



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO



Aliucha Morais Barbalho EMC/UFG, Ana Gabriela Machado de Jesus EMC/UFG

**APLICAÇÃO DE OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE  
PARTÍCULAS NO PROJETO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO  
AÉREAS DE EXTRA ALTA TENSÃO**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

## TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio do Repositório Institucional (RI/UFG), regulamentado pela Resolução CEPEC no 1240/2014, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei no 9.610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo dos Trabalhos de Conclusão dos Cursos de Graduação disponibilizado no RI/UFG é de responsabilidade exclusiva dos autores. Ao encaminhar(em) o produto final, o(s) autor(a)(es)(as) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

### 1. Identificação do Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação (TCCG)

Nome(s) completo(s) do(a)(s) autor(a)(es)(as): Aliucha Morais Barbalho / Ana Gabriela Machado de Jesus

Título do trabalho: Aplicação de otimização por enxame de partículas no projeto de linhas de transmissão aéreas de extra alta tensão

### 2. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador) Concorda com a liberação total do documento [ X ] SIM [ ] NÃO<sup>1</sup>

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante: a) consulta ao(à)(s) autor(a)(es)(as) e ao(à) orientador(a); b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo do TCCG. O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

#### Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro.

Obs.: Este termo deve ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.



Documento assinado eletronicamente por **Igor Kopcak, Professor do Magistério Superior**, em 30/06/2025, às 15:48, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ana Gabriela Machado De Jesus, Discente**, em 01/07/2025, às 16:39, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Aliucha Morais Barbalho, Discente**, em 01/07/2025, às 16:54, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **5470382** e o código CRC **5AAE828F**.

---

**Referência:** Processo nº 23070.015450/2025-35

SEI nº 5470382

Aliucha Morais Barbalho EMC/UFG, Ana Gabriela Machado de Jesus EMC/UFG

**APLICAÇÃO DE OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE  
PARTÍCULAS NO PROJETO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO  
AÉREAS DE EXTRA ALTA TENSÃO**

Trabalho de conclusão de curso orientado pelo Prof. Dr. Igor Kopcak que tem como objetivo conclusão de graduação do curso de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação da Universidade Federal de Goiás.

Orientador: Prof. Igor Kopcak, Dr.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do  
Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Barbalho, Aliucha Moraes

Aplicação de otimização por enxame de partículas no projeto de linhas de transmissão aéreas de extra alta tensão [manuscrito] / Aliucha Moraes Barbalho, Ana Gabriela Machado de Jesus. - 2025.  
xxvi, 26 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Igor Kopcak.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC), Engenharia Elétrica, Goiânia, 2025.

Bibliografia.

Inclui siglas, fotografias, abreviaturas, símbolos, gráfico, tabelas.

1. otimização. 2. linhas de transmissão. 3. extra alta tensão. 4. otimização por enxame de partículas. 5. pso. I. Jesus, Ana Gabriela Machado de. II. Kopcak, Igor, orient. III. Título.

CDU 621.3



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

## ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos 30 dias do mês de junho do ano de 2025 iniciou-se a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) intitulado “**Aplicação de otimização por enxame de partículas no projeto de linhas de transmissão aéreas de extra alta tensão**”, de autoria de **Aliucha Morais Barbalho e Ana Gabriela Machado de Jesus**, do curso de Engenharia Elétrica, da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC) da UFG. Os trabalhos foram instalados pelo Prof. Dr. Igor Kopcak (EMC/UFG) com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Profa. Dra. Lina Paola Garces Negrete (EMC/UFG) e Prof. Dr. Gelson Antônio Andrêa Brigatto (EMC/UFG). Após a apresentação, a banca examinadora realizou a arguição do(a) estudante. Posteriormente, de forma reservada, a Banca Examinadora atribuiu a nota final de 9,0 (nove), tendo sido o TCC considerado APROVADO.

Proclamados os resultados, os trabalhos foram encerrados e, para constar, lavrou-se a presente ata que segue assinada pelos Membros da Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Igor Kopcak, Professor do Magistério Superior**, em 30/06/2025, às 15:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Gelson Antonio Andrea Brigatto, Professor do Magistério Superior**, em 30/06/2025, às 15:48, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Lina Paola Garces Negrete, Professora do Magistério Superior**, em 30/06/2025, às 15:50, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **5470322** e o código CRC **52E89D35**.

# Aplicação de Otimização por Enxame de Partículas no Projeto de Linhas de Transmissão Aéreas de Extra Alta Tensão

*Aliucha Moraes Barbalho, EMC/UFG. Ana Gabriela Machado de Jesus, EMC/UFG*

**Resumo**— Este trabalho apresenta a implementação do algoritmo por enxame de partículas (PSO - *Particle Swarm Optimization*) no projeto de linhas de transmissão. O objetivo principal é evidenciar os benefícios do uso do algoritmo para percorrer um cenário complexo na avaliação da expansão das linhas aéreas de extra alta tensão, encontrando a melhor alternativa para redução de custos, considerando um conjunto de possibilidades para o número de condutores por feixe, variação na seção transversal dos condutores e espaçamento do arranjo geométrico do feixe. A aplicabilidade da ferramenta proposta foi motivada por dois estudos de caso para cenários de linhas de transmissão em países de extensão territorial substancial, cujos resultados comprovaram sua viabilidade como apoio ao projeto de linhas de transmissão. A aplicação do (PSO) mostrou-se eficaz na otimização de variáveis de projeto, como seção transversal do condutor, número de subcondutores e espaçamentos, permitindo a identificação de configurações que equilibram custos e desempenho elétrico. A ferramenta desenvolvida possibilita o registro estruturado dos parâmetros de entrada, a documentação dos resultados obtidos e a análise comparativa entre alternativas. Assim, contribui para o planejamento técnico-econômico de novas linhas, permitindo reduzir perdas, maximizar a capacidade de transmissão e promover maior eficiência no uso dos recursos. Dessa forma, a utilização de métodos meta-heurísticos como o PSO representa uma alternativa promissora para auxiliar engenheiros e planejadores na tomada de decisão em sistemas de transmissão de energia elétrica.

**Palavras-chave** – otimização, linhas de transmissão, minimização, custo, modelagem, extra alta tensão, perdas, otimização por enxame de partículas, pso.

**Abstract**— This work presents the implementation of the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm in transmission line design. The main objective is to highlight the benefits of using the algorithm to navigate a complex scenario in extra-high voltage (EHV) overhead transmission line expansion, identifying the optimal alternative for cost reduction. This is achieved by considering a set of possibilities for the number of subconductors per bundle, variations in conductor cross-sectional area, and spacing between subconductors within the same phase. The applicability of the proposed tool was motivated by two case studies involving transmission line scenarios in countries with substantial territorial extension. The results confirmed its feasibility as a support tool for transmission line design. The PSO algorithm proved effective in optimizing design variables such as conductor size, number of subconductors and spacing, enabling the identification of configurations that balance costs and electrical performance. The developed tool enables the structured recording of input parameters, documentation of the results obtained, and

comparative analysis of different alternatives. Thus, it contributes to the technical and economic planning of new lines by reducing losses, maximizing transmission capacity, and promoting more efficient use of resources. Therefore, the use of metaheuristic methods such as PSO stands out as a promising alternative to assist engineers and planners in decision-making for electric power transmission systems.

**Keyword** – optimization, transmission line, reduction, cost, modeling, extra high voltage, losses, particle swarm optimization, pso.

## I. INTRODUÇÃO

O projeto e construção de linhas de transmissão é uma etapa crucial para a expansão e manutenção da infraestrutura energética, dada a sua importância como conexão entre as fontes de geração de energia e seus consumidores.

O aumento contínuo da demanda energética ao longo das últimas décadas reforça a relevância do aprimoramento da rede de transmissão. A Composição Setorial de Consumo de Eletricidade de 1970 a 2023, Figura 1, evidencia um crescimento expressivo no consumo nacional, que passou de cerca de  $3 \times 10^6$  tep em 1970 para  $53 \times 10^6$  tep em 2023 [1]. Esse aumento reflete a expansão da atividade econômica e a elevação dos níveis de urbanização, industrialização e acesso à energia.

O setor industrial manteve-se como o maior consumidor de eletricidade ao longo de todo o período, seguido pelo setor residencial, que apresentou crescimento acentuado, sobretudo após os anos 2000. Os setores comercial, público e agropecuário também demonstraram aumento progressivo no consumo, enquanto os setores energético, de transportes e público mantiveram participação proporcionalmente menor, embora estável.

Este panorama reforça a importância de um planejamento robusto para a expansão da infraestrutura de transmissão, de modo a assegurar a continuidade e a confiabilidade no fornecimento de energia frente às crescentes demandas setoriais.

No Brasil, os estudos de planejamento da expansão de energia são realizados com base nas projeções de carga e na evolução prevista para a topologia da rede de transmissão. Essas análises são conduzidas pelos Grupos de Estudos de Transmissão (GET) da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), que realizam simulações de fluxo de potência e elaboram um diagnóstico preliminar das necessidades do sistema. Com base nesse diagnóstico, a EPE avalia a viabilidade técnica, econômica, social e ambiental de novos empreendimentos, de modo a garantir que as soluções propostas sejam adequadas para resolver os problemas previamente identificados no Sistema Interligado Nacional (SIN) [2].

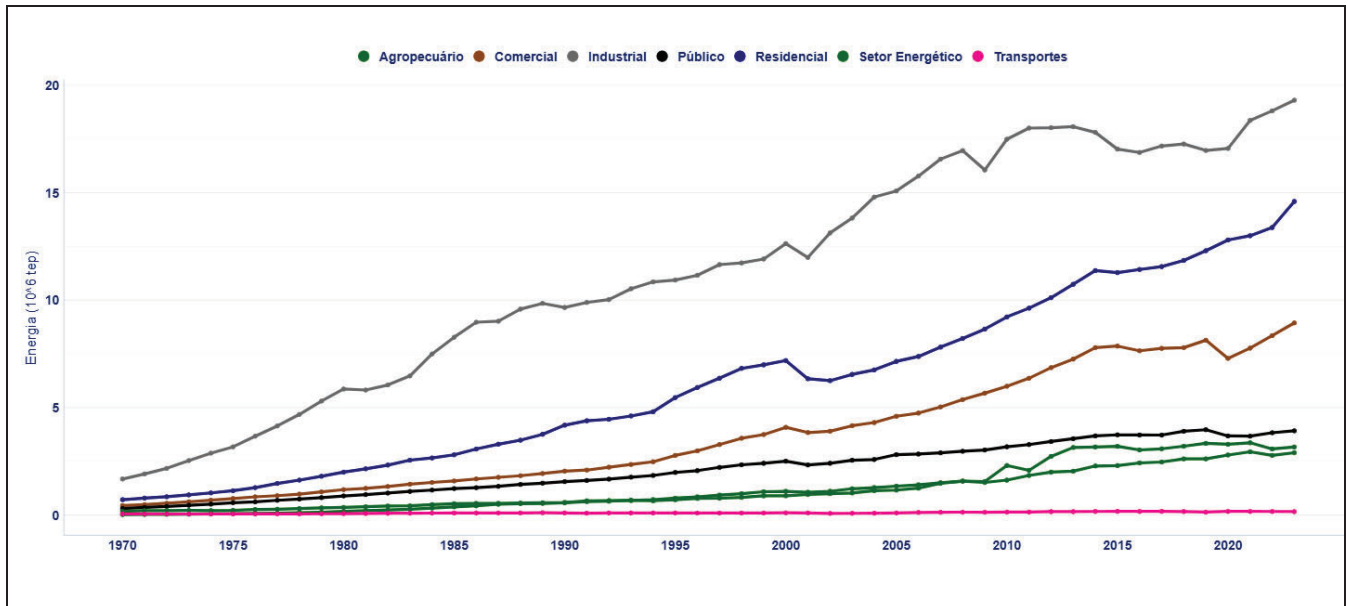


Figura 1 - Composição Setorial de Consumo de Eletricidade no Brasil de 1970 a 2023. [1]

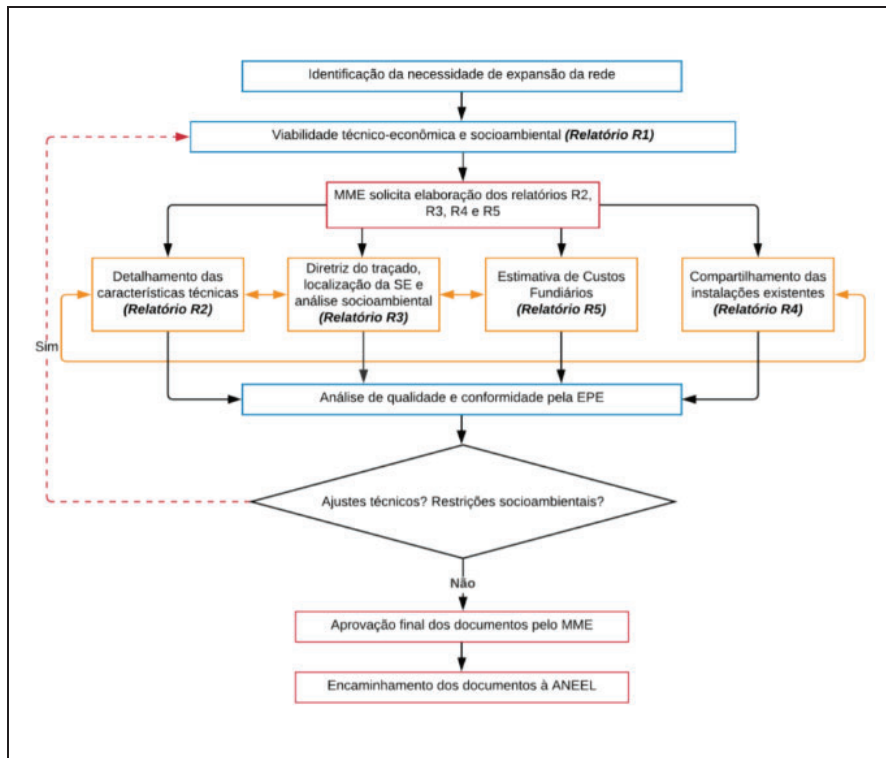


Figura 2 - Fluxograma da elaboração dos relatórios técnicos R1 a R5 da EPE. [3]

O processo de planejamento da expansão da transmissão tem início com a elaboração do Relatório R1, no qual a EPE avalia a viabilidade técnico-econômica e socioambiental dos empreendimentos propostos. Em seguida, essas obras são organizadas no documento Programa de Expansão da Transmissão (PET) que contempla as obras determinativas para os próximos seis anos e o Plano de Expansão de Longo Prazo (PELP) que apresenta obras indicativas para o período a partir do sétimo ano. Esses documentos subsidiam o Ministério de Minas e Energia (MME) na priorização das instalações de transmissão e sinalizam os investimentos futuros ao setor.

Com base nesses documentos, o MME elabora o Plano de Outorgas de Transmissão de Energia Elétrica (POTEE), que define

os empreendimentos a serem outorgados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), por licitação ou autorização. Quando se trata de licitação, o Relatório R1 deve ser complementado pelos relatórios R2 a R5, que detalham os aspectos técnicos, socioambientais, de compartilhamento de infraestrutura e os custos fundiários do projeto.

O fluxograma, mostrado na Figura 2, ilustra como esses relatórios se integram no processo de análise, aprovação e encaminhamento dos empreendimentos à ANEEL (EPE).

Como linhas de transmissão são projetadas para operarem por um longo período, além do custo inicial de investimento, os custos relacionados à operação também devem ser considerados [4].

O processo de estabelecimento dos custos explorando todas as possibilidades de otimização é complexo. Conciliar os múltiplos critérios, variáveis e restrições para garantir um sistema de transmissão eficiente, confiável e de baixo custo é um desafio devido à natureza combinatória e não linear do problema.

Assim, é imprescindível a busca por técnicas eficientes que descompliquem e auxiliem na obtenção de soluções econômicas e precisas para projetos no sistema elétrico.

A utilização do algoritmo de Otimização por Enxame de Partículas (PSO - *Particle Swarm Optimization*) objetivando reduzir os custos e alcançar precisão na escolha do nível de tensão para linhas longas de transmissão em extra alta tensão considerando o cenário australiano [4], revelou novas vias para explorar o máximo de alternativas em tempo hábil evitando a convergência para um resultado ótimo local limitado pela quantidade de alternativas consideradas. No entanto, os parâmetros alcançados não demonstraram coerência com as linhas de transmissão analisadas, devido o algoritmo [4] sugerir para linhas longas, especificamente, em extra alta tensão configurações de espaçamento, entre os condutores de um mesmo feixe, menores que 30 centímetros. Comprometendo a eficiência elétrica da linha, uma vez que a potência natural diminui com o aumento da indutância devido ao espaçamento próximo dos condutores.

As autoras deste trabalho, motivadas por essa lacuna, propõem, como objetivo geral modelar uma função matemática que represente os custos para implantação de uma linha de transmissão aérea de extra alta tensão e desenvolver uma ferramenta computacional a partir de um modelo de otimização metaheurístico, especificamente o PSO, para auxiliar no projeto de linhas de transmissão visando: a minimização dos custos, garantir a maximização da eficiência do sistema, considerar os principais parâmetros técnicos e econômicos envolvidos que resultem em configurações viáveis a cenários complexos reais.

A relevância deste estudo está na possibilidade de oferecer uma ferramenta computacional eficaz para engenheiros e projetistas do setor elétrico. O uso de técnicas de otimização avançadas como o PSO, ao permitir a análise de um vasto número de cenários e a identificação de soluções ótimas globais, representa um avanço significativo na engenharia de linhas de transmissão, proporcionando maior robustez e confiabilidade aos projetos.

Para melhor compreensão, este trabalho está estruturado da seguinte forma: a Seção II apresenta os conceitos teóricos fundamentais sobre linhas de transmissão e metaheurística de Otimização por Enxame de Partículas (PSO), além dos seus princípios e funcionamento. A Seção III descreve a metodologia proposta para a aplicação da PSO no projeto de linhas de transmissão, incluindo a formulação do problema de otimização. Na Seção IV, são apresentados os resultados dos estudos de caso e a discussão das análises realizadas. Finalmente, a Seção V apresenta as conclusões do trabalho e as sugestões para futuras pesquisas.

## II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### A. Linhas de Transmissão Trifásica

Ao projetar alternativas para a construção ou expansão de linhas de transmissão, considera-se o uso de estruturas que melhor se adequem às condições socioambientais e à viabilidade técnica de implantação. Além disso, são definidas as condições iniciais do projeto com base em critérios elétricos e na capacidade requerida de transmissão, de modo a garantir o desempenho adequado, a segurança operacional e a eficiência do sistema [5].

As linhas de transmissão são projetadas para garantir o fornecimento eficiente de grandes blocos de energia com baixas perdas e alta confiabilidade. Operam em níveis de tensão elevados (acima de 69 kV), classificando-se em alta, extra alta e ultra alta tensão, conectando os centros de geração aos centros de carga, geralmente por longas distâncias.

Classificação quanto ao Nível de Tensão:

- a. Alta Tensão → acima de 69 kV
- b. Alta Tensão → acima de 230 kV
- c. Alta Tensão → acima de 800 kV

A constituição de uma linha de transmissão envolve um conjunto de componentes essenciais que operam de forma integrada para assegurar seu funcionamento. Dentre os elementos principais, destacam-se os condutores, que efetivamente transportam a energia elétrica; os isoladores, responsáveis por isolar os condutores energizados das estruturas de suporte; os cabos-guarda, posicionados no topo para proteger a linha contra descargas atmosféricas; e as fundações, que garantem a ancoragem das torres.

Dentre os elementos estruturais relevantes na modelagem de linhas de transmissão, destacam-se as estruturas de suporte, comumente denominadas torres de transmissão. Essas torres são responsáveis por sustentar os condutores e os componentes isolantes da rede a uma altura segura do solo e garantir o espaçamento adequado entre fases e entre os condutores, evitando descargas elétricas e perdas por efeito corona.

Elas são classificadas conforme sua função, tipo construtivo e disposição dos condutores, sendo caracterizadas da seguinte forma [6]:

### 2. Classificação por Sustentação

As estruturas podem ser classificadas pela sua forma de resistir às cargas verticais e horizontais atuantes, sendo:

- a. Estruturas Autoportantes

Os esforços são transmitidos diretamente para as fundações das torres. Podem ser rígidas, flexíveis ou mistas ou semirrígidas.

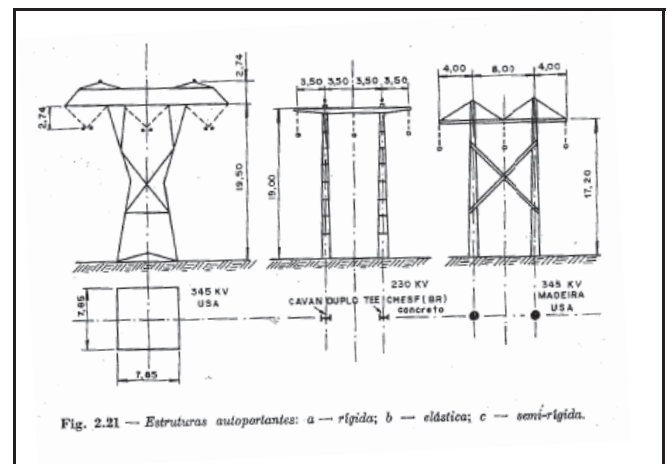


Figura 3 - Estruturas autoportantes. [6]

- b. Estruturas Estaiadas

Utilizam cabos para transmitir parte dos esforços horizontais para o solo através de âncoras, tornando a torre mais leve e econômica.

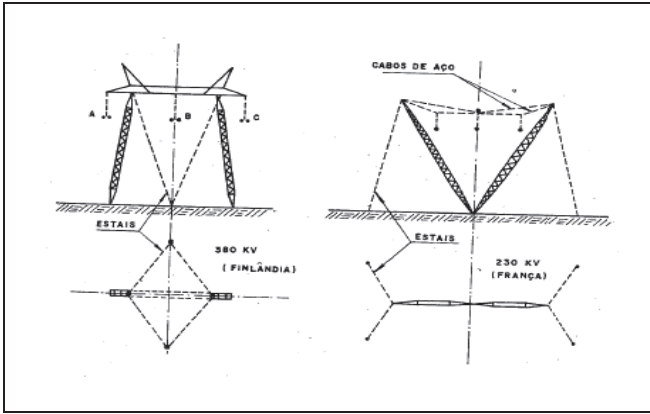


Figura 4 - Disposição Triangular. [6]

3. Classificação por Função

As classificações quanto à função na linha das torres são:

- a. Estruturas de Suspensão
- b. Estruturas de Ancoragem
- c. Estruturas de Ângulos
- d. Estruturas de Derivação
- e. Estruturas de Transposição
- f. Estruturas de Travessia

4. Classificação por quantidade de circuitos na mesma torre

- a. Circuito simples
- b. Circuito duplo
- c. Circuito quádruplo

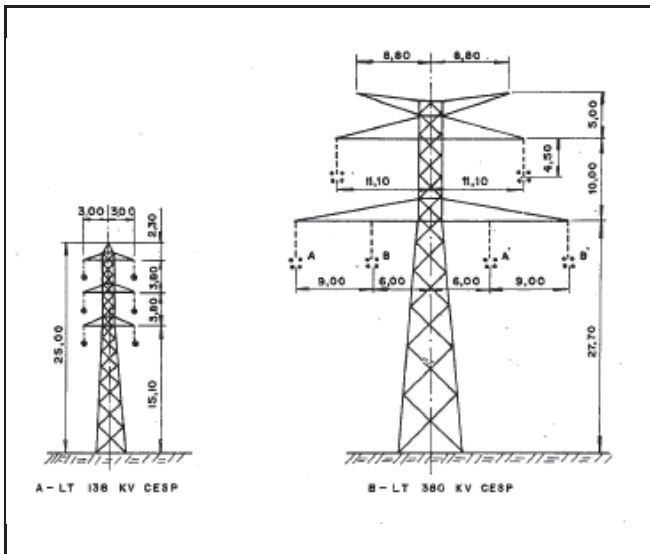


Figura 5 - Linhas de circuito duplo com disposição vertical e triangular respectivamente. [6]

5. Disposição dos condutores nas estruturas

Nas linhas trifásicas empregam-se três disposições de condutores:

- a. Disposição Triangular.

Condutores dispostos segundo os vértices de um triângulo. A Figura 6 mostra exemplos de disposição eletricamente simétrica e assimétrica respectivamente.

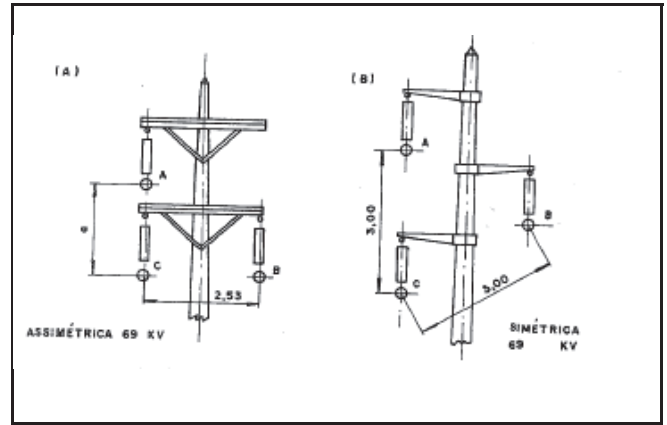


Figura 6 - Disposição Triangular a) assimétrica e b) simétrica. [6]

b. Disposição Horizontal.

Condutores dispostos em um mesmo plano horizontal. A Figura 7 mostra exemplos desta disposição, que é a preferida para linhas com circuitos simples.

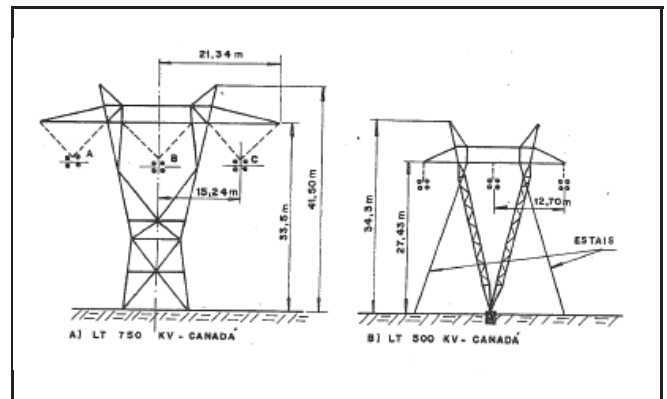


Figura 7 - Disposição horizontal. [6]

c. Disposição Vertical.

Condutores dispostos em um mesmo plano vertical. A Figura 8 mostra exemplos desta disposição, que é a preferida para linhas com circuitos duplos.

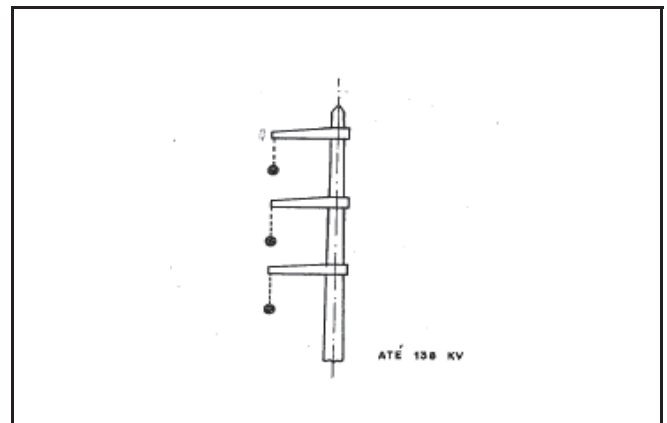


Figura 8 - Disposição vertical. [6]

B. Parâmetros das linhas de transmissão

As linhas de transmissão são representadas por modelos compostos por resistores, indutores e capacitores. Para as linhas curtas o circuito equivalente é o visto na Figura 9.

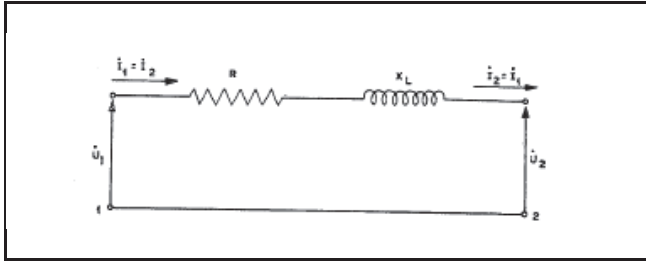


Figura 9 - Circuito equivalente de uma linha curta. [6]

Para linhas de transmissão de comprimento médio, tanto o modelo equivalente em T (Figura 10) quanto o modelo π (Figura 11) podem ser utilizados. No entanto, o modelo π é preferido por proporcionar maior simplicidade na representação dos nós, o que facilita a formulação das equações nodais em sistemas elétricos de grande porte. [6]

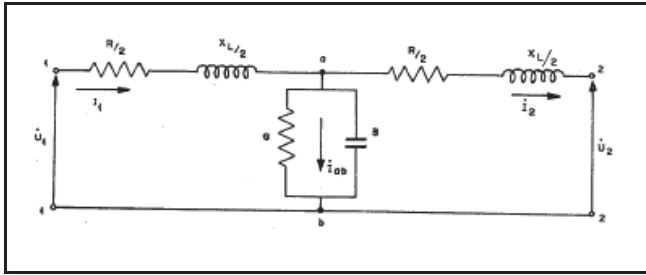


Figura 10 - Circuito T de uma linha de transmissão. [6]

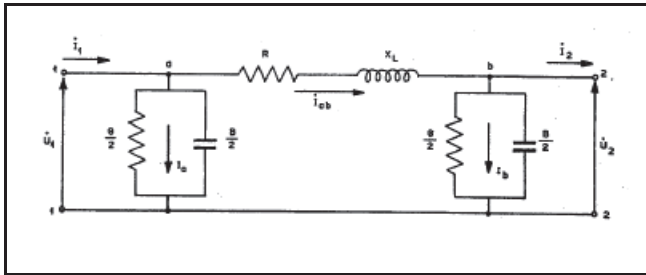


Figura 11 - Circuito pi de uma linha de transmissão. [6]

Para linhas de transmissão longas, admite-se o uso do modelo π equivalente, desde que sejam aplicadas correções nos parâmetros elétricos de impedância série (Z) e admitância shunt (Y), a fim de representar com maior fidelidade os efeitos distribuídos ao longo da linha.

A modelagem da configuração das linhas de transmissão influencia diretamente os parâmetros elétricos e o desempenho da linha. O principal objetivo desta modelagem é aumentar a capacidade de transmissão e reduzir as perdas, garantindo que a maior parte da energia gerada seja efetivamente entregue aos consumidores. Esse processo envolve a definição da seção transversal dos condutores, do número de condutores por fase, do arranjo geométrico dos feixes, dos espaçamentos entre condutores do mesmo feixe, do espaçamento entre as fases e o espaçamento entre os circuitos. Além disso, fatores como a altura dos condutores em relação ao solo e a seleção dos equipamentos de isolamento elétrica

e térmica das torres também impactam a capacidade de transmissão [4].

Considerando a operação em regime permanente na frequência fundamental de 60 Hz, os parâmetros de sequência positiva, impedância (Z+) e admitância (Y+), são os mais relevantes para a análise e otimização do desempenho da linha [7].

A corrente de operação de linhas trifásicas é obtida como se segue na Equação 1:

$$I = \frac{Pn}{\sqrt{3}.U.FP} \tag{1}$$

Pn: Potência natural da linha (W).

U: Tensão eficaz entre as fases (V).

FP: Fator de potência da linha.

A corrente elétrica nos condutores produz um campo magnético que enlaça os cabos da própria fase, os cabos das fases vizinhas e os cabos guarda. Os fenômenos relacionados aos efeitos desses campos magnéticos sobre o comportamento da linha de transmissão podem ser representados por meio de indutâncias. De forma simplificada, desprezando-se o efeito do solo e dos cabos guarda, a indutância por fase da LT pode ser calculada por (2), na qual RMG é o Raio Médio Geométrico (4) e DMG é a Distância Média Geométrica (5).

$$L = 2 \times 10^{-7} \ln \left( \frac{DMG}{RMG} \right) \tag{2}$$

L: Indutância Equivalente por fase (H/km)

Da mesma forma, os efeitos dos campos elétricos devidos aos condutores carregados podem ser representados por capacitâncias, calculadas a partir das diferenças de potencial entre eles. Desprezando-se os efeitos do solo e dos cabos guarda, a capacitância por fase pode ser calculada de forma aproximada por (3).

$$C = \frac{5,56 \times 10^{-11}}{\ln \left( \frac{DMG}{RMG} \right)} \tag{3}$$

C: Capacitância Equivalente por fase (F/km)

Definidos pelos parâmetros de geometria da linha, orientados pela estrutura das torres de transmissão os parâmetros utilizados em (2) e (3) podem ser calculados por (4), (5), e (6).

$$DMG = \sqrt[3]{D_{ab}D_{bc}D_{ca}} \tag{4}$$

Dab: Distância entre as fases a e b (m)

Dbc: Distância entre as fases b e c (m)

Dca: Distância entre as fases c e a (m)

$$RMG = \sqrt[n]{n R^{n-1} RMG_{cabo}} \quad (5)$$

n: número de subcondutores do feixe

R: Raio do feixe com disposição geométrica simétrica (m)

RMGcabo: Raio médio geométrico do cabo (m)

Neste trabalho, serão considerados apenas feixes organizados em forma de polígonos regulares.

A equação (6) representa o raio do círculo que circunscreve o feixe de cabos, em que d é a distância entre os condutores que compõe o feixe, como ilustra a Figura 12, para feixes de 2, 3 e 4 cabos.

$$R = \frac{d}{2 \text{sen}(180/n)} \quad (6)$$

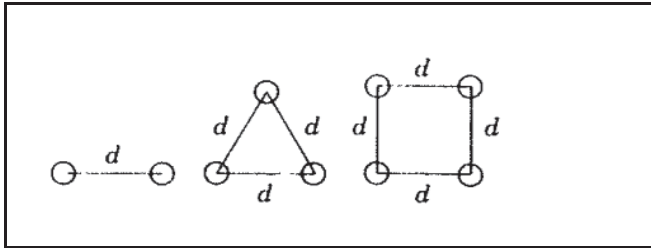


Figura 12 – Exemplo de feixes de condutores com 2, 3 e 4 condutores organizados com espaçamento regular, d. [8]

A indutância e capacitância definem a impedância característica da rede (7).

$$Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (7)$$

A potência natural (8) em MW depende da impedância característica ( $Z_c$ ) em ohms e da tensão de linha (U) em Volts empregada na linha.

$$P_n = \frac{U^2}{Z_c} \quad (8)$$

A capacidade de transmissão de uma linha pode ser caracterizada numericamente pela sua potência natural ( $P_n$ ), definida como a potência ativa transmitida quando há equilíbrio entre a energia reativa gerada pela capacitância da linha e a energia reativa consumida por sua indutância. Nessa condição, a linha opera em regime de compensação natural, não sendo necessário o uso de dispositivos externos de compensação reativa [7]. Essa condição representa o ponto ótimo de operação da linha em termos de transferência de potência, minimizando o efeito da potência reativa na linha.

### C. Efeito Corona

A magnitude do campo elétrico ao redor dos condutores é um fator determinante para a ocorrência do efeito corona, que se manifesta quando esse campo excede a rigidez dielétrica do ar, provocando descargas parciais entre os condutores. Esse fenômeno resulta em perdas energéticas, ruídos audíveis e interferências eletromagnéticas, sendo particularmente relevante em linhas de alta e extra alta tensão.

Com o objetivo de mitigar o efeito corona e controlar o campo elétrico ao redor dos condutores, J.B. Whitehead patenteou, em 1910, o conceito de enfeixamento de condutores por fase (*bundle conductors*), conforme documentado por H. Huang et al [9]. No entanto, o uso sistemático dessa técnica só passou a ser amplamente discutido e documentado a partir da década de 1960, com os estudos de Abetti et al [10].

Além das perdas por descargas elétricas associadas ao efeito corona, a circulação de corrente elétrica nos condutores também gera perdas térmicas por meio do efeito Joule, nas quais parte da energia elétrica é convertida em calor. Tais perdas impactam diretamente a eficiência da linha e sua capacidade de transmissão [11].

Desta forma, o aumento dos condutores por fase, arranjados em feixes (Figura 12), contribui para a redução das perdas ativas (9) e reativas durante a operação da linha.

Neste trabalho, serão consideradas apenas as perdas de potência ativa devidas à resistência série dos condutores, conforme (9).

$$P = 3 \cdot (I)^2 \cdot R_e \quad (9)$$

I: Corrente de Operação (A)

$R_e$ : Resistência equivalente por fase ( $\Omega$ ) dada por (10).

$$R = \frac{\rho l}{A} \quad (10)$$

$\rho$ : Resistividade do Alumínio ( $\Omega.m$ )

l: Comprimento da linha (m)

A: Área da seção transversal do condutor ( $m^2$ )

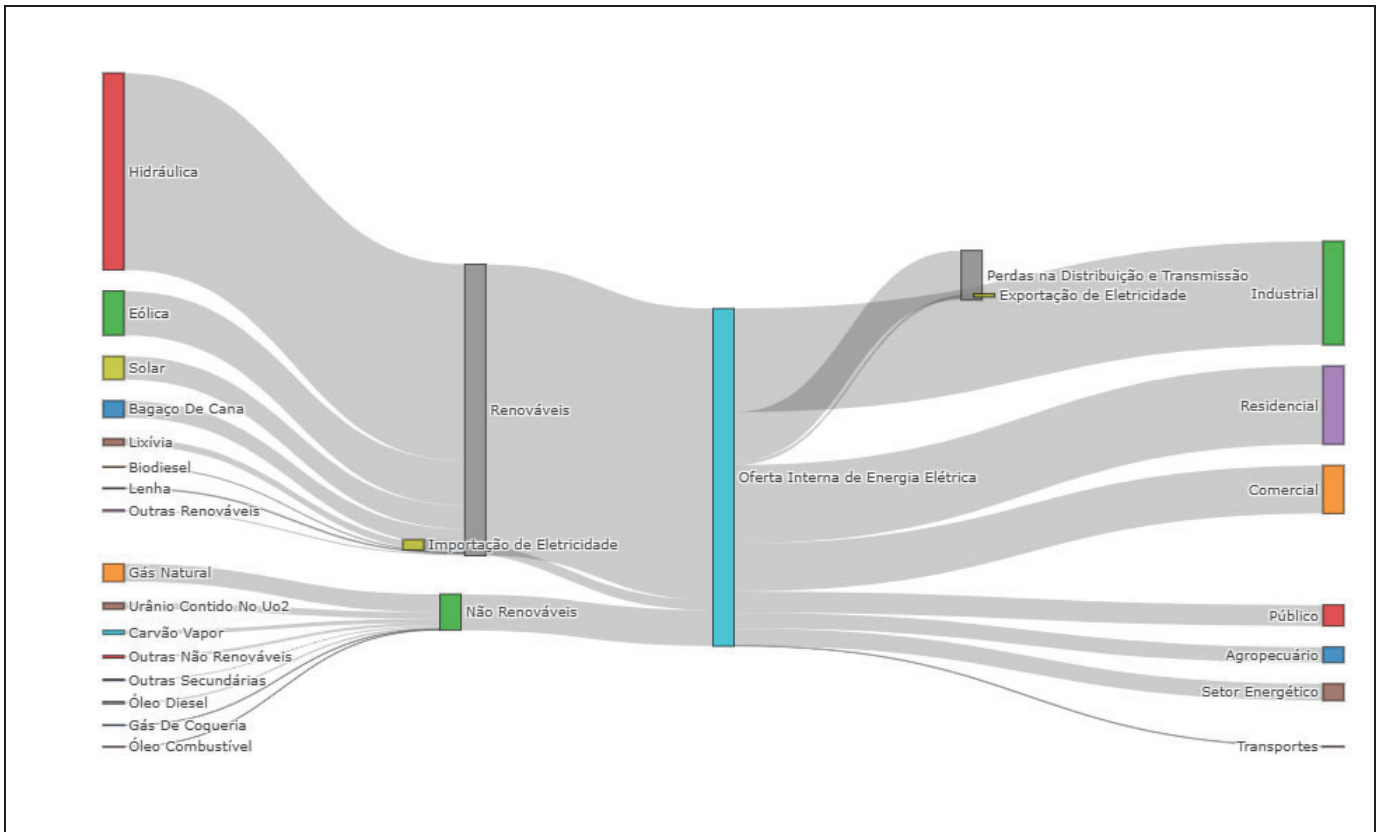


Figura 13 - Fluxo Elétrico no Brasil em 2023. [1]

A redução das perdas ao longo da linha é fundamental para a eficiência do sistema elétrico como um todo. A relevância desse aspecto é evidenciada por dados da EPE, que apontam que, em 2023, aproximadamente 15% da oferta interna de energia elétrica no Brasil foi perdida nos processos de distribuição e transmissão, totalizando 106.916 GWh [1], conforme Figura 13.

#### D. Custos

Do ponto de vista da minimização de custos, o uso de condutores com menor diâmetro seria a escolha mais econômica. No entanto, em linhas de extra alta tensão, essa solução se torna inviável, pois condutores de pequena seção transversal favorecem a ocorrência do efeito corona, bem como apresentam maior resistência, implicando em maiores perdas.

Para mitigar essas perdas, uma abordagem comum é o aumento da seção transversal dos condutores, o que contribui para a redução da resistência e da reatância indutiva, além de aumentar a capacitância da linha e conseqüentemente o aumento da área transversal do fio, aumenta a passagem de corrente. No entanto, essa solução implica em um acréscimo significativo no custo dos condutores.

Como alternativa, adota-se o uso de múltiplos condutores por fase, dispostos em feixes, o que permite a diminuição da reatância e das perdas associadas, sem a necessidade de aumentar individualmente o diâmetro de cada condutor. Contudo, o aumento no número de condutores também eleva os custos totais do sistema, não apenas pelos materiais condutores adicionais, mas também pela necessidade de estruturas mais robustas para suportá-los.

Dessa forma, torna-se imprescindível buscar um equilíbrio entre o custo de implantação dos condutores (e suas estruturas associadas) e os custos operacionais relacionados às perdas elétricas. Esse compromisso é fundamental para garantir a viabilidade técnica e

econômica do projeto de linhas de transmissão de alta e extra alta tensão.

A maior parte dos custos de operação se dão devido às perdas de potência ativa e reativa, enquanto o custo dos condutores é aproximadamente 30% do custo total da linha de transmissão [12].

A variação do espaçamento entre os condutores de um feixe também é um fator relevante no projeto de linhas de transmissão. Um maior espaçamento contribui para a redução da reatância indutiva e do campo elétrico superficial, aumentando a capacidade de transmissão da linha e mitigando o efeito corona. No entanto, essa medida implica em um aumento nos custos estruturais, uma vez que requer suportes mecânicos mais robustos e torres com maiores dimensões. Assim, a definição do espaçamento ideal deve considerar o compromisso entre o desempenho elétrico e a viabilidade econômica da infraestrutura.

#### E. Otimização por Enxame de Partículas

Os métodos de otimização metaheurística consistem em abordagens genéricas para resolver problemas complexos de otimização, frequentemente caracterizados por não linearidades, resultando em uma aplicação adequada à otimização dos custos de sistemas de transmissão de energia.

Entre os métodos, a otimização por enxame de partículas (PSO, do inglês *Particle Swarm Optimization*) é um algoritmo inspirado no comportamento coletivo de partículas, utilizando princípios de abstração derivativos da natureza para explorar eficientemente espaços de busca.

O PSO utiliza uma estratégia de otimização estocástica que simula o comportamento de bio-cooperação de pássaros através da atualização iterativa de suas posições avaliando os melhores candidatos à solução. Essa busca é orientada por parâmetros de

performance pré-definidos, convergindo para ótimos locais ou globais [13].

No algoritmo, cada pássaro é representado por uma partícula que explora posições candidatas no espaço de solução definido pela função objetivo, conforme apresentado na Figura 14, que replica a modelagem gráfica [14] encontrada na literatura para representar essa abstração. Essa abordagem é inspirada metaforicamente no comportamento coletivo de aves em busca de recursos. Encontrar o ponto de interesse localizando ótimos locais ou globais é análogo a buscar a região com melhor disponibilidade de recursos no contexto biológico aos pássaros [13].

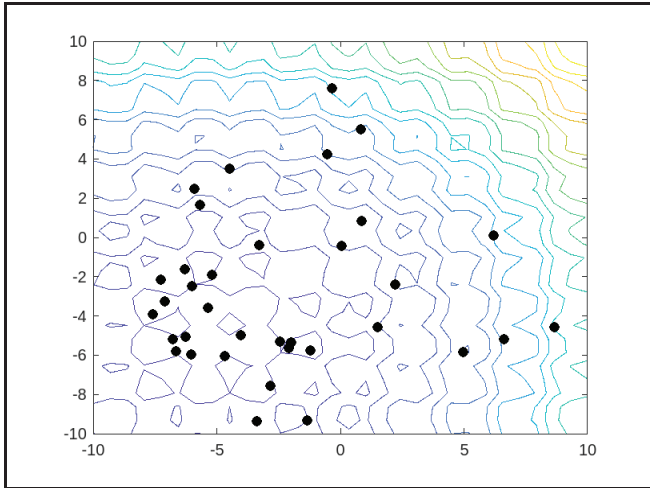


Figura 14 - Inicialização aleatória das partículas. Fonte: Próprios autores.

A função objetivo é a função matemática que modela o problema a ser otimizado. Neste trabalho, a função objetivo é a função custo. A otimização por enxame de partículas deve executar para n-entradas a função custo e armazenar os resultados gerados comparando-os para maximizar ou minimizar a função a cada laço de repetição dentro de um número máximo de iterações previamente definido.

Cada partícula é composta por 3 vetores posição que mantém memória da sua posição atual, melhor posição local e melhor posição global (Figura 15). Os vetores posição armazenam os valores de entrada a serem otimizados, enquanto os resultados gerados por essas entradas e a velocidade com que a partícula se move no espaço de busca são armazenados para cada partícula.

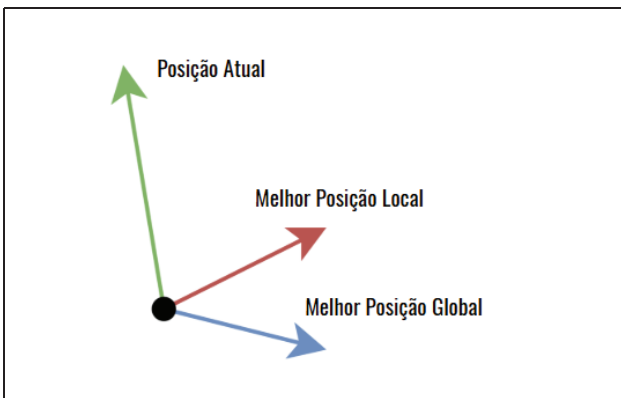


Figura 15 – Representação dos vetores direção de uma partícula. Fonte: Próprios autores.

A cada iteração as partículas avaliam sua posição atual no espaço de busca n dimensional, conforme os critérios estabelecidos pela

função objetivo, visando identificar sua melhor posição local. Esta posição ótima local corresponde ao vetor posição da partícula que pode maximizar ou minimizar o valor da função objetivo naquela região do espaço [15].

Posteriormente, o algoritmo PSO avalia a melhor solução encontrada por partícula, armazenando o valor ótimo global e a posição associada a este resultado. Estes valores são centralmente compartilhados com todas as partículas do enxame. Dessa forma, as partículas possuem acesso a uma memória coletiva contendo a melhor solução global e melhor posição global [15].

A posição de cada partícula (11) é atualizada através da soma de sua posição anterior com sua velocidade atual. A velocidade da partícula é composta pelos vetores posição (12) e uma velocidade inicial.

$$Px = X + V \tag{11}$$

X: Posição Anterior

V: Velocidade Atual

Estabelecendo o melhor local de cada partícula e o melhor global entre todas as partículas é possível definir os novos parâmetros de velocidade que definirão as novas direções para cada partícula. Dessa forma a velocidade é definida em (12):

$$V = w.V + c1.r1.(Plocal - X) + c2.r2.(Pglobal - X) \tag{12}$$

A atualização da velocidade incorpora um peso de inércia (w) que modula a influência da velocidade anterior. Adicionalmente, os vetores de melhor posição local (Plocal) e melhor posição global (Pglobal) são ponderados por coeficientes cognitivos sociais, c1 e c2, respectivamente. Esses parâmetros são combinados com termos estocásticos r1 e r2.

A cada iteração, o balanço entre exploração (busca em novas regiões) definido por c1 e profundidade (refinamento local) definido por c2 é dinamicamente ajustado mediante os vetores posição, velocidade das partículas e solução global. Esse mecanismo permite atingir zonas maiores do espaço de busca, enquanto restringe as trajetórias individuais das partículas (Figura 16).

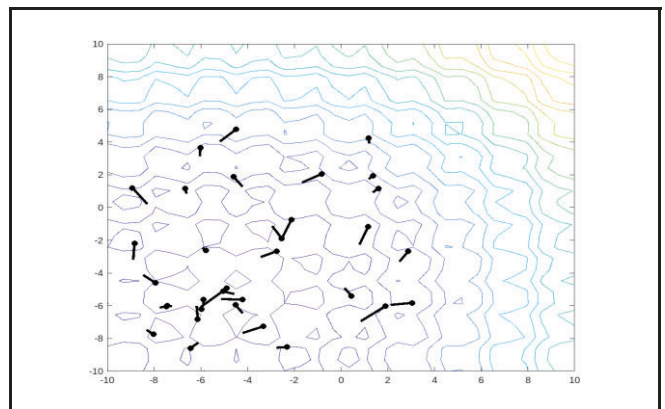


Figura 16 - Aumento do grau de exploração. Fonte: Próprios autores.

À medida que o enxame começa a convergir para regiões promissoras é intensificado o grau de profundidade das buscas locais (Figura 17), permitindo a avaliação do melhor resultado de n-soluções em uma zona de maior densidade de ótimos. Esta transição eleva a probabilidade de identificação de ótimos locais ou globais.

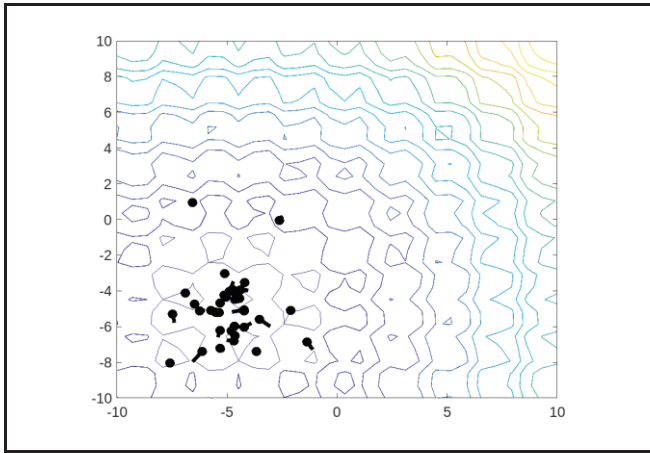


Figura 17 - Aumento do grau de profundidade. Fonte: Próprios autores.

Apesar do paradigma do algoritmo abstrair o comportamento de revoada ou bando de pássaros, o seu comportamento real é mais bem definido como um enxame de partículas [15].

Conforme literatura [14] [15] a aplicação do enxame de partículas pode ser otimizada através da análise das curvas de convergência que avaliam os resultados por iteração do algoritmo. Os estudos [13] [16] sugerem a implementação de diferentes funções objetivo para analisar o comportamento da convergência do PSO, sendo elas: as funções lineares, as funções não lineares unimodais, as funções com penalidades extremamente altas e as funções com penalidades finitas.

### 1. Funções Lineares

Inicialmente, a função objetivo (13) é intencionalmente modelada como uma função linear [14].

$$o = f(x) = x + 5 \tag{13}$$

Conforme discutido anteriormente, o intuito final do algoritmo é reduzir os custos de linhas de transmissão. Nestes estudos, o PSO foi definido para minimizar as funções objetivo avaliadas.

É possível concluir em (13) que dentre  $n$  – possibilidades de entrada que chegaram à solução ideal, o valor ótimo de  $x$  será a menor entrada possível. Em um conjunto de números naturais essa resposta se limitaria ao valor zero e em um conjunto de números inteiros essa resposta seria o menor valor negativo possível.

Alguns valores de entrada ao alcançarem a menor solução possível podem ser considerados valores de entrada irreal/infinitos para aplicação em cenários complexos reais. A correção do espaço de busca para incluir apenas valores reais é feita através da inclusão de valores de limite superiores e inferiores no algoritmo do PSO.

Após aplicação dos limites, o espaço de busca é limitado para valores de entrada realísticos e é denominado cenário de busca [16].

Para a função objetivo definida em (13) e limites inferiores e superiores, respectivamente [-10:10], a resposta do algoritmo para

quinhentas iterações é a entrada ( $x$ ) determinada em -10 e a saída ( $o$ ) resultante em -5, conforme Figura 17 e Figura 19.

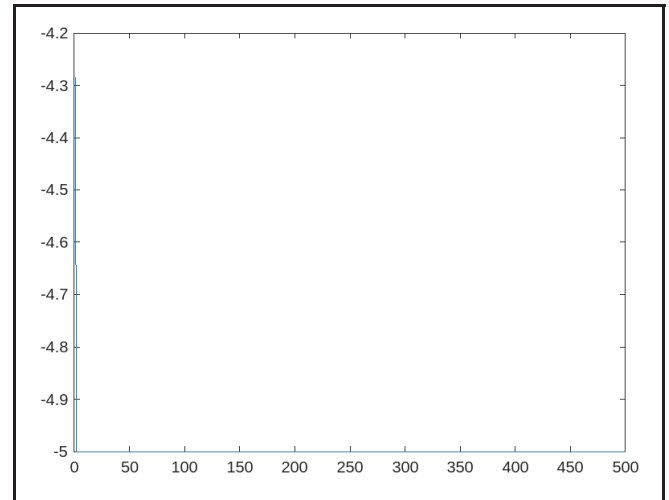


Figura 19 - Resposta a função linear. Fonte: Próprios autores.

### 2. Funções Não-lineares Unimodais

A partir do estudo do comportamento do algoritmo para funções lineares com e sem inserção de limites, a função objetivo pode ser definida para uma função não-linear (14) que resulta na soma do quadrado das entradas.

$$o = f(x) = soma(x^2) \tag{14}$$

A escolha da função objetivo (14) é estratégica, pois mesmo em um intervalo de valores inteiros o PSO encontrará seu valor mínimo em entradas próximas à zero devido a característica da função quadrática. O ponto de mínimo desta função pode ser estabelecido visualmente (Figura 20).

Avaliando o cenário de busca através da expressão gráfica da função objetivo (14), limitada em alguns pontos para poupar recursos computacionais na geração do gráfico (eixo x: -10:10; eixo y: -10:10; eixo z: 0:200). É possível visualizar na Figura 20, tanto pelas cores frias geradas quanto pela forma da curva e pelos eixos do gráfico, a região de maior probabilidade de valores ótimos globais da função.

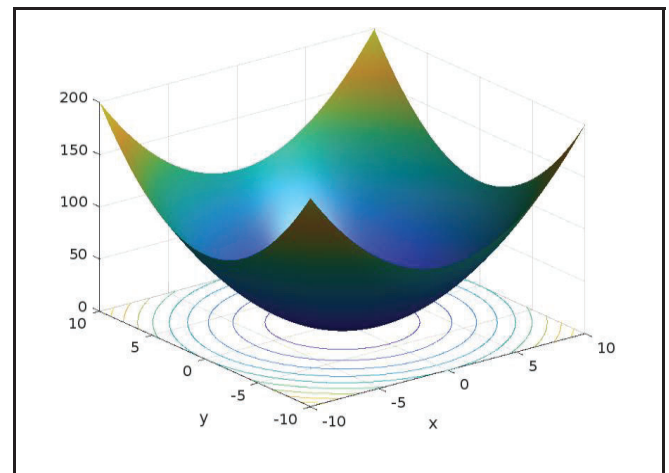


Figura 20 - Gráfico de uma função unimodal. Fonte: Próprios autores.

O gráfico exemplificado na Figura 20, demonstra que os valores de ótimos globais são iguais aos valores ótimos locais da função (14), correspondendo ao cenário denominado unimodal [16].

Para cenários unimodais como a função objetivo (14) poderíamos substituir o algoritmo PSO por algoritmos tradicionais determinísticos, como por exemplo o algoritmo de gradiente descendente. Para cenários de busca não lineares e multimodais (Figura 21) é necessário a utilização de algoritmos modernos e estocásticos como o PSO.

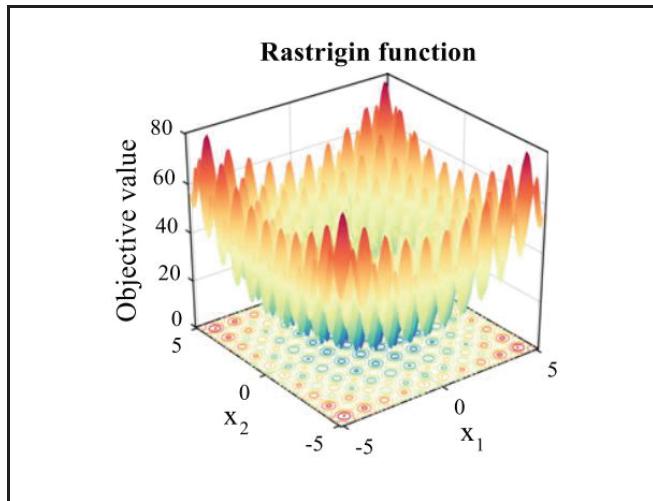


Figura 21 – Função teste Rastrigin multimodal. Fonte: [16].

### 3. Funções com Penalidades Extremamente Altas

Antes de aumentar a complexidade da função objetivo, utiliza-se da função anterior para analisar o uso de restrições aplicadas ao PSO. Na função objetivo (14) aplica-se restrições para x a partir de inequações (15):

$$\begin{aligned} x[2] &\leq 3,2 \text{ ou } x[2] \geq 6,2 \\ x[1]^2 + x[2]^2 &\geq 1 \\ x[1] &\neq x[2] \end{aligned} \tag{15}$$

Para valores fora da restrição, uma penalidade alpha é adicionada à função objetivo  $f(x)$  (15). Definindo uma função ( $ft$ ) de aptidão (fitness) [16] que avalia a qualidade da solução (16).

$$\begin{aligned} \alpha &= \infty; \\ ft &= f(x) + \alpha; \end{aligned} \tag{16}$$

O gráfico resultante da análise da penalidade infinita é apresentado na Figura 22.

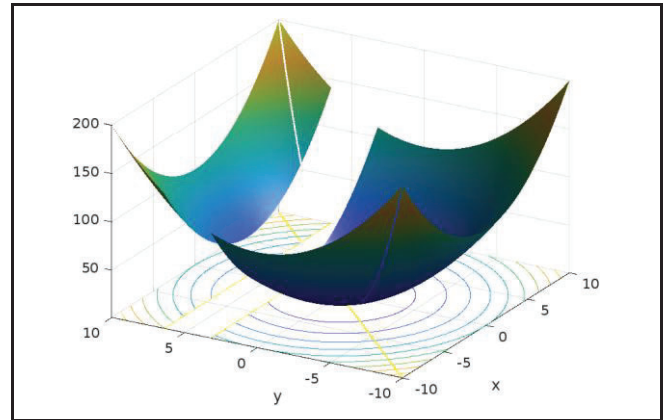


Figura 22 - Aplicação da penalidade infinita. Fonte: Próprios autores.

É possível observar que ao aplicar uma penalidade infinita o algoritmo cria quebras ou vãos no gráfico. Ao definir uma penalidade extremamente alta, partículas com soluções viáveis próximas à fronteira podem ser descartadas impactando o comportamento do algoritmo em sua eficiência de busca e viabilidade de soluções.

### 4. Funções com Penalidades Finitas

Ao modificar a penalidade da função objetivo para um número finito (17), permite-se a exploração das regiões de fronteira [16].

$$\begin{aligned} \alpha &= 2000; \\ ft &= f(x) + \alpha; \end{aligned} \tag{17}$$

O gráfico resultante da análise da penalidade finita é apresentado na Figura 23.

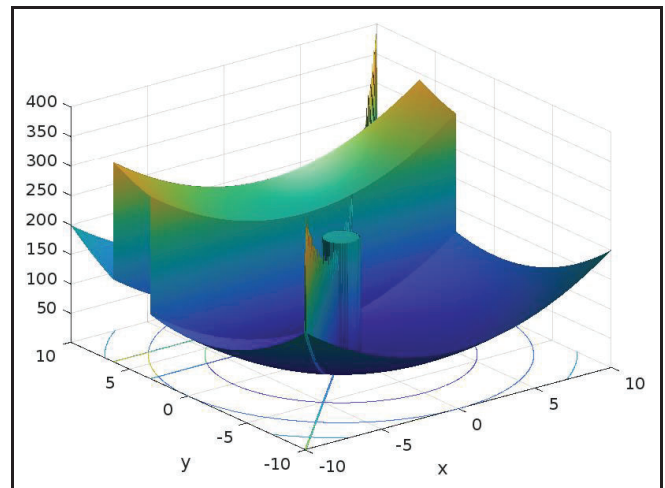


Figura 23 - Aplicação da penalidade finita. Fonte: Próprios autores.

Conforme análises recomendadas pela literatura, é possível avaliar a qualidade das soluções através da função aptidão (fitness), implementando no PSO restrições que podem ser penalizadas. Portanto, o PSO é um algoritmo simples e bastante efetivo para otimizar um número de funções não-lineares contínuas [15] semelhante a função custo a ser modelada, permitindo evitar estagnação em pontos de ótimos locais e se torna independente dos pontos de localização iniciais para encontrar o melhor resultado global devido a utilização de parâmetros aleatórios.

### III. METODOLOGIA

A metodologia utilizada neste projeto baseou-se em:

- a) Compilação e estudo da literatura referente a otimização por enxame de partículas;
- b) Compilação e estudo da literatura referente a projetos de linhas de transmissão;
- c) Estabelecimento das variáveis de entrada a serem consideradas na modelagem da função custo;
- d) Modelagem matemática da função custo para linhas de transmissão aéreas de extra alta tensão;
- e) Estudo de caso 1 - simulando situações analisadas pelo artigo motivador;
- f) Estudo de caso 2 - simulando situações analisadas pelo relatório da EPE;
- g) Desenvolvimento de uma ferramenta computacional para o auxílio na elaboração de projetos de linhas de transmissão, utilizando ferramentas do Matlab Online e Octave;
- h) Análise, comparação dos estudos e conclusão dos resultados a partir dos dados gerados.

A simplicidade de implementação do algoritmo de otimização por enxame de partículas (PSO – *Particle Swarm Optimization*), dentre os algoritmos de otimização metaheurísticos modernos encontrados na literatura, foi o fator crucial para determinar sua implementação neste estudo de graduação. A inicialização aleatória do enxame de partículas em funções não-lineares é considerada vantajosa, especialmente, para estabelecer resultados independentes dos valores de inicialização das partículas no cenário de busca determinado pela função custo a ser modelada para linhas de transmissão de extra alta tensão.

Para implementar o algoritmo do PSO e elaborar uma função custo a ser otimizada foram utilizados dois softwares: MATLAB online versão para estudantes e o Octave, respectivamente, Figura 24 e Figura 25.

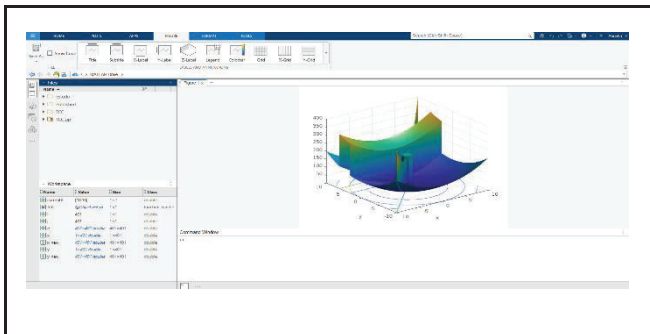


Figura 24 - Ferramenta MATLAB online. Fonte: Próprios autores.

O desenvolvimento da ferramenta para linhas de transmissão seguiu-se pela ferramenta Octave (Figura 25), devido ao limite de horas por mês do MATLAB online para estudantes. Ao todo, foram realizadas 4 versões do PSO. A diferença entre as versões utilizadas do algoritmo estava na função custo que foi formulada matematicamente com base em dois estudos de caso.

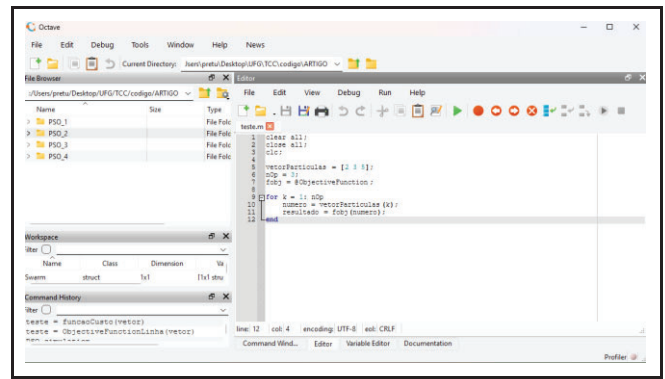


Figura 25 - Ferramenta Octave. Fonte: Próprios autores.

A função custo é a função objetivo do algoritmo PSO que deve ser minimizada. Sistemas complexos reais possuem função objetivo tipicamente não linear. Dessa forma, sua formulação afeta a complexidade do cenário de busca do algoritmo.

Primeiramente, foi estabelecido na função custo as variáveis em que o algoritmo de otimização por enxame de partículas irá explorar ao longo das iterações para encontrar o menor custo da linha de transmissão. As variáveis de entrada definidas foram: número de condutores por feixe (n), área da seção transversal do condutor (b) e espaçamento dos condutores de um mesmo feixe (e). Dessa forma, a função custo recebe três variáveis de entrada (18).

$$custo = funcaoCusto(n, b, e) \tag{18}$$

A modelagem matemática da função custo foi formulada conforme dois estudos de caso: o primeiro referente ao artigo sobre a otimização do nível de tensão para linhas de transmissão australianas [4] e o segundo referente ao relatório R1 da EPE para a linha de transmissão Teles-Pires [2].

De forma que, este estudo se concentrou na análise de linhas de transmissão aéreas de extra alta tensão, em que o nível de tensão foi limitado para 500 kV, devido a obtenção de dados se restringir as referências utilizadas nos casos de estudo.

#### A. Estudo de Caso 1

O primeiro estudo de caso, implementa a otimização utilizando o PSO para definir o nível de tensão para linhas de transmissão longas e de extra alta tensão em locais remotos no cenário australiano [4]. Neste estudo, são utilizados dados de custo em dólares e referentes ao ano de 2010.

Os parâmetros utilizados para a avaliação da expansão da linha de transmissão são, conforme Tabela I: comprimento da linha, tensão, número de circuitos em uma mesma torre, fases, fator de potência (com ou sem grau de segurança), custo base do condutor, custo de energia e o tempo expresso em horas para uma linha com 30 anos de operação [4].

TABELA I

DADOS FIXOS PELO ARTIGO MOTIVADOR. FONTE: PRÓPRIOS AUTORES.

Comprimento da linha	$1000 \times 10^3$ (metros)
Potência	$1000 \times 10^6$ (W)
Tensão	$500 \times 10^3$ (V)
Número de circuitos	1 (simples)
Fases	3 (trifásico)
Tempo	262.800 (horas)

Os dados inseridos para o fator de potência, custo base da torre e custos do condutor foram inicialmente replicados do artigo [4].

Os custos analisados estão em dólares e foi considerado na análise a instalação de 2 torres. Dessa forma, a formulação do custo conta com o custo de instalação das torres.

Os dados podem ser visualizados conforme a Tabela II.

TABELA II

DADOS DE CUSTO OBTIDOS NO ARTIGO MOTIVADOR. FONTE: PRÓPRIOS AUTORES.

Fator de potência	0,95
Custo base do condutor	5.280,48 (\$/km)
Custo da torre	26.402,41 (\$/torre)

Foi definido na função custo, dados fixos notáveis que representam a resistividade e densidade do alumínio para 20° C, conforme Tabela III.

TABELA III

DADOS ALUMÍNIO. FONTE: PRÓPRIOS AUTORES.

Resistividade $\rho$	$2,82 \times 10^{-8}$ (ohm.m)
Densidade	$2,71 \times 10^{-6}$ (kg/m <sup>3</sup> )

Finalmente, foi implementada a formulação do custo (19). Em que o custo total para a linha de transmissão avaliada é a soma do custo das perdas, custo do condutor e o custo da torre.

$$custo = cP + cC + cT \quad (19)$$

Onde,

Custo: custo total em dólares

cP: custo das perdas em dólares

cC: custo do condutor em dólares

cT: custo da torre em dólares

O custo da torre foi definido em (20):

$$cT = cBT \cdot Nt \cdot \frac{L}{1000} \cdot Fh \quad (20)$$

Onde,

cBT: custo da torre em dólares

Nt: torres por km (2 torres)

L: comprimento da linha (m)

Fh: fator horizontal

Em que o fator horizontal (20) se dá pela relação de número de condutores no feixe e o espaçamento do arranjo geométrico da fase.

O custo do condutor é encontrado por (21):

$$cC = cBC \cdot \frac{L}{1000} \cdot nC \quad (21)$$

Onde,

cBC: custo base do condutor em dólares

L: comprimento da linha (m)

nC: número de condutores no feixe

O custo das perdas é definido por (22):

$$cP = \left( \frac{P}{1000} \cdot t \cdot ckWh \right) \quad (22)$$

P: Potência ativa das perdas (W)

t: Tempo de operação (horas)

ckWh: Custo de energia (kWh)

L: comprimento da linha (m)

Finalizada a função custo, foi implementado no algoritmo PSO a geração do gráfico da curva de convergência, representada pelo custo em dólares por iteração. Em que, cada iteração representa um vetor posição diferente em busca do menor custo possível. Os gráficos e as soluções geradas são discutidos na Seção IV.

Ao analisar a curva de convergência do algoritmo segundo parâmetros e resultados do artigo modelo [4], os resultados encontrados para o espaçamento responsável pelo menor custo estavam incoerentes com a realidade implementada para linhas de transmissão de extra alta tensão. Para todos os testes realizados, foi reduzido o espaçamento para seu tamanho mínimo.

Após a primeira implementação do algoritmo, foi realizada a alteração da função objetivo para seguir os processos de avaliação utilizados pelo estudo de caso 2.

B. Estudo de Caso 2

O segundo estudo de caso implementa a função custo baseada nos processos utilizados no relatório técnico da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) para linhas de transmissão que conectam a bacia do rio Teles Pires [2]. Neste estudo a análise é referente ao ano de 2010 até 30 anos de operação da linha.

A função custo foi alterada para seguir os processos de avaliação utilizados pela EPE. Dessa forma, foram alterados os dados fixos utilizados como parâmetros para a linha de transmissão, conforme Tabela IV, os dados seguem os custos referenciais da ANEEL, versão outubro de 2010 [2], para valores monetários em reais.

TABELA IV

DADOS FIXOS PARA EPE - 2010. FONTE: PRÓPRIOS AUTORES.

Comprimento da linha	400x10 <sup>3</sup> (metros)
Tensão	500x10 <sup>3</sup> (V)
Número de circuitos	1 (simples)
Fases	3 (trifásico)
Tempo	262.800 (horas)

TABELA V

DADOS CUSTO PARA EPE - 2010. FONTE: PRÓPRIOS AUTORES.

Fator de potência	0,90
Custo base do condutor	25,71 (R\$/kg)
Custo de energia	0,113 (R\$/kWh)

A torre do tipo *Cross Rope* e o respectivo espaçamento entre fases foram adotados neste trabalho com base nos dados disponibilizados pela EPE com o objetivo de simplificar o problema, tendo em vista sua configuração horizontal das fases, que facilita a modelagem geométrica e elétrica. Essa escolha permitiu a comparação e validação dos resultados, garantindo maior consistência à análise realizada e podem ser visualizados na Tabela VI.

TABELA VI

DADOS TORRE. FONTE: PRÓPRIOS AUTORES.

Torre	Cross Rope
Distância entre as fases	12,5 (metros)

Foi implementado as variáveis que integram o custo do condutor (23) e o custo das perdas (24):

$$cC = cb.l.n.nc.nf.d.A.1000 \quad (23)$$

l: comprimento da linha (m)

cb: custo base do condutor (R\$/km)

n: número de condutores no mesmo feixe

nc: número de circuitos (circuito simples)

nf: número de fases (trifásico)

d: Densidade do Alumínio (kg/mm<sup>3</sup>)

A: Área da seção transversal do condutor (m<sup>2</sup>)

$$cP = \left(\frac{P}{1000}\right) . t. ckWh \quad (24)$$

P: Potência ativa das perdas (W)

t: Tempo de operação (horas)

ckWh: Custo de energia (kWh)

Finalmente, foi implementado as variáveis que custo total (25):

$$custo = (0,3 x cC) + (0,7 x cP) \quad (25)$$

Onde,

Custo: custo total em reais

cP: custo das perdas em reais

cC: custo do condutor em reais

Para seguir com uma análise de custos que se aproxime da análise robusta utilizada pela EPE, mas que diminua a complexidade do algoritmo, foi realizada uma simplificação dos custos a serem considerados pela ferramenta implementada. Dessa forma, o algoritmo não leva em consideração o custo da torre e os fatores de custo socioambientais.

É adicionado ao custo do condutor a relação direta com a dimensão da seção transversal do condutor, a densidade do alumínio e o custo base do condutor por quilogramas. Em relação ao custo das perdas ativas trifásicas (9), seu valor se relaciona com a potência (8) e a impedância natural da linha (7).

Essa relação se faz importante para atrelar, além das variáveis de entrada, ao custo total uma possível relação com a Capacitância e Indutância da linha de transmissão.

Em virtude da relação do custo total poder ser associado com a capacitância e indutância, foi adicionado uma restrição para aumentar a potência natural da linha. Essa restrição limita a indutância da linha a um valor máximo permitido, aumentando a capacitância e diminuindo a impedância natural. A restrição da indutância faz com que o PSO aumente o tamanho do espaçamento do arranjo geométrico dos condutores.

$$L \leq I\mu H \quad (26)$$

O valor de indutância máximo é definido para considerar apenas o cenário de linhas de transmissão de extra alta tensão conforme linhas de transmissão com níveis de tensão em 500 kV analisadas nos relatórios R1 disponíveis pela EPE. De forma que, a avaliação da função custo é realizada com a redução gradativa do limite de indutância para encontrar um valor de indutância ideal. Os

resultados de indutância e suas representações gráficas são detalhados na Seção IV.

C. Implementação do PSO

Na implementação do PSO adotou-se uma estrutura de dados para representar o Enxame. Esta estrutura armazena um conjunto de partículas, modeladas como subestrutura contendo: vetor posição atual, vetor velocidade, vetor melhor posição local histórica e resultado associado a posição atual.

O segundo componente da estrutura do enxame é constituído por uma subestrutura que representa o melhor global. Essa subestrutura contém: o vetor melhor posição global e vetor melhor resultado global. Ambos os elementos são compartilhados centralmente com todas as partículas durante o processo de otimização de forma que essa subestrutura é responsável por armazenar a melhor solução global identificada.

Os parâmetros utilizados pelo PSO podem ser visualizados na Tabela VII. Os limites superiores e inferiores representam, respectivamente, o número de condutores, a seção transversal do condutor e o espaçamento entre os condutores. Esses limites reduzem as infinitas possibilidades de entrada para a função custo, criando um cenário mais realístico/reduzido.

TABELA VII  
PARÂMETROS DO PSO. FONTE: PRÓPRIOS AUTORES.

Número de variáveis	3
Limite superior (condutores, seção transversal, espaçamento)	[6, 600, 2]
Limite inferior (condutores, seção transversal, espaçamento)	[1, 200, 0,2]
Número de partículas	30
Máximo de Iterações	25
Limite superior da velocidade de inércia	0,9
Limite inferior da velocidade de inércia	0,2
Componente Cognitivo c1	2
Componente Social c2	2

A ferramenta desenvolvida atua como uma forma de busca bruta pelos valores mínimos da função de custo da operação da linha de transmissão, inserindo valores aleatórios para um vetor posição de n entradas que processa a função de custo e retorna o menor custo possível que atenda os parâmetros fixos e restritivos da otimização, assim como o vetor posição responsável por gerar o menor custo da linha.

IV. RESULTADOS

A. Estudo de Caso I

Os resultados do PSO configurado conforme Tabela VII e utilizando os parâmetros das Tabelas I, II e III referente ao artigo de referência [4] são exibidos nas Figuras 26 e 27.

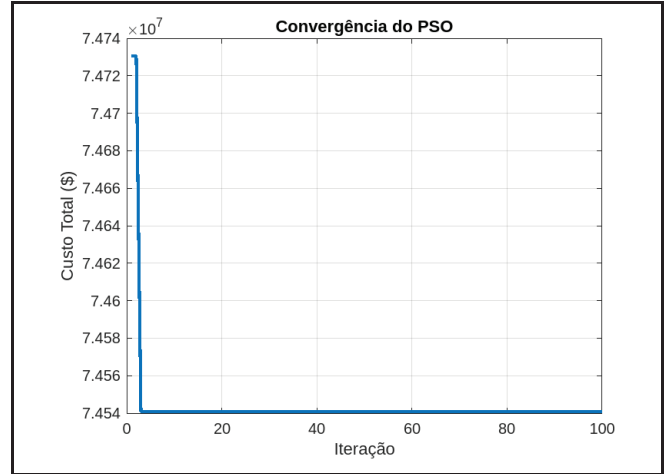


Figura 26 - Convergência - 100 iterações para 1000 km e 500 kV. Fonte: Próprios autores.

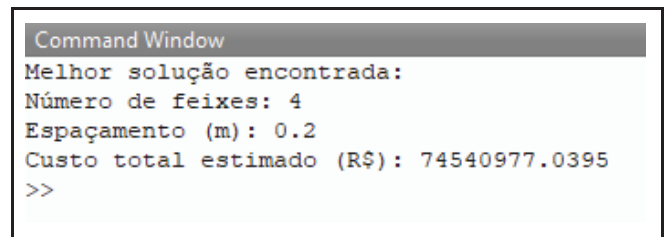


Figura 27 - Parâmetros geradores da convergência. Fonte: Próprios autores.

Devido à natureza estocástica dos parâmetros de inicialização do algoritmo, o PSO apresenta variabilidade de resposta entre suas execuções. Contudo, as soluções obtidas convergem sistematicamente para uma região restrita do espaço de busca, indicando estabilidade na proximidade do ótimo global.

Os resultados obtidos na Figura 26 se aproximam dos resultados obtidos pelo estudo de referência, conforme Figura 28 e Tabela VIII.

TABELA VIII  
RESULTADOS ARTIGO MOTIVADOR. FONTE: [4]

Tamanho da linha em (km)	Potência (MW)	Tensão (kV)	Condutores no feixe	Espaçamento (cm)
500	500	400	2	27
1000	1000	500	5	20
1000	1500	500	6	20
1500	2000	750	3	20

A análise comparativa das Figuras 26, 27 e tabela VIII do estudo de referência [4], revela uma discrepância significativa nos parâmetros elétricos em função do reduzido espaçamento entre os

condutores em um mesmo feixe. Esta condição eleva a indutância série do feixe, degrada a impedância característica da linha, reduz a potência natural, comprometendo a eficiência elétrica operacional da linha de transmissão.

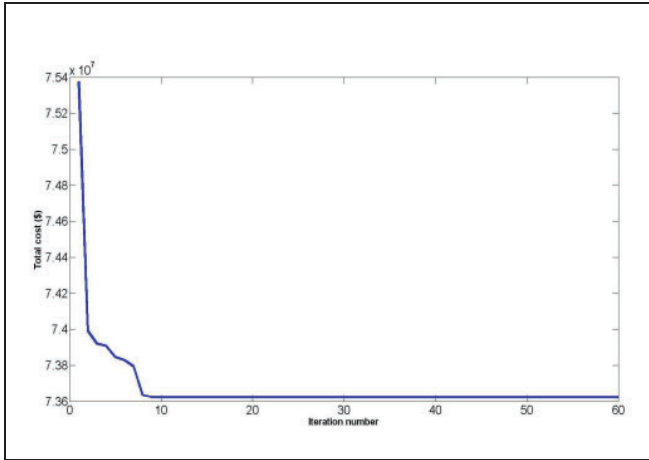


Figura 28 - Convergência - 60 iterações para 1000 km e 500 kV. Fonte: [4]

Conforme ilustrado na Figura 26 e na Figura 28, o PSO converge significativamente antes das 10 primeiras iterações. Essa convergência precoce é positiva, mas indica uma ineficiência: o algoritmo continua processando iterações redundantes após a convergência, aumentando sua complexidade computacional e o consumo de recursos sem ganhos adicionais na função objetivo.

Nesse contexto, houve a necessidade de ampliar os estudos de otimização utilizando referências detalhadas para linhas reais de transmissão de 500 kV. Este trabalho utilizou como referência os relatórios R1, R2 e R4 da Empresa de Pesquisa Energética (EPE).

**B. Estudo de Caso 2**

Na etapa de aplicação do PSO aos parâmetros da EPE (23) (24) (25) (26) (Tabelas IV, V, VI e VII), reduziu-se o número de iterações para 25, preservando o tamanho do enxame de partículas em 30, decisão fundamentada nos estudos de convergência anteriores.

A validação cruzada (artigo de referência vs relatório da EPE) evidenciou a necessidade de otimizar a potência natural da linha, perturbada pelo espaçamento entre condutores em uma fase. Para garantir seu ponto ótimo, o algoritmo proposto incorpora restrições de indutância máxima.

As Figuras 29 e 30 comprovam a eficácia desta abordagem para indutâncias inferiores a  $1\mu H$ .

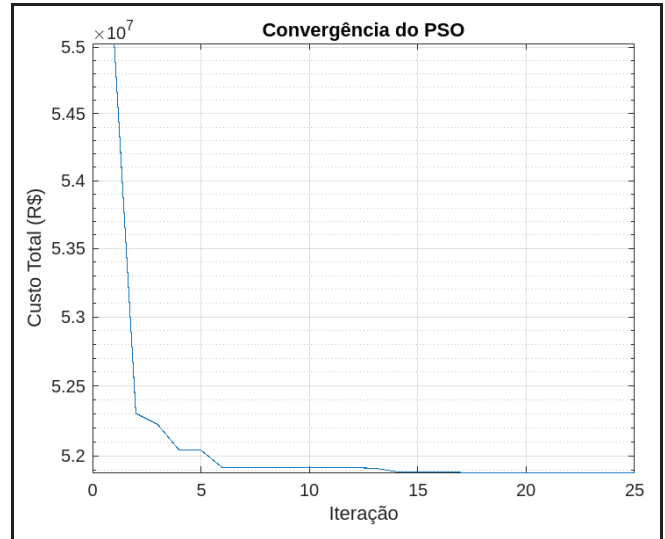


Figura 29 - Convergência do PSO - para  $L < 1\mu H$ . Fonte: Próprios autores.

```

Command Window

Melhor solução encontrada:

Número de condutores por feixe: 2
Bitola (mm²): 520.1663
Espaçamento (m): 1.124
Custo total estimado (R$): 51881219.3111
>> |
    
```

Figura 30 - Parâmetros da convergência para  $L < 1\mu H$ . Fonte: Próprios autores.

Os resultados apresentaram consistência com o estudo de expansão de linhas da EPE. Diante dessa validação, optou-se por reduzir progressivamente a indutância máxima. As Figuras 31 e 32 apresentam o comportamento do sistema sob esta nova restrição.

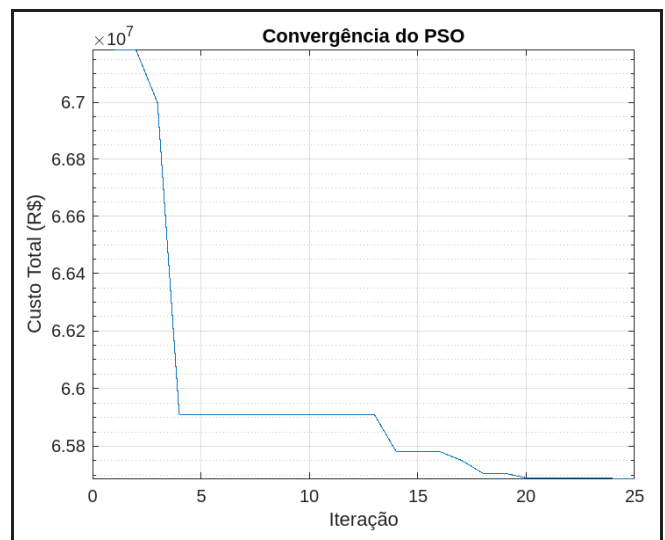


Figura 31 - Convergência do PSO - para  $L < 10 \times 10^{-7} H$ . Fonte: Próprios autores.

```

Command Window

Melhor solução encontrada:

Número de condutores por feixe: 3
Bitola (mm²): 426.5091
Espaçamento (m): 1.7534
Custo total estimado (R$): 65689121.0095
>>
    
```

Figura 32 - Parâmetros da convergência para  $L < 10 \times 10^{-7} H$ . Fonte: Próprios autores.

Na configuração final, o algoritmo PSO atingiu uma indutância de  $7,90 \cdot 10^{-7} H$ , valor que minimiza perdas por efeito corona e aumenta a potência natural da linha. Neste ponto, as combinações viáveis de condutores (quantidade, seção transversal e espaçamento) concentram-se numa região de convergência próxima ao mínimo global. As Figuras 33 e 34 demonstram a curva de convergência da aplicação do método.

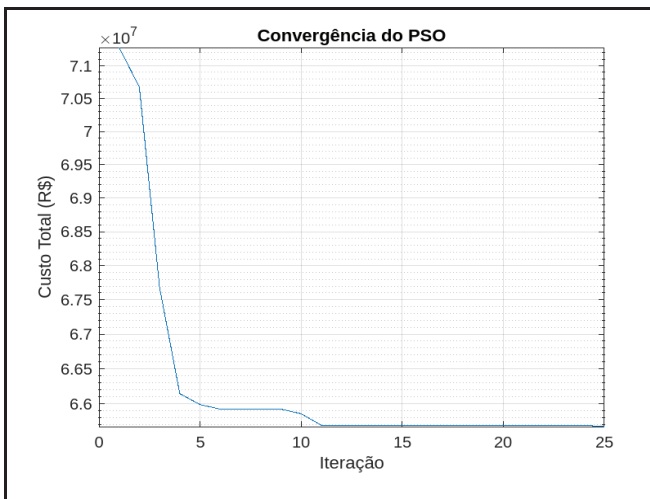


Figura 33 - Convergência do PSO - para  $L < 7,90 \times 10^{-7} H$ . Fonte: Próprios autores.

```

Command Window

Melhor solução encontrada:

Número de condutores por feixe: 4
Bitola (mm²): 330.7811
Espaçamento (m): 0.90798
Custo total estimado (R$): 65675308.1983
>> |
    
```

Figura 34 - Parâmetros da convergência para  $L < 7,90 \times 10^{-7} H$ . Fonte: Próprios autores.

A Tabela IX apresenta os valores obtidos ao longo de 100 iterações do algoritmo.

TABELA IX  
RESULTADOS – PSO 100 ITERAÇÕES. FONTE: PRÓPRIOS AUTORES.

Iterações	Número de Condutores	Área da Seção Transversal (mm²)	Espaçamento (m)
1	4	329,095	0,90923
2	4	328,9028	0,90884
3	5	260,3345	0,61044
4	4	325,431	0,91062
5	3	439,5969	1,7411
6	3	432,5424	1,7516
7	4	324,5416	0,91131
8	3	441,5929	1,7386
9	3	436,0248	1,7435
10	4	326,6138	0,90997
11	5	267,5197	0,6076
12	4	323,7586	0,91135
13	4	335,2138	0,90626
14	3	431,0444	1,7484
15	3	438,2702	1,7411
16	3	436,9206	1,7437
17	4	330,4202	0,9082
18	3	441,67	1,7378

19	4	343,0668	0,90239
20	3	436,3966	1,7441
21	3	436,5294	1,7434
22	3	432,59	1,7511
23	3	427,6704	1,7536
24	4	332,3285	0,90713
25	4	325,417	0,91033
26	4	329,759	0,90852
27	4	323,9749	0,91111
28	3	440,0038	1,7399
29	4	334,2325	0,90759
30	4	328,3752	0,90901
31	5	255,1754	0,61408
32	4	328,3631	0,90902
33	3	437,1542	1,745
34	4	330,632	0,90882
35	3	441,5936	1,738
36	3	430,1261	1,7497
37	4	328,0622	0,90914
38	4	328,1199	0,90956

39	4	325,1245	0,91097
40	4	323,4295	0,91237
41	6	210,8147	0,45873
42	4	326,9041	0,90986
43	3	434,5426	1,7453
44	4	331,1202	0,90779
45	4	329,1866	0,90869
46	3	438,7071	1,7414
47	3	430,9495	1,7496
48	5	263,5345	0,60902
49	4	334,5752	0,90652
50	4	325,0302	0,91053
51	3	425,892	1,757
52	4	335,4369	0,90609
53	4	335,1292	0,90805
54	3	432,1847	1,7476
55	3	443,7098	1,7362
56	3	438,4469	1,7413
57	3	442,9296	1,7366
58	6	213,8889	0,45929

59	4	333,5863	0,90658
60	4	329,0652	0,90909
61	3	441,9293	1,7375
62	4	332,3036	0,90786
63	3	433,3335	1,7466
64	3	435,8071	1,744
65	4	322,922	0,91181
66	4	331,1446	0,90809
67	6	215,697	0,45779
68	4	328,8941	0,91006
69	3	438,9059	1,7405
70	4	322,3996	0,91525
71	4	334,8974	0,90605
72	3	439,0292	1,7404
73	4	330,1899	0,90818
74	3	451,7813	1,7286
75	4	336,1868	0,90953
76	4	331,8736	0,90759
77	3	436,0348	1,7434
78	3	442,2504	1,7385

79	4	323,4913	0,91161
80	3	445,0954	1,7348
81	3	432,2507	1,7475
82	4	327,3751	0,90946
83	4	324,3839	0,91082
84	3	432,5901	1,7468
85	3	432,8997	1,7483
86	3	443,7176	1,7358
87	4	319,9896	0,91324
88	4	322,6252	0,9121
89	4	321,7556	0,91317
90	4	325,1089	0,91117
91	4	322,5829	0,91198
92	4	327,9606	0,90925
93	3	431,9539	1,7476
94	4	328,3435	0,90927
95	4	328,5213	0,90901
96	4	324,1731	0,91125
97	3	430,1818	1,7494
98	5	257,3429	0,61069

99	4	331,2746	0,90774
100	4	320,8183	0,91284

Observa-se que os resultados são bastante próximos entre si, o que evidencia a consistência e estabilidade do método aplicado.

TABELA X

EPE - CUSTO DO INVESTIMENTO DAS 4 ALTERNATIVAS (R\$ x 1000) – PARA 1 ANO - 2010. FONTE: [2]

Alternativas	Investimento
Alternativa 1 (3 LTs CA 4 x 954 MCM)	1.185.802
Alternativa 2 (2 LTs CA 6 x 900 MCM)	1.173.797
Alternativa 3 (1 bipolo ±500kVCC 2800 MW + 1 LTCA 4 x 954 MCM)	1.262.405
Alternativa 4 (1 bipolo ±600kVCC 2800 MW + 1 LTCA 4 x 954 MCM)	1.308.431

É evidente pela Tabela X que a alternativa 1, que mais se aproxima das soluções encontradas pela ferramenta desenvolvida neste estudo, não é a alternativa mais econômica encontrada no intervalo de tempo de 1 ano.

TABELA XI

EPE - CUSTO DE INVESTIMENTO E PERDAS (R\$ x 1000) – TRÊS USINAS APÓS 2020. FONTE: [2]

Alternativas	Investimento	$\Delta$ Perdas	Total	%
Alternativa 1	923.871	117.908	1.041.779	100,0%
Alternativa 2	1.165.709	96.095	1.261.804	121,1%
Alternativa 3	1.254.308	22.924	1.277.232	122,6%
Alternativa 4	1.298.241	0	1.298.241	124,6%

A análise da Tabela XI conclui que, em 10 anos, a alternativa 1 torna-se o investimento mais econômico. Resultado que condiz com a resposta do algoritmo que opera em um intervalo de tempo de 30 anos.

## V. CONCLUSÕES

Este trabalho demonstrou o potencial da aplicação do algoritmo de PSO como uma ferramenta eficaz no apoio ao projeto de linhas de transmissão. Considerando a complexidade envolvida nas decisões de engenharia, marcada por diversas variáveis técnicas e econômicas, o PSO se destacou pela sua simplicidade conceitual, facilidade de implementação e robustez na busca por soluções otimizadas.

Durante a análise do algoritmo apresentado no artigo motivador, verificou-se que a modelagem adequada da função objetivo é um aspecto crítico para a obtenção de resultados corretos e confiáveis, sendo essencial para evitar o enviesamento de dados e garantir a consistência das soluções encontradas.

A análise realizada, focada na minimização dos custos associados aos condutores e às perdas ativas, evidenciou que o uso do PSO pode conduzir a projetos mais eficientes e economicamente viáveis, contribuindo não apenas para a redução de investimentos e custos operacionais, mas também para a sustentabilidade do sistema elétrico.

Devido às limitações relacionadas à obtenção de dados e à modelagem dos custos dos parâmetros elétricos, especialmente no que diz respeito às perdas reativas, ao custo das torres e aos elementos de isolamento, o escopo deste estudo foi restrito. Ainda assim, o modelo apresentado estabelece uma base sólida para futuras ampliações.

Como continuidade, propõe-se a inclusão de novos componentes de custo e a ampliação da função objetivo, incorporando critérios utilizados pela EPE como a maximização da ampacidade e da potência natural da linha. Essas melhorias permitirão uma abordagem mais abrangente e realista, com maior aderência às exigências práticas do planejamento de sistemas de transmissão.

Adicionalmente, sugere-se o desenvolvimento de uma interface gráfica interativa que seja independente do software Matlab e do software Octave, com o intuito de facilitar a utilização da ferramenta por engenheiros e técnicos, retirando a necessidade de interpretação de linguagem de programação em uma ferramenta intuitiva. Ampliando sua aplicabilidade em ambientes reais de projeto.

Além disso, o PSO mostra-se promissor para diversas outras análises relacionadas à variação de custos em função de alterações específicas nos parâmetros do sistema, ampliando ainda mais sua utilidade no contexto da engenharia elétrica.

Dessa forma, conclui-se que, mesmo diante dos desafios de modelagem da função custo para linhas de transmissão, a tendência é que, com o avanço da ferramenta computacional e da base de dados, a aplicação de algoritmos meta-heurísticos como o PSO se torne cada vez mais acessível, ágil e eficaz no contexto do planejamento e da otimização de sistemas de transmissão de energia elétrica.

## VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balço Energético Nacional Interativo**. Disponível em: <https://dashboard.epe.gov.br/apps/ben/>. Acesso em: 03 mai. 2025.
- [2] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Estudos para licitação da expansão da transmissão**: análise técnico-econômica de alternativas – Relatório R1 – Análise do sistema de integração dos aproveitamentos hidrelétricos da bacia do rio Teles Pires e reforços no SIN. Rio de Janeiro: EPE,2011. 234 p. Relatório técnico: EPE-DEE-RE-050/2011-r2. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/areas-de-atuacao/energia-eletrica/planejamento-da-transmissao/estudos-de-planejamento> . Acesso em: 10 mai. 2025.
- [3] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Planejamento da Transmissão**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/areas-de-atuacao/energia-eletrica/planejamento-da-transmissao>. Acesso em: 20 jun. 2025.
- [4] EGHBAL, Mehdi; SAHA, Tapan K.; NGUYEN, Mai H. **Optimal voltage level and line bundling for transmission lines**. In: 2010 20th Australasian Universities Power Engineering Conference. IEEE, 2010. p. 1-6.7
- [5] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Estudos para licitação da expansão da transmissão** – Relatório R1 – Reforços para resiliência no sistema de transmissão Acre e Rondônia em resposta às mudanças climáticas. out 2024. 119 p. Relatório: EPE-DEE-RE-057/2024-REV0. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/areas-de-atuacao/energia-eletrica/planejamento-da-transmissao/estudos-de-planejamento> . Acesso em: 10 mai. 2025.
- [6] FUCHS, Rubens Dario. **Transmissão de energia elétrica: linhas aéreas; teoria das linhas em regime permanente**. v. 1. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos; Itajubá: Escola Federal de Engenharia, 1977.
- [7] SARMIENTO, Jhair Stivel Acosta; TAVARES, Maria Cristina. **Enhancement the overhead transmission lines' capacity by modifying the bundle geometry using heuristics algorithms**. In: 2016 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC). IEEE, 2016. p. 646-650.
- [8] STEVENSON, William D. **Elementos de Análise de Sistemas de Potência**. Tradução e revisão técnica de Arlindo Rodrigues Mayer, João Paulo Minussi, Smdall Anaga. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986
- [9] H. Huang, D.K., . V. Ramaswami, D. Retzmann, UHV 1200 kV AC Transmission, in **Power Transmission and Distribution (GRIDTECH)**. 2007: New Delhi, India.
- [10] P. A. Abetti, "**Bibliography on extra-high-voltage systems**," Power Apparatus and Systems, Part III. Transactions of AIEE, vol. 77, no. 3, pp. 1517-1535, apr 1958.
- [11] MOTA, Felipe Augusto Oliveira; MOTA, Suzana Viana. **Um modelo matemático de otimização para um projeto de linhas de transmissão compactas suportando múltiplos circuitos A mathematical optimization model for a compact transmission line design supporting multiple circuits**. Brazilian Journal of Development, v. 8, n. 7, p. 51525-51546, 2022.
- [12] MOUSA, A. M. **Reducing the cost of power lines through the use of alternative conductor bundle configurations**. In: Proceedings of Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. IEEE, 1993. p. 570-573.
- [13] YUAN, Quan; YIN, George. **Analyzing convergence and rates of convergence of particle swarm optimization algorithms using stochastic approximation methods**. IEEE Transactions on Automatic Control, v. 60, n. 7, p. 1760-1773, 2014.
- [14] TRAN, Minh Q. et al. **Finite element model updating for composite plate structures using particle swarm optimization algorithm**. Applied Sciences, v. 13, n. 13, p. 7719, 2023.
- [15] KENNEDY, James; EBERHART, Russell. **Particle swarm optimization**. In: Proceedings of ICNN'95-international conference on neural networks. ieee, 1995. p. 1942-1948.
- [16] MIRJALILI, Seyedali; DONG, Jin Song; LEWIS, Andrew. **Nature-inspired optimizers**. Studies in Computational Intelligence, v. 811, p. 167-183, 2020.