao nível do solo; o campo elétrico superficial assim como os limites deste para a ocorrência do efeito Corona; e determinar a influência do posicionamento dos feixes de condutores nestas grandezas de interesse. Em sequência são apresentadas as técnicas de otimização para que seja possível melhorar a configuração atual levando em consideração os limites considerados.

## 3.6 Ferramenta de Otimização

Inicialmente faz-se necessário a determinação do que é a otimização, quais as suas características para os métodos escolhidos serem justificados. O processo de otimização é composto por um conjunto de métodos capazes de determinar as melhores configurações possíveis para a construção ou o funcionamento de sistemas de interesse (TAKAHASHI, 2007). Dessa forma inicialmente deve-se traçar qual a função objetivo, ou seja qual a grandeza que pretende-se otimizar e a forma com a qual ela se relaciona com as outras variáveis do problema. Convenciona-

se sempre formular o problema de otimização como sendo um problema de minimização. Nos casos em que se deseja maximizar uma determinada grandeza, basta que se minimize a função que se deseja maximizar multiplicada por  $-1$  (PAGANOTTI, 2012). A formulação matemática para o problema de otimização é dada por (RAO, 2019)

$$\text{Encontre } x = \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{Bmatrix} \text{ que minimiza } f(x)$$

sujeito às restrições:

$$\begin{aligned} g_j &\leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, m \\ l_j &\leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, p \end{aligned}$$

Sendo  $x$  um vetor  $n$ -dimensional chamado vetor de projeto,  $f(x)$  é denominado função objetivo, e  $g_j(x)$  e  $l_j(x)$  são conhecidos como restrições de desigualdade e igualdade, respectivamente. O número de variáveis  $n$  e o número de restrições  $m$  e/ou  $p$  não precisam estar relacionadas de alguma forma (RAO, 2019).

Em sequência é necessário impor limites e condições para as variáveis, de forma que a solução encontrada seja factível e atenda todos os parâmetros necessários para execução do resultado. Tem-se como as principais limitações para a maximização do SIL o campo elétrico superficial, que não deve exceder os valores críticos; o campo elétrico máximo ao nível do solo, que é imposto por normas e leis nacionais; a distância mínima entre os condutores e entre as fases; os limites horizontais para construção da linha, entre outros.

Em sequência determina-se o método de otimização a ser utilizado. O problema de otimização LNPE possui uma modelagem não linear e restrita, o que torna difícil a definição de funções continuamente diferenciáveis e, além disso, nem a otimização clássica nem heurísticas podem garantir que a solução ótima global será encontrada (SARMIENTO, 2016).

Com o objetivo de otimizar essas correlações entre parâmetros elétricos e mecânicos de LTs, especificadas neste trabalho, são aplicadas estratégias estocásticas mono e multiobjetivo baseadas no método de Evolução Diferencial (ED), o que apresenta bons resultados para otimização de LTs (PAGANOTTI, 2012; SARMIENTO, 2016; RESENDE, 2019).

### 3.6.1 Algoritmo de Evolução Diferencial

O Algoritmo de Evolução Diferencial é um algoritmo de otimização de busca paralela, genética, aleatória, introduzida por (STORN; PRICE, 1997). Cada solução é representada por um indivíduo. No início, uma população inicial de indivíduos é criada aleatoriamente na região viável. Em seguida, eles são submetidos a operadores sequenciais: mutação, cruzamento e seleção. O processo de otimização ocorre até que algum critério de parada seja satisfeito

(por exemplo: número máximo de gerações) (PAGANOTTI, 2012) que pode ser observado na figura 3.13. Neste trabalho, cada indivíduo representa uma solução, uma possibilidade para as coordenadas  $x$  e  $y$  de posicionamento dos condutores.

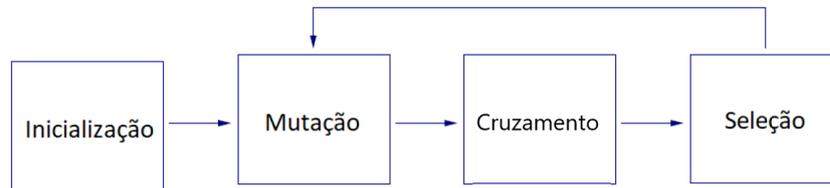


Figura 3.13: Diagrama do fluxo de opera es no DE - Do Autor (2022)

### Muta o

A muta o   a primeira fase, nela são gerados novos indivíduos. O processo de gera o desses indivíduos   bastante estudado e serão comparados algumas metodologias propostas por SILVA OLIVEIRA; SARAMAGO (2005); GAO (2010); STORN; PRICE (1997). O primeiro caso   o proposto por STORN; PRICE (1997) e nele temos que o próximo candidato a indivíduo da gera o   dado por 3.34

$$V^{(q+1)} = X_{\alpha}^q + F(X_{\beta}^q - X_{\gamma}^q) \quad (3.34)$$

Onde  $X_{\alpha}^q$ ,  $X_{\beta}^q$  e  $X_{\gamma}^q$  são escolhidos aleatoriamente e distintos entre si e representam cada um, um indivíduo da gera o  $q$ ;  $V^{(q+1)}$    um candidato a indivíduo para a gera o  $q + 1$ ;  $F$    uma constante, cujo valor foi definido como 0,9 por STORN; PRICE (1997) na elabora o do método. Um exemplo da aplica o dessa fórmula pode ser vista na figura 3.14

Na figura, tem-se os indivíduos da gera o representados pelos "x"vermelhos e ela mostra o processo de gera o do vetor doador  $V^{(q+1)}$ . Inicialmente seleciona-se 2 indivíduos aleatoriamente, no caso estão representados com  $X_{\beta}^{(q)}$  e  $X_{\gamma}^{(q)}$ . em sequência   gerado um vetor que liga  $\gamma$  em  $\beta$  ao se realizar a subtra o entre os termos. Sequencialmente multiplica-se esse vetor por uma constante  $F$ , representado pela seta preta na figura. Por fim, soma-se esse veto a outro indivíduo escolhido aleatoriamente, neste caso, o  $X_{\alpha}^{(q)}$  e o resultado será um candidato a indivíduo na gera o  $q + 1$ .

O segundo caso   muito parecido com o primeiro, porém, ao invés de se aplicar a muta o em um termo aleatório aplica-se no termo que apresenta o melhor resultado da gera o. Dessa forma tem-se a equa o para a muta o dada por SILVA OLIVEIRA; SARAMAGO (2005)

$$V^{(q+1)} = X_{best}^q + F(X_{\beta}^q - X_{\gamma}^q) \quad (3.35)$$

Onde  $X_{best}^q$    o indivíduo com o melhor resultado da gera o  $q$ .

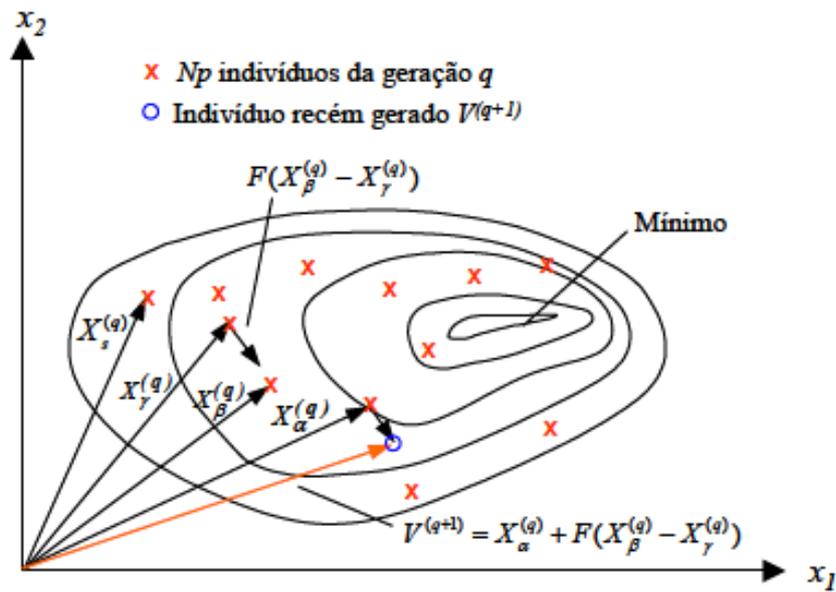


Figura 3.14: Processo de gerar o vetor doador  $V^{(q+1)}$  para uma função objetivo bidimensional - (SILVA OLIVEIRA; SARAMAGO, 2005)

O terceiro e quarto caso, são similares ao primeiro e segundo, porém ao invés de utilizar a diferença entre dois indivíduos aleatórios, utiliza-se quatro indivíduos, para melhorar a diversidade da população (SILVA OLIVEIRA; SARAMAGO, 2005). Dessa forma as fórmulas de mutação para os casos 3 e 4 são respectivamente 3.36 e 3.37 (SILVA OLIVEIRA; SARAMAGO, 2005):

$$V^{(q+1)} = X_{\alpha}^q + F(X_{\beta}^q - X_{\gamma}^q + X_{\sigma}^q - X_{\lambda}^q) \quad (3.36)$$

$$V^{(q+1)} = X_{best}^q + F(X_{\beta}^q - X_{\gamma}^q + X_{\sigma}^q - X_{\lambda}^q) \quad (3.37)$$

O quinto caso propõe a aproximação do indivíduo atual na direção do melhor resultado da geração, somando um distúrbio proporcionado por dois indivíduos aleatórios. Dessa forma a fórmula para o caso 5 pode ser vista a equação 3.38 (SILVA OLIVEIRA; SARAMAGO, 2005)

$$V^{(q+1)} = X_{old}^q + F(X_{best}^q - X_{old}^q + X_{\sigma}^q - X_{\lambda}^q) \quad (3.38)$$

Onde  $X_{old}^q$  é o indivíduo da geração  $q$  sob o qual está sendo realizada a mutação, diferente dos outros métodos o vetor gerador é aplicado no mesmo indivíduo a partir do qual foi gerado.

Por fim, o sexto caso foi proposto por GAO (2010) e consiste na ideia de se utilizar um  $F$  dinâmico que se altere baseado no quão próximo o indivíduo se encontra do melhor valor da geração. Assim, a fórmula proposta foi

$$V^{(q+1)} = X_{\alpha}^q + sF(X_{\beta}^q - X_{\gamma}^q) \quad (3.39)$$

onde

$$sF = \begin{cases} 1 - 0,6 \sqrt[n]{\frac{f(X_{\alpha}^q)}{f(X_{best}^q)}} & \text{se objetivo de maximização} \\ 1 - 0,6 \sqrt[n]{\frac{f(X_{best}^q)}{f(X_{\alpha}^q)}} & \text{se objetivo de minimização} \end{cases} \quad (3.40)$$

Após realizada a mutação é analisado se o resultado se encontra dentro dos limites máximos impostos, isso é, se as coordenadas  $x$  e  $y$  da solução estão dentro dos limites da região de cálculo. Caso negativo, o ponto é realocado para a extremidade da região. Essa manipulação pode ser vista na figura 3.15

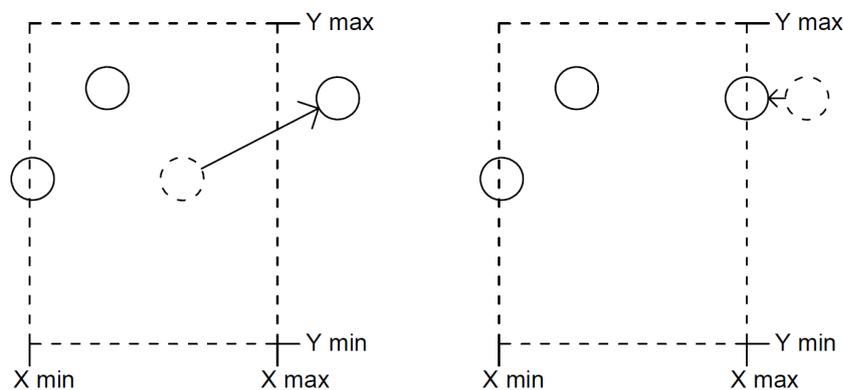


Figura 3.15: Aplicação dos limites de cálculo na mutação - Do Autor (2022)

### Cruzamento

O cruzamento existe para gerar variedade na população, nele determina-se aleatoriamente se a mutação estabelecida na fase de mutação gerará um candidato para a próxima geração ou se será suprimida. Para isso em cada mutação gera-se um valor  $r$  aleatório no intervalo  $[0, 1]$  e compara-se com um fator  $CR$  previamente estabelecido que é a probabilidade da mutação ocorrer. Dessa forma o indivíduo candidato é determinado segundo a seguinte fórmula (STORN; PRICE, 1997)

$$u_i^{(q+1)} = \begin{cases} V_i^{(q+1)}, & \text{se } r_i \leq CR \\ X_i^q, & \text{se } r_i \geq CR \end{cases} \quad (3.41)$$

Onde  $u_i^{(q+1)}$  é o candidato  $i$  da geração  $q + 1$ , e  $V_i^{(q+1)}$  é o resultado da mutação no indivíduo  $X_i^q$  da geração  $q$ .

### Seleção

Por fim tem-se a seleção onde compara-se o resultado obtido dos candidatos com os seus geradores e seleciona-se o melhor resultado de cada comparação para integrar os indivíduos

da próxima geração. Dessa forma:

$$x_{j,Q+1} = \begin{cases} u_{j,Q+1} & \text{se } f(u_{j,G+1}) \leq f(x_{j,Q}) \\ x_{j,Q} & \text{se } f(u_{j,G+1}) > f(x_{j,Q}) \end{cases} \quad j = 1, 2, \dots, N_{ind} \quad (3.42)$$

Onde  $x_{j,Q+1}$  é o indivíduo  $j$  da geração  $Q + 1$ ,  $f(u_{j,G+1})$  é o resultado considerando as penalidades do candidato  $j$  da geração  $G + 1$ ,  $x_{j,Q}$  é o indivíduo  $j$  da geração  $Q$ ,  $f(x_{j,Q})$  é o resultado considerando as penalidades do indivíduo  $j$  da geração  $Q$ , e  $N_{ind}$  é o número de indivíduos por geração.

Uma vez terminado este passo, todo o ciclo de mutação, recombinação e seleção continuam até que o critério de parada determinado pelo usuário seja alcançado. Para o problema atribuído a este trabalho, o algoritmo interrompe somente quando o programa alcançar os valores predefinidos de número de gerações, no caso, o critério adotado é de 100 gerações.

### Restrições do problema

Durante as simulações deve-se considerar as restrições do problema de forma que as soluções sejam factíveis. Para a restrição do campo elétrico ao nível do solo considera-se os limites impostos pela norma ANEEL (5 de maio, 2009) que determina um campo máximo de  $8,33 \text{ kV/m}$ , para o campo elétrico superficial e minimização do efeito Corona utiliza-se um fator de superfícies para superfície molhada, considera-se a LT a nível do mar e com uma temperatura de operação de  $60^\circ \text{ C}$ , assim garante-se que a solução encontrada é robusta mesmo em ambientes mais severos.

Para os limites horizontais e verticais de construção consideram-se valores máximos e mínimos de variação para as variáveis, de modo que todas as soluções estejam dentro dos limites físicos, conforme figura 3.15.

Para o campo elétrico ao nível do solo e os limites de distâncias mínimas e máximas entre os condutores ou fases implementa-se barreiras, isto é, adiciona-se um valor à função de resultado a fim de que ele se torne um resultado pior, para a barreira ser efetiva a ordem de grandeza desse valor adicionado deve ser maior do que a ordem da função comparada, a fim de impedir que o indivíduo apresente uma resposta superior a outro dentro dos limites impostos TAKAHASHI (2007).

Uma vez definida todas as formulações matemáticas, todas as bases teóricas necessárias e toda a metodologia a ser executada, é possível realizar a execução de códigos para o cálculo do campo elétrico superficial, do campo elétrico ao nível do solo, do SII e da execução da rotina de otimização. Assim o próximo capítulo aborda as premissas e resultados desses tópicos.

## Resultados e Discussões

Nesse capítulo são validados os resultados alcançados ao longo do desenvolvimento do trabalho de conclusão de curso, para isso são utilizados casos já conhecidos e adotados por outros pesquisadores para validação das ferramentas desenvolvidas e para a análise da variação dos parâmetros de interesse da LT envolvidos.

### 4.1 Validação do Campo Elétrico Pontual Adotando Diâmetro Equivalente dos Feixes de Condutores

Para esta validação é utilizada uma linha de transmissão trifásica, com 3 subcondutores por fase, tensão de linha de 525 kV, uma configuração de fases na horizontal, com 10 metros de distância entre as fases, 10,6 metros de altura do solo, subcondutores com 3,3 centímetros de diâmetro e separados por 45 centímetros. O campo será calculado a 20 metros da linha de centro e a 2 metros acima do solo. Inicialmente determinou-se um condutor equivalente para o feixe, utilizando a equação 3.18 e é obtido um valor de 30 centímetros para ele. Em seguida é calculado a matriz dos coeficientes potenciais de Maxwell utilizando as distâncias entre os condutores, as imagens e o diâmetro equivalente segundo a equação 3.3, dessa forma é encontrada a matriz  $[P]$  de coeficientes:

$$[P] = \begin{bmatrix} 8,91 & 1,53 & 0,68 \\ 1,53 & 8,91 & 1,53 \\ 0,68 & 1,53 & 8,91 \end{bmatrix} \cdot 10^{10} \quad (4.1)$$

Para o cálculo do vetor de tensão, é considerada a tensão eficaz, com módulos iguais e separadas  $120^\circ$ , e obteve-se  $V_a, V_b$  e  $V_c$ :

$$V_a = \cos(120) \cdot 525k/\sqrt{3} + \sin(120) \cdot 525k/\sqrt{3} = -151,6k + j262,5k \text{ V} \quad (4.2)$$

$$V_b = \cos(0) \cdot 525k/\sqrt{3} + \sin(0) \cdot 525k/\sqrt{3} \cdot i = 303,1k \text{ V} \quad (4.3)$$

$$V_c = \cos(-120) \cdot 525k/\sqrt{3} + \sin(-120) \cdot 525k/\sqrt{3} = -151,6k - j262,5k \text{ V} \quad (4.4)$$

Em sequência multiplica-se o inverso da matriz  $P$  pelas tensões e obtém-se os valores de carga de cada linha  $Q_a$ ,  $Q_b$ ,  $Q_c$ :

$$Q_a = -2,25 \cdot 10^{-6} + j3,19 \cdot 10^{-6} \text{ C/m} \quad (4.5)$$

$$Q_b = 4,18 \cdot 10^{-6} \quad (4.6)$$

$$Q_c = -2,25 \cdot 10^{-6} - j3,19 \cdot 10^{-6} \text{ C/m} \quad (4.7)$$

Em seguida são utilizadas as cargas encontradas para cada fase em conjunto com a geometria de construção da LT e o ponto de interesse na equação 3.25, que resultou no campo  $\vec{E}$ :

$$\vec{E} = (-380,52 - j938,78) \cdot \vec{a}_x + (1749,6 + j4438,2) \cdot \vec{a}_y \quad (4.8)$$

Por fim, aplica-se a equação 3.26 no campo obtido e obtém-se um valor eficaz de campo elétrico equivalente a:

$$E_{RMS} = 4877,0 \text{ V/m} \quad (4.9)$$

Esse valor encontrado é o mesmo valor previamente conhecido para o campo gerado pela LT considerada mostrado por EPRI (2005), validando o modelo proposto. Na sequência será feita a validação do cálculo do campo elétrico a 1 metro acima do solo utilizando as ferramentas computacionais desenvolvidas.

## 4.2 Validação do Campo Elétrico ao Nível do Solo

Uma ferramenta para o cálculo do campo elétrico ao nível do solo foi desenvolvida usando o *Matlab R2018a* (MATLAB, 2012). Para a validação é considerada a LT São Gotardo II - Três Marias, de 345 kV da CEMIG (1988), com dois subcondutores por fase, as características físicas e elétricas consideradas para o cálculo podem ser vistas na Tabela 4.1. A configuração geométrica da LT no ponto intermediário pode ser vista na figura 4.1 e a comparação entre os resultados encontrados neste trabalho e o resultado encontrado por PAGANOTTI (2012) para o campo elétrico é mostrado na figura 4.2.

Tabela 4.1: Características Dimensionais da LT consideradas

| Subcondutor:           | 1        | 2       | 3                      | 4      | 5                       | 6      |
|------------------------|----------|---------|------------------------|--------|-------------------------|--------|
| Posição Horizontal [m] | -10,5930 | -10,364 | -0,1143                | 0,1143 | 10,1360                 | 10,364 |
| Altura [m]             | 14,29    |         |                        |        |                         |        |
| Raio [m]               | 0,0144   |         |                        |        |                         |        |
| Tensão [kV]            | 345      |         | 345 $\angle 120^\circ$ |        | 345 $\angle -120^\circ$ |        |

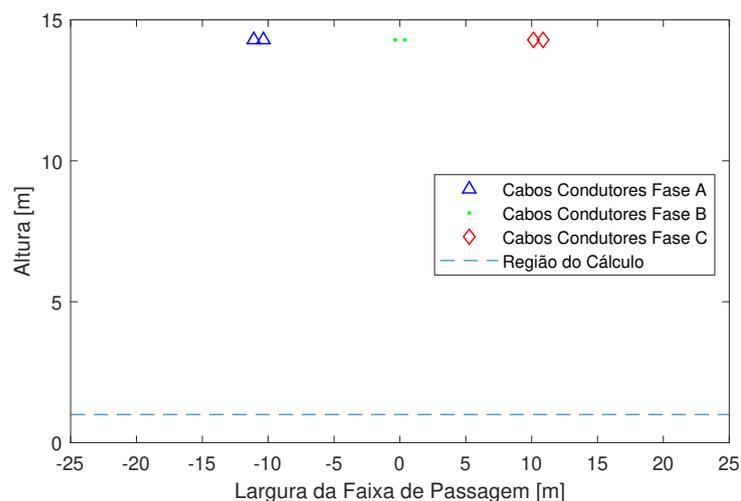


Figura 4.1: Representação da configuração geométrica da LT.

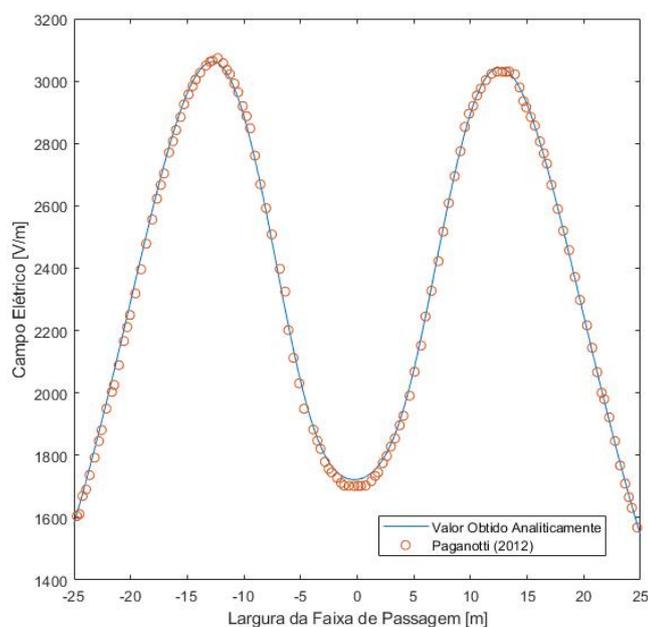


Figura 4.2: Representação comparativa entre o campo elétrico encontrado utilizando a metodologia proposta e o encontrado por PAGANOTTI (2012)

Para a geração da curva simulada são calculados 100 pontos, igualmente distribuídos pelo eixo das abscissas entre -25 e 25 metros de distância do centro da LT e para a de referência é utilizado um software de aquisição de pontos em imagens (*WebPlotDigitizer*<sup>®</sup>) na figura mostrada por PAGANOTTI (2012) em sua dissertação. Desse resultado é possível perceber como as duas curvas são bastante similares e se comportam da mesma maneira, com a maior diferença entre elas sendo um descolamento de 1,23% no mínimo local próximo da origem segundo a equação 4.10, é calculado também o erro quadrático médio (MSE) e o erro de raiz quadrático médio (RMSE) (KAY, 1993). Os valores de erro obtidos são vistos na tabela 4.2 e são obtidos utilizando a ferramenta *data cursor* (MATLAB, 2012) do MatLab.

$$\left( 1 - \frac{\text{Valor encontrado}}{\text{Valor de referência}} \right) \quad (4.10)$$

Tabela 4.2: Resultados encontrados na comparação entre os campos elétricos

| Erros                  | Ponto de máximo local à esquerda | Ponto de máximo local à direita | Ponto de mínimo local ao centro |
|------------------------|----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Posição Horizontal [m] | -12,5                            | 12,37                           | 0                               |
| PAGANOTTI (2012)       | 3074                             | 3031                            | 1702                            |
| Valor Simulado         | 3062                             | 3042                            | 1722                            |
| Variação Percentual    | 0,39%                            | 0,36%                           | 1,23%                           |
| Erro MSE               | 419,71                           |                                 |                                 |
| Erro RMSE              | 20,49                            |                                 |                                 |

Como os erros encontrados são pequenos, isto é menor do que 5 %, valida-se a ferramenta computacional desenvolvida e dessa forma ela é utilizada durante o trabalho no cálculo do campo elétrico envolvido nas LT's estudadas.

### 4.3 Validação do campo elétrico superficial

Para o cálculo do campo elétrico superficial é desenvolvida uma ferramenta utilizando o *Matlab R2018a* (MATLAB, 2012). Para a validação é utilizada a LT São Gonçalo do Pará - Ouro Preto de 500kV da CEMIG (1988), com com três condutores por feixe. A disposição geométrica de cabos está representada graficamente na figura 4.3 e as respostas dos níveis de campos elétricos superficiais para um cabo por fase são apresentadas nas figuras 4.4 a 4.6.

### 4.3. Validação do campo elétrico superficial

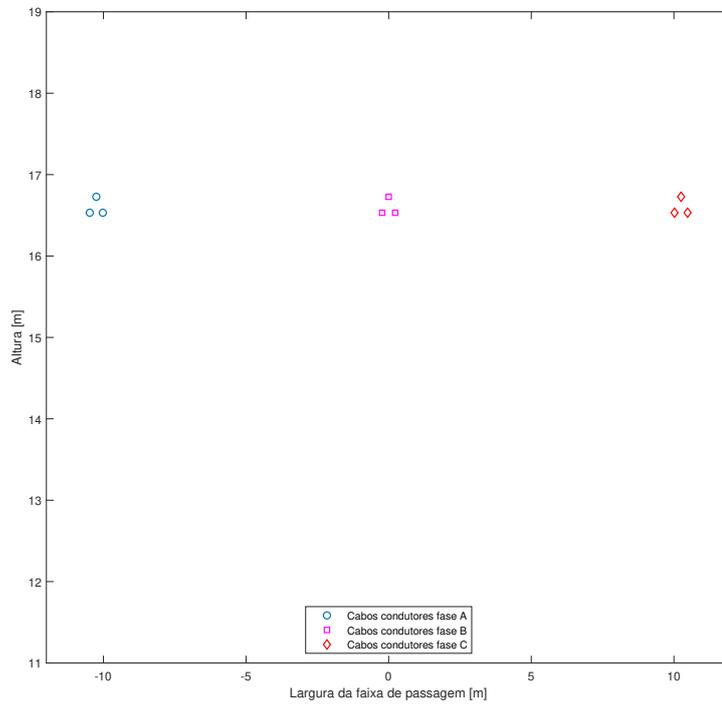


Figura 4.3: Representação da configuração dos condutores

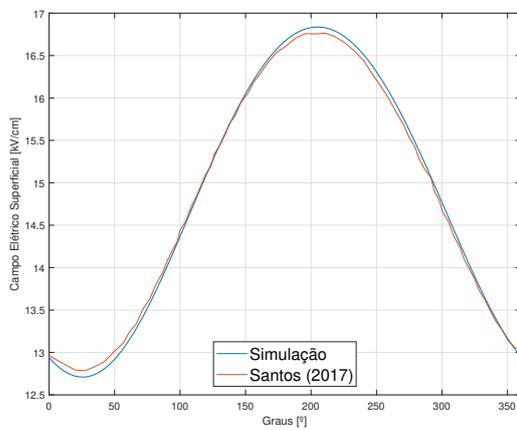


Figura 4.4: Campo elétrico superficial no cabo 1 da fase A

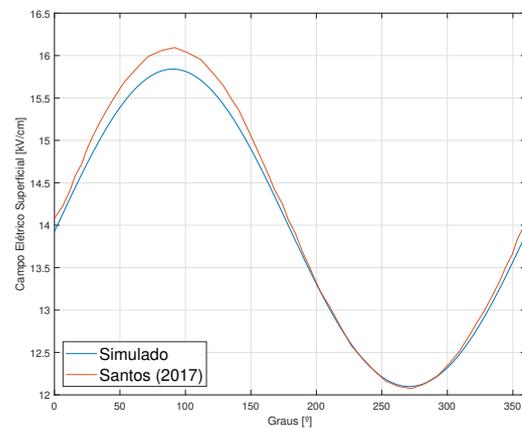


Figura 4.5: Campo elétrico superficial no cabo 2 da fase B

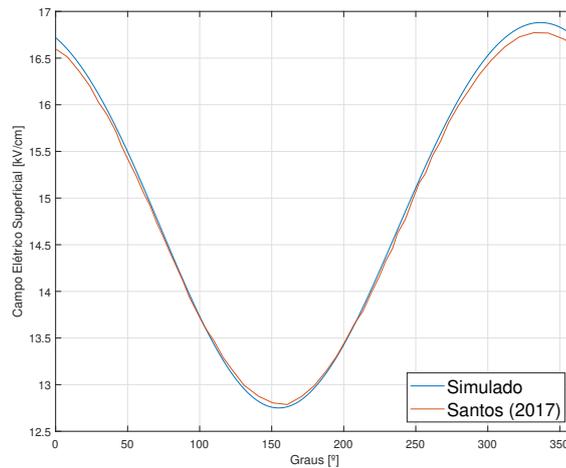


Figura 4.6: Campo elétrico superficial no cabo 3 da fase C

Para a geração da curva simulada é calculado o campo elétrico superficial em 360 pontos, divididos radialmente, ao redor da superfície de cada cabo. Em seguida esse resultado é comparado com o apresentado por SANTOS (2017). Como pode ser observado, os resultados encontrados são muito próximos aos de SANTOS (2017), sendo que a maior variação ocorre no ponto de  $90^\circ$  do segundo cabo da fase B, onde o valor simulado para o ponto é, conforme análise gráfica por meio da ferramenta *data cursor*, 1,55% menor do que o valor de referência. Como os erros encontrados são pequenos, menor do que 5%, valida-se a ferramenta computacional desenvolvida e dessa forma ela é utilizada durante o trabalho no cálculo do campo elétrico superficial.

## 4.4 Obtenção do SIL Aproximado

Nesta sessão são abordados os resultados referentes ao cálculo da potência característica de sequência positiva para linhas com 2, 3 e 4 cabos por fase.

### 4.4.1 Validação do cálculo do valor do SIL

Para essa validação uma ferramenta para o cálculo da potência característica de sequência positiva considerando a velocidade de fase como a equação 3.13, e também considerando a velocidade de fase constante, resultando em 3.16 é desenvolvida usando o *Matlab*. Inicia-se pela obtenção da carga elétrica de sequência positiva, obtida a partir da equação 3.17 e que depende também da tensão aplicada, do número de fases e da velocidade de fase da LT. As principais características das linhas e os resultados obtidos por PAGANOTTI *et al.* (2016) são apresentados nas tabelas 4.3, 4.4 e 4.5 e a posição dos condutores são representados nas figuras 4.7, 4.8 e 4.9 para os casos de LTs com 2, 3 e 4 cabos por fase, respectivamente.

Tabela 4.3: Características do caso com 2 condutores por fase

| Caso com 2 condutores por Fase                                  | Fase A           | Fase B                  | Fase C                 |
|---|------------------|-------------------------|------------------------|
| Posição Horizontal dos condutores [m]                           | -9,4570 ; -9,000 | -0,2285 ; 0,2285        | 9,0000 ; 9,4570        |
| Altura dos condutores [m]                                       | 14,29            |                         |                        |
| Raio dos condutores [m]   | 0,01437          |                         |                        |
| Tensão de Fase [kV]   | 345              | 345 $\angle -120^\circ$ | 345 $\angle 120^\circ$ |
| Valor de SIL encontrado por PAGANOTTI <i>et al.</i> (2016) [MW] | 400,28           |                         |                        |

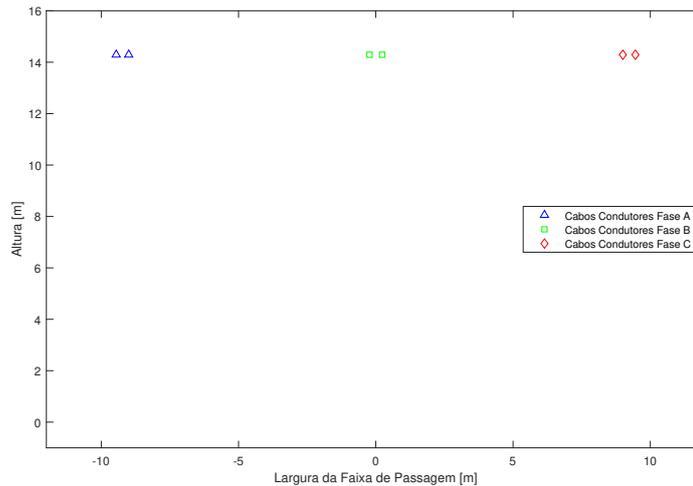


Figura 4.7: Representação da configuração geométrica da LT de 2 cabos por fase

Tabela 4.4: Características do caso com 3 condutores por fase

|   |                         |         |          |
|---|-------------------------|---------|----------|
| Fase  | A                       |         |          |
| Posição Horizontal dos condutores [m]                           | -12,2285                | -12,000 | -11,7715 |
| Altura dos condutores [m]                                       | 15,3779                 | 14,9821 | 15,3779  |
| Tensão de Fase [kV]   | 500                     |         |          |
| Fase  | B                       |         |          |
| Posição Horizontal dos condutores [m]                           | -0,2285                 | 0,0000  | 0,2285   |
| Altura dos condutores [m]                                       | 15,3779                 | 14,9821 | 15,3779  |
| Tensão de Fase [kV]   | 500 $\angle -120^\circ$ |         |          |
| Fase  | C                       |         |          |
| Posição Horizontal dos condutores [m]                           | 11,7715                 | 12,000  | 12,2285  |
| Altura dos condutores [m]                                       | 15,3779                 | 14,9821 | 15,3779  |
| Tensão de Fase [kV]   | 500 $\angle 120^\circ$  |         |          |
| Raio dos condutores [m]   | 0,01437                 |         |          |
| Valor de SIL encontrado por PAGANOTTI <i>et al.</i> (2016) [MW] | 903,73                  |         |          |

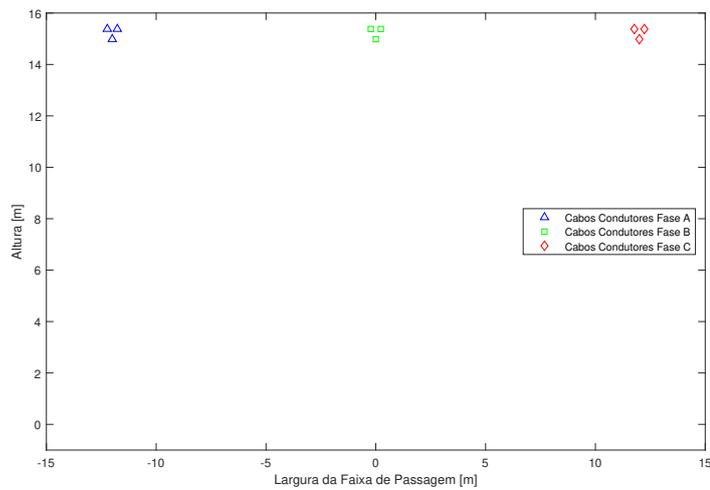


Figura 4.8: Representação da configuração geométrica da LT de 3 cabos por fase

Tabela 4.5: Características do caso com 4 condutores por fase

|   |                         |         |         |         |
|---|-------------------------|---------|---------|---------|
| Fase  | A                       |         |         |         |
| Posição Horizontal dos condutores [m]                           | -7,9750                 | -7,9750 | -7,0250 | -7,0250 |
| Altura dos condutores [m]                                       | 18,4499                 | 17,5000 | 17,5000 | 18,4499 |
| Tensão de Fase [kV]   | 500                     |         |         |         |
| Fase  | B                       |         |         |         |
| Posição Horizontal dos condutores [m]                           | -0,4750                 | -0,4750 | 0,47500 | 0,47500 |
| Altura dos condutores [m]                                       | 18,4499                 | 17,5000 | 17,5000 | 18,4499 |
| Tensão de Fase [kV]   | $500 \angle -120^\circ$ |         |         |         |
| Fase  | C                       |         |         |         |
| Posição Horizontal dos condutores [m]                           | 7,0250                  | 7,0250  | 7,9750  | 7,9750  |
| Altura dos condutores [m]                                       | 18,4499                 | 17,5000 | 17,5000 | 18,4499 |
| Tensão de Fase [kV]   | $500 \angle 120^\circ$  |         |         |         |
| Raio dos condutores [m]   | 0,01598                 |         |         |         |
| Valor de SIL encontrado por PAGANOTTI <i>et al.</i> (2016) [MW] | 1281,76                 |         |         |         |

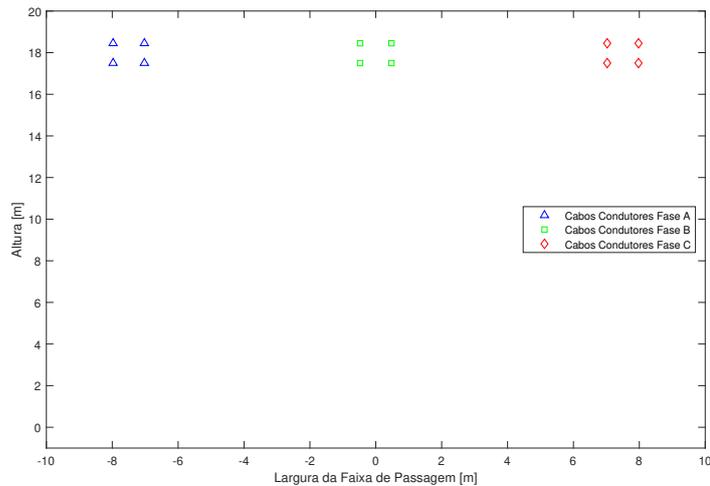


Figura 4.9: Representação da configuração geométrica da LT de 4 cabos por fase

Em sequência são aplicadas essas informações no código, e dessa forma obtêm-se valores aproximados da potência característica da linha, que são comparados com os valores indicados nas tabelas 4.3, 4.4 e 4.5 encontrados por PAGANOTTI *et al.* (2016). Obtém-se o SIL aproximado de duas maneiras diferentes. Primeiro usando a formulação aproximada dada por (3.17), onde o valor da velocidade de fase  $s$  é variável. Ou seja,  $s$  depende da capacitância e indutância de sequência positiva que são variáveis em função da posição geométrica dos cabos. Em seguida, obtém-se o SIL aproximado considerando novamente a formulação da carga elétrica de sequência positiva, mas com o valor da velocidade de fase ( $s_1$ ) constante, conforme feito por SERGIO (1995). Essas comparações são vistas na tabela 4.6. A variação é a diferença do resultado encontrado em relação à referência e é calculada dividindo o resultado encontrado pelo valor de referência e diminuindo 1 unidade.

Tabela 4.6: Resultado de SIL encontrado utilizando a aproximação por sequência positiva, por sequência positiva considerando velocidade de fase constante e os valores esperados de SIL encontrados por PAGANOTTI *et al.* (2016)

| Casos            | SIL Sequência positiva |            | SIL com velocidade de fase constante |            | SIL encontrado por Paganotti |            |
|------------------|------------------------|------------|--------------------------------------|------------|------------------------------|------------|
| 2 cabos por fase | 400,77 [Mw]            | Variação % | 409,92 [Mw]                          | Variação % | 400,28 [Mw]                  | Referência |
|                  |                        | 0,12       |                                      | 2,44       |                              |            |
| 3 cabos por fase | 907,94 [Mw]            | Variação % | 927,81 [Mw]                          | Variação % | 903,73 [Mw]                  | Referência |
|                  |                        | 0,46       |                                      | 2,66       |                              |            |
| 4 cabos por fase | 1315,2 [Mw]            | Variação % | 1334,2 [Mw]                          | Variação % | 1281,76 [Mw]                 | Referência |
|                  |                        | 2,60       |                                      | 4,01       |                              |            |

A partir desses dados, percebe-se que para um menor número de cabos a simplificação de sequência positiva apresenta resultados muito bons, abaixo de 1 % de diferença e para um número mais elevado, obteve um erro um pouco maior, porém ainda satisfatório. Já ao simplificar o SIL considerando a velocidade de fase constante, os erros apresentados são consideravelmente maiores quando comparados com o modelo de velocidade de fase variável, e

mesmo para 2 subcondutores por fase apresentou um erro de 2,44 % em comparação com 0,12 % do outro modelo. Dessa forma será utilizado o modelo sem a simplificação da velocidade de fase constante para a modelagem do SIL no trabalho.

## 4.5 Análise do Efeito da Geometria das Fases no SIL Aproximado

Em sequência são analisadas as influências das posições geométricas das fases no SIL da linha. Para isso, são utilizados os modelos anteriores (tabelas 4.3, 4.4 e 4.5) e são feitas alterações de  $\pm 1$  m na altura das fases e de  $\pm 2$  m na distância entre elas demonstrado nas figuras 4.10, 4.11 e 4.12. Os resultados são mostrados na tabela 4.9 a seguir:

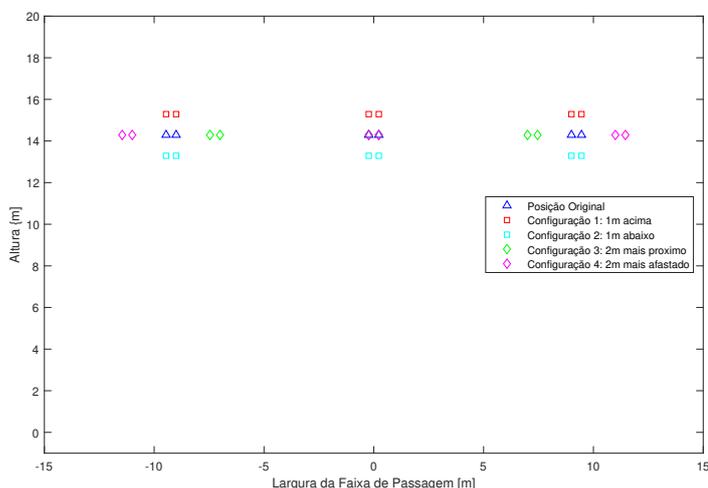


Figura 4.10: Representação da configuração geométrica da LT de 2 cabos por fase para as configurações citadas

Tabela 4.7: Resultados obtidos após variação de posição das fases

| Caso 1                                     | SIL Aproximado - $s(x,y)_1$ variável |                    | SIL Aproximado - $s_1$ constante |                   |
|--|--------------------------------------|--------------------|----------------------------------|-------------------|
| <b>2 cabos por fase - posição original</b> | 400,77 [Mw]                          | Referência         | 409,92 [Mw]                      | Referência        |
| Fases 1m acima                             | 400,32 [Mw]                          | Varição<br>-0,11%  | 409,17 [Mw]                      | Varição<br>-0,18% |
| Fases 1m abaixo                            | 401,32 [Mw]                          | Varição<br>0,13 %  | 410,83 [Mw]                      | Varição<br>0,22 % |
| Fases 2m mais próximas                     | 420,41 [Mw]                          | Varição<br>4,9 %   | 429,5 [Mw]                       | Varição<br>4,8 %  |
| Fases 2m mais afastadas                    | 386,80 [Mw]                          | Varição<br>-3,48 % | 396,36 [Mw]                      | Varição<br>-3,3 % |

#### 4.5. Análise do Efeito da Geometria das Fases no SIL Aproximado

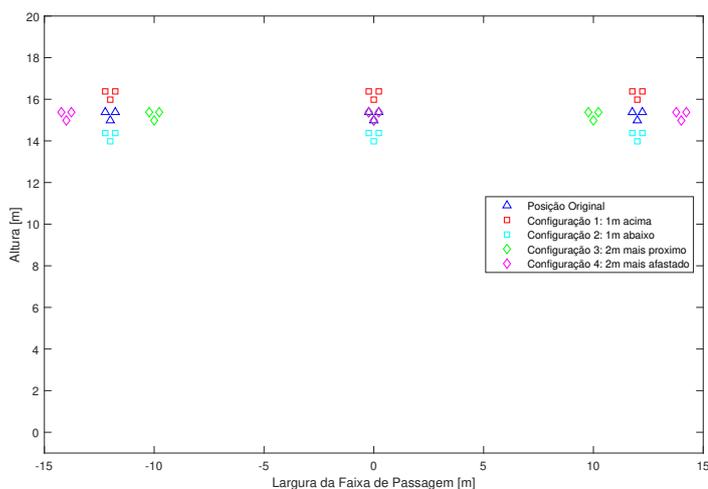


Figura 4.11: Representação da configuração geométrica da LT de 3 cabos por fase para as configurações citadas

Tabela 4.8: Resultados obtidos após variação de posição das fases

| Caso 2                                     | SIL Aproximado - $s(x,y)_1$ variável |                     | SIL Aproximado - $s_1$ constante |                     |
|--|--------------------------------------|---------------------|----------------------------------|---------------------|
| <b>3 cabos por fase - posição original</b> | 907,94 [Mw]                          | Referência          | 927,81 [Mw]                      | Referência          |
| Fases 1m acima                             | 906,74 [Mw]                          | Variação<br>-0,13 % | 925,30 [Mw]                      | Variação<br>-0,27 % |
| Fases 1m abaixo                            | 909,07 [Mw]                          | Variação<br>0,12 %  | 930,47 [Mw]                      | Variação<br>0,28 %  |
| Fases 2m mais próximas                     | 942,76 [Mw]                          | Variação<br>3,9 %   | 960,58 [Mw]                      | Variação<br>3,5 %   |
| Fases 2m mais afastadas                    | 880,99 [Mw]                          | Variação<br>-2,9 %  | 903,09 [Mw]                      | Variação<br>-2,6 %  |

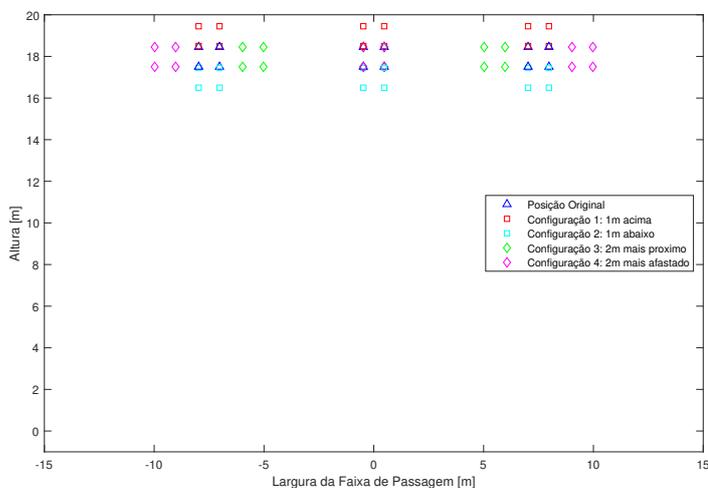


Figura 4.12: Representação da configuração geométrica da LT de 4 cabos por fase para as configurações citadas

Tabela 4.9: Resultados obtidos após variação de posição das fases

| Caso 3                                     | SIL Aproximado - $s(x,y)_1$ variável |                    | SIL Aproximado - $s_1$ constante |                   |
|--|--------------------------------------|--------------------|----------------------------------|-------------------|
| <b>4 cabos por fase - posição original</b> | 1315,2 [Mw]                          | Referência         | 1334,2 [Mw]                      | Referência        |
| Fases 1m acima                             | 1314,8 [Mw]                          | Varição<br>-0,03 % | 1332,9 [Mw]                      | Varição<br>-0,1 % |
| Fases 1m abaixo                            | 1315,6 [Mw]                          | Varição<br>0,03 %  | 1335,8 [Mw]                      | Varição<br>0,1 %  |
| Fases 2m mais próximas                     | 1461,1 [Mw]                          | Varição<br>11,1 %  | 1479,5 [Mw]                      | Varição<br>10,9 % |
| Fases 2m mais afastadas                    | 1223,8 [Mw]                          | Varição<br>-6,9 %  | 1244,8 [Mw]                      | Varição<br>-6,7 % |

Com essas informações, percebe-se primeiramente que os dois modelos apresentaram uma variação entre si comparados com os valores de referência bem similares. Percebe-se também que a alteração da posição dos cabos resulta em uma variação do SIL, porém existem alterações que são mais significativas que outras. Ao alterar horizontalmente, isto é, aproximando ou afastando uma fase da outra, obtém-se as maiores variações percentuais, tanto positivas ao aproximá-las, quanto negativas ao afastá-las. Também é observado que ao aproximar ou afastar os condutores do solo, resulta em uma alteração no SIL, ao reduzir a altura dos cabos acontecem variações positivas e ao aumentar as alturas dos condutores negativas, porém elas geram um efeito muito menor quando comparada ao efeito obtido pela compactação ou expansão da linha.

## 4.6 Maximização do SIL

Para a maximização do SIL foi utilizado um código desenvolvido em MATLAB (2012) utilizando o SIL com velocidade de fase variável, visto que obteve resultados mais precisos, compreendendo todas as etapas e restrições citadas anteriormente, de distância mínima entre os condutores, distância mínima entre fases, distância máxima entre condutores, respeitando os limites de campo elétrico ao nível do solo impostos pela norma brasileira ANEEL (5 de maio, 2009) e do campo elétrico crítico. Para a simulação são considerados os mesmos exemplos de 2, 3 e 4 cabos por condutor da seção anterior, 100 gerações, 50 indivíduos por geração e são comparados os 6 casos diferentes de mutação propostos por GAO (2010); SILVA OLIVEIRA; SARAMAGO (2005); STORN; PRICE (1997). "Mutação caso:1"  simula o utilizando a muta o apresentada por STORN; PRICE (1997) na equa o 3.34, "Muta o caso:2"  simula o utilizando a muta o apresentada por SILVA OLIVEIRA; SARAMAGO (2005) na equa o 3.35, "Muta o caso:3"  simula o utilizando a muta o apresentada por SILVA OLIVEIRA; SARAMAGO (2005) na equa o 3.36 "Muta o caso:4"  simula o utilizando a muta o apresentada por SILVA OLIVEIRA; SARAMAGO (2005) na equa o 3.37, "Muta o caso:5"  simula o utilizando a muta o apresentada por SILVA OLIVEIRA; SARAMAGO (2005) na equa o 3.38 e

"Mutação caso:6"   simulação utilizando a mutação apresentada por GAO (2010) na equação 3.40

#### 4.6.1 Cenário 1: LT 2 Cabos por Fase

Para o caso de 2 condutores por fase foi utilizada como base a LT que pode ser vista na tabela 4.10 e na figura 4.13. Na figura 4.14   possível ver a variação do melhor SIL de cada geração e nas figuras 4.17 a 4.22   possível analisar a comparação entre o modelo inicial e o modelo final proposto.

Tabela 4.10: Características do caso com 2 condutores por fase

| Cenário 1: LT 2 Cabos por Fase                                  | Fase A           | Fase B                  | Fase C                 |
|---|------------------|-------------------------|------------------------|
| Posição Horizontal dos condutores [m]                           | -9,4570 ; -9,000 | -0,2285 ; 0,2285        | 9,0000 ; 9,4570        |
| Altura dos condutores [m]                                       | 14,29            |                         |                        |
| Raio dos condutores [m]   | 0,01437          |                         |                        |
| Tensão de Fase [kV]   | 345              | 345 $\angle -120^\circ$ | 345 $\angle 120^\circ$ |
| Valor de SIL encontrado por PAGANOTTI <i>et al.</i> (2016) [MW] | 400,28           |                         |                        |
| Distância mínima entre condutores [m]                           | 0,23             |                         |                        |
| Distância máxima entre condutores [m]                           | 1,5              |                         |                        |
| Distância mínima entre fases [m]                                | 7                |                         |                        |
| Número de gerações  | 100              |                         |                        |
| Número de indivíduos por geração                                | 50               |                         |                        |
| Temperatura [ $^\circ$ C]                                       | 60               |                         |                        |
| Altura da LT  | Nível do Mar     |                         |                        |
| Fator de superfície $f_s$                                       | 0,72             |                         |                        |

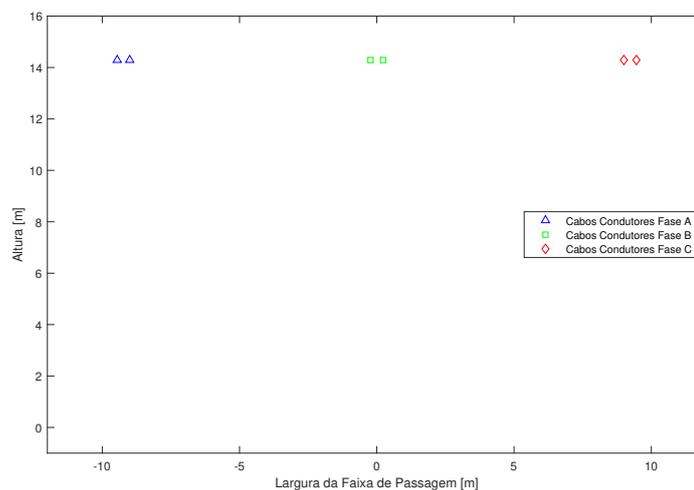


Figura 4.13: Representação da configuração geométrica da LT de 2 cabos por fase

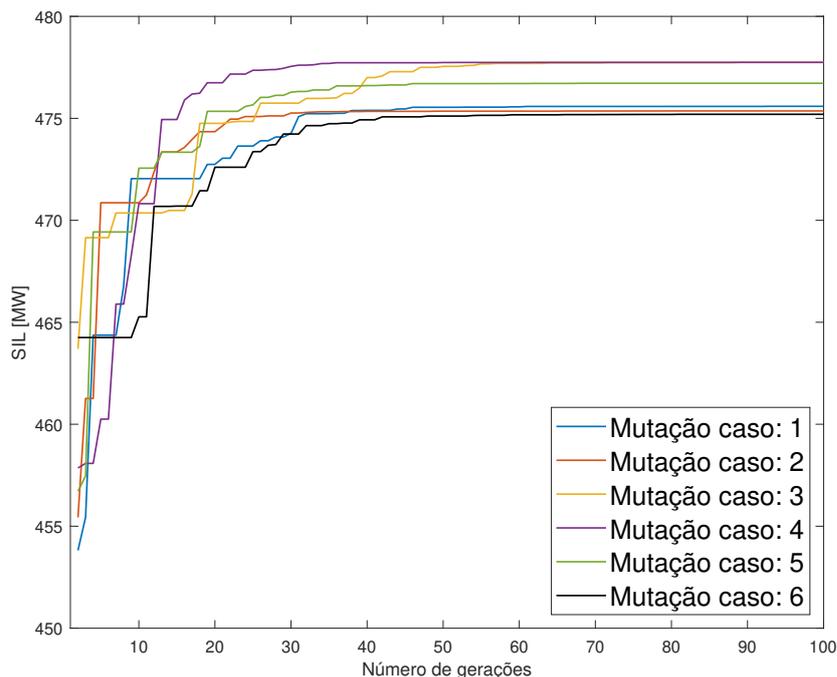


Figura 4.14: Comparativo entre os casos de mutação

É possível perceber que todos os resultados apresentaram melhora com o passar das gerações. Mesmo o menor valor encontrado, referente ao caso 6, resulta em um modelo com um ganho de 18,7% em relação ao valor de SIL encontrado na tabela 4.10 enquanto o melhor caso apresentou um ganho de 19,34% no SIL. Além disso os diferentes valores máximos alcançados se devem a existência de mínimos locais, e uma vez que uma população se concentra em um ponto os valores do vetor doador na mutação diminuem favorecendo o processo de concentração e assim, fazendo com que o resultado estagne.

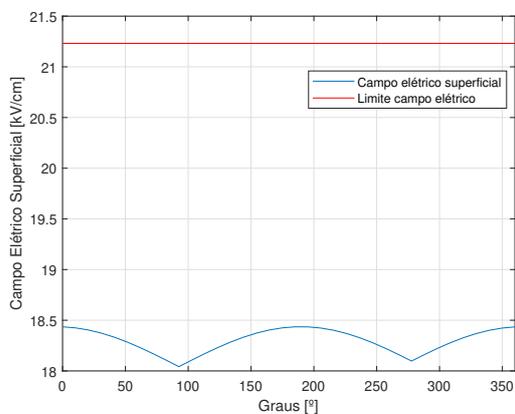


Figura 4.15: Campo elétrico superficial do melhor indivíduo com 2 condutores por fase

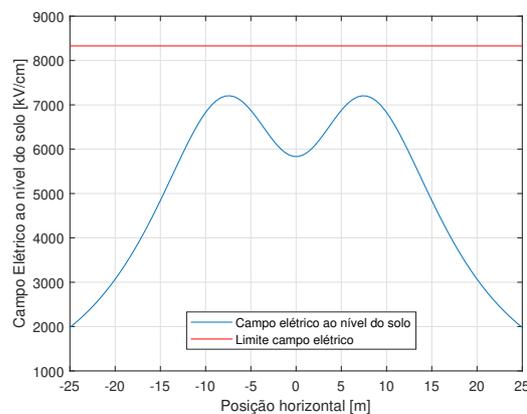


Figura 4.16: Campo elétrico ao nível do solo do melhor indivíduo com 2 condutores por fase

Percebe-se que a solução respeita os limites impostos de campo elétrico ao nível do solo e

campo elétrico superficial.

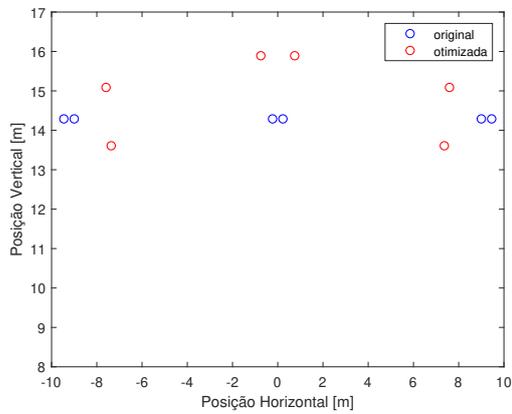


Figura 4.17: Comparativo posições originais e otimizadas para o caso 1 com 2 condutores

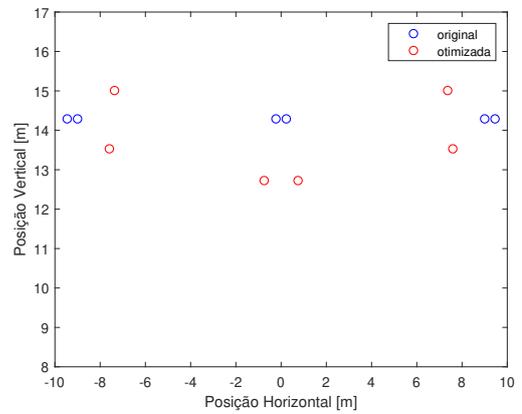


Figura 4.18: Comparativo posições originais e otimizadas para o caso 2 com 2 condutores

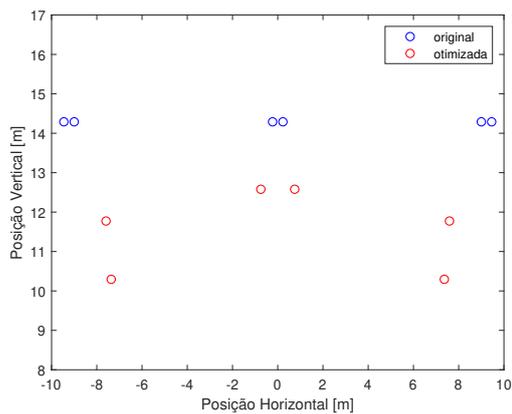


Figura 4.19: Comparativo posições originais e otimizadas para o caso 3 com 2 condutores

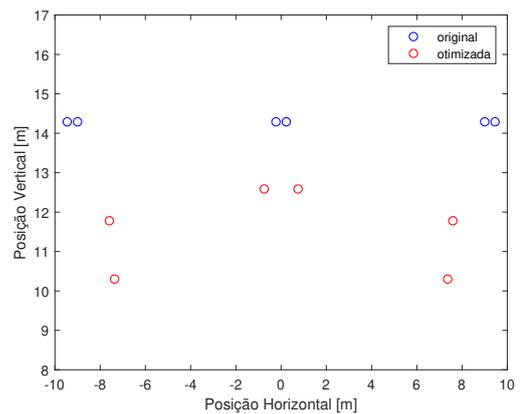


Figura 4.20: Comparativo posições originais e otimizadas para o caso 4 com 2 condutores

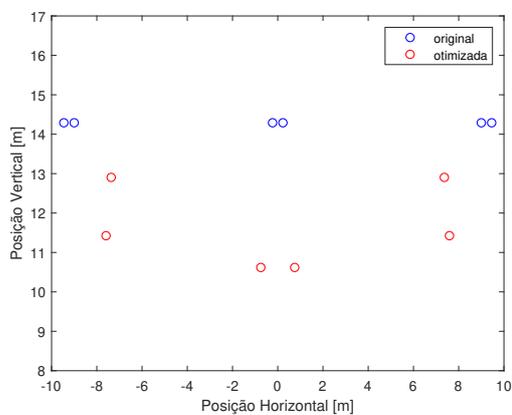


Figura 4.21: Comparativo posições originais e otimizadas para o caso 5 com 2 condutores

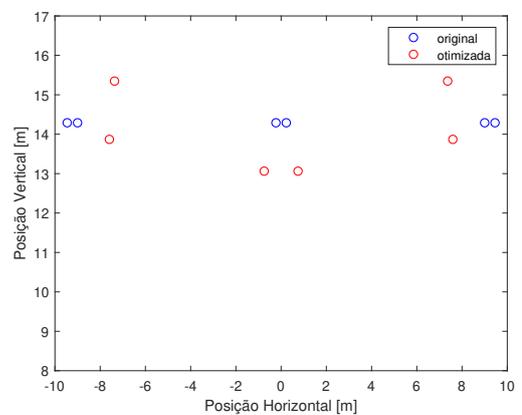


Figura 4.22: Comparativo posições originais e otimizadas para o caso 6 com 2 condutores

Observando a geometria dos cabos é perceptível a semelhança entre os resultados, como o fato de todas as soluções apresentarem os condutores de mesma fase afastados entre si, e das fases estarem mais próximas, resultado observado também no capítulo anterior. Outra semelhança notável, é que os melhores resultados apresentam, além das características anteriores, os condutores mais próximos do solo, uma característica que também foi identificada como amplificadora do SIL na seção anterior. Em sequência tem-se as tabelas 4.6.1 e 4.11 que representam respectivamente, os melhores valores de SIL encontrados para cada caso e as geometrias que os resultaram. A variação indicado é calculada segundo a fórmula 4.11.

$$\left(1 - \frac{\text{Valor encontrado}}{\text{Valor de referência}}\right) \quad (4.11)$$

Resultados encontrados para cada caso simulado

| Casos                 | SIL [MW] | Aumento    |
|-----------------------|----------|------------|
| Configuração Original | 400,28   | Referência |
| Mutação Caso 1        | 475,6    | 18,81 %    |
| Mutação Caso 2        | 475,4    | 18,76 %    |
| Mutação Caso 3        | 477,7    | 19,34 %    |
| Mutação Caso 4        | 477,7    | 19,34 %    |
| Mutação Caso 5        | 476,7    | 19,09 %    |
| Mutação Caso 6        | 475,2    | 18,71 %    |

Tabela 4.11: Resultados obtidos do cenário 1: LT 2 Cabos por Fase

| cenário 1: LT 2 Cabos por Fase        | Fase A           | Fase B           | Fase C           |
|---------------------------------------|------------------|------------------|------------------|
| Posição original                      |                  |                  |                  |
| Posição Horizontal dos condutores [m] | -9,4570 ; -9,000 | -0.7483;0.7483   | 9,0000 ; 9,4570  |
| Altura dos condutores [m]             | 14,29            |                  |                  |
| Posição Mutação caso 1                |                  |                  |                  |
| Posição Horizontal dos condutores [m] | -7.5928; -7.3643 | -0,2285; 0,2285  | 7.3643; 7.5928   |
| Altura dos condutores [m]             | 15.0876; 13.6085 | 15.8930; 15.8930 | 13.6085; 15.0876 |
| Posição Mutação caso 2                |                  |                  |                  |
| Posição Horizontal dos condutores [m] | -7.5928; -7.3643 | -0.7483; 0.7483  | 7.3643; 7.5928   |
| Altura dos condutores [m]             | 13.5305; 15.0096 | 12.7250; 12.7250 | 15.0096; 13.5305 |
| Posição Mutação caso 3                |                  |                  |                  |
| Posição Horizontal dos condutores [m] | -7.5928; -7.3643 | 7.3643; 7.5928   | 7.3643; 7.5928   |
| Altura dos condutores [m]             | 13.5305; 5.0096  | 12.579; 12.579   | 15.0096; 13.5305 |
| Posição Mutação caso 4                |                  |                  |                  |
| Posição Horizontal dos condutores [m] | -7.5928; -7.3643 | -0.7483; 0.74831 | 7.3643; 7.5928   |
| Altura dos condutores [m]             | 13.5305; 15.0096 | 12.5862; 12.5862 | 15.0096; 13.5305 |
| Posição Mutação caso 5                |                  |                  |                  |
| Posição Horizontal dos condutores [m] | -7.5928; -7.3643 | -0.7482; 0.7482  | 7.3643; 7.5928   |
| Altura dos condutores [m]             | 11.4252; 12.9042 | 10.619; 10.619   | 12.9042; 11.4252 |
| Posição Mutação caso 6                |                  |                  |                  |
| Posição Horizontal dos condutores [m] | -7.5928; -7.3643 | -0.7483; 0.7483  | 7.3643; 7.5928   |
| Altura dos condutores [m]             | 13.8686; 15.3477 | 13.0631; 13.0631 | 15.3477; 13.8686 |

### 4.6.2 Cenário 2: LT 3 Cabos por Fase

Para o caso de 3 condutores por fase foi utilizada como base a LT que pode ser vista na tabela 4.12 e na figura 4.23. Na figura 4.24 é possível ver a variação do melhor SIL de cada geração e nas figuras 4.27 a 4.32 é possível analisar a comparação entre o modelo inicial e o modelo final proposto.

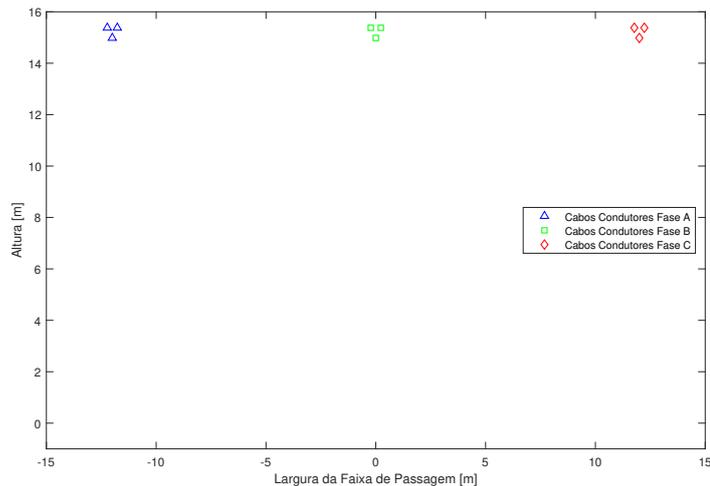


Figura 4.23: Representação da configuração geométrica da LT de 3 cabos por fase

Tabela 4.12: Características do cenário 2: LT 3 Cabos por Fase

|   |                         |         |          |
|---|-------------------------|---------|----------|
| Fase  | A                       |         |          |
| Posição Horizontal dos condutores [m]                           | -12,2285                | -12,000 | -11,7715 |
| Altura dos condutores [m]                                       | 15,3779                 | 14,9821 | 15,3779  |
| Tensão de Fase [kV]   | 500                     |         |          |
| Fase  | B                       |         |          |
| Posição Horizontal dos condutores [m]                           | -0,2285                 | 0,0000  | 0,2285   |
| Altura dos condutores [m]                                       | 15,3779                 | 14,9821 | 15,3779  |
| Tensão de Fase [kV]   | $500 \angle -120^\circ$ |         |          |
| Fase  | C                       |         |          |
| Posição Horizontal dos condutores [m]                           | 11,7715                 | 12,000  | 12,2285  |
| Altura dos condutores [m]                                       | 15,3779                 | 14,9821 | 15,3779  |
| Tensão de Fase [kV]   | $500 \angle 120^\circ$  |         |          |
| Raio dos condutores [m]   | 0,01437                 |         |          |
| Valor de SIL encontrado por PAGANOTTI <i>et al.</i> (2016) [MW] | 903,73                  |         |          |
| Distância mínima entre condutores [m]                           | 0,317                   |         |          |
| Distância máxima entre condutores [m]                           | 1,5                     |         |          |
| Distância mínima entre fases [m]                                | 9                       |         |          |
| Número de gerações  | 100                     |         |          |
| Número de indivíduos por geração                                | 50                      |         |          |
| Temperatura [ $^\circ$ C]                                       | 40                      |         |          |
| Altura da LT  | Nível do Mar            |         |          |
| Fator de superfície $f_s$                                       | 0,72                    |         |          |

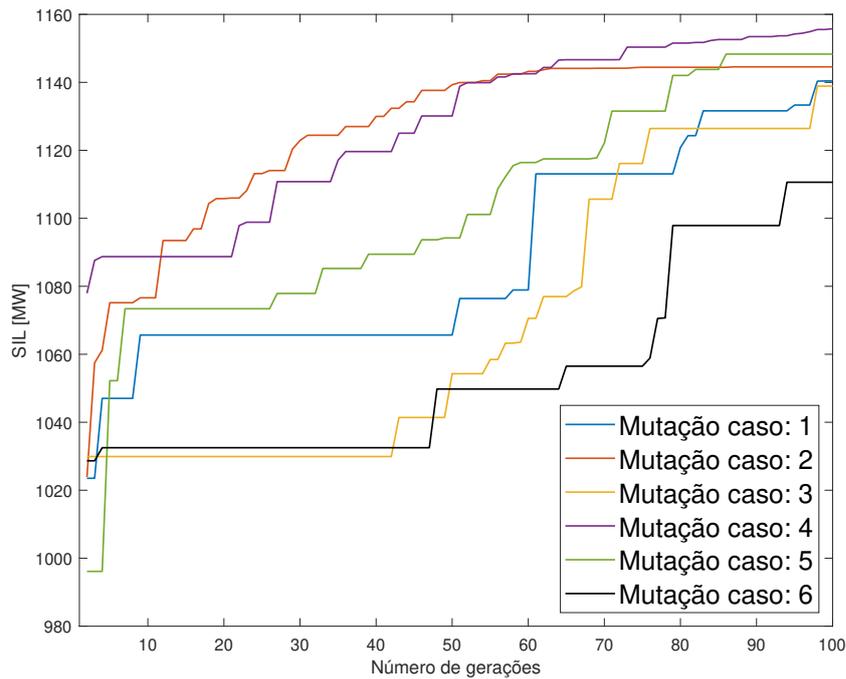


Figura 4.24: Comparativo entre os casos de mutação

É possível perceber que todos os resultados apresentam melhora com o passar das gerações. Mesmo o menor valor encontrado, referente ao caso 6, resulta em um modelo com um ganho de 22,9% em relação ao valor de SIL encontrado na tabela 4.4 enquanto o melhor caso apresentou um ganho de 27,9% no SIL. Nesse cenário é possível reparar que os casos 2 e 4, que consistem na aplicação do vetor doador no indivíduo de melhor resultado, alcançam um valor mais elevado com muito menos gerações que os demais casos.

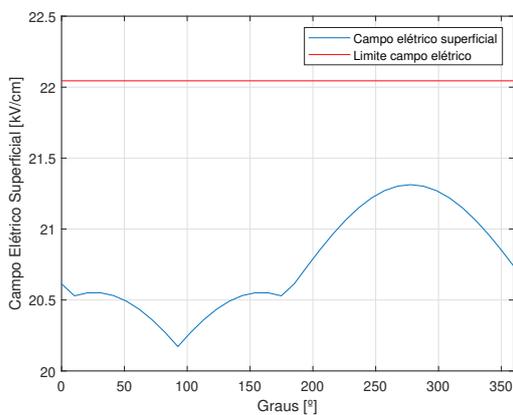


Figura 4.25: Campo elétrico superficial do melhor indivíduo com 3 condutores por fase

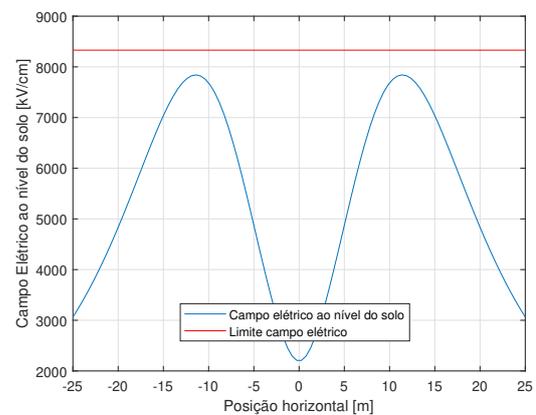


Figura 4.26: Campo elétrico ao nível do solo do melhor indivíduo com 3 condutores por fase

Percebe-se que a solução respeita os limites impostos de campo elétrico superficial e de campo elétrico ao nível do solo.

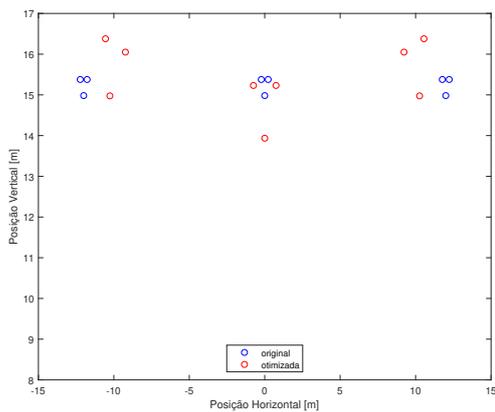


Figura 4.27: Comparativo posições originais e otimizadas para o caso 1 com 3 condutores

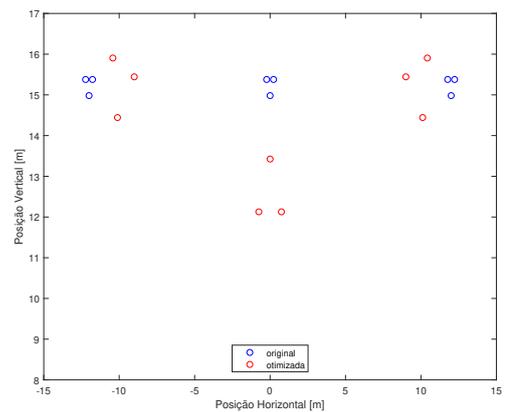


Figura 4.28: Comparativo posições originais e otimizadas para o caso 2 com 3 condutores

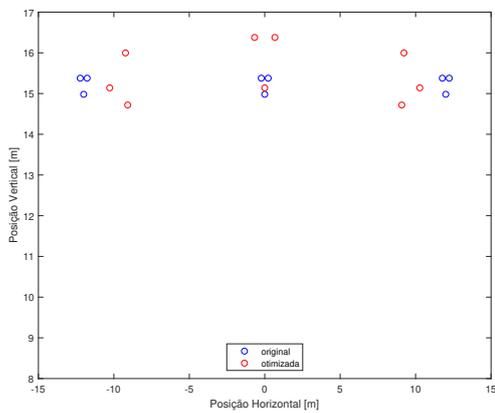


Figura 4.29: Comparativo posições originais e otimizadas para o caso 3 com 3 condutores

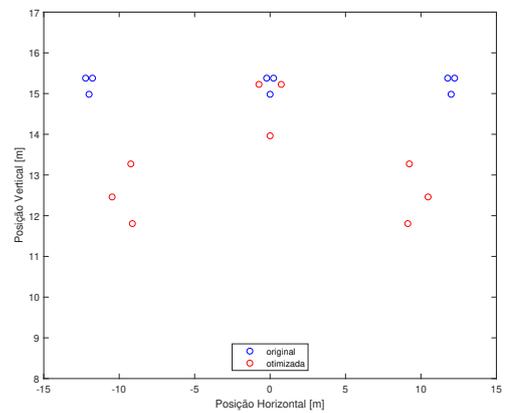


Figura 4.30: Comparativo posições originais e otimizadas para o caso 4 com 3 condutores

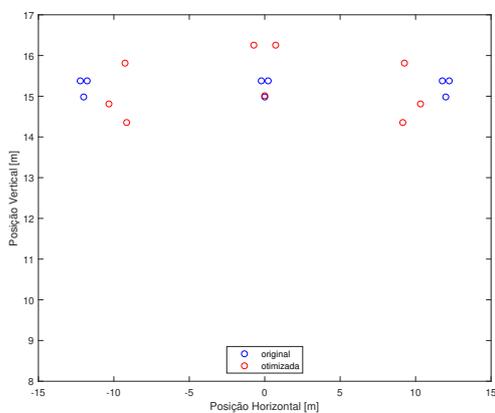


Figura 4.31: Comparativo posições originais e otimizadas para o caso 5 com 3 condutores

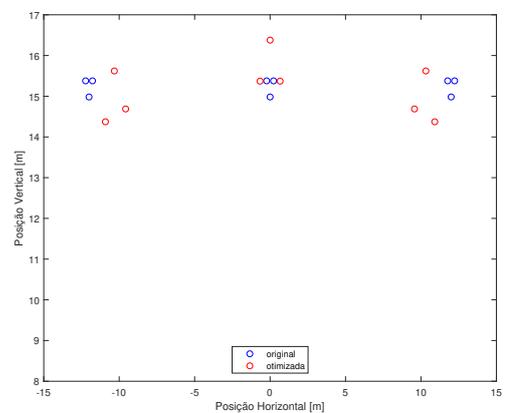


Figura 4.32: Comparativo posições originais e otimizadas para o caso 6 com 3 condutores

Observando a geometria dos cabos é possível notar a semelhança entre os resultados, do

mesmo modo que no caso com 2 condutores por fase, como o fato de todas as soluções apresentarem os condutores de mesma fase afastados entre si, e das fases estarem mais próximas, resultado observado também no capítulo anterior. Outra semelhança notável, é que os melhores resultados apresentam, além das características anteriores, os condutores mais próximos do solo, uma característica que também foi identificada como amplificadora do SIL no capítulo anterior. Em sequência tem-se as tabelas 4.13 e 4.14 que representam respectivamente, os melhores valores de SIL encontrados para cada caso e as geometrias que os resultaram. A variação indicado é calculada segundo a fórmula 4.12.

$$\left(1 - \frac{\text{Valor encontrado}}{\text{Valor de referência}}\right) \quad (4.12)$$

Tabela 4.13: Resultados encontrados para cada caso simulado

| Casos                 | SIL [MW] | Aumento    |
|-----------------------|----------|------------|
| Configuração Original | 903,73   | Referência |
| Mutação Caso 1        | 1140     | 26,14 %    |
| Mutação Caso 2        | 1145     | 26,69%     |
| Mutação Caso 3        | 1139     | 26,03 %    |
| Mutação Caso 4        | 1156     | 27,91 %    |
| Mutação Caso 5        | 1148     | 27,02 %    |
| Mutação Caso 6        | 1111     | 22,93 %    |

Tabela 4.14: Características do Cenário 2: LT 3 Cabos por Fase

| Fase                                  | A         |          |          | B        |         |         | C       |         |          |
|---------------------------------------|-----------|----------|----------|----------|---------|---------|---------|---------|----------|
| Posição original                      |           |          |          |          |         |         |         |         |          |
| Posição Horizontal dos condutores [m] | -12,2285  | -12      | -11,7715 | -0,2285  | 0       | 0,2285  | 11,7715 | 12      | 12,2285  |
| Altura dos condutores [m]             | 15,3779   | 14,9821  | 15,3779  | 15,3779  | 14,9821 | 15,3779 | 15,3779 | 14,9821 | 15,3779  |
| Posição Mutação caso 1                |           |          |          |          |         |         |         |         |          |
| Posição Horizontal dos condutores [m] | -9,2327   | -10,2639 | -10,553  | -0,7475  | 0       | 0,747   | 10,5539 | 10,2639 | 9,2327   |
| Altura dos condutores [m]             | 16,0500   | 14,9753  | 16,3779  | 15,2306  | 13,9350 | 15,2306 | 16,3779 | 14,9753 | 16,050   |
| Posição Mutação caso 2                |           |          |          |          |         |         |         |         |          |
| Posição Horizontal dos condutores [m] | -10,42103 | -9,00040 | -10,1133 | -0,747   | 0       | 0,747   | 10,1133 | 9,0004  | 10,4210  |
| Altura dos condutores [m]             | 15,9050   | 15,4426  | 14,4431  | 12,1278  | 13,423  | 12,1278 | 14,4431 | 15,442  | 15,9050  |
| Posição Mutação caso 3                |           |          |          |          |         |         |         |         |          |
| Posição Horizontal dos condutores [m] | -9,2285   | -9,082   | -10,2756 | -0,673   | 0       | 0,6739  | 10,27   | 9,0825  | 9,2285   |
| Altura dos condutores [m]             | 15,9977   | 14,7187  | 15,1404  | 16,3779  | 15,139  | 16,3779 | 15,1404 | 14,7187 | 15,9977  |
| Posição Mutação caso 4                |           |          |          |          |         |         |         |         |          |
| Posição Horizontal dos condutores [m] | -9,2285   | -10,469  | -9,126   | -0,738   | 0       | 0,7381  | 9,126   | 10,4690 | 9,2285   |
| Altura dos condutores [m]             | 13,2722   | 12,4605  | 11,8060  | 15,2252  | 13,9629 | 15,2252 | 11,8060 | 12,4605 | 13,2722  |
| Posição Mutação caso 5                |           |          |          |          |         |         |         |         |          |
| Posição Horizontal dos condutores [m] | -9,2588   | -9,152   | -10,326  | -0,72403 | 0       | 0,7240  | 10,3268 | 9,1522  | 9,2588   |
| Altura dos condutores [m]             | 15,8139   | 14,3542  | 14,8112  | 16,2545  | 15,0125 | 16,2545 | 14,8112 | 14,3542 | 15,8139  |
| Posição Mutação caso 6                |           |          |          |          |         |         |         |         |          |
| Posição Horizontal dos condutores [m] | -10,3229  | -9,5719  | -10,9136 | -0,6641  | 0       | 0,6641  | 10,9136 | 9,57197 | 10,32290 |
| Altura dos condutores [m]             | 15,621    | 14,6880  | 14,3726  | 15,37088 | 16,3779 | 15,3708 | 14,3726 | 14,6880 | 15,6210  |

### Cenário 3: LT 4 Cabos por Fase

Para o caso de 4 condutores por fase foi utilizada como base a LT que pode ser vista na tabela 4.15 e na figura 4.33. Na figura 4.34 é possível ver a variação do melhor SIL de cada

geração e nas figuras 4.37 a 4.42 é possível analisar a comparação entre o modelo inicial e o modelo final proposto.

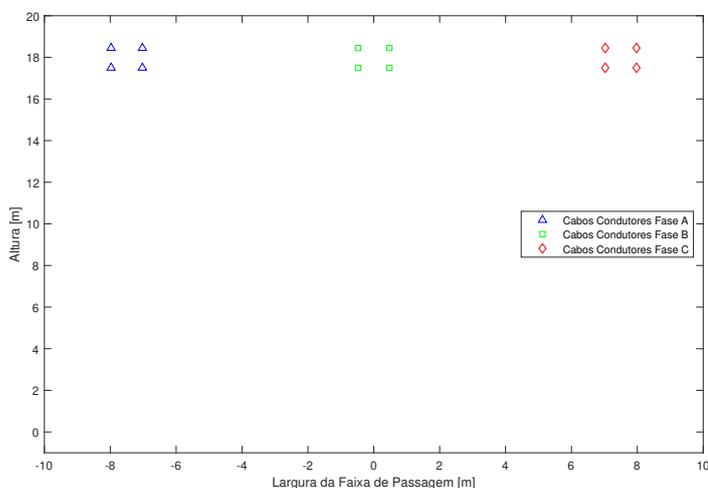


Figura 4.33: Representação da configuração geométrica da LT de 4 cabos por fase

Tabela 4.15: Características do caso com 4 condutores por fase

|   |                         |         |         |         |
|---|-------------------------|---------|---------|---------|
| Fase  | A                       |         |         |         |
| Posição Horizontal dos condutores [m]                           | -7,9750                 | -7,9750 | -7,0250 | -7,0250 |
| Altura dos condutores [m]                                       | 18,4499                 | 17,5000 | 17,5000 | 18,4499 |
| Tensão de Fase [kV]   | 500                     |         |         |         |
| Fase  | B                       |         |         |         |
| Posição Horizontal dos condutores [m]                           | -0,4750                 | -0,4750 | 0,47500 | 0,47500 |
| Altura dos condutores [m]                                       | 18,4499                 | 17,5000 | 17,5000 | 18,4499 |
| Tensão de Fase [kV]   | 500 $\angle -120^\circ$ |         |         |         |
| Fase  | C                       |         |         |         |
| Posição Horizontal dos condutores [m]                           | 7,0250                  | 7,0250  | 7,9750  | 7,9750  |
| Altura dos condutores [m]                                       | 18,4499                 | 17,5000 | 17,5000 | 18,4499 |
| Tensão de Fase [kV]   | 500 $\angle 120^\circ$  |         |         |         |
| Raio dos condutores [m]   | 0,01598                 |         |         |         |
| Valor de SIL encontrado por PAGANOTTI <i>et al.</i> (2016) [MW] | 1281,76                 |         |         |         |
| Distância mínima entre condutores [m]                           | 0,317                   |         |         |         |
| Distância máxima entre condutores [m]                           | 2,2                     |         |         |         |
| Distância mínima entre fases [m]                                | 5,5                     |         |         |         |
| Número de gerações  | 100                     |         |         |         |
| Número de indivíduos por geração                                | 50                      |         |         |         |
| Temperatura [ $^\circ$ C]                                       | 40                      |         |         |         |
| Altura da LT  | Nível do Mar            |         |         |         |
| Fator de superfície $f_s$                                       | 0,82                    |         |         |         |

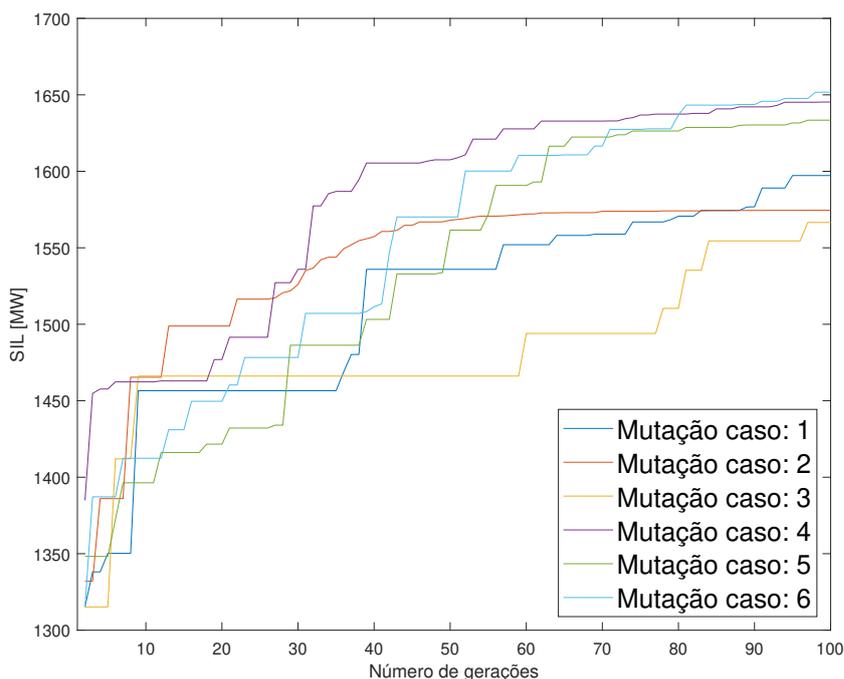


Figura 4.34: Comparativo entre os casos de mutação

É possível perceber que todos os resultados apresentam melhora com o passar das gerações. Mesmo o menor valor encontrado, referente ao caso 3, resulta em um modelo com um ganho de 22,25% em relação ao valor de SIL encontrado na tabela 4.5 enquanto o melhor caso apresentou um ganho de 28,88% no SIL. Percebe-se ainda que a Mutação caso 4, apresentou excelentes resultados em todas as simulações, tendo o melhor resultado nos cenários com 2 e 3 cabos por fase, e o segundo melhor resultado considerando o com 4 cabos.

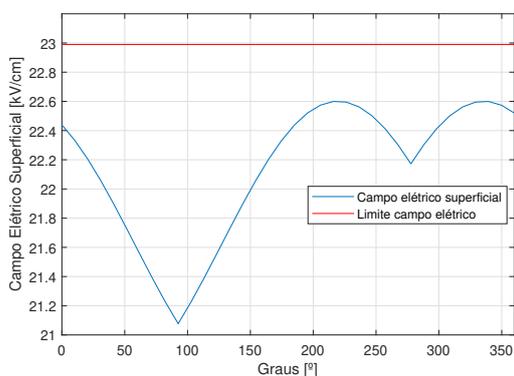


Figura 4.35: Campo elétrico superficial do melhor indivíduo com 4 condutores por fase

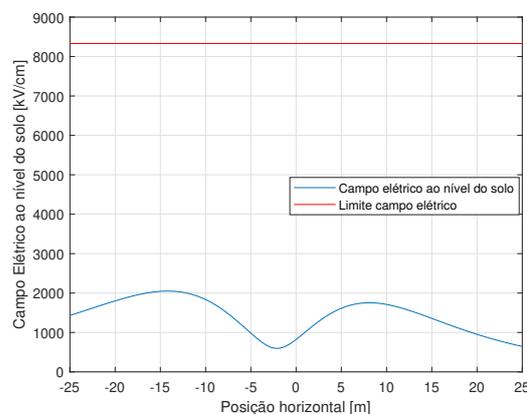


Figura 4.36: Campo elétrico ao nível do solo do melhor indivíduo com 4 condutores por fase

Percebe-se que a solução respeita os limites impostos de campo elétrico superficial e de campo elétrico ao nível do solo.

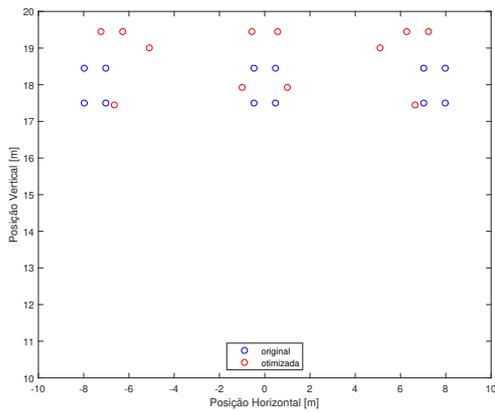


Figura 4.37: Comparativo posições originais e otimizadas para o caso 1 com 4 condutores

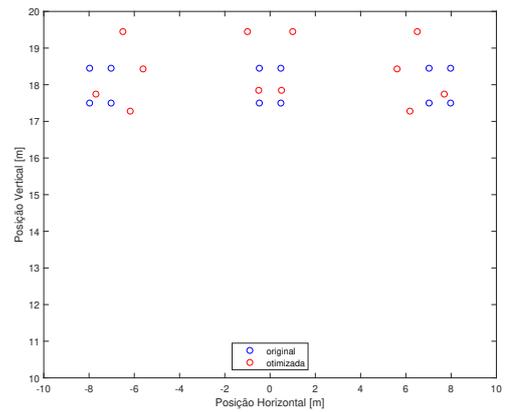


Figura 4.38: Comparativo posições originais e otimizadas para o caso 2 com 4 condutores

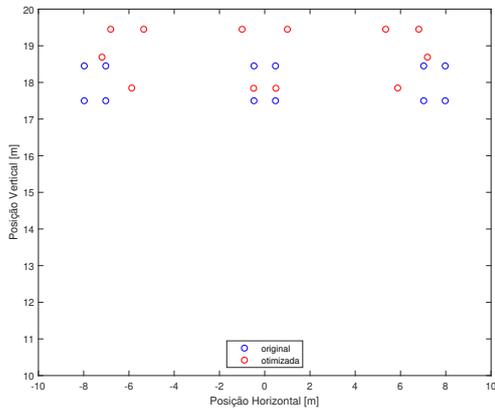


Figura 4.39: Comparativo posições originais e otimizadas para o caso 3 com 4 condutores

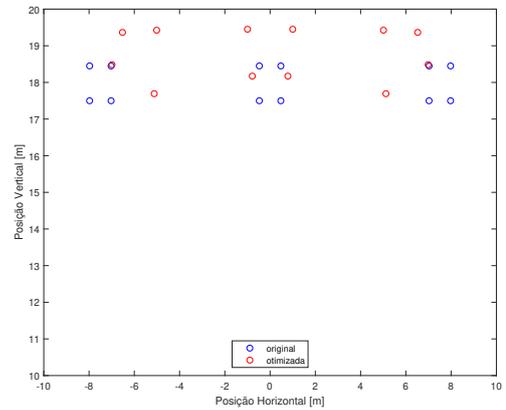


Figura 4.40: Comparativo posições originais e otimizadas para o caso 4 com 4 condutores

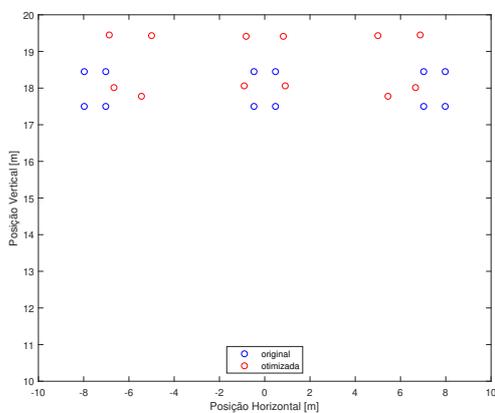


Figura 4.41: Comparativo posições originais e otimizadas para o caso 5 com 4 condutores

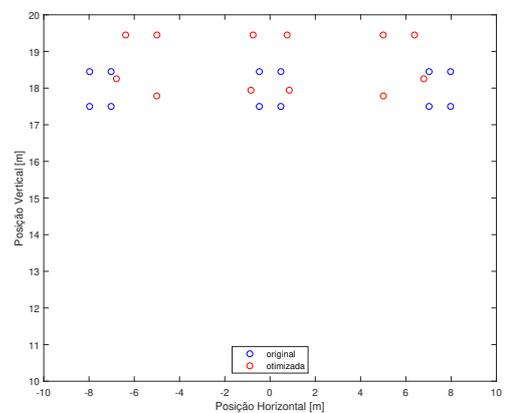


Figura 4.42: Comparativo posições originais e otimizadas para o caso 6 com 4 condutores

Observando a geometria dos cabos é perceptível as semelhanças entre os resultados, do

Tabela 4.16: Resultados encontrados para cada caso simulado

| Casos                 | SIL [MW] | Aumento    |
|-----------------------|----------|------------|
| Configuração Original | 1281,76  | Referência |
| Mutação Caso 1        | 1597     | 24,59 %    |
| Mutação Caso 2        | 1575     | 22,87 %    |
| Mutação Caso 3        | 1567     | 22,25 %    |
| Mutação Caso 4        | 1645     | 28,33 %    |
| Mutação Caso 5        | 1633     | 27,40 %    |
| Mutação Caso 6        | 1652     | 28,88 %    |

mesmo modo que nos casos anteriores, como o fato de todas as soluções apresentarem os condutores de mesma fase afastados entre si, e das fases estarem mais próximas, resultado observado também no capítulo anterior. Em sequência tem-se as tabelas 4.16 e 4.17 que representam respectivamente, os melhores valores de SIL encontrados para cada caso e as geometrias que os resultaram. A variação indicado é calculada segundo a fórmula 4.13.

$$\left(1 - \frac{\text{Valor encontrado}}{\text{Valor de referência}}\right) \quad (4.13)$$

Tabela 4.17: Características do cenário 3: LT 4 Cabos por Fase

| Fase                                  | A       |         |         |         | B       |         |         |         | C       |         |         |         |
|---------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Posição original                      |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
| Posição Horizontal dos condutores [m] | -6.381  | -5      | -6.79   | -5.006  | -0.7509 | -0.8474 | 0.8474  | 0.7509  | 5.006   | 6.79    | 5       | 6.381   |
| Altura dos condutores [m]             | 18.4499 | 17.5000 | 17.5000 | 18.4499 | 18.4499 | 17.5000 | 17.5000 | 18.4499 | 18.4499 | 17.5000 | 17.5000 | 18.4499 |
| Posição Mutação caso 1                |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
| Posição Horizontal dos condutores [m] | -7.235  | -6.277  | -6.648  | -5.099  | -0.5689 | -1      | 1       | 0.5689  | 5.099   | 6.648   | 6.277   | 7.235   |
| Altura dos condutores [m]             | 19.45   | 19.45   | 17.45   | 19.01   | 19.45   | 17.93   | 17.93   | 19.45   | 19.01   | 17.45   | 19.45   | 19.45   |
| Posição Mutação caso 2                |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
| Posição Horizontal dos condutores [m] | -6.505  | -5.612  | -7.697  | -6.178  | -1      | -0.5033 | 0.5033  | 1       | 6.178   | 7.697   | 5.612   | 6.505   |
| Altura dos condutores [m]             | 19.45   | 18.43   | 17.74   | 17.28   | 19.45   | 17.85   | 17.85   | 19.45   | 17.28   | 17.74   | 18.43   | 19.45   |
| Posição Mutação caso 3                |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
| Posição Horizontal dos condutores [m] | -6.807  | -5.347  | -7.191  | -5.877  | -1      | -0.4909 | 0.4909  | 1       | 5.877   | 7.191   | 5.347   | 6.807   |
| Altura dos condutores [m]             | 19.45   | 19.45   | 18.69   | 17.85   | 19.45   | 17.84   | 17.84   | 19.45   | 17.85   | 18.69   | 19.45   | 19.45   |
| Posição Mutação caso 4                |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
| Posição Horizontal dos condutores [m] | -6.522  | -5.011  | -6.985  | -5.118  | -1      | -0.7861 | 0.7861  | 1       | 5.118   | 6.985   | 5.011   | 6.522   |
| Altura dos condutores [m]             | 19.36   | 19.42   | 18.49   | 17.69   | 19.45   | 18.17   | 18.17   | 19.45   | 17.69   | 18.49   | 19.42   | 19.36   |
| Posição Mutação caso 5                |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
| Posição Horizontal dos condutores [m] | -6.87   | -5.001  | -6.663  | -5.446  | -0.8212 | -0.9061 | 0.9061  | 0.8212  | 5.446   | 6.663   | 5.001   | 6.87    |
| Altura dos condutores [m]             | 19.45   | 19.43   | 18.01   | 17.78   | 19.41   | 18.06   | 18.06   | 19.41   | 17.78   | 18.01   | 19.43   | 19.45   |
| Posição Mutação caso 6                |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
| Posição Horizontal dos condutores [m] | -6.381  | -5      | -6.79   | -5.006  | -0.7509 | -0.8474 | 0.8474  | 0.7509  | 5.006   | 6.79    | 5       | 6.381   |
| Altura dos condutores [m]             | 19.45   | 19.45   | 18.25   | 17.79   | 19.45   | 17.94   | 17.94   | 19.45   | 17.79   | 18.25   | 19.45   | 19.45   |

Após a demonstração dos resultados e comparações e validações das modelagens propostas, no próximo capítulo será discutida a conclusão do trabalho assim como o projeto de continuidade.

## Considerações Finais

### 5.1 Conclusões

Por meio do desenvolvimento dos estudos bibliográficos realizados é possível verificar a importância e o interesse por parte de empresas de energia e centros de pesquisa em estudos que visem o entendimento das técnicas de recapacitação de LT's para o aumento da capacidade de transmissão de LT's já existentes.

Com o desenvolvimento das ferramentas é possível realizar cálculos assertivos do perfil do campo elétrico ao nível do solo, do perfil do campo elétrico superficial e do campo elétrico superficial crítico, partindo dos parâmetros físicos da LT. No trabalho verifica-se que o SIL pode ser utilizado considerando a velocidade de fase como uma constante com baixas perdas de precisão, erros menores do que 5 % limite considerado como aceitável para variáveis de projeto. Porém optou-se pela utilização do método tradicional, tendo em vista que a diferença em tempo computacional era muito pequena (menor do que 0,1%) e o custo computacional do método não era uma variável crítica para o processo.

Após o levantamento dos tipos de metodologia da etapa de mutação do DE, é possível comparar as diferenças e as vantagens de cada metodologia, entender o funcionamento e como aplica-la nos projetos. Observou-se também que o caso 4, caso em que se gera o vetor doador a partir diferença entre 4 variáveis e em seguida o aplica no melhor indivíduo, obtiveram os melhores resultados para os casos apresentados nesse projeto.

Por fim é possível aplicar o algoritmo Evolutivo Diferencial à LT's de 1,2,3 e 4 cabos, junto de características construtivas como: tensão; raio dos condutores; posição dos condutores; temperatura de trabalho; e altura em relação a nível do mar, e obter resultados significativamente melhores, até mais de 28% respeitando as normas brasileiras sobre limites de campo elétrico ao nível do solo, os limites de campo elétrico superficial para a não ocorrência do efeito Corona e ainda respeitando os limites construtivos da LT.

## 5.2 Continuidade

Como continuidade do trabalho propõe-se:

- Adaptação do modelo utilizado para ser possível a utilização do código um número superior de cabos;
- Inclusão de análise de custo de eventual projeto de recapacitação de LTs;
- Verificar e avaliar a adoção de outros algoritmos de otimização;
- Inclusão da modelagem matemática dos esforços mecânicos sobre os condutores elétricos;

# Referências

- ALMEIDA, V. Recapitação de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica. 2020 *CEFET-MG Trabalho de Conclusão de Curso*, 2020.
- ANEEL. Limites à exposição humana a campos elétricos e magnéticos originários de instalações de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, Lei nº 11.934. , 5 de maio, 2009.
- CEMIG. 2-Três Marias-345 kV- Características da Linha. *Companhia Energética de Minas Gerais SA*, 1988.
- DUANE, I. A. M. *et al.* A New Strategy for Optimizing HSIL Transmission Lines. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, v.31, n.5, p.1288–1297, 2020.
- EPRI, A. Transmission Line Reference Book–200 kV and Above. *Electric Power Research Institute*, 2005.
- ESMERALDO, P. *et al.* A proposed design for the new Furnas 500 kV transmission lines– the High Surge Impedance Loading Line. *IEEE transactions on power delivery*, v.14, n.1, p.278–286, 1999.
- FORCE, U. P. S. O. T. Final report on the August 14, 2003 blackout in the United States and Canada: causes and recommendations. , 2004.
- GAO, L. A modified differential evolution algorithm. In: CHINESE CONTROL CONFERENCE, 29. *Proceedings...* 2010. p.1738–1741.
- GHASSEMI, M. High surge impedance loading (HSIL) lines: a review identifying opportunities, challenges, and future research needs. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v.34, n.5, p.1909–1924, 2019.
- GHASSEMI, M. Future Transmission Lines with Increased Loadability through Geometrical Optimized Phase Configurations and Sub-conductors in the Bundle. , p.1–5, 2020.

- KAY, S. M. *Fundamentals of statistical signal processing: estimation theory*. : Prentice-Hall, Inc., 1993.
- LABEGALINI, P. R. *et al. Projetos mecânicos das linhas aéreas de transmissão*. : Editora Blucher, 1992.
- MATLAB, S. Matlab. *The MathWorks, Natick, MA*, 2012.
- MATZENBACHER, L. S. Sistema de dimensionamento de condutores de linhas aéreas de transmissão e análise financeira preliminar. , 2015.
- NAYAK, R.; SEHGAL, Y.; SEN, S. EHV transmission line capacity enhancement through increase in surge impedance loading level. , p.4 pp.–, 2006.
- PAGANOTTI, A. ABORDAGEM MULTICRITÉRIO NA OTIMIZAÇÃO DE LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO. , 2012.
- PAGANOTTI, A. L. *et al.* The surge impedance loading optimization by an adaptive Deep Cut Ellipsoidal algorithm. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, v.51, n.s1, p.S157–S165, 2016.
- RAO, S. S. *Engineering optimization: theory and practice*. : John Wiley & Sons, 2019.
- RESENDE, P. ABORDAGEM MULTICRITÉRIO NA OTIMIZAÇÃO DE LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO. , 2019.
- SADIKU, M. Elementos de Eletromagnetismo. , 2004.
- SANTOS, P. RECAPACITAÇÃO NÃO CONVENCIONAL DE LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO. *2017 CEFET-MG Dissertação de pós-graduação*, 2017.
- SARMA, M. P.; JANISCHEWSKYJ, W. Analysis of corona losses on DC transmission lines: i-unipolar lines. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1969.
- SARMIENTO, J. Ampliação da Capacidade de Transmissão de Linhas Aéreas Melhorando a Geometria dos Feixes. , 2016.
- SERGIO, J. OTIMIZAÇÃO DE LINHAS AÉRIAS DE TRANSMISSÃO CONSIDERANDO NOVAS CONCEPÇÕES CONSTRUTIVAS PARA OS FEIXES DE CONDUTORES. *1995 UFRJ Tese de pós-graduação*, 1995.
- SILVA OLIVEIRA, G. T. da; SARAMAGO, S. F. P. ESTRATÉGIAS DE EVOLUÇÃO DIFERENCIAL APLICADAS A PROBLEMAS DE OTIMIZAÇÃO RESTRITOS. *Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica*, 2005.

- SILVA, T. Estudo das configurações geométricas das linhas de transmissão aéreas com vistas a obtenção de melhorias no campo elétrico. *2021 CEFET-MG Trabalho de Conclusão de Curso*, 2021.
- STORN, R.; PRICE, K. Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. *Journal of global optimization*, v.11, n.4, p.341–359, 1997.
- TAKAHASHI, R. H. Otimização escalar e vetorial. *Notas de aula*, 2007.