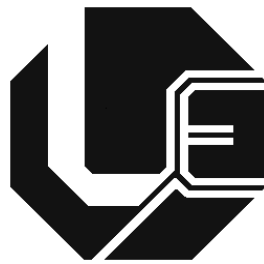


UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO



UMA CONTRIBUIÇÃO À OTIMIZAÇÃO
DA TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA
COM FOCO NA QUALIDADE DA TENSÃO

Ivan Nord

Uberlândia
2009

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

UMA CONTRIBUIÇÃO À OTIMIZAÇÃO
DA TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA COM
FOCO NA QUALIDADE DA TENSÃO

Dissertação apresentada por Ivan Nord
à Universidade Federal de Uberlândia,
para a obtenção do título de Mestre em
Ciências. Aprovada em 16 de março de
2009.

BANCA EXAMINADORA:

José Carlos de Oliveira, PhD. (Orientador) – UFU
Marco Aurélio Gonçalves de Oliveira, Dr. – UnB
José Wilson Resende, PhD. – UFU
Kleiber David Rodrigues, Dr. – UFU
Carlos Eduardo Tavares, Dr. – UFU

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU – MG, Brasil

- N828c Nord, Ivan, 1977-
Uma contribuição à otimização da transmissão de energia elétrica
com foco na qualidade da tensão [manuscrito] / Ivan Nord. - 2009.
106 p. : il.
- Orientador: José Carlos de Oliveira.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.
Inclui bibliografia.
1. Energia Elétrica - Transmissão - Teses. 2. Algoritmos Genéticos - Teses. I. Oliveira, José Carlos de, 1947 - II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

CDU: 621.315

UMA CONTRIBUIÇÃO À OTIMIZAÇÃO DA TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA COM FOCO NA QUALIDADE DA TENSÃO

Ivan Nord

Dissertação apresentada por Ivan Nord à Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Prof. José Carlos de Oliveira, PhD.
Orientador

Prof. Alexandre Cardoso, Dr.
Coordenador da Pós-Graduação

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha família, minha esposa Clarissa e meus filhos Isadora, Natalia e Lucas, que me fortalecem e são fontes de alegria, inspiração e motivação para a busca de evolução pessoal e profissional.

AGRADECIMENTOS

Ao Divino Mestre, que me clareia e me dá força para seguir no caminho de luz, paz e amor.

À minha família, que teve compreensão quando precisei me dedicar a elaboração deste trabalho, em especial a minha esposa Clarissa, companheira de todos os momentos.

Ao Prof. José Carlos de Oliveira, pela orientação sempre firme e precisa, amizade, dedicação, incentivo e colaboração na realização deste trabalho.

Ao amigo Eng. Alfredo Resende Neto, pela oportunidade que me concedeu de gerenciar o Projeto de Pesquisa & Desenvolvimento que culminou neste trabalho e pelo valoroso apoio em todo o período que trabalhamos juntos.

À equipe do Projeto de Pesquisa & Desenvolvimento, Prof. José Wilson, Angélica, Carlos Eduardo e demais colegas, pelas contribuições e amizade.

RESUMO

Nos sistemas elétricos a transmissão de energia elétrica realiza-se, principalmente, através de linhas aéreas, as quais, através de suas indutâncias e capacitâncias próprias, consomem ou geram energia reativa. Diante da reconhecida correlação entre tal energia e os níveis das tensões, fica evidenciado que, os indicadores atrelados com a qualidade da tensão no sistema estão, intimamente, relacionados com as características construtivas das linhas aéreas de transmissão. Neste contexto e, em vista do tema central desta dissertação, o qual encontra-se direcionado ao estabelecimento de meios para a busca de configurações físicas construtivas de linhas fundamentadas na tecnologia das transmissões, em que pese a otimização da transmissibilidade de energia, procurou-se correlacionar, de um lado, os métodos de busca das melhores estruturas de linhas que conduzam a ganhos de potência transferida, sem ignorar, de outro lado, os parâmetros de desempenho das soluções encontradas. Neste particular, adicionalmente à apresentação de uma síntese dos equacionamentos clássicos, visando à obtenção das indutâncias e capacitâncias representativas de uma dada estrutura, a dissertação pauta pela discussão de métodos modernos de otimização de processos, com destaque à utilização dos denominados Algoritmos Genéticos (AG). Com base nesta metodologia, é obtido um aplicativo computacional focando a maximização da potência transmissível, cujo uso é exemplificado através de aplicações que motivaram a presente pesquisa, a saber, sistemas de transmissão de 34,5kV e 138kV, portanto, no contexto de distribuição de energia. Através destes estudos procura-se destacar a potencialidade e versatilidade do método e constatados níveis ilustrativos de ganhos na transmissibilidade de potência para as condições de contorno adotadas.

Palavras-Chave: Linhas de transmissão de energia elétrica, qualidade da tensão, algoritmo genético.

ABSTRACT

It is well known that the electrical energy transmission procedures make use of traditional overhead lines. The operation performances of these lines are strongly dependent on their equivalent inductances and capacitances which are strictly tight to the concept of reactive energy consumption and generation. Due to the relationship between this type of energy and the operational voltage levels, it is quite straightforward that the voltage quality standards are directly linked to the constructive characteristics of the overhead lines. Within this context and considering the main target of this dissertation, focusing the optimization of transmission energy procedures without ignoring the voltage quality matters, the present research makes use of a modern technical approach based on Genetic Algorithm (GA) to look for the best physical arrangement for a given transmission line, without forgetting the power quality requirements. In addition to an introductory chapter related to classical principles leading to the line equivalent inductances and capacitances, the methods to cope with optimization processes are described with emphasis to the mentioned GA. Using this approach, a computational program is obtained and tests are conducted to highlight its application. Two distribution lines are considered a 34.5 and a 138 kV line. Throughout these examples the software potentiality is clearly shown and the gains on power transmissibility are illustrated.

Key-words: Transmission lines, Power quality, Genetic Algorithm.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO GERAL	1
1.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	1
1.2 – DIRETRIZES DESTA DISSERTAÇÃO	4
1.3 – CONTRIBUIÇÕES OFERECIDAS POR ESTA DISSERTAÇÃO	5
1.4 – ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	5

CAPÍTULO II

MODELAGEM MATEMÁTICA DAS LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	8
2.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	8
2.2 – RELAÇÕES ENTRE TENSÕES E CORRENTES	9
2.3 – RELAÇÕES DE POTÊNCIA	17
2.4 – PARÂMETROS ELÉTRICOS	21
2.4.1 – IMPEDÂNCIA LONGITUDINAL	23
2.4.2 – ADMITÂNCIA TRANSVERSAL.....	29
2.4.3 – REDUÇÃO DAS MATRIZES DE PARÂMETROS.....	30
2.4.4 – TRANSPOSIÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO.....	39
2.4.5 – IMPEDÂNCIAS E ADMITÂNCIAS SEQUENCIAIS	41
2.5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS	44

CAPÍTULO III

OTIMIZAÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO VIA ALGORITMO GENÉTICO	45
3.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	45
3.2 – CONSIDERAÇÕES SOBRE OS MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO	47
3.3 – ALGORITMOS GENÉTICOS.....	51

3.3.1 – CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS AG.....	51
3.3.2 – PRINCIPAIS CONCEITOS.....	53
3.3.3 – PARÂMETROS.....	54
3.3.4 – OPERAÇÕES BÁSICAS.....	56
3.4 – APLICATIVO COMPUTACIONAL PARA A MAXIMIZAÇÃO DA POTÊNCIA TRANSMISSÍVEL VIA ALGORITMO GENÉTICO	61
3.4.1 – EXEMPLO DE APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PARA UMA LINHA DE TRANSMISSÃO DE 34,5 kV	65
3.4.2 – EXEMPLO DE APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PARA UMA LINHA DE TRANSMISSÃO DE 138 kV	70
3.5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	75

CAPÍTULO IV

APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PARA MAXIMIZAÇÃO DA POTÊNCIA TRANSMISSÍVEL	77
4.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	77
4.2 – LINHAS DE TRANSMISSÃO DE 34,5 kV E 138 kV COM FEIXE CIRCULAR	78
4.3 – LINHAS DE TRANSMISSÃO DE 34,5 kV E 138 kV COM FEIXES HORIZONTAL E VERTICAL	83
4.4 – LINHAS DE TRANSMISSÃO DE 34,5 kV E 138 kV COM FEIXES CIRCULARES EXPANDIDOS	88
4.5 – SÍNTESE DOS RESULTADOS	97
4.6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	99

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES.....	101
------------------------	------------

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	104
--	------------

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Circuito equivalente de um elemento dx de uma linha.	10
Figura 2.2 – Circuito π equivalente de uma linha de transmissão.....	14
Figura 2.3 – Quadripolo típico.	15
Figura 2.4 – Disposição dos cabos condutores e imagens.....	24
Figura 2.5 – Esquemas de transposição nas linhas trifásicas.	40
Figura 3.1 – Gráfico da função unimodal $f(x)=1/(0.3+x^2+y^2)$	49
Figura 3.2 – Gráfico da função multimodal $f(x)=x\sin 4x+1.1\sin 2y+20$	50
Figura 3.3 – Estrutura e pseudocódigo de um algoritmo genético básico.	57
Figura 3.4 – Exemplo do método da roleta utilizado para a seleção dos indivíduos.....	58
Figura 3.5 – Cruzamento por um ponto.....	59
Figura 3.6 – Cruzamento por dois pontos.....	59
Figura 3.7 – Exemplo de Mutação.	60
Figura 3.8 – Identificação da linha e entrada de dados.	62
Figura 3.9 – Processo de Convergência.	63
Figura 3.10 – Resultados da simulação.	64
Figura 3.11 – Disposição construtiva em configuração horizontal, com quatro subcondutores por fase, feixe circular.	65
Figura 3.12 – Entrada de Parâmetros do AG.....	67
Figura 3.13 – Inicialização da população e cálculo das primeiras gerações.	68
Figura 3.14 – Cálculo de aptidão da quadragésima sétima geração.....	68
Figura 3.15 – Convergência do AG e apontamento da potência máxima transmissível encontrada.....	69
Figura 3.16 – Resultados encontrados.....	69
Figura 3.17 – Disposição em configuração triangular isósceles, com quatro subcondutores por fase, feixe circular.....	70
Figura 3.18 - Entrada de Parâmetros do AG.	72
Figura 3.19 – Inicialização da população e primeiros cálculos de aptidão.	73
Figura 3.20 – Cálculo de aptidão da quadragésima terceira geração.	73
Figura 3.21 – Convergência do AG.....	74
Figura 3.22 – Resultados apresentados pelo AG.....	74

Figura 4.1 – Disposição para linhas 34,5kV com quatro subcondutores por fase, feixe horizontal.....	83
Figura 4.2 – Disposição em configuração triangular para linhas 138kV com quatro subcondutores por fase, feixe horizontal.	84
Figura 4.3 – Disposição para linhas 34,5kV com quatro subcondutores por fase, feixe vertical.	84
Figura 4.4 – Disposição em configuração triangular para linhas 138kV com quatro subcondutores por fase, feixe vertical.	85
Figura 4.5 – Disposição em configuração horizontal para linhas 34,5kV com quatro subcondutores por fase, feixe circular expandido.	89
Figura 4.6 – Entrada de Parâmetros do AG.....	90
Figura 4.7 – Inicialização da população e cálculo das primeiras gerações.	90
Figura 4.8 – Convergência do AG e apontamento da potência máxima transmissível encontrada.....	91
Figura 4.9 – Resultados encontrados.....	91
Figura 4.10 – Disposição em configuração triangular para linhas 138kV com quatro subcondutores por fase, feixe circular expandido.	92
Figura 4.11 – Entrada de Parâmetros do AG.....	93
Figura 4.12 – Convergência do AG.....	93
Figura 4.13 – Resultados encontrados.....	94
Figura 4.14 – Ganho percentual da potência transmissível para disposição horizontal das fases, 34,5kV.	97
Figura 4.15 – Ganho percentual da potência transmissível para disposição vertical das fases, 34,5kV.	98
Figura 4.16 – Ganho percentual da potência transmissível para disposição triangular eqüilátera das fases, 138kV.	98
Figura 4.17 – Ganho percentual da potência transmissível para disposição triangular isósceles das fases, 138kV.....	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Métodos de Procura.	48
Tabela 3.2 – Principais conceitos dos algoritmos genéticos.	54
Tabela 3.3 – Dados da linha de transmissão convencional de 34,5kV com disposição horizontal.	66
Tabela 3.4 – Limites das variáveis que definem o espaço de busca para o exemplo 34,5kV. .	66
Tabela 3.5 – Dados da linha de transmissão convencional de 138kV com disposição triangular eqüilátera.	71
Tabela 3.6 – Limites das variáveis que definem o espaço de busca para exemplo 138kV.	72
Tabela 4.1 – Dados da linha de transmissão convencional de 34,5kV com disposição vertical.	79
Tabela 4.2 – Resultados das simulações de linhas de transmissão de 34,5kV, com configuração horizontal e vertical, cabo 1/0AWG e sem cabo guarda.	80
Tabela 4.3 – Resultados das simulações de linhas de transmissão de 34,5kV, com configuração horizontal e vertical, cabo 4/0AWG e sem cabo guarda.	81
Tabela 4.4 – Resultados das simulações de linhas de transmissão de 138kV, com configuração triangular eqüilátera e isósceles, cabos 336,4MCM e 556,5MCM, com cabo guarda.	82
Tabela 4.5 – Resultados das simulações de linhas de transmissão de 34,5kV, com configuração horizontal e vertical de fases, cabo 4/0AWG, feixes horizontais e verticais, sem cabo guarda.	86
Tabela 4.6 – Resultados das simulações de linhas de transmissão de 138kV, com configuração triangular eqüilátero e isósceles de fases, cabo 336,4MCM, feixes horizontais e verticais, com cabo guarda.	87
Tabela 4.7 – Resultados das simulações de linhas de transmissão de 34,5kV, com configuração horizontal e vertical de fases, cabo 4/0AWG, feixe circular expandido, sem cabo guarda.	95
Tabela 4.8 – Resultados das simulações de linhas de transmissão de 138kV, com configuração triangular eqüilátero e isósceles de fases, cabo 336,4MCM, feixe circular expandido, com cabo guarda.	96

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO GERAL

1.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

As linhas de transmissão de energia elétrica são componentes essenciais dentro de um sistema elétrico, especialmente em países onde a geração encontra-se distante dos centros consumidores. Além disso, os programas de governo, buscando o atendimento energético a toda população, associados ao desenvolvimento tecnológico que torna o ser humano cada vez mais dependente da eletricidade, têm levado a um aumento substancial de demanda de energia em todo o mundo. Tais fatores suscitam a necessidade de construção de novas linhas de transmissão para a garantia da continuidade do fornecimento de energia elétrica nas regiões consumidoras. Contudo, o elevado custo para a implantação de novas linhas, associado às crescentes e necessárias dificuldades impostas pelos órgãos ambientais, tem conduzido ao conceito da recapacitação das linhas já existentes. No Brasil, a busca de novas concepções de linhas de transmissão é constante e o desafio de transportar maiores potências a maiores

distâncias é permanente em um país de grande extensão territorial e em constante desenvolvimento.

Nos últimos anos, vários estudos voltados para a avaliação de diferentes composições estruturais de linhas, objetivando o aumento da potência transmissível, têm sido realizados, a exemplo dos expostos nas referências [1], [2], [3], [4], [5], [6] e [7]. Este novo conceito atua na configuração geométrica dos condutores, onde uma análise da tendência destas mudanças revela a intenção de buscar soluções que primem por uma configuração em que as fases tendam a se aproximar enquanto que os seus subcondutores tendam a se afastar (feixes expandidos). Esta concepção de linhas de transmissão envolve a tecnologia chamada Linha de Potência Natural Elevada – LPNE (*HSIL – High Surge Impedance Loading Line*) que chegou ao Brasil no início da década de 80 advinda da Rússia. As publicações sobre o tema comprovam ganhos consideráveis de potência transmissível, obtidos através de estudos de casos para diferentes composições geométricas [8] e [9]. Dentro deste cenário, surge a idéia de se avaliar qual seria a melhor configuração possível, de acordo com os parâmetros construtivos e operacionais da linha existente, tais como comprimento, nível de tensão, número de subcondutores, tipo e bitola dos condutores, tipo de estrutura mecânica, disposição geométrica das fases e dos feixes, etc. Portanto, a possibilidade de reabilitação das linhas convencionais existentes levanta a necessidade da otimização das mesmas objetivando o aumento de sua capacidade.

De um modo geral, para as formas construtivas convencionais, a impedância característica ou a impedância de surto das linhas tem aproximadamente o mesmo valor para certa quantidade de cabos por fase, independente da classe de tensão, fato este que resulta em que a potência natural varie proporcionalmente ao quadrado da tensão. Deste modo, como entre as classes de tensão padronizadas adjacentes, geralmente, o valor da tensão é o dobro da anterior, a potência natural será quatro vezes maior. Assim sendo, sabe-se que para uma linha

de 34,5 kV a potência natural será de 3 MW, de 69 kV será de 12 MW, de 138 kV a potência será 48 MW, e assim por diante. Estes valores enfatizam que a variação de potência de uma classe para a outra é muito elevada e que, diante desta situação, a transmissão de uma potência um pouco maior que o valor da potência natural de qualquer classe, implicará em grandes investimentos associados com a mudança da classe de tensão. Diante desta conjuntura e buscando alternativas para a solução da questão, há tempos reconhece-se a viabilidade construtiva de linhas de transmissão e que permitem ampliar consideravelmente a capacidade de transmissão para cada classe de tensão [10], [11] e [12]. Assim procedendo tornou-se factível obter configurações físicas construtivas que trouxeram expressivos impactos no custo global dos sistemas de energia elétrica. Todavia, a obtenção da configuração ótima sob os aspectos técnicos e econômicos não se constitui numa tarefa analítica simples. Isto se deve, sobretudo, à inter-relação entre os mencionados parâmetros equivalentes e representativos das linhas, as restrições mecânicas e elétricas e os indicadores de desempenho da linha, a exemplo da regulação de tensão, balanço de reativos, perdas, etc.

Reconhecendo então a complexidade e as implicações advindas da interação entre os aspectos construtivos, parâmetros elétricos e indicadores de desempenho, a utilização de métodos de otimização que permitam entrelaçar todos estes aspectos, culminando pela indicação de uma solução técnica em que pese a viabilidade construtiva, as questões da factibilidade econômica e o atendimento às premissas estabelecidas, constitui-se em um desafio importante para a área em pauta.

Procurando, pois, dar os primeiros passos para o domínio desta tecnologia, com destaque à sua aplicação no cenário dos sistemas de distribuição, foram então delineados os rumos desta pesquisa visando seu coroamento através de uma dissertação de mestrado, cujas metas principais encontram-se explicitadas na sequência.

1.2 – DIRETRIZES DESTA DISSERTAÇÃO

Em consonância com os propósitos anteriormente descritos, a presente dissertação foi idealizada com vistas a contemplar os seguintes pontos focais:

- Modelagem matemática das linhas de transmissão: com destaque aos cálculos dos parâmetros elétricos e dos indicadores de desempenho das mesmas, para qualquer arranjo físico dos cabos condutores, permitindo assim, a análise de linhas não convencionais. Os modelos apresentados são genéricos e aplicáveis a qualquer classe de tensão e permitem ainda configurações genéricas das fases e dos feixes de subcondutores;
- Não obstante a generalização das equações, ressalta-se que o trabalho, sempre que se fizer necessário, será direcionado a aplicações relacionadas com duas tensões nominais, a de 34,5 kV e 138 kV. Estes níveis são os mais comuns dentre as concessionárias de distribuição de energia elétrica no Brasil. No que tange a tais sistemas vale ressaltar que, apesar da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) definir as linhas de tensão nominal menor ou igual a 138kV como linhas de distribuição, no decorrer deste trabalho será, por vezes, utilizado o termo “linha de transmissão” para designá-las;
- Apresentação dos métodos de otimização aplicáveis à questão em foco, com destaque ao procedimento selecionado para fins desta pesquisa, qual seja, o Algoritmo Genético, o qual é detalhado quanto ao seu princípio e principais características;
- Desenvolvimento de um aplicativo computacional, o qual, utilizando a ferramenta de otimização acima e as formulações apresentadas, prima pela

obtenção da melhor configuração construtiva das linhas de transmissão através da correlação entre os requisitos operacionais impostos e os parâmetros de desempenho desejados;

- Aplicação da metodologia sistematizada através do *software* à situações típicas encontradas nas concessionárias de distribuição de energia.

1.3 – CONTRIBUIÇÕES OFERECIDAS POR ESTA DISSERTAÇÃO

Tendo contextualizado o tema e estabelecidas as diretrizes que nortearam a concepção e o desenvolvimento da presente pesquisa, vale ressaltar que esta dissertação apresenta as seguintes contribuições:

- Verificação e comprovação da aplicabilidade e versatilidade de algoritmos genéticos para a otimização da disposição dos condutores de linhas de transmissão;
- Desenvolvimento de um aplicativo computacional para maximização da potência transmissível de linhas de transmissão via algoritmo genético;
- Caracterização do uso do *software* através de sua aplicação a redes de 34,5 e 138 kV, visando mostrar o seu uso, potencialidade, aplicabilidade e limitações para o presente estágio dos desenvolvimentos.

1.4 – ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Com o intuito de atender às metas supracitadas, esta dissertação apresenta-se estruturada, além deste capítulo introdutório, com as seguintes unidades principais:

CAPÍTULO II – MODELAGEM MATEMÁTICA DAS LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.

Este capítulo destina-se a apresentar as expressões matemáticas que representam as linhas aéreas de transmissão de energia elétrica, com destaque ao cálculo dos parâmetros elétricos equivalentes com configurações não convencionais dos condutores e subcondutores e grandezas de desempenho das linhas quanto à regulação de tensão e rendimento.

CAPÍTULO III – OTIMIZAÇÃO VIA ALGORITMO GENÉTICO.

Nesta seção são discutidos os métodos de busca existentes para a otimização de soluções de problemas diversos e, de modo especial são ressaltados os atrativos oferecidos pelos conhecidos Algoritmos Genéticos. Além da descrição dos princípios da metodologia selecionada, através de exemplos, procede-se a esclarecimentos sobre a aplicabilidade da técnica escolhida.

CAPÍTULO IV – APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PARA MAXIMIZAÇÃO DA POTÊNCIA TRANSMISSÍVEL.

Esta etapa está centrada na aplicação da metodologia proposta, utilizando-se, para tanto, de linhas aéreas de transmissão com diferentes configurações para os cabos condutores no que tange aos espaçamentos entre fases, da distância entre subcondutores e altura média dos mesmos para cada disposição das fases, indicando, ao final, os ganhos obtidos para a potência máxima transmissível

através do processo de otimização e evidenciando o uso e potencialidade do *software* obtido.

CAPÍTULO V – CONCLUSÕES

Esta última seção do trabalho objetiva sintetizar as principais contribuições do trabalho e suas conclusões finais a respeito dos pontos focados ao longo da pesquisa como um todo, apontando os avanços obtidos e as direções futuras para as complementações necessárias visando um produto final.

CAPÍTULO II

MODELAGEM MATEMÁTICA DAS LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

2.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Diante do contexto geral desta pesquisa, fica evidenciado que o processo de busca das melhores configurações construtivas das linhas de transmissão passa, necessariamente, pelo conhecimento dos parâmetros elétricos equivalentes destas. Tais elementos, como se sabe, são definidos pelos valores das indutâncias, capacitâncias e resistências. As duas primeiras grandezas são fortemente influenciadas pelos arranjos construtivos físicos, por vezes conhecidos por topologia construtiva, e esta propriedade é a grande responsável por conferir distintos valores para as potências transmissíveis, conforme seja a escolha feita para as distâncias entre fases, número de subcondutores que perfazem uma fase, distâncias das fases e o referencial de terra, etc.

À luz de tais interdependências, que ficarão mais esclarecidas ao longo dos desenvolvimentos contidos neste capítulo da dissertação, torna-se imperativo se tecer discussões, formulações e outros aspectos, atrelados com a vinculação construtiva e seus efeitos sobre os mencionados parâmetros equivalentes. Neste particular, muito embora se reconheça que o tema seja clássico, acredita-se ser relevante contemplar tais aspectos, e, focando tais objetivos, o presente capítulo tem por metas principais:

- Apresentar uma síntese didática dos equacionamentos básicos pertinentes à matéria;
- Abordar as correlações entre as dependências entre as potências transmissíveis e os parâmetros que as regem;
- Explorar, com o devido detalhamento e generalização, os conceitos físicos e matemáticos associados com as formulações propostas, de modo a contemplar as correlações entre os dados físicos construtivos e os parâmetros elétricos equivalentes visando o processo de otimização alvo desta pesquisa;
- Avaliar e analisar as variáveis de influência sobre as capacidades de transmissão para fins de definição da lógica de otimização a ser empregada.

2.2 – RELAÇÕES ENTRE TENSÕES E CORRENTES

Utilizando, para o momento, de um tratamento simplificado através do qual uma linha trifásica é modelada apenas por uma fase e seu respectivo neutro, e ainda, admitindo um elemento de comprimento dx no sentido longitudinal, tem-se que o circuito equivalente da figura 2.1 representa o trecho incremental em pauta [13].

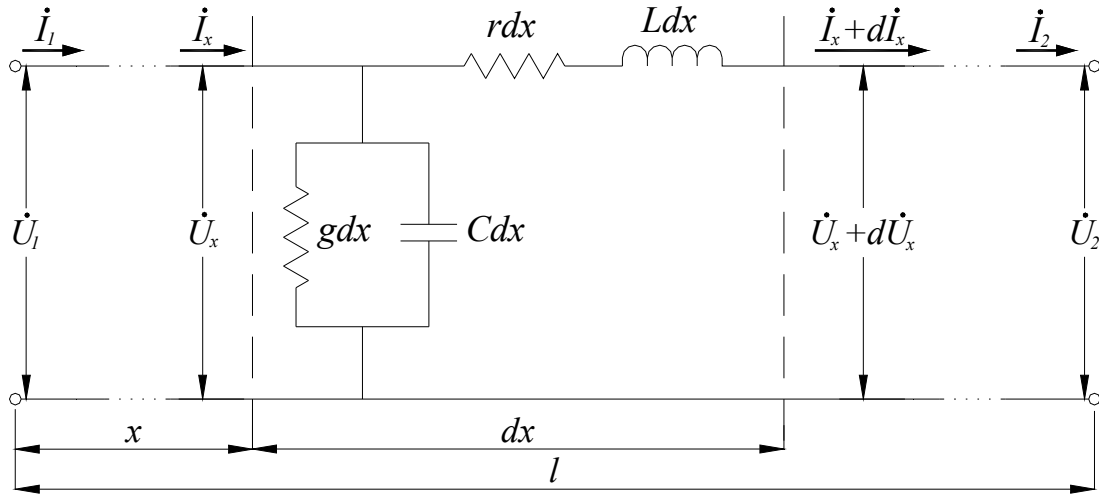


Figura 2.1 – Circuito equivalente de um elemento dx de uma linha.

Onde:

- $\dot{U}_x$ Tensão de fase no início do elemento de comprimento considerado (V);
- $\dot{I}_x$ Corrente de fase no início do elemento de comprimento considerado (A);
- r Resistência elétrica por unidade de comprimento (Ω / km);
- L Indutância por unidade de comprimento (H / km);
- g Condutância por unidade de comprimento (S / km);
- C Capacitância por unidade de comprimento (F / km);
- x Distância de um ponto da linha até o ponto de referência estabelecido (km);
- l Comprimento total da linha (km);
- $\dot{U}_1$ Tensão de fase no terminal emissor da linha (V);
- $\dot{I}_1$ Corrente de fase no terminal emissor da linha (A);
- $\dot{U}_2$ Tensão de fase no terminal receptor da linha (V);
- $\dot{I}_2$ Corrente de fase no terminal receptor da linha (A);

A impedância longitudinal por unidade de comprimento $\dot{z}$ (Ω / km) e a admitância transversal por unidade de comprimento $\dot{y}$ (S / km) são:

$$\dot{z} = r + j\omega L \quad (1)$$

$$\dot{y} = g + j\omega C \quad (2)$$

O elemento diferencial de tensão ($d\dot{U}_x$) no domínio da frequência é:

$$-d\dot{U}_x = \dot{I}_x \dot{z} dx \quad (3)$$

$$-\frac{d\dot{U}_x}{dx} = \dot{z} \dot{I}_x \quad (4)$$

Analogamente:

$$-d\dot{I}_x = \dot{U}_x \dot{y} dx \quad (5)$$

$$-\frac{d\dot{I}_x}{dx} = \dot{y} \dot{U}_x \quad (6)$$

Derivando as expressões (4) e (6) em relação a x obtém-se:

$$-\frac{d^2\dot{U}_x}{dx^2} = \dot{z} \frac{d\dot{I}_x}{dx} \quad (7)$$

$$-\frac{d^2 \dot{I}_x}{dx^2} = \dot{y} \frac{d\dot{U}_x}{dx} \quad (8)$$

Substituindo os valores de $\frac{d\dot{I}_x}{dx}$ e $\frac{d\dot{U}_x}{dx}$, encontrados nas expressões (6) e (4):

$$\frac{d^2 \dot{U}_x}{dx^2} = \dot{z} \dot{y} \dot{U}_x \quad (9)$$

$$\frac{d^2 \dot{I}_x}{dx^2} = \dot{z} \dot{y} \dot{I}_x \quad (10)$$

Resolvendo-se as equações diferenciais:

$$\dot{U}_x = \frac{\dot{U}_1 + \dot{Z}_c \dot{I}_1}{2} e^{-\dot{\gamma} x} + \frac{\dot{U}_1 - \dot{Z}_c \dot{I}_1}{2} e^{\dot{\gamma} x} \quad (11)$$

$$\dot{I}_x = \frac{\dot{U}_1 + \dot{Z}_c \dot{I}_1}{2 \dot{Z}_c} e^{-\dot{\gamma} x} - \frac{\dot{U}_1 - \dot{Z}_c \dot{I}_1}{2 \cdot \dot{Z}_c} e^{\dot{\gamma} x} \quad (12)$$

Onde:

$\dot{Z}_c$ Impedância característica da linha, sendo calculada por $\dot{Z}_c = \sqrt{\dot{z}/\dot{y}}$. Para linha sem perdas reduz-se a $Z_0 = \sqrt{L/C}$ que é, normalmente, denominada de impedância de surto ou impedância natural da linha;

$\dot{\gamma}$ Constante de propagação, calculada por $\dot{\gamma} = \sqrt{\dot{z}\dot{y}}$.

Fica pois evidenciado que as expressões (11) e (12) permitem a determinação das tensões e correntes em qualquer ponto ao longo das linhas, em função das condições no emissor ou fonte.

Em geral, as linhas possuem um comprimento definido entre transmissor e emissor. Conhecidas ou especificadas as tensões e correntes em um dos terminais da linha calcula-se estas grandezas na outra extremidade. Focando tal objetivo, pode-se reescrever as equações considerando o comprimento total da linha $l(km)$ e, utilizando funções hiperbólicas, é possível chegar a:

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_1 \cosh(\dot{\gamma} l) - \dot{I}_1 \dot{Z}_c \sinh(\dot{\gamma} l) \quad (13)$$

$$\dot{I}_2 = -\frac{\dot{U}_1}{\dot{Z}_c} \sinh(\dot{\gamma} l) + \dot{I}_1 \cosh(\dot{\gamma} l) \quad (14)$$

Reciprocamente:

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 \cosh(\dot{\gamma} l) + \dot{I}_2 \dot{Z}_c \sinh(\dot{\gamma} l) \quad (15)$$

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_2}{\dot{Z}_c} \sinh(\dot{\gamma} l) + \dot{I}_2 \cosh(\dot{\gamma} l) \quad (16)$$

Na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\dot{\gamma} l) & -\dot{Z}_c \sinh(\dot{\gamma} l) \\ -\frac{1}{\dot{Z}_c} \sinh(\dot{\gamma} l) & \cosh(\dot{\gamma} l) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\dot{\gamma}l) & \dot{Z}_c \sinh(\dot{\gamma}l) \\ \frac{1}{\dot{Z}_c} \sinh(\dot{\gamma}l) & \cosh(\dot{\gamma}l) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} \quad (18)$$

A regulação de tensão de uma linha, em um determinado regime de carga, é dada pela variação percentual entre os módulos das tensões entre transmissor e receptor, com relação a esta última. Assim [13]:

$$Reg\% = \frac{|\dot{U}_1| - |\dot{U}_2|}{|\dot{U}_2|} \cdot 100 \quad (19)$$

Para a representação genérica das linhas nos circuitos e modelos matemáticos dos sistemas elétricos, e objetivando a análise em regime permanente, pode-se utilizar o circuito π equivalente, como indicado na figura 2.2 [13] e [14].

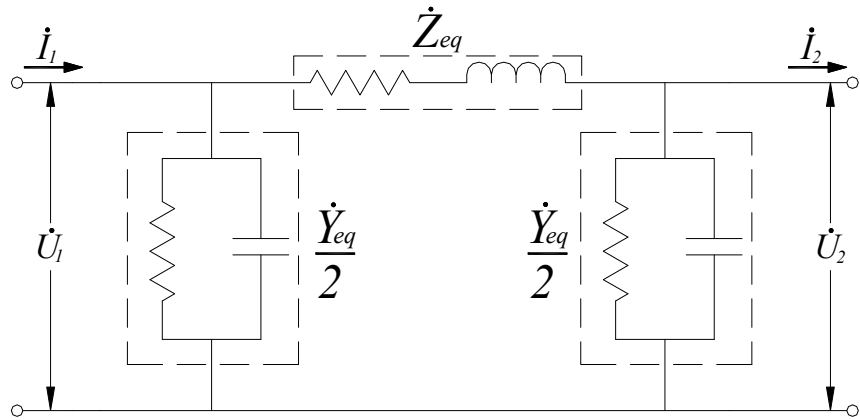


Figura 2.2 – Circuito π equivalente de uma linha de transmissão.

Sendo a admitância transversal equivalente total $\dot{Y}_{eq}$ (S) e a impedância longitudinal equivalente total $\dot{Z}_{eq}$ (Ω) calculadas por:

$$\dot{Y}_{eq} = \dot{Y} \frac{\tanh\left(\frac{\dot{\gamma}l}{2}\right)}{\frac{\dot{\gamma}l}{2}} \quad (20)$$

$$\dot{Z}_{eq} = \dot{Z} \frac{\sinh(\dot{\gamma} l)}{\dot{\gamma} l} \quad (21)$$

Onde:

$\dot{Y}$ Admitância transversal total da linha de transmissão (S);

$\dot{Z}$ Impedância longitudinal total da linha de transmissão (Ω);

Também, como é amplamente conhecido, a exemplo de outros componentes, as linhas de transmissão podem ser representadas na forma de quadripolos e suas respectivas constantes generalizadas [13]. Esta estratégia é representada na figura 2.3:

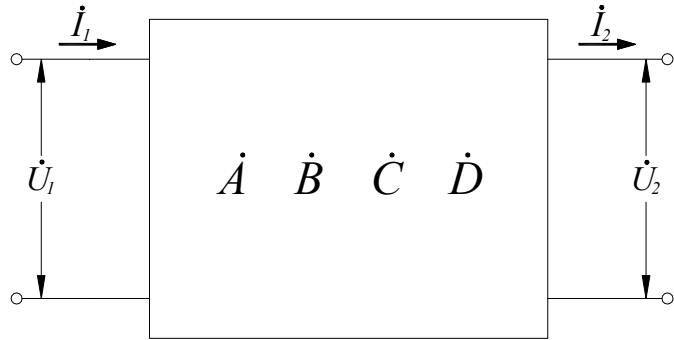


Figura 2.3 – Quadripolo típico.

Adotando-se a forma matricial, as relações entre as tensões e correntes na entrada e saída do quadripolo podem ser expressas da forma:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{A} & \dot{B} \\ \dot{C} & \dot{D} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} \quad (22)$$

Comparando-se as equações exatas das linhas de transmissão, representadas na forma matricial na equação (18), com a equação (22), obtêm-se as constantes generalizadas:

$$\dot{A} = \cosh(\dot{\gamma} l) \quad (23)$$

$$\dot{B} = \dot{Z}_c \sinh(\dot{\gamma} l) \quad (24)$$

$$\dot{C} = \frac{1}{\dot{Z}_c} \sinh(\dot{\gamma} l) \quad (25)$$

$$\dot{D} = \cosh(\dot{\gamma} l) \quad (26)$$

Utilizando-se o circuito π equivalente para representar a linha de transmissão, então as constantes generalizadas serão:

$$\dot{A} = 1 + \frac{\dot{Z}_{eq} \dot{Y}_{eq}}{2} \quad (27)$$

$$\dot{B} = \dot{Z}_{eq} \quad (28)$$

$$\dot{C} = \dot{Y}_{eq} \left(1 + \frac{\dot{Z}_{eq} \dot{Y}_{eq}}{4} \right) \quad (29)$$

$$\dot{D} = 1 + \frac{\dot{Z}_{eq} \dot{Y}_{eq}}{2} \quad (30)$$

2.3 – RELAÇÕES DE POTÊNCIA

As expressões para as potências ativas e reativas, em função das grandezas operacionais e das constantes generalizadas podem ser expressas por [13]:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_1 = \frac{|\dot{D}||\dot{U}_1|^2}{|\dot{B}|} \cos(\alpha_B - \alpha_D) - \frac{|\dot{U}_1||\dot{U}_2|}{|\dot{B}|} \cos(\alpha_B + \delta) \\ Q_1 = \frac{|\dot{D}||\dot{U}_1|^2}{|\dot{B}|} \sin(\alpha_B - \alpha_D) - \frac{|\dot{U}_1||\dot{U}_2|}{|\dot{B}|} \sin(\alpha_B + \delta) \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (31) \\ (32) \end{array}$$

No transmissor

$$\left\{ \begin{array}{l} P_2 = \frac{|\dot{U}_1||\dot{U}_2|}{|\dot{B}|} \cos(\alpha_B - \delta) - \frac{|\dot{A}||\dot{U}_2|^2}{|\dot{B}|} \cos(\alpha_B - \alpha_A) \\ Q_2 = \frac{|\dot{U}_1||\dot{U}_2|}{|\dot{B}|} \sin(\alpha_B - \delta) - \frac{|\dot{A}||\dot{U}_2|^2}{|\dot{B}|} \sin(\alpha_B - \alpha_A) \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (33) \\ (34) \end{array}$$

No receptor

Onde α_A , α_B e α_D são os argumentos das constantes generalizadas $\dot{A}$, $\dot{B}$ e $\dot{D}$, respectivamente, e δ é o ângulo de potência ou de carga da linha, correspondente à diferença angular entre os fasores $\dot{U}_1$ e $\dot{U}_2$. Utilizando-se, nestas equações, os valores de tensão de linha em kV , serão obtidas potências trifásicas em MW e $MVar$.

A partir da equação (33) pode-se, por fim, concluir que, para linhas de transmissão que interligam barras do sistema com tensão controlada, a potência ativa máxima transmissível, para determinados valores de $|\dot{U}_1|$ e $|\dot{U}_2|$, ocorrerá quando $\delta = \alpha_B$:

$$P_{2\max} = \frac{|\dot{U}_1||\dot{U}_2|}{|\dot{B}|} - \frac{|\dot{A}||\dot{U}_2|}{|\dot{B}|} \cos(\alpha_B - \alpha_A) \quad (35)$$

Para análise do desempenho de linhas de transmissão radiais, em regime permanente, o problema está na determinação do módulo da tensão no receptor $|\dot{U}_2|$ e do ângulo de carga da linha δ , uma vez definidas a carga no receptor ($\dot{S}_2 = P_2 + jQ_2$) e o módulo da tensão no transmissor $|\dot{U}_1|$. Diante destes requisitos pode-se empregar a equação a seguir [13]:

$$|\dot{U}_2|^4 + |\dot{U}_2|^2 \frac{2|\dot{B}|}{|\dot{A}|} \left[P_2 \cos(\alpha_B - \alpha_A) + Q_2 \sin(\alpha_B - \alpha_A) - \frac{|\dot{U}_1|^2}{2|\dot{A}||\dot{B}|} \right] + \frac{|\dot{S}_2|^2 |\dot{B}|^2}{|\dot{A}|^2} = 0 \quad (36)$$

A solução desta equação fornece quatro raízes, porém uma única possui valores aceitáveis.

A perda de potência em uma linha de transmissão, a qual define o rendimento da transferência de potência pelo elemento, é dada pela diferença entre as potências ativas no transmissor e no receptor $\Delta P = P_1 - P_2$. Os fatores que contribuem para a definição desta grandeza, conforme [13], são:

- Perdas por efeito Joule nos condutores;
- Perdas através dos dielétricos: efeito corona e nos isoladores;
- Perdas por circulação de corrente nos cabos pára-raios;
- Perdas por correntes de Foucault, e por histerese magnética, na alma de aço dos condutores e em ferragens da linha e próximas a ela.

As mais significativas são as perdas por efeito Joule, e estas serão as únicas a serem contempladas neste trabalho. Portanto:

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \frac{|\dot{U}_1|^2 |\dot{D}|}{|\dot{B}|} \cos(\alpha_B - \alpha_D) + \frac{|\dot{U}_2|^2 |\dot{A}|}{|\dot{B}|} \cos(\alpha_B - \alpha_A) - \frac{2|\dot{U}_1| |\dot{U}_2|}{|\dot{B}|} \cos \alpha_B \cos \delta \quad (37)$$

Uma alternativa mais simples para se obter tais perdas consiste no emprego da expressão:

$$\Delta P = 3 I^2 r l \quad (38)$$

Onde I é o módulo da corrente de fase da linha, r a resistência por unidade de comprimento do condutor e l o comprimento total da linha.

O rendimento do processo de transferência de energia, definido como a relação percentual entre a potência ativa entregue ao receptor (P_2) e a potência ativa que parte do transmissor da linha de transmissão (P_1), é:

$$\eta\% = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 \quad (39)$$

Onde $\eta\%$ é o rendimento percentual da linha de transmissão.

Para a determinação da diferença entre as potências reativas encontradas para o terminal correspondente ao transmissor e aquele associado com o receptor pode-se empregar [13]:

$$\Delta Q = Q_1 - Q_2 = \frac{|\dot{U}_1|^2 |\dot{D}|}{|\dot{B}|} \text{sen}(\alpha_B - \alpha_D) + \frac{|\dot{U}_2|^2 |\dot{A}|}{|\dot{B}|} \text{sen}(\alpha_B - \alpha_A) - \frac{2|\dot{U}_1||\dot{U}_2|}{|\dot{B}|} \cos \alpha_B \text{sen} \delta \quad (40)$$

Se ΔQ é positivo, isto significa que a linha encontra-se absorvendo reativos do sistema para a manutenção dos seus campos elétricos e magnéticos. Se, por outro lado, ΔQ for negativo, a linha estará fornecendo reativos ao sistema. Naturalmente, o valor de ΔQ será nulo somente para o caso de operação com potência característica ou natural para uma linha sem perdas (ideal).

Outra característica de grande relevância ao tema central desta dissertação consiste na clássica potência característica P_c . Esta deve ser interpretada como sendo a potência ativa calculada a partir de uma carga de impedância de valor igual à impedância característica da linha, conectada ao terminal receptor da linha e considerando a tensão nominal da linha (U), sendo, portanto:

$$P_c = \text{Re} \left\{ \frac{U^2}{\dot{Z}_c} \right\} \quad (41)$$

O argumento da impedância característica ($\dot{Z}_c$) geralmente está entre 1° e 5° , e nessas condições $\cos[\arg(\dot{Z}_c)] \cong 1$. O módulo da impedância característica é aproximadamente igual à impedância natural da linha, ou seja, $|\dot{Z}_c| \cong Z_0$. De forma que, pode-se usar como parâmetro representativo da linha a potência natural (P_0) obtida a partir da impedância natural da linha. Portanto:

$$P_0 = \frac{U^2}{Z_0} = \frac{U^2}{\sqrt{L/C}} \quad (42)$$

Na transmissão da potência natural numa linha não há consumo nem fornecimento de reativos e isto possui significativas implicações econômicas, pois, nesta condição, as perdas serão menores face à diminuição das correntes. Além disso, sob tais circunstâncias constata-se um melhor desempenho da linha no que se refere à regulação de tensão.

2.4 – PARÂMETROS ELÉTRICOS

A metodologia para a determinação dos parâmetros elétricos de linhas de transmissão utilizada obedece aos procedimentos expostos em [1] e [15]. Estes permitem a análise de configurações físicas genéricas, fato este de grande relevância para o objetivo de maximizar a capacidade de transmissão das linhas através da variação da disposição dos seus condutores em configurações não convencionais.

Os desenvolvimentos associados com a determinação dos parâmetros das linhas de transmissão, de forma exata, constituem-se em assuntos bastante complexos. Isto se deve, sobretudo, às dificuldades de se obter, com precisão, algumas grandezas envolvidas nos cálculos. Dentre estas, citam-se:

- As características elétricas do solo sob a linha;
- A disposição dos condutores com relação ao solo e entre si;
- A influência das estruturas no campo eletromagnético.

Reconhecendo estas limitações, usualmente, os procedimentos para a estimativa dos parâmetros equivalentes e representativos das linhas utilizam de simplificações a exemplo de [1] e [16]:

- O solo é plano na vizinhança da linha;
- O solo é homogêneo, com condutividade e rigidez dielétrica constantes;
- Os condutores são paralelos entre si e ao solo;
- A influência das estruturas no campo eletromagnético é desprezada;
- Os efeitos terminais da linha são desprezados no cálculo do campo eletromagnético;

A partir destas considerações, a análise quase-estacionária das linhas elétricas, no domínio da frequência, em regime linear, permite determinar as impedâncias longitudinais e as admitâncias transversais entre os n condutores em presença do solo de uma linha de transmissão [16].

As matrizes primitivas das impedâncias longitudinais e das admitâncias transversais por unidade de comprimento, $[\dot{Z}]$ e $[\dot{Y}]$ respectivamente, de ordem igual ao número total de condutores $(n_t \times n_t)$, obtidas dentro desta estratégia, conduzem a resultados que se materializam em matrizes de impedâncias longitudinais e de admitâncias transversais por unidade de comprimento entre fases $[\dot{Z}_F]$ e $[\dot{Y}_F]$, de ordem igual ao número de fases $(n_f \times n_f)$ [16].

2.4.1 – IMPEDÂNCIA LONGITUDINAL

A matriz de impedâncias longitudinais é formada pelos seguintes elementos:

$$\dot{z}_{ik} = \dot{z}_{Eik} + \dot{z}_{Iik} + \dot{z}_{0ik} \quad i, k = 1, 2, 3, \dots, n_t \quad (43)$$

Sendo:

$$n_t = n_c + n_{pr} = (n_f \times n_s) + n_{pr} \quad (44)$$

Onde:

$\dot{z}_{Eik}$ Impedância por unidade de comprimento considerando condutor e solo ideais, ou seja, com condutividade infinita (Ω / km);

$\dot{z}_{Iik}$ Impedância interna do condutor por unidade de comprimento, sendo $\dot{z}_{Iik} = 0$ para $i \neq k$ (Ω / km);

$\dot{z}_{0ik}$ Impedância por unidade de comprimento considerando a contribuição do solo, supondo as permeabilidades magnéticas do ar e do solo iguais à permeabilidade do vácuo (Ω / km);

n_t Número total de condutores;

n_c Número total de condutores de fase;

n_{pr} Número de cabos pára-raios;

n_f Número de fases;

n_s Número de subcondutores por fase;

A impedância para condutor e solo ideais é dada por [13], [16] e [17]:

$$\dot{z}_{Eik} = j x_{Eik} = j \frac{\omega \mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{D_{ik}}{d_{ik}} \right) \quad i, k = 1, 2, 3, \dots, n_t \quad (45)$$

Onde:

x_{Eik} Reatância indutiva por unidade de comprimento para condutor e solo ideais (Ω / km);

ω Frequência angular (rad / s);

μ_0 Permeabilidade magnética do vácuo $\left(\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \frac{V \times s}{A \times m} \right)$;

D_{ik} Distância entre o condutor e imagem (m) – Ver figura 2.4;

d_{ik} Distância entre condutores (m) – Ver figura 2.4.

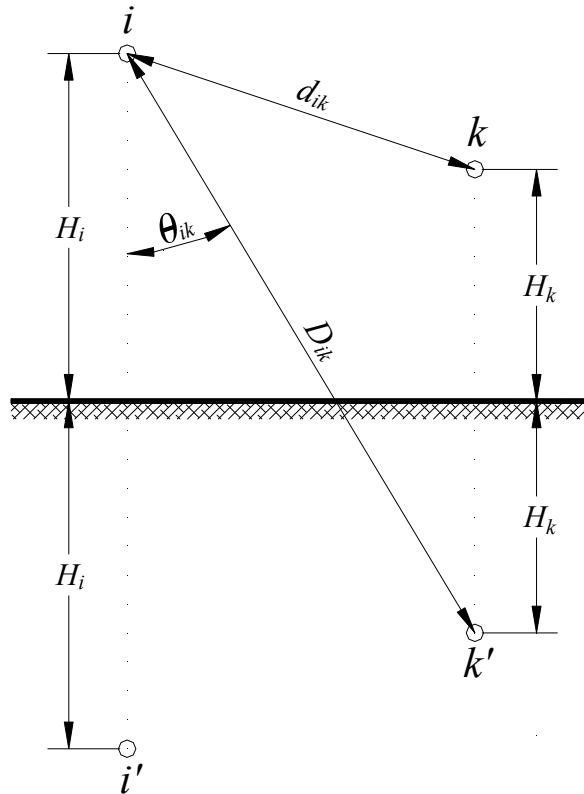


Figura 2.4 – Disposição dos cabos condutores e imagens.

Para $i = k$ tem-se:

$$D_{ik} = 2H_k \quad (46)$$

$$d_{ik} = R_k \quad (47)$$

Onde:

H_k Altura do condutor k em relação ao solo, sendo considerada a altura média do condutor calculada por $H_k = H_e - \frac{2}{3}f$;

H_e Altura do condutor na estrutura (m);

f Flecha do condutor (m);

R_k Raio externo do condutor k (m).

A impedância interna para todo $i = k$ é composta por:

$$\dot{Z}_{Ik} = r_k + j x_{Ik} \quad k = 1, 2, 3, \dots, n_t \quad (48)$$

Onde:

r_k Resistência do condutor k por unidade de comprimento (Ω/km);

x_{Ik} Reatância indutiva interna do condutor k por unidade de comprimento (Ω/km);

A resistência dos condutores depende dos seguintes fatores [13] e [17]:

- Natureza e características do material condutor: caracterizada pela sua resistividade, têmpera e pureza;

- Dimensões: diretamente proporcional ao comprimento e inversamente proporcional a área;
- Temperatura: a resistividade dos condutores metálicos cresce com o aumento da temperatura;
- Frequência: devido ao efeito pelicular a resistência cresce com o aumento da frequência;
- Características dos cabos: encordoamento e coeficiente de preenchimento.

A variação da resistência efetiva dos cabos condutores em função destas grandezas é contemplada nas referências citadas anteriormente.

Trabalhando com condutores padronizados, obtêm-se, dos fabricantes, tabelas de resistências efetivas dos mesmos. Estas representam, em geral, valores médios obtidos em medição direta sobre um grande número de amostras de condutores, de diversos lotes de fabricação. Os valores considerados para fins desta dissertação correspondem àqueles indicados na referência [18].

Complementarmente, a reatância interna de um condutor cilíndrico maciço é dada por [1], [13] e [17]:

$$j x_{I_k} = j \frac{\omega \mu_0}{8\pi} \quad (49)$$

Somando as expressões (45) e (49) para todo $i = k$ obtém-se:

$$j x_{E_k} + j x_{I_k} = j \frac{\omega \mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{2H_k}{R_k} \right) + j \frac{\omega \mu_0}{8\pi} = j \frac{\omega \mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{2H_k}{R_k e^{-1/4}} \right) \quad (50)$$

Portanto, a reatância devido ao fluxo interno ao condutor pode ser considerada utilizando-se um raio fictício $R'_k = R_k e^{-1/4}$ no cálculo de $x_{E_{ik}}$ para $i = k$.

Considerando, ainda, que os cabos condutores padronizados não são maciços e homogêneos, e sim compostos por uma associação de fios de aço e alumínio, o valor da reatância interna difere do calculado pela expressão (49). Para se levar em conta a reatância interna dos condutores pode-se então empregar o raio médio geométrico (RMG) na expressão (50). Este corresponde ao raio de um condutor cilíndrico fictício que produz um fluxo externo de mesmo valor que o fluxo total para solo ideal, produzido pelo condutor real correspondente. Isto resulta em:

$$j x_{E_k} + j x_{I_k} = j \frac{\omega \mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{2H_k}{RMG} \right) \quad (51)$$

O raio médio geométrico pode ser determinado em função das características dos condutores. No entanto, prefere-se lançar mãos de valores obtidos através da medição da indutância em um grande número de amostras de cabos de composições padronizadas. Seus valores médios são fornecidos pelos fabricantes e, mais uma vez, para fins desta dissertação, serão utilizados os valores indicados na referência [18].

Os elementos da matriz das impedâncias de contribuição do solo são [13] e [16]:

$$\dot{z}_{0_{ik}} = r_{0_{ik}} + j x_{0_{ik}} \quad i, k = 1, 2, 3, \dots, n_t \quad (52)$$

Onde:

$$r_{0_{ik}} = \frac{\omega \mu_0}{\pi} P_C(\sigma_{ik}, \theta_{ik}) \quad (53)$$

$$j x_{0ik} = j \frac{\omega \mu_0}{\pi} Q_C(\sigma_{ik}, \theta_{ik}) \quad (54)$$

Sendo:

r_{0ik} Resistência devido a contribuição do solo (Ω / km);

x_{0ik} Reatância indutiva devido a contribuição do solo (Ω / km);

P_C e Q_C Fatores de correção de Carson [16];

A variável σ_{ik} é calculada pela equação:

$$\sigma_{ik} = \sqrt{\frac{\omega \mu_0}{\rho}} D_{ik} \quad (55)$$

Onde:

ρ Resistividade do solo (Ω / m^3)

D_{ik} e θ_{ik} são obtidos da geometria da linha, conforme verifica-se na figura 2.4.

Para $i = k$, $D_{ik} = 2H_k$ e $\theta_{ik} = 0$.

As expressões aproximadas de P_C e Q_C , para $\sigma \leq 1/4$, que é a faixa geralmente encontrada nas aplicações elétricas à frequência industrial, são [13] e [16]:

$$P_C(\sigma_{ik}, \theta_{ik}) = \frac{\pi}{8} - \frac{\sigma_{ik}}{3\sqrt{2}} \cos \theta_{ik} + \frac{\sigma_{ik}^2}{16} \cos(2\theta_{ik}) \left(0,6728 + \ln \frac{2}{\sigma_{ik}} \right) + \frac{\sigma_{ik}^2}{16} \theta_{ik} \sin(2\theta_{ik}) \quad (56)$$

$$Q_C(\sigma_{ik}, \theta_{ik}) = -0,0386 + \frac{1}{2} \ln \left(\frac{2}{\sigma_{ik}} \right) + \frac{\sigma_{ik}}{3\sqrt{2}} \cos \theta_{ik} \quad (57)$$

2.4.2 – ADMITÂNCIA TRANSVERSAL

Para tal grandeza considera-se que as condutâncias podem ser desprezadas na matriz de admitância transversal e, nestas circunstâncias, a expressão será composta apenas pelas susceptâncias entre os condutores e dos condutores ao solo.

De acordo com princípios fundamentais, as tensões são relacionadas com as cargas elétricas nos condutores pela matriz de coeficientes de campo elétrico de Maxwell ou coeficientes de potencial, da seguinte forma:

$$[\dot{U}] = [A][\dot{Q}] \quad (58)$$

Onde:

$[\dot{U}]$ Vetor das tensões fase-terra dos condutores (V);

$[\dot{Q}]$ Vetor de densidade linear das cargas elétricas nos condutores (C/km);

$[A]$ Matriz dos coeficientes de potencial (km/F).

Os valores dos elementos da matriz de coeficientes de potencial dependem exclusivamente do meio em que os condutores se encontram e das dimensões físicas dos condutores e da linha [13] e [16]. Diante disto:

$$a_{ik} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D_{ik}}{d_{ik}} \quad (59)$$

Sendo D_{ik} e d_{ik} obtidos conforme figura 2.4, e ϵ_0 a permeabilidade do vácuo

$$\left(\epsilon_0 = 8,859 \times 10^{-12} \frac{A \cdot s}{V \cdot m} \right). \text{ Para } i = k \text{ teremos: } D_{ik} = 2H_k \text{ e } d_{ik} = r_k.$$

Reescrevendo-se a equação (58):

$$[\dot{Q}] = [A]^{-1} [\dot{U}] \quad (60)$$

A partir da definição de capacitância, que é dada pela carga por unidade de potencial, conclui-se que a matriz inversa da matriz de coeficientes de potencial corresponde à própria matriz de capacitâncias. Assim:

$$[C] = [A]^{-1} \quad (61)$$

e

$$[\dot{Y}] = j\omega [C] \quad (62)$$

Onde:

$[C]$ Matriz das capacitância entre condutores e entre condutores e solo (F / km);

$[\dot{Y}]$ Matriz de admitância transversal por unidade de comprimento (S / km).

2.4.3 – REDUÇÃO DAS MATRIZES DE PARÂMETROS

As matrizes de impedâncias e admitâncias obtidas da forma apresentada terão dimensões iguais ao número total de condutores da linha, inclusive os cabos pára-raios. Não obstante a isto, é possível reduzir estas matrizes para uma dimensão igual ao número de fases da linha. Isto é feito relacionando-se as tensões e correntes totais de cada fase.

As relações entre tensões e correntes em uma linha de transmissão, no domínio da frequência, para regime alternado senoidal e desprezando o efeito corona, podem ser escritas na forma matricial [16]:

$$\left\{ \begin{array}{l} -\frac{d}{dx} [i] = [\dot{Y}] [\dot{U}] \\ -\frac{d}{dx} [\dot{U}] = [\dot{Z}] [i] \end{array} \right. \quad (63)$$

$$\quad (64)$$

Sendo:

$[\dot{U}]$ Vetor das tensões nos condutores em relação ao solo na coordenada longitudinal x , com n_t elementos;

$[i]$ Vetor das correntes nos condutores na coordenada longitudinal x , com n_t elementos;

$[\dot{Z}]$ Matriz das impedâncias longitudinais por unidade de comprimento de dimensão $n_t \times n_t$;

$[\dot{Y}]$ Matriz das admitâncias transversais por unidade de comprimento de dimensão $n_t \times n_t$;

n_t Número total de condutores.

As linhas e colunas referentes aos cabos pára-raios devem ser eliminadas e, adicionalmente, as dos subcondutores de um mesmo feixe devem ser suprimidas em uma única, a qual representa um condutor equivalente [15] e [16].

Para realizar a redução referente aos pára-raios e obter a matriz $[Z']$ equivalente pode-se reescrever a equação (64) na forma:

$$-\frac{d}{dx} \begin{bmatrix} \dot{U}_F \\ \dot{U}_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{Z}_{FF} & \dot{Z}_{FR} \\ \dot{Z}_{RF} & \dot{Z}_{RR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_F \\ \dot{I}_R \end{bmatrix} \quad (65)$$

Onde $[\dot{U}_F]$ e $[\dot{I}_F]$ são os vetores de tensão e corrente dos condutores de fase e $[\dot{U}_R]$ e $[\dot{I}_R]$ são os vetores de tensão e corrente nos cabos pára-raios. As submatrizes $[\dot{Z}_{FF}]$, $[\dot{Z}_{FR}]$, $[\dot{Z}_{RF}]$ e $[\dot{Z}_{RR}]$ são partes da matriz de impedâncias.

Se os cabos pára-raios forem aterrados, tem-se:

$$[\dot{U}_R] = 0 \Rightarrow -\frac{d}{dx} [\dot{U}_R] = 0 = [\dot{Z}_{RF}][\dot{I}_F] + [\dot{Z}_{RR}][\dot{I}_R] \Rightarrow [\dot{I}_R] = -[\dot{Z}_{RR}]^{-1} [\dot{Z}_{RF}][\dot{I}_F] \quad (66)$$

Introduzindo o valor de $[\dot{I}_R]$ na expressão derivada da equação (65):

$$-\frac{d}{dx} [\dot{U}_F] = [\dot{Z}_{FF}][\dot{I}_F] + [\dot{Z}_{FR}][\dot{I}_R] \quad (67)$$

$$-\frac{d}{dx} [\dot{U}_F] = \left\{ [\dot{Z}_{FF}] - [\dot{Z}_{FR}][\dot{Z}_{RR}]^{-1}[\dot{Z}_{RF}] \right\} [\dot{I}_F] = [\dot{Z}'] [\dot{I}_F] \quad (68)$$

$$[\dot{Z}'] = [\dot{Z}_{FF}] - [\dot{Z}_{FR}][\dot{Z}_{RR}]^{-1}[\dot{Z}_{RF}] \quad (69)$$

Se os cabos pára-raios forem isolados, tem-se:

$$[i_R]=0 \Rightarrow -\frac{d}{dx}[\dot{U}_F]=[\dot{Z}_{FF}][i_F]+[\dot{Z}_{FR}][i_R]=[\dot{Z}_{FF}][i_F] \quad (70)$$

$$[\dot{Z}']=[\dot{Z}_{FF}] \quad (71)$$

Para redução da matriz $[\dot{Y}]$ e obtenção da matriz $[\dot{Y}']$ equivalente, sem linhas e colunas dos condutores pára-raios, faz-se:

$$-\frac{d}{dx}\begin{bmatrix} i_F \\ i_R \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} \dot{Y}_{FF} & \dot{Y}_{FR} \\ \dot{Y}_{RF} & \dot{Y}_{RR} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \dot{U}_F \\ \dot{U}_R \end{bmatrix} \quad (72)$$

Para cabos pára-raios aterrados:

$$[\dot{U}_R]=0 \Rightarrow -\frac{d}{dx}[i_F]=[\dot{Y}_{FF}][\dot{U}_F]+[\dot{Y}_{FR}][\dot{U}_R]=[\dot{Y}_{FF}][\dot{U}_F] \quad (73)$$

$$[\dot{Y}']=[\dot{Y}_{FF}] \quad (74)$$

Para o caso de cabos pára-raios isolados:

$$[i_R]=0 \Rightarrow -\frac{d}{dx}[i_R]=0=[\dot{Y}_{RF}][\dot{U}_F]+[\dot{Y}_{RR}][\dot{U}_R] \Rightarrow [\dot{U}_R]=-\left[\dot{Y}_{RR}\right]^{-1}[\dot{Y}_{RF}][\dot{U}_F] \quad (75)$$

$$-\frac{d}{dx}[\dot{I}_F] = [\dot{Y}_{FF}][\dot{U}_F] + [\dot{Y}_{FR}][\dot{U}_R] \quad (76)$$

$$-\frac{d}{dx}[\dot{I}_F] = \left\{ [\dot{Y}_{FF}] - [\dot{Y}_{FR}][\dot{Y}_{RR}]^{-1}[\dot{Y}_{RF}] \right\} [\dot{U}_F] = [\dot{Y}'][\dot{U}_F] \quad (77)$$

$$[\dot{Y}'] = [\dot{Y}_{FF}] - [\dot{Y}_{FR}][\dot{Y}_{RR}]^{-1}[\dot{Y}_{RF}] \quad (78)$$

Havendo múltiplos condutores por fase, com a utilização de espaçadores condutores e considerando a frequência industrial, todos os subcondutores possuirão aproximadamente a mesma tensão. Adicionalmente, considerando as correntes totais de fase sendo iguais à soma das correntes de cada subcondutor da fase em questão, pode-se reduzir as matrizes $[\dot{Z}']$ e $[\dot{Y}']$ de dimensões iguais ao número total de condutores das fases, para matrizes de dimensões iguais ao número de fases $[\dot{Z}_F]$ e $[\dot{Y}_F]$, conforme exposto em [1], [15] e [16].

Reescrevendo a equação matricial com a redução dos pára-raios $[\dot{Z}']$ de forma expandida, tem-se:

$$-\frac{d}{dx} \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_1 \\ \vdots \\ \dot{U}_2 \\ \vdots \\ \dot{U}_{nf} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{z}'_{11} & \dot{z}'_{12} & \cdots & \dot{z}'_{1,nc} \\ \dot{z}'_{21} & \dot{z}'_{22} & & \\ \vdots & & \ddots & \\ \dot{z}'_{nc,1} & & & \dot{z}'_{nc,nc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \vdots \\ \dot{I}_{ns+1} \\ \vdots \\ \dot{I}_{nc} \end{bmatrix} \quad (79)$$

Onde n_f é o número de fases, n_s é o número de subcondutores de cada fase e n_c é o número total de condutores de fase.

Subtraindo as linhas correspondentes aos subcondutores $2, 3, \dots, n_s$ pela primeira linha de cada fase, obtêm-se:

$$-\frac{d}{dx} \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ 0 \\ \vdots \\ \dot{U}_2 \\ 0 \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{z}'_{11} & \dot{z}'_{12} & \cdots & \dot{z}'_{1,nc} \\ \dot{z}'_{21} - \dot{z}'_{11} & \dot{z}'_{22} - \dot{z}'_{12} & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \dot{z}'_{ns+1,1} & \dot{z}'_{ns+1,2} & \cdots & \vdots \\ \dot{z}'_{ns+2,1} - \dot{z}'_{ns+1,1} & \dot{z}'_{ns+2,2} - \dot{z}'_{ns+1,2} & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \vdots \\ \dot{I}_{ns+1} \\ \vdots \\ \dot{I}_{nc} \end{bmatrix} \quad (80)$$

Como o objetivo é relacionar as tensões de fase com as correntes totais de cada fase, substitui-se a corrente do primeiro subcondutor de cada fase pela soma das correntes de todos os subcondutores da fase. Para manter a equação, cada coluna da matriz é substituída pela subtração da coluna referente a cada subcondutor, pela coluna correspondente ao primeiro subcondutor da fase, da seguinte forma:

$$-\frac{d}{dx} \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ 0 \\ \vdots \\ \dot{U}_2 \\ 0 \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{z}'_{11} & \dot{z}'_{12} - \dot{z}'_{11} & \cdots & \vdots \\ \dot{z}'_{21} - \dot{z}'_{11} & \dot{z}'_{22} - \dot{z}'_{12} - (\dot{z}'_{21} - \dot{z}'_{11}) & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \dot{z}'_{ns+1,1} & \dot{z}'_{ns+1,2} - \dot{z}'_{ns+1,1} & \cdots & \vdots \\ \dot{z}'_{ns+2,1} - \dot{z}'_{ns+1,1} & \dot{z}'_{ns+2,2} - \dot{z}'_{ns+1,2} - (\dot{z}'_{ns+2,1} - \dot{z}'_{ns+1,1}) & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dots + \dot{I}_{ns} \\ \dot{I}_2 \\ \vdots \\ \dot{I}_{ns+1} + \dot{I}_{ns+2} + \dots + \dot{I}_{2ns} \\ \vdots \\ \dot{I}_{ns+2} \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (81)$$

Reordenando-se as matrizes da equação (81), de forma que as linhas $1, ns+1, 2ns+1, \dots, (nf-1)ns+1$, correspondentes às tensões dos primeiros subcondutores de cada

fase e às correntes totais de cada fase, sejam dispostas ordenadamente nas primeiras linhas das matrizes resultantes, tem-se:

$$-\frac{d}{dx} \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \vdots \\ \dot{U}_{nf} \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{Z}_{M1} & \dot{Z}_{M2} \\ \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots \\ \dot{Z}_{M3} & \dot{Z}_{M4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{T1} \\ \vdots \\ \dot{I}_{Tnf} \\ \dot{I}_2 \\ \vdots \\ \dot{I}_{nc} \end{bmatrix} \quad (82)$$

Onde as submatrizes $[\dot{Z}_{M1}]$, $[\dot{Z}_{M2}]$, $[\dot{Z}_{M3}]$ e $[\dot{Z}_{M4}]$ são partes da matriz de impedâncias modificada e $\dot{I}_{Ti}$ é a corrente total da fase i , sendo que esta última calcula-se por:

$$\dot{I}_{Ti} = \sum_{k=(i-1)ns+1}^{ins} \dot{I}_k \quad (83)$$

Reescrevendo o sistema:

$$-\frac{d}{dx} \begin{bmatrix} \dot{U}_F \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{Z}_{M1} & \dot{Z}_{M2} \\ \dot{Z}_{M3} & \dot{Z}_{M4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_F \\ \dot{I}_z \end{bmatrix} \quad (84)$$

Pode-se observar que o sistema da equação (84) tem a mesma formação do sistema da equação (65) para o caso de pára-raios aterrados. Sendo assim, aplicando-se a mesma metodologia para a redução da matriz de impedâncias, determina-se a matriz $[\dot{Z}_F]$ com dimensão $n_f \times n_f$, equivalente à matriz de dimensão $n_t \times n_t$ inicial. Desta forma:

$$[\dot{Z}_F] = [\dot{Z}_{M1}] - [\dot{Z}_{M2}] [\dot{Z}_{M4}]^{-1} [\dot{Z}_{M3}] \quad (85)$$

A redução da matriz de admitâncias $[\dot{Y}']$ para uma dimensão igual ao número de fases é feita a partir do sistema:

$$-\frac{d}{dx} \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \vdots \\ \dot{I}_{ns+1} \\ \vdots \\ \dot{I}_{nc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{y}'_{11} & \dot{y}'_{12} & \cdots & \dot{y}'_{1,ns+1} & \cdots & \dot{y}'_{1,nc} \\ \dot{y}'_{21} & \dot{y}'_{22} & & & & \\ \vdots & & & & \ddots & \\ \dot{y}'_{nc,1} & & & & & \dot{y}'_{nc,nc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \\ \vdots \\ \dot{U}_{nf} \end{bmatrix} \quad (86)$$

Como as tensões são iguais para todos os subcondutores de uma mesma fase, as colunas representativas destes podem ser reduzidas em uma única coluna, obtida pelo somatório das admitâncias de cada subcondutor de uma fase, para cada linha da matriz. Assim:

$$-\frac{d}{dx} \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \vdots \\ \dot{I}_{ns+1} \\ \vdots \\ \dot{I}_{nc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^{ns} \dot{y}'_{ik} & \sum_{k=ns+1}^{2ns} \dot{y}'_{ik} & \cdots & \sum_{k=(ns-1)ns+1}^{nc} \dot{y}'_{ik} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \\ \vdots \\ \dot{U}_{nf} \end{bmatrix} \quad (87)$$

O elemento $\dot{y}'_{ik}$ é o correspondente à matriz de admitância na posição linha i e coluna k . Substituindo o vetor de correntes nos subcondutores pelo vetor de correntes totais

nas fases, pode-se reduzir a matriz somando-se as suas linhas, já que neste caso se está somando as correntes dos subcondutores, obtendo-se:

$$-\frac{d}{dx} \begin{bmatrix} \dot{I}_{T1} \\ \dot{I}_{T2} \\ \vdots \\ \dot{I}_{Tnf} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{ns} \sum_{k=1}^{ns} \dot{y}'_{ik} & \sum_{i=1}^{ns} \sum_{k=ns+1}^{2ns} \dot{y}'_{ik} & \cdots & \\ \sum_{i=ns+1}^{2ns} \sum_{k=1}^{2ns} \dot{y}'_{ik} & \sum_{i=ns+1}^{2ns} \sum_{k=ns+1}^{2ns} \dot{y}'_{ik} & & \\ \vdots & & \ddots & \\ \sum_{i=(nf-1)ns+1}^{nf \cdot ns} \sum_{k=(nf-1)ns+1}^{nf \cdot ns} \dot{y}'_{ik} & & & \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \\ \vdots \\ \dot{U}_{nf} \end{bmatrix} \quad (88)$$

Desta forma, reduziu-se a matriz $[\dot{Y}']$ para dimensão igual ao número de fases, encontrando-se a matriz denominada $[\dot{Y}_F]$, cujos elementos são determinados através dos somatórios expressos na matriz de admitâncias da equação (88). A matriz $[\dot{Y}_F]$ relaciona as tensões de fase com as correntes de fase.

As diagonais das matrizes $[\dot{Z}_F]$ e $[\dot{Y}_F]$ são compostas pelas impedâncias e admitâncias próprias equivalentes de cada fase e, os elementos fora das diagonais, são definidos pelas impedâncias e admitâncias mútuas equivalentes entre as fases. Desta forma:

$$[\dot{Z}_F] = \begin{bmatrix} \dot{z}_{AA} & \dot{z}_{AB} & \dot{z}_{AC} \\ \dot{z}_{BA} & \dot{z}_{BB} & \dot{z}_{BC} \\ \dot{z}_{CA} & \dot{z}_{CB} & \dot{z}_{CC} \end{bmatrix} \quad (89)$$

$$[\dot{Y}_F] = \begin{bmatrix} \dot{y}_{AA} & \dot{y}_{AB} & \dot{y}_{AC} \\ \dot{y}_{BA} & \dot{y}_{BB} & \dot{y}_{BC} \\ \dot{y}_{CA} & \dot{y}_{CB} & \dot{y}_{CC} \end{bmatrix} \quad (90)$$

Como $\dot{z}_{AB} = \dot{z}_{BA}$, $\dot{z}_{AC} = \dot{z}_{CA}$, $\dot{z}_{BC} = \dot{z}_{CB}$, $\dot{y}_{AB} = \dot{y}_{BA}$, $\dot{y}_{AC} = \dot{y}_{CA}$ e $\dot{y}_{BC} = \dot{y}_{CB}$ as matrizes são simétricas.

Pode-se, então, reescrever as equações (63) e (64) para tensões e correntes de fase da linha como:

$$\begin{cases} -\frac{d}{dx}[\dot{I}_F] = [\dot{Y}_F][\dot{U}_F] \\ -\frac{d}{dx}[\dot{U}_F] = [\dot{Z}_F][\dot{I}_F] \end{cases} \quad (91)$$

$$\quad (92)$$

As correntes para cada subcondutor podem ser obtidas calculando-se o valor das tensões de fase a partir da equação (92) e repetindo-se o valor da tensão para os condutores de mesma fase. Pela solução do sistema linear torna-se possível a obtenção das correntes desejadas.

$$-\frac{d}{dx} \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_1 \\ \vdots \\ \dot{U}_2 \\ \vdots \\ \dot{U}_{nf} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{z}'_{11} & \dot{z}'_{12} & \cdots & \dot{z}'_{1,nc} \\ \dot{z}'_{21} & \dot{z}'_{22} & & \\ \vdots & & \ddots & \\ \dot{z}'_{nc,1} & & & \dot{z}'_{nc,nc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \vdots \\ \dot{I}_{ns+1} \\ \vdots \\ \dot{I}_{nc} \end{bmatrix} \quad (93)$$

2.4.4 – TRANSPOSIÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

A disposição assimétrica dos condutores em conjunto com o efeito do solo e dos cabos pára-raios resulta em que os elementos das diagonais, e fora das diagonais, de $[\dot{Z}_F]$ e $[\dot{Y}_F]$,

sejam diferentes entre si. Para viabilizar uma simetria média entre as extremidades da linha emprega-se, como é tradicionalmente conhecida, a transposição de fases, com rotação cíclica dos condutores. O método consiste em dividir a linha, ou parte da linha, em três trechos de igual comprimento, transpondo-se os condutores no final de cada trecho, de forma que cada fase ocupe uma posição na linha, ou parte dela por 1/3 da extensão, como mostrado na figura 2.5. Tal construção visa, fisicamente, atingir um equilíbrio eletromagnético das linhas.

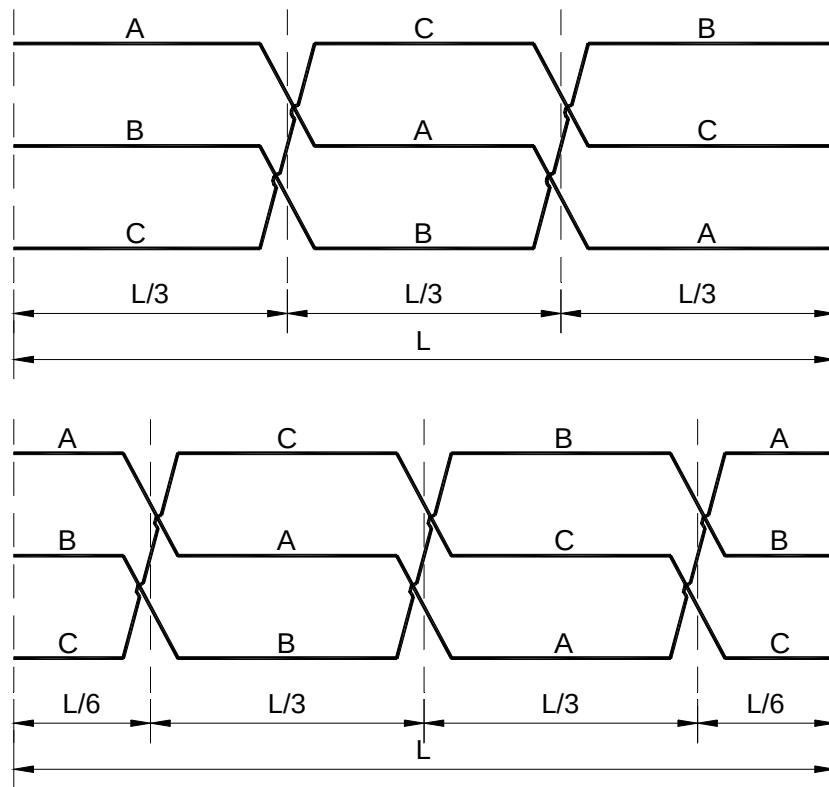


Figura 2.5 – Esquemas de transposição nas linhas trifásicas.

A matriz de impedâncias de uma linha transposta tem a forma:

$$[\dot{Z}_F] = \begin{bmatrix} \dot{z}_p & \dot{z}_m & \dot{z}_m \\ \dot{z}_m & \dot{z}_p & \dot{z}_m \\ \dot{z}_m & \dot{z}_m & \dot{z}_p \end{bmatrix} \quad (94)$$

Onde:

$$\dot{z}_p \quad \text{Média das impedâncias próprias} \quad \dot{z}_p = \frac{\dot{z}_{AA} + \dot{z}_{BB} + \dot{z}_{CC}}{3} \quad (\Omega / km);$$

$$\dot{z}_m \quad \text{Média das impedâncias mútuas} \quad \dot{z}_m = \frac{\dot{z}_{AB} + \dot{z}_{AC} + \dot{z}_{BC}}{3} \quad (\Omega / km).$$

A matriz de admitâncias para linha transposta é obtida de forma semelhante aos procedimentos anteriormente expostos.

2.4.5 – IMPEDÂNCIAS E ADMITÂNCIAS SEQUENCIAIS

Para determinar as impedâncias e admitâncias de sequência positiva, negativa e zero, a partir das equações (91) e (92), pode-se efetuar a transformação dos vetores de tensão e corrente em componentes simétricas. Assim:

$$[\dot{A}] \left[-\frac{d\dot{U}_s}{dx} \right] = [\dot{Z}_F] [\dot{A}] [\dot{I}_s] \quad (95)$$

$$[\dot{U}_s] = \begin{bmatrix} \dot{U}_0 \\ \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad [\dot{I}_s] = \begin{bmatrix} \dot{I}_0 \\ \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix}$$

Onde:

$[\dot{U}_s]$ Vetor das componentes simétricas de tensão;

$[\dot{I}_s]$ Vetor das componentes simétricas de corrente.

$$[\dot{A}] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad [\dot{A}]^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}$$

Sendo $a = 1 \angle 120^\circ = -0,5 + j0,866$. Reescrevendo-se a equação:

$$\left[-\frac{d\dot{U}_S}{dx} \right] = [\dot{A}]^{-1} [\dot{Z}_F] [\dot{A}] [\dot{I}_S] \quad (96)$$

Então:

$$[\dot{Z}_S] = [\dot{A}]^{-1} [\dot{Z}_F] [\dot{A}] \quad (97)$$

E analogamente:

$$[\dot{Y}_S] = [\dot{A}]^{-1} [\dot{Y}_F] [\dot{A}] \quad (98)$$

Para linhas transpostas, em que $[\dot{Z}_F]$ e $[\dot{Y}_F]$ possuem os elementos das diagonais e fora das diagonais iguais entre si:

$$[\dot{Z}_S] = \begin{bmatrix} \dot{z}_p + 2\dot{z}_m & 0 & 0 \\ 0 & \dot{z}_p - \dot{z}_m & 0 \\ 0 & 0 & \dot{z}_p - \dot{z}_m \end{bmatrix} \quad (99)$$

E

$$[\dot{Y}_S] = \begin{bmatrix} \dot{y}_p + 2\dot{y}_m & 0 & 0 \\ 0 & \dot{y}_p - \dot{y}_m & 0 \\ 0 & 0 & \dot{y}_p - \dot{y}_m \end{bmatrix} \quad (100)$$

Portanto:

$$\dot{z}_0 = \dot{z}_p + 2\dot{z}_m \quad (101)$$

$$\dot{z}_1 = \dot{z}_2 = \dot{z}_p - \dot{z}_m \quad (102)$$

$$\dot{y}_0 = \dot{y}_p + 2\dot{y}_m \quad (103)$$

$$\dot{y}_1 = \dot{y}_2 = \dot{y}_p - \dot{y}_m \quad (104)$$

Neste caso, mesmo que as tensões e correntes sejam desequilibradas, pode-se resolver o sistema de equações pela superposição de sistemas equilibrados desacoplados entre si.

Para linhas não transpostas, em que as impedâncias próprias e mútuas não são diferentes entre si, as transformações das impedâncias e admitâncias são realizadas através do procedimento matricial apresentado. Entretanto, o sistema de equações resultante não será desacoplado, sendo que os elementos da diagonal serão as componentes de seqüência desejadas, e os elementos fora da diagonal não serão nulos. Assim sendo:

$$[\dot{Z}_S] = \begin{bmatrix} \dot{z}_{00} & \dot{z}_{01} & \dot{z}_{02} \\ \dot{z}_{10} & \dot{z}_{11} & \dot{z}_{12} \\ \dot{z}_{20} & \dot{z}_{21} & \dot{z}_{22} \end{bmatrix} \quad (105)$$

Onde:

$\dot{z}_{00} = \dot{z}_0$ é a impedância de seqüência zero;

$\dot{z}_{11} = \dot{z}_1 = \dot{z}_{22} = \dot{z}_2$ são as impedâncias de seqüência positiva e negativa, respectivamente;

$\dot{z}_{01}, \dot{z}_{02}, \dot{z}_{10}, \dot{z}_{12}, \dot{z}_{20}$ e $\dot{z}_{21}$ são impedâncias interseqüenciais, as quais podem ser usadas como medida de desequilíbrio, ou do acoplamento entre as componentes de seqüência, indicando se uma linha deve ou não ser transposta.

A matriz de admitâncias tem forma análoga e, por tal motivo, não há necessidade de reescrevê-la aqui.

Para a análise do desempenho das linhas de transmissão, com representação trifásica, a solução do sistema de equações diferenciais acopladas é mais complexa. Embora exista

solução para esse tipo de problema, é conveniente utilizar uma metodologia envolvendo o desacoplamento das equações e, dessa forma, tratá-las de forma independente. Tal método é denominado por análise modal ou formulação modal. Quando tal procedimento se faz necessário, torna-se essencial calcular os parâmetros modais da linha. Entretanto, para a análise através de circuitos equivalentes monofásicos, como será feito no decorrer deste trabalho, as componentes de seqüência calculadas, nos termos realizados, serão apropriadas.

2.5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo, como esclarecido ao longo de sua descrição, visou apresentar uma síntese dos principais conceitos atrelados com a questão da modelagem de linhas de transmissão, com ênfase na obtenção dos parâmetros elétricos representativos das mesmas a partir de sua estrutura construtiva. Neste contexto, foram utilizados conceitos tradicionalmente empregados na área, fundamentando-se, como afirmado no texto, de princípios classicamente utilizados na literatura pertinente. Todavia, os desenvolvimentos avançaram em relação a alguns pontos, principalmente no que tange às formulações que permitissem contemplar arranjos físicos genéricos para as fases, que estas pudessem ser compostas por condutores múltiplos ou vários subcondutores, que estes permitissem configurações genéricas, enfim, propriedades que viabilizassem a busca de linhas de transmissão otimizadas quanto a sua capacidade de transmissão de energia.

À luz dos resultados obtidos fica evidenciado que as modelagens matemáticas apresentadas passam a formar um grande complexo de equações próprias à implementação num algoritmo de otimização, como será feito na seqüência dos trabalhos.

CAPÍTULO III

OTIMIZAÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO VIA ALGORITMO GENÉTICO

3.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Nos últimos anos, vários estudos voltados para a avaliação de diferentes composições estruturais de linhas, objetivando o aumento da potência transmissível, têm sido realizados. Este novo conceito atua na configuração geométrica dos condutores, onde uma análise da tendência destas mudanças revela a intenção de buscar soluções que primem por uma configuração em que as fases tendam a se aproximar enquanto que os seus subcondutores tendam a se afastar (feixes expandidos). Esta concepção de linhas de transmissão envolve, como já mencionado nesta dissertação, a tecnologia chamada Linha de Potência Natural Elevada – LPNE (*HSIL – High Surge Impedance Loading Line*).

As publicações sobre o tema comprovam ganhos consideráveis de potência transmissível, obtidos através de estudos de casos para diferentes composições geométricas. Dentro deste cenário, surge a idéia de se avaliar qual seria a melhor configuração possível, de

acordo com os parâmetros construtivos e operacionais da linha existente, tais como comprimento, nível de tensão, número de subcondutores, tipo e bitola dos condutores, tipo de estrutura mecânica, disposição geométrica das fases e dos feixes, etc. Procurando contribuir nesta direção, este capítulo encontra-se centrado nos processos de otimização visando, fundamentalmente, a busca de combinações ótimas para o aproveitamento máximo da capacidade das linhas de transmissão.

Diante da impossibilidade do estabelecimento das melhores configurações apenas pela experiência do projetista, visto que a questão envolve um grande número de variáveis e suas respectivas iterações até se atingir a melhor solução, a ciência tem desenvolvido e utilizado vários recursos que culminaram em processos sistematizados para a busca computacional dos pontos ótimos para distintos problemas. Portanto, dentro deste cenário, esta seção da dissertação possui como intuítos principais:

- Apresentar e sintetizar os principais métodos disponíveis para contemplar os desafios como o da otimização de estruturas físicas construtivas de linhas de transmissão;
- Detalhar os fundamentos da técnica selecionada, a saber, aquela conhecida por Algoritmos Genéticos (AG), que são códigos de otimização global, baseados nos mecanismos de seleção natural e da genética, que empregam uma estratégia de busca paralela e estruturada, porém, aleatória, voltada ao encontro do melhor resultado possível para um determinado problema;
- Apresentar uma descrição do método utilizado e sua implementação para a otimização de linhas de transmissão nas classes de tensão de 34,5 e 138 kV;
- Mostrar a versatilidade e a boa adequação do método para os fins desejados, adaptando-se a quaisquer restrições impostas.

3.2 – CONSIDERAÇÕES SOBRE OS MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO

Um processo de otimização caracteriza-se, essencialmente, pela busca de combinações ótimas para o aproveitamento máximo da capacidade de solução para um determinado problema.

Toda tarefa de busca e otimização possui vários componentes, entre eles o espaço de busca, onde são consideradas todas as possibilidades de solução de um determinado problema e a função de aptidão. Esta última consiste numa forma de avaliação da qualidade dos membros do espaço de busca.

Os variados métodos de procura existentes podem ser divididos em três grupos, sendo cada um deles mais adequado a uma determinada classe de problemas [19]. A Tabela 3.1, sintetiza esta classificação.

Tabela 3.1 – Métodos de Procura.

Métodos Determinísticos	Sem Cálculo de Derivadas	Coordenadas Cíclicas, Rosenbrock e outros
	Com Cálculo de Derivadas	Newton, <i>Steepest Descent</i>
	Direções Conjugadas	BFGS, DFP, Fletcher e Reeves
	Métodos de Penalidade	Exterior, Interior, Interior Extendida
	Outros	Elipsóide
Métodos Enumerativos	Programação Dinâmica	
Métodos Estocásticos	Algoritmos Evolucionários	Estratégias Evolucionárias/Programação Genética
		Algoritmos Genéticos
	Outros	Tabu
		<i>Simulated Annealing</i>

As principais características de cada método são:

- **Métodos determinísticos:** compreendem o uso do cálculo de derivadas para a otimização promovendo buscas por pontos vizinhos. Estes são bastante satisfatórios para resolução de problemas que envolvem funções de derivação simples, unimodais (com um único valor máximo), como o exemplo apresentado na figura 3.1;

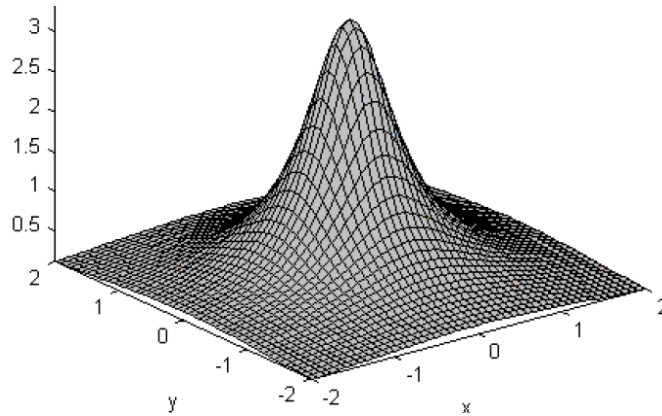


Figura 3.1 – Gráfico da função unimodal $f(x)=1/(0.3+x^2+y^2)$.

- **Métodos enumerativos:** dentro de um espaço finito de busca, o algoritmo verifica todas as combinações possíveis de solução. Embora a sua implementação não seja complicada, este método torna-se inviável para regiões muito grandes de busca, demandando maior tempo de processamento e, assim, prejudicando sua eficácia;
- **Métodos estocásticos:** procuram a solução a partir de regras de probabilidade e, conseqüentemente, promovem a busca da solução fora da vizinhança dos pontos iniciais. Assim, aumentam-se as chances de se encontrar uma solução ótima global (e não local), para problemas que envolvam funções multimodais (com vários máximos) como apresentado na figura 3.2. Tais procedimentos têm se tornado bastante populares por: sua eficiência (rapidez de processamento), eficácia (convergência para solução global) e fácil adaptação a problemas em geral.

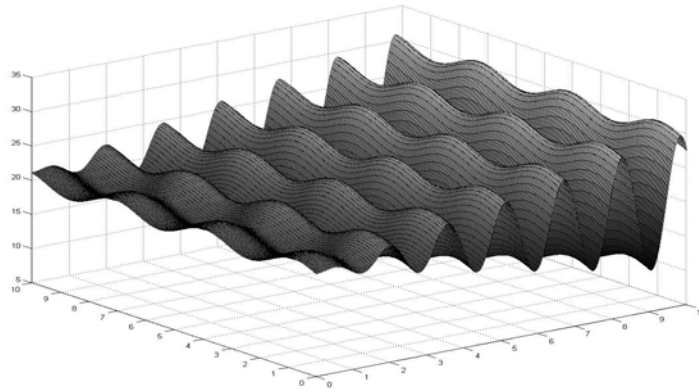


Figura 3.2 – Gráfico da função multimodal $f(x)=x\text{sen}4x+1.1\text{sen}2y+20$.

Neste último grupo encontram-se os Algoritmos Genéticos (AG) que compreendem o ramo mais conhecido da Computação Evolucionária e diferem dos algoritmos tradicionais de otimização pelos seguintes aspectos:

- Fundamentam-se em uma codificação do conjunto das possíveis soluções, e não nos parâmetros da otimização em si;
- Apresentam os resultados como uma população de soluções e não como uma solução única;
- Usam transições probabilísticas e não regras determinísticas.

Diante do fato de que esta é a ferramenta para a procura da solução otimizada para os problemas contemplados por esta dissertação, o algoritmo genético é, na sequência, discutido em maiores detalhes.

3.3 – ALGORITMOS GENÉTICOS

Em 1858, após anos de observações e experimentos, Charles Darwin apresentou sua teoria de evolução através da seleção natural, simultaneamente com outro naturalista inglês Alfred Russel Wallace. Tal teoria foi modernizada em 1900, com a associação da genética, criando o princípio básico de Genética Populacional: a variabilidade entre indivíduos em uma população de organismos que se reproduzem sexualmente é produzida pela mutação e pela recombinação genética. Este princípio foi desenvolvido durante os anos 30 e 40, por biólogos e matemáticos de importantes centros de pesquisa. Posteriormente, muitos outros profissionais da área começaram a desenvolver simulações computacionais de sistemas genéticos. Contudo, foi o Prof. John Holland, Universidade de Michigan, quem verdadeiramente começou a desenvolver as primeiras pesquisas sobre o tema. Holland foi, gradualmente, refinando suas idéias e, em 1975, publicou o seu livro "*Adaptation in Natural and Artificial Systems*", hoje considerado como uma das mais importantes referências sobre os Algoritmos Genéticos [20]. Nos anos 80, David Goldberg, aluno de Holland, obteve sucesso aplicando algoritmos genéticos em otimização de processos industriais. Desde então, estes algoritmos vêm sendo empregados com sucesso em diversas áreas e nos mais variados problemas de otimização.

3.3.1 – CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS AG

Algoritmos Genéticos são códigos de otimização global, baseados nos mecanismos de seleção natural e da genética, que empregam uma estratégia de busca paralela e estruturada,

porém, aleatória, voltada ao encontro do melhor resultado possível para um determinado problema [20]. Apesar da aleatoriedade, eles exploram informações históricas para encontrar novos pontos de busca onde são esperados melhores desempenhos. Isto se dá através de um processo iterativo, onde cada iteração é chamada geração.

Os algoritmos genéticos são, particularmente, aplicados em problemas complexos de otimização, os quais apresentam:

- Diversos parâmetros, com mais de uma variável ou características que precisam ser combinadas em busca da melhor solução;
- Muitas restrições ou condições que não podem ser representadas matematicamente;
- Grandes espaços de busca.

O ponto de partida para a sua utilização é a correta representação do problema através de uma função matemática, na qual, as estruturas que melhor satisfazem à mesma são chamadas indivíduos mais fortes ou mais aptos. Neste contexto, cada indivíduo deve ser codificado conforme o problema a ser tratado, resultando em uma concatenação de variáveis (letras, números reais, inteiros ou binários) correspondendo a uma possível solução.

Basicamente, o que um algoritmo genético faz é criar uma população ou um conjunto de possíveis respostas para o problema a ser tratado para, então, submetê-las a um processo computacional semelhante ao da biologia evolutiva. Este procedimento compreende etapas que, de maneira a reforçar tal característica, são denominadas avaliação, seleção, reprodução e mutação, entre outras a serem descritas posteriormente.

3.3.2 – PRINCIPAIS CONCEITOS

De acordo com a teoria dos Algoritmos Genéticos, na natureza, quando uma determinada população enfrenta escassez de recursos essenciais, somente os indivíduos mais preparados sobrevivem, após terem dominado os mais fracos. Isto acontece porque, dentre as características de ambos os indivíduos, aquelas, imprescindíveis à competição, são mais acentuadamente presentes nos que se mostraram mais fortes. Estas características, provavelmente, serão passadas aos seus descendentes através da reprodução, que, conseqüentemente, terão maior probabilidade de saírem vencedores também. Por outro lado, indivíduos fortes podem surgir da exploração de outra característica ainda não desenvolvida naquela população. Para a descoberta deste atributo diferenciado ocorre a mutação, ou seja, a inserção de material genético diferente. Assim, se o indivíduo que sofreu mutação estiver tão apto à sobrevivência como os atuais, suas chances serão grandes no futuro processo de seleção.

Partindo deste pressuposto, John Holland procurou implementar um procedimento análogo para sistemas artificiais cujo entendimento se torna facilitado em função da manutenção dos termos da genética natural. Tal comparação está apresentada na Tabela 3.2 e envolve os principais conceitos de algoritmos genéticos.

Tabela 3.2 – Principais conceitos dos algoritmos genéticos [20].

Genética Natural	Algoritmo Genético
Ambiente de sobrevivência	Problema
Espaço de Busca	Onde são consideradas todas as possibilidades de solução de um determinado problema
Cromossomo ou Indivíduo (genótipo)	Concatenação de variáveis ou cadeia de bits que representam uma possível solução para o problema (codificação do problema)
Gene	Representação de cada parâmetro de acordo com o alfabeto utilizado (binário, inteiro ou real)
Fenótipo	Cromossomo codificado
População	Conjunto de pontos (indivíduos) no espaço de busca
Geração	Iteração completa do AG que gera uma nova população
Aptidão Bruta	Saída gerada pela função objetivo para um indivíduo da população
Aptidão Máxima	Melhor indivíduo da população corrente (o ponto que melhor satisfaz à função)

3.3.3 – PARÂMETROS

Além da forma como o cromossomo é codificado, existem vários parâmetros do AG que podem ser escolhidos para melhorar o seu desempenho. Entre eles, os mais importantes são: o número de gerações, o tamanho da população, a probabilidade de cruzamento e a

probabilidade de mutação. A influência de cada um deles depende do tipo de problema envolvido. Assim, a determinação de um conjunto de valores ótimos para estes parâmetros demandará a realização de um grande número de experimentos e testes [21].

É importante também, analisar de que maneira alguns parâmetros influenciam no comportamento dos AG, para que se possa estabelecê-los conforme as necessidades do problema e dos recursos disponíveis:

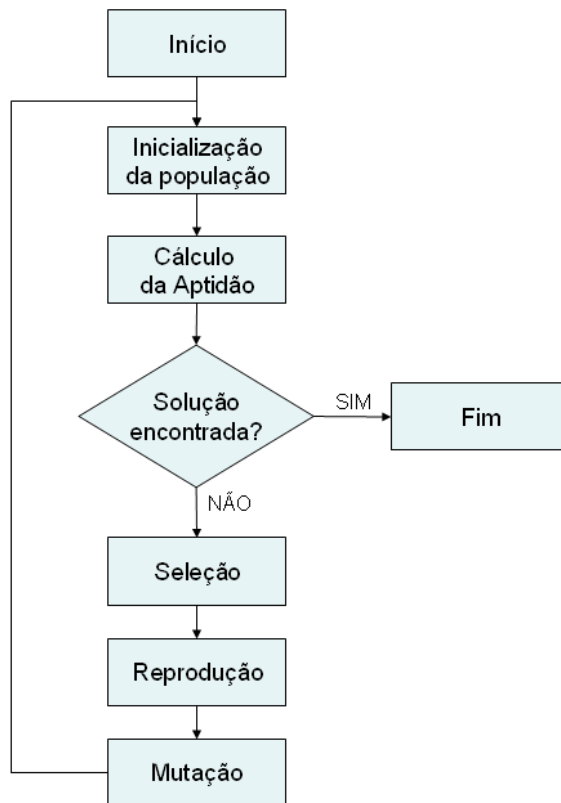
- **Número de Gerações:** Corresponde ao número de iterações do algoritmo ou ciclos em que serão geradas as populações. Com um valor alto, haverá uma melhor cobertura do espaço de busca e a maior parte da população será substituída, mas com valores muito elevados pode ocorrer perda de estruturas de alta aptidão, assim como, maior dispêndio computacional. Já em baixa quantidade, o algoritmo pode não convergir satisfatoriamente, podendo apontar um valor não correspondente ao ótimo global;
- **Tamanho da População:** Afeta o desempenho global e a eficiência dos AG. Com uma população pequena o desempenho pode cair, pois ocorrerá uma pequena cobertura do espaço de busca do problema. Uma grande população geralmente fornece uma cobertura representativa do domínio do problema, além de prevenir convergências prematuras para soluções locais ao invés de globais. No entanto, para se trabalhar com grandes populações, são necessários maiores recursos computacionais;
- **Taxa de Cruzamento (Pc):** Quanto maior for esta taxa, mais rapidamente novas estruturas serão introduzidas na população. Mas se esta for muito alta, estruturas com boas aptidões poderão ser descartadas do processo. Na literatura, os valores encontrados estão na faixa de 50 a 95%;

- **Taxa de Mutação (Pm):** Uma baixa taxa de mutação previne que uma dada posição fique estagnada em um valor, além de possibilitar que se chegue a qualquer ponto do espaço de busca. Com uma taxa muito alta a busca se torna essencialmente aleatória. Na literatura, os valores encontrados estão na faixa de 0,1 a 5%.

3.3.4 – OPERAÇÕES BÁSICAS

Assim como na biologia evolutiva, os AG selecionam indivíduos cada vez mais aptos através da recombinação do material genético de seus antecessores. Os AG possuem uma população com determinado número de possíveis soluções para o problema (cromossomos), e para cada uma delas está associado um valor de aptidão (capacidade de adaptação). Estes indivíduos passarão por um processo de seleção, que irá determinar quais deles serão escolhidos para reprodução na qual serão gerados novos descendentes. Consequentemente, os pais são descartados dando lugar aos sucessores que formarão uma nova população. A nova geração passará pelo mesmo processo de seus pais, até que gerem outra população. Este procedimento ocorre sucessivamente até que as melhores soluções sejam dominantes. Com o passar das gerações, os indivíduos começam a demonstrar poucas diferenças em relação a seus pais, fazendo com que o algoritmo convirja, resultando em um conjunto de soluções ótimas para a resolução do problema.

Neste contexto, a figura 3.3 ilustra a estrutura básica de um AG e seu pseudocódigo (forma genérica de ser escrito).



Procedimento AG

```

{ t = 0;
inicia_população (P, t)
avaliação (P, t);
repita até (t = d)

{ t = t + 1;
seleção_dos_pais (P, t);
recombinação (P, t);
mutação (P, t);
avaliação (P, t);
sobrevivem (P, t)
}
}
  
```

Onde:

t Tempo atual;

d Tempo determinado para finalizar o AG;

P População.

Figura 3.3 – Estrutura e pseudocódigo de um algoritmo genético básico.

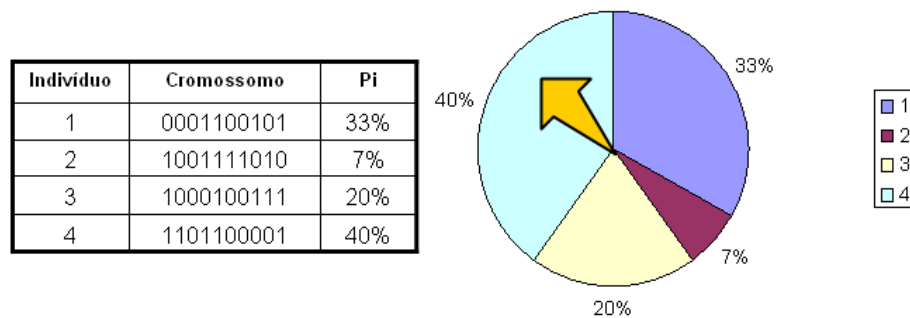
Como pode ser visto no fluxograma da figura 3.3, a estrutura de um AG compreende basicamente os seguintes passos:

- **Inicialização da População:** Uma população de n indivíduos é gerada aleatoriamente na qual cada um deles representa uma possível solução para o problema, ou seja, um ponto no espaço de busca das soluções;
- **Cálculo da Aptidão:** Geralmente a aptidão do indivíduo é determinada através do cálculo da função objetivo, ou seja, aquela que representa o problema. Os indivíduos aptos a solucionar a questão são ordenados conforme seu potencial.

Com o decorrer das gerações, objetiva-se a melhoria da aptidão dos indivíduos de sucessivas populações e, para tanto, fazem-se necessários os operadores genéticos. Estes operadores permitem que a nova geração seja parcial ou completamente nova, possuindo as

características de seus antecessores, diversificando a população e mantendo as peculiaridades de adaptação adquiridas pelas gerações passadas [22]. Os operadores genéticos são:

- **Seleção:** um dos métodos mais utilizados de seleção é o da roleta, onde cada indivíduo é representado proporcionalmente à sua aptidão. Este processo pode ser visualizado na figura 3.4. Considera-se uma roleta sobre um círculo dividido em n regiões (tamanho da população), onde a área de cada uma é proporcional à aptidão do indivíduo. Após n giros da roleta, as posições obtidas pelo cursor indicam os indivíduos selecionados. Evidentemente, os que ocuparem maior área terão maior probabilidade de serem selecionados mais vezes [23].



Pi = Probabilidade do indivíduo

Figura 3.4 – Exemplo do método da roleta utilizado para a seleção dos indivíduos.

- **Cruzamento (Reprodução):** Os cromossomos selecionados na etapa anterior são agrupados em pares aleatórios e serão os pais no processo de cruzamento. Este é o operador genético predominante, responsável pela recombinação de características durante a reprodução, permitindo que as próximas gerações herdem essas peculiaridades. Para tanto, é aplicado com probabilidade determinada pela taxa de *cross-over* (Pc), que deve ser maior que a taxa de mutação (Pm). O cruzamento pode ser empregado de várias formas, contudo,

as mais utilizadas são:

Um ponto: é escolhido um ponto de cruzamento e, a partir deste, as informações genéticas dos pais serão trocadas. As informações anteriores a este ponto em um dos pais são ligadas às informações posteriores a este ponto no outro pai. Na figura 3.5 verifica-se este tipo de cruzamento para uma concatenação de variáveis de codificação binária.

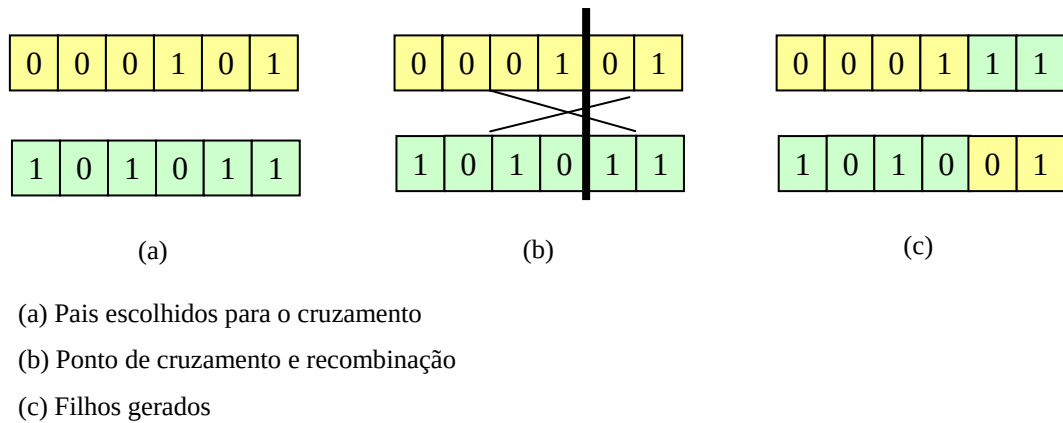


Figura 3.5 – Cruzamento por um ponto.

Multi pontos: é uma variação do procedimento anterior que realiza a troca de material genético através de mais de um ponto. No caso de dois pontos de corte, um dos filhos fica com a parte "central" de um dos pais mais as partes extremas do outro pai e vice versa. Este processo pode ser visualizado na figura 3.6.

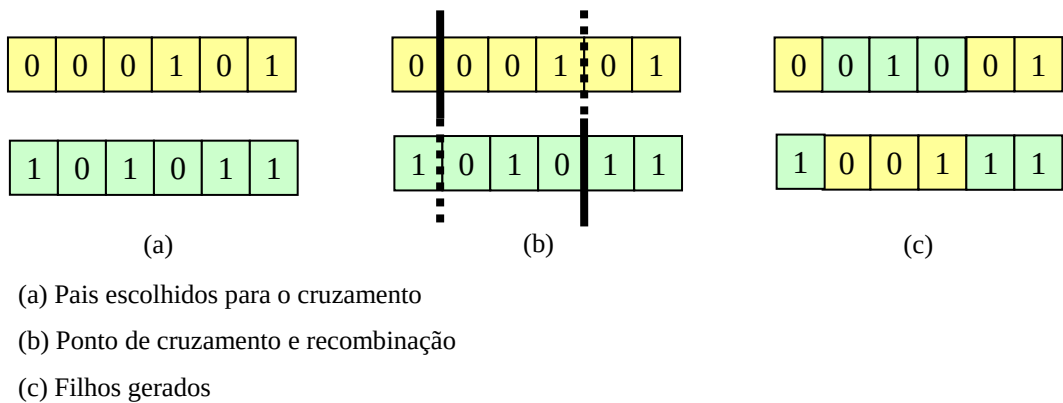


Figura 3.6 – Cruzamento por dois pontos.

Uniforme: não utiliza pontos de cruzamento, mas, determina através de um parâmetro global, qual a probabilidade de cada variável ser trocada entre os pais.

- **Mutação:** Esta operação permite uma maior varredura do espaço de busca e evita que o algoritmo genético convirja muito cedo para mínimos locais, pois, altera levemente a direção da busca. Como demonstra a figura 3.7, a mutação é efetuada através da alteração do valor de um gene sorteado nos indivíduos com uma probabilidade dada pela taxa de mutação (P_m).

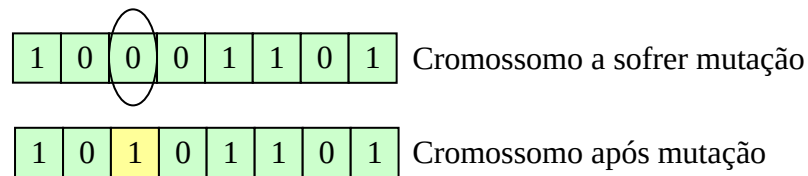


Figura 3.7 – Exemplo de Mutação.

Com a finalidade de melhorar a convergência e assegurar um melhor desempenho dos AG é comum a utilização de um método chamado de elitismo. Este consiste na escolha dos indivíduos com maior valor de aptidão da população, passando-os, diretamente, às próximas gerações, para que possam participar das novas reproduções, garantindo que não sejam perdidas as melhores possibilidades de soluções encontradas em cada fase do AG. Normalmente estes indivíduos com elevado valor de aptidão, representam um número muito pequeno na população. A frequência fica em torno de 1 a 2 indivíduos selecionados em cada geração.

3.4 – APLICATIVO COMPUTACIONAL PARA A MAXIMIZAÇÃO DA POTÊNCIA TRANSMISSÍVEL VIA ALGORITMO GENÉTICO

O cerne das questões investigadas neste trabalho está na busca da disposição ótima dos condutores, no sentido da maximização da potência transmissível em linhas de transmissão de energia elétrica via algoritmo genético, uma vez que o aumento da potência transmissível implica na melhoria da regulação de tensão na linha. Como ponto de partida para o estabelecimento do processo utilizam-se topologias convencionais às quais são impostos limites aceitáveis para as variáveis de definição do espaço de busca.

Conforme estabelecido na seção 2.3 do Capítulo II, a expressão que determina a potência máxima transmissível por uma linha conectando barras com tensão controlada corresponde àquela identificada por expressão (35). Nesta, fixando-se os valores das tensões dos dois terminais da linha, conclui-se que a potência máxima transmissível será função apenas das constantes generalizadas $\dot{A}$ e $\dot{B}$, dadas pelas equações (27) e (28) respectivamente. Adicionalmente, verifica-se que estas constantes dependem da impedância longitudinal e da admitância transversal da linha de transmissão, as quais, por sua vez, são definidas pelas características dos condutores e da disposição dos mesmos entre si e ainda, em relação ao solo.

Sendo assim, a potência máxima transmissível está diretamente relacionada com disposição dos condutores e, diante deste fato, o algoritmo genético se apresenta como uma boa alternativa para maximizar a capacidade de transmissão de energia elétrica. Isto se processa através de inúmeras combinações das distâncias entre fases, distâncias entre os subcondutores, e ainda, da altura dos condutores com relação ao solo. Com tais premissas em mente, foram implementados algoritmos genéticos referentes a diversas configurações geométricas das fases, quais sejam: horizontal, vertical, triangular equilátero e triangular

isósceles para linhas de 34,5 kV e 138kV, com e sem cabo-guarda (também conhecido como cabo para-raios). Tais implementações foram desenvolvidas em MATLAB 7.0.1 gerando um aplicativo para otimização da potência transmissível em linhas aéreas. O ponto inicial deste aplicativo foi a codificação do problema através de sua representação matemática e da criação de cromossomos binários. Estes, são envolvidos no AG que avaliará seus potenciais de solução do problema em questão, utilizando-se da seleção por roleta, do cruzamento e da mutação, ambos por dois pontos escolhidos aleatoriamente, e do elitismo que assevera a sobrevivência dos dois melhores indivíduos (possíveis soluções) de cada população nas próximas gerações.

A figura 3.8 ilustra os campos de entrada de dados necessários à execução do aplicativo desenvolvido.

Inicialmente é apresentada a identificação da configuração a ser simulada. Logo a seguir, são solicitados os parâmetros do AG como: gerações, população inicial, probabilidade de cruzamento e de mutação, podendo ser preenchidos à escolha do usuário. Posteriormente devem-se inserir alguns dados de entrada da linha a ser simulada.

```
#####
#
##### IMPLEMENTAÇÃO DE ALGORITMO GENÉTICO - LPNE #####
#
##### Linha Trifásica com Disposição Horizontal - 1 a 4 subcondutores por fase #####
#
##### Sem CABO GUARDA #####
#
#####

Entre com o número de GERAÇÕES(iterações) desejado: 60

Entre com a POPULAÇÃO: 50

Entre com a PROBABILIDADE DE CRUZAMENTO Sugestão(0.5<=pc<=0.95): .9

Entre com a PROBABILIDADE DE MUTAÇÃO Sugestão(0.001<=pm<=0.1): .01

Entre com o número de subcondutores: (1) (2) (3) ou (4)? => 4

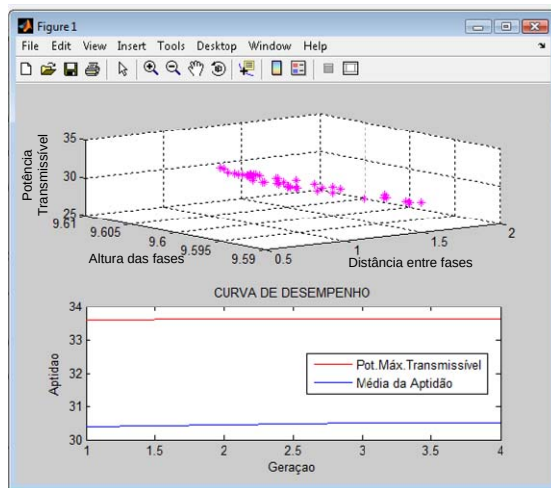
Entre com a distancia entre os subcondutores(cm): 10

Escolha o cabo condutor :
(1) 1/0 AWG CAA (2) 4/0 AWG CAA (3) 336,4 MCM CAA ou (4) 556,5 MCM CAA => 2

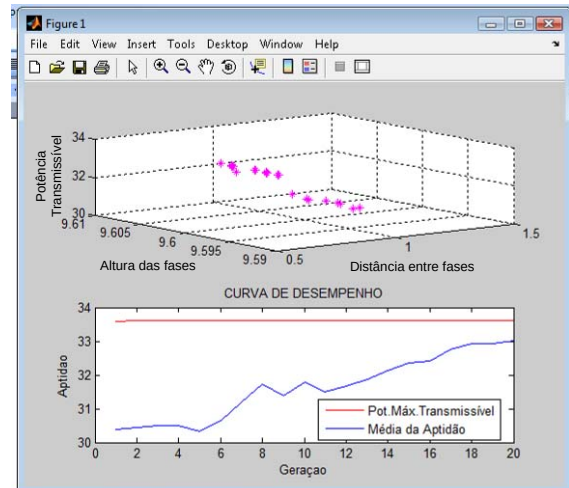
Entre com o Percentual da Potência Característica: 100
PROCESSANDO INFORMAÇÕES.....
```

Figura 3.8 – Identificação da linha e entrada de dados.

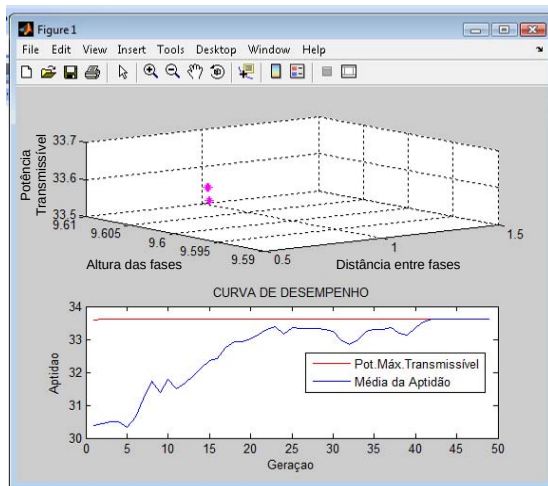
Durante o processamento das informações, o aplicativo abre uma figura demonstrativa da varredura do espaço de busca e da curva de desempenho do AG. Estas informações são dinâmicas e atualizadas a cada nova geração, conforme mostrado na figura 3.9.



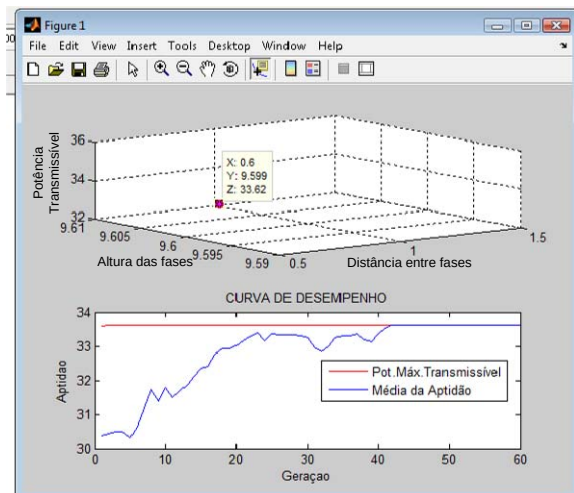
(a) Quarta geração



(b) Vigésima geração



(c) Quadragésima nona geração



(d) Convergência

Figura 3.9 – Processo de Convergência.

Como pode ser visto na figura anterior, os pontos vermelhos do gráfico tridimensional representativo do espaço de busca do algoritmo indicam a população de possíveis soluções testadas a cada geração. A potência máxima calculada a cada geração (aptidão máxima) é indicada pela linha vermelha da curva de desempenho. A linha azul, por sua vez, representa a média aritmética das aptidões dos indivíduos de cada geração. Esta linha tende a valores cada vez maiores, em função do elitismo aplicado e, quando de encontro ou proximidade com a

linha vermelha do mesmo gráfico, está concluído o processo de convergência do AG. O ponto correspondente à máxima potência transmissível global encontrada é ressaltado no gráfico superior de demonstração da varredura do espaço de busca (coordenada z), indicando também a distancia entre as fases (coordenada x) e a altura das mesmas (coordenada y), conforme figura 3.9(d).

Somado às propriedades acima, o aplicativo desenvolvido também considera, nos processos de cálculo, a determinação de parâmetros de desempenho da linha de transmissão para distintas cargas radiais, cada qual associada com um valor percentual da potência característica da linha otimizada. Isto posto, fica esclarecido que, após a determinação da configuração ótima dos condutores, aplicam-se cargas correspondentes a um percentual da potência característica para fins da avaliação do desempenho operacional da resposta obtida para a linha. Estas cargas são inseridas no terminal receptor da linha de transmissão e as grandezas representativas do desempenho da linha em pauta são apresentadas, finalmente, conforme evidencia o exemplo contido na figura 3.10. Nesta encontram-se: a regulação percentual da tensão - equação (19) e o rendimento da transmissão - equação (39), entre outras (fator de potência e corrente).

Distancia_entre_Fases =	
0.6000	
Altura_das_Fases =	
9.5990	Rend_percent =
	95.2577
Potencia_Maxima_Transmissivel =	FPot1 =
33.6221	0.9844
Reg_percent =	I2_abs =
6.8441	122.8078
FPot2 =	I1_abs =
0.9859	120.2880

Figura 3.10 – Resultados da simulação.

Com a finalidade de ilustrar a potencialidade do método de otimização, são apresentados, na sequência, dois exemplos, sendo um atrelado com uma linha de 34,5kV e outro de 138kV, as quais correspondem às classes de tensão focadas como aplicações para fins desta pesquisa.

3.4.1 – EXEMPLO DE APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PARA UMA LINHA DE TRANSMISSÃO DE 34,5 kV

Este exemplo ilustra a utilização do *software* para o processo de otimização de um arranjo em que as fases encontram-se dispostas horizontalmente, e ainda, com cada fase sendo constituída por quatro subcondutores, sem cabo-guarda e tensão de 34,5 kV. A situação em pauta é indicada na figura 3.11.

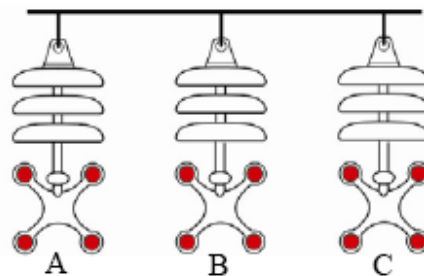


Figura 3.11 – Disposição construtiva em configuração horizontal, com quatro subcondutores por fase, feixe circular.

Os dados construtivos da linha convencional e algumas informações elétricas, considerados a título desta simulação, são apresentados na tabela 3.3. Esta configuração será utilizada como referência para o processo avaliativo quando da obtenção do arranjo otimizado.

Tabela 3.3 – Dados da linha de transmissão convencional de 34,5kV com disposição horizontal.

Altura dos condutores	9,60m
Distância entre as fases A e B, B e C	1,10m
Distância entre subcondutores	0,10m
Flecha dos condutores	1,40m
Vão Básico	150m
Comprimento da linha	100km
Resistividade do solo	2000 Ω m
Cabo condutor (CAA)	4/0AWG
Tensão da linha	34,5kV
Percentual da potência característica para cálculo do desempenho	100%

A partir das informações contidas na tabela anterior é possível calcular a potência máxima transmissível para a linha convencional fornecida de 34,5kV. O valor encontrado é de 30,49 MW.

A implementação do algoritmo genético considera a topologia original da linha no que tange a sua disposição horizontal e distância entre subcondutores, porém, os dados de altura e distância entre fases constituem-se em grandezas passíveis do processo de busca através do algoritmo genético, o qual, dentro das premissas estabelecidas, procurará por uma nova configuração visando a maximização da potência.

A variada gama dos valores de alturas e de distância entre fases resultam no chamado espaço de busca do algoritmo genético, e este, para fins da aplicação em foco, foi pré-definido restringido nos termos indicados na tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Limites das variáveis que definem o espaço de busca para o exemplo 34,5kV.

Altura dos condutores	9,59m a 9,61m
Distância entre as fases	0,50m a 1,50m

A figura 3.12 mostra o preenchimento dos dados da linha, assim como os parâmetros necessários à aplicação do algoritmo genético. Para esta simulação trabalhou-se com 60 gerações, cada uma delas testando uma população de 50 possíveis soluções. Adotou-se uma taxa de cruzamento de 90% e de 1% para a mutação.

```
#####  
#                                                                                                     #  
##### IMPLEMENTAÇÃO DE ALGORITMO GENÉTICO - LPNE #####  
#                                                                                                     #  
##### Linha Trifásica com Disposição Horizontal - 1 a 4 subcondutores por fase #####  
#                                                                                                     #  
##### Sem CABO GUARDA #####  
#                                                                                                     #  
#####  
  
Entre com o número de GERAÇÕES(iterações) desejado: 60  
  
Entre com a POPULAÇÃO: 50  
  
Entre com a PROBABILIDADE DE CRUZAMENTO Sugestão(0.5<=pc<=0.95): .9  
  
Entre com a PROBABILIDADE DE MUTAÇÃO Sugestão(0.001<=pm<=0.1): .01  
  
  
Entre com o número de subcondutores: (1) (2) (3) ou (4)? => 4  
  
Entre com a distancia entre os subcondutores(cm): 10  
  
Entre com o Percentual da Potência Característica: 100  
PROCESSANDO INFORMAÇÕES.....
```

Figura 3.12 – Entrada de Parâmetros do AG.

As figuras 3.13 a 3.15 ilustram algumas etapas da convergência do AG até a obtenção dos resultados otimizados, os quais podem ser visualizados na figura 3.16.

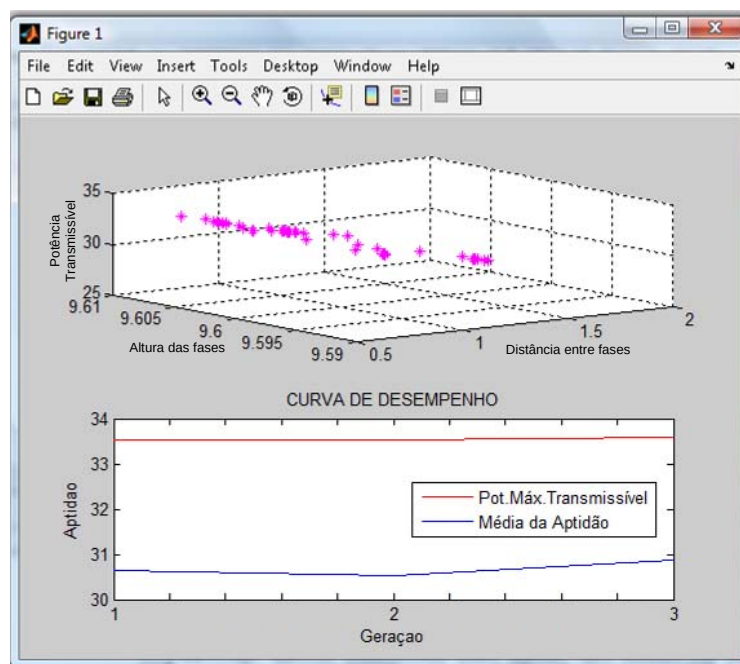


Figura 3.13 – Inicialização da população e cálculo das primeiras gerações.

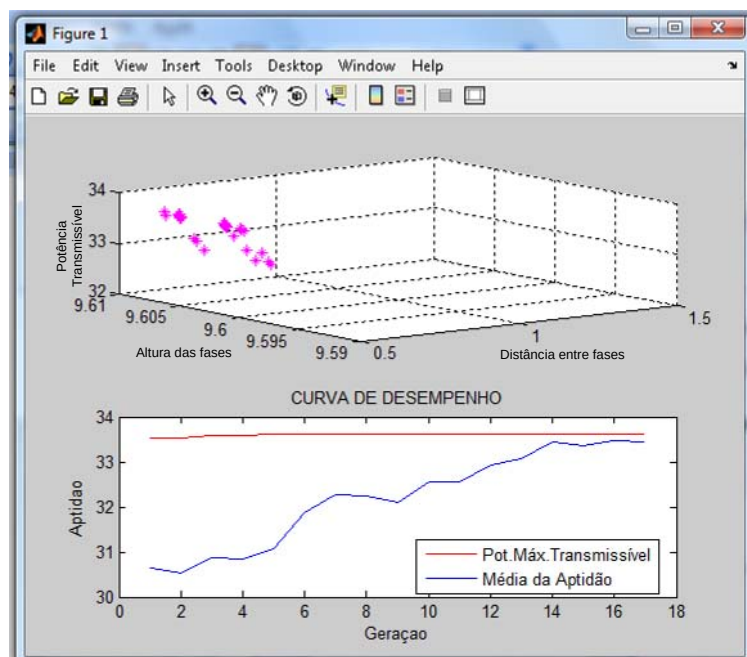


Figura 3.14 – Cálculo de aptidão da quadragésima sétima geração.

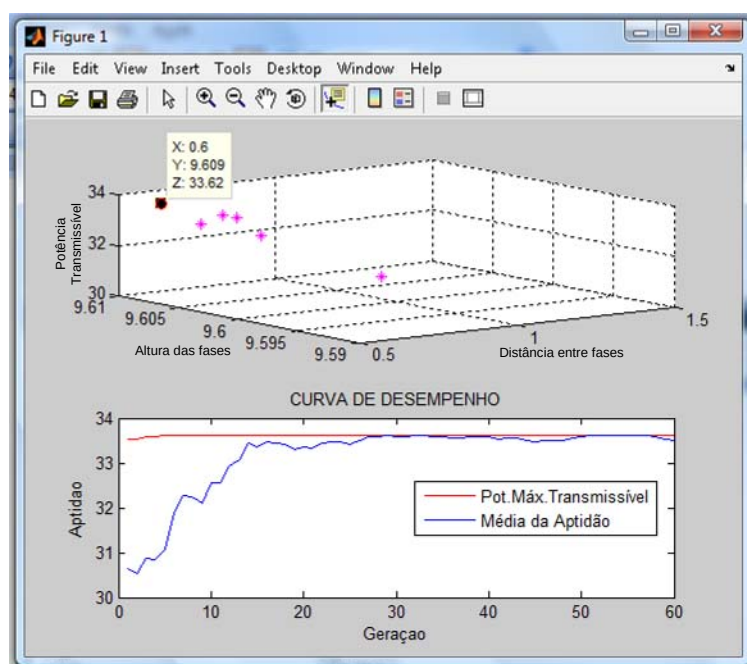


Figura 3.15 – Convergência do AG e apontamento da potência máxima transmissível encontrada.

Distancia_entre_Fases =	
0.6000	FPot2 =
	0.9859
Altura_das_Fases =	
9.6090	Rend_percent =
	95.2577
Potencia_Maxima_Transmissivel =	
33.6221	FPot1 =
	0.9844
Reg_percent =	
6.8441	I2_abs =
	122.8078
FPot2 =	
0.9859	I1_abs =
	120.2880

Figura 3.16 – Resultados encontrados.

Pode-se observar, pelos resultados anteriores, que as distâncias entre as fases foram alteradas pelo AG para 0,60 metros. Esta nova configuração resultou em uma elevação da potência transmissível de 30,49 MW para 33,6 MW (ganho de 10,3%). É importante observar

que eventuais dificuldades construtivas deverão orientar para a adoção de novas condições de contorno, compatíveis com a implementação em campo. No que tange aos valores da regulação percentual e do rendimento, estes se apresentaram iguais a 6,84% e 95,26%, respectivamente, para o atendimento de uma carga igual a 100% da potência característica da linha de transmissão otimizada.

3.4.2 – EXEMPLO DE APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PARA UMA LINHA DE TRANSMISSÃO DE 138 kV

Este caso contempla uma linha de configuração triangular isósceles, possuindo 04(quatro) subcondutores por fase, com cabo-guarda e tensão de 138kV. O arranjo básico construtivo é indicado na figura 3.17.

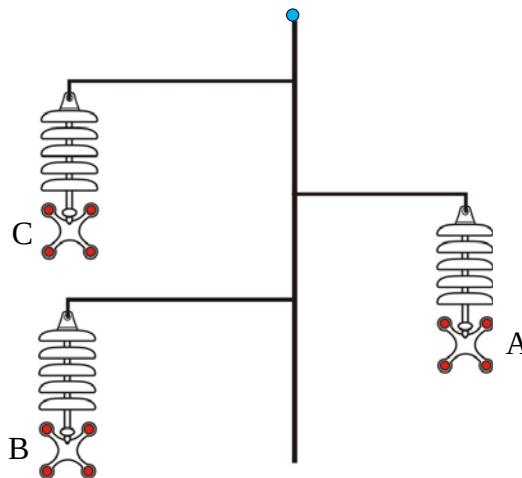


Figura 3.17 – Disposição em configuração triangular isósceles, com quatro subcondutores por fase, feixe circular.

Os dados construtivos da linha convencional, com disposição triangular, e algumas informações elétricas, constituindo o arranjo físico a ser utilizado como referência, são apresentados na tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Dados da linha de transmissão convencional de 138kV com disposição triangular.

Altura do Condutor A	19,90m
Altura do Condutor B	18,00m
Altura do Condutor C	21,80m
Posição Horizontal do Condutor A em relação ao eixo da torre	2,74m
Posição Horizontal do Condutor A em relação ao eixo da torre	-2,74m
Posição Horizontal do Condutor A em relação ao eixo da torre	-2,74m
Distância entre subcondutores	0,20m
Flecha dos condutores	1,40m
Vão Básico	150m
Comprimento da Linha	100km
Resistividade do Solo	2000 Ω m
Cabo condutor (CAA)	4/0AWG
Tensão da Linha	138kV
Percentual da potência característica para cálculo do desempenho	100%
Altura do cabo-guarda	24,40m
Flecha do cabo-guarda	1,40m
Cabo-guarda (CAA)	4/0AWG

Para o arranjo anterior a potência máxima transmissível é de 432,60 MW. Este valor constitui-se pois no valor de referência para fins da comparação do ganho associado com a configuração otimizada.

Para o presente caso, objetivando definir os limites para os espaços de busca das variáveis, apresenta-se, na tabela 3.6, as condições de contorno impostas.

Tabela 3.6 – Limites das variáveis que definem o espaço de busca para exemplo de 138kV.

Altura dos condutores	9,00m a 22,00m
Distância entre as fases e fase-estrutura	1,44m a 3,80m

A figura 3.18 mostra o preenchimento dos dados da linha, assim como os parâmetros necessários à aplicação do AG.

```
#####
#
#####      IMPLEMENTAÇÃO AG LPNE      #####
#
#####  Linha Trifásica com Disposição Isosceles - para 1 a 4 subcond por fase  #####
#
#####      Com CABO GUARDA      #####
#####
Entre com o número de GERAÇÕES(iterações) desejado:  60

Entre com a POPULAÇÃO:  50

Entre com a PROBABILIDADE DE CRUZAMENTO Sugestão(0.5<=pc<=0.95):  .9

Entre com a PROBABILIDADE DE MUTAÇÃO Sugestão(0.001<=pm<=0.1):  .01

Entre com o número de subcondutores: (1) (2) (3) ou (4)?  => 4

Entre com a distancia entre os subcondutores(cm):  20
```

Figura 3.18 - Entrada de Parâmetros do AG.

As figuras 3.19 e 3.20 ilustram a inicialização da população e alguns dos cálculos de aptidão. A figura 3.21 mostra a convergência do AG, enquanto que a figura 3.22 destaca os resultados finais obtidos.

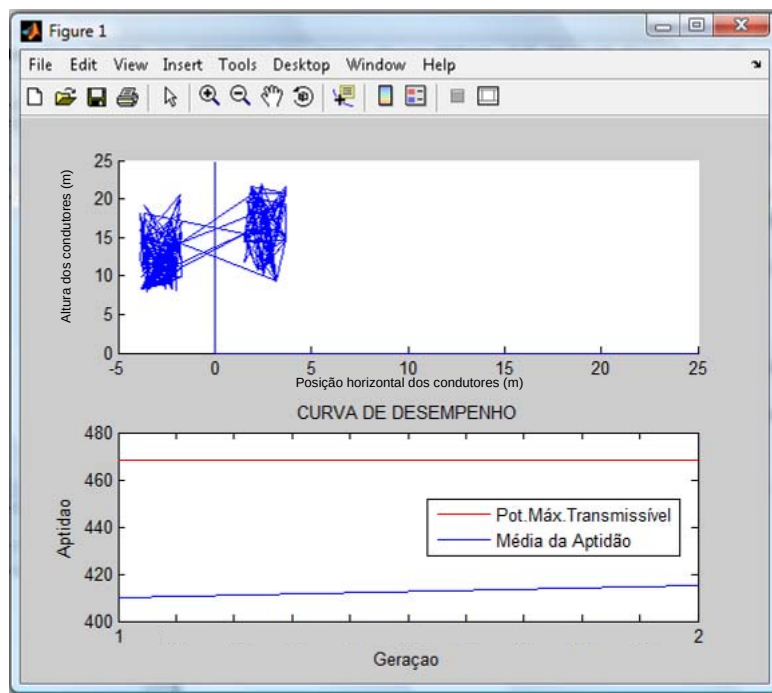


Figura 3.19 – Inicialização da população e primeiros cálculos de aptidão.

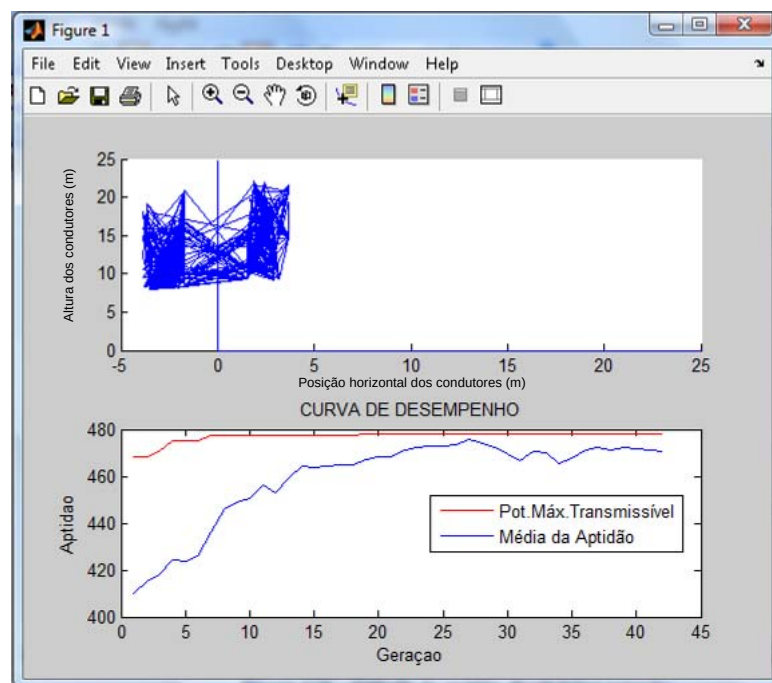


Figura 3.20 – Cálculo de aptidão da quadragésima terceira geração.

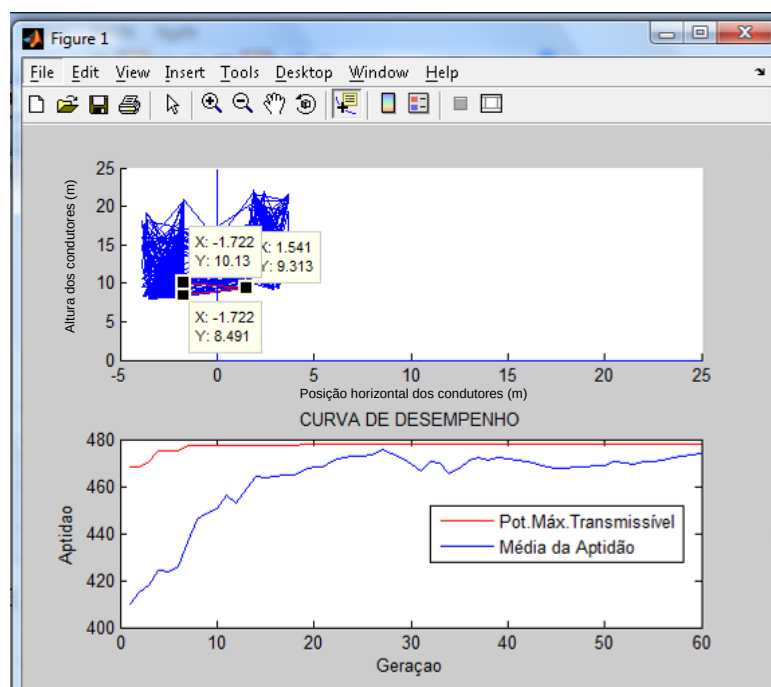


Figura 3.21 – Convergência do AG.

Distancia_entre_Fase_A_e_Cabo_guarda =	
1.5414	
Distancia_entre_Fase_B_e_Cabo_guarda =	Reg_percent =
-1.7219	5.4794
Distancia_entre_Fase_C_e_Cabo_guarda =	FPot2 =
-1.7219	0.9908
Altura_da_Fase_A =	Rend_percent =
9.3125	96.2734
Altura_da_Fase_B =	FPot1 =
8.4912	0.9895
Altura_da_Fase_C =	I2_abs =
10.1338	388.0917
Potencia_Maxima_Transmissivel =	I1_abs =
477.8886	381.5448

Figura 3.22 – Resultados apresentados pelo AG.

Observa-se nas figuras anteriores, que as distâncias horizontais das fases em relação ao cabo-guarda foram alteradas pelo AG para valores correspondentes a 1,54m para a fase A e -1,72m para as fases B e C, enquanto as alturas foram indicadas a 9,31m para a fase A, 8,49m para a fase B e 10,13m para a fase C. Esta nova configuração resultou em uma elevação da potência máxima transmissível de 432,60MW para 477,88 MW (ganho de 10,5%). Mais uma vez, destaca-se que os números obtidos refletem apenas um espaço de busca aberto que poderá ser delimitado em função dos dados de entrada. Neste caso, constatou-se uma regulação de 5,48% e um rendimento de 96,27% para uma carga igual a 100% da potência característica da linha de transmissão.

3.5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente unidade desta dissertação foi direcionada à apresentação de uma síntese dos principais métodos disponíveis para os mais distintos processos de busca de soluções ótimas. Dentre as possibilidades, a seleção feita recaiu sobre o denominado Algoritmo Genético, cujas propriedades se mostram atrativas para o tratamento de problemas da natureza contemplada nesta pesquisa.

Em consonância com a expressão que determina a potência máxima transmissível por uma linha conectando barras com tensão controlada, fixando-se os valores das tensões dos dois terminais da linha, verificou-se que a potência máxima transmissível será função apenas das constantes generalizadas, e que estas dependem da impedância longitudinal e da admitância transversal da linha de transmissão, as quais, por sua vez, são definidas pelas características dos condutores e da disposição dos mesmos entre si e ainda, em relação ao solo. Sendo assim, a potência máxima transmissível está diretamente relacionada com

disposição dos condutores e, diante deste fato, o algoritmo genético se apresenta como uma boa alternativa para maximizar a capacidade de transmissão de energia elétrica.

Com tais premissas em mente, foram implementados algoritmos genéticos referentes a diversas configurações geométricas das fases, quais sejam: horizontal, vertical, triangular equilátero e triangular isósceles. Tais desenvolvimentos utilizando a plataforma MATLAB culminaram por um aplicativo de otimização da potência transmissível, o qual foi apresentado e utilizado com eficácia para os fins aqui almejados. É relevante destacar que o programa desenvolvido, adicionalmente à questão da busca da configuração ótima sob o ponto de vista de transmissibilidade de potência, ainda determina alguns parâmetros de desempenho, a exemplo da regulação da tensão e o rendimento da transmissão.

Com a finalidade de exemplificar a utilização do programa elaborado, o mesmo foi empregado para duas situações de busca, uma direcionada à otimização de uma linha em 34,5kV e outra em 138kV. Estas duas tensões consistiram nos objetos focais desta pesquisa. Como demonstrado para os exemplos selecionados, comparativamente às estruturas convencionais utilizadas como referência para os cálculos, o processo de otimização evidenciou que mudanças ocorridas em espaçamentos conduziram a ganhos na capacidade de transmissão de potência de cerca de 10%. É importante ressaltar que muito embora tais valores se mostrem relativamente modestos, os casos utilizados foram apenas elucidativos e vantagens maiores podem ser vislumbradas quando se considera a possibilidade de alterações de outras características que foram conservadas constantes para os estudos feitos.

CAPÍTULO IV

APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PARA MAXIMIZAÇÃO DA POTÊNCIA TRANSMISSÍVEL

4.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Uma vez constatada a eficácia do procedimento proposto para o processo de otimização e obtido um aplicativo computacional que contemple os mecanismos estabelecidos, o capítulo anterior esclareceu, através de dois exemplos básicos, a utilização da ferramenta obtida.

Não obstante os resultados encorajadores, torna-se, neste momento, relevante, uma maior exploração do *software* visando, sobretudo, evidenciar sua potencialidade de uso. Objetivando contemplar tal meta, esta unidade da dissertação encontra-se direcionada aos seguintes pontos focais:

- Avaliação do desempenho da metodologia e aplicativo para outras configurações construtivas para os condutores fase constituintes de linhas de

transmissão de 34,5 kV e 138 kV;

- Utilização do conceito de feixes expandidos e emprego de diferentes condutores comercialmente disponíveis para a construção de linhas;
- Análise comparativa dos ganhos da transmissibilidade de potência para distintas situações.

4.2 – LINHAS DE TRANSMISSÃO DE 34,5 kV E 138 kV COM FEIXE CIRCULAR

Para estas simulações implementou-se o algoritmo genético para otimização da distância entre fases e da altura dos condutores, considerando os subcondutores dispostos em feixes circulares. Partiu-se, então, de configurações convencionais de linhas de transmissão de 34,5kV e 138kV, mantendo-se fixa a posição relativa entre as fases e a distância entre os subcondutores, sendo investigadas as seguintes situações:

- Para linhas de transmissão de 34,5kV foram consideradas as configurações horizontais e verticais, e empregados cabos de bitola 1/0AWG e 4/0AWG, sem cabo guarda;
- Para as linhas de 138 kV foram avaliados os desempenhos das configurações triangulares eqüiláteras e isósceles, e utilizados condutores de bitola 336,4MCM e 556,5MCM, com cabo guarda;
- Para todos os casos simulados foram avaliados arranjos constituídos por 1, 2, 3 e 4 subcondutores perfazendo cada uma das fases.

Visando o estabelecimento de termos comparativos sobre os ganhos associados com a otimização, para cada situação investigada foram anexados os resultados obtidos para as

configurações otimizadas e aqueles atrelados com a estrutura convencional com o mesmo cabo condutor.

Os dados da linha de transmissão de 34,5kV convencional com disposição horizontal são os mesmos indicados na tabela 3.3, todavia, as características para a linha com disposição vertical convencional são aquelas indicadas na tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Dados da linha de transmissão convencional de 34,5kV com disposição vertical.

Altura do Condutor A	10,70m
Altura do Condutor B	9,60m
Altura do Condutor C	8,50m
Distância Vertical entre as fases	1,10m
Flecha dos condutores	1,40m
Vão Básico	150m
Comprimento da Linha	100km
Resistividade do Solo	2000 Ω m
Cabo condutor (CAA)	1/0 ou 4/0AWG
Tensão da Linha	34,5kV

Também, as informações pertinentes à linha de transmissão de 138kV convencional são as mesmas utilizadas da tabela 3.5. Complementarmente, os parâmetros do algoritmo genético e os espaços de busca utilizados também estão em consonância com aqueles fornecidos anteriormente, com exceção do limite máximo de altura dos condutores para as linhas de 34,5kV, que foi ampliado para 22,0m (fase A).

Os resultados das simulações realizadas são apresentados nas tabelas 4.2, 4.3 e 4.4.

Tabela 4.2 – Resultados das simulações de linhas de transmissão de 34,5kV, com configuração horizontal e vertical, cabo 1/0AWG e sem cabo guarda.

Tipo	Cabo-Guarda	Tensão (kV)	Sub condutores	Dist. entre subcond.	Tipo de Cabo Condutor	Convencional ou Otimizado	Resultados							Altura da fase A	Altura da fase B	Altura da fase C
							Máxima Potência no Receptor (MW)	Regulação (%)	Rendimento (%)	FPot1	FPot2	Dist. Vertical entre fases	Dist. entre as fases AB	Dist. entre as fases BC		
Horizontal	Não	34,5	1		1/0 AWG	Convencional	4,62	17,71	84,47	0,93	0,91		1,1	1,1	9,6	
					1/0 AWG	Otimizado	4,66	17,23	85,1	0,93	0,91		1,49	1,49	9,59	
			2	10 cm	1/0 AWG	Convencional	9,73	14,31	88,48	0,94	0,93		1,1	1,1	9,6	
					1/0 AWG	Otimizado	9,79	13,53	89,3	0,95	0,94		1,59	1,59	9,59	
			3	10 cm	1/0 AWG	Convencional	14,73	11,91	90,93	0,95	0,95		1,1	1,1	9,6	
					1/0 AWG	Otimizado	14,74	13,38	89,49	0,94	0,95		0,88	0,88	9,6	
			4	10 cm	1/0 AWG	Convencional	19,32	10,34	92,37	0,97	0,97		1,1	1,1	9,6	
					1/0 AWG	Otimizado	19,64	12,09	90,78	0,95	0,95		0,6	0,6	9,6	
Vertical	Não	34,5	1		1/0 AWG	Convencional	4,62	17,71	84,47	0,93	0,91		1,1	1,1	9,6	
					1/0 AWG	Otimizado	4,66	17,24	85,08	0,93	0,91	1,49			12,44	10,94
			2	10 cm	1/0 AWG	Convencional	9,73	14,32	88,48	0,94	0,93		1,1	1,1	9,6	
					1/0 AWG	Otimizado	9,78	14,92	87,82	0,94	0,93	1,49			10,68	9,18
			3	10 cm	1/0 AWG	Convencional	14,73	11,91	90,93	0,95	0,95		1,1	1,1	9,6	
					1/0 AWG	Otimizado	14,74	12,42	90,44	0,95	0,95	0,88			10,77	9,88
			4	10 cm	1/0 AWG	Convencional	19,32	10,34	92,37	0,97	0,97		1,1	1,1	9,6	
					1/0 AWG	Otimizado	19,65	12,08	90,79	0,95	0,95	0,6			15,07	14,47

Tabela 4.3 – Resultados das simulações de linhas de transmissão de 34,5kV, com configuração horizontal e vertical, cabo 4/0AWG e sem cabo guarda.

Tipo	Cabo-Guarda	Tensão (kV)	Sub condutores	Dist. entre subcond.	Tipo de Cabo Condutor	Convencional ou Otimizado	Resultados								Altura da fase A	Altura da fase B	Altura da fase C
							Máxima Potência no Receptor (MW)	Regulação (%)	Rendimento (%)	FPot1	FPot2	Dist. Vertical entre fases	Dist. entre as fases AB	Dist. entre as fases BC			
Horizontal	Não	34,5	1		4/0 AWG	Convencional	9,84	11,46	91,35	0,96	0,96	1,10	1,10	9,60			
						Otimizado	9,87	12,56	90,29	0,95	0,95	0,62	0,62	9,59			
			2	10 cm	4/0 AWG	Convencional	18,46	8,51	93,93	0,97	0,97	1,10	1,10	9,60			
						Otimizado	19,16	9,69	92,90	0,97	0,97	0,60	0,60	9,60			
			3	10 cm	4/0 AWG	Convencional	25,07	6,71	95,34	0,98	0,98	1,10	1,10	9,60			
						Otimizado	26,91	7,90	94,40	0,97	0,98	0,60	0,60	9,60			
			4	10 cm	4/0 AWG	Convencional	30,48	5,66	96,13	0,98	0,99	1,10	1,10	9,60			
						Otimizado	33,62	6,84	95,25	0,98	0,98	0,60	0,60	9,60			
Vertical	Não	34,5	1		4/0 AWG	Convencional	9,84	11,46	91,35	0,96	0,96	1,10	1,10	9,60			
						Otimizado	9,87	12,42	90,43	0,95	0,95	0,62		18,36	17,85	17,35	
			2	10 cm	4/0 AWG	Convencional	18,46	8,51	93,93	0,97	0,97	1,10	1,10	9,60			
						Otimizado	19,33	10,13	92,56	0,96	0,96	0,50		19,09	18,59	18,09	
			3	10 cm	4/0 AWG	Convencional	25,07	6,71	95,34	0,98	0,98	1,10	1,10	9,60			
						Otimizado	26,97	7,95	94,30	0,98	0,97	0,58		20,48	19,90	19,31	
			4	10 cm	4/0 AWG	Convencional	30,48	5,66	96,13	0,98	0,99	1,10	1,10	9,60			
						Otimizado	33,62	6,84	95,25	0,98	0,98	0,60		20,57	19,97	19,37	

Tabela 4.4 – Resultados das simulações de linhas de transmissão de 138kV, com configuração triangular equilátera e isósceles, cabos 336,4MCM e 556,5MCM, com cabo guarda.

Tipo	Cabo-Guarda	Tensão (kV)	Sub condutores	Dist. entre subcond.	Tipo de Cabo Condutor	Convencional ou Otimizado	Resultados										
							Máxima Potência no Receptor (MW)	Regulação (%)	Rendimento (%)	FPot1	FPot2	Dist. entre fase A e cabo-guarda	Dist. entre fase B e cabo-guarda	Dist. entre fase C e cabo-guarda	Altura da fase A	Altura da fase B	Altura da fase C
Triangular Isósceles	Sim (altura de 24,40m)	138	1	-----	336,4 MCM	Conv. Triang. Equil.	223,46	7,49	94,75	0,98	0,98	2,74	-2,74	-2,74	19,9	18	21,8
						Otimizado Triang. Equil.	229,17	7,95	94,37	0,97	0,98	1,44	-1,44	-1,44	21,76	20,09	23,42
						Otimizado Triang. Isósceles	232,85	8,37	94,05	0,97	0,97	1,60	-1,52	-1,52	9,37	8,65	10,08
			556,5 MCM	Conv. Triang. Equil.	290,53	4,8	96,7	0,99	0,99	2,74	-2,74	-2,74	19,9	18	21,8		
				Otimizado Triang. Equil.	303,6	5,12	96,52	0,99	0,99	1,44	-1,44	-1,44	21,96	20,3	23,62		
				Otimizado Triang. Isósceles	308,89	5,33	96,38	0,99	0,99	1,84	-1,9	-1,9	9,02	8,3	9,74		
	Sim (altura de 24,40m)		2	20 cm	336,4 MCM	Conv. Triang. Equil.	364,42	5,1	96,5	0,99	0,99	2,74	-2,74	-2,74	19,9	18	21,8
						Otimizado Triang. Equil.	380,63	5,46	96,28	0,98	0,99	1,54	-1,54	-1,54	15,48	13,70	17,26
						Otimizado Triang. Isósceles	394,28	5,88	95,97	0,98	0,98	1,59	-2	-2	19,54	18,82	20,26
			556,5 MCM	Conv. Triang. Equil.	432,74	3,18	97,9	0,99	0,99	2,74	-2,74	-2,74	19,9	18	21,8		
				Otimizado Triang. Equil.	459,60	3,43	97,71	0,99	0,99	1,54	-1,54	-1,54	21,77	19,99	23,54		
				Otimizado Triang. Isósceles	481,82	3,67	97,55	0,99	0,99	1,78	-1,75	-1,75	9	8,28	9,72		
Sim (altura de 24,40m)	3	20 cm	336,4 MCM	Conv. Triang. Equil.	451,9	3,84	97,4	0,99	0,99	2,74	-2,74	-2,74	19,9	18	21,8		
				Otimizado Triang. Equil.	480,39	4,17	97,20	0,99	0,99	1,54	-1,54	-1,54	21,98	20,20	23,76		
				Otimizado Triang. Isósceles	501,11	4,39	97,05	0,99	0,99	1,77	-1,69	-1,69	15,59	14,78	16,41		
	556,5 MCM	Conv. Triang. Equil.	512,65	2,37	98,4	0,99	0,99	2,74	-2,74	-2,74	19,9	18	21,8				
		Otimizado Triang. Equil.	550,33	2,57	98,30	0,99	0,99	1,54	-1,54	-1,54	18,12	16,34	19,90				
		Otimizado Triang. Isósceles	581,13	2,79	98,15	0,99	0,99	1,55	-1,93	-1,93	9,51	8,71	10,32				
Sim (altura de 24,40m)	4	20 cm	336,4 MCM	Conv. Triang. Equil.	518,75	3,15	97,9	0,99	0,99	2,74	-2,74	-2,74	19,9	18	21,8		
				Otimizado Triang. Equil.	557,64	3,44	97,71	0,99	0,99	1,54	-1,54	-1,54	21,35	19,57	23,13		
				Otimizado Triang. Isósceles	587,89	3,76	97,49	0,99	0,99	1,86	-1,55	-1,55	9,15	8,33	9,97		
	556,5 MCM	Conv. Triang. Equil.	574,22	1,93	98,73	0,99	0,99	2,74	-2,74	-2,74	19,9	18	21,8				
		Otimizado Triang. Equil.	624,38	2,12	98,60	0,99	0,99	1,54	-1,54	-1,54	21,97	20,19	23,75				
		Otimizado Triang. Isósceles	667,54	2,32	98,46	0,99	0,99	1,7	-1,58	-1,58	10,81	9,98	11,64				

4.3 – LINHAS DE TRANSMISSÃO DE 34,5 kV E 138 kV COM FEIXES HORIZONTAL E VERTICAL

Uma vez que os resultados anteriores foram todos derivados para uma situação específica, a qual focou a busca da distância entre fases e altura dos condutores, mantendo-se os subcondutores inalterados quanto a sua estrutura circular, considerou-se relevante a avaliação do desempenho de outras formas construtivas para os feixes. Neste sentido, esta seção é dedicada à análise de outros arranjos para os feixes dos subcondutores, conservando-se, todavia, as mesmas estruturas para as composições de fase definidas anteriormente, quais sejam, horizontal e vertical, para linhas de transmissão de 34,5kV e, triangular eqüilátera e isósceles, para linhas de transmissão de 138kV.

Dentro deste enfoque foram contempladas as seguintes configurações para os feixes de subcondutores:

- Subcondutores dispostos na horizontal, conforme figuras 4.1 e 4.2;
- Subcondutores dispostos na vertical, conforme figuras 4.3 e 4.4.

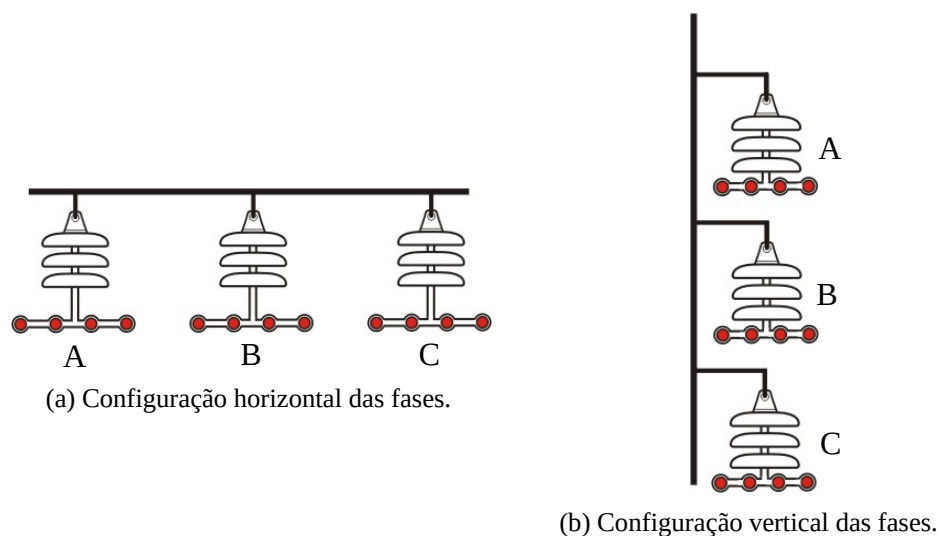


Figura 4.1 – Disposição para linhas 34,5kV com quatro subcondutores por fase, feixe horizontal.

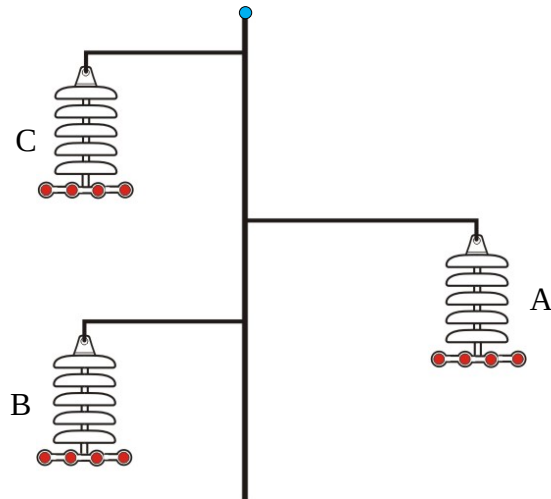


Figura 4.2 – Disposição em configuração triangular para linhas 138kV com quatro subcondutores por fase, feixe horizontal.

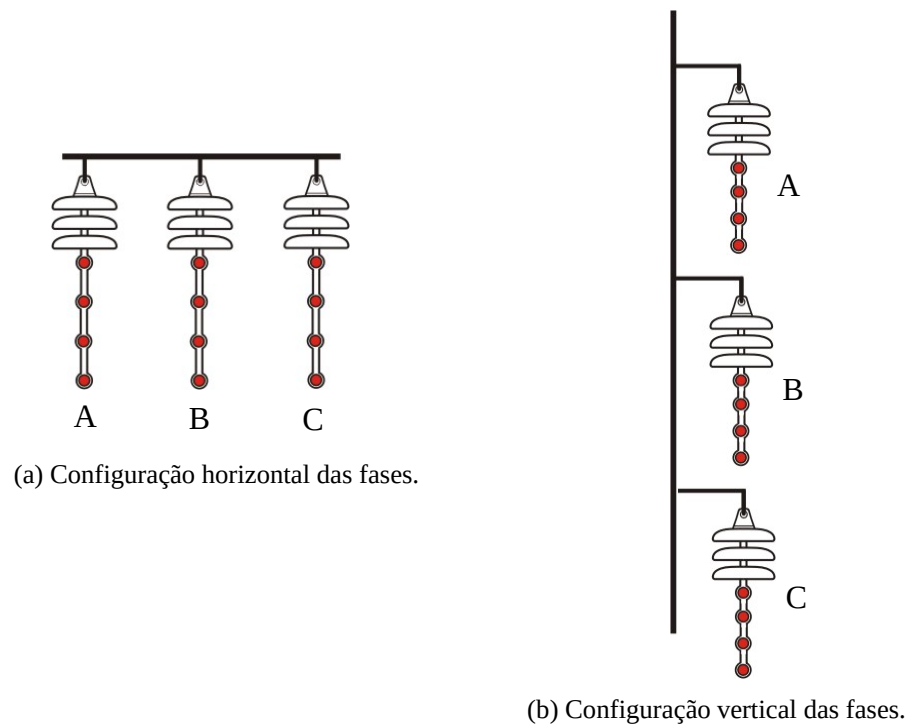


Figura 4.3 – Disposição para linhas 34,5kV com quatro subcondutores por fase, feixe vertical.

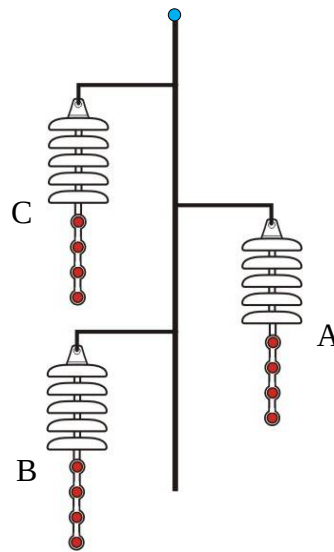


Figura 4.4 – Disposição em configuração triangular para linhas 138kV com quatro subcondutores por fase, feixe vertical.

Tendo em vista que a utilização de um ou dois subcondutores por fase não ocasiona nenhuma alteração dos resultados obtidos para feixes circulares, os casos analisados contemplam as situações que empregam 3(três) ou 4(quatro) subcondutores por feixe.

Os demais dados das linhas de transmissão de 34,5kV e 138kV são os mesmos já apresentados neste trabalho, bem como os parâmetros do algoritmo genético e os espaços de busca.

Os resultados obtidos das simulações estão apresentados nas tabelas 4.5 e 4.6.

Tabela 4.5 – Resultados das simulações de linhas de transmissão de 34,5kV, com configuração horizontal e vertical de fases, cabo 4/0AWG, feixes horizontais e verticais, sem cabo guarda.

Tipo	Feixe	Cabo-Guarda	Tensão (kV)	Sub Condutores	Dist. Entre Subcond.	Tipo de Cabo Condutor	Resultados										
							Máxima Potência no Receptor (MW)	Regulação (%)	Rendimento (%)	Fpot1	Fpot2	Dist. Vertical entre Fases	Dist. Entre as Fases AB	Dist. entre as Fases BC	Altura da Fase A	Altura da Fase B	Altura da Fase C
Horizontal	Horizontal	Não	34,5kV	3	10cm	4/0AWG	26,68	7,73	94,56	0,98	0,98		0,70	0,70		9,61	
	Vertical			4		4/0AWG	32,46	6,36	95,63	0,99	0,99		0,80	0,80		9,61	
				3		4/0AWG	27,67	8,54	93,92	0,98	0,98		0,50	0,50		9,61	
				4		4/0AWG	34,97	7,17	95,01	0,98	0,98		0,50	0,50		9,61	
Vertical	Horizontal	Não	34,5kV	3	10cm	4/0AWG	27,67	8,55	93,91	0,98	0,98	0,50			10,61	10,11	9,61
	Vertical			4		4/0AWG	34,97	7,49	94,76	0,98	0,98	0,50			10,61	10,11	9,61
				3		4/0AWG	26,68	7,68	94,61	0,98	0,98	0,70			10,61	10,11	9,61
				4		4/0AWG	32,46	6,37	95,62	0,99	0,99	0,80			10,61	10,11	9,61

Tabela 4.6 – Resultados das simulações de linhas de transmissão de 138kV, com configuração triangular equilátero e isósceles de fases, cabo 336,4MCM, feixes horizontais e verticais, com cabo guarda.

Tipo	Feixe	Cabo-Guarda	Tensão (kV)	Sub Condutores	Dist. Entre Subcond.	Tipo de Cabo Condutor	Resultados										
							Máxima Potência no Receptor (MW)	Regulação (%)	Rendimento (%)	Fpot1	Fpot2	Dist. entre Fase A e Eixo	Dist. entre Fase B e Eixo	Dist. entre Fase C e Eixo	Altura da Fase A	Altura da Fase B	Altura da Fase C
Triangular Equilátero	Horizontal	Sim	138kV	3	20cm	336,4MCM	481,57	4,20	97,18	0,99	0,99	1,64	-1,64	-1,64	21,87	19,98	23,77
				4			551,59	3,41	97,74	0,99	0,99	1,74	-1,74	-1,74	21,17	19,17	23,18
	3			492,67			4,34	97,09	0,99	0,99	1,44	-1,44	-1,44	21,97	20,31	23,64	
	4			574,03			3,58	97,62	0,99	0,99	1,44	-1,44	-1,44	21,99	20,32	23,65	
Triangular Isósceles	Horizontal	Sim	138kV	3	20cm	336,4MCM	508,82	4,64	96,88	0,99	0,99	1,94	-1,65	-1,65	9,05	8,33	9,77
				4			581,94	3,72	97,53	0,99	0,99	1,80	-2,08	-2,08	9,01	8,11	9,91
	3			521,15			4,54	96,95	0,99	0,99	1,49	-1,45	-1,45	9,00	8,26	9,74	
	4			612,86			3,72	97,53	0,99	0,99	1,50	-1,48	-1,48	10,65	9,90	11,40	

4.4 – LINHAS DE TRANSMISSÃO DE 34,5 kV E 138 kV COM FEIXES CIRCULARES EXPANDIDOS

Em consonância com os objetivos deste trabalho, com a meta de maximização da transmissibilidade de potência, os recursos até então empregados primaram pela busca da melhor disposição física entre as fases, considerando-se, entretanto, os feixes de subcondutores das fases dispostos de forma circular, horizontal ou vertical com distanciamentos fixos durante o processo de otimização. Dentro desta ótica, os conceitos utilizados pelo AG ficaram restritos à definição da melhor topologia entre as fases, sem, todavia, contar com a flexibilidade associada com os arranjos físicos entre os subcondutores. Reconhecendo, pois que ganhos adicionais poderão ser alcançados com a possibilidade da inclusão, no processo de otimização, da variação espacial entre tais condutores, surge a presente seção, imbuída do propósito de inserir esta nova grandeza na busca sistematizada em pauta.

No que tange à modelagem matemática para as linhas de transmissão, nos termos agora requeridos, os procedimentos seguem, em sua essência, as formulações anteriormente apresentadas. A diferença fundamental está na forma de tratamento dos dados de otimização que, nestas circunstâncias, passa a contemplar, de modo conjunto, os afastamentos entre fases e também entre os subcondutores. Neste contexto, em sintonia com a terminologia utilizada na área, tem-se o que é classicamente conhecido por linhas com feixe expandido (FEX).

Objetivando destacar, de forma aplicativa, a questão supramencionada, apresenta-se, na sequência, duas situações ilustrativas.

O primeiro caso descreve o processo de otimização para uma linha cujas fases encontram-se dispostas em linha horizontal, contendo 04(quatro) subcondutores por fase, sem cabo-guarda e tensão de 34,5 kV, conforme figura 4.5.

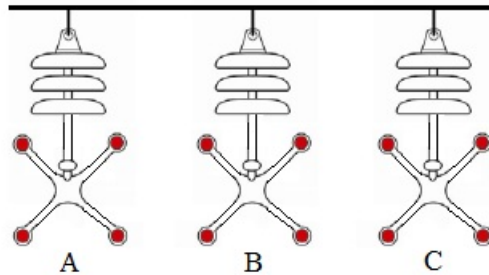


Figura 4.5 – Disposição em configuração horizontal para linhas 34,5kV com quatro subcondutores por fase, feixe circular expandido.

Os parâmetros para a simulação foram os mesmos adotados para o exemplo associado ao item 3.4.1, contudo, o espaço de busca foi modificado de forma a permitir a variação concomitante do espaçamento dos subcondutores e das fases, priorizando a maximização da potência transmissível.

Nestes termos, o espaço de busca para o caso em questão ficou definido entre 0,1m e 2,0m para a distância entre os subcondutores, e entre 6,0m e 22,0m para a altura das fases (fase A), enquanto que o limite de distância mínima entre fases se manteve inalterado.

A figura 4.6 mostra o preenchimento dos dados da linha, assim como os parâmetros necessários à aplicação do AG.

```
#####
#
##### IMPLEMENTAÇÃO DE ALGORITMO GENÉTICO - LPNE #####
# Feixe Expandido - FEX #
##### Linha Trifásica com Disposição Horizontal - 1 a 4 subcondutores por fase #####
# Considera subcondutores dispostos em círculo #
##### Sem CABO GUARDA #####
#
#####

Entre com o número de GERAÇÕES (iterações) desejado: 60

Entre com a POPULAÇÃO: 50

Entre com a PROBABILIDADE DE CRUZAMENTO Sugestão (0.5<=pc<=0.95): 0.9

Entre com a PROBABILIDADE DE MUTAÇÃO Sugestão (0.001<=pm<=0.1): 0.01

Entre com a distancia mínima permitida entre fases (em metros): 0.5

Entre com o número de subcondutores: (1) (2) (3) ou (4)? => 4

Escolha o cabo condutor :
(1) 1/0 AWG CAA (2) 4/0 AWG CAA (3) 336,4 MCM CAA ou (4) 556,5 MCM CAA => 2

Entre com o Percentual da Potência Característica: 100|
```

Figura 4.6 – Entrada de Parâmetros do AG.

A figura 4.7 ilustra o início do processamento e, consecutivamente, as figuras 4.8 e 4.9 apresentam a convergência do AG e seus respectivos resultados.

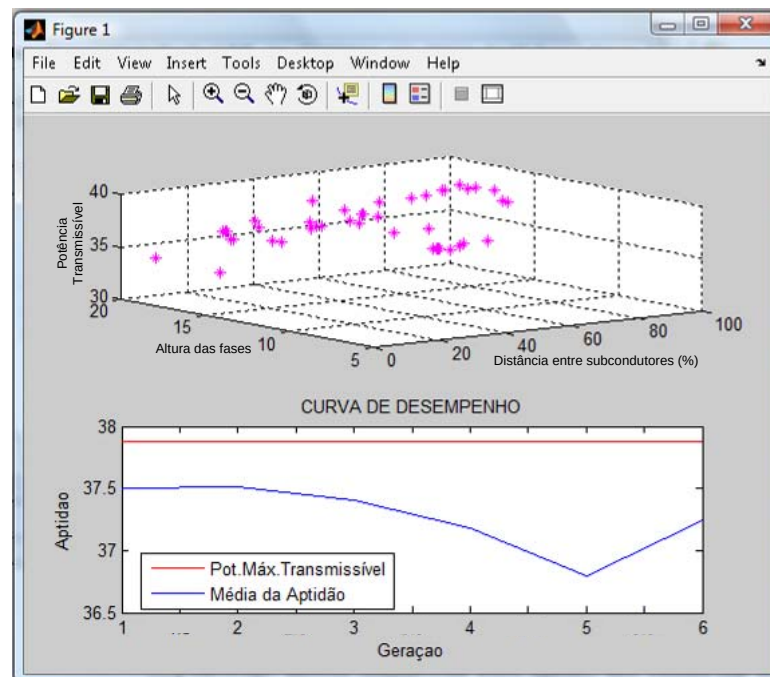


Figura 4.7 – Inicialização da população e cálculo das primeiras gerações.

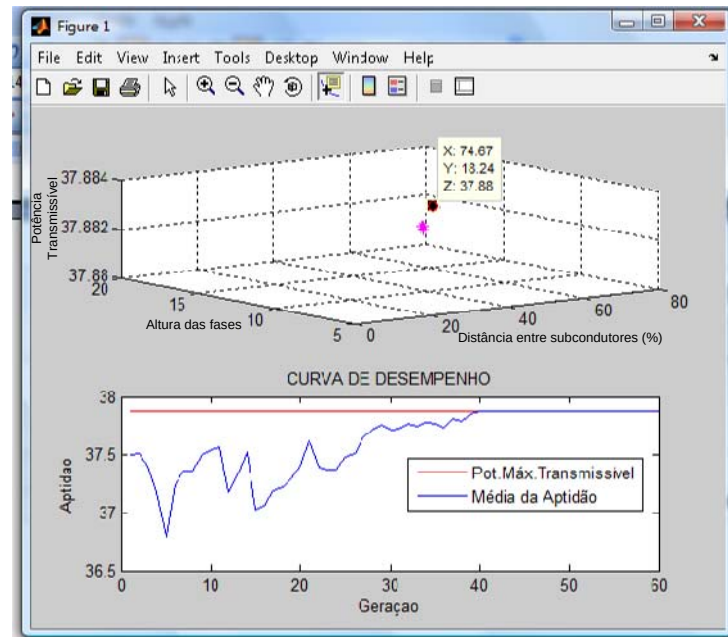


Figura 4.8 – Convergência do AG e apontamento da potência máxima transmissível encontrada.

Distancia_entre_Subcondutores =	FPot2 =
1.4935	0.9740
Distancia_entre_Fases =	Rend_percent =
1.9935	93.1212
Altura_das_Fases =	FPot1 =
18.9831	0.9729
Potencia_Maxima_Transmissivel =	I2_abs =
37.8819	175.9892
Reg_percent =	I1_abs =
9.5244	171.1910

Figura 4.9 – Resultados encontrados.

Como se observa na figura 4.9, a potência máxima encontrada para este caso resultou em 37,88 MW. Em comparação com a linha convencional original constata-se, pois, que houve um aumento de 24,27% para a potência transmissível. Também, diante deste nova

conjuntura, os distanciamentos sugeridos pelo AG, tanto para as fases, como para os subcondutores, foram de 1,99m e 1,49m, respectivamente.

O segundo caso selecionado para apresentação e discussão está associado com a linha de 138 kV com configuração triangular isósceles, com 04(quatro) subcondutores por fase e com cabo-guarda, conforme figura 4.10. Os demais parâmetros são os mesmos relativos ao exemplo do item 3.4.2, com exceção do espaço de busca para a distância entre os subcondutores que também ficou definido entre 0,1m a 2,0m.

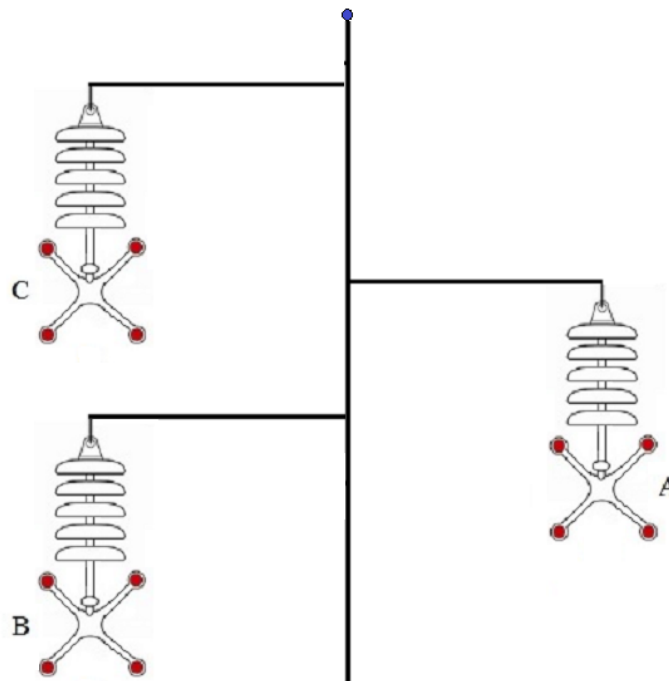


Figura 4.10 – Disposição em configuração triangular para linhas 138kV com quatro subcondutores por fase, feixe circular expandido.

A figura 4.11 mostra o preenchimento dos dados da linha, assim como os parâmetros necessários à aplicação do AG.

```
#####
#
##### IMPLEMENTAÇÃO AG LPNE #####
#
##### Feixe Expandido - FEX #####
##### Linha Trifásica com Disposição Isosceles - para 1 a 4 subcond por fase #####
#
##### Considera disposição circular dos subcondutores #####
##### Com CABO GUARDA #####
#####

Entre com o número de GERAÇÕES(iterações) desejado: 60

Entre com a POPULAÇÃO: 50

Entre com a PROBABILIDADE DE CRUZAMENTO Sugestão(0.5<=pc<=0.95): 0.9

Entre com a PROBABILIDADE DE MUTAÇÃO Sugestão(0.001<=pm<=0.1): 0.01

distancia minima permitida entre a fase e a torre = 1.44m

Entre com o número de subcondutores: (1) (2) (3) ou (4)? => 4

Escolha o cabo condutor :
(1) 1/O AWG CAA (2) 4/O AWG CAA (3) 336,4 MCM CAA ou (4) 556,5 MCM CAA => 3

Escolha o cabo-guada :
(1) 1/O AWG CAA (2) 4/O AWG CAA (3) 336,4 MCM CAA (4) 556,5 MCM CAA (5) 1/O AWG Cobre ou

Entre com o Percentual da Potência Característica: 100
```

Figura 4.11 – Entrada de Parâmetros do AG.

A figura 4.12 ilustra a convergência do AG enquanto a figura 4.13 mostra os seus respectivos resultados.

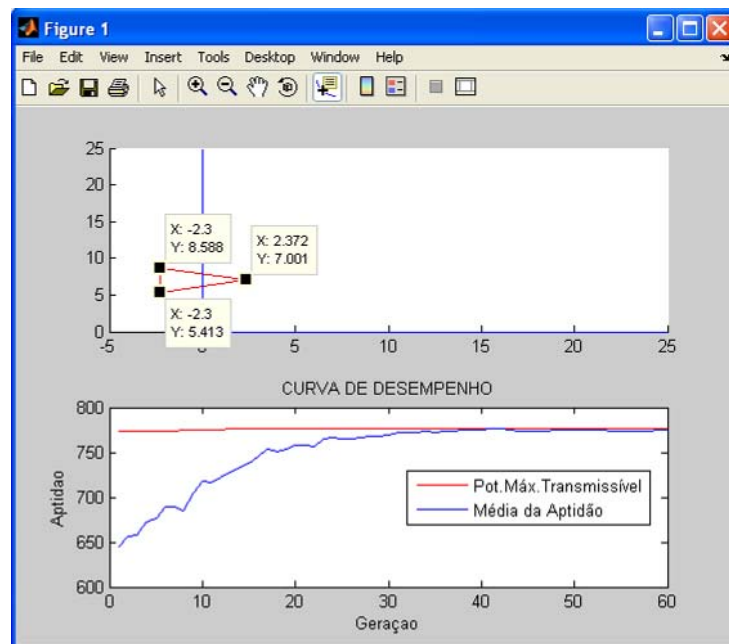


Figura 4.12 – Convergência do AG.

Distancia_entre_Subcondutores =	A_B =
1.7193	1.5872
Distancia_Fase_Torre_FA =	C_A =
2.3725	1.5872
Distancia_Fase_Torre_FB =	C_B =
-2.2997	3.1745
Distancia_Fase_Torre_FC =	Reg_percent =
-2.2997	5.8220
Altura_da_Fase_A =	FPot2 =
7.0007	0.9900
Altura_da_Fase_B =	Rend_percent =
5.4134	96.0291
Altura_da_Fase_C =	FPot1 =
8.5879	0.9885
Altura_Cabo_Guarda =	I2_abs =
11.3137	654.6547
Potencia_Maxima_Transmissivel =	I1_abs =
777.1259	642.9914

Figura 4.13 – Resultados encontrados.

Observa-se, na figura 4.13, que a potência máxima encontrada para este caso resulta em 777,12 MW. Em comparação com a linha convencional triangular equilátera com os mesmos parâmetros verifica-se que houve um aumento de 49,8% para a potência transmissível. Também, as distâncias entre fases e dos subcondutores foram de 1,71m e 2,37m, respectivamente.

Vale ressaltar que vários outros casos foram também analisados, como evidencia as tabelas 4.7 e 4.8.

Tabela 4.7 – Resultados das simulações de linhas de transmissão de 34,5kV, com configuração horizontal e vertical de fases, cabo 4/0AWG, feixe circular expandido, sem cabo guarda.

Nome	Tipo	Cabo-Guarda	Tipo de Cabo Condutor	Tensão (kV)	Sub condutores	Dist. entre subcond.	Tipo do Feixe	Resultados								
								Máxima Potência no Receptor (MW)	Regulação (%)	Rendimento (%)	FPot1	FPot2	Dist. Vertical entre fases	Dist. entre as fases AB	Dist. entre as fases BC	Altura da fase A
FEX	Horizontal	Não	4/0 AWG	34,5	1	...	Convencional	9,84	11,46	91,35	0,96	0,96	1,10	1,10	9,60	
						...	Otimizado	9,86	12,75	90,1	0,95	0,95	0,5	0,5	6	
					2	10 cm	Convencional	18,46	8,51	93,93	0,97	0,97	1,10	1,10	9,60	
						0,49 m	Otimizado	19,43	10,4	92,32	0,96	0,96	0,99	0,99	19,95	
					3	10 cm	Convencional	25,07	6,71	95,34	0,98	0,98	1,10	1,10	9,60	
						0,99 m	Otimizado	28,6	9,62	93,01	0,97	0,97	1,49	1,49	20,39	
					4	10 cm	Convencional	30,48	5,66	96,13	0,98	0,99	1,10	1,10	9,60	
						1,49 m	Otimizado	37,88	9,52	93,12	0,97	0,97	1,99	1,99	20,73	
FEX	Vertical	Não	4/0 AWG	34,5	1	...	Convencional	9,84	11,46	91,35	0,96	0,96	1,10	1,10	9,60	
						...	Otimizado	9,86	12,75	90,1	0,95	0,95	0,5	0,5	6	6,5
					2	10 cm	Convencional	18,46	8,51	93,93	0,97	0,97	1,10	1,10	9,60	
						0,52 m	Otimizado	19,74	12,6	90,3	0,95	0,95	0,5	0,5	6,5	7
					3	10 cm	Convencional	25,07	6,71	95,34	0,98	0,98	1,10	1,10	9,60	
						1,15 m	Otimizado	28,82	8,42	94,01	0,97	0,97	1,5	1,5	20,25	21,75
					4	10 cm	Convencional	30,48	5,66	96,13	0,98	0,99	1,10	1,10	9,60	
						1,51 m	Otimizado	37,88	9,52	93,12	0,97	0,97	2,01	2,01	20,71	22,72

Tabela 4.8 – Resultados das simulações de linhas de transmissão de 138kV, com configuração triangular equilátero e isósceles de fases, cabo 336,4MCM, feixe circular expandido, com cabo guarda.

Nome	Tipo	Cabo-Guarda	Tipo de Cabo Condutor	Tensão (kV)	Sub condutores	Dist. entre subcond.	Tipo do Feixe	Máxima Potência no Receptor (MW)	Regulação (%)	Rendimento (%)	F Potf	FPot2	Dist. Entre Fase A torre	Dist. Entre Fase B torre	Dist. Entre Fase C torre	Altura da fase A	Altura da fase B	Altura da fase C
FEX	Triangular Equilátero	Sim	336,4 MCM	138	1	...	Convencional	223,46	7,49	94,75	0,98	0,98	2,74	-2,74	-2,74	19,90	18,00	21,80
						...	Otimizado	230,93	8,18	94,2	0,97	0,97	1,44	-1,44	-1,44	19,98	21,64	23,31
					2	20 cm	Convencional	364,42	5,1	96,5	0,99	0,99	2,74	-2,74	-2,74	19,9	18	21,8
						2 m	Otimizado	423,8	6,78	95,3	0,98	0,98	2,43	-2,43	-2,43	18,86	21,68	24,5
					3	20 cm	Convencional	451,90	3,84	97,40	0,99	0,99	2,74	-2,74	-2,74	19,90	18,00	21,80
						2 m	Otimizado	600,56	6,15	95,78	0,98	0,98	2,43	-2,43	-2,43	20,85	23,66	26,48
					4	20 cm	Convencional	518,75	3,15	97,9	0,99	0,99	2,74	-2,74	-2,74	19,9	18	21,8
						2 m	Otimizado	773,23	5,88	95,9	0,98	0,99	2,43	-2,43	-2,43	20,98	23,8	26,61
FEX	Triangular Isósceles	Sim	336,4 MCM	138	1	...	Convencional	223,46	7,49	94,75	0,98	0,98	2,74	-2,74	-2,74	19,90	18,00	21,80
						...	Otimizado	232,37	8,31	94,09	0,97	0,97	1,68	-1,44	-1,44	7	6,22	7,79
					2	20 cm	Convencional	364,42	5,1	96,5	0,99	0,99	2,74	-2,74	-2,74	19,9	18	21,8
						1,79 m	Otimizado	426,96	6,8	95,28	0,98	0,98	2,45	-2,33	-2,33	10,93	9,31	12,55
					3	20 cm	Convencional	451,90	3,84	97,40	0,99	0,99	2,74	-2,74	-2,74	19,90	18,00	21,80
						1,81 m	Otimizado	604,21	6,11	95,81	0,98	0,98	2,67	-2,34	-2,34	9,22	7,59	10,85
					4	20 cm	Convencional	518,75	3,15	97,9	0,99	0,99	2,74	-2,74	-2,74	19,9	18	21,8
						1,93 m	Otimizado	777,12	5,85	96	0,98	0,99	2,46	-2,4	-2,4	7,01	5,16	8,86

4.5 – SÍNTESE DOS RESULTADOS

Objetivando simplificar o processo de análise dos resultados obtidos, as figuras identificadas pelas numerações de 4.14 a 4.17 apresentam uma síntese dos principais ganhos obtidos para os diversos arranjos empregados para fins ilustrativos da aplicabilidade do processo proposto e do programa computacional elaborado. O resumo, na forma de gráficos percentuais, expressa os ganhos para a potência máxima transmissível em relação às respectivas linhas de transmissão convencionais.

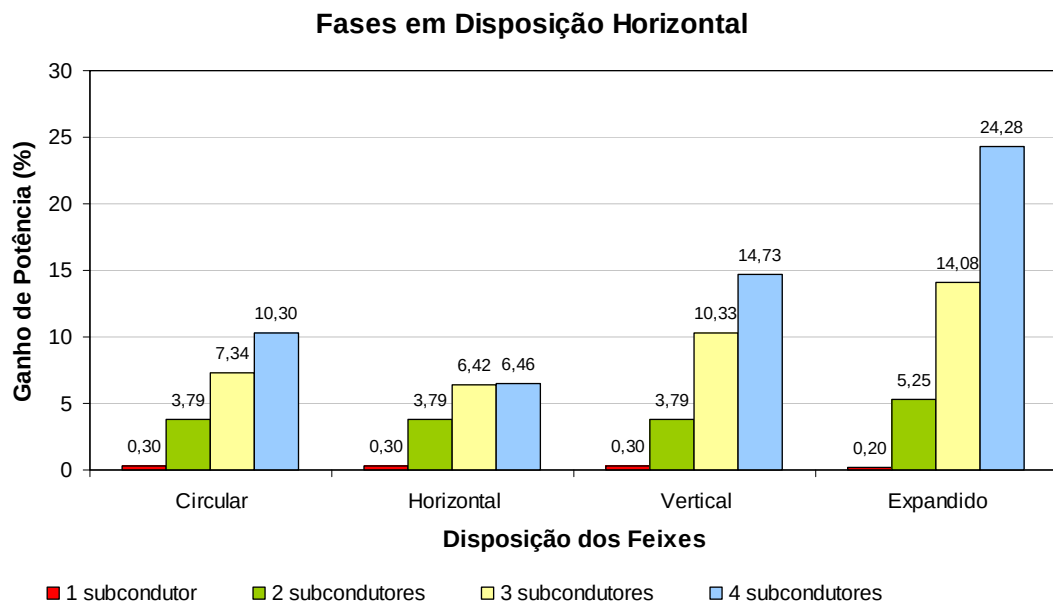


Figura 4.14 – Ganho percentual da potência transmissível para disposição horizontal das fases, 34,5kV.

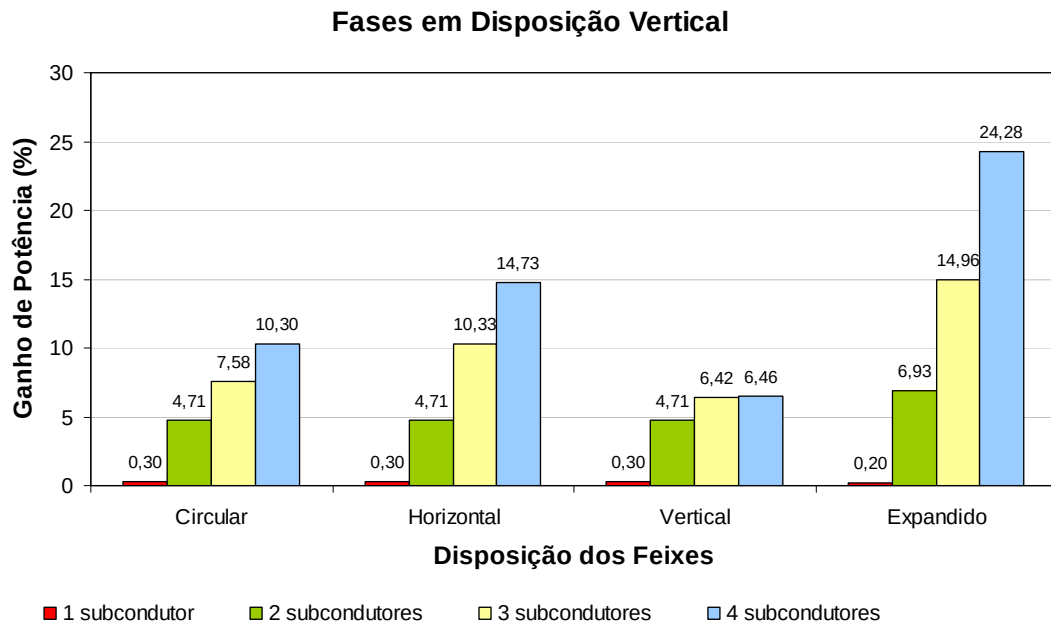


Figura 4.15 – Ganho percentual da potência transmissível para disposição vertical das fases, 34,5kV.

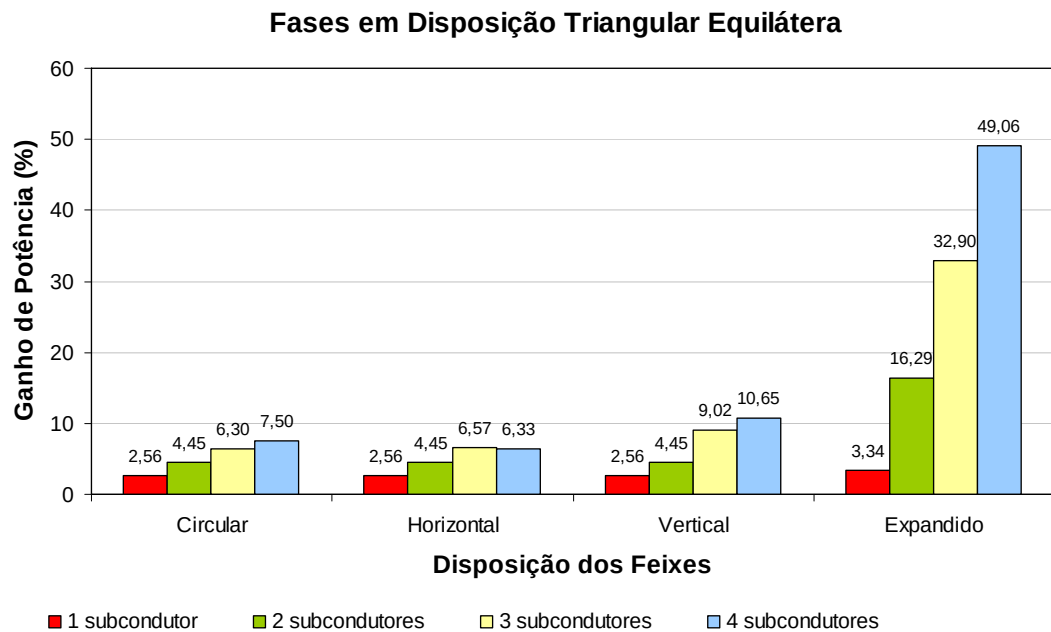


Figura 4.16 – Ganho percentual da potência transmissível para disposição triangular equilátera das fases, 138kV.

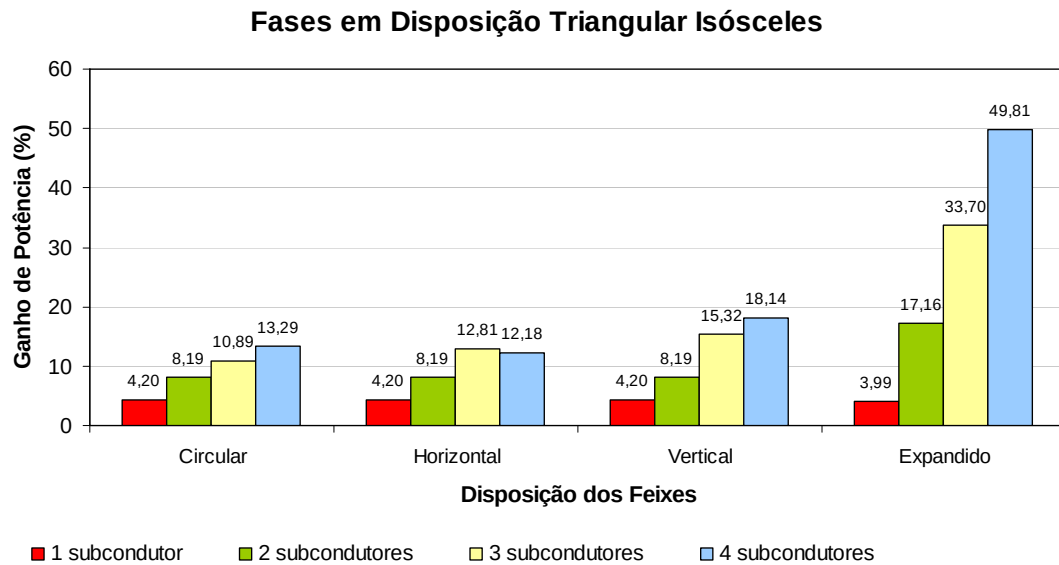


Figura 4.17 – Ganho percentual da potência transmissível para disposição triangular isósceles das fases, 138kV.

4.6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Objetivando complementar as análises e evidenciar a potencialidade e eficácia do processo de otimização proposto e implementado, o presente capítulo avançou, em relação ao anterior, no sentido de expandir o processo avaliativo para diversas outras configurações construtivas, mantendo-se, todavia, os mesmos níveis de tensão já empregados. Neste sentido foram investigados os ganhos atrelados com distintos arranjos para os subcondutores e outras características. Os resultados, resumidos na forma de gráficos de barras são auto-esclarecedores sobre os ganhos obtidos.

No que tange aos arranjos utilizados, as características pré-fixadas e os níveis de liberdade admitidos, ressalta-se que:

- Para as linhas de 34,5 kV apenas as configurações de fase horizontal e vertical foram admitidas. Para estas foram investigadas situações que pré selecionaram os condutores utilizados, o número de subcondutores e a forma física para o arranjo destes. Numa última situação foi utilizado o conceito de feixe

expandido, o qual permite que o programa determine a melhor distância entre os subcondutores;

- Para as linhas de 138 kV foram investigadas apenas as configurações de fase na forma triangular equilátera e isósceles. As demais propriedades foram mantidas como para as linhas de 34,5kV.

Sem entrar em maiores particularidades numéricas sobre os ganhos obtidos, os quais foram claramente indicados na seção anterior, fica evidenciado que a tecnologia fundamentada no que se tem denominado por feixe expandido conduziu aos melhores resultados. Entretanto, as vantagens iniciais demonstradas devem ser, indiscutivelmente, melhor analisadas diante de outras questões associadas, como: aspectos construtivos (viabilidade, custos, etc) e outras diretamente afeitas aos parâmetros de desempenho.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

Não obstante os diversos comentários e análises feitos ao longo da dissertação, este capítulo final visa, acima de tudo, tecer considerações de modo a enfatizar os principais pontos associados com os desenvolvimentos feitos ao longo desta pesquisa.

Iniciando pelo Capítulo II, este foi centrado na apresentação de uma síntese dos principais conceitos e formulações atrelados com o tema da modelagem de linhas de transmissão, com destaque à questão da obtenção dos parâmetros elétricos representativos das mesmas a partir de sua estrutura construtiva. O conteúdo do capítulo, muito embora tenha empregado princípios amplamente difundidos na área, contribuiu no sentido de oferecer um equacionamento que viabilizou a inserção de configurações genéricas para as disposições físicas das fases, dos subcondutores e outros aspectos relevantes ao processo de busca do arranjo construtivo que ofereça a melhor capacidade de transmissão de potência. Ao final dos tratamentos, foi disponibilizado um conjunto de equações que correlaciona: parâmetros construtivos, parâmetros elétricos, potências de transmissão e outras grandezas que expressam indicadores de operação. Estas equações formaram a base para o processo de otimização contemplado na seção subsequente.

A terceira unidade da dissertação foi centrada no processo de otimização propriamente dito. Objetivando oferecer uma visão didática mais ampla sobre o assunto, o capítulo foi iniciado com considerações gerais sobre os processos utilizados para a obtenção de respostas otimizadas para os mais distintos problemas de engenharia e outros. Diante dos atrativos oferecidos pela técnica conhecida por Algoritmos Genéticos, esta foi selecionada para os fins da presente dissertação. Uma vez feita a escolha do método, suas principais características, propriedades, definições e forma de utilização foram sintetizados de modo a oferecer ao leitor uma visão geral sobre o tema. Fundamentando-se nas expressões que traduzem as potências transmissíveis e as variáveis de influência, foi então elaborado um aplicativo computacional, utilizando a plataforma MATLAB, direcionado ao processo de otimização em pauta. É relevante destacar que o programa desenvolvido, adicionalmente à questão da busca da configuração ótima do ponto de vista de transmissibilidade de potência, ainda possibilita o cálculo de alguns parâmetros de desempenho, a exemplo da regulação da tensão e o rendimento da transmissão.

Com a finalidade de exemplificar a utilização do programa elaborado, o mesmo foi empregado para duas situações de busca, uma direcionada à otimização de uma linha em 34,5kV e outra em 138kV. Os resultados numéricos, embora ainda modestos nesta etapa, evidenciaram a eficácia e potencialidade da ferramenta obtida.

Objetivando complementar e melhor ressaltar a aplicabilidade do *software* e do método de análise, estudos adicionais foram realizados no âmbito do Capítulo IV. Desta feita, muito embora a manutenção das linhas de transmissão nos níveis de 34,5 kV (em configuração de fase horizontal e vertical) e de 138 kV (em configuração triangular), foram investigadas, para cada estrutura, outras possibilidades para os condutores e subcondutores. Os ganhos obtidos para as respectivas potências de transmissão foram detalhadamente explorados no corpo do capítulo e, de modo particular, a utilização do conceito conhecido por

feixes expandidos se mostrou bastante eficaz no que tange ao aumento da capacidade de transmissão.

Diante dos resultados obtidos ficou evidenciado que a busca de soluções ótimas se mostrou efetiva, no entanto, as vantagens iniciais encontradas, anteriormente a uma eventual implantação em campo, devem ser minuciosamente estudadas à luz de outros fatores, a exemplo de: viabilidade construtiva, custos, parâmetros de desempenho, etc.

Um outro aspecto de grande relevância a ser destacado refere-se ao fato que o processo de busca implementado, na forma atual, emprega condições de contorno associadas com regulação, rendimento e outras, de forma liberada. Também, para o momento, o aplicativo não busca dentre as diversas possibilidades para os arranjos físicos e construtivos, qual seria a melhor opção. Nestes termos, muito embora os pontos positivos já destacados, é importante enfatizar que a metodologia ainda é merecedora de maiores desenvolvimentos com vistas a obtenção de um produto final para uso comercial.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Salari Filho, J., *Otimização da geometria dos feixes de linhas de transmissão*, Tese de Mestrado, 382p., COPPE / Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro – RJ, 1993.
- [2] Gomes Júnior, S., *Otimização de linhas aéreas de transmissão considerando novas concepções construtivas para os feixes condutores*, Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Engenharia Elétrica, COPPE, Janeiro, 1995.
- [3] Nord, I., *Linhas de transmissão de potência natural elevada de 34,5kV e 138kV*, Monografia, Universidade Federal de Mato Grosso, Departamento de Engenharia Elétrica, 2005.
- [4] Azevedo, R.M., Dart, F.C., Filho, J.I.S., Mendonça, P.N., *Avaliação de linhas de transmissão não convencionais em 34,5 kV e 138 kV para o sistema CEMAT*, Relatório Técnico, DIE 16071/05, 2005.
- [5] Santos, A.A.F., Formiga, A.M, Lima, R.A.A., Costa, C.L.G., Bezerra, J.M.B., Pessoa, A., Régis Júnior, O., Melo, M.T., *Aplicação de técnicas de LPNE em linhas de distribuição da CELPE*, SBSE – Seminário Brasileiro de Sistemas Elétricos, Campina Grande - PB, Agosto 2006.
- [6] Prosdócimo, N., Mokdese, H., *Novas soluções em linhas compactas em 69kV para áreas urbanas*, Revista Eletricidade Moderna, páginas 50-60, Outubro 2002.
- [7] Régis Jr., O., Maia, M.J.A, Pessoa Neto, A., *Linhas não convencionais de potência natural elevada (LPNE): estudos paramétricos para utilização em 69kV e 138kV*, Revista Eletroevolução: Sistema de Potência, CIGRE, nº.02, páginas 27-34, Rio de Janeiro, 1995.

- [8] Alexandrov, G.N., *New means of power transmission in electrical power systems*, Leningrad University, Leningrado, 1987.
- [9] Alexandrov, G.N., Podporkyn, G.V., *Improvement of the efficiency of 35 to 220kV lines*, International Conference on AC and DC Power Transmission, Setembro 1991.
- [10] Melo, O.B.C., Fonseca, L.C.A., Fontana, E., Naidu, S.R., *Electric and magnetic fields of compact transmission lines*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 14, nº.1, Janeiro 1999.
- [11] Salari Filho, J.C., Silva Filho, J.I., Dart, F.C., *O sistema computacional ELEKTRA - integração de modelos matemáticos para o dimensionamento otimizado de linhas de transmissão com feixes convencionais e não convencionais*, X SEPOPE – Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica, Florianópolis - SC, Maio 2006.
- [12] Ceccehetti, E., Noferi, P.L., Barbarito, M., Clerici, A., Paris, L., Pelacchi, P., *Compact lines for urban areas - A new solution*, 10th International Conference on Electricity Distribution – CIRED, páginas 190-195, vol. 3, Rome, 1989.
- [13] Fuchs, R.D., *Transmissão de energia elétrica*, Livros Técnicos e Científicos, São Paulo, 1979.
- [14] Nefzger, P., Nolasco, J.F., Kiessling, F., *Overhead power lines: planning, design, construction*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York, 2006.
- [15] CAUE – COMITE ARGENTINO DE USUÁRIOS DE EMTP – ATP, *Rule Book – Alternative Transient Program: RB-210 Line constants*, Buenos Aires, 1995.
- [16] Portela, C., *Regimes Transitórios*, COPPE/UFRJ & ELETROBRÁS, Rio de Janeiro, 1984.
- [17] Stevenson, W.D., *Elementos de análise de sistemas de potência*, McGraw-Hill do Brasil, São Paulo, 1974.
- [18] NEXANS, *Catálogo de condutores nus de alumínio*, São Paulo, 2007. Disponível em: <<http://www.nexans.com.br>>. Acesso em 12 out. 2007.

- [19] Soares, L.G., *Algoritmos Genéticos: Estudo, Novas Técnicas e Aplicações*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte - MG, 1997.
- [20] Holland, J.H., *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, University of Michigan Press, Ann Arbor, Michigan, 1975.
- [21] Linden, R., *Algoritmos Genéticos*, Brasport, Rio de Janeiro, 2006.
- [22] Goldberg, D.E., *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison Wesley, 1989.
- [23] Mitchell, M., *An Introduction to Genetic Algorithms*, Mit Press, Cambridge, 1998.
- [24] NBR 5422/1985, *Projetos de linhas aéreas de transmissão*, Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, 1985.
- [25] Fuchs, R.D., Almeida, M.T., *Projetos mecânicos das linhas aéreas de transmissão*, Editora Edgard Blucher, São Paulo, 1982.
- [26] Kundur, P., *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill, Inc, New York, 1994.