

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO SUPERIOR DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Tomás Scherer Ellwanger

**AUTOMAÇÃO DO PROCESSO DE ALOCAÇÃO DE TORRES DE UM
SISTEMA DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Santa Maria, RS
2022

RESUMO

AUTOMAÇÃO DO PROCESSO DE ALOCAÇÃO DE TORRES DE UM SISTEMA DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

AUTOR: Tomás Scherer Ellwanger

ORIENTADOR: Maurício Sperandio

O desenvolvimento social e econômico de uma nação tem uma forte relação com a expansão do setor elétrico. A medida que são inseridas novas tecnologias em um país, é necessário que o sistema elétrico nacional seja capaz de acompanhar esse crescimento e suprir a energia requisitada pela demanda da população, que se torna cada vez maior. As primeiras etapas do processo de expansão de linhas de transmissão, costumam ser muito burocráticas e, podem, muitas vezes, tomar uma parcela considerável de tempo para serem realizadas, o que torna a operação mais lenta e causa atrasos na implantação das obras. Portanto, é vantajoso que sejam aplicados esforços para agilizar as demais etapas deste processo. Neste trabalho, foi desenvolvido um programa capaz de realizar a alocação automática de torres de um sistema de transmissão de energia elétrica, dado um perfil topográfico. O código faz o uso de um algoritmo genético como ferramenta de otimização dentro do software MATLAB. São utilizados três operadores genéticos para obtenção dos indivíduos: Reprodução, Cruzamento e Mutação. A função fitness avalia dados relativos aos componentes e restrições da linha de transmissão para estimar o custo total que servirá como parâmetro de seleção ao ser aplicado no Algoritmo Genético.

Palavras-chave: *Linhas de Transmissão. Algoritmos Genéticos. Otimização.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Projeção do Crescimento de Linhas de Transmissão 2020-2025	7
Figura 2.1 – Fluxograma de um Algoritmo Genético	10
Figura 2.2 – Representação do Operador Cruzamento	13
Figura 2.3 – Representação do Operador Mutação	13
Figura 3.1 – Linha de Transmissão Aérea	15
Figura 3.2 – Altura de segurança sobre travessia de pedestres	17
Figura 3.3 – Altura de segurança sobre travessia de águas navegáveis	18
Figura 3.4 – Esforços mecânicos em vão de alturas desiguais	19
Figura 3.5 – Média da variação de peso das EAs x Número de condutores por fase ..	22
Figura 3.6 – Média da variação de peso das EAs x Tensão	22
Figura 3.7 – Média do peso das fundações x Número de condutores por fase	23
Figura 3.8 – Quantidade de Isoladores por quilômetro x Tensão	24
Figura 3.9 – Preço dos Isoladores x Tensão	24
Figura 3.10 – Preço dos Espaçadores x Número de Condutores por fase	25
Figura 5.1 – Terreno - Caso 1	33
Figura 5.2 – Representação gráfica do processo de otimização - Caso 1	33
Figura 5.3 – Projeto da linha de transmissão - Geração 5 - Caso 1	34
Figura 5.4 – Projeto final da linha de transmissão - Caso 1	35
Figura 5.5 – Terreno - Caso 2	36
Figura 5.6 – Representação gráfica do processo de otimização - Caso 2	37
Figura 5.7 – Projeto da linha de transmissão - Geração 9 - Caso 2	37
Figura 5.8 – Projeto final da linha de transmissão - Caso 2	38
Figura 5.9 – Terreno - Caso 3	39
Figura 5.10 – Representação gráfica do processo de otimização - Caso 3	40
Figura 5.11 – Projeto da linha de transmissão - Geração 5 - Caso 3	40
Figura 5.12 – Projeto final da linha de transmissão - Caso 3	41
Figura 5.13 – Terreno - Caso 4	42
Figura 5.14 – Representação gráfica do processo de otimização - Caso 4	43
Figura 5.15 – Projeto da linha de transmissão - Geração 7 - Caso 4	44
Figura 5.16 – Projeto final da linha de transmissão - Caso 4	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Exemplo Função de Aptidão.....	11
Tabela 3.1 – Altura básica de segurança segundo NBR 5422.....	16
Tabela 3.2 – Cargas máximas recomendadas para os cabos na condição de trabalho de maior duração	18
Tabela 5.1 – Detalhamento do custo total da linha de transmissão - Geração 5 - Caso 1.....	34
Tabela 5.2 – Detalhamento final do custo total da linha de transmissão - Caso 1.....	35
Tabela 5.3 – Detalhamento do custo total da linha de transmissão - Geração 9 - Caso 2.....	38
Tabela 5.4 – Detalhamento final do custo total da linha de transmissão - Caso 2.....	39
Tabela 5.5 – Detalhamento do custo total da linha de transmissão - Geração 5 - Caso 3.....	41
Tabela 5.6 – Detalhamento final do custo total da linha de transmissão - Caso 3.....	42
Tabela 5.7 – Detalhamento do custo total da linha de transmissão - Geração 7 - Caso 4.....	44
Tabela 5.8 – Detalhamento final do custo total da linha de transmissão - Caso 4.....	45
Tabela A.1 – Propriedades mecânicas e elétricas dos condutores.....	49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>ABNT</i>	Associação Brasileira de Normas Técnicas
<i>AG</i>	Algoritmo Genético
<i>ANEEL</i>	Agência Nacional de Energia Elétrica
<i>CAA</i>	Condutor com Alma de Aço
<i>CME</i>	Custo Marginal de Expansão
<i>CS</i>	Circuito Simples
<i>EA</i>	Estruturas de Aço
<i>EPE</i>	Empresa de Pesquisa Energética
<i>LT</i>	Linha de Transmissão
<i>NBR</i>	Normas Técnicas Brasileiras
<i>ONS</i>	Operador Nacional do Sistema Elétrico
<i>SIN</i>	Sistema Interligado Internacional

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	7
1.1	OBJETIVOS	8
2	PROCESSOS DE OTIMIZAÇÃO	9
2.1	ALGORITMOS GENÉTICOS	9
2.1.1	Função de aptidão	11
2.1.2	Seleção	12
2.1.3	Operador básico: Reprodução	12
2.1.4	Operador básico: Cruzamento	13
2.1.5	Operador básico: Mutação	13
3	PROJETO DE LINHA DE TRANSMISSÃO	15
3.1	RESTRIÇÕES	16
3.1.1	Altura de Segurança	16
3.1.2	Carga Máxima nos Cabos	18
3.2	DETERMINAÇÃO DE MATERIAIS E EQUIPAMENTOS	19
3.2.1	Condutores	20
3.2.2	Estruturas de Aço	21
3.2.3	Fundações	23
3.2.4	Isoladores	23
3.2.5	Amortecedores e Espaçadores	25
4	METODOLOGIA	27
4.1	COMPOSIÇÃO DO INDIVÍDUO	27
4.2	CONFIGURAÇÕES INICIAIS	28
4.3	CRIAÇÃO DE POPULAÇÃO	29
4.4	MUTAÇÃO	29
4.5	CRUZAMENTO	30
4.6	FUNÇÃO DE APTIDÃO	30
4.7	TÉRMINO DA OTIMIZAÇÃO	31
5	RESULTADOS	32
5.1	CASO 1	32
5.2	CASO 2	36
5.3	CASO 3	39
5.4	CASO 4	42
6	CONCLUSÃO	46
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	47
	ANEXO A – TABELA DOS CONDUTORES	49

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento social e econômico de uma nação tem uma forte relação com a expansão do setor elétrico, o que torna a energia elétrica e suas diversas aplicações indispensáveis à sociedade moderna. O progresso de uma região é acompanhado pelo aumento na demanda por eletricidade, tanto pelos fornecedores, que necessitam de mais energia para poderem produzir, quanto por parte dos consumidores, que adquirem mais produtos como eletrodomésticos e eletroeletrônicos (Menezes (2015)).

Devido à esse aumento de demanda por energia elétrica, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) realiza estudos para a expansão do sistema, através da implementação de novas linhas de transmissão, com o intuito de aumentar a confiabilidade e qualidade do mesmo e garantir que ele seja capaz de acompanhar o desenvolvimento dos mais diversos setores do país.

De acordo com estudos da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), só em 2020 foram concluídos 6.159,34 km do total de novas linhas a nível nacional, aumentando o alcance das mesmas em 15 estados. Segundo dados obtidos pela EPE, de acordo com o Plano Decenal de Expansão de Energia 2029, lançado no dia 11/02/19, os investimentos em infraestrutura energética para suprir a expansão necessária até 2029 podem alcançar R\$ 2,3 trilhões, sendo que nos setores de geração centralizada, distribuída e sistemas de transmissão no Brasil vão somar R\$ 456 bilhões de investimento total. De acordo com o Operador do Sistema Nacional (ONS), a extensão da rede de transmissão passará de 145.600 km em 2020 para 184.054 km em 2025 (EPE (2019)).

Nível de Tensão	2020 (km)	2025 (km)
800 kV CC	9.204	9.204
750 kV	1.722	1.722
600 kV CC	9.544	9.544
500 kV	53.214	76.220
440 kV	6.911	7.130
345 kV	9.551	11.171
230 kV	59.454	61.164
TOTAL	145.600	184.054

Figura 1.1 – Projeção do Crescimento de Linhas de Transmissão 2020-2025

Fonte: ONS (2020).

No projeto e na construção de uma linha de transmissão de energia elétrica, o

planejamento adequado é a base prioritária para uma execução com baixo custo, menor impacto ambiental e redução no tempo de execução (Rosa (2009)). As primeiras etapas do processo de expansão de linhas de transmissão, como obtenção de licenças ambientais e liberações fundiárias, contratação de empresas para execução, entre outros, podem, muitas vezes, tomar uma parcela considerável de tempo para serem realizadas, o que torna a operação mais lenta e causa atrasos na implantação das obras (Alves (2017)).

O diretor técnico e vice presidente do Cigré Brasil – Comitê Nacional Brasileiro de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Iony Patriota de Siqueira, considera que o Brasil detém conhecimento significativo em engenharia de projeto e construção de linhas e que os atrasos invariavelmente originam-se nos impedimentos legais e dificuldades de licenciamento destes empreendimentos. Há ainda a questão ambiental. Para Siqueira, as restrições ambientais à construção de novos corredores de transmissão respondem pelos principais impedimentos à expansão destas interligações (O Setor Elétrico (2021)).

Portanto, é vantajoso que sejam aplicados esforços para agilizar as demais etapas deste processo, como por exemplo, a utilização de métodos computacionais rápidos e eficazes para realizar a escolha automática da alocação das torres, entre outros parâmetros de projeto. Dessa forma, é possível minimizar o impacto dos atrasos das etapas anteriores e, ao mesmo tempo, obter um projeto de implementação de uma linha de transmissão viável economicamente, com menor tempo e trabalho.

1.1 OBJETIVOS

Este trabalho tem como finalidade desenvolver um programa capaz de realizar a alocação automática de torres de um trecho de um sistema de transmissão de energia elétrica, dado um perfil topográfico. Para isso, o código faz uso de algoritmo genético como método de otimização, para obter não só o posicionamento das torres como também outras características da LT.

Serão apresentados conceitos teóricos que envolvem as restrições e definições pertinentes ao projeto de uma linha de transmissão, para que seja possível entender a metodologia empregada pelo programa, e, por fim, são realizados alguns estudos de caso para comprovar o correto funcionamento do mesmo. Assim, busca-se ao fim do trabalho possuir uma ferramenta capaz de proporcionar projetos de trechos de LT, de maneira automática, eficaz e viável economicamente.

2 PROCESSOS DE OTIMIZAÇÃO

Otimizar é melhorar o que já existe, projetar o novo com mais eficiência e menor custo. Tem como vantagens diminuir o tempo dedicado ao projeto, possibilitar o tratamento simultâneo de uma grande quantidade de variáveis e restrições, permitir a obtenção de algo melhor, obtenção de soluções não tradicionais (Saramago (2003)).

Como limitações tem-se o aumento do tempo computacional quando aumenta-se o número de variáveis de projeto, pode-se surgir funções descontínuas que apresentam lenta convergência, funções com presença de muitos mínimos locais onde o mínimo global raramente é obtido, entre outras (Saramago (2003)).

A otimização é deste modo uma ciência que está sempre em demanda, uma vez que se encontra direta ou indiretamente relacionada com capital e é empregada em todos os campos de aplicações: engenharia civil, mecânica, automobilística, aérea, econômica, eletrônica, química, etc (Castro (2001)).

Os problemas de otimização podem ser resolvidos por meio de métodos numéricos adotados para determinação da solução ótima. Como um destes métodos, apresenta-se a Computação Evolucionária constituída de técnicas estocásticas de busca e otimização, poderosas e largamente aplicáveis, inspiradas nos mecanismos da evolução e da genética. A ideia é a evolução de uma população de estruturas computacionais, de modo tal que melhore a adequação média dos indivíduos que formam esta população em relação ao ambiente a que ela está submetida (Castro (2001)).

Estas técnicas ganharam popularidade com a evolução dos computadores, já que requerem um grande número de análises do problema. Isto é necessário para que se dê chance ao método de explorar devidamente todas as suas opções de busca (Cardoso e Avila (2012)). Podem ser citados como exemplo deste método os Algoritmos Genéticos, que foram escolhidos como ferramenta de otimização aplicada neste trabalho principalmente devido à sua facilidade de implementação utilizando o MATLAB, além de outros pontos positivos levantados na próxima seção.

2.1 ALGORITMOS GENÉTICOS

Algoritmos Genéticos (AG) constituem uma técnica de busca e otimização, altamente paralela, inspirada no princípio Darwiniano de seleção natural e reprodução genética. Os princípios da sobrevivência do indivíduo mais apto que terá maior probabilidade de perpetuar seu código genético, propostos por Darwin, são imitados na construção de algoritmos computacionais que buscam uma melhor solução para um determinado problema, através da evolução de populações de soluções codificadas através de cromossomos arti-

ficiais (Pacheco (1999)).

Em AGs um cromossomo é uma estrutura de dados que representa uma das possíveis soluções do espaço de busca do problema. Cromossomos são então submetidos a um processo evolucionário que envolve avaliação, seleção, recombinação sexual (crossover) e mutação. Após vários ciclos de evolução a população deverá conter indivíduos mais aptos.

A representação, ou a codificação, das variáveis de otimização tem um grande impacto na performance da procura, uma vez que a otimização é realizada sobre a representação destas variáveis. A escolha mais conveniente de representação é baseada no tipo de aplicação, sendo que as duas representações mais comuns utilizam codificação em binários ou em números reais, diferindo principalmente em como os operadores de recombinação e mutação são executados (Tsuruta e Narciso (2000)).

A cada iteração, a população é modificada, através de três tipos de operadores básicos: Reprodução, Cruzamento e Mutação. Os melhores indivíduos da geração anterior são submetidos a tais operadores para que suas características sejam passadas para a nova geração (Saramago (2003)). Dessa forma, um algoritmo genético pode ser definido como um processo iterativo, onde se repete ciclos de evolução, controlados por um critério de parada, conforme a Figura 2.1.

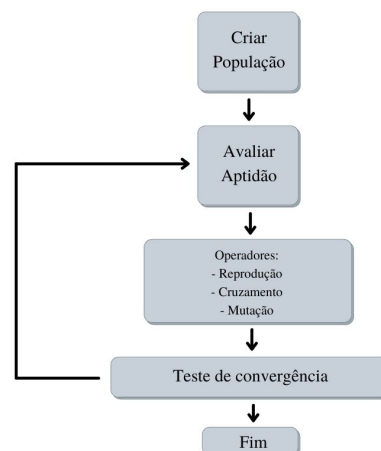


Figura 2.1 – Fluxograma de um Algoritmo Genético

Fonte: Autor

Uma das razões de se preferir o uso de AGs é a sua versatilidade. Usando os conhecimentos sobre o sistema, pode-se moldar o algoritmo para uma aplicação particular. Isso se deve ao fato de que pode-se geralmente modificar alguns aspectos da configuração genética, ou usar diferentes operadores genéticos para obter uma performance de procura adequada, tornando o algoritmo flexível e eficiente para diversas aplicações. Por estes mesmos motivos, os AGs também são indicados em situações onde as variáveis sendo otimizadas são muito diferentes umas das outras (Tsuruta e Narciso (2000)). Dito isto, para problemas envolvendo a otimização de características de um trecho de uma linha de

transmissão, os algoritmos genéticos mostram-se promissores.

Por outro lado, aplicações que requerem um ótimo global exato têm sido um desafio para um AG. AGs são melhores para se achar a região ótima global mas algumas vezes encontram dificuldades em achar o local ótimo exato. Muitos pesquisadores usam AGs para chegar perto da região ótima e mudam para outro método para uma exploração final. Em suma, para problemas de otimização onde um bom ponto inicial está disponível, as variáveis são altamente correlacionadas e um limitado número de avaliações de resposta está disponível, a utilização de AGs pode não ser tão benéfica quanto outros métodos computacionais (Tsuruta e Narciso (2000)).

Porém, como nesta aplicação em particular existe um número grande de possibilidades de projetos viáveis e não há a necessidade de se encontrar uma única solução perfeita, o uso de AGs é adequado.

A seguir serão abordados mais a fundo alguns dos principais aspectos dos Algoritmos Genéticos:

2.1.1 Função de aptidão

Geralmente a aptidão do indivíduo é determinada através do cálculo da função *fitness*, que depende das especificações de projeto. Cada indivíduo é uma entrada para uma ferramenta de análise de desempenho, cuja saída fornece medidas que permitem ao algoritmo genético o cálculo da aptidão do indivíduo. Ainda nesta fase os indivíduos são ordenados conforme a sua aptidão (Márcio Nunes Miranda (2009)).

A escolha da função de aptidão é para a maioria das aplicações a etapa crítica do processo, já que ela deverá ser avaliada para cada cromossomo de cada população dentro do processo evolutivo. Ela pode ser considerada o elo entre o algoritmo genético e o mundo, pois deve ser uma função que melhor representa o problema e tem por objetivo fornecer uma medida de aptidão de cada indivíduo na população corrente, que irá dirigir o processo de busca (Pacheco (1999)).

Para exemplificar, considera-se uma função de aptidão $f(x) = x^2$, com dois indivíduos binários, C1 e C2, valendo 9 e 4, respectivamente. Pode-se observar na Tabela 2.1 que C1 é mais apto que C2, para este critério de avaliação.

Tabela 2.1 – Exemplo Função de Aptidão.

	Cromossomo	x	f(x)
C1	001001	9	81
C2	000100	4	16

Fonte: Adaptado de Pacheco (1999).

2.1.2 Seleção

O processo de seleção em algoritmos genéticos seleciona indivíduos para a próxima geração. A seleção é baseada na aptidão dos indivíduos: indivíduos mais aptos têm maior probabilidade de serem escolhidos para serem submetidos aos operadores básicos e gerar os novos integrantes da próxima população. Em contrapartida, os indivíduos com baixa aptidão serão descartados da população.

Inúmeros esquemas de seleção já foram propostos e implementados na prática dos Algoritmos Genéticos, como seleção por roleta, torneios, ordenação linear ou exponencial, etc. Neste trabalho foi adotado o método estocástico uniforme, no qual a função gera uma linha onde cada indivíduo corresponde à uma seção desta linha, proporcional ao seu valor de aptidão. O algoritmo se move sobre esta linha, em intervalos iguais, e a cada intervalo é escolhido o indivíduo que a seleção "aterrissa" em cima.

Porém, antes de ocorrer o processo de seleção propriamente dito, deve ser feito dimensionamento da aptidão, através da função *fitness scaling*. Ela é responsável por converter os dados de aptidão brutos, retornados pela função *fitness* em um conjunto que é adequado para a função de seleção.

No método de seleção por normalização linear, utilizado neste trabalho, os indivíduos são inicialmente ordenados de acordo com sua aptidão. A seguir, estes valores de aptidão são alterados de acordo com a posição relativa de cada indivíduo. Ao melhor indivíduo é assinalada uma aptidão de valor mx e ao pior indivíduo uma aptidão mn . Os demais indivíduos têm valores de aptidão linearmente distribuídos entre mínimo e máximo, de acordo com sua posição relativa na ordenação (Pacheco (1999)).

2.1.3 Operador básico: Reprodução

Reprodução é um processo que será atribuído às cadeias que possuem o maior valor objetivo e, portanto uma probabilidade mais elevada de contribuir á geração seguinte, criando pelo menos um descendente. É o processo no qual n indivíduos, que são considerados mais aptos da geração corrente, são copiados para a próxima geração (Saramago (2003)).

Dessa forma, busca-se manter uma 'elite', procurando garantir que os melhores indivíduos de uma geração sempre possam contribuir na geração seguinte. Obviamente, o valor de n deve ser bem baixo quando comparado ao tamanho total da população, para impedir a cópia exagerada de indivíduos e permitir a diversidade de características das populações. Por isso, neste trabalho, é adotado $n = 2$, para uma população total de 50 integrantes.

2.1.4 Operador básico: Cruzamento

Também denominado de *Crossover* ou Recombinação, é considerado a característica fundamental dos AGs. Pares de genitores são escolhidos na população com base em sua aptidão, e novos indivíduos são criados a partir da troca do material genético. Os descendentes serão diferentes de seus pais, mas com características genéticas de ambos os genitores (Pacheco (1999)). O ponto de corte é a posição na qual o corte será feito nos dois cromossomos, e então, ocorre a combinação das duas partes, originando um novo indivíduo. A Figura 2.2 ilustra o funcionamento do operador.

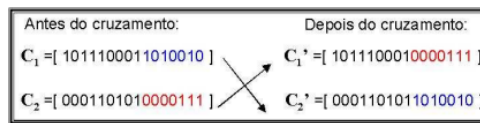


Figura 2.2 – Representação do Operador Cruzamento

Fonte: Adaptado de Saramago (2003).

Deve-se notar que se o cromossomo for representado por uma cadeia de bits o ponto de corte pode incidir em qualquer posição (bit) no interior de um gene, não importando os limites do gene. No caso de genes representados por números reais, a menor unidade do cromossomo que pode ser permutada é o gene (Márcio Nunes Miranda (2009)).

O ponto de corte é escolhido aleatoriamente e pode existir mais de um, ficando como critério do programador. A quantidade de cromossomos a ser submetida ao processo de cruzamento é definida através da probabilidade de cruzamento p_c , especificada pelo usuário. Neste estudo foram adotados 2 pontos de corte e $p_c = 70\%$ da população.

2.1.5 Operador básico: Mutação

A mutação é a modificação aleatória, com uma determinada probabilidade, geralmente baixa, de um ou mais genes de um indivíduo. É utilizada para garantir uma maior varredura do espaço de estados e evitar que o algoritmo genético convirja muito cedo para mínimos locais (Márcio Nunes Miranda (2009)). Uma elevada taxa de mutação aumenta a probabilidade de que bons esquemas sejam destruídos, mas aumenta a diversidade da população, portanto, a melhor taxa de mutação é dependente da aplicação (Tsuruta e Narciso (2000)). A Figura 2.3 ilustra o funcionamento do operador.

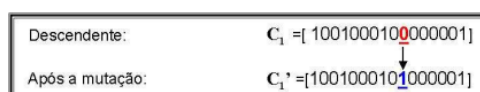


Figura 2.3 – Representação do Operador Mutação

Fonte: Adaptado de Saramago (2003).

O operador de mutação é necessário para a introdução e manutenção da diversidade genética na população, alterando arbitrariamente um ou mais componentes de uma estrutura escolhida. Ele fornece assim, meios para a introdução de novos elementos na população, assegurando que a probabilidade de se chegar a qualquer ponto do espaço de busca nunca seja zero (Castro (2001)).

3 PROJETO DE LINHA DE TRANSMISSÃO

Linhas de transmissão (LTs) são elementos de grande extensão, de altura elevada, predominantemente metálicos, localizados em áreas abertas, como mostrado na Figura 3.1.



Figura 3.1 – Linha de Transmissão Aérea

As LTs têm a função de transportar a energia elétrica de onde foi produzida até os centros de distribuição, onde ela será entregue aos consumidores finais. O projeto de linhas de transmissão têm evoluído para proporcionar melhor desempenho, visando uma transmissão de forma mais eficiente, com menos perdas, mais resistentes ao tempo, às intempéries e aos fenômenos naturais, de mais fácil manutenção, construção, menor custo, entre outros (Melo (2016)).

Para se transportar uma determinada quantidade de energia elétrica a uma distância preestabelecida, há um número grande de variáveis associadas à linha que são relevantes e devem ser definidas na fase de projeto, como valor da tensão transmitida, número e tipo de cabos condutores, materiais estruturais e de suporte, altura de suspensão, entre outros. Os trechos otimizados pelo programa desenvolvido neste trabalhos correspondem a linhas aéreas convencionais em corrente alternada (CA).

Um dos benefícios de se ter um excelente projeto de linha de transmissão de energia elétrica é que o mesmo possibilita o envio e realiza transmissões de energia por longas distâncias de maneira ágil e competente depois de ser concluída a instalação. Portanto, com um projeto de LT preciso e bem desenvolvido se ganha qualidade e lucratividade por estar de acordo com as expectativas e normas exigidas.

Ao executar o planejamento de uma linha de transmissão, de maneira geral, destacam-se dois objetivos importantes a serem atingidos: a definição da quantidade de materiais e equipamentos necessários para a sua construção, e a garantia de que o projeto esteja de acordo com os requisitos mínimos impostos com o intuito de manter a segurança e confiabilidade da rede de transmissão e de todos que a utilizam.

3.1 RESTRIÇÕES

As Normas Técnicas Brasileiras (NBR) são normas técnicas, aprovadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), que definem a padronização de documentos, processos produtivos e procedimentos de gestão dos mais diversos setores, contribuindo para o desenvolvimento tecnológico do país. No caso das LTs, existem normas que devem ser respeitadas dentro do seu projeto.

A NBR 5422, de 1985, fixa as condições básicas para o projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica com tensão máxima, valor eficaz fase-fase, acima de 38 kV e não superior a 800 kV, de modo a garantir níveis mínimos de segurança e limitar perturbações em instalações próximas. Entre as principais restrições que constam na norma destacam-se as limitações referentes à carga máxima nos cabos condutores e à altura de segurança.

3.1.1 Altura de Segurança

Ao estender o cabo entre dois pontos elevados, o mesmo adquire uma forma curva, chamada de catenária. De acordo com a NBR 5422, essa curva deve manter uma distância mínima do solo, denominada altura de segurança. As distâncias básicas a , utilizadas para calcular a altura de segurança conforme a norma, estão elencadas na Tabela 3.1. É possível observar que elas variam de acordo com a região em que a linha atravessa ou se aproxima, logo, é importante identificar o uso do solo do terreno que é cruzado pela LT. O nível de tensão também influencia o valor da altura mínima.

Natureza da região ou obstáculo atravessado pela linha ou que dela se aproxime	Distância básica a (m)
Locais acessíveis apenas a pedestres	6
Locais onde circulam máquinas agrícolas	6,5
Rodovias, ruas e avenidas	8
Ferrovias não eletrificadas	9
Ferrovias eletrificadas ou com previsão de eletrificação	12
Suporte de linha pertencente à ferrovia	4
Águas navegáveis	$H + 2$
Águas não navegáveis	6
Linhas de energia elétrica	1,2
Linhas de telecomunicações	1,8
Telhados e terraços	4
Paredes	3
Instalações transportadoras	3
Veículos rodoviários e ferroviários	3

Tabela 3.1 – Altura básica de segurança segundo NBR 5422

Fonte: ABNT (1985).

Para obter a distância de segurança real h_s a ser considerada no projeto, deve-se seguir os seguintes passos. Caso a tensão nominal da linha V_N seja superior a 87 kV,

utiliza-se a Equação 3.1:

$$h_s = a + 0,01 \cdot \left(\frac{V_N}{\sqrt{3}} - 50 \right) \quad (3.1)$$

Caso a tensão V_N seja menor que 87 kV, utiliza-se a Equação 3.2

$$h_s \geq a \quad (3.2)$$

O código construído no *MATLAB* realiza este cálculo, portanto, basta inserir o valor da distância básica aplicável ao projeto de acordo com a tabela da Figura 3.2 que o programa irá definir a altura de segurança.

Para verificar a violação de h_s ao longo trecho da LT, primeiro é preciso revisitar alguns conceitos. O termo flecha é utilizado para designar distância entre a altura de suspensão e o ponto mínimo da catenária e a expressão simplificada para seu cálculo pode ser vista na Equação 3.3.

$$f = \frac{p \cdot A^2}{8 \cdot T_0} \quad (3.3)$$

Em que p é o peso do cabo em kgf/m, T_0 é a tração de ancoragem em kgf em função da carga de ruptura do cabo e A é o vão entre as duas torres em m. A constante T_0 é usualmente adotada entre 15% e 20% da carga de ruptura do condutor.

Para situações onde tem-se um vão com alturas desiguais, deve-se primeiro calcular o vão equivalente A_e , conforme (3.4), e substituí-lo em (3.3) para encontrar f_e .

$$A_e = A + \frac{2 \cdot \Delta h \cdot T_0}{A \cdot p} \quad (3.4)$$

Em que Δh é a diferença de altura entre os dois pontos de suspensão.

O ponto de mínimo da catenária é localizado exatamente na metade de A ou A_e , horizontalmente, e subtraindo f ou f_e da maior altura de suspensão do vão, verticalmente. Por fim, tendo conhecimento de tal ponto, é possível traçar a catenária e analisar se em algum local do trecho o limite da altura de segurança é violado.

As Figuras 3.2 e 3.3 representam a ilustração das distâncias de segurança em locais de travessia de pedestres e águas navegáveis, respectivamente.

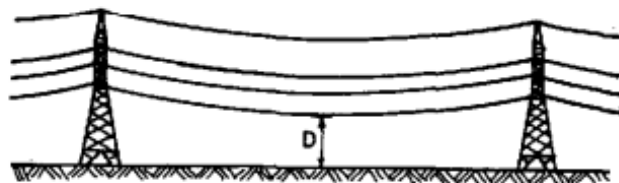


Figura 3.2 – Altura de segurança sobre travessia de pedestres

Fonte: ABNT (1985).

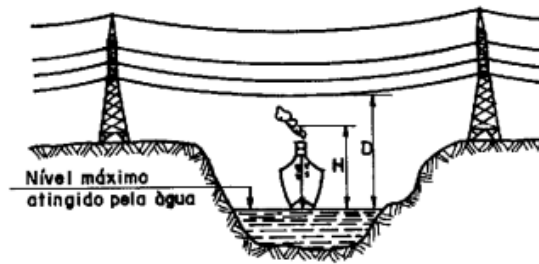


Figura 3.3 – Altura de segurança sobre travessia de águas navegáveis

Fonte: ABNT (1985).

3.1.2 Carga Máxima nos Cabos

A NBR 5422 também regulamenta os limites para as trações axiais que atuam sob os condutores. Segundo a norma, para situações com ventos de alta velocidade, a tração não pode ser superior a 50% da carga de ruptura do cabo. Em temperaturas baixas, é recomendado que o valor não ultrapasse 33%. E, no caso mais comum, onde é considerado um trabalho de grande duração, recomenda-se limitar o esforço de tração nos cabos aos valores máximos indicados na Tabela 3.2.

Cabos	(% da carga de ruptura)
Aço - AR	16
Aço - EAR	14
Aço-cobre	14
Aço-alumínio	14
CA	21
CAA	20
CAL	18
CALA	16
CAA-EF	16

Tabela 3.2 – Cargas máximas recomendadas para os cabos na condição de trabalho de maior duração

Fonte: ABNT (1985).

Neste trabalho, todos os projetos são feitos considerando cabos de alumínio com alma de aço, o limite adotado para tração axial é de 20% da carga de ruptura.

A fim de verificar tais condições, a expressão utilizada para calcular a força axial no cabo pode ser observada na Equação 3.5.

$$T_A = T_0 + f_e \cdot p \quad (3.5)$$

Em que T_A é a tração axial em kgf e f_e é a flecha equivalente do vão em m.

A tração deve ser calculada para cada vão do trecho e então deve-se verificar se o valor obtido não ultrapassa o limite estipulado nas hipóteses da NBR.

Na Figura 3.4, nota-se que, para vão de alturas desiguais, as trações T_1 e T_2 podem ser decompostas em uma tração horizontal T_A e uma tração vertical T_B .

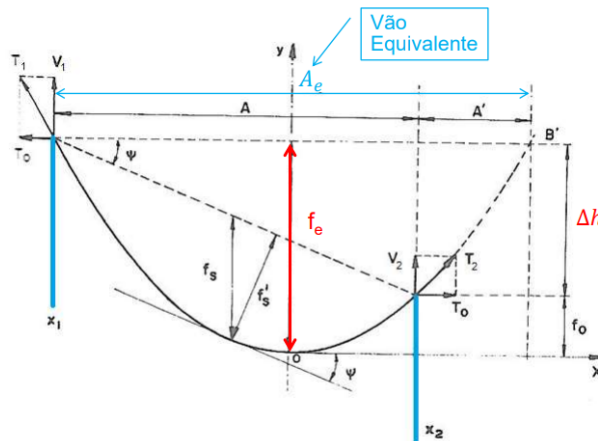


Figura 3.4 – Esforços mecânicos em vão de alturas desiguais

Fonte: SPERANDIO, 2019 - Material de aula

Porém, T_B não é considerado na verificação da violação da tração axial pois será sempre inferior a T_A , fato que é facilmente compreendido ao compararmos (3.5) e (3.6).

$$T_A = T_0 + (f_e - \Delta h) \cdot p \quad (3.6)$$

3.2 DETERMINAÇÃO DE MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

O desempenho elétrico das linhas depende fortemente de suas características físicas, portanto, ao se projetar uma LT, é necessário estudar e observar os componentes que as constituem. Além disso, a escolha dos materiais adequados e da quantidade necessária de equipamentos para a construção do trecho da linha possui grande impacto no custo econômico total do projeto. De maneira geral, devem ser definidos comprimento e tipo de cabo, número de fundações, estruturas de aço, espaçadores, amortecedores e isoladores.

A ANEEL disponibiliza uma planilha de apoio para realização de orçamentos de linhas de transmissão. Nela, estão contidos dados atualizados a cerca da quantidade dos materiais de construção e seus preços em todas as regiões do país. Para a realização das etapas a seguir, foram utilizadas como base as informações da planilha de apoio da ANEEL, atualizada para 03/2021, conjuntamente com uma tabela de condutores e suas propriedades físicas e elétricas.

3.2.1 Condutores

Os condutores têm como principal função formar o circuito elétrico por onde a corrente vai passar desde a sua geração até a localidade de distribuição. Idealmente, buscam-se cabos que possuam alta condutibilidade e resistência mecânica com um baixo custo e peso específico, porém, na prática essas características não são atendidas simultaneamente, então o tipo de cabo é selecionado de acordo com cada condição de operação. Normalmente, são confeccionados em alumínio ou cobre, devido as propriedades adequadas desses elementos (Silva et al. (2016)).

A Tabela A.1, presente no Anexo A, informa as características dos condutores que são consideradas pelo programa para realização da otimização. Tem-se código do cabo, massa, carga de ruptura, preço, resistência a 20 °C e coeficiente de temperatura, que quantifica a relação entre a variação da resistência elétrica de um material e a alteração de temperatura.

O comprimento dos cabos deve ser calculado a cada vão e depende da diferença de altura entre os dois pontos de suspensão. A seguir tem-se as Equações 3.7 e 3.8 para vão com alturas iguais e desiguais, respectivamente.

$$L = A + \frac{8 \cdot f^2}{3 \cdot A} \quad (3.7)$$

Em que L é o comprimento em m e f é a flecha também em m.

$$L = \sqrt{\Delta h^2 + A^2 \cdot \left(1 + \frac{A^2}{12 \cdot \left(\frac{T_0}{p}\right)^2}\right)} \quad (3.8)$$

Para estimar os custos de aquisição, basta multiplicar o comprimento total calculado com o preço do cabo em reais por quilômetro.

Normalmente são empregados cabos com alma de aço (CAA), porém, a determinação do material do qual o condutor será composto também é fundamental, pois devem ser levados em conta as perdas elétricas em operação. Logo, a resistência CA do condutor escolhido é utilizada para obter o valor estimado de perdas na linha.

Para isso, primeiro descobre-se a resistência CA do cabo na temperatura de operação da linha, conforme Equação 3.9.

$$R_{to} = R_{20^\circ C} \cdot (1 + \alpha \cdot (T_o - 20)) \quad (3.9)$$

Em que R_{to} é a resistência CA na temperatura de operação em Ω , T_o é a temperatura de operação em $^\circ C$.

Também calcula-se o valor de corrente da linha, conforme Equação 3.10.

$$I = \frac{S \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot V} \quad (3.10)$$

Em que S é a potência aparente da LT em MVA e V é a tensão de linha em kV.

Então, é possível calcular as perdas elétricas por efeito joule no condutor, conforme a Equação 3.11.

$$Perdas = I^2 \cdot R_{to} \quad (3.11)$$

A unidade das perdas é W/km.

Para obter uma avaliação mais completa dos custos com perdas elétricas a longo prazo, é utilizada uma ferramenta financeira do *MATLAB* para realizar o cálculo do valor presente das perdas, dadas informações sobre o período de tempo, valor de tarifa e taxa de desconto considerados, retornando o custo em R\$ por quilômetro.

O número de condutores por fase também influencia nas perdas, diminuindo a resistência, no entanto, é necessário um aumento nos gastos com comprimento de cabo e estruturas para suportar o peso adicional. Tanto o número de condutores por fase quanto o tipo de cabo empregado no trecho são características a serem otimizadas pelo algoritmo, que será comentado mais profundamente no decorrer do trabalho.

3.2.2 Estruturas de Aço

As estruturas de suporte das linhas de transmissão têm como finalidade sustentar os cabos condutores e demais equipamentos que ficam em seu topo, respeitando uma distância adequada de segurança, desempenho e custo. Tais estruturas são, em geral, construídas em treliças com perfis de aço galvanizado ou em postes de aço, concreto ou madeira.

No Brasil, as torres metálicas treliçadas são mais usuais, pois permitem, em um espaço limitado, obter uma estrutura alta, esbelta, mais leve e versátil. Resulta disso que o projeto deve considerar, necessariamente, além das diversas hipóteses de carregamento, as muitas hipóteses de composição da torre, com diferentes alturas associadas a diversas extensões das pernas, que podem estar niveladas ou com desníveis (Veloza (2010)).

Logo, devido à sua função de sustentação, a quantidade necessária de estruturas de aço (EAs) para formar as torres depende de alguns fatores. LTs projetadas para níveis de tensão e potência mais elevados normalmente requerem um número maior de condutores por fase, o que aumenta consideravelmente o peso que deve ser suportado pelas torres.

Na planilha de apoio da ANEEL, citada anteriormente, são fornecidos os pesos das estruturas de aço, representados em ton/km, que devem ser empregados na construção dos trechos. Esses pesos variam de acordo com o número de cabos por fase, nível de tensão, configuração do circuito, etc. O custo base das torres depende de suas respectivas

alturas, porém, é importante que o programa considere também as parcelas de custo causadas por outros fatores, como por exemplo, a necessidade de estruturas mais robustas em projetos de maior potência.

Para estimar estes custos adicionais com tais estruturas de maneira precisa, os dados da planilha foram agrupados em gráficos contendo a média de variação do peso das estruturas de aço, assumindo configuração em circuito simples (CS), em relação ao número de condutores por fase (Figura 3.5) e tensão (Figura 3.6).

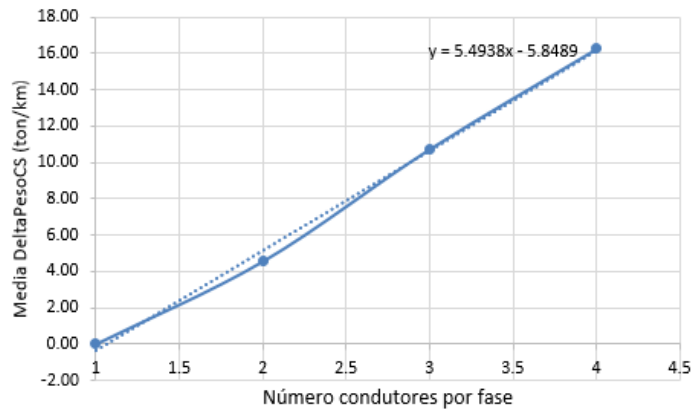


Figura 3.5 – Média da variação de peso das EAs x Número de condutores por fase

Fonte: Autor - Adaptado da planilha de apoio ANEEL

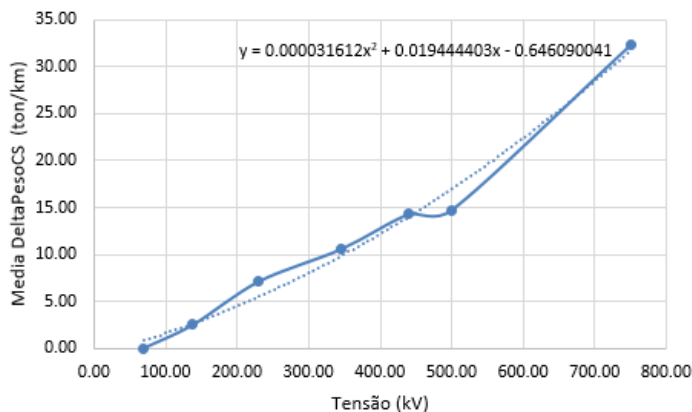


Figura 3.6 – Média da variação de peso das EAs x Tensão

Fonte: Autor - Adaptado da planilha de apoio ANEEL

Dessa forma, foi possível utilizar linhas de tendência para extrair as funções que estimam a quantidade necessária de estruturas de aço para o trecho, para qualquer valor de tensão e condutor por fase, e permitam o cálculo correto de seus impactos nos custos das torres. Na região Sul, o preço é de R\$ 10,38 por quilograma.

3.2.3 Fundações

As fundações são responsáveis por garantir a estabilidade para a operação das torres de uma linha de transmissão. Os tipos de fundações de emprego corrente em estruturas de suportes de LTs dependem, em geral, do tipo de solo e do dimensionamento da torre e seu carregamento. Neste trabalho são consideradas fundações de grelha metálica aplicadas à torres de aço autoportante convencionais.

Esse tipo de fundação pode ser aplicado nas mesmas condições em que são empregadas as sapatas de concreto armado, com a desvantagem de apresentar menor resistência à agressividade do terreno natural. Portanto, devem ser tomadas medidas de proteção adicionais, além da galvanização das peças metálicas, especialmente em locais de solos agressivos. Por outro lado, as principais vantagens da grelha consistem na rapidez de execução da fundação (escavação, montagem e reaterro) e na facilidade de transporte, principalmente em locais de difícil acesso para o uso de concreto (Veloza (2010)).

O programa não realiza o projeto da fundação em si, mas utiliza as informações da planilha para computar os custos de aquisição e montagem da grelha. Novamente, é montado um gráfico, presente na Figura 3.7, com a média do peso de fundações a ser empregado na obra em relação ao número de condutores por fase, já que, quanto mais cabos, maior será a carga que a fundação deverá suportar.

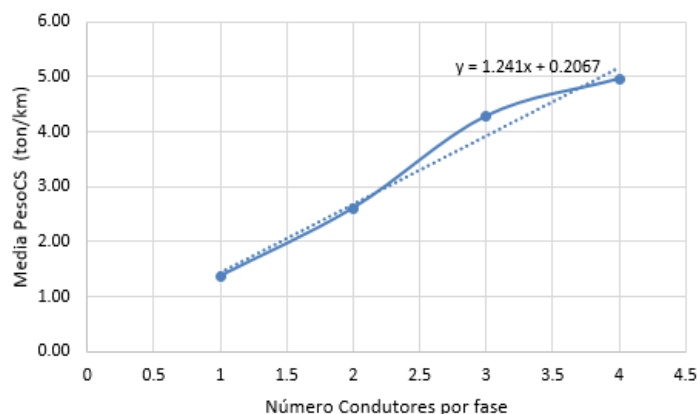


Figura 3.7 – Média do peso das fundações x Número de condutores por fase

Fonte: Autor - Adaptado da planilha de apoio ANEEL

O preço de aquisição é de R\$ 15,35 por quilograma e R\$ 13,25 por kg para montagem, na região Sul.

3.2.4 Isoladores

Os cabos são suportados pelas estruturas através dos isoladores, que, os mantêm isolados eletricamente do seu suporte e do solo. Devem resistir tanto às solicitações

mecânicas quanto às elétricas (Silva et al. (2016)). Discos ou séries de discos, em geral constituídos de porcelana, vidro, ou polímero, são usados para sustentar cabos e fornecer a isolamento para a estrutura da linha de transmissão. Existem diferentes tipos de discos, que oferecem diferentes níveis de isolamento, peso e resistência mecânica. Quanto maior for a tensão carregada por certa linha, maior é o número de isoladores utilizados em cada série (Melo (2016)).

Seguindo os dados da tabela de apoio, a quantidade de isoladores aplicados no trecho é avaliada conforme a tensão da linha. Esta relação é ilustrada na Figura 3.8.

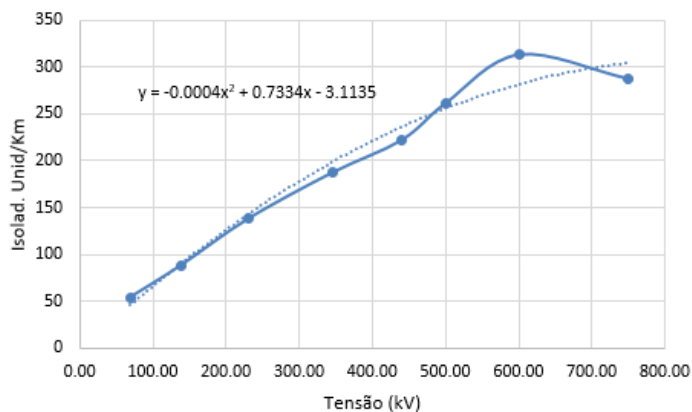


Figura 3.8 – Quantidade de Isoladores por quilômetro x Tensão

Fonte: Autor - Adaptado da planilha de apoio ANEEL

O preço desses equipamentos também depende do nível de tensão do projeto, dessa forma, a função que relaciona essas duas variáveis também é extraída, a partir do gráfico da Figura 3.9. Assim, torna-se possível para o programa estimar o custo esperado com isoladores no trecho da LT.

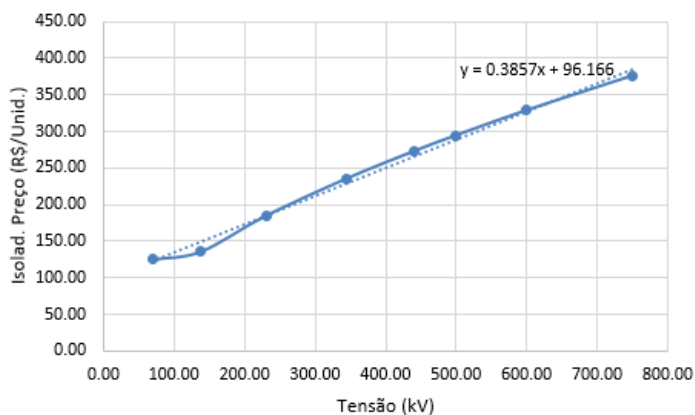


Figura 3.9 – Preço dos Isoladores x Tensão

Fonte: Autor - Adaptado da planilha de apoio ANEEL

3.2.5 Amortecedores e Espaçadores

As linhas de transmissão são projetadas para o transporte de energia, normalmente em longas distâncias, atravessando em sua rota diversas condições ambientais, muitas delas desfavoráveis à manutenção e vida útil dos cabos condutores e para-raios. Um dos agentes externos que podem provocar danos consideráveis é a ação dos ventos sobre os cabos, resultando nas chamadas vibrações eólicas que em alguns casos pode levar à fadiga precoce dos cabos.

Com o objetivo de controlar as vibrações induzidas pela ação dos ventos, são instalados amortecedores de vibrações nos cabos condutores e para-raios. Esses equipamentos são usualmente instalados em LTs compostas por um cabo por fase. Segundo a tabela de apoio, para trechos com torres de aço autoportante convencionais e montagem de circuito simples, é empregada uma média de 14,36 unidades por quilômetro, com preço médio de R\$ 234,42.

Já para trechos onde são empregados mais de um condutor por fase, os espaçadores são os principais componentes do sistema de amortecimento, evitando que os cabos condutores de energia se choquem com a movimentação do vento. A quantidade média utilizada, considerando as mesmas condições descritas para os amortecedores, é de 41 unidades por quilômetro. Porém, para estimar os custos destes equipamentos de maneira adequada, foi necessária a construção do gráfico da Figura 3.10 que revela a função entre preço e número de cabos por fase, novamente baseando-se nos dados da planilha de apoio orçamentária.

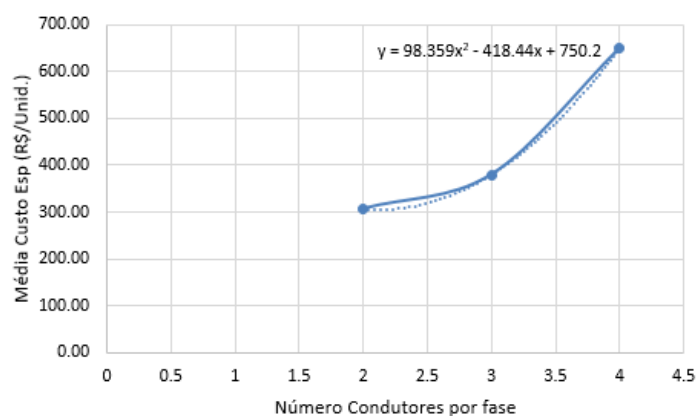


Figura 3.10 – Preço dos Espaçadores x Número de Condutores por fase

Fonte: Autor - Adaptado da planilha de apoio ANEEL

Ao fim do capítulo, pode-se contemplar os pontos de maior importância ao longo de um projeto de uma linha de transmissão aérea. Foram abordadas as restrições impostas pela NBR 5422 para o projeto de linhas aéreas que dependem primordialmente das condições do ambiente no qual estão inseridas e que são fundamentais para garantir a segurança e integridade da rede.

Além disso, foram apresentadas todas as maneiras adotadas pelo programa para computar os preços com aquisição e montagem dos equipamentos, incluindo todos os fatores que impactam na quantidade necessária desses materiais e considerando dados oficiais da ANEEL, com o intuito de aproximar ainda mais as soluções obtidas pelo programa de projetos reais e aplicáveis na prática.

4 METODOLOGIA

Neste capítulo serão abordadas as etapas de construção e funcionamento do programa de alocação automática de torres de um trecho de um sistema de transmissão de energia elétrica. Serão discutidas a composição do indivíduo a ser otimizado, as configurações necessárias anteriores ao processo de otimização, as descrições dos operadores básicos para a aplicação e, por fim, a função *fitness* para avaliação de desempenho.

4.1 COMPOSIÇÃO DO INDIVÍDUO

Para realizar a otimização de um processo por meio de um algoritmo genético, primeiro, é necessário identificar a composição dos indivíduos, que varia de acordo com a problemática em questão. Como, neste trabalho, o objetivo é agilizar o projeto de linhas de transmissão, inicialmente, desejava-se otimizar o posicionamento horizontal de cada torre que compõe o trecho. Porém, ao longo do desenvolvimento do estudo, percebeu-se que era possível adicionar mais variáveis no processo de otimização, tornando o resultado final mais completo.

Devido à existência de uma grande variedade de cabos condutores, onde cada um possui propriedades mecânicas, elétricas e custos diferentes, vide Tabela A.1, notou-se a possibilidade de incumbir o algoritmo com a escolha do condutor mais adequado para o trecho em questão. De maneira auxiliar, incluiu-se na otimização a definição do percentual da carga de ruptura do cabo escolhido que será tomado como tração de ancoragem, que influenciará nas catenárias e trações exercidas sobre os condutores.

O número de condutores por fase também é uma variável interessante de se otimizar, já que possui impacto significativo tanto na quantidade de materiais necessários para implantação da obra, quanto nas perdas por efeito joule pela passagem da corrente e pode assumir diferentes valores dependendo das especificações da linha de transmissão.

Além disso, nem todas as torres possuem o mesmo tamanho ao longo de um trecho de uma LT. Suas alturas podem variar dependendo de certos fatores, como por exemplo o relevo da região onde está instalada. Torres mais altas podem representar um maior custo de aquisição e montagem, porém, se posicionadas de maneira estratégica, podem contribuir para a redução do número total de torres necessárias no trecho. Por isso, foi adicionado no processo de otimização um vetor contendo as alturas de cada torre, para que cada uma seja analisada individualmente.

Dessa forma, o indivíduo passou a ser constituído dos seguintes elementos: tipo de condutor empregado, número de condutores por fase, o percentual da carga de ruptura do cabo que será tomado como tração de ancoragem, um vetor com o posicionamento das

torres e, por fim, um vetor contendo as alturas de cada torre.

De maneira geral, ao fim da execução, o código deverá retornar com valores aperfeiçoados para os elementos listados acima que podem ser aplicados e resultam em projetos de LTs viáveis e dentro das restrições técnicas.

4.2 CONFIGURAÇÕES INICIAIS

Antes do início da execução do processo de otimização, existem alguns parâmetros que devem ser configurados no programa. Esses ajustes dizem respeito tanto às especificações técnicas de projeto quanto configurações dos próprios mecanismos do algoritmo genético.

Deve-se inserir os valores de tensão e potência nominais e temperatura de operação da linha a ser projetada, pois estes dados são indispensáveis e utilizados principalmente no cálculo de materiais e perdas elétricas. A distância básica para consideração da altura de segurança também deve ser informada, seguindo as diretrizes da Tabela 3.1.

Como o programa também faz a análise do valor presente das perdas elétricas para inclusão no custo final do projeto, são necessárias alguns dados financeiros como o valor da energia, obtido a partir do CME em R\$/MWh, período de tempo em anos, taxa de desconto anual e fator de carga.

Ainda, é permitido a alteração das coordenadas horizontais e verticais do terreno, para que o programa possa ser utilizado em projetos dos mais diversos perfis topográficos. Devido ao método de funcionamento da função de aptidão e à composição adotada para os indivíduos, o número de torres a ser posicionado no trecho não faz parte do processo de otimização e é pré-fixado, devendo ser ajustado previamente, com os demais elementos comentados nesta seção.

No que diz respeito às configurações básicas do algoritmo genético, pode-se ajustar os critérios de parada do processo, sejam eles por tempo de processamento, número máximo de gerações e/ou até mesmo por número de gerações seguidas em que não se detectou nenhuma melhoria significativa na população, ou seja, por critério de estagnação. Os métodos de seleção e *fitness scaling*, comentados na seção 2.1.2 do capítulo 2, podem ser escolhidos nesta mesma etapa.

Também é possível definir o tamanho da população, número de indivíduos considerados como 'elite' que passarão pelo operador de reprodução e porcentagem da população que será formada através do operador de cruzamento. Neste trabalho, foram adotadas populações com 50 integrantes, destes, os 2 com melhor colocação compõem a 'elite' e 70% (35) são obtidos por meio do cruzamento de indivíduos da geração anterior. Normalmente optou-se por utilizar o critério de, no máximo, 75 gerações ou após passadas 30 gerações com estagnação das aptidões.

4.3 CRIAÇÃO DE POPULAÇÃO

A função de criação de indivíduos utiliza o comando do MATLAB *randi*, que retorna números inteiros de maneira randômica, para gerar indivíduos aleatoriamente. Todos os indivíduos da primeira geração, assim como aqueles que não são obtidos por meio da reprodução ou cruzamento, são obtidos através desta função.

Todavia, os 'genes' que compõem cada indivíduo não podem assumir qualquer valor inteiro. Portanto, devem-se estabelecer limites máximos e mínimos para cada um, dependendo de sua natureza. Tais limitações foram descritas da seguinte maneira:

- **Tipo de cabo:** de 1 à 31, de acordo com os 31 tipos considerados, conforme Tabela 3.1;
- **Número de condutores por fase:** de 1 à 4;
- **Percentual da carga de ruptura do cabo a ser tomada como tração de ancoragem:** de 18% à 19,3%;
- **Coordenadas horizontais das torres:** estes limites são obtidos automaticamente pois dependem do número de torres inserido nas configurações. O cálculo é feito a partir de distância média entre as torres do trecho, conforme abaixo.

$$Distancia = \frac{Comprimento\ total\ do\ trecho}{Numero\ de\ torres + 1,5} \quad (4.1)$$

Então, assume-se que as torres estejam distribuídas uniformemente e é permitida uma excursão horizontal de valor $\pm \frac{Distancia}{2}$ em cada uma delas.

- **Altura das torres:** de 19 a 35 metros.

4.4 MUTAÇÃO

Todos os indivíduos de uma geração são suscetíveis a sofrer uma alteração em algum 'gene'. Na função de mutação, cada 'gene' possui uma probabilidade de ser mutado e é possível ajustar quais deles são passíveis de mutação como também suas respectivas probabilidades. Depois de selecionado, por meio do comando *randerr*, o 'gene' assume um novo valor respeitando os mesmos limites máximos e mínimos elencados na seção 4.3.

4.5 CRUZAMENTO

A função responsável pelo operador de cruzamento ocorre em, basicamente, três etapas. Primeiro, é realizada a escolha de dois genitores de dentro da população da geração atual. Nesta fase, também é feita uma pequena mutação, caso os indivíduos escolhidos sejam iguais (o que tende a acontecer depois de algumas dezenas de gerações), para que a diversidade dos descendentes seja garantida.

Na segunda parte, são selecionados aleatoriamente dois pontos de corte. Por fim, na última etapa, duas novas 'crias' são formadas contendo características mistas dos indivíduos genitores, conforme a lógica apresentada na seção 2.1.4.

4.6 FUNÇÃO DE APTIDÃO

Também denominada função *fitness*, é a ferramenta responsável por avaliar cada indivíduo e fornecer um resultado que servirá como critério para classificação dos mesmos dentro da população. Ela foi construída para considerar e atender todas as restrições e etapas de projeto abordadas neste trabalho. Dessa forma, a função é capaz de:

- Posicionar as torres sobre o perfil topográfico;
- Realizar o cálculo das flechas e catenárias de cada vão;
- Calcular o comprimento de cabo empregado;
- Verificar ponto a ponto a ultrapassagem da altura de segurança exigida;
- Monitorar as violações da tração axial em cada vão;
- Retornar o custo total da implantação do trecho da linha de transmissão, levando em conta os valores gastos com estruturas de aço, condutores, isoladores, espaçadores e amortecedores, fundações e perdas elétricas.

O preço total, obtido da função de aptidão, serve como critério para que o algoritmo faça o ranqueamento dos indivíduos da população, de maneira que o indivíduo que apresente menor custo seja o de maior classificação e vice-versa. Os indivíduos que apresentarem violação das restrições mencionadas na seção 3.1, sofrem penalidades que aumentam consideravelmente o seu custo, com o intuito de diminuir o seu ranking e eliminá-los do processo.

4.7 TÉRMINO DA OTIMIZAÇÃO

Quando algum dos critérios de parada é atingido, o processo iterativo é interrompido, indicando a conclusão da otimização. Por fim, é plotado um gráfico do projeto realizado com os dados do indivíduo de melhor classificação ao longo de todas as gerações. A imagem contém as torres do trecho da linha de transmissão sobre o perfil topográfico, demonstrando as catenárias, seus pontos mínimos e a altura de segurança. Também são informados a potência, tensão, número de condutores por fase, tipo de cabo, a porcentagem da carga de ruptura considerada e o custo total de implantação.

5 RESULTADOS

Neste capítulo serão discutidos alguns resultados de teste obtidos por meio do programa desenvolvido. Serão aplicados diferentes tipos de perfis topográficos, níveis de tensão e potência, entre outras especificações de projeto para demonstrar a eficácia e o correto funcionamento do código considerando uma grande variedade dos dados de entrada. As simulações também servem para ilustrar o processo de otimização e seu produto final.

Para todos os casos, foram considerados os mesmos valores dos seguintes elementos:

- Temperatura de operação: 60 °C;
- Tarifa CME: 234 R\$/MWh;
- Período: 30 anos;
- Taxa de desconto: 8% ao ano;
- Fator de Carga: 0,58.

Em todos os casos, a escolha do número de torres a ser adotado no início do processo de otimização é feita baseada na extensão do trecho. Procurou-se utilizar um valor próximo ao comprimento total do terreno dividido por 500 metros. Depois, realizam-se testes variando esse número, tanto para mais quanto para menos, para verificar qual o que melhor se encaixa em cada situação.

5.1 CASO 1

O primeiro caso de estudo é caracterizado por um terreno plano de 4625 m, com mínima variação de altitude, conforme a Figura 5.1.

As especificações do trecho são:

- Tensão: 230 kV;
- Potência: 100 MVA;
- Distância básica da altura de segurança: 8 m (situação de passagem por rodovias, ruas e avenidas);

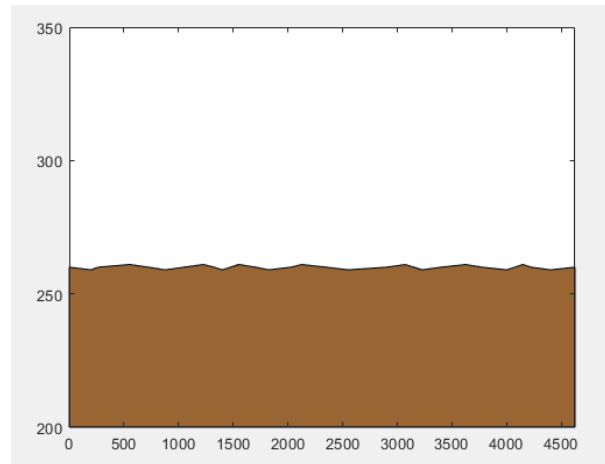


Figura 5.1 – Terreno - Caso 1

Fonte: Autor

- Número de torres: 9, sem contar com as duas torres que são sempre alocadas exatamente no início e fim do trecho, totalizando 11.

A Figura 5.2 representa a evolução das respostas obtidas ao longo do processo de otimização, onde tem-se o número de gerações e os custos das LTs nas coordenadas X e Y respectivamente. Os círculos azuis correspondem à média dos custos de uma geração e os pretos ao custo referente ao indivíduo de melhor classificação desta mesma geração.

É possível observar que logo nas primeiras gerações, ocorre um rápido declínio no valor dos projetos, que já a partir da geração 10 começa a se estabilizar e passa o restante do processo refinando o resultado final. Isso indica a eficiência do processo como um todo, encontrando um indivíduo com características adequadas em aproximadamente 45 segundos.

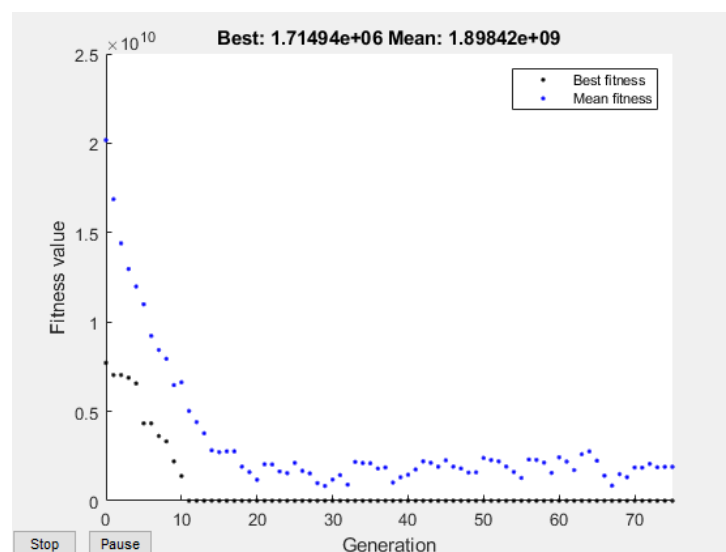


Figura 5.2 – Representação gráfica do processo de otimização - Caso 1

Fonte: Autor

Com o intuito de demonstrar a evolução dos indivíduos durante a execução do algoritmo genético, na Figura 5.3 tem-se o trecho utilizando os dados do melhor indivíduo da geração 5. O detalhamento do cálculo dos custos deste mesmo trecho pode ser visto na Tabela 5.1.

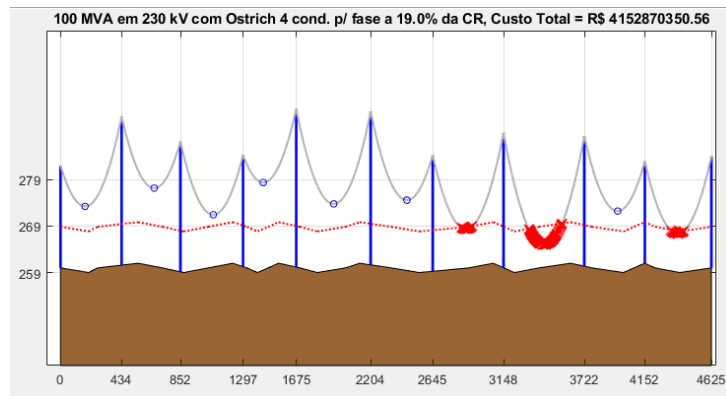


Figura 5.3 – Projeto da linha de transmissão - Geração 5 - Caso 1

Fonte: Autor

Nº de ultrapassagens altura de segurança	415
Nº de violações tração axial	0
Tração axial crítica	1084,3 kgf
Tipo de cabo empregado	Ostrich
Custo dos cabos para as 3 fases	R\$ 539.855,44
Custo estruturas de aço	R\$ 821.341,07
Custo fundações	R\$ 532.375,27
Custo amortecedores/espaçadores e isoladores	R\$ 246.768,51
Custo total das torres	R\$ 1.909.912,86
Custo total das perdas elétricas	R\$ 420.582,27
Custo total	R\$ 4.152.870.350,56

Tabela 5.1 – Detalhamento do custo total da linha de transmissão - Geração 5 - Caso 1

Fonte: Autor

Por estar ainda nos estágios iniciais da otimização, nota-se que o projeto do trecho está longe de ser o correto para este caso. Estão sendo empregados 4 condutores por fase em uma LT de potência não tão elevada, aumentando os custos com cabos e estruturas desnecessariamente. Também existem violações da altura de segurança em diversos pontos ao longo do trecho. Tudo isso contribui para altas penalidades e preços, dessa forma, esta solução será eliminada ao longo do processo e substituída por indivíduos de maior qualidade.

A solução final de otimização para as especificações do primeiro caso está contida na Figura 5.4 e Tabela 5.2.

Percebe-se o aperfeiçoamento da resposta ao compararmos com a Figura 5.3. Desta vez não há violações de nenhuma restrição e, apesar de ser empregado um condutor mais caro para redução de perdas elétricas, o projeto consta com apenas um cabo por fase, reduzindo a quantidade total a ser adquirida, característico de LTs de potência

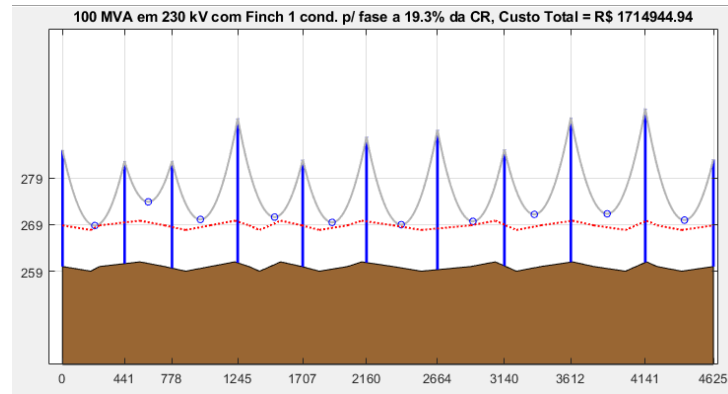


Figura 5.4 – Projeto final da linha de transmissão - Caso 1

Fonte: Autor

Nº de ultrapassagens altura de segurança	0
Nº de violações tração axial	0
Tração axial crítica	3514,9 kgf
Tipo de cabo empregado	Finch
Custo dos cabos para as 3 fases	R\$ 452.979,90
Custo estruturas de aço	R\$ 205.464,12
Custo fundações	R\$ 149.055,19
Custo amortecedores/espaçadores e isoladores	R\$ 139.046,38
Custo total das torres	R\$ 794.769,68
Custo total das perdas elétricas	R\$ 467.195,35
Custo total	R\$ 1.714.944,94

Tabela 5.2 – Detalhamento final do custo total da linha de transmissão - Caso 1

Fonte: Autor

mais baixa. Em terrenos mais planos, o programa opta por utilizar algumas torres de alturas elevadas com o máximo admitido de tração de ancoragem sobre os condutores, para aumentar o aproveitamento do comprimento total do trecho.

Para verificar isso, foram realizados testes alterando o limite máximo de altura das torres. Inicialmente limitou-se a altura à 25 metros, porém, não foi encontrada solução sem violação da altura de segurança. Em seguida, foram experimentados vários valores de limite superior indo de 25 metros até 30 metros. A partir da simulação de 26 metros foram obtidas respostas viáveis, no entanto, nenhuma delas provou-se superior quando comparada à apresentada neste trabalho, considerando alturas de até 35 metros.

Dessa forma, a resposta apresentada pelo AG para o caso 1 contém o projeto de uma linha de transmissão de 100 MVA em 230 kV em um trecho relativamente plano de 4635 metros de comprimento. O posicionamento das torres, bem como suas alturas podem ser visualizados na Figura 5.4. Nesta obra é empregado um condutor por fase do código Finch à 19,3% de sua carga de ruptura como tração de ancoragem, totalizando um custo de R\$ 1.714.944,94, conforme a Tabela 5.2.

5.2 CASO 2

O segundo caso de estudo é caracterizado pela presença de um vale entre dois terrenos mais elevados, onde o trecho completo apresenta um comprimento de 4000 m, conforme a Figura 5.5.

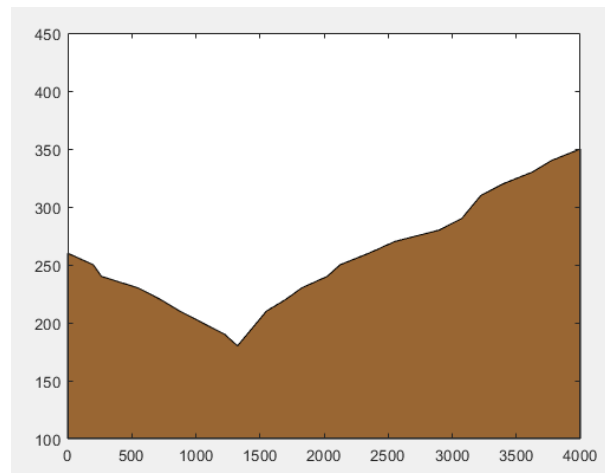


Figura 5.5 – Terreno - Caso 2

Fonte: Autor

As especificações do projeto são:

- Tensão: 500 kV;
- Potência: 1000 MVA;
- Distância básica da altura de segurança: 9 m (situação de passagem por ferrovias não eletrificadas);
- Número de torres: 7, sem contar com as duas torres que são sempre alocadas exatamente no início e fim do trecho, totalizando 9.

Ao analisar a Figura 5.6, observa-se que o declínio no valor dos projetos é significativamente mais lento quando comparado ao caso 1, ou seja, o algoritmo leva um pouco mais de tempo para convergir para o indivíduo 'ótimo'. Esse comportamento de convergência mais demorada advém de duas principais causas: o terreno não uniforme e um pouco mais dificultoso, e, principalmente, o menor número de torres que o programa tem disponível para excursionar. Este último, por outro lado, contribui para um processamento mais rápido, contribuindo para redução do tempo total de simulação. Logo, esse aspecto mostra-se irrelevante na eficiência do projeto como um todo, pois, passadas as mesmas 75 gerações, o código ainda é capaz de apresentar uma resposta tão viável quanto a do caso 1 em um tempo ligeiramente inferior, em torno de 40 segundos.

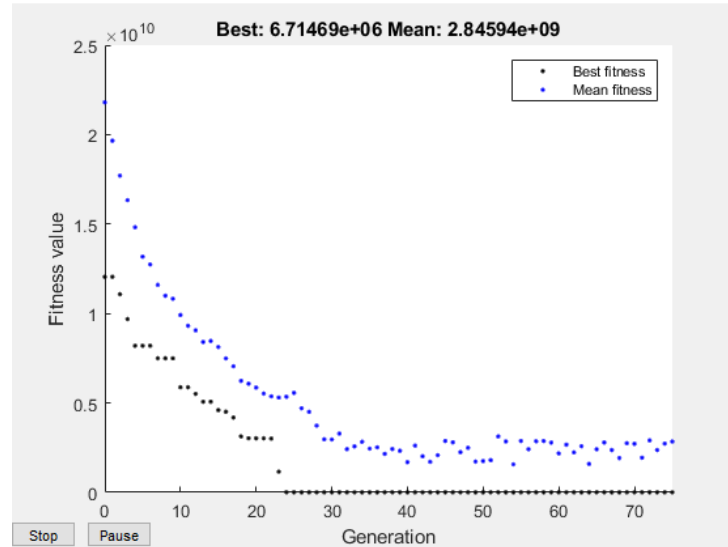


Figura 5.6 – Representação gráfica do processo de otimização - Caso 2

Fonte: Autor

Com o intuito de demonstrar a evolução dos indivíduos durante a execução do algoritmo genético, na Figura 5.7 tem-se o trecho utilizando os dados do melhor indivíduo da geração 9. O detalhamento do cálculo dos custos deste mesmo trecho pode ser visto na Tabela 5.3.

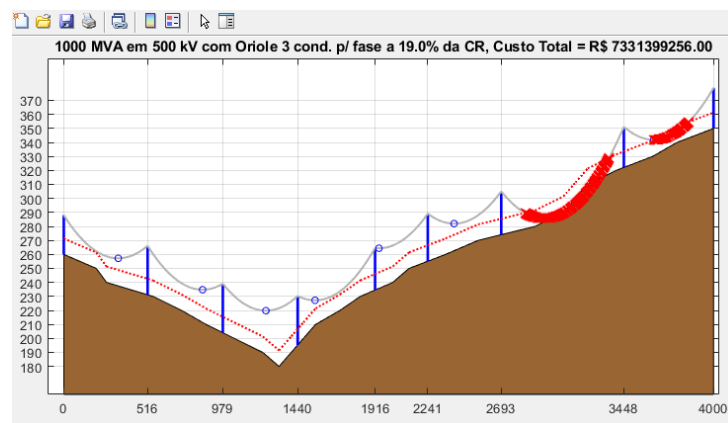


Figura 5.7 – Projeto da linha de transmissão - Geração 9 - Caso 2

Fonte: Autor

Como esperado, nas gerações iniciais existem indivíduos com diversos erros de projeto. O condutor empregado do tipo Oriole apresenta resistência relativamente alta, o que é prejudicial em LTs de alta potência. Também existem violações da altura de segurança na parte final do trecho, causada pelo posicionamento equivocado de algumas torres, fazendo com que o preço estimado para esta obra, com as penalidades, chegue à exorbitantes R\$ 7.331.399.256.

A solução final de otimização para as especificações do segundo caso está contida na Figura 5.8 e Tabela 5.4.

Nº de ultrapassagens altura de segurança	732
Nº de violações tração axial	0
Tração axial crítica	1489,1 kgf
Tipo de cabo empregado	Oriole
Custo dos cabos para as 3 fases	R\$ 501.995,77
Custo estruturas de aço	R\$ 812.824,50
Custo fundações	R\$ 314.690,38
Custo amortecedores/espaçadores e isoladores	R\$ 367.061,07
Custo total das torres	R\$ 1.788.583,95
Custo total das perdas elétricas	R\$ 9.108.676,28
Custo total	R\$ 7.331.399.256,00

Tabela 5.3 – Detalhamento do custo total da linha de transmissão - Geração 9 - Caso 2

Fonte: Autor

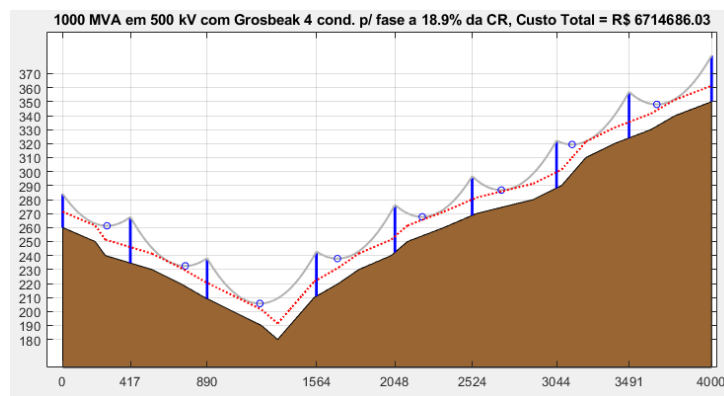


Figura 5.8 – Projeto final da linha de transmissão - Caso 2

Fonte: Autor

Novamente, percebe-se o aperfeiçoamento da resposta ao compararmos com a Figura 5.7. O algoritmo escolheu um condutor de menor resistência para a linha e, através do posicionamento das estruturas, foi possível eliminar qualquer violação de altura de segurança. Devido à existência de uma seção de menor altitude no terreno, não é necessário adotar o maior valor de tração de ancoragem, optando por empregar 18,9 % da carga de ruptura dos cabos.

De acordo com a Tabela 5.4, há um grande gasto com cabos já que são empregados quatro condutores por fase, o que contribui também para o aumento de estruturas de aço, equipamentos e fundações empregadas. Além disso, o custo das perdas é muito superior ao do caso 1 devido à alta potência da LT. No entanto, como dito anteriormente, a tração crítica deste trecho é inferior à do trecho estudado no primeiro caso.

Dessa forma, a resposta apresentada pelo AG para o caso 2 contém o projeto de uma linha de transmissão de 1000 MVA em 500 kV em um trecho caracterizado por um vale de 4000 metros de comprimento. O posicionamento das torres, bem como suas alturas podem ser visualizados na Figura 5.8. Nesta obra são empregados quatro condutores por fase do código Grosbeak à 18,9% de sua carga de ruptura como tração de ancoragem, totalizando um custo de R\$ 6.714.686,03, conforme a Tabela 5.4.

Nº de ultrapassagens altura de segurança	0
Nº de violações tração axial	0
Tração axial crítica	2189,7 kgf
Tipo de cabo empregado	Grosbeak
Custo dos cabos para as 3 fases	R\$ 978.093,71
Custo estruturas de aço	R\$ 972.496,31
Custo fundações	R\$ 414.069,66
Custo amortecedores/espaçadores e isoladores	R\$ 411.353,04
Custo total das torres	R\$ 2.085.759,00
Custo total das perdas elétricas	R\$ 3.650.833,31
Custo total	R\$ 6.714.686,03

Tabela 5.4 – Detalhamento final do custo total da linha de transmissão - Caso 2

Fonte: Autor

5.3 CASO 3

O terceiro caso de estudo é semelhante ao caso 2, com uma LT de potência inferior, porém ainda considerada elevada. O terreno consiste em um aumento gradual da atitude ao longo de 4000 metros, conforme a Figura 5.9.

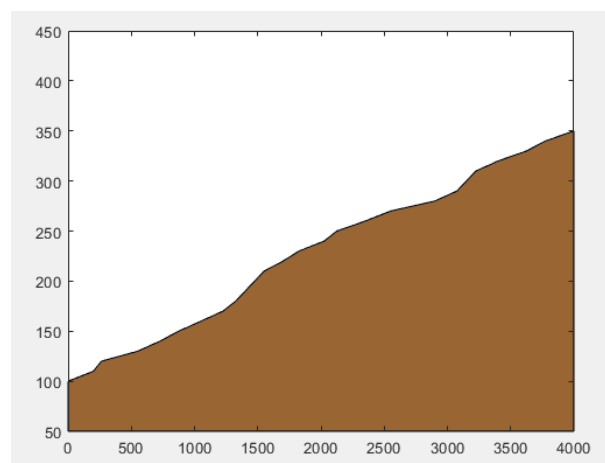


Figura 5.9 – Terreno - Caso 3

Fonte: Autor

As especificações do projeto são:

- Tensão: 500 kV;
- Potência: 600 MVA;
- Distância básica da altura de segurança: 6 m (situação de locais acessíveis apenas à pedestres);
- Número de torres: 8, sem contar com as duas torres que são sempre alocadas exatamente no início e fim do trecho, totalizando 10.

Conforme a Figura 5.10, nota-se a semelhança da velocidade de convergência com o caso 1, iniciando em torno da décima geração. Para este caso, o processo de otimização foi concluído em aproximadamente 42 segundos.

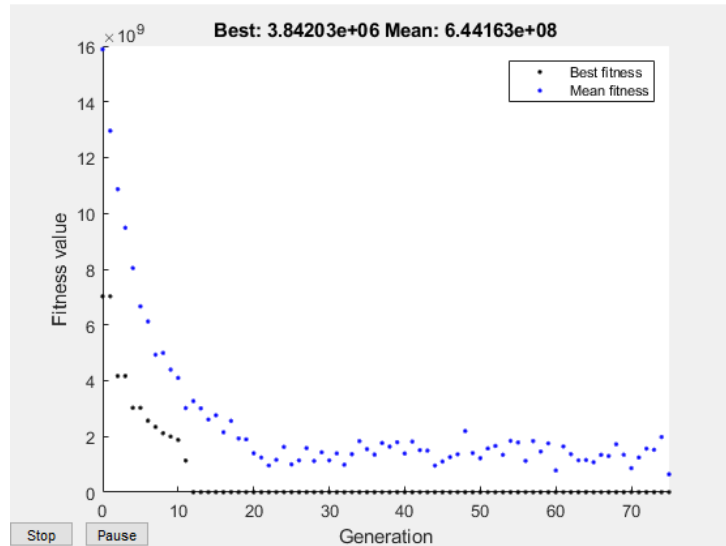


Figura 5.10 – Representação gráfica do processo de otimização - Caso 3

Fonte: Autor

Com o intuito de demonstrar a evolução dos indivíduos durante a execução do algoritmo genético, na Figura 5.11 tem-se o trecho utilizando os dados do melhor indivíduo da geração 5. O detalhamento do cálculo dos custos deste mesmo trecho pode ser visto na Tabela 5.5.

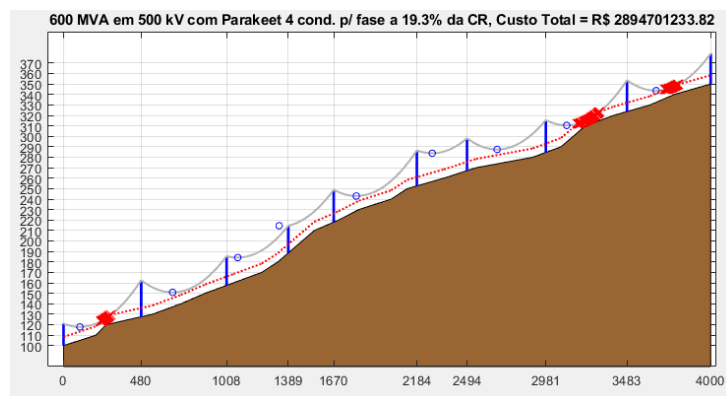


Figura 5.11 – Projeto da linha de transmissão - Geração 5 - Caso 3

Fonte: Autor

Mais uma vez, o indivíduo das primeiras gerações possui pontos onde ultrapassa o limite de altura de segurança estipulados. Além disso, é possível notar a existência de uma situação de arrancamento na torre 4, onde o ponto de mínimo de sua catenária ocorre além da torre de menor altitude do vão. Mesmo assim, não foram encontradas violações de tração axial sobre os condutores.

Nº de ultrapassagens altura de segurança	289
Nº de violações tração axial	0
Tração axial crítica	1765,9 kgf
Tipo de cabo empregado	Parakeet
Custo dos cabos para as 3 fases	R\$ 891.732,59
Custo estruturas de aço	R\$ 1.111.424,35
Custo fundações	R\$ 473.222,46
Custo amortecedores/espaçadores e isoladores	R\$ 411.353,04
Custo total das torres	R\$ 2.300.287,85
Custo total das perdas elétricas	R\$ 1.509.213,37
Custo total	R\$ 2.894.701.233,82

Tabela 5.5 – Detalhamento do custo total da linha de transmissão - Geração 5 - Caso 3

Fonte: Autor

A solução final de otimização para as especificações do terceiro caso está contida na Figura 5.12 e Tabela 5.6.

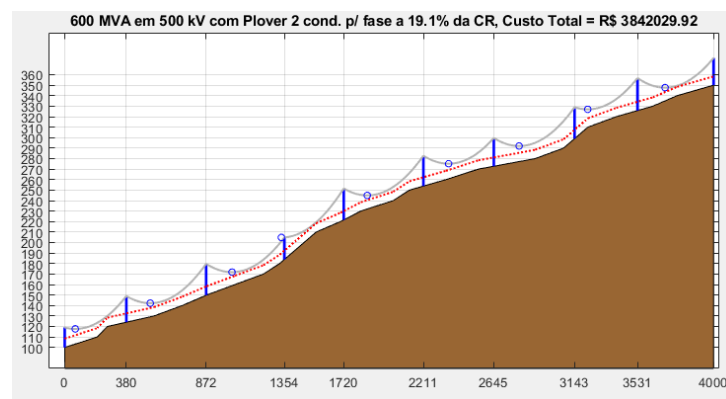


Figura 5.12 – Projeto final da linha de transmissão - Caso 3

Fonte: Autor

Ao fim do processo, conseguiu-se eliminar as ultrapassagens das restrições presentes na geração 5. O número de condutores por fase foi reduzido de quatro para dois, porém foi empregado um cabo mais caro e de menor resistência, para balancear as perdas elétricas.

Como pode-se observar, o processo de otimização não eliminou a situação de arancamento, pois não há uma restrição nesse sentido, porém, como a natureza do problema é leve, sugere-se apenas reduzir um pouco a tração de ancoragem no vão, ou, para maior garantia, utilizar uma torre de ancoragem no ponto. Dessa forma não ocorre alteração na catenária e evita o risco de ultrapassagem da altura de segurança.

Por fim, a resposta apresentada pelo AG para o caso 3 contém o projeto de uma linha de transmissão de 600 MVA em 500 kV em um trecho caracterizado por um aumento gradual da atitude ao longo 4000 metros de comprimento. O posicionamento das torres, bem como suas alturas podem ser visualizados na Figura 5.12. Nesta obra são empregados dois condutores por fase do código Plover à 19,1% de sua carga de ruptura como tração de ancoragem, totalizando um custo de R\$ 3.842.029,92, conforme a Tabela

Nº de ultrapassagens altura de segurança	0
Nº de violações tração axial	0
Tração axial crítica	4452,1 kgf
Tipo de cabo empregado	Plover
Custo dos cabos para as 3 fases	R\$ 1.009.964,26
Custo estruturas de aço	R\$ 746.460,23
Custo fundações	R\$ 246.069,82
Custo amortecedores/espaçadores e isoladores	R\$ 355.030,85
Custo total das torres	R\$ 1.623.064,90
Custo total das perdas elétricas	R\$ 1.209.000,76
Custo total	R\$ 3.842.029,92

Tabela 5.6 – Detalhamento final do custo total da linha de transmissão - Caso 3

Fonte: Autor

5.6.

5.4 CASO 4

No quarto e último caso estudado, tem-se o projeto mais complexo dentre os simulados. O perfil topográfico é bem acidentado com alta variação de altitude ao longo do terreno que se estende por 5000 metros, conforme a Figura 5.13.

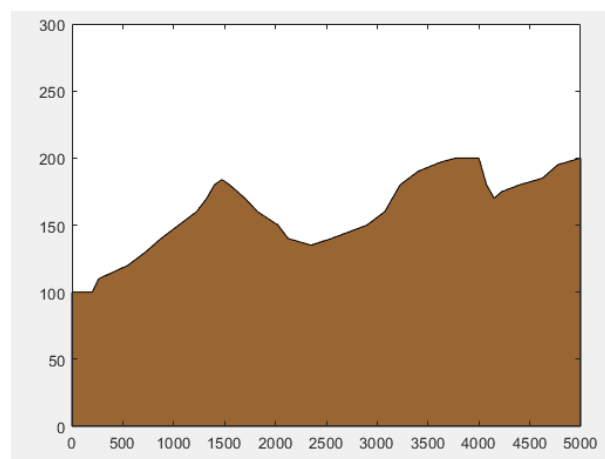


Figura 5.13 – Terreno - Caso 4

Fonte: Autor

As especificações do projeto são:

- Tensão: 230 kV;
- Potência: 100 MVA;
- Distância básica da altura de segurança: 8 m (situação de passagem por rodovias, ruas e avenidas);

- Número de torres: 9, sem contar com as duas torres que são sempre alocadas exatamente no início e fim do trecho, totalizando 11.

Ao observar a Figura 5.14, nota-se que, apesar de possuir um perfil mais acidentado, o processo de otimização do quarto caso convergiu mais rapidamente que o caso 2, por volta da décima quinta geração, devido ao maior número de torres disponíveis para alocação. No entanto, ao compararmos com o caso 1, que emprega a mesma quantidade de torres, sua convergência é mais lenta. Logo percebe-se que o número de torres escolhido para o projeto tem grande impacto no tempo de convergência do algoritmo do que o perfil topográfico. Para este caso, o processo de otimização foi concluído em aproximadamente 46 segundos.

Como forma de validar o resultado, foram realizados testes alterando somente o número de torres do trecho e comparando com a solução apresentada neste caso. Com 8 torres, o programa também encontra projetos viáveis porém ligeiramente mais caros no preço final e a diferença de tempo de processamento total é de apenas 2 ou 3 segundos a menos. Já com 7 torres, todos os projetos obtidos sempre continham violações na altura de segurança. Por conta disso, foi escolhida a configuração de projeto com 9 torres ao longo do terreno.

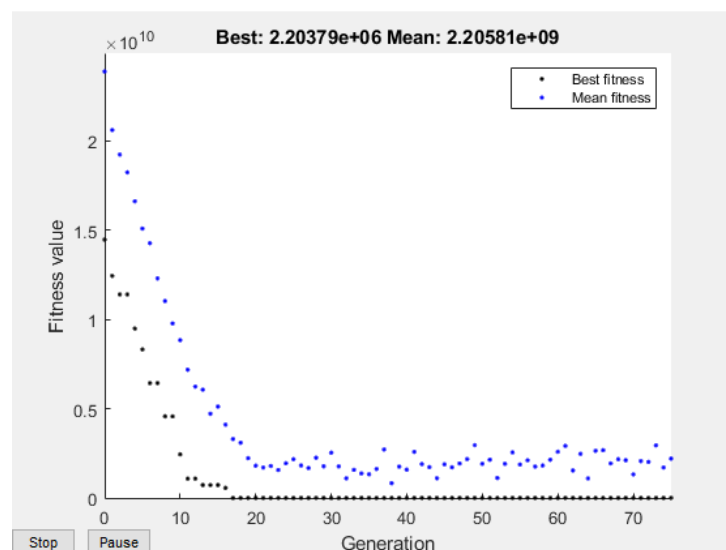


Figura 5.14 – Representação gráfica do processo de otimização - Caso 4

Fonte: Autor

Com o intuito de demonstrar a evolução dos indivíduos durante a execução do AG, na Figura 5.15 tem-se o trecho utilizando os dados do melhor indivíduo da geração 7. O detalhamento do cálculo dos custos deste mesmo trecho pode ser visto na Tabela 5.7.

Percebem-se várias violações da altura de segurança, inclusive no vão entre as torres 8 e 9, onde a catenária estimada chega a ultrapassar o nível do solo. Além das penalidades, a opção de empregar três condutores por fase em uma LT de apenas 100 MVA

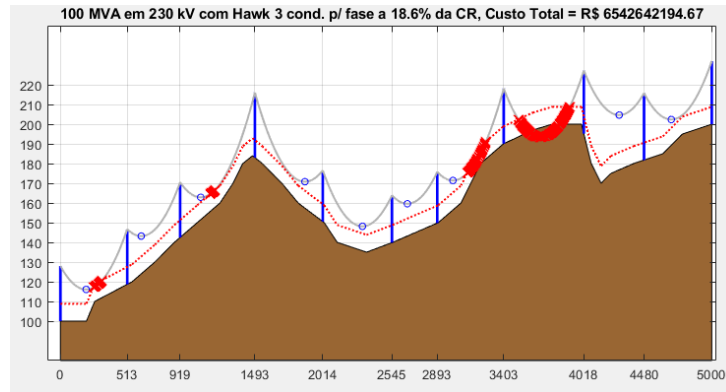


Figura 5.15 – Projeto da linha de transmissão - Geração 7 - Caso 4

Fonte: Autor

Nº de ultrapassagens altura de segurança	654
Nº de violações tração axial	0
Tração axial crítica	1651,0 kgf
Tipo de cabo empregado	Hawk
Custo dos cabos para as 3 fases	R\$ 700.206,22
Custo estruturas de aço	R\$ 616.048,75
Custo fundações	R\$ 404.601,91
Custo amortecedores/espaçadores e isoladores	R\$ 211.411,81
Custo total das torres	R\$ 1.559.994,47
Custo total das perdas elétricas	R\$ 381.993,98
Custo total	R\$ 6.542.642.194,67

Tabela 5.7 – Detalhamento do custo total da linha de transmissão - Geração 7 - Caso 4

Fonte: Autor

não é indicada, requisitando uma maior quantidade de gastos com estruturas, fundações e equipamentos e contribuindo para o custo exageradamente alto de R\$ 6.542.642.194,67.

A solução final de otimização para as especificações do quarto caso está contida na Figura 5.16 e Tabela 5.8.

Ao fim do processo, apesar do terreno dificultoso, conseguiu-se eliminar as ultrapassagens das restrições presentes na geração 7. O número de condutores por fase foi reduzido de três para um, e o cabo empregado manteve-se semelhante, localizado na parte intermediária da Tabela A.1 com balanceamento entre os valores de aquisição e resistência elétrica.

Por fim, a resposta apresentada pelo AG para o caso 4 contém o projeto de uma linha de transmissão de 100 MVA em 230 kV em um trecho caracterizado por inconstância e alta variação de altitude, demonstrando a robustez do programa que pode ser utilizado para realização de projetos dos mais diversos perfis topográficos. O posicionamento das torres, bem como suas alturas podem ser visualizados na Figura 5.16. Nesta obra é empregado apenas um condutor por fase do código Hen à 19,1% de sua carga de ruptura como tração de ancoragem, totalizando um custo de R\$ 2.203.792,21, conforme a Tabela 5.8.

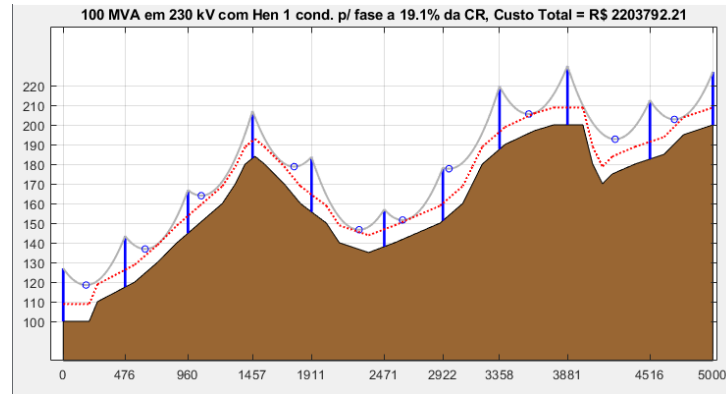


Figura 5.16 – Projeto final da linha de transmissão - Caso 4

Fonte: Autor

Nº de ultrapassagens altura de segurança	0
Nº de violações tração axial	0
Tração axial crítica	2053,9 kgf
Tipo de cabo empregado	Hen
Custo dos cabos para as 3 fases	R\$ 260.793,85
Custo estruturas de aço	R\$ 205.464,12
Custo fundações	R\$ 149.055,19
Custo amortecedores/espaçadores e isoladores	R\$ 150.320,41
Custo total das torres	R\$ 805.015,72
Custo total das perdas elétricas	R\$ 1.137.982,65
Custo total	R\$ 2.203.792,21

Tabela 5.8 – Detalhamento final do custo total da linha de transmissão - Caso 4

Fonte: Autor

6 CONCLUSÃO

É de conhecimento geral a necessidade de expansão do setor elétrico para o desenvolvimento de um país. Seja para suprir a demanda das indústrias cada vez mais tecnológicas, seja para fornecer energia suficiente para os consumidores usufruírem dos produtos por elas fabricados, é fundamental aumentar a qualidade e confiabilidade das linhas de transmissão. Tendo isso em vista, conclui-se que é vantajoso que sejam aplicados esforços para contornar os atrasos do crescimento deste setor, causados principalmente por impedimentos legais e licenciamentos.

E este é o propósito do estudo descrito neste documento. Em suma, apesar de possuir espaços para melhoria, o trabalho apresentado atingiu seu objetivo principal com êxito. O programa se mostrou capaz de entregar projetos viáveis, considerando diferentes especificações de linhas de transmissão, de maneira rápida e automatizada, levando em consideração normas técnicas e valores reais de aquisição e montagem de equipamentos.

Graças à versatilidade dos algoritmos genéticos, através da possibilidade de modificação de alguns aspectos da configuração e dos operadores, foi possível a criação de um programa flexível e eficiente para realização de projetos de linhas de transmissão. A capacidade de avaliar variáveis de natureza diferente umas das outras, presente nos AGs, é imprescindível para este tipo de aplicação e contribuiu para encontrar uma resposta que não necessariamente é ótima, mas atende a todos os requisitos com um custo adequado para implementação prática.

Vale ressaltar que o tempo de processamento depende diretamente da quantidade de variáveis que fazem parte do processo de otimização e que, conseqüentemente, o número de torres escolhido terá impacto na duração deste processo. Deve-se sempre realizar a otimização considerando diferentes números de torres para o mesmo projeto, e então escolhe-se o resultado mais vantajoso. Além disso, as penalidades aplicadas no custo total do projeto mostraram-se um método eficaz para a exclusão dos indivíduos que apresentam violações das restrições de segurança.

Como proposta para estudos futuros, pode-se buscar um refinamento ainda maior da função de aptidão, para que novos parâmetros sejam analisados, como por exemplo as situações de arracamento, bem como aumentar o número de elementos que constituem um indivíduo, inserindo ainda mais características da linha a serem otimizadas pelo algoritmo genético. Ainda, pode-se buscar complementar o programa para contemplar o traçado completo, em que o AG deve decidir onde alocar torres de ancoragem, para que seja possível projetar uma linha de transmissão completa, não apenas trechos sem desvios.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. **NBR 5422: Projeto de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica.** São Paulo, 1985. 57 p. Acesso em 20 dez. 2021. Disponível em: <<https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/5329/abnt-nbr5422-projeto-de-linhas-aereas-de-transmissao-de-energia-eletrica>>.

ALVES, R. B. **IMPLANTAÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO: DO LEILÃO À OPERAÇÃO COMERCIAL.** 2017. 63 f. Monografia (Projeto de Graduação) — Curso de Graduação em Engenharia Elétrica, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

CARDOSO, R. P.; AVILA, S. L. Matemática aplicada na busca do ótimo. **Seminário de Pesquisa, Extensão e Inovação do IFSC**, p. 5, 2012.

CASTRO, R. E. de. **OTIMIZAÇÃO DE ESTRUTURAS COM MULTI-OBJETIVOS VIA ALGORITMOS GENÉTICOS.** 2001. 226 f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.

EPE, E. de P. E. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2029.** Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2019. 382 p.

MELO, M. V. E. S. de. **LINHAS DE TRANSMISSÃO E DESCARGAS ATMOSFÉRICAS: ANÁLISE DE AVARIAS, PERDAS TÉCNICO-FINANCEIRAS E SISTEMAS DE PROTEÇÃO.** 2016. 62 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) — Curso de Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

MENEZES, V. P. D. **LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA ASPECTOS TÉCNICOS, ORÇAMENTÁRIOS E CONSTRUTIVOS.** 2015. 87 f. Monografia (Projeto de Graduação) — Curso de Graduação em Engenharia Elétrica, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

Márcio Nunes Miranda. **Algoritmos Genéticos: Fundamentos e Aplicações.** 2009. Acesso em 15 dez. 2021. Disponível em: <<http://www.nce.ufrj.br/GINAPE/VIDA/alggenet.htm>>.

O Setor Elétrico. **Os desafios para a expansão da transmissão.** 2021. Acesso em 11 dez. 2021. Disponível em: <<https://www.osetoreletrico.com.br/os-desafios-para-a-expansao-da-transmissao/>>.

ONS, O. N. do S. E. **Plano da Operação Elétrica de Médio Prazo do SIN - PAR/PEL 2021-2025.** Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2020. 54 p.

PACHECO, M. A. C. Algoritmos genéticos: Princípios e aplicações. **ICA - Laboratório de Inteligência Computacional Aplicada - PUC RJ**, p. 9, 1999.

ROSA, M. **LINHA DE TRANSMISSÃO: CRITÉRIOS DE PROJETOS E DEFINIÇÃO DO TIPO DE FUNDAÇÃO.** 2009. 82 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) — Curso de Graduação em Engenharia Civil, Universidade Anhembi Morumbi, São Paulo, 2009.

SARAMAGO, S. F. P. Métodos de otimização randômica: algoritmos genéticos e “simulated annealing”. In: _____. **Notas em Matemática Aplicada.** São Carlos, SP: Sociedade Brasileira de Matemática Aplicada e Computacional - SBMAC, 2003. cap. 6, p. 31.

SILVA, C. A. et al. Análise conceitual de linhas de transmissão operando em regime permanente senoidal. **ForScience: revista científica do IFMG**, p. 16, 2016.

TSURUTA, J. H.; NARCISO, M. G. Um estudo sobre algoritmos genéticos. **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA**, p. 23, 2000.

VELOZO, L. T. **METODIZAÇÃO DO ESTUDO DAS FUNDAÇÕES PARA SUPORTES DE LINHAS DE TRANSMISSÃO**. 2010. Tese (Doutorado em Ciências de Engenharia Civil) — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

ANEXO A – TABELA DOS CONDUTORES

Tabela A.1 – Propriedades mecânicas e elétricas dos condutores.

Código	Massa(kg/km)	C.Rup.(kgf)	Preço(R\$/km)	$R_{20^{\circ}C}$ (Ω/km)	$\alpha(1/^{\circ}C)$
Waxwing	432	3140,7	8212,9	0,21678	0,0032779
Partridge	547	5078,2	996,9	0,21454	0,0032831
Ostrich	616	5628,8	9696,3	0,1908	0,003279
Merlin	544	3905,5	9453,5	0,17197	0,0032526
Linnet	692	6240,7	11831	0,17011	0,0032761
Oriole	787	7566,3	13874	0,16899	0,0032855
Chickadee	642	4624	11172	0,14556	0,0032736
Ibis	816	7240	15099	0,14438	0,0032716
Pelican	775	5486,1	12991	0,12163	0,0032533
Flicker	916	7709,1	15437	0,12076	0,0032767
Hawk	981	8596,2	15475	0,12001	0,0032626
Hen	1110	10503	17306	0,11927	0,0032656
Osprey	904	6373,2	14513	0,10435	0,0032559
Parakeet	1069	8902,1	18469	0,10373	0,0032554
Dove	1150	9932	18022	0,10336	0,0032672
Rook	1224	10116	19172	0,090802	0,0032398
Grosbeak	1310	11319	20265	0,090367	0,0032554
Drake	1630	13970	24584	0,07284	0,0031854
Tern	1340	10065	21917	0,073835	0,0031987
Rail	1610	11931	25182	0,061964	0,0031762
Cardinal	1840	15194	30212	0,061405	0,0031714
Ortolan	1860	16000	29987	0,057427	0,0031385
Bluejay	1870	13766	32331	0,053511	0,0030972
Finch	2138	17947	32531	0,053201	0,0031542
Bittern	2130	15704	32759	0,047359	0,0030621
Pheasant	2440	20292	38670	0,046675	0,003107
Bobolink	2400	17390	40252	0,042511	0,0030214
Plover	2740	22638	41841	0,041827	0,0030708
Lapwing	2660	19375	43607	0,03872	0,0029428
Falcon	3040	25085	48089	0,038036	0,0029956
Bluebird	3467	28608	64376	0,029584	0,0027311

Fonte: SPERANDIO, 2019 - Material de aula