

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Engenharia
Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica

Guilherme Esteves Mendes Campos

**ALOCÇÃO DE TORRES AO LONGO DE TRAÇADOS DE LINHAS DE
TRANSMISSÃO AÉREAS (LTAS)**

Belo Horizonte

2022

Guilherme Esteves Mendes Campos

**ALOCAÇÃO DE TORRES AO LONGO DE TRAÇADOS DE LINHAS DE
TRANSMISSÃO AÉREAS (LTAS)**

Versão final

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Engenharia de Potência

Linha de Pesquisa: Compatibilidade Eletromagnética e Qualidade de Energia

Orientador: Wallace do Couto Boaventura

Coorientador: Vinicius Mariano Gonçalves

Belo Horizonte

2022

C198a

Campos, Guilherme Esteves Mendes.

Alocação de torres ao longo de traçados de linhas de transmissão aéreas (LTAs) [recurso eletrônico] / Guilherme Esteves Mendes Campos. - 2022.

1 recurso online (77 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Wallace do Couto Boaventura.

Coorientador: Vinicius Mariano Gonçalves.

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

Bibliografia: f. 73-77.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Linha de transmissão - Teses. 3. Algoritmos genéticos - Teses. 4. Energia elétrica - Transmissão - Teses. 5. Leilões - Teses. I. Boaventura, Wallace do Couto. II. Gonçalves, Vinicius Mariano. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 621.3(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
COLEGIADO DO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

FOLHA DE APROVAÇÃO

"Alocação de Torres Ao Longo de Traçados de Linhas de Transmissão Aéreas (Itas)"

GUILHERME ESTEVES MENDES CAMPOS

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada, no dia 27 de maio de 2022, pela Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais constituída pelos seguintes professores:

Prof. Dr. João Antônio de Vasconcelos (DEE (UFMG))

Prof. Dr. Eduardo Gontijo Carrano (DEE (UFMG))

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

Prof. Dr. Vinícius Mariano Gonçalves (DEE (UFMG)) - Coorientador

Belo Horizonte, 27 de maio de 2022.



Documento assinado eletronicamente por **Wallace do Couto Boaventura**, Presidente de comissão, em 03/06/2022, às 16:40, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1485864** e o código CRC **B27DE0E3**.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, por, de alguma forma, me permitir ter acesso ao conhecimento, ter conduzido meu caminho em uma instituição de ensino de excelência e ter sido meu parceiro nos momentos de dificuldades ao longo dessa trajetória.

Agradeço imensamente também à minha família, em especial aos meus pais, que desde sempre me proporcionaram o melhor que podiam para que eu tivesse acesso à educação e sempre me apoiaram nas minhas escolhas. Agradeço também a minha irmã Verônica, que desde cedo muito me ensinou e ensina e a todos familiares e amigos que me inspiram, me ensinam sobre a vida, foram pacientes em aceitar minha ausência em diversos momentos ao longo desses anos e continuaram me apoiando.

Agradeço muito à UFMG, à Escola de Engenharia e, em especial aos professores Wallace e Vinicius, por terem me ajudado nessa jornada, e à Marina, companheira em muitos trabalhos e disciplinas. A parceria com eles se estende de longa data, muito além desse projeto e trabalho, e sempre aprendo muito com vocês.

Serei eternamente grato também à Concert Technologies S/A, por tudo que me proporcionou como pessoa, profissional e mestrandando, com todas as oportunidades, ensinamentos, projetos desafiadores e inovadores, e aplicação prática de tanto conhecimento em Engenharia Elétrica. Tenho muito orgulho dessa empresa! Agradeço, em especial ao Daniel e à Lara, que muito me ajudaram nesse projeto e permitiram que eu chegasse até aqui.

Agradeço também à TAESA, representada pelo Eduardo, que promoveu e incentivou o desenvolvimento desse trabalho, uma empresa que busca a excelência em tudo que faz e muito contribui para as pesquisas no setor. Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL por vias do projeto PD-07130-0057/2019 da Empresa de Energia Elétrica TAESA intitulado “Análise de Investimento e Traçados Otimizados - Ferramenta de Otimização Multicritério para Análise de Investimentos em Leilões de Linhas de Transmissão Utilizando Técnicas de Inteligência Artificial”, celebrado entre TAESA e Concert Technologies S/A, com participação da UFMG. O Autor agradece à ANEEL e TAESA.

Resumo

Este trabalho apresenta a metodologia desenvolvida e os resultados obtidos por meio de um algoritmo computacional que tem por objetivo determinar a alocação de torres de transmissão de energia ao longo de traçados de linhas de transmissão aéreas (LTAs) previamente determinados. Esse algoritmo se baseia em técnicas de Algoritmos Genético e tem como entradas critérios elétricos definidos pelos órgãos reguladores, características mecânicas que influenciam na escolha do tipo de torre e atributos da topologia do corredor de implantação da linha, dentre outros dados.

O algoritmo desenvolvido foi aplicado a cenários de traçados de linhas de transmissão fictícios e real. Os traçados fictícios foram utilizados para se determinar os valores dos parâmetros que influenciam na execução do algoritmo genético, enquanto o exemplo de traçado real serviu para aplicação e validação da metodologia em um cenário mais próximo ao deparado pelas empresas proponentes durante os leilões de transmissão de energia promovidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

Os resultados obtidos com o desenvolvimento do trabalho poderão auxiliar as empresas proponentes nos leilões promovidos pela ANEEL a estimarem melhor os custos iniciais de construção das LTAs, a partir de uma alocação prévia e rápida das torres que já considera a redução dos custos de implantação, e, assim, poderão melhor definir os *bids* (lances) e obterem mais sucesso nos leilões.

Palavras-chave: linhas de transmissão aéreas; algoritmos genéticos; alocação de torres em linhas de transmissão; leilões de transmissão de energia; projeto de linhas de transmissão.

Abstract

This work presents the methodology developed and the results obtained through a computational algorithm that aims to determine the allocation of power transmission towers along previously determined overhead transmission lines. This algorithm is based on Genetic Algorithm techniques and has as inputs electrical criteria defined by regulatory agencies, mechanical characteristics that influence the choice of tower type and attributes of the topology of the line's implementation corridor, among other data.

The developed algorithm was applied to fictitious and real transmission lines scenarios. The fictitious tracings were used to determine the values of the parameters that influence the execution of the genetic algorithm, while the example of a real tracing served to apply and validate the methodology in a scenario closer to that encountered by the bidders during the energy transmission auctions, promoted by the Brazilian National Electric Energy Agency (ANEEL).

The results obtained with the development of the work may help the bidders in the auctions promoted by ANEEL to better estimate the initial costs of construction of the lines, by giving a preliminary and fast allocation of the towers that already considers the reduction of the implantation costs, and, thus, they will be able to better define the bid and obtain more success in the auctions.

Keywords: overhead transmission line; genetic algorithm; allocation of transmission line towers; power transmission auctions; transmission line design.

Sumário

1	INTRODUÇÃO.....	11
1.1	RELEVÂNCIA E MOTIVAÇÃO	11
1.2	OBJETIVO.....	12
1.3	METODOLOGIA.....	13
1.4	ORGANIZAÇÃO DO TEXTO.....	13
2	LINHAS DE TRANSMISSÃO AÉREAS	15
2.1	PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DA TRANSMISSÃO	16
2.2	LEILÕES DE TRANSMISSÃO	18
2.2.1	EDITAL	20
2.2.2	RELATÓRIOS TÉCNICOS (“Rs”).....	20
2.2.3	BANCO DE PREÇOS DE REFERÊNCIA ANEEL.....	23
2.2.4	PROJETO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO	24
2.2.4.1	Projeto Básico	24
2.2.4.2	Projeto Executivo	27
2.3	ELEMENTOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO AÉREAS	28
2.3.1	TORRES.....	28
2.3.1.1	Tipos.....	29
2.3.1.2	Fundação.....	31
2.3.1.3	Esforços mecânicos.....	32
2.3.1.4	Vãos.....	32
2.3.2	CABOS CONDUTORES.....	33
2.3.2.1	Características.....	34
2.3.2.2	Distância do condutor ao solo	35
2.3.3	OUTROS ELEMENTOS	36
2.3.3.1	Aterramento.....	36
2.3.3.2	Isoladores.....	36
2.3.3.3	Para-raios	37

3	ALOCAÇÃO DE TORRES EM LTAS.....	37
3.1	ALGORITMOS DE ALOCAÇÃO DE TORRES EM LTAS	38
3.2	ALGORITMOS COMPUTACIONAIS	39
3.2.1	HEURÍSTICA GULOSA.....	39
3.2.2	ALGORITMOS GENÉTICOS	40
4	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	42
4.1	DEFINIÇÃO MACRO	42
4.1.1	ENTRADAS	42
4.1.2	SAÍDAS.....	44
4.2	DEFINIÇÃO MATEMÁTICA	45
4.2.1	VARIÁVEIS DE DECISÃO	45
4.2.2	FUNÇÃO OBJETIVO.....	45
4.2.3	RESTRICÇÕES	46
5	METODOLOGIA	47
5.1	ESTRUTURA DO ALGORITMO GENÉTICO PROJETADO	47
5.1.1	REPRESENTAÇÃO DOS INDIVÍDUOS	48
5.1.2	GERAÇÃO DA POPULAÇÃO INICIAL	49
5.1.3	AVALIAÇÃO DA POPULAÇÃO	51
5.1.4	SELEÇÃO DOS INDIVÍDUOS	53
5.1.5	CRUZAMENTO E MUTAÇÃO DOS INDIVÍDUOS	53
5.1.6	ELITISMO.....	55
5.2	HEURÍSTICA GULOSA AUXILIAR	55
6	TESTES E RESULTADOS	57
6.1	TESTES COM TERRENO FICTÍCIO MANTIDO FIXO	58
6.1.1	VARIAÇÃO DO NÚMERO DE GERAÇÕES (<i>NGEN</i>)	58
6.1.2	VARIAÇÃO DO TAMANHO DA POPULAÇÃO (<i>NPOP</i>)	59
6.1.3	VARIAÇÃO DOS FATORES DE CRUZAMENTO (<i>PC</i>) E MUTAÇÃO (<i>PM</i>)	59
6.1.4	VARIAÇÃO DO FATOR DE PENALIDADE (<i>FPEN</i>)	60
6.2	TESTES COM TERRENOS FICTÍCIOS GERADOS ALEATORIAMENTE.....	61

6.3	TESTES COM DADOS REAIS	62
6.4	ALGORITMO GENÉTICO COMBINADO COM HEURÍSTICA GULOSA	63
7	CONCLUSÕES	64
7.1	PROPOSTA DE CONTINUIDADE	65
	REFERÊNCIAS.....	67

1 Introdução

1.1 Relevância e Motivação

A necessidade de expansão e melhorias do sistema de transmissão de energia elétrica, motivada, principalmente, pelo aumento da geração hidráulica, implantação de parques eólicos e solares, criação de novas interconexões na rede básica e pela demanda crescente de consumo (de centros urbanos e indústrias, por exemplo), exige o desenvolvimento de novos projetos de linhas de transmissão e subestações mais eficientes e que causem menores impactos ambientais e sociais. Além disso, esses empreendimentos devem ser economicamente viáveis para que se tornem de interesse de empresas executoras e investidores e garantam serviço de qualidade, com altos índices de confiabilidade e disponibilidade a um custo praticável aos consumidores.

No Brasil, a identificação da necessidade de expansão da rede de transmissão de energia é realizada por meio de estudos de viabilidade técnico-econômica denominados Plano Decenal de Expansão de Energia, realizados pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), associados à incorporação de novos empreendimentos de geração, disponibilizados pelo Ministério de Minas e Energia (MME) e pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que também promove leilões públicos a cada semestre para a concessão e construção de linhas de transmissão [1] [2]. Esses leilões são organizados por lotes de instalações de transmissão (subestações, linhas e trechos de linhas), definidos em documentos como editais, anexos e relatórios técnicos. As concessionárias vencedoras do leilão devem atender a indicadores de qualidade de energia a partir da finalização da implantação e conexão da linha com o sistema de transmissão [2].

Devido ao número elevado de atividades que precisam ser realizadas entre a abertura de um edital de leilão de transmissão e sua realização, as empresas proponentes recorrem, cada vez mais, à utilização de métodos e modelos computacionais que proporcionem a otimização e automatização do processo de formação de *bid* (lance) considerando as restrições técnicas, econômicas e socioambientais. No que se refere à determinação do traçado das linhas de transmissão aéreas (LTAs), estudos e análises técnicas de composição do traçado aliados a algoritmos computacionais têm se mostrado

possíveis soluções para rápida determinação de cenários iniciais que podem ser detalhados ao longo do processo de composição do *bid* e, uma vez arrematado o lote, durante a etapa de análise detalhada de engenharia [3] [4]. Esses traçados constituem-se de um conjunto de arestas e vértices descritos por suas coordenadas geográficas que devem ainda ser detalhados para se determinar a posição e estrutura de torres e cabos ao longo de sua extensão.

No contexto da alocação das torres ao longo das LTAs, são considerados limites de parâmetros elétricos dos condutores, características mecânicas das estruturas das torres, cabos e outros elementos e atributos da topologia (relevo e superfície) da região do corredor de implantação da linha. Dentre os parâmetros referentes a características elétricas da torre, tem-se o comprimento mínimo e máximo do vão gravante, que está relacionado ao tipo de condutor, à sua capacidade de corrente, às suas perdas e à tensão máxima operativa [5]. As características mecânicas das torres, como resistência aos esforços de tração e compressão, são determinadas pelo tipo e material da estrutura. Outras características, como altura e fundação da torre estão relacionadas à topologia da região. Já dentre os atributos topológicos estão aqueles associados ao relevo (declive) e superfície (composição do solo e tipo de área de interferência, como rodovias, aeroportos, área de preservação ambiental etc.). [5]

Assim, a determinação da alocação das torres de transmissão também é fator importante para os projetos de linhas de transmissão e impacta diretamente na análise de engenharia preliminar aos leilões que auxiliam na definição do *bid* das empresas proponentes.

1.2 Objetivo

O objetivo principal do trabalho apresentado é criar uma metodologia que auxilie as empresas transmissoras de energia na alocação de torres de linhas de transmissão aérea durante o período de elaboração de lances para os leilões de transmissão promovidos pela ANEEL.

Justamente devido à complexidade dessa determinação, este trabalho propõe uma metodologia que visa reduzir o tempo de projeto e subsidiar a proponente com

informações mais precisas para a composição técnica e financeira do *bid* referentes aos locais de instalação e custos de torres de transmissão.

Os resultados obtidos por meio da metodologia proposta servirão para auxiliar as empresas transmissoras na determinação de um perfil de alocação de torres e na estimativa de custos iniciais, que poderá ser refinada e validada na etapa de estudos técnicos e elaboração do projeto executivo realizados após a realização dos leilões.

1.3 Metodologia

A metodologia proposta no trabalho e detalhada no Capítulo 5 consiste num algoritmo computacional desenvolvido no software Matlab que utiliza técnicas de Algoritmos Genéticos (AG) para realizar a alocação de um conjunto de torres ao longo de um traçado de LTA previamente determinado (com coordenadas definidas que lhe conferem um perfil de relevo e superfície). A metodologia utiliza como dados de entrada, além dos dados do traçado, parâmetros técnicos, econômicos e próprios do algoritmo.

1.4 Organização do Texto

O presente trabalho está organizado em sete capítulos. O primeiro capítulo introduziu o tema do trabalho, destacando sua relevância, motivação e uma breve descrição da metodologia a ser detalhada posteriormente.

O segundo capítulo consiste em uma revisão bibliográfica de diversos conceitos relacionados aos projetos de linhas de transmissão aéreas, aos leilões de transmissão e aos elementos que compõem as linhas de transmissão aérea. A contextualização desses conceitos auxilia no entendimento da solução proposta.

Uma revisão sobre trabalhos anteriores que empregaram técnicas computacionais para alocação de torres de transmissão de energia é feita no terceiro capítulo. Além disso, esse capítulo apresenta os conceitos de algumas das técnicas encontradas e que possibilitaram a criação da metodologia desenvolvida neste trabalho.

O quarto capítulo descreve a definição do problema, tanto de forma textual, com as entradas disponíveis e saídas esperadas da solução quanto do ponto de vista matemático, com as variáveis de decisão, função objetivo e restrições.

No quinto capítulo é feito o detalhamento da metodologia desenvolvida. Cada etapa do algoritmo genético implementado é detalhada. Além disso são listados os parâmetros utilizados nos testes.

O sexto capítulo descreve os testes realizados, quais foram os dados de entrada utilizados, premissas consideradas e exibe e discute os resultados obtidos.

O sétimo e último capítulo sumariza os resultados obtidos com o trabalho, destacando sua relevância e aplicabilidade prática. Além disso, são descritas considerações que podem ser observadas em trabalhos futuros.

2 Linhas de Transmissão Aéreas

Linhas de Transmissão (LTs) são circuitos elétricos constituídos por conjuntos de condutores através dos quais a energia elétrica é transportada de um local transmissor (geralmente uma subestação elevadora próxima a uma fonte geradora de energia) a um local receptor (normalmente uma subestação abaixadora em grandes centros consumidores de energia).

No Brasil, para se caracterizar como linha de transmissão, a tensão do circuito deve ser superior a 230 kV para a chamada Rede Básica (RB) que compõe o Sistema Interligado Nacional (SIN) [6]. Abaixo desse valor, os circuitos de transporte de energia elétrica são denominados *subtransmissão* e *distribuição*.

A coordenação da operação do sistema de transmissão de energia no Brasil é feita pelo Operador Nacional do Sistema (ONS) e regulamentada pela ANEEL. O mapa do sistema de transmissão nacional no horizonte 2024 é mostrado na Figura 1.

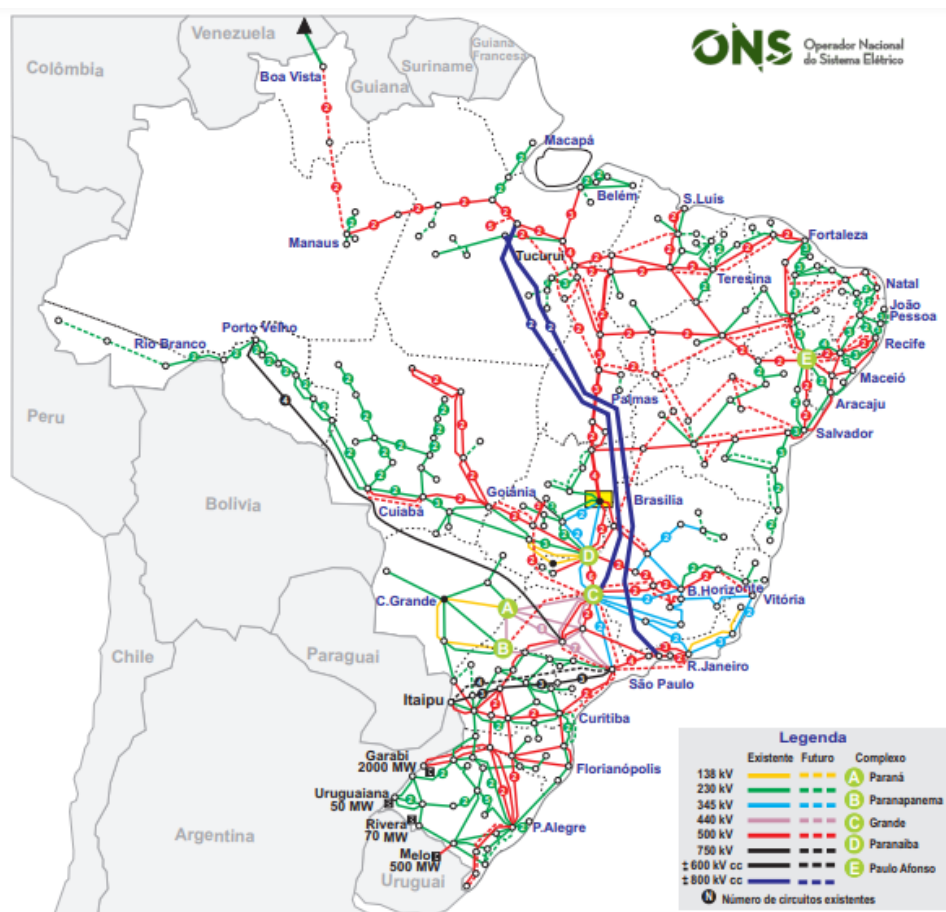


Figura 1 - Mapa do sistema de transmissão de energia nacional horizonte 2024 [7]

Dentre os principais tipos de linhas de transmissão, tem-se:

- Linhas de transmissão aérea (LTAs) em corrente alternada ou em corrente contínua: linhas compostas por cabos suspensos por hastes (torres, postes) que mantêm o material condutor afastado do alcance de pessoas, animais e interferência com outras construções;
- Linhas de transmissão subterrânea: linhas que são construídas em galerias ou tubulações subterrâneas, de acesso mais limitado e menor exposição ao tempo, compostas por cabos coaxial com um fio central condutor, isolado de um condutor externo coaxial de retorno.

As linhas de transmissão podem variar em tipo, comprimento, altura do solo, nível de tensão, capacidade de transmissão, frequência, nível de proteção e diversos outros aspectos, que devem ser definidos em projetos de linhas de transmissão após análises realizada por especialistas.

2.1 Planejamento da Expansão da Transmissão

A expansão do sistema de transmissão de energia elétrica é motivada pelo aumento da demanda de energia (de centros urbanos e indústrias, principalmente) e pela implantação de fontes geradoras geralmente distantes desses pontos de demanda (normalmente hidroelétricas, parques eólicos e solares, dentre outros tipos de fontes). Para se iniciar a construção desses empreendimentos, é necessário realizar uma série de estudos, considerando um horizonte de longo prazo que esteja alinhado às expectativas de mudanças no cenário econômico do país. A Empresa de Pesquisa Energética é o agente do setor elétrico responsável por realizar no Brasil os estudos para o planejamento da expansão da transmissão de curto, médio e longo prazos. Esses estudos são realizados semestralmente tendo como horizonte ciclos decenais e dão origem a um documento que reúne os resultados obtidos e compreende o Programa de Expansão da Transmissão (PET) e o Plano de Expansão de Longo Prazo (PELP), que compõem o Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE) [8] [9].

Os estudos de expansão realizados que dão origem ao PDE têm a coordenação da Superintendência de Transmissão de Energia integrada à Superintendência de Meio Ambiente da EPE e podem ainda ter a colaboração de concessionárias de energia. Neles são listados os problemas levantados pelas concessionárias e discutidas alternativas de

melhorias e soluções, que resultam em determinações e recomendações de novas instalações de subestações e linhas de transmissão para a expansão da rede [10].

O processo cíclico de planejamento, mostrado na Figura 2, se inicia com a projeção e o levantamento dos diversos patamares de carga, que são associados ao plano de geração, com seus vários cenários, e a estudos de novas instalações de transmissão, considerando-se o critério de contingência/redundância simples “n-1”, em que o escoamento de energia deve continuar ocorrendo mesmo com o desligamento de um link ou unidade geradora, com outro, redundante, garantindo que não haja interrupção [11]. Toda essa análise é feita a partir de informações existentes em uma base de dados e resulta no PET e no PELP. O PET determina os empreendimentos que devem ser realizados nos seis primeiros anos subsequentes ao da elaboração do documento e origina o primeiro de cinco relatórios técnicos do conjunto que é disponibilizado anexo ao edital dos leilões de transmissão, o R1. Já o PELP recomenda os empreendimentos que podem ser construídos nos quatro anos finais do decênio [8] [12]. Em paralelo, o ONS elabora o Plano de Ampliações e Reforços (PAR), documento que contempla todas as ampliações e os reforços necessários na Rede Básica e nas Demais Instalações da Transmissão (DIT) no que se refere à operação do sistema, com o intuito de garantir a qualidade e a segurança do SIN [9]. Baseando-se no PET e no PAR, o MME elabora o Plano de Outorgas de Transmissão de Energia Elétrica (POTEE), que dá origem aos demais relatórios técnicos disponibilizados nos leilões, R2, R3, R4 e R5, que subsidiarão a análise técnica do empreendimento.

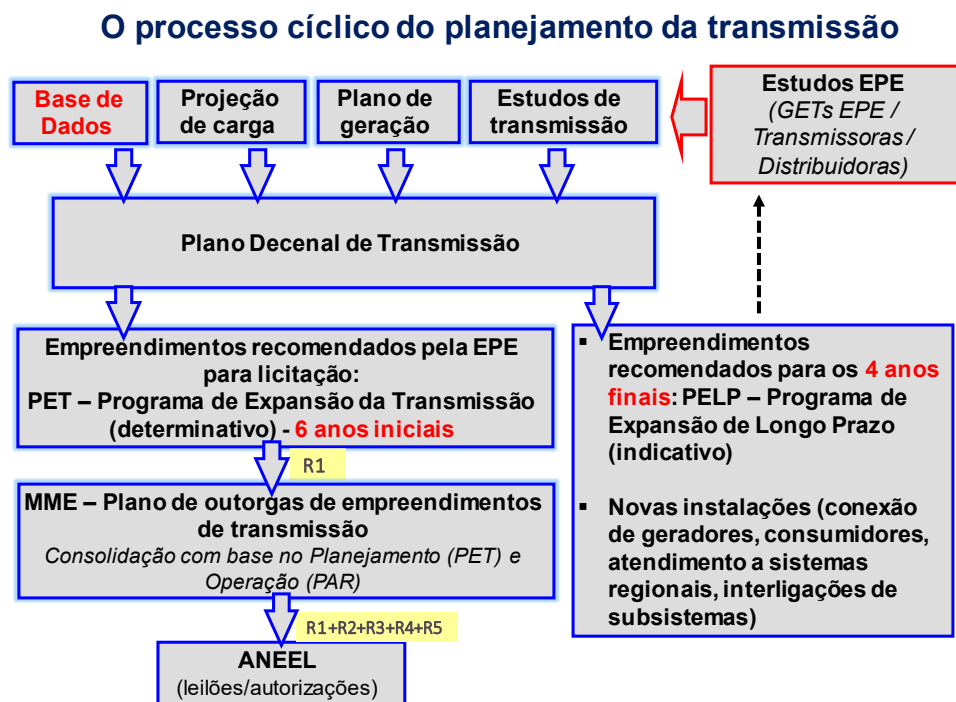


Figura 2 - Processo cíclico do Planejamento da Expansão da Transmissão de Energia Elétrica [13]

Todo esse processo cíclico de planejamento da expansão da transmissão de energia culmina nos leilões de transmissão realizados pela ANEEL.

2.2 Leilões de Transmissão

Os leilões de transmissão promovidos pela ANEEL são os procedimentos licitatórios para a contratação de empresas concessionárias e permissionárias de serviço público para transmissão de energia elétrica. [2]

Os leilões foram definidos nos termos do artigo 175 da Constituição de 1988, que diz que a prestação de serviços públicos, caso não seja feita diretamente pelo Estado, deverá ser atribuída a concessionários e/ou permissionários sempre mediante licitação. A atribuição desses leilões à ANEEL foi feita por meio do artigo 3º, II, da Lei nº 9.427, de 26 de dezembro de 1996 [14]. Como mencionado, os leilões surgem a partir das determinações e indicações definidas no POTEE pelo Ministério de Minas e Energia, elaborado com base no PET, PELP e PAR. Cada leilão é constituído por um conjunto de concessões denominadas “lotes”, que podem ser relativos a projetos de linhas de transmissão e/ou subestações [14]. As concessões são divulgadas semestralmente por meio de editais de transmissão elaborados pela ANEEL e, para cada uma delas, é definido um valor de Receita Anual Permitida (RAP) máximo, que corresponde ao maior valor que a empresa executora da concessão receberá a

cada ano durante o prazo definido em contrato [14]. As empresas proponentes disputam cada um dos lotes por meio de sessões realizadas no portal da ANEEL e a empresa que apresentar o lance com o maior deságio em relação à RAP máxima é declarada vencedora para o lote em questão.

Cada uma das empresas proponentes tem seu histórico analisado pela ANEEL. Elas devem informar seus desempenhos na implantação de obras de transmissão nos 36 meses anteriores ao da publicação do edital, apresentar documentos de habilitação jurídica, técnica, econômico-financeira e comprovação de boa situação financeira, dentre outras garantias [14]. Uma vez credenciada para participar dos leilões, as proponentes definem estratégias e realizam estudos técnicos e econômicos para avaliar a atratividade econômica dos lotes de seu interesse, e, uma vez definidos os lotes alvos, aprofundam nesses estudos para que obtenham um valor de lance competitivo em relação à RAP máxima e a seus concorrentes. Esses estudos são feitos com base no edital e nos relatórios técnicos R1, R2, R3, R4 e R5.

Apenas como referência, o Leilão de Transmissão nº 002/2021, realizado no dia 17/12/2021 contou com cinco lotes em cinco estados, totalizando 902 km em linhas de transmissão e 750 MVA em capacidade de transformação nas subestações, conforme mostrado na Figura 3. Os investimentos obtidos foram estimados em R\$ 2,89 bilhões, um deságio próximo a 50% da RAP máxima. [15]

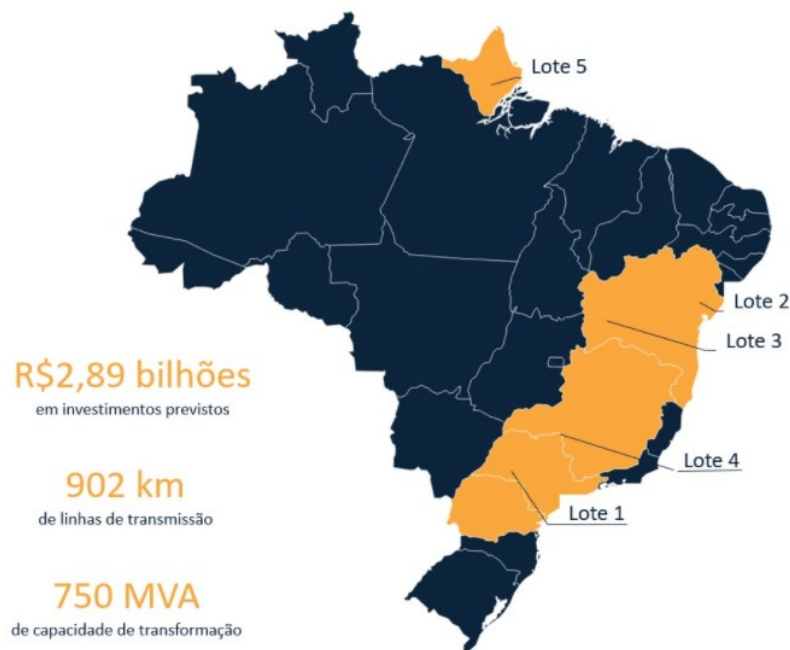


Figura 3 - Dados do Leilão de Transmissão nº 002/2021 realizado pela ANEEL [15]

2.2.1 Edital

O Edital do Leilão de Transmissão é um documento elaborado pela ANEEL com base no POTEE elaborado pelo MME que reúne dados regulatórios, financeiros, técnicos e jurídicos com um detalhamento dos empreendimentos que compõem o leilão [16]. Esse documento tem por objetivo estabelecer as diretrizes para contratação de serviço público de transmissão de energia elétrica, incluindo as etapas de construção, operação e manutenção de linhas de transmissão e subestações a serem incorporadas na Rede Básica do SIN. [16]

Normalmente, um edital é composto pelos seguintes itens:

- Informações preliminares da participação;
- Características e requisitos definidos por lote;
- Direitos e obrigações gerais;
- RAP máxima;
- Questões práticas do processo (documentação, inscrição, garantia, penalidade, assinatura do contrato, cronograma etc.);
- Modelos de referência;
- Referências de cálculos;
- Questões jurídicas. [14]

2.2.2 Relatórios Técnicos (“Rs”)

Os relatórios técnicos dos editais de transmissão, ou simplesmente “Rs”, são um conjunto de documentos disponibilizados pela ANEEL que subsidiam as empresas proponentes com informações técnicas mais detalhadas sobre os lotes listados em um determinado edital de leilão. Os relatórios técnicos são denominados R1, R2, R3, R4 e R5. Cada relatório técnico tem objetivos específicos e seu fluxo de elaboração é mostrado na Figura 4.

Análise de novos empreendimentos de transmissão

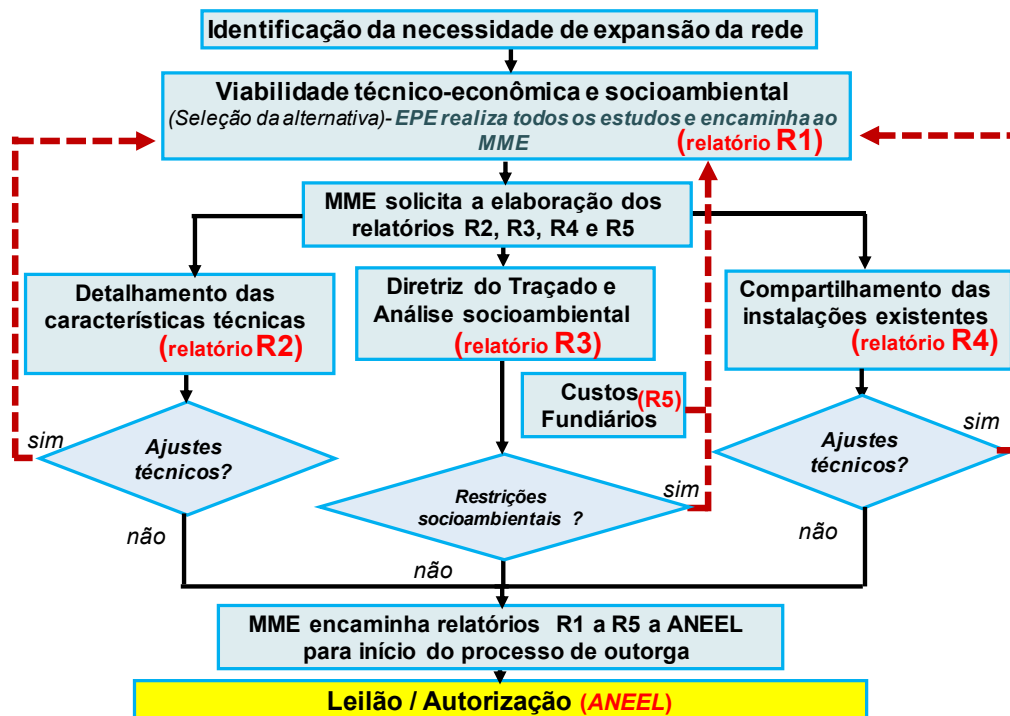


Figura 4 – Fluxo de elaboração dos Relatórios Técnicos [13]

O relatório R1 é elaborado pela EPE enquanto os relatórios R2, R3, R4 e R5 são elaborados por diferentes empresas e avaliados pela EPE, que faz apontamento de adequações, quando necessário. As empresas que elaboram os relatórios técnicos são ressarcidas pelos agentes vencedores do leilão. O relatório R5 é elaborado para casos específicos, quando é identificada a necessidade de detalhamento dos custos fundiários no relatório R1. [8] [13] [17]

Os objetivos e conteúdo dos relatórios técnicos são—:

- R1 - Relatório de Viabilidade Técnico-econômica e Socioambiental: tem por objetivo analisar a viabilidade de cada um dos empreendimentos considerando os aspectos técnicos, econômicos e socioambientais e demonstrar sua competitividade em relação a outros. Neste relatório são definidas as características preliminares dos empreendimentos com base em estudos de fluxo de potência, estudos de estabilidade de tensão em regime permanente, estudos de curto-circuito, análise dos aspectos socioambientais, análise econômica dentre outros [5];

-
- R2 - Relatório de Detalhamento Técnico da Alternativa de Referência: tem por objetivo detalhar a alternativa de referência com informações técnicas relevantes das características das novas instalações e adequações das existentes. Contém estudos como o de energização de transformadores, cálculo do desempenho do condutor, transitórios eletromagnéticos com base em simulações em *software*, avaliação de sobretensões e correntes de *inrush* etc. [5];
 - R3 - Relatório de Definição da Diretriz de Traçado e Análise Socioambiental para Linhas de Transmissão e Subestações: tem por objetivo fornecer informações de características socioambientais dos corredores de passagem das linhas de transmissão nos diversos lotes. Contém dados como o banco de dados geográficos, caderno de mapas, relatório fotográfico, análise para identificação da sensibilidade das áreas à implantação do empreendimento. Esse relatório define uma diretriz preferencial do empreendimento para ser avaliada com maior profundidade para favorecer a etapa de licenciamento ambiental [5];
 - R4 - Relatório de Caracterização do Sistema de Transmissão: tem por objetivo fornecer informações para auxiliar na implantação de subestações e instalação das linhas de transmissão. São informadas características gerais das subestações dos empreendimentos, como dados dos sistemas de controle e supervisão, de proteção, de registro de perturbações e de telecomunicação, e outras informações como como os pontos de entrada e saída das linhas nas subestações [5];
 - R5 - Relatório de Custos Fundiários: tem por objetivo fornecer informações relativas aos possíveis custos fundiários dos empreendimentos, de acordo com sua área de implantação (faixa de servidão da linha e área ocupada pelas subestações) e suas intercessões com as diversas possíveis *zonas de interferência*, como aglomerações urbanas, áreas de reserva e preservação etc. É detalhada a memória de cálculo dos custos, de acordo com a área, valor dos imóveis e loteamentos e outros dados disponibilizados por imobiliárias.

2.2.3 Banco de Preços de Referência ANEEL

O Banco de Preços de Referência da ANEEL é uma série de informações de custos e valores de diversos elementos que compõem o preço final de um projeto de linha de transmissão disponibilizados por meio de uma plataforma no site da ANEEL e por planilhas de apoio [18]. O Banco de Preços de Referência da ANEEL é utilizado pela EPE no desenvolvimento dos estudos de planejamento e na elaboração de relatórios PDE, PET e PELP [19]. Por meio da plataforma disponível no site da ANEEL [20] é possível configurar uma série de parâmetros de entrada para obtenção de planilhas de custos de referência para subestações ou linhas de transmissão. Já as planilhas de apoio que compõem o Banco de Preço de Referência da ANEEL são divididas em cinco arquivos com o seguinte detalhamento:

- Módulos de Linhas de Transmissão: contém um resumo de custos de linhas nas fases leilão, instalação e substituição para as diferentes regiões do Brasil para diversas configurações de tipos de estruturas, cabos, para-raios e nível de tensão;
- Módulo de Manobras: contém os custos de diversos módulos de manobra, como capacitor de derivação, capacitor série, compensador, reator de barra, reator de linha, reator de linha fixo, transformador, transformador de aterramento, entrada de linha e interligação de barras, listados por nível de tensão, arranjo e região do Brasil;
- Módulo Geral: possui preços de referência para diversos itens de infraestrutura geral, de manobra e do acessante por características e por região do Brasil;
- Linhas de Transmissão: contém preços de referência para terrenos e servidões, estruturas em aço, estruturas em concreto, cabos estruturais, estaiamento, fundações gelha, concretagem, hastes tirantes, cabo condutor, cabo para-raios convencional, cabo para-raios óptico, isolador, limpeza de faixa, escavação, dentre outros, por nível de tensão, atributos e região ou estado do Brasil;
- Módulo Equipamento: contém preços de referência de diversos equipamentos, como banco de capacitores série, compensador estático,

compensador síncrono, reator, transformador, para diversas configurações e por região do Brasil.

2.2.4 Projeto de Linhas de Transmissão

O projeto de uma linha de transmissão pode ser dividido em três etapas principais:

- Projeto elétrico;
- Projeto estrutural;
- Projeto final da linha. [4]

No projeto elétrico são definidas as características elétricas da linha, tais como número e tamanho dos condutores, geometria das torres, número de condutores de terra, que favorecerão que os critérios elétricos definidos pela ANEEL sejam atendidos [4]. O objetivo dessa etapa é definir a configuração elétrica que melhor favorecerá a transferência de carga com o menor custo de construção, operação e manutenção.

No projeto estrutural são definidos os tipos de condutor, agrupamentos, isolamento, estruturas, fundações, aterramento, dentre outros. Nessa etapa, normalmente são usadas informações de parâmetros estruturais previamente calculados para facilitar e elaboração da composição de elementos. [4]

No projeto final da linha é definida a rota, a alocação das torres e outros elementos com base em estudos, informações do terreno e modelos digitais [4]. Esta etapa serve de base para a execução do empreendimento.

Essas três etapas são abordadas, em especial, em dois importantes documentos que auxiliam as empresas executoras durante todo o processo de composição do *bid* e execução dos empreendimentos: o projeto básico e o projeto executivo.

2.2.4.1 Projeto Básico

O projeto básico de linhas de transmissão consiste em um documento com as características técnicas essenciais para definir um empreendimento com um nível de detalhamento inicial, mas, ao mesmo tempo, suficiente para que se tenha uma visão geral do projeto. Nele são definidos os conceitos e aspectos gerais do projeto, as características, materiais, equipamentos (torres, cabos condutores, equipamentos de proteção e auxiliares etc.), quantidades e custos indicados e estimados para a execução da obra, além de informações sobre possíveis impactos, riscos e alternativas. [21]

No Projeto Básico de LTAs devem ser observadas as diretrizes e critérios indicados pelo ONS no documento de Diretrizes para Elaboração de Projetos Básicos para Empreendimentos de Transmissão [21] e nos anexos dos leilões de transmissão da ANEEL [22]. Na ausência de referência sobre algum determinado tópico nesses documentos, devem ser adotadas as últimas revisões de normas do *International Electrotechnical Commission* (IEC), do *American National Standards Institute* (ANSI) ou do *National Electrical Safety Code* (NESC), nesta ordem de preferência. [21]

Dentre as diretrizes para os estudos elétricos, estão aqueles que devem ser realizados na frequência fundamental da LTA e os estudos de transitórios eletromagnéticos. Já as diretrizes para especificação da instalação de equipamentos tratam dos parâmetros elétricos gerais, tais como tensão nominal, sobretensão admissível, nível de isolamento, corrente nominal e barramento de subestações, e dos parâmetros específicos dos diversos tipos de equipamentos, como transformadores, reatores, bancos de capacitores, compensadores, para-raios, equipamentos de seccionamento e de medição. Por fim, as diretrizes para as linhas de transmissão definem aspectos como a determinação preliminar do traçado, levantamento de parâmetros meteorológicos, escolha do condutor, cálculos de capacidades operativas, avaliação de perdas, coordenação de isolamento, cálculo de parâmetros elétricos, cálculo da distância de segurança do condutor ao solo, cálculo de emissão eletromagnética, definição das fundações, dentre outros. [21] [22]

O projeto básico de LTAs também tem importante contribuição na definição do traçado preliminar da linha. Esse traçado tem por objetivo guiar a análise detalhada e decisões técnicas futuras que deverão ser observadas durante a elaboração do projeto executivo e execução da obra. Nele são definidas de forma preliminar as coordenadas do traçado da linha, posição das torres, ângulo de entrada e saída nas subestações, faixa de servidão etc., sempre observando os aspectos técnicos, econômicos e socioambientais, subsidiados pelos relatórios técnicos disponibilizados pela ANEEL, por dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), do Exército, de ferramentas computacionais e por outros estudos realizados pela própria empresa proponente ou por terceiras contratadas.

O projeto básico de linhas de transmissão normalmente contém como informações:

- Parâmetros elétricos da linha de transmissão;
- Capacidade de corrente do condutor e dos cabos para-raios;
- Distâncias de segurança;
- Perdas Joule nos cabos condutores;
- Desequilíbrios de tensão;
- Coordenação de isolamento das estruturas;
- Emissão eletromagnética;
- Parâmetros meteorológicos e estudo dos ventos aplicados ao projeto básico;
- Cargas mecânicas sobre os cabos condutores;
- Cargas mecânicas sobre as estruturas;
- Memória de cálculo do suporte predominante;
- Fadiga mecânica dos cabos condutores;
- Requisitos para cantoneiras das torres de transmissão;
- Fundações;
- Série de estruturas;
- Planta do traçado das linhas;
- Informações sobre cruzamentos com outras linhas de transmissão da Rede Básica;
- Informações sobre grandes travessias de rios;
- Projeto do seccionamento de linhas de transmissão da Rede Básica. [22]

Como citado anteriormente, este trabalho visa auxiliar no projeto básico fornecendo uma solução viável de série de estruturas com suas posições e tipos, a partir de um traçado da linha previamente definido.

Já no que se refere ao levantamento de custos do empreendimento, no projeto básico é importante listar os custos chamados diretos e indiretos, de diversos aspectos, como os de engenharia, administrativos, fiscais, jurídicos, regulatórios e ambientais. Um diagrama mostrando a composição do custo total de um empreendimento de implantação de LTA é mostrado na Figura 5. Para a estimativa preliminar do custo do empreendimento

presente no projeto básico, o Banco de Preços de Referência divulgado e atualizado recorrentemente pela ANEEL [23] é a referência mais indicada e utilizada pelas empresas.

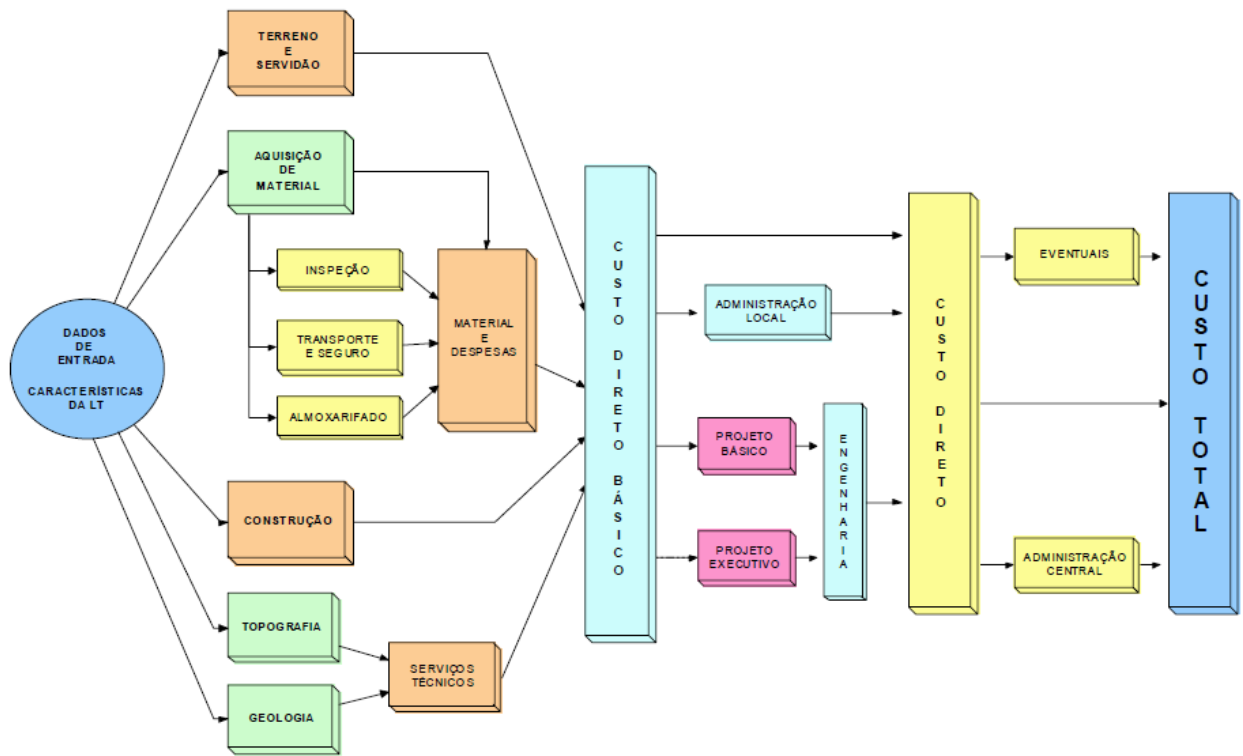


Figura 5 – Composição do custo total associado a empreendimentos de transmissão [24]

Assim, a definição do traçado e posição das torres ao longo de uma LTA tem interferência direta e indireta nos custos totais. Dentre os pontos relacionados aos custos do traçado e definição das torres estão o custo da estrutura, dos materiais, das fundações, da montagem e instalação, da manutenção, dos equipamentos, da mão-de-obra, do transporte, das obras civis, da faixa de servidão e das zonas de interferência.

2.2.4.2 Projeto Executivo

O projeto executivo consiste no documento que contempla todo detalhamento técnico necessário para a execução da obra. Ele contém as especificações, plotações, desenhos, instruções de instalação e montagem etc.

A elaboração do projeto executivo se inicia a partir dos estudos detalhados, levantamento topográfico e desenhos da planta por meio de ferramentas de projeto de linhas de transmissão (a mais usada é o PLS-CADD). [5]

Na plotação da linha de transmissão são analisados aspectos como a flecha máxima e mínima do cabo condutor, o estado de tração normal que o cabo experimenta

durante maior parte da sua vida útil, fluência do cabo (alongamento permanente devido à tração normal), atuação dos ventos de máxima intensidade, dentre outras. Uma vez definida a condição de flecha máxima, é realizada a plotação das torres. Normalmente, opta-se por iniciar a plotação com as torres de menor altura possível, respeitando-se a distância mínima entre o condutor e o solo, e a estrutura de menor custo, de acordo com as características do traçado. [5]

A definição das torres também é feita considerando-se o cálculo da capacidade de carga à tração, que se relaciona ao vão de vento (ou médio) e ao vão de peso (ou gravante).

O projeto de travessias sobre outras LTAs, cursos d'água, rodovias, ferrovias, edificações etc. também é considerado dentro do projeto executivo. Nessa etapa são definidas as implicações técnicas das travessias, como alteração da distância mínima do condutor ao solo, ângulo de cruzamento, desvios, dentre outras.

Outros elementos importantes dentro do projeto executivo são a lista de construção, a tabela de flechas e a tabela *off-set*. A lista de construção contempla a lista de torres (com quantidade, altura e tipo de estrutura), fundações, tipos e comprimento dos cabos, comprimento dos vãos, arranjo das cadeias, lista de materiais e equipamentos. A tabela de flechas reúne os resultados dos cálculos das flechas e tensões mecânicas para cada tipo de cabo e torre. Já a tabela de *off-set* auxilia no processo de grampeamento dos cabos quando o traçado passa por regiões de grandes aclives e declives e se faz necessário acumular o cabo nos pontos mais baixos. [5]

2.3 Elementos de Linhas de Transmissão Aéreas

2.3.1 Torres

A transmissão da energia elétrica em linhas de transmissão aéreas é realizada por meio dos cabos condutores, que são sustentados por estruturas físicas modulares apoiadas no solo, denominadas torres de transmissão. Mais do que apenas sustentar os cabos condutores, as torres de transmissão de energia têm papel fundamental na garantia do fornecimento de energia, uma vez que realizam a interconexão entre diversas regiões e contribuem para uma gestão eficiente do sistema elétrico [25]. Além disso, as torres se

localizam em regiões às vezes inóspitas e de difícil acesso e devem ser capazes de suportar as mais diversas intempéries às quais são submetidas.

As seções seguintes descrevem aspectos importantes das torres a serem considerados no projeto de linhas de transmissão.

2.3.1.1 Tipos

Por serem construídas de forma modular, existem alguns tipos de torres de transmissão de energia com diferentes características e que são mais adequados para situações específicas. As estruturas podem ser classificadas de acordo com a forma de resistência aos esforços mecânicos, com a sua função na linha de transmissão e com o material utilizado, da seguinte forma:

1. Classificação de acordo com a forma de resistência aos esforços mecânicos:
 - a. Estruturas estaiadas: são aquelas que são sustentadas mecanicamente por um mastro central, mas cuja estabilidade é garantida por cabos (estais) sujeitos a tensão de tração. Necessitam de uma área maior para que os cabos possam ser devidamente ancorados. Alguns dos formatos de estruturas estaiadas são: Cara de Gato, Corss-Rope, Danúbio e Monomastro Vertical [26] [27]. Um exemplo de torre de estrutura estaiada é mostrado na Figura 6.

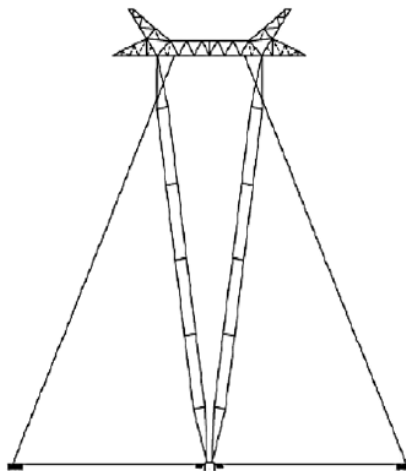


Figura 6 - Torre com estrutura estaiada [27]

- b. Estruturas autoportantes: são aquelas estruturas sustentadas por quatro pontos de apoio no solo, em que a transferência dos esforços mecânicos é realizada diretamente por meio desses pontos. Esse tipo de estrutura pode ser instalado em áreas menores, sendo o mais indicado para áreas urbanas com restrições de espaço. Alguns dos formatos de estruturas autoportantes são: Tronco Piramidal, Raquete, Delta, Cara de Gato e Danúbio [26] [27]. Um exemplo de torre de estrutura autoportante é mostrado na Figura 7.

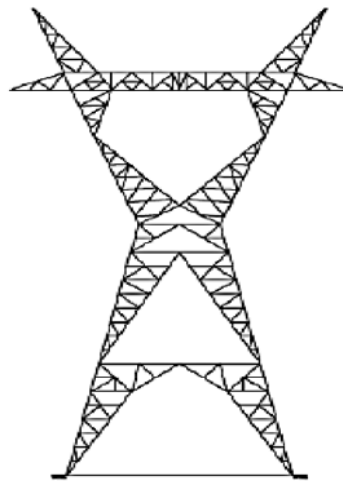


Figura 7 - Torre com estrutura autoportante [27]

2. Classificação de acordo com a função na linha de transmissão:
- Suspensão: é o tipo de estrutura cuja função principal é sustentar a estrutura de cabo condutor, sendo o principal esforço mecânico o do peso do cabo. Pode ser do tipo leve, pesada e de transposição de fases, necessária em linhas com mais de 100 km de extensão.
 - Ancoragem: é o tipo de estrutura utilizado para sustentar um maior peso dos cabos devido às diferenças de altitude entre estruturas subsequentes. Pode ser do tipo de meio de linha e de fim de linha, sendo a última empregada próxima às subestações.

-
- c. Para ângulo: é o tipo de estrutura utilizada para mudança de ângulo no traçado da linha de transmissão, sofrendo esforços horizontais em diferentes direções.
 - d. Para derivação: é o tipo de estrutura utilizado para derivação (bifurcação) da linha, também desenvolvido para suportar trações em mais de uma direção. [26]
3. Classificação de acordo com o material
- a. Metal: material mais utilizado em linhas de média e alta tensão por ser de fácil transporte e montagem e ter elevada resistência aos efeitos meteorológicos [26]. O metal mais comumente usado é o aço.
 - b. Concreto: material mais utilizado em linhas de baixa tensão por ser de fácil instalação e ter elevada resistência a intempéries. [26]
 - c. Madeira: normalmente utilizadas para linhas de baixa e média tensão e pouco utilizadas atualmente para linhas de alta tensão devido à sua menor vida útil, por ser muito susceptível a ações biológicas e do tempo. [26]

2.3.1.2 Fundação

A partir da definição da plotação e tipos de torres, são feitas as definições das intervenções nas bases das estruturas que auxiliam na instalação, manutenção e segurança das torres, as chamadas fundações.

Para o dimensionamento das fundações, devem ser analisadas as propriedades e os parâmetros dos solos e rochas típicos dos pontos de alocação das torres. Forças de tração, compressão e cisalhamento atuam na parte superior das fundações devido ao peso e forças normais que atuam nas torres, mas também devido às situações de máximo carregamento e ação de forças naturais (como ventos, chuvas e outros eventos meteorológicos). Essas forças também devem ser consideradas nos estudos e documentos de definições das fundações (projeto básico e executivo), os quais devem conter as fundações típicas recomendadas, de acordo com os possíveis tipos de estruturas, e detalhamento por desenho ou croquis. [21]

2.3.1.3 Esforços mecânicos

Os esforços mecânicos que atuam nas estruturas de suporte de LTAs podem ser de três tipos:

1. Cargas de vento: são aquelas decorrentes da ação do vento e que atuam sobre a estrutura e sobre outros elementos (como cabos e cadeia de isoladores) e que indiretamente resultam em forças aplicadas na estrutura;
2. Cargas permanentes: são aquelas que praticamente não variam durante a vida útil da LTA, como por exemplo o peso dos cabos, de ferragens e de outros equipamentos, e esforços transversais não decorrentes da ação do vento, como cabos em estruturas de ângulo ou ancoragem;
3. Cargas especiais: são aquelas decorrentes de eventos de curta duração, como a construção e manutenção da linha ou efeito cascata (queda sucessiva de estruturas) decorrente de algum acidente. [28]

2.3.1.4 Vãos

Um vão é a distância horizontal entre duas torres subsequentes – que é diferente do comprimento do cabo condutor entre as duas torres. Existem ainda outros conceitos de vãos em uma linha de transmissão referentes a uma torre:

- Vão médio ou vão de vento: é a distância dada pela média aritmética dos vãos adjacentes à torre (a soma de metade de cada uma das distâncias entre a torre em questão as torres adjacentes, a montante e a jusante, na linha), a chamada semi-soma dos vãos adjacentes à torre [28] [29], como mostrado na Figura 8;

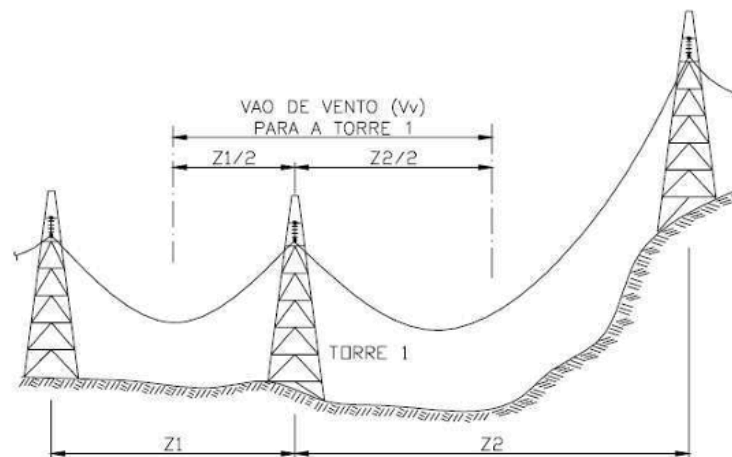


Figura 8 - Vão médio ou vão de vento [30]

- Vão gravante ou vão de peso: é um vão fictício que é definido como a distância entre os pontos com tangente horizontal das catenárias dos vãos adjacentes ao da torre em questão [28] [29], como mostrado na Figura 9.

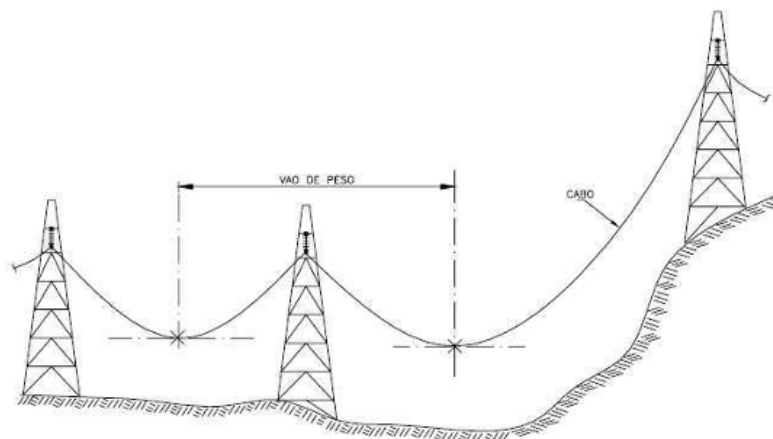


Figura 9 - Vão gravante ou vão de peso [30]

2.3.2 Cabos Condutores

Os cabos condutores das linhas de transmissão são os conjuntos de fios metálicos encordados que conectam uma subestação de energia elétrica a outra e são os elementos ativos das linhas, responsáveis pelo transporte de energia de uma região produtora de energia a outra, normalmente com maior concentração de consumidores. [5]

2.3.2.1 Características

As características principais que definem os cabos condutores são: material, bitola, área da seção transversal, peso por unidade de comprimento, diâmetro, carga de ruptura, resistência elétrica, reatância, ampacidade, dentre outras [5]. Atualmente, existem diversos tipos de cabos condutores padronizados, com suas características definidas e especificadas pelos fabricantes. Assim, a definição do tipo de cabo já implica na determinação dessas diversas características.

O material mais utilizado atualmente na constituição dos cabos condutores é o alumínio, em forma de liga ou em conjunto com aço. Esse material – e suas ligas – apresenta uma série de características que o torna o mais indicado para o contexto de LTAs, em especial no Brasil: menor custo em relação a outros metais condutores, principalmente em relação ao cobre; boa condutividade elétrica; boa resistência mecânica. [5]

A escolha do condutor a ser empregado em um projeto de LTA tem por objetivo atender a todas as necessidades técnicas do projeto, como a capacidade de carga a ser transmitida, considerando-se as limitações mecânicas do empreendimento, em um menor custo possível.

Em relação às demandas técnicas, são considerados na escolha do condutor: capacidade de carga que se quer transmitir, nível de tensão, resistência elétrica, reatância, ampacidade, número de condutores, número de cabos alma, diâmetro, bitola, peso, características mecânicas e fatores externos que podem interferir em seu desempenho, como temperatura ambiente, velocidade do vento, pressão atmosférica, emissividade e absorção solar. Um exemplo de tabela de características de cabos condutores de um fornecedor é mostrado na Figura 10.

Shaped Wire Concentric-Lay Compact Aluminum Conductors Steel Supported (ACSS/TW)																						
Area Equal to Standard ACSR Sizes																						
Code Word	Size (kcmil)	Type No.	Cross Sectional Area (in ²)		Stranding			Diameter (in)		Weight (lbs/1000 ft)			Rated Breaking Strength (lbs)			Resistance (ohms/mile)		Ampacity (amps)				
			Aluminum	Total	No of Layers of Aluminum	No. of Aluminum Wires	No. & Diameter Individual Steel Wire	Steel Core	Complete Cable	Alum.	Steel	Total	Standard Strength	High Strength	HS-285	DC @ 20°C	AC @ 75°C	@ 75°C	@ 100°C	@ 150°C	@ 200°C	@ 250°C
Partridge/ACSS/TW	266.8	16	0.2094	0.2435	2	14	7 x 0.0788	0.2364	0.595	250.5	115.6	366.1	8,880	9,730	11,400	0.3262	0.4009	454	553	692	795	880
Linnet/ACSS/TW	336.4	16	0.2641	0.3070	2	16	7 x 0.0885	0.2655	0.667	316.1	145.8	461.9	11,200	12,300	14,400	0.2588	0.3181	523	638	801	921	1021
Oriole/ACSS/TW	336.4	23	0.2642	0.3258	2	16	7 x 0.1059	0.3177	0.692	318.2	209.2	527.4	14,800	16,300	19,100	0.2565	0.3151	533	650	816	940	1043
Flicker/ACSS/TW	477.0	13	0.3747	0.4233	2	18	7 x 0.0940	0.2820	0.776	447.8	164.5	612.3	13,000	14,200	16,400	0.1831	0.2255	648	793	998	1151	1279
Hawk/ACSS/TW	477.0	16	0.3746	0.4356	2	18	7 x 0.1054	0.3162	0.790	448.7	206.4	655.1	15,600	17,100	19,800	0.1825	0.2247	652	799	1005	1159	1289
Hen/ACSS/TW	477.0	23	0.3747	0.4621	2	20	7 x 0.1261	0.3783	0.820	451.1	296.6	747.8	21,000	22,700	26,700	0.1809	0.2225	663	813	1024	1181	1315
Parakeet/ACSS/TW	556.5	13	0.4371	0.4937	2	18	7 x 0.1015	0.3045	0.835	522.4	191.8	714.2	15,200	16,600	19,100	0.1569	0.1935	713	874	1102	1271	1415
Dove/ACSS/TW	556.5	16	0.4371	0.5083	2	20	7 x 0.1138	0.3414	0.850	523.4	241.1	764.5	18,200	19,900	23,100	0.1564	0.1928	719	881	1111	1282	1427
Rook/ACSS/TW	636.0	13	0.4995	0.5643	2	20	7 x 0.1085	0.3255	0.893	597.0	219.2	816.2	17,300	19,000	21,900	0.1373	0.1696	775	951	1200	1386	1544
Grosbeak/ACSS/TW	636.0	16	0.4995	0.5808	2	20	7 x 0.1216	0.3648	0.909	601.5	275.8	877.3	20,700	22,400	26,000	0.1369	0.1689	781	958	1210	1398	1557
Scoter/ACSS/TW	636.0	23	0.4995	0.6160	2	22	7 x 0.1456	0.4368	0.942	600.5	394.7	995.2	27,400	29,700	35,000	0.1356	0.1672	795	976	1234	1427	1591
Tern/ACSS/TW	795.0	7	0.6244	0.6675	2	17	7 x 0.0886	0.2658	0.960	745.2	146.1	891.3	14,200	15,200	17,400	0.1105	0.1373	878	1080	1366	1580	1762
Puffin/ACSS/TW	795.0	11	0.6244	0.6919	2	18	7 x 0.1056	0.3168	0.980	745.9	228.5	974.4	17,700	19,200	22,000	0.1101	0.1365	886	1090	1378	1595	1778
Condor/ACSS/TW	795.0	13	0.6244	0.7053	2	20	7 x 0.1213	0.3639	0.993	746.3	273.9	1020.0	21,700	23,300	26,900	0.1098	0.1361	890	1095	1386	1604	1789
Drake/ACSS/TW	795.0	16	0.6244	0.7261	2	20	7 x 0.1360	0.4080	1.010	747.0	344.3	1091.3	25,900	28,000	32,600	0.1095	0.1355	896	1103	1396	1616	1803
Canary/ACSS/TW	900.0	13	0.7089	0.7983	2	20	7 x 0.1291	0.3873	1.055	844.8	310.9	1155.7	24,600	26,400	30,500	0.0970	0.1205	962	1185	1501	1739	1942
Phoenix/ACSS/TW	954.0	5	0.7493	0.7876	3	30	7 x 0.0837	0.2511	1.044	897.7	130.4	1028.0	14,200	15,200	17,100	0.0927	0.1187	967	1189	1503	1740	1940
Rail/ACSS/TW	954.0	7	0.7493	0.8011	3	32	7 x 0.0971	0.2913	1.061	896.6	175.5	1074.1	16,700	18,000	20,400	0.0926	0.1183	972	1196	1512	1750	1953
Cardinal/ACSS/TW	954.0	13	0.7493	0.8464	2	20	7 x 0.1329	0.3987	1.080	895.5	328.8	1224.3	26,000	28,000	32,300	0.0915	0.1138	997	1229	1558	1806	2016
Snowbird/ACSS/TW	1033.5	5	0.8117	0.8534	3	30	7 x 0.0871	0.2613	1.089	972.5	141.2	1114.0	15,400	16,400	18,500	0.0856	0.1098	1016	1251	1584	1834	2048
Ortolan/ACSS/TW	1033.5	7	0.8117	0.8678	3	32	7 x 0.1010	0.3030	1.102	972.5	189.9	1162.0	18,100	19,500	22,000	0.0854	0.1095	1021	1257	1592	1843	2058
Curlew/ACSS/TW	1033.5	13	0.8117	0.9169	2	22	7 x 0.1383	0.4149	1.132	970.1	356.1	1326.2	28,200	30,300	35,000	0.0845	0.1053	1048	1293	1641	1903	2126
Avocet/ACSS/TW	1113.0	5	0.8742	0.9191	3	30	7 x 0.0904	0.2712	1.129	1047.0	152.1	1199.0	16,300	17,500	19,500	0.0794	0.1022	1063	1310	1661	1925	2150

Figura 10 - Características de diversos tipos de cabos de um fornecedor [31]

Já os custos dos cabos condutores são normalmente definidos em função de seus pesos e são expressos por quilograma ou tonelada. O preço dos cabos depende da cotação dos metais que o compõem na Bolsa de Londres (LME, do inglês, *London Metal Exchange*), da variação cambial e do custo de industrialização [5]. O Banco de Preços de Referência da ANEEL também auxilia na determinação dos custos dos cabos condutores do tipo CCA (cabo de alumínio com alma de aço). Nele, os preços de referência dos cabos são listados por região do Brasil e de acordo com três parâmetros: número de cabos por fase; bitola, dada em AWG/MCM (*American Wire Gauge* e 1000 circular mils) e mm²; código.

Além de influenciar nos custos e na vida útil da linha, a escolha dos cabos condutores é determinante também para a definição das características das torres a serem utilizadas, uma vez que parâmetros como esforços mecânicos, tipo de isoladores, tipo de estrutura e de fundação são influenciados pelas características dos cabos. [5]

2.3.2.2 Distância do condutor ao solo

Os cabos condutores devem ser dispostos de forma a respeitar, nas situações de máxima expansão, uma distância mínima até o solo ou obstáculos para garantir a segurança de pessoas e animais na região da LTA. O cálculo dessa distância mínima em condições

normais e emergenciais de operação para linhas com tensão máxima operativa menor ou igual a 242 kV deve ser feito conforme a NBR 5422. [21] [28]. Acima desse valor de tensão, devem ser seguidas as determinações contidas no NESC. Também devem ser consideradas as recomendações do Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes (DNIT) nos casos de trechos de LTAs com travessias sobre rodovias. Já no caso de travessias sobre rios navegáveis, devem ainda ser consideradas recomendações da Capitania dos Portos do estado do empreendimento. [21]

2.3.3 Outros elementos

2.3.3.1 Aterramento

O sistema de aterramento das linhas de transmissão é essencial para assegurar o desempenho e segurança do circuito, evitando ou reduzindo os impactos causados por descargas atmosféricas, rompimento dos cabos condutores, ruptura de isoladores e indução de corrente de outras LTAs próximas. Esse sistema consiste em fios condutores que transportam o excesso de cargas elétricas proveniente das perturbações causadas na linha/torre para um ponto de referencial em terra.

Normalmente, o sistema de aterramento é composto por cabos contrapesos e impedâncias instaladas nas bases e estais das torres, dependendo do tipo de estrutura. O cabo contrapeso consiste em fio, cabo de aço ou fita metálica enterrado ao longo da faixa de servidão em uma profundidade entre 50 e 90 cm, normalmente. O projeto do sistema de aterramento é feito por especialistas com base em parâmetros da linha, das torres e do solo, como a resistência de aterramento requerida e a resistividade do solo, e em critérios de segurança para pessoas e animais na faixa de servidão. No projeto são definidos o tipo do sistema, arranjo, comprimento dos cabos contrapesos etc. [5]

2.3.3.2 Isoladores

Os isoladores são os equipamentos que permitem isolar eletricamente os cabos condutores da estrutura das torres. O desempenho das LTAs também está relacionado com o comportamento e qualidade da sua cadeia de isoladores.

O tipo e número de isoladores por cadeia é determinado com base em parâmetros elétricos da linha e mecânicos do cabo e da torre. Dentre os fatores elétricos, a tensão da linha é determinante, uma vez que o isolamento deve suportar valores maiores

que a tensão normal de operação. Dentre os fatores mecânicos, devem ser consideradas as componentes verticais e horizontais das forças exercidas sobre a cadeia de isoladores em decorrência do peso dos cabos condutores e ações externas que influenciem nessas forças.

[5]

Já no que se refere ao material que pode constituir os isoladores, utiliza-se sempre materiais dielétricos que garantam o isolamento dos condutores. O vidro é o material mais utilizado para linhas de alta tensão, por ser de baixo custo de manutenção e ser empregado há muitos anos. Porém, outros materiais como cerâmica, porcelana vitrificada, vidro temperado, fibra de vidro revestida de borracha ou silicone também são usados. [5]

2.3.3.3 Para-raios

Os cabos para-raios são os cabos conectados eletricamente às torres que têm por objetivo proteger todo o circuito de descargas atmosféricas, conduzindo a carga por elas injetada na linha para o solo e evitando que interrupções no fornecimento de energia aconteçam e que danos maiores sejam causados à LTA. [32]

Os cabos para-raios são geralmente constituídos de aço e são fixados às torres por meio de ferragens de fixação condutoras conduzindo a corrente elétrica para o sistema de aterramento. Recentemente, algumas concessionárias têm adotado a estratégia de utilizar cabos do tipo *Optical Ground Wires* (OPGW), cabos de fibra ótica que, além de desempenhar a função dos cabos para-raios, também transmite dados digitais, possibilitando o envio e recebimento de sinais de telecontrole e telecomunicação utilizando a mesma infraestrutura da transmissão de energia. [33] [5]

3 Alocação de Torres em LTAs

O processo de alocação de torres é a etapa do projeto de empreendimentos de construção de LTAs em que se define quais as localizações geográficas (coordenadas), as alturas e os tipos de estruturas de torres de transmissão ao longo de um traçado previamente definido. Os principais fatores técnicos e econômicos considerados na alocação das torres de transmissão são licenciamento, capacidade da estrutura e elevação do condutor [34]

Historicamente, a alocação de torres é feita por meio de estudos técnicos baseados nos diversos documentos e levantamentos de dados em campo e é realizada de forma preliminar nos projetos básicos dos empreendimentos de linhas de transmissão e de forma mais detalhada nos projetos executivos.

Com o avanço da capacidade de processamento e com a melhoria do processo levantamento de dados geoespaciais, facilitado por tecnologias como o *Global Positioning System* (GPS), algoritmos computacionais têm se mostrado ferramentas que podem auxiliar na etapa de alocação de torres. Esses algoritmos, em geral, consideram dados da região onde se estabelecerá o empreendimento da LTA e características elétricas e mecânicas dos elementos que compõem a linha.

3.1 Algoritmos de Alocação de Torres em LTAs

Existe relativamente poucos estudos relacionados a técnicas de otimização aplicadas à alocação de torres em LTAs. Em [35] é apresentado um algoritmo baseado em Programação Dinâmica (PD), em que são considerados dois tipos diferentes de torres (âncora e de suspensão) e variadas alturas. Os resultados alcançados foram restritos, devido às limitações computacionais em que os testes foram executados. Em [36] é descrito outro algoritmo de PD em que é escolhida a altura e os locais das torres de suspensão de uma LT com o objetivo de minimizar o custo total. As restrições consideradas no algoritmo foram o espaçamento máximo entre as torres, elevação e licenciamento. Os autores testaram o algoritmo em um trecho de 35 km de uma linha de 400 kV e obtiveram uma redução de custos da ordem de 7%. Em [37] foi desenvolvido um método de PD que considera a escolha de tipos, alturas e localizações das torres ao longo de todo o traçado da LTA, com o objetivo de encontrar a solução ótima do problema – uma vez que, segundo o autor, os trabalhos anteriores continham imprecisões que não garantiam o mínimo absoluto. Já em [38] também foi apresentado um modelo de otimização de alocação de torres baseado em Programação Dinâmica, porém aplicado a um caso real, da LTA de 525 kV ligando Machadinho (RS) a Campos Novos (SC), e que buscou encontrar o custo mínimo de implantação das torres considerando recursividade, diferentes tipos e alturas de torres, características da topografia e critérios elétricos. Em [39] foi apresentada uma reformulação do algoritmo proposto em [40], em que as restrições do PD implementado passaram a considerar três torres subsequentes.

Em [41], embora o trabalho não seja focado na alocação das torres, foi desenvolvido um algoritmo para alocação ótima de dispositivos para-raios em torres existentes em linhas de transmissão utilizando técnicas de Algoritmos Genéticos (AG) integradas a simulações no software ATP. Já em [42] é desenvolvido um método de busca em grafos com nós parcialmente ordenados. São consideradas restrições eletromecânicas e topográficas para definição dos custos dos nós e arcos, e determinação da alocação ótima das torres.

A contribuição almejada pelo presente trabalho está em propor uma solução para alocação de torres em linhas de transmissão diferente das anteriormente implementadas, empregando-se técnicas de Algoritmos Genéticos (associada à Heurística Gulosa), que exigem menor esforço computacional e de memória e que possibilitem resultados em tempo hábil para o detalhamento realizado nas etapas posteriores dos estudos para composição do *bid* nos leilões de transmissão.

3.2 Algoritmos computacionais

3.2.1 Heurística Gulosa

A Heurística Gulosa (HG) é uma das formas mais simples de se resolver um problema de otimização. Esse método se baseia em dividir um problema em partes menores e obter o ótimo local em cada subproblema e utilizar a solução encontrada em cada estágio como entrada para o estágio seguinte até se determinar a solução final do problema.

Algoritmos gulosos são determinísticos, isto é, dado um problema com um conjunto de dados de entrada, o algoritmo sempre resultará na mesma solução independente de quantas vezes for executado. [43]

A principal desvantagem de um algoritmo baseado em heurística gulosa é que não há garantia de que a solução final encontrada seja equivalente ao ótimo global, uma vez que soluções ótimas encontradas em estágios anteriores podem conduzir a estágios posteriores com soluções piores. Entretanto, devido a sua fácil implementação e baixo custo computacional, esse método pode ser usado para se obter uma aproximação do valor ótimo em um curto tempo. [43]

3.2.2 Algoritmos Genéticos

Um Algoritmo Genético (AG) é um tipo particular de algoritmo evolutivo definido por John Henry Holland que busca encontrar soluções aproximadas em problemas de otimização por meio de técnicas baseadas em conceitos de biologia evolutiva. [44]

Em um algoritmo genético genérico, primeiro é gerado um conjunto de *indivíduos*, soluções possíveis para o problema de otimização em questão, denominado *população inicial*. Essa população pode ser gerada de forma aleatória ou direcionada e é avaliada por uma função de mérito denominada *fitness*. A partir dessa população, inicia-se um processo que se repete até que se alcance um critério de parada definido (tempo, número de execuções, valor mínimo ou máximo da *fitness* etc.). Esse processo consiste em uma sequência de operações que alteram a população da iteração anterior e reavaliam os novos indivíduos gerados favorecendo a permanência na nova população daqueles indivíduos que apresentam melhores resultados em relação à *fitness*. O melhor indivíduo da população final é considerado a solução do problema.

Existem diversos tipos de operações possíveis de serem realizadas em um AG. A *seleção* se encarrega de selecionar, de acordo com a *fitness*, alguns indivíduos da população para serem submetidos aos operadores seguintes [45]. A *reprodução* gera novos indivíduos utilizando as operações de *cruzamento* e *mutação*. No cruzamento é realizada uma combinação de características de dois ou mais indivíduos, enquanto na mutação é realizada alteração aleatória de alguma característica de um ou mais indivíduos. Por fim, no *elitismo*, uma nova população formada é avaliada de forma que, se um indivíduo da população da geração anterior é melhor que algum indivíduo da geração seguinte, ele é recuperado e inserido na nova população [45].

Diversas combinações e variações de operadores podem ser aplicadas gerando-se diferentes algoritmos genéticos. A Figura 11 mostra um exemplo do fluxograma de operadores de um algoritmo genético genérico.

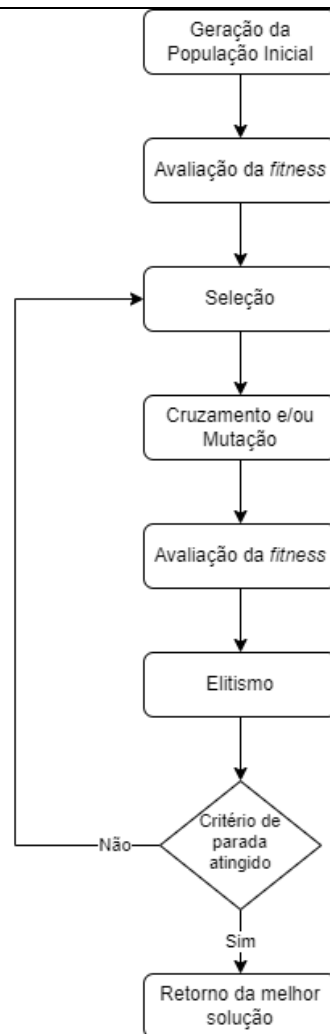


Figura 11 - Fluxograma de operadores de um algoritmo genético genérico (adaptado de [46])

4 Definição do Problema

4.1 Definição macro

O problema consiste em se determinar a localização (coordenadas geográficas) de pontos ao longo do traçado discretizado de uma determinada linha de transmissão em que devem ser alocadas as torres de transmissão de forma a garantir o cumprimento dos critérios técnicos com o menor custo possível após um determinado número de iterações do algoritmo.

4.1.1 Entradas

Os dados de entrada necessários para a execução do algoritmo consistem em informações do terreno relativo ao traçado previamente definido, informações de características elétricas e de custos associados às torres de transmissão, e parâmetros do algoritmo genético.

De forma a facilitar o desenvolvimento do trabalho e, ao mesmo tempo, aplicar a técnica proposta a uma situação real do contexto da concessionária, foram gerados dados de entrada para três cenários diferentes, da seguinte forma:

1. Cenário 1: terrenos gerados aleatoriamente (terrenos fictícios); valores de características elétricas e de custos fictícios definidos manualmente; e parâmetros do algoritmo ajustados a cada novo teste. Esse cenário permitiu a comparação de diferentes subcenários, reparametrização do algoritmo genético e análise dos resultados;
2. Cenário 2: um terreno gerado aleatoriamente (terreno fictício mantido fixo); valores de características elétricas e de custos fictícios definidos manualmente; e parâmetros do algoritmo mantidos fixos. Esse cenário permitiu comparar os resultados do algoritmo em diferentes execuções mantendo-se os dados de entrada fixos, para se avaliar o comportamento aleatório do algoritmo;
3. Cenário 3: exemplo real de terreno (número de pontos, alturas), provenientes de um traçado real proposto em [3]; valores de características elétricas e de custos fictícios definidos manualmente; e

parâmetros do algoritmo mantidos fixos. Esse cenário permitiu avaliar o algoritmo para um cenário mais próximo do real.

Para todos os casos, foi considerado que os traçados apresentados eram lineares, isto é, as análises foram feitas considerando-se apenas uma coordenada para representar o traçado (x) e outra para representar a cota do terreno e altura das torres (y).

Para o cenário em que foi utilizado um exemplo real de terreno, a determinação do traçado realizada em [3] considerou zonas de interferência dos tipos aeródromos, sítios arqueológicos, áreas de inundação, cavernas e grutas, áreas de conservação ambiental, áreas importantes para preservação de aves (IBAs, do inglês, *Important Bird Areas*), assentamentos do Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (INCRA), áreas indígenas, áreas de malária, áreas quilombolas e rodovias. Além disso foram considerados os pontos iniciais e finais, ângulo de saída e chegada da linha nas subestações e a área do corredor disponibilizada pelo edital do leilão da linha [47]. A Figura 12 mostra os dois traçados resultantes do trabalho apresentado em [3]. O traçado considerado no cenário 3 é o determinado com relevo, mostrado em laranja e no gráfico *Altitude Profile (with relief)*, na Figura 12. Neste traçado, as variações de relevo foram consideradas para determinação do traçado ótimo do algoritmo, enquanto no traçado em verde (*without relief*) apenas as zonas de interferência foram consideradas, resultando em um traçado diferente.

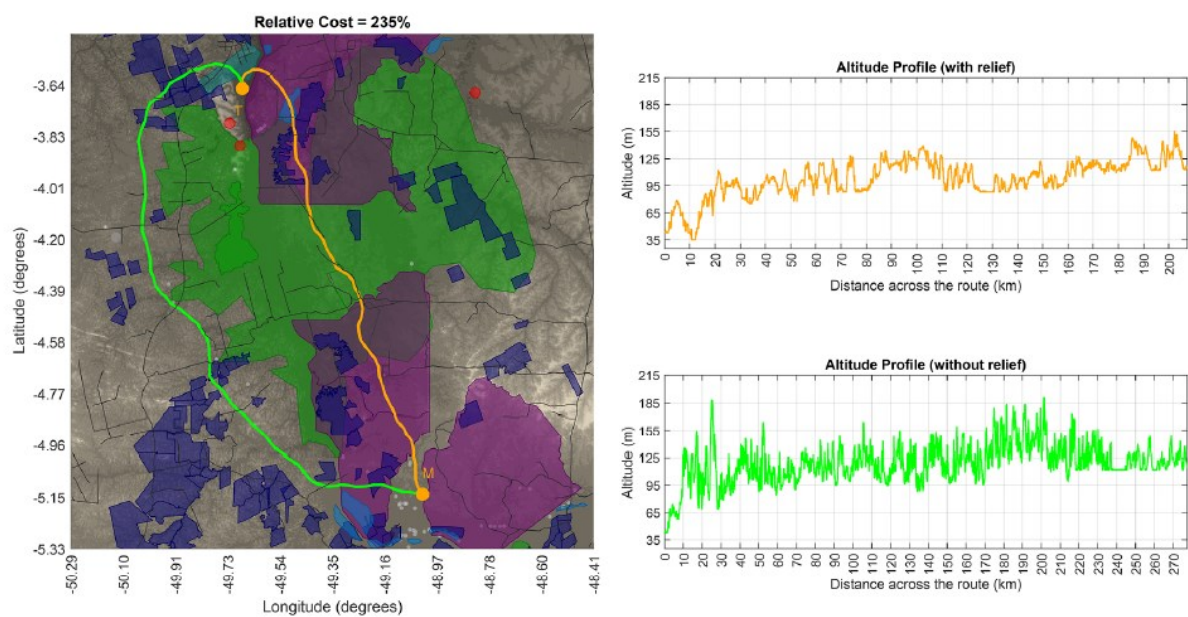


Figura 12 - Traçado real resultante do trabalho apresentado em [3]

Cada ponto do terreno dos cenários representa uma subdivisão do traçado total no eixo horizontal (discretização do traçado real em um número reduzido de pontos, a fim de facilitar a manipulação dos dados). A distância entre cada um dos pontos representa uma fração do comprimento total do traçado. Para cada um dos pontos são definidas as seguintes características:

- Cota altimétrica: altura do ponto em relação ao eixo horizontal;
- Declividade: variação da cota altimétrica do ponto em relação ao ponto anterior;
- Tipo de solo: dentre dois possíveis tipos de solo, um de boa qualidade que não exige fundações especiais e outro de baixa resistência que exige fundações especiais como estacas e sapatas especiais [38];
- Altura de segurança: altura mínima entre o cabo condutor e o solo, determinada segundo a NBR 5422 [28] de acordo com o uso do solo (8,5 m para água, floresta e pastagem; 9 m para agricultura e 10,5 m para ruas e avenidas).

Já cada tipo de torre possui os seguintes atributos:

- Deflexão máxima: valor máximo do ângulo de deflexão com as torres adjacentes;
- Vão médio máximo (VMM): valor máximo da média aritmética da distância dos vãos adjacentes à torre;
- Vão gravante mínimo (VGmin): valor mínimo da distância entre os pontos com tangente horizontal das catenárias dos vãos adjacentes;
- Vão gravante máximo (VGmax): valor máximo da distância entre os pontos com tangente horizontal das catenárias dos vãos adjacentes;
- Custo de fundação por tipo de solo: custo da fundação do tipo de torre de acordo com o tipo de solo;
- Custo da estrutura por altura: custo da estrutura do tipo de torre de acordo com a altura.

4.1.2 Saídas

Como resultado do algoritmo, obtém-se uma lista de pontos, cada um com as seguintes características:

- Presença ou não de torre: indica se no ponto deve ser alocada uma torre ou não;
- Tipos da torre: indica o tipo da torre a ser alocada nos pontos em que é indicada a presença de torre;
- Altura: indica a altura da torre a ser alocada nos pontos em que é indicada a presença de torre.

Também é retornado como saída do algoritmo o custo total da alocação das torres de acordo com as parciais de custo consideradas (custo da fundação e da estrutura). Outros custos como de condutores, outros equipamentos, montagem, manutenção, abertura de acesso, serviços técnicos e outros não são considerados por simplificação da solução e por não terem sido encontrados valores reais na literatura.

4.2 Definição matemática

4.2.1 Variáveis de decisão

As variáveis de decisão do problema se referem aos pontos de alocação, ao tipo da estrutura e à altura de cada uma das torres, e são da seguinte forma:

$x_{jt} \in \{0,1\}$: se uma torre do tipo t será alocada na posição j

$h_j \in \mathbb{R}^+$: altura da torre a ser alocada na posição j

4.2.2 Função objetivo

A função objetivo do problema é dada por:

$$\min \left(\sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T x_{jt} \cdot (CF(CG_j) \cdot CD(decliv_j) + CT_t(h_j)) \right) \quad (1)$$

em que x_{jt} é a variável binária que indica a presença ou ausência de uma torre do tipo t no ponto j ; $CF(CG_j)$ é o custo de fundação devido a classe geotécnica do ponto j ; $CD(decliv_j)$ representa o fator multiplicador do custo de fundação relacionado a declividade do ponto j ; e $CT_t(h_j)$ é o custo da torre do tipo t em função da altura h_j no ponto. O custo associado ao tipo de torre é dado por:

$$CT_t(h_j) = a_t \cdot h_j + b_t \quad (2)$$

em que a_t é o coeficiente de custo por altura das torres do tipo t ; h_j é a altura da torre no ponto j ; e b_t é o coeficiente fixo de custo das torres do tipo t .

4.2.3 Restrições

As restrições do problema são referentes aos limites de altura mínima e máxima, vão médio máximo, vão gravante mínimo e máximo, e ângulo de deflexão para cada um dos cinco tipos de estrutura de torres. Os valores desses limites são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 – Restrições do problema [48]

Restrição	Tipo de estrutura				
	SS	SR	AS	AM	AT
Altura mínima [m]	15	15	15	15	20
Altura máxima [m]	35	40	40	55	45
Deflexão máxima [°]	3	3	10	25	56
Vão médio máximo [m]	450	560	700	1000	1400
Vão gravante mínimo [m]	300	300	350	300	300
Vão gravante máximo [m]	600	700	850	1120	1300

5 Metodologia

A metodologia proposta neste trabalho tem por objetivo criar um algoritmo baseado nas técnicas de Algoritmos Genéticos para determinar a alocação das torres de transmissão de energia ao longo do traçado de LTAs com base em critérios técnicos e econômicos. O algoritmo foi implementado com o auxílio do software Matlab e é descrito na próxima seção. Na sequência, é descrita também a Heurística Gulosa implementada apenas para referência da ordem de grandeza dos resultados a serem esperados pelo Algoritmo Genético, uma vez que algumas das simplificações adotadas na implementação de algum dos algoritmos dificulta a comparação entre as soluções.

5.1 Estrutura do Algoritmo Genético Projetado

A metodologia de alocação de torres baseada em Algoritmos Genéticos utiliza os conceitos de seleção, cruzamento, mutação e elitismo e tem o pseudoalgoritmo no formato mostrado na Figura 13.

```
Algoritmo genético - Alocação de torres em LTAs
1   $i \leftarrow 0$ 
2   $x_0 \leftarrow \text{gera\_populacao\_inicial}$ 
3   $\text{avalia\_fitness}(x_0)$ 
4   $x_i \leftarrow x_0$ 
5  repita
6       $x_i \leftarrow \text{faz\_selecao}(x_i)$ 
7       $x_i \leftarrow \text{faz\_elitismo}(x_i, x_{i-1})$ 
8       $x_i \leftarrow \text{faz\_cruzamento}(x_i)$  e  $\text{faz\_mutacao}(x_i)$ 
9       $x_{\text{star}} \leftarrow \text{melhor solu\c{c}\~{a}o}(x_i)$ 
10      $f_{\text{star}} \leftarrow \text{menor custo}(x_i)$ 
11      $i \leftarrow i+1$ 
12 até  $i = \text{ngen}$ 
13  $x_i \leftarrow \text{faz\_elitismo}(x_i, x_{i-1})$ 
14 retorna  $x_{\text{star}}, f_{\text{star}}$ 
```

Figura 13 - Pseudoalgoritmo da metodologia de algoritmo genético para alocação de torres em LTAs

Para execução do algoritmo, deve ser definido um número de gerações, *ngen*, correspondente ao número de vezes que o algoritmo é executado, e o número de indivíduos de cada população, *npop*, correspondente ao número de soluções viáveis que passará pelo

processo evolutivo do algoritmo. O número de variáveis de cada indivíduo, *nvar*, corresponde ao número total de pontos do traçado discretizado e varia de cenário para cenário.

5.1.1 Representação dos Indivíduos

Os indivíduos são compostos por três vetores com dimensão *nvar* igual ao número de pontos do traçado da LTA discretizada em questão. Esses vetores são manipulados de forma conjugada, isto é, ao aplicar algum operador genético em algum indivíduo, os três vetores são afetados. O primeiro vetor representa a alocação das torres propriamente dita. Nesse arranjo, as posições, com valor igual a “0” indicam a ausência de torres de transmissão de energia enquanto aquelas com valor igual a “1” indicam a presença de torres.

As posições inicial e final dos indivíduos sempre são iguais a “1”, indicando que sempre haverá a presença de uma torre de transmissão de energia no início e no final de uma LTA (as torres de ancoragem de fim de linha). As outras posições são determinadas de acordo com a função geradora da população inicial, para o caso dos indivíduos da população inicial, ou com os outros operadores que modificam os indivíduos ao longo da execução do algoritmo, para os demais casos.

Já o segundo vetor representa o tipo das torres alocadas. Nesse vetor, os pontos do traçado discretizado em que há presença de torres possuem um valor de “1” a “5” indicando os cinco possíveis tipos de torres a serem alocadas e “0” para as posições sem torres alocadas. Os valores de “1” a “5” representam os tipos de estrutura da seguinte forma:

- 1 para suspensão simples (SS);
- 2 para suspensão reforçada (SR);
- 3 para suspensão em ângulo (SA);
- 4 para ancoragem de meio de linha (AM);
- 5 para ancoragem terminal (AT).

O terceiro vetor representa as alturas das torres nos pontos em que elas foram alocadas, de acordo com a faixa de valores de altura permitida para cada tipo de estrutura. Nos pontos em que não há alocação de torre, o valor atribuído para esse vetor é igual a “0”.

Um exemplo dos vetores de um indivíduo é mostrado na Figura 14.

	nvar																																					
Presença de torre	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	...	1
Tipo de estrutura	5	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	...	5	
Altura	37	0	0	0	0	0	0	0	0	18	0	0	0	0	0	0	28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	31	0	0	...	20			

Figura 14 – Exemplo do vetor de alocação de torres de um indivíduo

5.1.2 Geração da População Inicial

A população inicial é gerada alocando-se torres ao longo dos pontos discretizados do traçado considerado, seja ele correspondente a um terreno fictício ou a um terreno real.

Inicialmente, são alocadas torres no início e no fim do traçado. Estas torres são definidas como do tipo ancoragem terminal (AT). Em seguida, são alocadas torres de ancoragem de meio de linha (AM) em alguns pontos específicos do traçado. Esses pontos com torres de ancoragem de meio de linha têm o intuito de representar os pontos onde a deflexão do traçado é maior do que os valores máximos de deflexão suportados por outros tipos de estrutura. Foi criada uma função para determinar o número de torres de ancoragem de meio de linha a serem alocadas e suas posições, definidas de forma aleatória. Na sequência, são alocadas as demais torres ao longo do traçado. Para essas torres, os pontos de alocação são definidos de forma aleatória dentro da faixa de possíveis posições que não violem os critérios de vãos para os respectivos tipos de torre. Por exemplo, ao alocar uma torre do tipo suspensão simples (SS) em um ponto, para realizar a alocação do ponto seguinte é definido um tipo de torre (de forma aleatória) e avaliado, de acordo com os critérios de vãos (distância sempre maior que o vão gravante mínimo, $V_{gmín}$, e menor que o vão gravante máximo, $V_{gmáx}$, das duas torres em questão) para os dois tipos de torre em questão – da torre anterior e da torre a ser alocada – qual a faixa de possíveis pontos para que ela seja alocada. Dentro dessa faixa, a posição é definida de forma aleatória. Dentro desse intervalo de pontos, mostrado na Figura 15, para cada ponto, a alocação foi determinada por uma função em que a presença da torre era definida de forma aleatória com uma probabilidade de 90% de não ser alocada no ponto ($probpi = 0,9$).

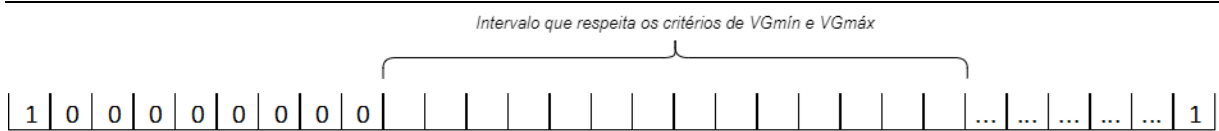


Figura 15 – Alocação de torres na população inicial

Como dito, a definição do tipo de torre para os pontos que não correspondem às torres de ancoragem terminal e de meio de linha (AT e AM) é feita de forma aleatória entre os três demais tipos de torres disponíveis, suspensão simples (SS), suspensão reforçada (SR) e suspensão em ângulo (SA). Já as alturas dessas torres também foram definidas de forma aleatória dentro da faixa de valores permitidos para o tipo de torre correspondente, compreendida entre $hmín$ e $hmáx$.

Para o cenário com traçado real, a única especificidade é que os pontos com torres de ancoragem de meio de linha foram fixados, pois foram definidos com base nos valores reais de deflexão entre cada um dos pontos do traçado exibido na Figura 12. Para aqueles pontos em que a deflexão era maior ou igual a 25° para ao menos algum dos seus pontos adjacentes foram alocadas torres de ancoragem de meio de linha (AM). Os pontos com torres de ancoragem de meio de linha para esse traçado são mostrados na Figura 16, destacados em verde claro, ao longo da linha. Os tipos de torre dos demais pontos e as alturas das torres foram definidas de forma aleatória, da mesma forma que para o caso de traçados fictícios.

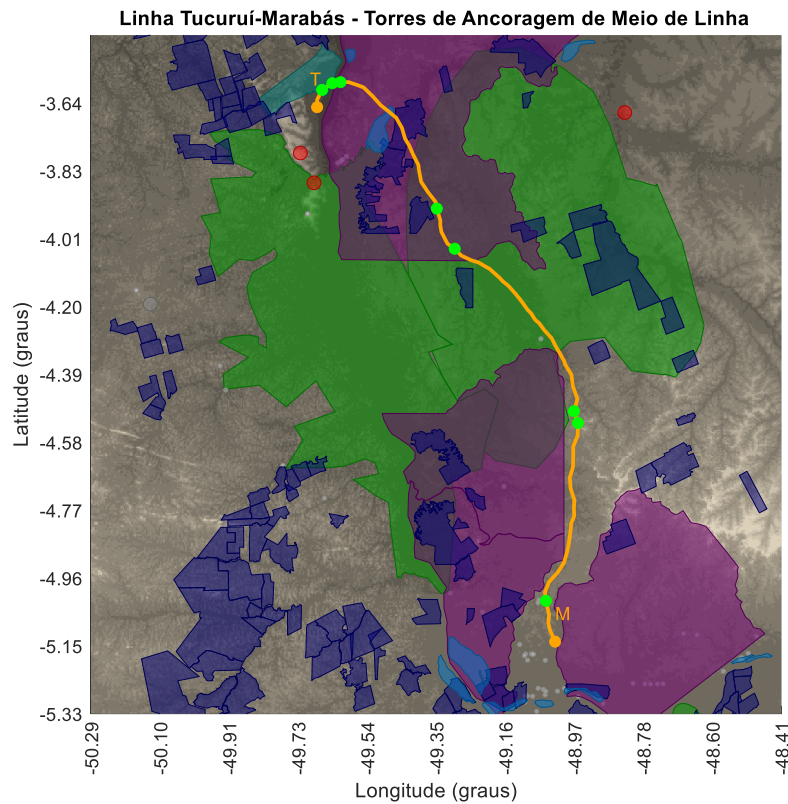


Figura 16 – Torres de ancoragem de meio de linha para o cenário de traçado real

5.1.3 Avaliação da População

A avaliação da população é feita por meio de uma função de aptidão de cada um dos seus indivíduos, que consiste na soma de duas componentes: o custo e a penalidade do indivíduo, da seguinte forma:

$$F_{p_i} = f_{p_i} + p_{p_i} \quad (3)$$

em que F_{p_i} é o valor da função de aptidão para o indivíduo i da população p ; f_{p_i} é o custo do indivíduo i da população p ; e p_{p_i} é a penalidade do indivíduo i da população p .

O custo de uma população, f_{p_i} , é dado pelo somatório dos custos estruturais de cada uma das torres alocadas no traçado correspondente ao indivíduo. A função custo, baseada em [48], é definida da seguinte forma:

$$f_{p_i} = \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T x_{ijt} \cdot (CF(CG_{ij}) \cdot CD(decliv_{ij}) + CT_{it}(h_j)) \quad \forall i \in P \quad (4)$$

em que f_{p_i} é o custo do indivíduo i da população p ; x_{ijt} é a variável binária que indica a presença ou ausência de uma torre do tipo t no ponto j do indivíduo i ; $CF(CG_{ij})$ é o custo de fundação devido a classe geotécnica do ponto j do indivíduo i ; $CD(decliv_{ij})$ representa o fator multiplicador do custo de fundação relacionado a declividade do ponto j do indivíduo i ; e $CT_{it}(h_j)$ é o custo da torre do tipo t do indivíduo i em função da altura da torre no ponto j . O custo associado ao tipo de torre é dado pela seguinte equação:

$$CT_{it}(h_j) = a_t \cdot h_{ij} + b_t \quad (5)$$

em que a_t é o coeficiente de custo por altura das torres do tipo t ; h_{ij} é a altura da torre no ponto j do indivíduo i ; e b_t é o coeficiente fixo de custo das torres do tipo t .

Já a função de penalização tem o intuito de acrescentar um custo extra àquelas soluções que violam os limites de vão gravante mínimo e máximo. Nela, é adicionado um custo proporcional à distância de cada torre até os valores limites de vão gravante (mínimo ou máximo) para as torres que violem essas distâncias e a um fator multiplicador de penalidade, $fpen$, fixado. Esta função não é aplicada para os pontos inicial e final do traçado, nem entre duas torres com tipo de estrutura de ancoragem de meio de linha, uma vez que esses pontos têm alocação obrigatória. A função penalidade é dada por:

$$p_{p_i} = \sum_{j=1}^J x_{jt} \cdot (fpen \cdot (\max(d_j - d_{t,máx}, 0) + \min(d_{t,mín} - d_j, 0))) \quad \forall i \in P \quad (6)$$

em que p_{p_i} é a penalidade do indivíduo i da população p ; $fpen$ é o fator de penalidade fixado; e d_j é a distância entre o ponto j e a primeira torre previamente alocada a montante do ponto j ; e $d_{t,máx}$ e $d_{t,mín}$ são as distâncias do vão gravante máximo e mínimo, respectivamente, para a torre do tipo t . O fator multiplicador de penalidade, $fpen$, foi definido como 100000.

5.1.4 Seleção dos indivíduos

A técnica de seleção dos indivíduos empregada foi a Amostragem Universal Estocástica (*Stochastic Universal Sampling* ou SUS, do inglês) com ranqueamento linear. Nesse método de seleção, os indivíduos de uma população são ordenados de acordo com sua função de aptidão em um ranking e a cada um é dado uma parcela de área de um círculo imaginário. Nesse ranqueamento, o melhor indivíduo (o que possui o menor valor da função de aptidão) recebe uma cota de valor igual ao número de indivíduos da população. O segundo melhor indivíduo recebe uma cota de valor igual ao número de indivíduos subtraído de 1, e assim sucessivamente até que o pior indivíduo recebe uma cota igual a 1. Em seguida, é realizado um sorteio de um valor aleatório dentro do círculo imaginário de tamanho igual à soma de todas as cotas dos indivíduos e um número de ponteiros (igual ao número da população) espaçados uniformemente seleciona quais indivíduos deverão compor a próxima geração, como mostrado na Figura 17.

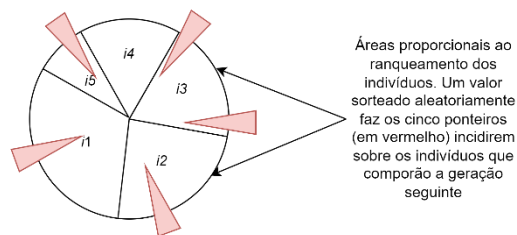


Figura 17 – Exemplo da seleção Amostragem Universal Estocástica com ranqueamento linear

5.1.5 Cruzamento e mutação dos indivíduos

As operações de cruzamento e mutação podem ser aplicadas em uma mesma geração de indivíduos, com probabilidades distintas: 90% para cruzamento e 10% para mutação ($p_c = 0,9$). Isto é, primeiramente é sorteado um valor aleatório entre 0 e 1 e, caso esse valor seja abaixo de 0,9, é realizada uma operação de cruzamento. Na sequência, outro número entre 0 e 1 é sorteado e, caso esse valor seja acima de 0,9, é realizada uma operação de mutação.

O cruzamento implementado é do tipo com vários pontos de corte. O número de pontos de corte foi definido como 0,5% do número de variáveis de um indivíduo ($n_{cor} = 0,005$). Assim, para um indivíduo com 1000 variáveis, são definidos 5 pontos de corte de forma aleatória. Quando se sorteia que deve ser realizada uma operação de cruzamento em

uma determinada geração, da forma descrita anteriormente, é realizado, na verdade, um número de operações de cruzamento igual ao número de indivíduos da população. Por exemplo, se foi sorteado que haverá cruzamento para a geração corrente e o número de indivíduos é igual a 20, serão realizadas 20 operações de cruzamento. Em cada operação, dois pais são escolhidos de forma aleatória e dois novos filhos são gerados para ocupar o lugar de cada um dos pais. Cada filho é formado pela combinação dos bits dos pais. Nos trechos entre cada um dos pontos de corte definidos aleatoriamente os bits de um dos pais são copiados para um dos filhos e os do outro pai para o outro filho, alternando-se qual pai provê os bits para qual filho em cada um dos trechos, como mostrado na Figura 18.

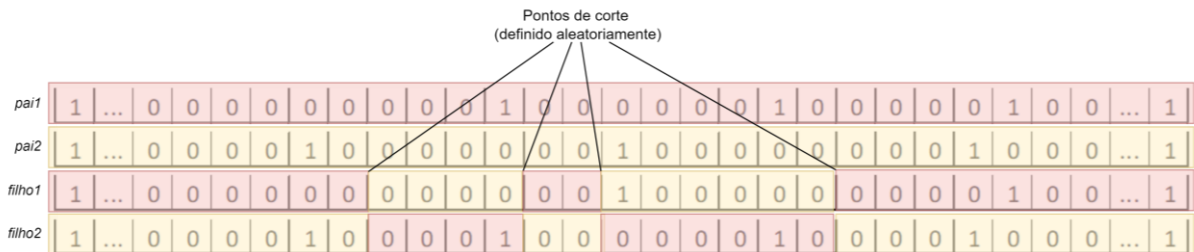


Figura 18 - Exemplo de cruzamento com vários pontos de corte implementado

Já a mutação implementada foi do tipo *swap* com vizinhança. Para cada um dos pontos em que há a presença de uma torre, excetuando-se os pontos com torres do tipo ancoragem de fim e de meio de linha, que são fixos, é permitido o deslocamento da torre para mais ou menos até duas posições adjacentes (deslocamento de -2 a +2 definido de forma aleatória), como mostrado na Figura 19.

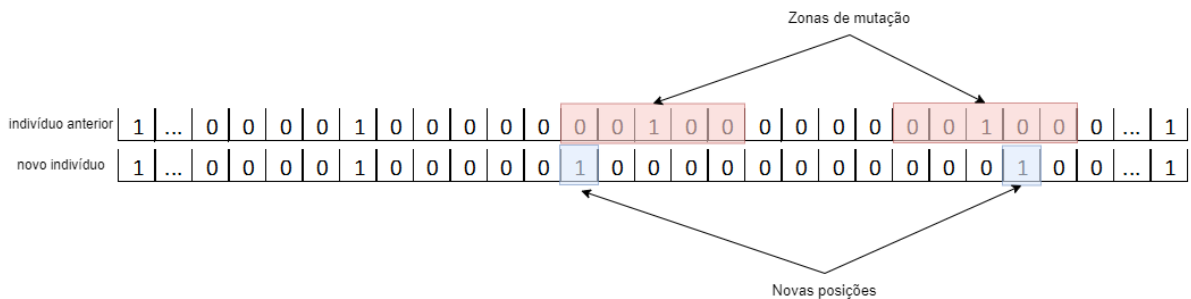


Figura 19 - Exemplo da mutação binária implementada

Optou-se por realizar a mutação do tipo *swap* com vizinhança porque mutações que pudessem alterar significativamente o número de torres acabaram por inserir um

número de violações dos critérios de vãos gravantes mínimos e máximos, prejudicando as soluções obtidas.

5.1.6 Elitismo

Por fim, a operação de elitismo é feita com base nos valores da função de aptidão (custo e penalidade) dos pais e filhos (gerados após os processos de seleção e no final do algoritmo). Os pais e filhos são ordenados de acordo com o resultado das somas de suas respectivas *fitness* e um número igual a 80% ($kelit = 0,8$) dos piores pais são substituídos por um número equivalente de melhores filhos, a fim de se obter uma geração nova melhor, a qual é submetida ao mesmo processo até que o número de gerações, *ngen*, seja atingido.

5.2 Heurística Gulosa Auxiliar

A título de referência inicial para os resultados obtidos e para se ter uma solução inicial viável para o Algoritmo Genético implementado, foi desenvolvida uma Heurística Gulosa baseada nos algoritmos de Programação Dinâmica listados no item 3.1.

A Heurística Gulosa implementada consistiu em:

1. Iniciar alocando-se uma torre no ponto inicial.
2. A partir de um ponto com uma torre já alocada (como o caso do ponto inicial), percorrer a faixa de possíveis pontos de alocação para a torre seguinte, observando-se os critérios de vão gravante mínimo e máximo e vão médio máximo.
3. Para cada um dos possíveis pontos e para um determinado tipo de estrutura, variar a altura da torre dentro da faixa permitida para o respectivo tipo, observando-se também os critérios de altura mínima de segurança para os cabos entre as duas torres.
4. Calcular o custo para cada uma das possíveis soluções (ponto e altura da torre)
5. Escolher o ponto viável com o menor custo como o ponto da torre a ser alocada.
6. Repetir o processo até o ponto final do traçado.

Embora a HG implementada não necessariamente resulte na solução ótima para o problema, ela fornece um resultado que pode ser utilizado como referência para a ordem de grandeza dos resultados obtidos com o AG e como entrada (um dos indivíduos) da população inicial do AG.

6 Testes e Resultados

Como mencionado anteriormente, foram realizados testes com cenários de terrenos fictícios, gerados pelo algoritmo, e um cenário com terreno real, baseado no traçado proposto pelo trabalho [3]. Para cada caso, a localização e altura dos pontos inicial e final foram fixadas.

Foi considerado um número de gerações n_{gen} igual a 50 e uma população com número de indivíduos n_{pop} igual a 200. O número de pontos a partir da discretização dos traçados para os cenários fictícios foi igual a 1000 enquanto para o cenário de traçado real foi igual a 3969 (correspondente a, aproximadamente, 220 km de extensão da linha). Os demais parâmetros dos operadores genéticos foram definidos com base em experimentos e ajustes realizados para um cenário de terreno fictício mantido fixo e em valores de referência encontrados na literatura. A Tabela 2 resume os parâmetros usados no Algoritmo Genético.

Tabela 2 - Parâmetros do Algoritmo Genético implementado

Parâmetro	Valor
Número de gerações do algoritmo (n_{gen})	50
Número de indivíduos por população (n_{pop})	200
Número de variáveis por indivíduo (n_{var})	1000 ou 3969
Probabilidade de realização de cruzamento (pc)	90%
Probabilidade de realização de mutação (pm)	10%
Fator de número de cortes no cruzamento em relação ao número de variáveis ($ncor$)	0,5%
Faixa de mutação	± 2
Percentual de piores pais substituídos pelos melhores filhos no elitismo ($kelit$)	80%
Fator multiplicador de penalidade ($fpen$)	100
Fator de discretização (conversão de ponto para metros para os cenários fictício e real)	50 e 55

Também foram definidos valores de altura mínima e máxima, deflexão máxima, vão médio máximo, vão gravante mínimo, vão gravante máximo, custo de fundação por tipo de solo e custo por tipo de estrutura para todos os tipos de estrutura de torres. Os valores dos parâmetros utilizados, baseados em [48], estão mostrados na Tabela 3 para cada um dos tipos de estrutura de torre: suspensão simples (SS), suspensão reforçada (SR), suspensão em ângulo (SA), ancoragem de meio de linha (AM) e ancoragem terminal (AT).

Tabela 3 - Parâmetros de entrada dos testes com dados fictícios [48]

Parâmetro	Tipo de estrutura				
	SS	SR	SA	AM	AT
Altura mínima [m]	15	15	15	15	20
Altura máxima [m]	35	40	40	55	45
Deflexão máxima [°]	3	3	10	25	56
Vão médio máximo [m]	450	560	700	1000	1400
Vão gravante mínimo [m]	300	300	350	300	300
Vão gravante máximo [m]	600	700	850	1120	1300
Fator <i>a</i> do custo de fundação por altura [R\$/m]*	2753	3158	3554	6329	7048
Fator <i>b</i> do custo fixo de fundação [R\$]*	36263	30675	32495	165442	182149
Custo por estrutura para o tipo de solo I [R\$]*	48637	64410	82434	103893	129702
Custo por estrutura para o tipo de solo II [R\$]*	90434	119803	153327	193241	241246

*Como referência, o valor do dólar em 31/12/2018, ano em que o artigo de referência foi publicado, era igual a R\$ 3,88.

6.1 Testes com terreno fictício mantido fixo

O teste com um terreno fictício mantido fixo consistiu em gerar um cenário de forma aleatória e executar o Algoritmo Genético repetidas vezes (100, tipicamente), mantendo-se o terreno/traçado e ajustando-se os parâmetros de forma empírica até que os resultados alcançados se mostrassem melhores que nas execuções anteriores. Os valores dos parâmetros mostrados na Tabela 2 foram definidos após a realização desses testes.

6.1.1 Variação do número de gerações (*ngen*)

No teste de variação do número de gerações, o algoritmo foi executado por 100 vezes para gerações de tamanho *ngen* igual a 10, 20, 50 e 100. Os resultados obtidos são mostrados na Tabela 4.

Tabela 4 - Resultados do teste de variação do número de gerações (*ngen*)

<i>ngen</i>	Custo AG [R\$ milhares]			Tempo médio de execução do AG [s]	Custo médio HG [R\$ milhares]	%AG melhor que HG
	Mínimo	Médio	Máximo			
10	12.022	14.527	15.652	4,56	13.225	6
20	12.109	13.675	15.363	7,57	13.213	29
50	9.191	12.128	14.029	22,53	13.073	87
100	7.638	9.868	11.980	37,05	12.989	100

A partir dos resultados obtidos, pôde-se observar que um número maior de gerações tende a favorecer uma melhora nos resultados obtidos, uma vez que o custo médio do AG caiu de R\$ 14.527.000,00 para R\$ 9.868.000,00 e que o número de resultados do AG melhores que o HG subiu de 6 para 100%. Por outro lado, o tempo médio de execução do AG também aumenta com um número maior de gerações, passando de 4,56 para 37,05s.

6.1.2 Variação do tamanho da população (n_{pop})

No teste de variação do tamanho da população, o algoritmo foi executado por 100 vezes para gerações de tamanho n_{gen} igual a 50 e para populações de tamanho n_{pop} igual a 50, 100, 200 e 300. Os resultados obtidos são mostrados na Tabela 5.

Tabela 5 - Resultados do teste de variação do tamanho da população (n_{pop})

n_{pop}	Custo AG [R\$ milhares]			Tempo médio de execução do AG [s]	Custo médio HG [R\$ milhares]	%AG melhor que HG
	Mínimo	Médio	Máximo			
50	10.671	12.333	13.551	5,89	13.047	78
100	10.686	11.779	13.223	8,74	13.292	95
200	10.603	12.056	13.924	18,97	12.924	91
300	11.782	12.583	13.195	31,17	13.078	82

A partir dos resultados obtidos, pôde-se observar que o tamanho da população igual a 100 obteve os resultados obtidos, uma vez que o custo médio do AG foi o menor para esse caso, igual a R\$ 11.779.000,00, e que o número de resultados do AG melhores que o HG foi o maior, igual a 95%.

6.1.3 Variação dos fatores de cruzamento (pc) e mutação (pm)

No teste de variação dos fatores de cruzamento e mutação, o algoritmo foi executado por 100 vezes para gerações de tamanho n_{gen} igual a 50 e populações de tamanho n_{pop} a 100. Os valores de pc foram variados entre 0,7 e 0,95 (com pm mantido fixo em 0,1) e os valores de pm variados de 0,05 a 0,20 (com pc mantido fixo em 0,9). Os resultados obtidos são mostrados na Tabela 6 e na Tabela 7.

Tabela 6 - Resultados do teste de variação do fator de cruzamento (pc)

pc	Custo AG [R\$ milhares]			Tempo médio de execução do AG [s]	Custo médio HG [R\$ milhares]	%AG melhor que HG
	Mínimo	Médio	Máximo			
0,70	10.304	12.493	14.657	11,69	13.020	64
0,75	10.452	12.390	13.837	11,65	13.107	73
0,80	9.648	11.791	12.877	10,49	13.101	94
0,85	11.394	12.229	13.258	9,05	13.004	91
0,90	10.686	11.779	13.223	8,74	13.292	95
0,95	10.673	12.282	13.905	8,61	13.056	91

Tabela 7 - Resultados do teste de variação do fator de mutação (pm)

pm	Custo AG [R\$ milhares]			Tempo médio de execução do AG [s]	Custo médio HG [R\$ milhares]	%AG melhor que HG
	Mínimo	Médio	Máximo			
0,05	11.515	12.544	13.732	10,66	13.051	75
0,10	10.524	11.681	13.259	10,14	13.548	100
0,15	10.819	11.867	13.906	9,90	12.979	87
0,20	10.607	11.933	12.704	11,26	13.115	95

A partir dos resultados obtidos, pôde-se observar que o melhor resultado obtido foi para um valor do fator de cruzamento (pc) entre 0,80 e 0,90, uma vez que o custo médio do AG para essa faixa variou entre R\$ 11.791.000,00 e R\$ 11.779.000,00 e que o número de resultados do AG melhores que o HG foi de cerca de 95%.

Já em relação ao fator de mutação (pm), pôde-se observar que o melhor resultado foi obtido com um valor igual a 0,10, uma vez que o custo médio do AG para esse caso foi igual a R\$ 11.681.000,00 e que o número de resultados do AG melhores que o HG foi de 1000%.

6.1.4 Variação do fator de penalidade ($fpen$)

No teste de variação do fator de penalidade, o algoritmo foi executado por 100 vezes para gerações de tamanho $ngen$ igual a 50 e populações de tamanho $npop$ a 100. Os valores de pc e pm foram mantidos iguais a 0,9 e 0,1, respectivamente e o valor do fator de penalidade foi variado entre 100 e 10000. Os resultados obtidos são mostrados na Tabela 8.

Tabela 8 - Resultados do teste de variação do fator de penalidade ($fpen$)

$fpen$	Custo AG [R\$ milhares]			Tempo médio de execução do AG [s]	Custo médio HG [R\$ milhares]	%AG melhor que HG
	Mínimo	Médio	Máximo			
100	10.686	11.995	13.218	8,65	13.137	100
1000	11.511	12.357	13.175	9,38	13.169	95
10000	10.631	12.214	13.546	8,90	12.910	63
100000	12.442	13.990	15.311	10,60	12.972	32

A partir dos resultados obtidos, pôde-se observar que quanto maior o valor do fator de penalidade ($fpen$), piores os resultados obtidos, uma vez que o custo médio do AG aumentou de R\$ 11.995.000,00 para R\$ 13.990.000,00 e que o número de resultados do AG melhores que o HG diminuiu de 100 para 32 %. Já o tempo médio de execução do AG também foi maior com o aumento de $fpen$, passando de 8,65 para 10,60 s.

6.2 Testes com terrenos fictícios gerados aleatoriamente

Os traçados de terrenos fictícios gerados aleatoriamente consistiram, cada, em vetores de 1000 pontos para os quais foram definidos os parâmetros de entrada conforme detalhado no item 4.1.1. e na Tabela 3.

Uma vez gerados os terrenos e definidos os parâmetros de entrada, iniciou-se a execução do algoritmo. Um exemplo de resultado para um cenário fictício gerado é mostrado na Figura 20. Nessa figura são mostrados o perfil altimétrico do terreno (linha verde com 1000 pontos e diferentes alturas) e os pontos de alocação de torres, anotados com um traço vertical cinza, para as torres dos tipos SS, SR e AS, e com um quadrado vermelho para as torres dos tipos AM e AT.

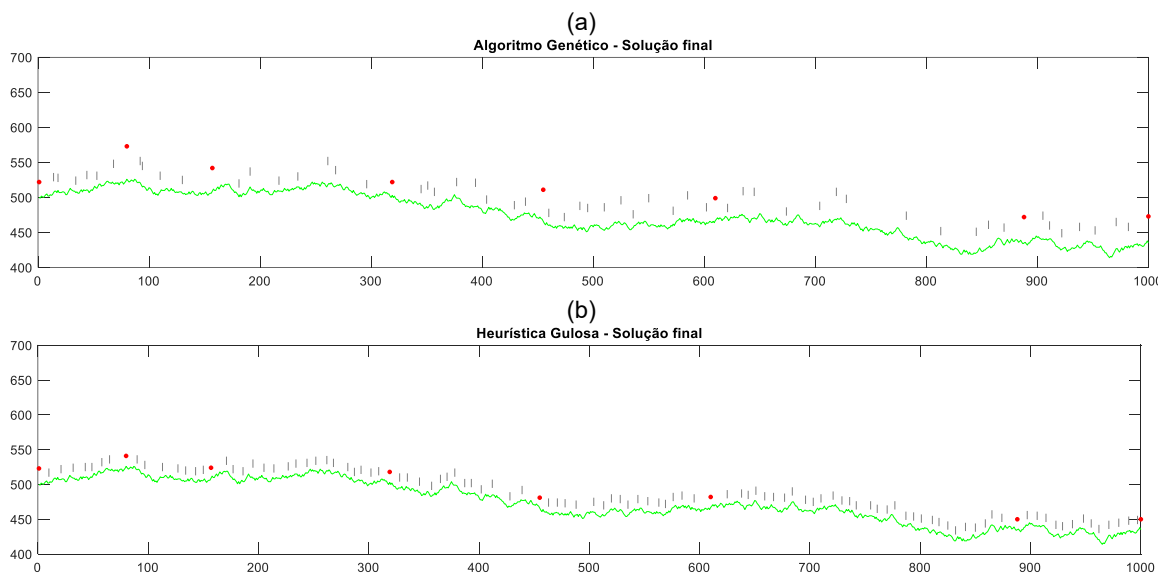


Figura 20 - Resultados do teste com dados fictícios. (a) Algoritmo Genético. (b) Heurística Gulosa

Para esse caso, foram obtidos como resultados de número de torres e custo os valores mostrados na Tabela 9. Nessa tabela também são mostrados os valores obtidos para o algoritmo de Heurística Gulosa implementado, como referência de valores.

Tabela 9 – Resultados de um exemplo de execução para um teste com dados fictícios

Resultado	Algoritmo Genético	Heurística Gulosa
Número de torres	63	112
Torres por tipo (SS, SR, SA, AM, AT)	25, 19, 11, 6, 2	53, 39, 12, 6, 2
Distância média entre torres [m]	793,5	446,43
Custo total [R\$ milhares]	15.821 (inic.) 12.276 (fin)	13.484

Pode-se observar que, para esse caso, a solução final do algoritmo genético obteve um custo total que mudou de seu valor inicial de R\$ 15.821.00,00 para R\$

12.276.000,00. Como referência, a Heurística Gulosa resultou em um custo total de R\$ 13.484.000,00. O número total de torres alocadas pelo Algoritmo Genético foi igual a 63, enquanto para a Heurística Gulosa foi igual a 112.

6.3 Testes com dados reais

O teste com dados reais, foi realizado com base no traçado definido em [3] para a linha Tucuruí-Marabás. Este cenário constitui-se de 3969 pontos com as cotas e deflexões definidas. As características do terreno que influenciam no custo de alocação foram definidas de forma aleatória, uma vez que estes dados não estavam disponíveis. Também foram utilizados os parâmetros conforme definidos nas Tabela 2 e Tabela 3. Os resultados obtidos são mostrados na Figura 21.

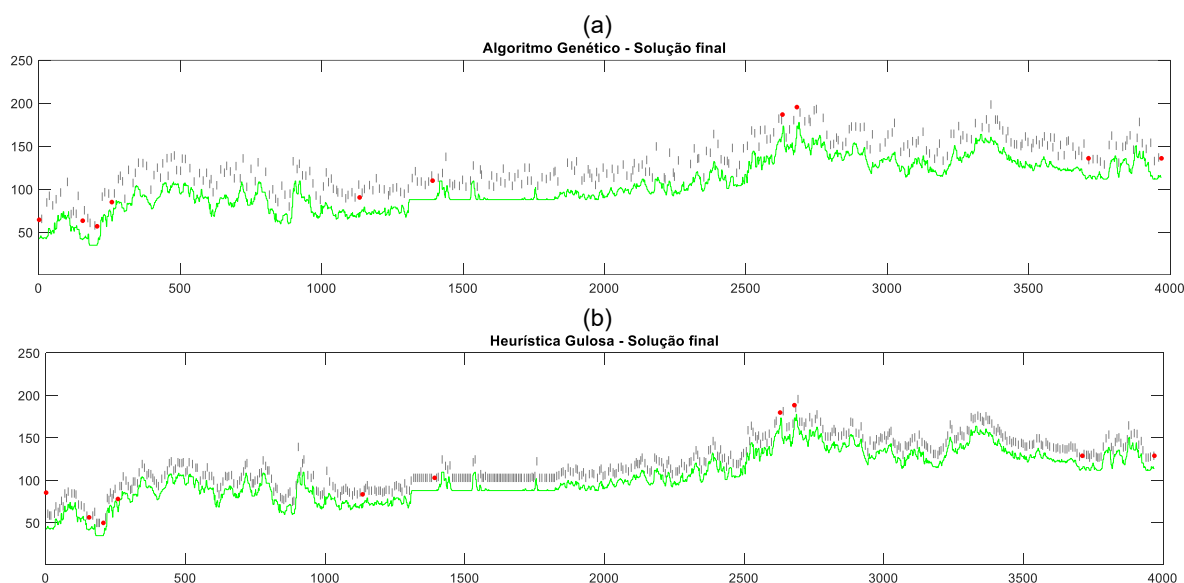


Figura 21 - Resultados do teste com dados reais. (a) Algoritmo Genético. (b) Heurística Gulosa

Para esse caso, foram obtidos como resultados de número de torres e custo os valores mostrados na Tabela 10.

Tabela 10 – Resultados de um exemplo de execução para um teste com dados reais

Resultado	Algoritmo Genético	Heurística Gulosa
Número de torres	336	516
Torres por tipo (SS, SR, SA, AM, AT)	118, 94, 114, 8, 2	222, 223, 61, 8, 2
Distância média entre torres [m]	649,9	423,0
Custo total [R\$ milhares]	55.668 (inic.) 50.377 (fin)	47.851

A solução final do Algoritmo Genético obteve um custo total que mudou de seu valor inicial de R\$ 55.668.00,00 para R\$ 50.377.000,00. O número total de torres alocadas pelo Algoritmo Genético foi igual a 336 enquanto para a Heurística Gulosa foi igual a 516.

6.4 Algoritmo Genético combinado com Heurística Gulosa

A fim de se validar a contribuição da Heurística Gulosa como uma das soluções para compor a população inicial do Algoritmo Genético, foram realizados testes combinando-se as duas metodologias.

Foram realizadas 1000 execuções em que, para cenários fictícios diferentes gerados aleatoriamente, foi executado primeiramente de forma isolada o AG, seguido da HG também executada de forma isolada e, com o resultado obtido da HG, disparou-se o processamento do AG novamente considerando como um dos indivíduos iniciais o resultado obtido com a HG. Para cada teste realizado foram determinados os custos totais de cada algoritmo e definido o algoritmo de melhor resultado. O percentual de ocorrências de cada um dos três modos de execução como melhor algoritmo e o custo médio para as ocorrências em que eles obtiveram os melhores resultados são mostrados na Tabela 11.

Tabela 11 - Resultados dos testes com o Algoritmo Genético combinado com a Heurística Gulosa

Melhor Algoritmo	Ocorrência (em %)	Custo Médio (em R\$ milhares)
Algoritmo Genético	32,1	11.899
Heurística Gulosa	2,1	13.058
Algoritmo Genético + Heurística Gulosa	65,8	10.835

De acordo com os resultados obtidos mostrados na Tabela 11, pode-se observar que o modo de execução que obteve maior número de ocorrências (65,8%) como melhor algoritmo e menor custo médio foi a execução do Algoritmo Genético de forma combinada com a Heurística Gulosa (com uma solução obtida por meio da Heurística Gulosa). Isso pode indicar que a qualidade da solução inicial pode influenciar na solução obtida. O Algoritmo Genético isolado forneceu o melhor resultado para 32,1% das soluções. Já a Heurística Gulosa forneceu o melhor resultado apenas para 2,1% das execuções.

7 Conclusões

Neste trabalho foram implementados um Algoritmo Genético e uma Heurística Gulosa para determinar a alocação de torres ao longo de LTAs em traçados previamente definidos.

A determinação da localidade, o tipo de estrutura e altura das torres de transmissão é parte importante dos estudos que são realizados pelas empresas proponentes nos leilões de transmissão realizados pela ANEEL. Mesmo que o local exato e o tipo da estrutura sejam definidos após análises técnicas mais rigorosas, essa etapa subsidia as empresas a realizarem um levantamento dos custos envolvidos nos empreendimentos de forma mais precisa. Assim, os lances realizados nos leilões pelas proponentes podem ser ajustados considerando-se referências de custos melhores do que aqueles de projetos básicos que considerem distâncias e estruturas de torres uniformes.

A metodologia implementada, baseada em técnicas de Algoritmos Genéticos combinadas a uma formulação matemática de outra referência que utilizou Programação Dinâmica para solucionar o problema, possibilitou uma nova forma de determinar a alocação das torres em LTAs, de simples implementação (cerca de 500 linhas de código no *software* Matlab) e rápida execução (da ordem de 97 segundos para um traçado de 4000 pontos, considerando-se o processamento de um computador Intel i5 com 8 GB de memória). Os operadores genéticos empregados e seus diversos parâmetros foram ajustados de acordo com os resultados obtidos nos testes preliminares (com cenário fictício fixado). À título de referência, foi também implementada uma Heurística Gulosa que permitiu comparar a ordem de grandeza dos resultados obtidos pelo algoritmo genético. Essa heurística também serviu de teste para a determinação de uma das soluções iniciais (um indivíduo da população inicial) do algoritmo genético, a fim de se validar o quanto a heurística poderia ajudar a melhorar o resultado de uma solução dita “combinada”. É importante ressaltar que seria possível modelar o problema por meio de uma Programação Inteira Mista ou Programação Linear Inteira, mas seria necessário usar um solver comercial, e colocar restrições mais complexas resultaria em não linearidade. Também seria possível utilizar Programação Dinâmica, porém, este tipo de algoritmo é mais complexo de

implementar, não existe um solver específico e, na possibilidade de surgirem novas restrições ao problema, o problema poderia se tornar não solucionável por meio de uma PD.

Para os testes realizados, foram utilizados traçados de linhas fictícios (com características geradas de forma aleatória) e baseados em um traçado real definido anteriormente (com somente algumas das características indisponíveis dos terrenos geradas de forma aleatória). Foram executados o Algoritmos Genético e a Heurística Gulosa para ambos os casos e os resultados obtidos mostraram-se satisfatórios. Para um exemplo de caso de teste realizado com um terreno fictício discretizado em 1000 pontos gerado aleatoriamente apresentado no trabalho, o Algoritmo Genético obteve uma evolução de um custo inicial de R\$ 15.821.000,00 para R\$ 12.376.000,00 após a execução, com 63 torres alocadas. Em comparação à Heurística Gulosa, o custo obtido foi de R\$ 13.484.000,00 e 112 torres alocadas. Já para um exemplo de caso de teste realizado com um terreno baseado num traçado real discretizado em 3969 pontos, o Algoritmo Genético obteve uma evolução de um custo inicial de R\$ 55.668.000,00 para R\$ 50.377.000,00 após a execução, com 336 torres alocadas. Em comparação à Heurística Gulosa, o custo obtido foi de R\$ 47.851.000,00 e 516 torres alocadas. Em relação a metodologias simplificadas, com alocações uniformes, considerando-se distâncias entre os pontos de alocação, tipos de estruturas e alturas fixas, os custos obtidos podem ser muito maiores e prejudicar os lances realizados pelas empresas proponentes nos leilões.

Para o teste comparativo entre o modo de execução dos algoritmos, com o Algoritmo Genético sendo executado com uma população inicial aleatória ou de modo combinado à Heurística Gulosa, com um indivíduo da população inicial sendo gerado por ela, um percentual considerável de melhores soluções correspondeu ao modo combinado de execução (65,8% para 1000 execuções realizadas), enquanto o modo isolado de execução do Algoritmo Genético se mostrou mais eficiente em 32,1% dos casos.

7.1 Proposta de Continuidade

Embora os resultados apresentados já se mostrem satisfatórios com os dados utilizados, novas melhorias e testes com mais dados reais podem possibilitar ainda evoluções na solução. No que se refere ao Algoritmo Genético implementado, novas variações dos operadores e seus parâmetros poderiam ser experimentados a fim de se observar o comportamento do algoritmo para obter melhores resultados. Além disso, os

parâmetros poderiam ser ajustados de forma automática com outras técnicas de otimização. Outras metodologias diferentes também poderiam ter sido avaliadas em comparação ao Algoritmo Genético. O trabalho também se utilizou de simplificações de custos e parâmetros mecânicos/elétricos das torres. Foram utilizados apenas dois tipos de terrenos com custos diferentes e cinco diferentes estruturas de torres. Embora as distâncias de vãos gravante mínimos e máximos tenham sido consideradas, não foram avaliados outros parâmetros mecânicos das torres e/ou dos cabos elétricos, estrutura e fundação que poderiam conferir maior precisão à solução. Por fim, a ausência de dados reais atualizados de custos e de mais exemplos de traçados também limitou o teste e análise dos resultados. Essas informações poderiam ser disponibilizadas pelas concessionárias para uma melhor validação do algoritmo e adaptação dos seus parâmetros de forma mais alinhada com a realidade.

Por fim, o trabalho também resultou na elaboração e publicação de um artigo técnico no XV SEPOPE - Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica, promovido pelo CIGRE-Brasil com o apoio da Itaipu, realizado em Foz do Iguaçu, Brasil, em março de 2022. O trabalho apresentado, intitulado Alocação de Torres ao Longo de Traçados de Linhas de Transmissão Aéreas (LTAs), apresentou a metodologia implementada e os resultados parciais do projeto até então.

Referências

- [1] EPE, “Plano Decenal de Energia,” 2021. [Online]. Available: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-pde>. [Acesso em 15 Agosto 2021].
- [2] ANEEL, “Leilões de Transmissão,” [Online]. Available: <http://www.aneel.gov.br/transmissao4>. [Acesso em 15 Agosto 2021].
- [3] V. M. Gonçalves, E. M. B. Bolonhez, G. E. M. Campos e L. H. Sathler, “Transmission line routing optimization using rapid random trees,” *Electric Power Systems Research*, 2021.
- [4] A. H. M. S. e. al., “Optimizing routing and tower spotting of electricity transmission lines: An integration of geographical data and engineering aspects into decision-making,” *Electric Power System Research*, 2019.
- [5] V. P. d. Menezes, “Linhas de Transmissão de Energia Elétrica - Aspectos Técnicos, Orçamentários e Construtivos,” Rio de Janeiro, 2015.
- [6] ANEEL, “Serviço Público de Transmissão de Energia Elétrica,” [Online]. Available: <https://www.aneel.gov.br/transmissao5>. [Acesso em 30 Janeiro 2022].
- [7] ANEEL, “Mapa do Sistema de Transmissão - Horizonte 2024,” [Online]. Available: <http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/mapas>. [Acesso em 30 Janeiro 2022].
- [8] EPE, “Plano Decenal de Expansão de Energia 2029,” 2019.
- [9] ONS, “A Expansão da Transmissão,” 2019. [Online]. Available: <http://www.ons.org.br/paginas/energia-no-futuro/transmissao/expansao>. [Acesso em 22 Novembro 2019].
- [10] EPE, “Informe - O Leilão de Transmissão nº 02/2019 e os Estudos de Expansão,” 2019.
- [11] TCU - Tribunal de Contas da União, “Levantamento junto ao MME, ONS e ANEEL acerca das medidas regulatórias, de fiscalização e coercitivas adotadas pelos agentes responsáveis do setor para mitigar a ocorrência de apagões e suas consequências,” 2013.

-
- [12] EPE, “Consolidação das Análises e Pareceres Técnicos,” 2019.
- [13] EPE, “Planejamento da Expansão da Transmissão e a Participação dos Agentes de transmissão,” 15 Março 2018. [Online]. Available: <http://www.mme.gov.br/documents/1138781/66357967/5+-+Apresenta%C3%A7%C3%A3o+da+EPE+-Semin%C3%A1rio+MME+-+14mar18%281%29.pptx/e0abe5d1-4d6b-42f0-8cf2-80f5a1d2840f>. [Acesso em 22 Novembro 2019].
- [14] ANEEL, “Edital do Leilão nº 02/2019 - Licitação para a Concessão de Serviço Público de Transmissão de Energia Elétrica, Incluindo a Construção, Operação e Manutenção das Instalações de Transmissão do Sistema Interligado Nacional,” 2019.
- [15] EPE, “Leilão de Transmissão nº 002/2021,” EPE, [Online]. Available: <https://www.epe.gov.br/pt/leiloes-de-energia/leiloes-de-transmissao/leilao-de-transmissao-n-002-2021>. [Acesso em 22 Janeiro 2022].
- [16] ANEEL, “Leilões de Transmissão,” 2 Outubro 2019. [Online]. Available: <https://www.aneel.gov.br/transmissao4>. [Acesso em 25 Novembro 2019].
- [17] EPE, “Planejamento da Expansão da Transmissão,” 2016 Novembro 2019. [Online]. Available: <http://www.aneel.gov.br/documents/656877/15099519/Planejamento+da+expans%C3%A3o+e+empreendimentos+previstos+-+Luiz+Augusto+Barroso.pptx/dfbc2c6c-607d-4c93-9e70-f033750c90ba>. [Acesso em 21 Novembro 2019].
- [18] ANEEL, “Banco de Preços de Referência da ANEEL: Atualização dos Valores para a Data-Base Março de 2021,” [Online]. Available: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/banco-de-precos-de-referencia-da-aneel-atualizacao-dos-valores-para-a-data-base-marco-de-2021>. [Acesso em 15 Agosto 2021].
- [19] EPE, “Informa Técnico - Banco de Preços de Referência da ANEEL: Atualização dos Valores para a Data-Base Março de 2021,” 2021.
- [20] ANEEL, “Simulador de Orçamento,” [Online]. Available: <http://bprsimulador.aneel.gov.br/>. [Acesso em 15 Agosto 2021].
- [21] ONS, “Diretrizes para a elaboração de Projetos Básicos para empreendimentos de

-
- transmissão - Estudos elétricos, especificação das instalações de equipamentos e de linhas de transmissão,” 2013.
- [22] ANEEL, “Edital de Leilão nº 02/2019-ANEEL - Anexo 2 - Características e Requisitos Técnicos Gerais das Instalações de Transmissão,” 2019.
- [23] EPE, “Informe Técnico – Banco de Preços de Referência da ANEEL: Atualização dos Valores para a Data-Base Maio de 2019,” 2019. [Online]. Available: <http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/informe-tecnico-banco-de-precos-de-referencia-da-aneel-atualizacao-dos-valores-para-a-data-base-maio-de-2019>. [Acesso em 18 Dezembro 2019].
- [24] Eletrobras S/A, “Revisão das Diretrizes para Elaboração de Orçamentos de Linhas de Transmissão - PLT,” 2005.
- [25] G. B. Cunha, *Análise de sustentabilidade de um projeto de linha de transmissão: o caso da linha 500 kV Tucuruí-Manaus*, Braga, Portugal, 2016.
- [26] P. H. S. Vilela, “Uma Proposta de Análise Técnica para Linhas de Transmissão Compactas com Potência Natural Elevada em Regiões,” Belo Horizonte, 2019.
- [27] A. F. P. Gracia e W. Q. Silva, “Análise Comparativa Entre Diferentes Geometrias de Torres de Transmissão do Tipo Autoportante Frente à Ação do Vento,” *Engenharia Estudo e Pesquisa. ABPE*, vol. 20, nº 1, pp. 32-43, 2020.
- [28] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas , “NBR 5422/1985 - Projeto de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica,” 1985.
- [29] R. S. Cavassin, “Uma Abordagem Multicritérios para Recapitação de Linhas de Transmissão,” Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.
- [30] C. L. B. d. França, Relatório de Estágio Supervisionado - Multiempreendimentos Engenharia Consultiva, Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande, 2012.
- [31] Southwire, “Southwire ACSS/TW,” 2014.
- [32] R. Fuchs, *Transmissão de Energia Elétrica: Linhas Aéreas*, Livros Técnicos e Científicos, 1977.
- [33] F. T. P. Duarte, “Redução de Perdas por Indução em Cabos Para-Raios de Linhas de

-
- Transmissão Dotadas de um Cabo Para-Raios OPGW e Outro EHS,” Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, 2007.
- [34] P. Y. Sriram Kalaga, *Design of Electrical Transmission Lines*, vol. 1, Londres: CRC Press, 2017.
- [35] A. W. J.C. Ranyard, The optimum arrangement of towers in an electric power transmission line, *Oxf. J. Comput. J*, 1967, pp. 157-161.
- [36] K. W. G. Mitra, A computer technique for optimizing the sites and Heights of transmission line towers—a dynamic programming approach, *Comput. J*, 1968, pp. 347-351.
- [37] L. Olbrycht, “A Contribution to the Methods of Optimizing the Spotting of Transmission Line Towers,” *Electric Power System Research*, pp. 163-171, 1982.
- [38] G. O. S. Medeiros, R. M. d. Lima, A. R. d. Queiroz, C. R. S. Pereira, A. H. M. Santos, R. Osis, R. A. d. Santos, L. C. Junior e E. L. C. Junior, “Metodologia de Locação de Torres de Linha de Transmissão Baseada em Programação Dinâmica,” *Revista Brasileira de Energia*, vol. 24, nº 3, pp. 51-64, 2018.
- [39] F. R. Viera e J. T. H, “Optimal Location of Towers in Power Transmission Lines Applying Dynamic Programming Reformulated,” *IEEE-PES.IEEE Magnetics*, 2006.
- [40] G. Mitra e K. Wolfenden, “A Computer Technique for Optimizing the Sites and Heights of Transmission Line Towers – A Dynamic Programming Approach,” *The Computer Journal*, vol. 10, nº 4, pp. 347-351, 1968.
- [41] W. d. S. Castro, “Posicionamento Ótimo de Para-raios em Linhas de Transmissão,” Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Belo Horizonte, 2016.
- [42] J. N. d. Figueiredo, “Aplicação de Métodos de Busca em Grafos com Nós Parcialmente Ordenados à Locação de Torres de Transmissão,” *Pesquisa Operacional*, vol. 23, nº 1, pp. 209-220, 2003.
- [43] Y. S. d. Silva e M. Mestria, “Algoritmos para o problema de localização de estações de carregamento de veículos elétricos,” *AEBPRO - Revista Produção Online*, pp. 290-320, 2019.

-
- [44] J. H. Holland, "Genetic Algorithms," *Scientific American*, vol. 267, pp. 66-72, 1992.
- [45] W. d. S. Castro, "Posicionamento Ótimo de Para-raios em Linhas de Transmissão," Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Belo Horizonte, 2016.
- [46] M. K. Benhachmi, D. Ouazar, A. Naji, A. Cheng e K. e. Harrouni, "Optimal Management in Saltwater-Intruded Coastal Aquifers By Simple Genetic Algorithm," em *First International Conference on Saltwater Intrusion and Coastal Aquifers*, Essaouira, Marrocos, 2001.
- [47] ANEEL, "ANEEL auction - transmission auction no. 02/2019-ANEEL," 2019. [Online]. [Acesso em 15 Agosto 2021].
- [48] G. O. S. M. e. al., "Metodologia de Locação de Torres de Linha de Transmissão Baseada em Programação Dinâmica," *Revista Brasileira de Energia*, vol. 24, nº 3, pp. 51-64, 2018.
- [49] S. Dasgupta, *Algoritmos*, São Paulo: McGraw Hill, 2009.
- [50] G. Mota, *Análise de Algoritmos e Estrutura de Dados*, UFABC - Universidade Federal do ABC, 2018.
- [51] R. Bellman, "The Theory of Dynamic Programming," *Bulletin of the American Mathematical Society*, 60(6), pp. 503-515, 1954.
- [52] G. Nemhauser, *Introduction to Dynamic Programming*, John Wiley and Sons, 1966.
- [53] ANEEL, "Anexo 2-01 Lote 01 - Características e Requisitos Técnicos Específicos," 2019.
- [54] E. Prestes, "Complexidade de Algoritmos - Inf UFRGS," [Online]. Available: <http://www.inf.ufrgs.br/~prestes/Courses/Complexity/aula17.pdf>. [Acesso em 12 Março 2022].
- [55] S. Dasgupta, *Algoritmos*, São Paulo: McGraw Hill, 2009.
- [56] T. Cormen, *Algoritmos: teoria e prática*, 3a ed., Campus, 2009.