



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Faculdade de Engenharia e Ciências
Câmpus de Rosana

PEDRO OTÁVIO ALMEIDA MACHADO

**PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DE SISTEMAS DE TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA USANDO OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS**

Rosana – SP
2024

PEDRO OTÁVIO ALMEIDA MACHADO

**PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DE SISTEMAS DE TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA USANDO OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Coordenadoria de Curso de
Engenharia de Energia do Câmpus de
Rosana, Universidade Estadual Paulista,
como parte dos requisitos para obtenção
do diploma de Graduação em Engenharia
de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Henrique
Faria Macedo Possagnolo

M149p

Machado, Pedro Otávio Almeida

Planejamento da expansão de sistemas de transmissão de energia elétrica usando otimização por enxame de partículas / Pedro Otávio Almeida Machado.

-- Rosana, 2024

51 p. : il., fotos

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia de Energia) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia e Ciências, Rosana

Orientador: Leonardo Henrique Faria Macedo Possagnolo

1. O PROBLEMA DE PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DE SISTEMAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. 2. ALGORITMO DE OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia e Ciências, Rosana. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

PEDRO OTÁVIO ALMEIDA MACHADO

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO
COMO PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE

“GRADUADO EM ENGENHARIA DE ENERGIA”

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIA

Prof. Dr. LEANDRO FERREIRA PINTO
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Leonardo Henrique Faria Macedo Possagnolo
Orientador/UNESP – Rosana

Prof. Dr. Lucas Teles de Faria
UNESP – Rosana

Doutorando Rafael Yuki de Souza Yamamoto
UNESP – Ilha Solteira

Julho de 2024

AGRADECIMENTOS

Este Trabalho de Conclusão de Curso representa não apenas o esforço e a dedicação de anos de estudo, mas também a contribuição e o apoio de muitas pessoas. Gostaria de expressar minha sincera gratidão a todos que, de alguma forma, colaboraram para a realização deste projeto.

Primeiramente agradeço aos meus pais e minhas irmãs, pelo amor, apoio incondicional e incentivo constantes em todos os momentos. Vocês foram fundamentais para que eu chegasse até aqui.

Ao meu orientador Leonardo Henrique Faria Macedo Possagnolo, por toda a paciência, orientação e dedicação ao longo deste trabalho. Seus conselhos e ensinamentos foram essenciais para o desenvolvimento deste projeto.

Aos meus colegas e amigos, pela companhia, troca de experiências e apoio mútuo. A jornada acadêmica foi muito mais agradável e enriquecedora graças à convivência com vocês.

Aos professores e funcionários da Unesp, por todo o conhecimento compartilhado e pelo suporte oferecido ao longo do curso.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho, deixo aqui meu sincero agradecimento.

Obrigado por acreditarem em mim e por me ajudarem a transformar este sonho em realidade.

“O sucesso é a soma de pequenos esforços repetidos dia após dia.”
Robert Collier

RESUMO

Este trabalho considera o desenvolvimento de um algoritmo de enxame de partículas (PSO) para encontrar a melhor solução para o problema de planejamento da expansão de sistemas de transmissão de energia elétrica. O setor elétrico brasileiro passou por uma reestruturação na década de 1990, resultando em privatização e um mercado mais competitivo, com acesso livre à rede elétrica. O crescimento populacional e a ocupação de novas regiões aumentam a demanda por energia. A expansão da rede de transmissão é crucial para atender essa demanda, envolvendo desafios matemáticos complexos. Modelagens matemáticas, como o fluxo de carga DC, são essenciais para o planejamento do sistema de transmissão. A utilização de heurísticas e meta-heurísticas é comum na resolução de problemas de expansão da rede. A construção da rede básica de transmissão exige investimentos significativos em estruturas como torres de linhas de transmissão. As técnicas de enxame de partículas, inspiradas no comportamento social de animais, são utilizadas para otimização em sistemas de energia. Os resultados dos testes indicam que o PSO é altamente eficaz para o planejamento da expansão da transmissão em sistemas de pequeno porte. O uso do algoritmo de enxame de partículas no problema de expansão do sistema Garver demonstrou ser promissor, evidenciando sua capacidade de lidar com a complexidade e as restrições associadas ao planejamento da transmissão de energia elétrica. Com parâmetros bem definidos e uma função de objetivo adequada, o PSO se prova uma ferramenta valiosa para engenheiros e planejadores no setor de energia.

PALAVRAS-CHAVE: Algoritmo de enxame de partículas. Expansão da rede de transmissão. Heurísticas e meta-heurísticas. Linhas de transmissão. Otimização.

ABSTRACT

This work considers the development of a particle swarm optimization (PSO) algorithm to find the best solution for the problem of planning the expansion of power transmission systems. The Brazilian electric sector underwent restructuring in the 1990s, resulting in privatization and a more competitive market, with free access to the power grid. Population growth and the occupation of new regions increase the demand for energy. The expansion of the transmission network is crucial to meet this demand, involving complex mathematical challenges. Mathematical modeling, such as DC load flow, is essential for transmission system planning. The use of heuristics and metaheuristics is common in solving network expansion problems. The construction of the basic transmission network requires significant investments in structures such as transmission line towers. Particle swarm techniques, inspired by the social behavior of animals, are used for optimization in energy systems. Test results indicate that PSO is highly effective for planning transmission expansion in small-scale systems. The use of the particle swarm algorithm in the Garver system expansion problem has shown to be promising, demonstrating its ability to handle the complexity and constraints associated with power transmission planning. With well-defined parameters and an appropriate objective function, PSO proves to be a valuable tool for engineers and planners in the energy sector.

KEYWORDS: Heuristics and metaheuristics. Optimization. Particle swarm optimization (PSO). Transmission network expansion. Transmission lines.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1-1 – Diagrama do sistema interligado nacional em operação – 2017

Figura 1-2 – Diagrama do sistema interligado nacional planejado – 2027

Figura 1-3 – Sistema de cálculo de perdas da rede

Figura 1-4 – Custo de transmissão por kW transmitido para linhas de 345 kV e 750 kV considerando comprimento da linha fixo

Figura 1-5 – Efeito da distância sobre o custo de transmissão por kW

Figura 1-6 – Custos fixos/variáveis

Figura 1-7 – Diagrama de Identificação da necessidade de expansão da rede

Figura 4-1 – Representação do modelo de otimização por enxame de partículas

Figura 4-2 – Fluxograma de planejamento de transmissão problema de expansão usando *particle swarm optimization*

Figura 6-1 – Rede original do sistema de Garver com seis barras

Figura 6-2 – Resultados do algoritmo PSO

LISTA DE ABREVIATURAS

ACF	Algoritmo de Colônia de Formigas
AG	Algoritmo Genético
AHC	Algoritmo Heurístico Construtivo
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
APE	Autoprodutor de Energia
BEM	Balanço Energético Nacional
DC	<i>Direct Current</i>
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GD	Geração Distribuída
kW	<i>Kilowatt</i>
LTs	Linhas de Transmissão
LF	Lógica <i>Fuzzy</i>
MME	Ministério de Minas e Energia
MT	Média Tensão
MILP	<i>Mixed Integer Linear Programming</i>
MINLP	<i>Mixed integer Nonlinear Programming</i>
NLP	<i>Natural Language Processing</i>
OPF	<i>Optmal Power Flow</i>
PET	Expansão da Transmissão
PELP	Plano de Expansão de Longo Prazo
PIE	Produtor Independente de Energia
PLIM	Programação Linear Inteira Mista
PSO	<i>Particle Swarm Optimization</i>
SDEE	Sistema de Distribuição de Energia Elétrica
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SEs	Subestação
SIN	Sistema Integrado Nacional
TL	Tensão Lida
TNEP	<i>Transmission Network Expansion Planning</i>
TR	Tensão Registrada
TWh	Terawatt-hora

LISTA DE SÍMBOLOS

B_{km}	Susceptância entre as barras k e m
G_{km}	Condutância entre as barras k e m
I_{km}	Corrente entre as barras k e m
P_k	Potência ativa injetada na barra k
P_{km}	Fluxo de potência ativa da barra k para m
P_{loss}	Perdas de potência ativa
Q_k	Potência reativa injetada na barra k
Q_{km}	Fluxo de potência reativa da barra k para m
Q_{loss}	Perdas de potência reativa
R_{km}	Resistência do ramo km
V_k	Módulo da tensão na barra k
V_m	Módulo da tensão na barra m
X_{km}	Reatância do ramo km
b_{km}	Susceptância do ramo km
b_{km}^{sh}	Susceptância <i>shunt</i> do ramo km
g_{km}	Condutância do ramo km
θ_{km}	Diferença angular da tensão entre as barras k e m
E	Vetor das tensões nodais
I	Vetor das injeções de corrente
PQ	Barra de carga
PV	Barra de geração
$V\theta$	Barra de referência angular
Y	Matriz nodal

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	DESAFIOS	16
1.2	REGULAÇÃO DO SERVIÇO DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	23
1.3	OTIMIZAÇÃO E OBJETIVO.....	25
1.4	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	27
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	29
2.1	SOLUÇÃO PARA O PROBLEMA TNEP.....	29
2.2	META-HEURÍSTICAS PARA PROBLEMA TNEP	30
3	O PROBLEMA DE PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DE SISTEMAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	31
3.1	MODELAGEM DO PROBLEMA DE PLANEJAMENTO DE SISTEMAS DE TRANSMISSÃO	31
3.2	MODELO DC.....	33
4	ALGORITMO DE OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS	36
4.1	MÉTODOS HEURÍSTICOS E META-HEURÍSTICAS	36
4.2	OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS	37
5	PLANEJAMENTO DE EXPANSÃO DE TRANSMISSÃO BASEADO EM OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS.....	42
6	TESTES E RESULTADOS	47
6.1	DADOS DO PROBLEMA	47
6.2	RESULTADOS E DISCUSSÕES	48
7	CONCLUSÃO	50
	REFERÊNCIAS.....	51

1 INTRODUÇÃO

O setor elétrico brasileiro tem passado por diversas mudanças desde o seu início, com sua maior reestruturação ocorrendo na década de 1990, diante do esgotamento do modelo vigente na época. Essa reestruturação levou à privatização e à criação de um mercado mais competitivo, além de uma separação das atividades funcionais do setor, permitindo a formação de um mercado atacadista de energia e garantindo o livre acesso à rede elétrica (Cruz, 2022).

Paralelamente, o Brasil enfrenta um cenário de crescente avanço populacional, com regiões antes inexploradas sendo habitadas e outras com crescimento acelerado. Esse aumento na população tem gerado uma demanda crescente por eletricidade, exigindo assim o aumento da infraestrutura de transmissão de energia elétrica. O país, conhecido por seu extenso território, detém uma das maiores redes interligadas de transmissão do mundo, tornando as linhas de transmissão um elemento crucial para o desenvolvimento e o atendimento dessa demanda crescente. Desde a década de 1990, é evidente o acréscimo na extensão das LTs, atendendo a locais onde a população necessita, proporcionando energia, conforto e impulsionando o desenvolvimento nacional (Cruz, 2022).

No contexto do setor elétrico, sua complexidade emerge da natureza do produto final, a eletricidade, que é uma forma de energia não estocável, ao contrário do petróleo e de outros recursos fósseis. Isso demanda uma ampla coordenação ao longo de toda a cadeia produtiva, desde a geração até o consumo final, para garantir um equilíbrio instantâneo entre a demanda e a oferta. Essa característica técnica singular torna a indústria de energia elétrica distinta em comparação com outros setores energéticos (Souza, 2006).

Além disso, o setor elétrico é caracterizado por ser intensivo em capital, envolvendo investimentos de longo prazo com maturação e economias de escala significativas, características comuns em todo o setor energético. Essa dinâmica é tão marcante na indústria elétrica que alguns de seus segmentos, como transmissão e distribuição, se configuram como monopólios naturais, alinhados com a natureza de indústria de rede que o setor elétrico apresenta. Estas características demonstram de

forma clara e objetiva a necessidade de um planejamento de médio e longo prazo no setor energético (Souza, 2006).

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), em conjunto com representantes do setor, em especial no que diz respeito à Lei 12.783, de 11 de janeiro de 2013, que dispõe sobre revisões tarifárias periódicas das distribuidoras de energia elétrica e das concessões de produção, transmissão e distribuição de energia elétrica, discutiu a redução das tarifas do setor a taxas razoáveis. A responsabilidade do Estado pelo planejamento do setor elétrico foi reafirmada, principalmente por meio da criação da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), em conjunto com o Ministério de Minas e Energia, cuja tarefa é realizar os estudos necessários aos planos de expansão do setor elétrico (dos Reis Pereira, 2014).

A Diretoria de Estudos de Energia Elétrica desempenha um papel crucial na coordenação e orientação das atividades relacionadas ao planejamento e expansão da geração e transmissão de energia elétrica no Brasil. Suas responsabilidades abrangem a elaboração de estudos para desenvolvimento dos planos de expansão da geração e transmissão, bem como estudos de viabilidade técnica e econômica para os empreendimentos nesses setores. Além disso, a Diretoria realiza estudos para determinação dos aproveitamentos ótimos dos potenciais hidráulicos e define parâmetros de planejamento para os leilões de expansão do sistema elétrico, incluindo articulações com países vizinhos para o aproveitamento de recursos energéticos compartilhados (Ministério Minas de Energia - MME, 2024).

A estrutura organizacional da Diretoria inclui a Superintendência de Planejamento da Geração, que se encarrega do desenvolvimento de estudos para os planos de expansão do parque de geração em curto, médio e longo prazo, responsável pelo acompanhamento e desenvolvimento de estudos para habilitação técnica de novos empreendimentos de geração de energia, além do dimensionamento de projetos de engenharia, definindo parâmetros técnicos e econômicos para leilões de concessão de instalações de transmissão, bem como realizando estudos para definição de projetos de engenharia, das instalações de transmissão elétrica e conexões de cargas e usinas geradoras ao sistema (BRASIL, 2024).

Os atuais planos para o setor elétrico, tendo em conta os horizontes de médio prazo (dez anos) e longo prazo (trinta anos), incluem perspectivas de expansão da oferta face ao crescimento esperado da procura e, portanto, a definição de oferta de eletricidade foi alterada.

Os projetos de geração de energia e de transmissão que precisam de ser priorizados reduzirão o risco de déficits. Após a priorização dos projetos sob a responsabilidade da autoridade financiadora, foram encontrados vários obstáculos que atrasam a implementação e representavam riscos para o sistema. Entre os principais obstáculos mais frequentemente observados, destacam-se aqueles relacionados às questões socioambientais e que exigem forte ação governamental para conciliar os benefícios econômicos, sociais e ambientais decorrentes desses investimentos (Vieira et al., 2012).

1.1 DESAFIOS

No presente momento, o sistema de transmissão brasileiro é constituído por uma variedade de instalações que estão em processo de envelhecimento. Esta condição tende a se agravar no futuro, considerando a idade avançada dos equipamentos que continuarão em operação. (Ministério Minas de Energia - MME, 2018).

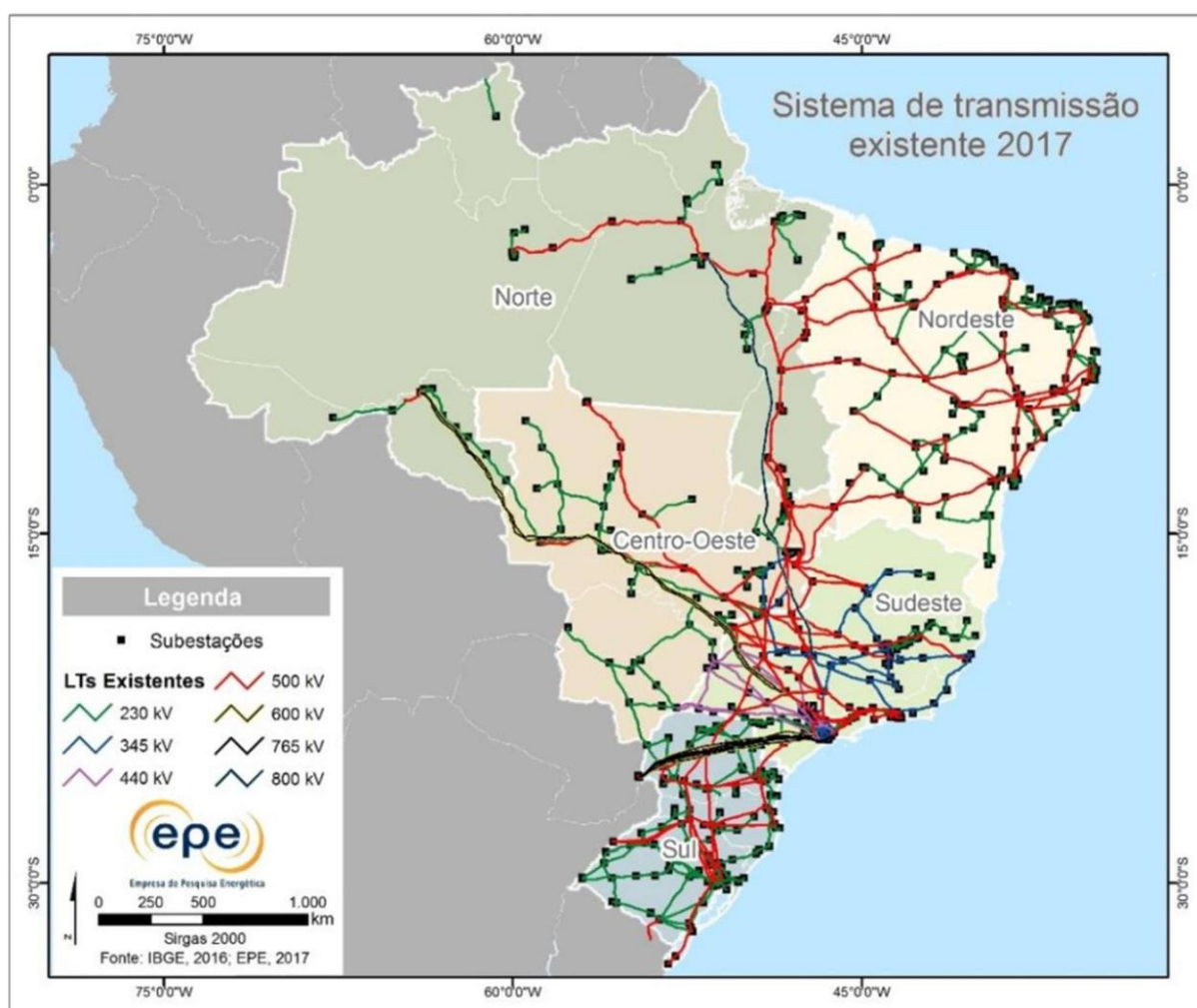
Deve-se notar que o envelhecimento do sistema é ainda agravado pela grande introdução de fontes de energia renováveis intermitentes na rede. Isto exigirá ciclos de carregamento e operação mais rigorosos do que aqueles tradicionalmente considerados no dimensionamento e *design* original destes dispositivos. Portanto, um grande desafio nas próximas décadas será substituir a infraestrutura envelhecida da rede elétrica. Deve-se ter cuidado para garantir que as redes de transmissão funcionem com a confiabilidade e a qualidade que a sociedade exige (BRASIL, 2018).

Ressalta-se que essas ações demandam um volume de investimento significativo, eventualmente até superando a capacidade financeira das empresas. Em última análise, pode comprometer a participação das empresas no desenvolvimento dos sistemas reais que são a base do desenvolvimento econômico.

A rede básica de transmissão do Sistema Interligado Nacional (SIN), que

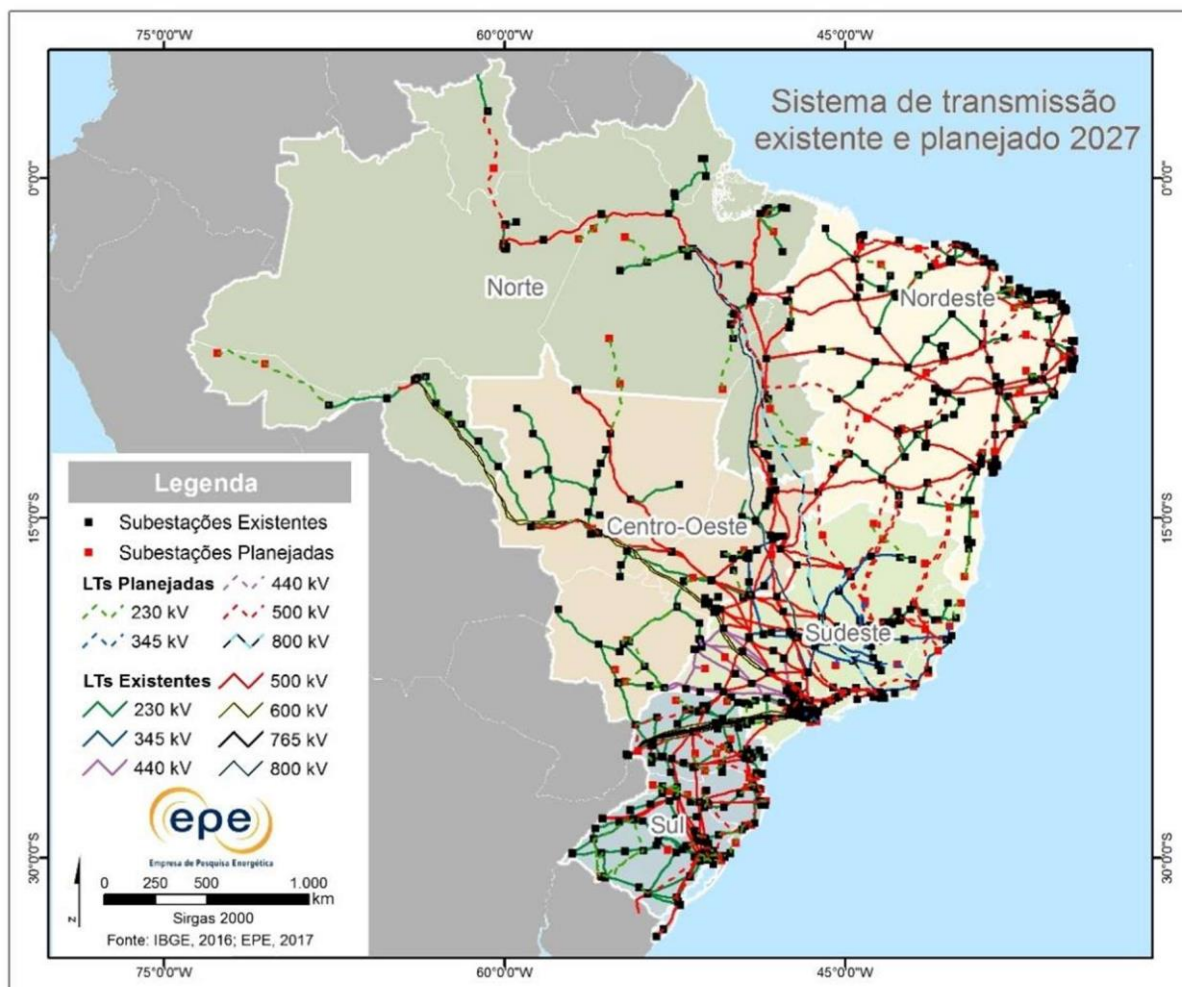
abrange tensões de 230 kV a 800 kV, desempenha as seguintes funções principais: (i) transmitir a energia gerada pelas usinas até os grandes centros de carga; (ii) integrar os diversos elementos do sistema elétrico para garantir a estabilidade e confiabilidade da rede; (iii) interligar bacias hidrográficas e regiões com características hidrológicas distintas para otimizar a geração hidrelétrica; e (iv) promover a integração energética com países vizinhos. A Figura 1-1 apresenta, de forma esquemática, a configuração do SIN em 2017, enquanto a Figura 1-2 mostra o sistema planejado até 2027. (BRASIL, 2018).

Figura 1-1 – Diagrama do Sistema Interligado Nacional em operação - 2017



Fonte: EPE – Webmap.

Figura 1-2 – Diagrama do Sistema Interligado Nacional planejado – 2027



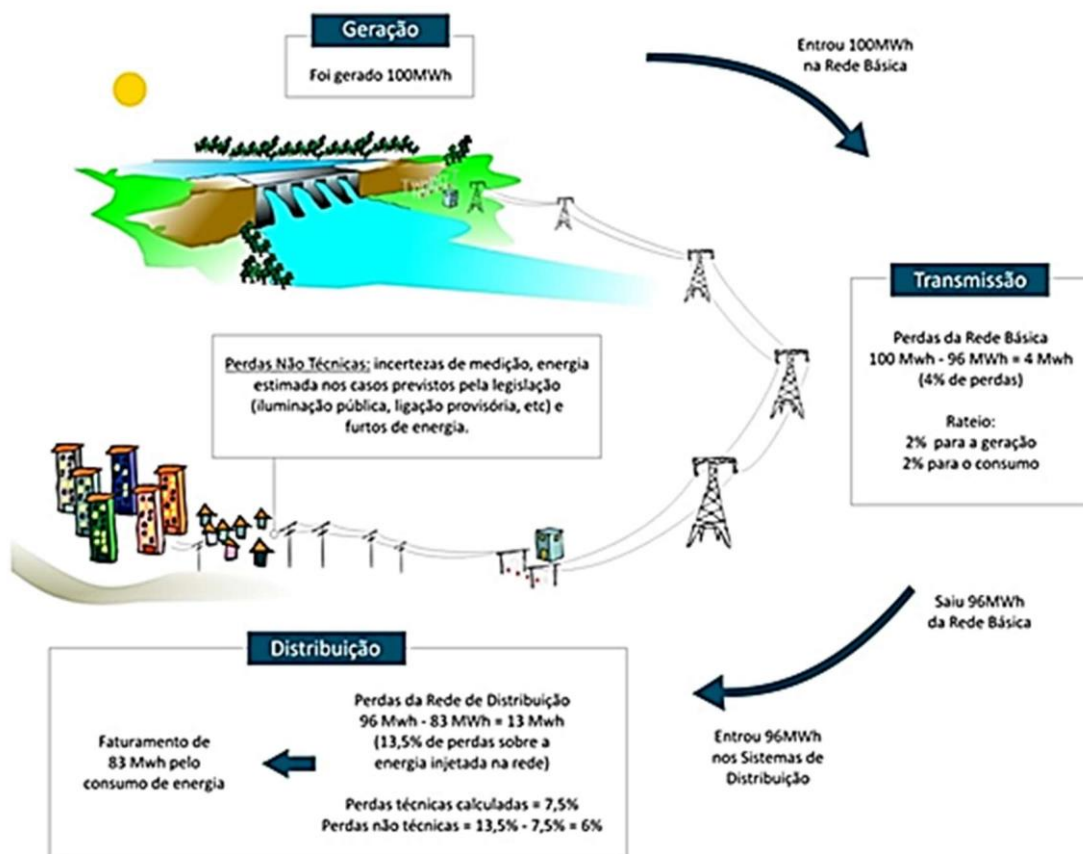
Fonte: EPE – Webmap.

As perdas de energia referem-se à energia elétrica gerada que é transmitida através de linhas de transmissão ou redes de distribuição, mas não é vendida por motivos técnicos ou comerciais. As perdas na distribuição podem ser definidas como a diferença entre a energia elétrica adquirida pela distribuidora e a energia elétrica faturada aos seus clientes. Essas perdas podem ser técnicas ou não técnicas (ANEEL, 2023).

As perdas técnicas são intrínsecas à atividade de distribuição de energia elétrica, pois uma parte da energia é dissipada durante o transporte, transformação de tensão e medição, conforme as leis da física. Essas perdas estão relacionadas às características de carregamento e à configuração das redes das concessionárias de distribuição. Os montantes de perdas técnicas são calculados em relação à energia

injetada, que é a energia elétrica inserida na rede de distribuição para atender aos consumidores, incluindo as perdas. Por outro lado, as perdas não técnicas, determinadas pela diferença entre as perdas totais e as perdas técnicas, são originadas principalmente por furtos (ligações clandestinas, desvio direto da rede), fraudes (adulterações no medidor ou desvios), erros de leitura, medição e faturamento. Popularmente conhecidas como "gatos", essas perdas estão amplamente associadas à gestão da concessionária e às características socioeconômicas das áreas de concessão. Os montantes de perdas não técnicas são calculados em relação ao mercado de baixa tensão, uma vez que essas perdas ocorrem predominantemente nesse segmento. (ANEEL, 2021).

Figura 1-3 – Sistema de cálculo de perdas da rede



Fonte: ANEEL – Perdas de Energia.

O planejamento de uma linha de transmissão requer cálculos elétricos e mecânicos, uma vez que o dimensionamento adequado dos componentes elétricos está intrinsecamente relacionado a aspectos mecânicos. Por exemplo, é necessário

dimensionar as estruturas capazes de suportar o peso dos cabos, resistir a rajadas de vento e lidar com eventualidades como o rompimento de cabos. Devido às deformações que os cabos sofrem, sua altura em relação ao solo entre duas estruturas é menor do que a altura das torres. Além disso, devido à possibilidade de vãos irregulares entre as torres, especialmente em regiões montanhosas, ao cruzar rios ou vales, é crucial otimizar o número e a altura das torres para reduzir custos. É necessário também definir adequadamente o tracionamento máximo permitido dos cabos nas estruturas (Zanetta, 2006).

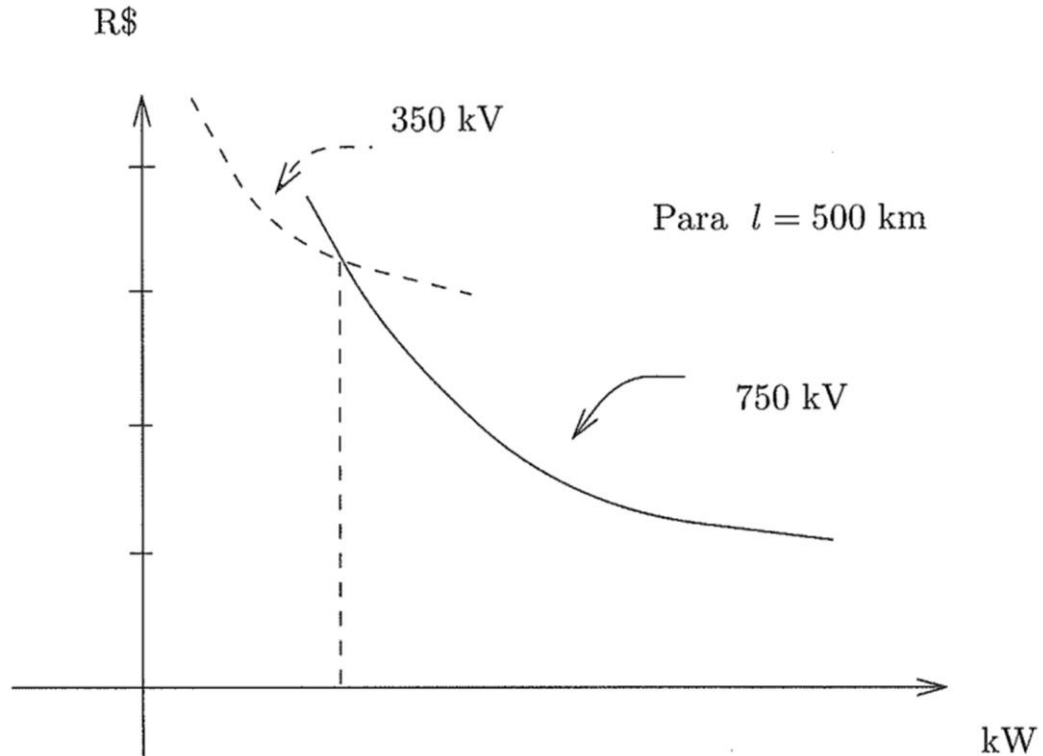
O aumento da tensão requer que os condutores sejam posicionados a uma altura maior em relação ao solo e que haja um espaçamento maior entre as fases. Isso implica na necessidade de estruturas de sustentação maiores, geralmente feitas de metal, conhecidas como torres de linhas de transmissão. Os cabos condutores são fixados às estruturas por meio de cadeias de isoladores e são compostos por fios encordoados que possuem propriedades elétricas e mecânicas distintas. Em termos mecânicos, variáveis como peso, resistência à tração e flexibilidade são destacadas, sendo esta última crucial para fabricação, transporte e montagem no local. Já em termos elétricos, as variáveis de condutividade e seção transversal são importantes considerações (Zanetta, 2006).

Por motivos econômicos, visando minimizar perdas, a transmissão de energia é geralmente realizada em níveis de tensão elevados, como 345 kV, 500 kV ou 750 kV. No entanto, devido às limitações físicas e de isolamento elétrico, os geradores não podem operar nessas faixas de tensão. Normalmente, com tecnologias convencionais, os geradores funcionam em tensões entre 10 kV e 30 kV. Portanto, geradores localizados distantes dos centros de consumo alimentam a rede por meio de transformadores elevadores, os quais têm a função de elevar a tensão da potência gerada para os níveis de transmissão, resultando em uma redução correspondente das correntes e, conseqüentemente, das perdas de transmissão (Monticelli et al., 1999).

A Figura 1-4 representa a variação do custo de transmissão conforme a potência transmitida para um determinado comprimento da linha de transmissão. Para potências menores, o sistema operando em 345 kV é mais vantajoso, porém, para potências mais elevadas, o sistema com tensão mais alta, como o de 750 kV por

exemplo, torna-se mais econômico em termos de custo por kW transportado.

Figura 1-4 – Custo de transmissão por kW transmitido para linhas de 345 kV e 750 kV considerando comprimento da linha fixo

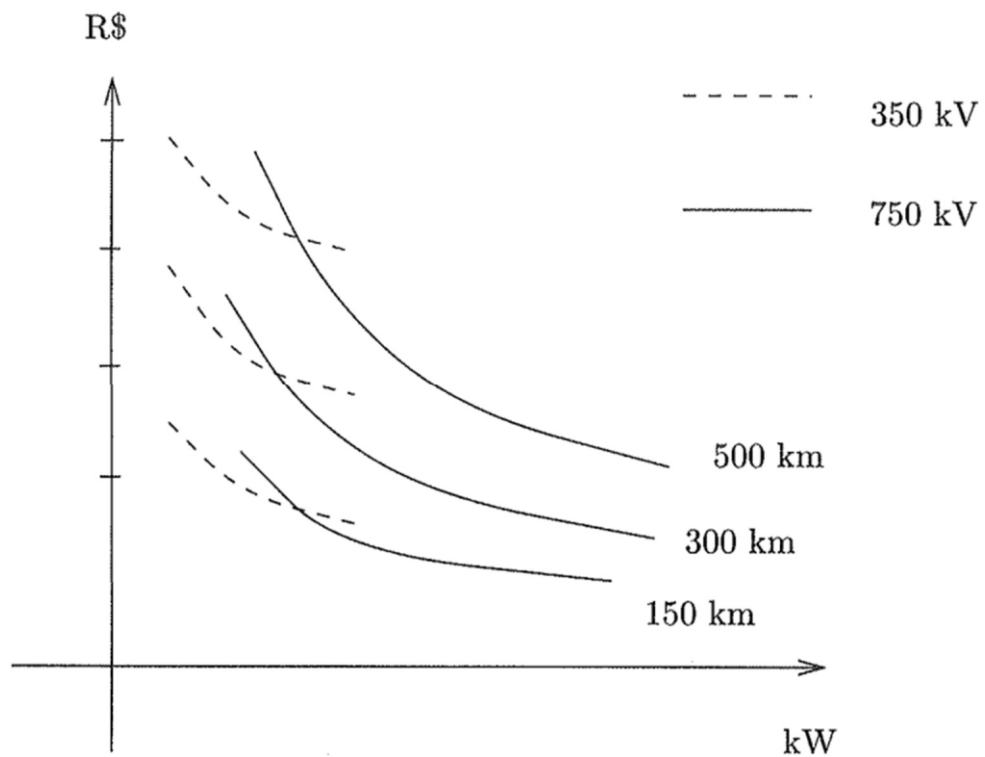


Fonte: Monticelli (1999).

A Figura 1-5 apresenta a variação do custo de transmissão conforme a potência transmitida e o comprimento da linha de transmissão. Para distâncias mais curtas, as linhas de 345 kV apresentam custos inferiores, enquanto para distâncias maiores, a transmissão em níveis de tensão mais elevados se torna vantajosa (como no exemplo de transmissão em 750 kV).

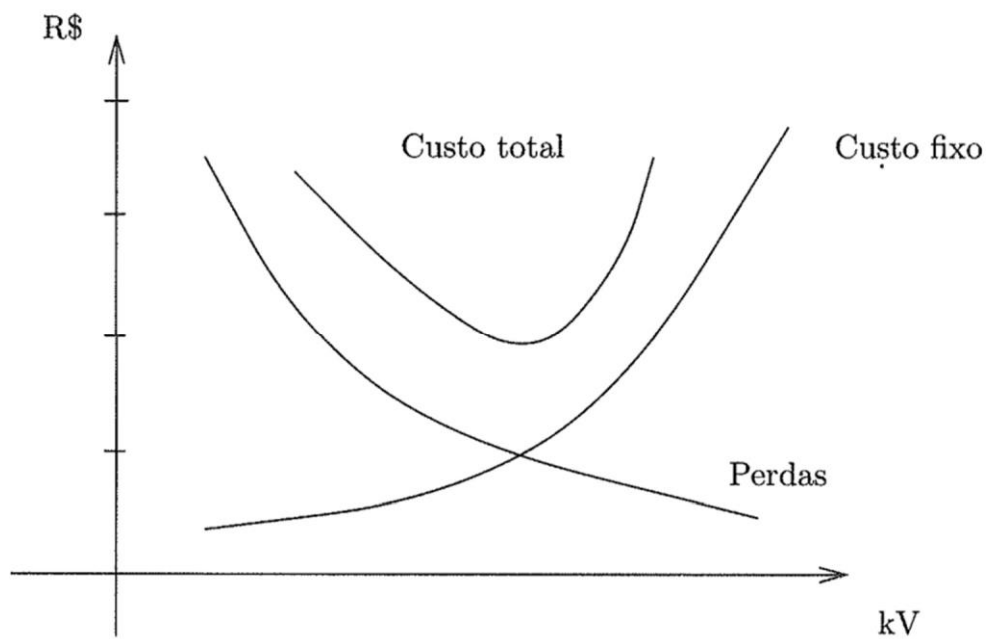
Os custos de transmissão podem ser categorizados em custos fixos, referentes aos investimentos em equipamentos, e custos variáveis, que englobam os custos das perdas de transmissão. A Figura 1-6 representa a variação dessas duas componentes dos custos em relação ao nível de tensão nominal da linha de transmissão, destacando a presença de um ponto de custo mínimo que representa o melhor equilíbrio entre custos fixos e variáveis. Os custos variáveis são calculados ao longo da vida útil esperada da linha e refletem as perdas previstas devido ao aquecimento dos condutores.

Figura 1-5 – Efeito da distância sobre o custo de transmissão por kW



Fonte: Monticelli (1999).

Figura 1-6 – Custos fixos/variáveis



Fonte: Monticelli (1999).

1.2 REGULAÇÃO DO SERVIÇO DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

A atividade de transmissão de energia elétrica no Brasil é regulada com o princípio de garantir o livre acesso à rede, mediante compensação dos custos de transporte envolvidos, conforme estabelece a Lei nº 9.074/1995. Essa regulação é uma das responsabilidades da ANEEL, que é encarregada de regular e fiscalizar a produção, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica, em conformidade com as políticas e diretrizes estabelecidas pelo Governo Federal, conforme definido pela Lei nº 9.427/1996.

A regulação dos serviços de transmissão de energia elétrica tem como objetivo assegurar a qualidade do serviço prestado, promover um ambiente regulatório seguro e alcançar um equilíbrio entre a atratividade do setor para os investidores e a moderação tarifária.

De modo geral, a transmissão de energia elétrica é realizada por meio de concessões, que são concedidas após processos de licitação na modalidade de leilão. Os vencedores desses leilões celebram contratos de concessão de serviço público de transmissão com o poder concedente, para a construção, operação e manutenção das instalações de transmissão. As concessionárias têm a responsabilidade de fornecer o serviço de forma adequada e realizar melhorias nas instalações existentes, mediante autorização da ANEEL (Vieira, 2009).

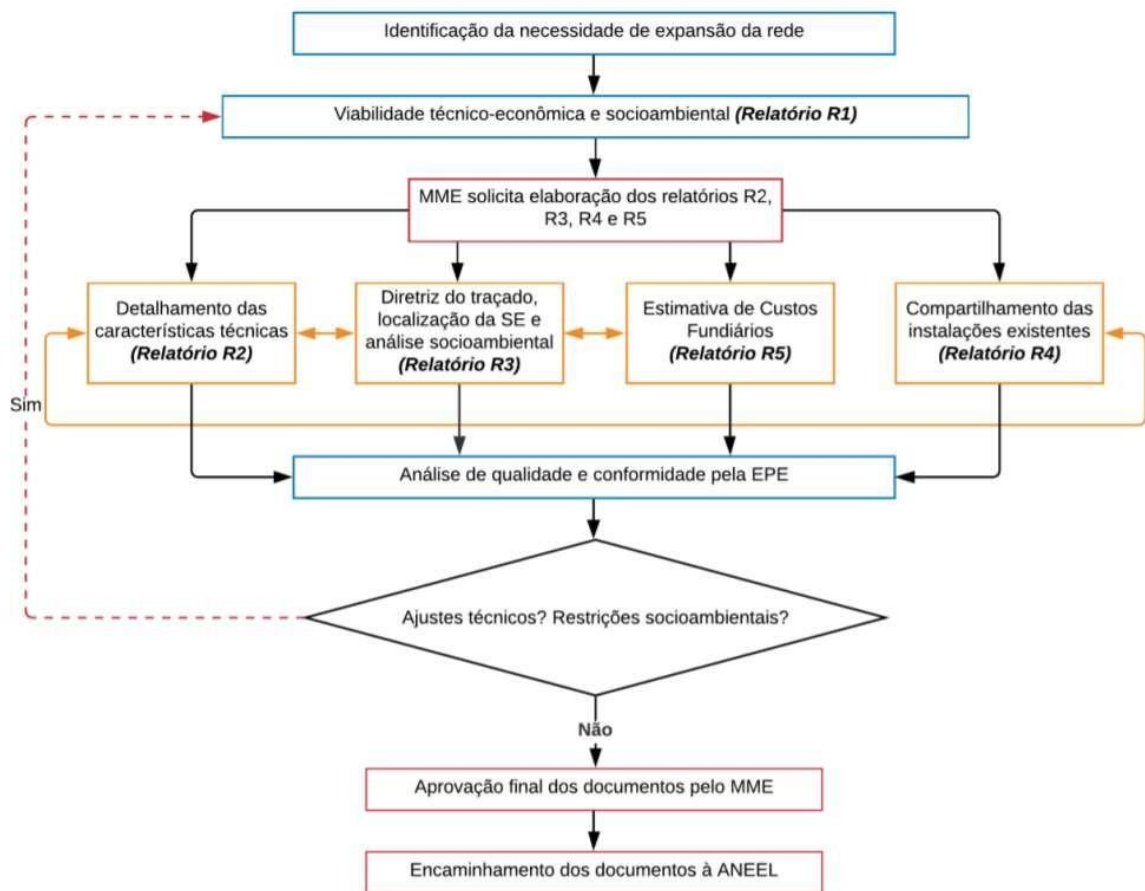
De acordo com a regulamentação do setor elétrico, todas as novas instalações de transmissão destinadas a integrar a rede básica devem ser recomendadas por estudos de planejamento de expansão conduzidos pelos Grupos de Estudo de Transmissão (GET), sob coordenação da EPE. Esse processo inicia-se com a elaboração dos estudos de planejamento, como os documentados nos relatórios R1, nos quais a EPE identifica os empreendimentos ou ampliações que compõem a melhor alternativa para suprir uma necessidade do sistema, baseando-se em análises técnico-econômicas e socioambientais.

Posteriormente, os empreendimentos planejados são organizados no Programa de Expansão da Transmissão (PET) e no Plano de Expansão de Longo Prazo (PELP), documentos gerenciais nos quais a EPE estrutura as obras conforme sua natureza e data prevista de implantação. O PET abrange apenas as obras determinativas,

definidas para os primeiros seis anos após o ano corrente, enquanto o PELP engloba as obras indicativas, abrangendo o período a partir do sétimo ano. Esses documentos têm como objetivo principal subsidiar o Ministério de Minas e Energia (MME) na priorização das instalações de transmissão a serem concedidas e fornecer orientações aos agentes setoriais e fornecedores sobre os investimentos futuros (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2024).

Quando se trata de licitações, o processo de planejamento exige, além do relatório R1, a elaboração de quatro documentos adicionais de detalhamento, designados como R2 a R5. Esses documentos são desenvolvidos para uma caracterização mais precisa de cada empreendimento, com o objetivo de instruir o processo licitatório conduzido pela ANEEL. Os itens a seguir delineiam o escopo de cada um desses relatórios.

Figura 1-7 – Diagrama de Identificação da necessidade de expansão da rede



Fonte: (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2024)

- O relatório R1 demonstra a viabilidade técnico-econômica e socioambiental da nova instalação.
- O relatório R2 apresenta o detalhamento técnico da alternativa de referência.
- O relatório R3 apresenta a diretriz de traçado para as LTs e localização das SEs, bem como a análise socioambiental associada.
- O relatório R4 define os requisitos do sistema circunvizinho, de forma a assegurar o adequado compartilhamento entre as instalações existentes e a nova obra.
- O relatório R5 apresenta a estimativa dos custos fundiários referentes à região onde a nova instalação será implantada.

1.3 OTIMIZAÇÃO E OBJETIVO

A otimização é uma área da matemática com amplas aplicações no mundo real, envolvendo a busca pelos mínimos ou máximos de uma função de várias variáveis dentro de uma região específica do espaço multidimensional. Aqueles responsáveis pela tomada de decisões em diversos campos da atividade humana se deparam diariamente com essa necessidade. Por vezes, a própria natureza do problema, a exigência por resultados precisos ou até mesmo a curiosidade levam à formalização de variáveis, restrições e objetivos, resultando na emergência da natureza matemática do problema. Esse processo, conhecido como modelagem, revela conexões entre a realidade empírica e o idealismo dos conceitos matemáticos. No entanto, a correspondência entre a experiência e o modelo formal é sujeita a erros, simplificações e falhas de comunicação, e ajustar um modelo matemático à situação real muitas vezes também se apresenta como um desafio de otimização (Martínez et al., 1998).

O planejamento da expansão da rede de transmissão (TNEP, do inglês *transmission network expansion planning*) consiste em desenvolver um plano para expandir uma rede de transmissão com o objetivo de reduzir os custos de construção e operação. O planejamento da expansão da rede de transmissão determina todas as mudanças necessárias na rede de transmissão, ou seja, adição, modificação ou substituição de instalações antigas. O planejamento da expansão da transmissão é um problema muito complexo para o sistema de energia. A complexidade do problema

deve-se à sua natureza inteira-mista das variáveis, além de ser um problema não linear e com região de busca não convexa. Para resolver esse problema, é introduzida a técnica de otimização por enxame de partículas (PSO, do inglês *particle swarm optimization*). O algoritmo PSO é uma técnica de otimização estocástica baseada em população. É um processo livre de derivadas e fácil de implementar. O objetivo principal é determinar os valores ótimos das variáveis para a minimização dos custos de investimento em condições normais de operação (Warudkar et al., 2017).

James Kennedy e Russell Elberhart introduziram o algoritmo PSO em 1995 com o objetivo de abordar problemas no domínio contínuo. O PSO surgiu a partir de estudos sobre algoritmos que simulam o “comportamento social” presente em diversas espécies de animais, como pássaros em bandos e cardumes de peixes, e até mesmo em interações sociais humanas.

A base do PSO reside em uma teoria sociocognitiva bastante simples. Cada membro de uma população possui sua própria experiência e é capaz de avaliar a qualidade dessa experiência. Devido à natureza social dos indivíduos, eles também têm conhecimento sobre o comportamento de seus vizinhos. Esses dois tipos de informações correspondem à aprendizagem individual (cognitiva) e à transmissão cultural (social), respectivamente. Portanto, a probabilidade de um determinado indivíduo tomar uma decisão específica será influenciada tanto pelo seu desempenho passado quanto pelo desempenho de alguns de seus vizinhos (Kennedy et al., 2001). São utilizados três princípios para resumir o processo de adaptação cultural:

- Avaliar: os indivíduos possuem a capacidade de sentir o ambiente de forma a estimar seu próprio comportamento;
- Comparar: os indivíduos usam uns aos outros como referência comparativa;
- Imitar: a imitação é central em organizações sociais humanas e é importante para a aquisição e manutenção das habilidades mentais.

Assim como outros métodos de inteligência coletiva, o PSO opera com base em uma população de indivíduos que podem interagir entre si e com o ambiente circundante. Por meio de autoavaliação, comparação e imitação, esses indivíduos conseguem lidar com diversas situações apresentadas pelo ambiente. Os

comportamentos globais que surgem são, portanto, resultados emergentes dessas interações.

No algoritmo PSO, os indivíduos da população são representados por pontos, denominados de partículas, que “voam” em um espaço de busca onde “d” é a dimensão do espaço. As variações nos atributos desses pontos levam a novos pontos no espaço, ou seja, correspondem a movimentações no espaço. Uma ideia inspirada em sistemas cognitivos é a de que essas partículas tenderão a mover-se em direção umas às outras e irão influenciar umas às outras (Serapião, 2009).

Esta técnica oferece uma abordagem valiosa para reduzir os custos durante o planejamento da expansão do sistema de transmissão de energia. O PSO permite determinar a maneira mais econômica de construir as linhas de transmissão, em busca de soluções que minimizem os custos, considerando a demanda de energia, a localização da carga e outros parâmetros relevantes. Ao otimizar a configuração das linhas de transmissão, o PSO reduz os custos de investimento, proporcionando um sistema mais eficiente e econômico para atender às crescentes demandas energéticas.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

A monografia está organizada da seguinte forma:

1. Neste Capítulo 1 são introduzidos o contexto do setor elétrico, desafios da transmissão de energia, assim como uma introdução sobre otimização.
2. No Capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica sobre o problema de TNEP.
3. No Capítulo 3 são discutidas as principais dificuldades na resolução do problema de TNEP e o modelo de fluxo de carga DC.
4. No Capítulo 4 são apresentadas definições e o funcionamento do algoritmo PSO.
5. No Capítulo 5 é discutido o TNEP baseado em otimização por enxame de partículas.
6. No Capítulo 6 são apresentados os testes e resultados.

7. No Capítulo 7 são apresentadas as conclusões deste estudo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 SOLUÇÃO PARA O PROBLEMA TNEP

A solução para o problema de TNEP define um plano de expansão ótimo para um sistema de transmissão de energia, garantindo o fornecimento contínuo de energia e atendendo a um aumento esperado na demanda. Em outras palavras, determina onde, quantas e quando novas linhas de transmissão devem ser construídas dentro de um horizonte de planejamento estipulado, a fim de atender ao crescimento da demanda ao menor custo, sem cortes de carga. O modelo DC é considerado por muitos pesquisadores como o modelo ideal para representar a operação de sistemas de transmissão para fins de planejamento, pois equilibra complexidade e a precisão. No entanto, ele desconsidera as perdas de transmissão que podem não ser negligenciáveis, resultando em planos de expansão com capacidades insuficientes (Alguacil et al., 2003).

Uma maneira de resolver o problema TNEP usando o modelo DC é convertê-lo em um problema de MILP com uma formulação disjuntiva. A vantagem dessa abordagem é que o problema original, não convexo MINLP, se torna um problema MILP que oferece a mesma solução que o problema original (quando as perdas de transmissão não são consideradas). A desvantagem dessa abordagem é que o modelo resultante possui um número significativamente maior de restrições e variáveis contínuas e discretas, além de um espaço de busca maior, o que dificulta a solução de sistemas de grande porte (Bahiense et al., 2001).

A decomposição matemática também tem sido utilizada para resolver o problema TNEP. O estudo de Binato et al. (2001) apresenta uma abordagem de decomposição de Benders para resolver o problema TNEP. O estudo de Majidi-Qadikolai et al. (2018) propõe um framework de decomposição para o problema TNEP, considerando a geração renovável e cenários de contingência. Finalmente, o estudo de Hong, Cheng e Zeng (2017) apresenta uma estratégia de decomposição de Benders para resolver o problema TNEP com investimentos simultâneos na expansão da geração, considerando contingências e incertezas na carga.

Outra abordagem, é usar um algoritmo de branch and bound (BB) para resolver

o problema TNEP diretamente. O estudo de Haffner et al. (2000) propôs um algoritmo BB para resolver o problema TNEP usando o modelo de transporte, que é um problema MILP. O estudo de Rider et al. (2008) também propôs um algoritmo BB, mas com um método de ponto interior para resolver o problema TNEP usando o modelo DC, que é um problema MINLP. O estudo de Delgado et al. (2013) apresenta um algoritmo BB para resolver o problema TNEP usando o modelo DC sem considerar perdas.

2.2 META-HEURÍSTICAS PARA PROBLEMA TNEP

Ao contrário dos métodos exatos, as meta-heurísticas permitem enfrentar instâncias de problemas de grande porte, fornecendo soluções satisfatórias em um tempo razoável. Não há garantia, entretanto, de se encontrar soluções ótimas globais ou mesmo soluções factíveis. Seu uso em muitas aplicações demonstra sua eficiência para resolver problemas grandes e complexos. A aplicação de meta-heurísticas abrange uma grande variedade de áreas (Talbi, 2009).

Meta-heurísticas têm sido amplamente empregadas na resolução do problema TNEP. Entre as diversas meta-heurísticas disponíveis, há trabalhos que utilizam o algoritmo de otimização por enxame de partículas, o algoritmo de busca por harmonia, o algoritmo de colônia de abelhas artificiais, o algoritmo multistart com path-relinking e a otimização evolutiva. Essas abordagens são robustas e adaptáveis, proporcionando resultados de boa qualidade, mas possuem várias desvantagens, incluindo alta demanda computacional, ajuste de parâmetros e estabelecimento de uma condição de parada (Glover et al., 2003).

Recentemente foi proposto o uso do modelo de operação AC no problema TNEP. Este tipo de problema é principalmente resolvido por heurísticas e meta-heurísticas, além de formulações convexas ou linearizadas. É importante destacar que ainda é desafiador lidar com o problema TNEP AC, pois as meta-heurísticas não asseguram a otimalidade de uma solução, enquanto formulações convexas ou linearizadas podem resultar em soluções inviáveis para o problema original (Talbi, 2009).

3 O PROBLEMA DE PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DE SISTEMAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

3.1 MODELAGEM DO PROBLEMA DE PLANEJAMENTO DE SISTEMAS DE TRANSMISSÃO

O problema de TNEP é um desafio clássico nos sistemas de energia. Neste problema, dada a configuração inicial do sistema de transmissão (incluindo circuitos possíveis, dados de geração e demanda, limites operacionais, restrições de custo e investimento para o período de planejamento), o objetivo é encontrar uma grande expansão planejada. Isto envolve determinar onde, quando e que tipo de equipamento precisa de ser implementado ao longo do tempo para servir o mercado elétrico e manter a qualidade do serviço ao menor custo possível. Este é um problema de PNLIM e possui diversas características. Modelagem matemática altamente não linear com redes desconectadas precocemente, fenômenos de explosão combinatória (mais opções de investimento em sistemas de médio e grande porte) e muitas otimizações locais. Devido a essas características, o problema TNEP tem atraído a atenção de diversos pesquisadores que utilizam diferentes técnicas para solucionar sua complexidade. (Vanderlinde, 2013).

A principal dificuldade na resolução do problema TNEP está relacionada à sua natureza combinatória, que gera um grande número de alternativas mesmo para sistemas de médio porte. Outro problema são as estruturas multimodais com um grande número de ótimos locais, dificultando a convergência de técnicas de otimização aproximada para ótimos locais de alta qualidade. Como qualquer outro problema de otimização matemática, o problema TNEP pode ser dividido em duas partes diferentes: a modelagem matemática e as técnicas de otimização utilizadas para encontrar a solução. Dada a complexidade do problema TNEP, é importante escolher técnicas apropriadas de modelagem matemática e solução para garantir que a solução não seja computacionalmente proibitiva. A modelagem matemática pode considerar vários aspectos do problema TNEP, como modelagem da rede elétrica, formatos de programação, requisitos de segurança, riscos, incerteza da demanda futura e modo de operação de acordo com as regras do mercado elétrico. (Vanderlinde, 2013).

A resolução de problemas de otimização em engenharia requer a implementação de dois processos sequenciais: a modelagem matemática e a solução escolhida para resolver o modelo matemático. Problemas de planejamento de rede, um tipo especial de otimização em sistemas de energia, também envolvem duas etapas: modelagem e técnicas de solução. A modelagem matemática consiste em representar um problema do mundo real através de um modelo matemático que relaciona um conjunto de variáveis de decisão através de múltiplos relacionamentos matemáticos. Esta modelagem pode ser uma representação exata ou simplista do problema real. Em geral, quanto mais precisa for a modelagem matemática de um problema do mundo real, mais complexa será a solução do modelo. Portanto, deve-se encontrar um equilíbrio entre a modelagem utilizada e o método de solução escolhido. (Monticelli et al., 2000).

A modelagem deve representar adequadamente o problema real e permitir sua solução utilizando tecnologia disponível e complexidade computacional aceitável. Neste contexto, o conceito de modelagem adequada muda ao longo do tempo, à medida que o desenvolvimento de novas tecnologias de soluções e a fabricação de computadores mais rápidos permitem modelos altamente complexos. Também fica claro que a solução escolhida resolve o modelo matemático e não necessariamente resolve o problema real.

O verdadeiro problema no planejamento de uma rede de transmissão de energia é um sistema elétrico com sua topologia atual, e o objetivo é encontrar o plano de expansão ideal (nova construção de circuitos elétricos) para um período de planejamento definido. Isto envolve determinar onde e que tipos de circuitos precisam ser construídos para que o sistema funcione adequadamente, dado o constante aumento da demanda (Monticelli et al., 2000).

Neste contexto, a modelagem matemática ideal para demonstrar o comportamento adequado é expressar o problema através de relações matemáticas de corrente AC. Entretanto, a modelagem de fluxo de potência AC não é usada para planejamento de sistemas de transmissão por diversas razões importantes. Geralmente, a topologia inicial de um sistema elétrico planejado é desconexa, com barras separadas do corpo principal do sistema. O planejamento da rede trata apenas de fontes ativas; Mesmo quando os sistemas elétricos estão conectados, a convergência dos modelos AC pode ser difícil ou impossível porque muitas vezes não

há solução para o problema (Monticelli et al., 2000).

Além disso, não existe uma tecnologia de solução que aborda simultaneamente a expansão da rede (construção de linhas e/ou transformadores) e a distribuição de energia reativa no sistema de energia. Considerando essas observações, uma modelagem matemática conhecida como fluxo de carga DC é considerada ideal para problemas de planejamento de sistemas de transmissão e é referida como modelo DC. As principais razões para este acordo são: extensos testes experimentais mostraram que os resultados obtidos com o modelo DC estão muito próximos dos resultados do fluxo de potência AC em termos de distribuição do fluxo de potência ativa. Existem diversas técnicas de solução (algoritmos) que utilizam modelos DC para resolver adequadamente problemas de planejamento (Monticelli et al., 2000).

Ao longo de 30 anos de pesquisa em planejamento de sistemas de transmissão, vários modelos matemáticos foram propostos para representar este problema. Três desses modelos ainda são utilizados no trabalho de planejamento: o modelo de transporte, o modelo híbrido e o modelo DC, e diversas variações desses modelos também são amplamente utilizadas.

3.2 MODELO DC

O modelo DC é uma generalização do modelo de fluxo de carga DC. Este modelo é considerado ideal para realizar tarefas de planejamento de redes de transmissão. No modelo DC, todo o sistema elétrico deve satisfazer ambas as leis de Kirchhoff. Isto é, todas as barras do sistema devem satisfazer a primeira lei de Kirchhoff, e todos os laços existentes devem satisfazer a segunda lei de Kirchhoff. Extensos testes experimentais demonstraram que a topologia identificada usando o modelo DC tem um bom desempenho quando avaliada em relação aos modelos tradicionais de comportamento do sistema de energia, como o fluxo de carga AC.

A formulação matemática do modelo DC assuma a seguinte forma:

$$\underset{ij}{\text{minimizar}} \ v = \sum C_{ij} n_{ij} \quad (1)$$

Sujeito a:

$$S f + g = d \quad (2)$$

$$f_{ij} - (\gamma^0 + \gamma^{eq})_{ij}(\theta_i - \theta_j) = 0 \quad (3)$$

$$f_{ij} \leq (\gamma^{eq} + \gamma^0)_{ij} \bar{\phi}_{ij} \quad (4)$$

$$0 \leq g \leq \bar{g} \quad (5)$$

$$0 \leq n_{ij} \leq \bar{n}_{ij} \quad (6)$$

$$n_{ij} \quad \text{Inteiro} \quad (7)$$

$$\gamma_{ij}^{eq} \quad \text{Discreto} \quad (8)$$

$$f_{ij} \quad \text{Irrestrito} \quad (9)$$

$$\theta_j \quad \text{Irrestrito} \quad (10)$$

em que o γ_{ij}^0 representa a susceptância equivalente dos circuitos existentes no caminho $i - j$ na configuração base, γ_{ij} representa a susceptância de um circuito no caminho $i - j$, γ_{ij}^{eq} representa a susceptância equivalente dos circuitos adicionados no caminho $i - j$ e as seguintes relações são válidas:

$$n_{ij} = \frac{\gamma_{ij}^{eq}}{\gamma_{ij}} \quad \bar{\phi}_{ij} = \frac{\bar{f}_{ij}}{\gamma_{ij}} \quad (11)$$

Usando as relações anteriores podem ser eliminadas as incógnitas γ_{ij}^{eq} ou n_{ij} da formulação do modelo DC.

Após as formulações, pode-se chegar a uma formulação equivalente que assume a seguinte forma:

$$\text{minimizar } v = \sum_{ij} C_{ij} n_{ij} \quad (12)$$

Sujeito a:

$$B\theta + g = d \quad (13)$$

$$|\theta_i - \theta_j| \leq \bar{\phi}_{ij} \quad \forall ij \in \Omega_1 \quad (14)$$

$$\gamma_{ij}^{\text{eq}} |\theta_i - \theta_j| \leq \gamma_{ij}^{\text{eq}} \bar{\phi}_{ij} \quad \forall ij \in \Omega_2 \quad (15)$$

$$0 \leq g \leq \bar{g} \quad (16)$$

$$0 \leq n_{ij} \leq \bar{n}_{ij} \quad (17)$$

$$n_{ij} \quad \text{Inteiro} \quad (18)$$

$$\gamma_{ij}^{\text{eq}} \quad \text{Discreto} \quad (19)$$

$$\theta_j \quad \text{Irrestrito} \quad (20)$$

em que B é a matriz de susceptâncias do sistema elétrico e θ é o vetor de ângulos de tensão de barras do sistema elétrico.

4 ALGORITMO DE OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS

4.1 MÉTODOS HEURÍSTICOS E META-HEURÍSTICAS

Os métodos heurísticos são algoritmos exploratórios que tentam resolver problemas. Estes normalmente não requerem a implementação computacional de conhecimentos especiais (por exemplo, métodos heurísticos para resolver equações quadráticas não requerem necessariamente o uso da fórmula de Bhaskara, mas podem ser usados para encontrar soluções que satisfaçam as equações através de outros métodos). Por esta razão, estes métodos são frequentemente classificados como “pesquisas cegas” (Bueno, 2009).

Uma solução ótima nem sempre é o objetivo dos métodos heurísticos. Partindo de uma solução viável, esses métodos utilizam sucessivas aproximações direcionadas a um ponto ótimo. Assim, costumam encontrar as melhores soluções possíveis para problemas, em vez de soluções exatas.

Essa subjetividade, ou falta de precisão dos métodos heurísticos, não é uma deficiência, mas uma característica análoga à inteligência humana. Frequentemente, resolve-se diversos problemas cotidianos sem conhecê-los com precisão. Por exemplo, ao preparar uma refeição, geralmente ajusta-se os temperos com base no gosto e na experiência, sem medir exatamente cada ingrediente; ao adoçar uma bebida, não se conhece as medidas exatas e; ao tentar mover ou levantar um objeto, raramente considera-se as leis da física que podem auxiliar ou comprometer a ação. Nessas e em muitas outras situações, encontra-se e adota-se a melhor solução imediata, em detrimento de soluções comprovadamente ótimas e precisas.

Entretanto, é importante destacar que, do ponto de vista teórico, as técnicas heurísticas não buscam descobrir o resultado globalmente ótimo para um problema complexo. Em problemas de grande porte e alta complexidade, essas técnicas raramente alcançam soluções globalmente ótimas. A complexidade de um problema pode se manifestar de diversas formas, seja devido a uma explosão combinatória à medida que o tamanho do problema aumenta, ou à natureza intrincada do modelo matemático subjacente, que pode envolver variáveis inteiras ou discretas, funções objetivo não lineares e não diferenciáveis, restrições não lineares e regiões factíveis

não convexas, entre outros fatores.

4.2 OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS

As técnicas de enxame de partículas se inspiram no comportamento social de animais, como enxames de abelhas, cardumes de peixes ou bandos de pássaros. Em tais grupos, cada indivíduo toma decisões próprias, mas sempre influenciado pela experiência do líder do grupo. Matematicamente, cada indivíduo é representado como um ponto em um espaço n -dimensional, e sua velocidade indica a direção de busca para a solução candidata. A direção de busca em cada iteração é determinada pela ponderação entre a experiência individual daquela solução e a melhor solução encontrada pelo grupo (ou seja, a solução líder). O peso de inércia w é utilizado para controlar o impacto da história prévia de velocidade na velocidade atual. Um valor maior de w favorece a exploração global, enquanto um valor menor facilita a exploração local. A seleção adequada do peso de inércia w proporciona um equilíbrio entre a capacidade de exploração global e local. Os principais parâmetros do método são as ponderações entre as experiências individual e coletiva (c_1 e c_2) e o fator de inércia w . (Kennedy et al., 2001)

Diferentes variantes do algoritmo PSO foram propostas, global do PSO (modelo Gbest), aquela mais padronizada onde toda a população é considerada como uma única vizinhança durante o processo de otimização. Uma característica atraente da abordagem PSO é sua simplicidade, pois envolve apenas duas equações do modelo. No PSO, as coordenadas de cada partícula representam uma possível solução associada a dois vetores, a posição (x_i) e a velocidade (v_i). No espaço de busca n -dimensional, $X_i = [x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,n}]$ e $V_i = [v_{i,1}, v_{i,2}, \dots, v_{i,n}]$ são os dois vetores associados a cada partícula i . Um enxame consiste em várias partículas, “ou soluções possíveis,” que se movem (voam) pelo espaço de soluções viáveis para explorar soluções ótimas (Alrashidi et al., 2009). Cada partícula atualiza sua posição com base na sua própria melhor exploração, na melhor experiência geral do enxame e no seu vetor de velocidade anterior, de acordo com o seguinte modelo:

$$v_i^{k+1} = w v_i^k + c_1 r_1 (pbest_i^k - x_i^k) + c_2 r_2 (gbest^k - x_i^k) \quad (21)$$

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \quad (22)$$

em que:

c_1 e c_2 são duas constantes positivas

r_1 e r_2 são dois números gerados aleatoriamente com um intervalo de [0,1]

w é o peso de inércia

$pbest_i^k$ é a partícula de melhor posição i alcançada com base em sua própria experiencia: $pbest_i^k = [x_{i,1}^{pbest}, x_{i,2}^{pbest}, \dots, x_{i,n}^{pbest}]$;

$gbest_i^k$ é a melhor posição das partículas com base na experiencia geral do enxame: $gbest_i^k = [x_1^{gbest}, x_2^{gbest}, \dots, x_n^{gbest}]$;

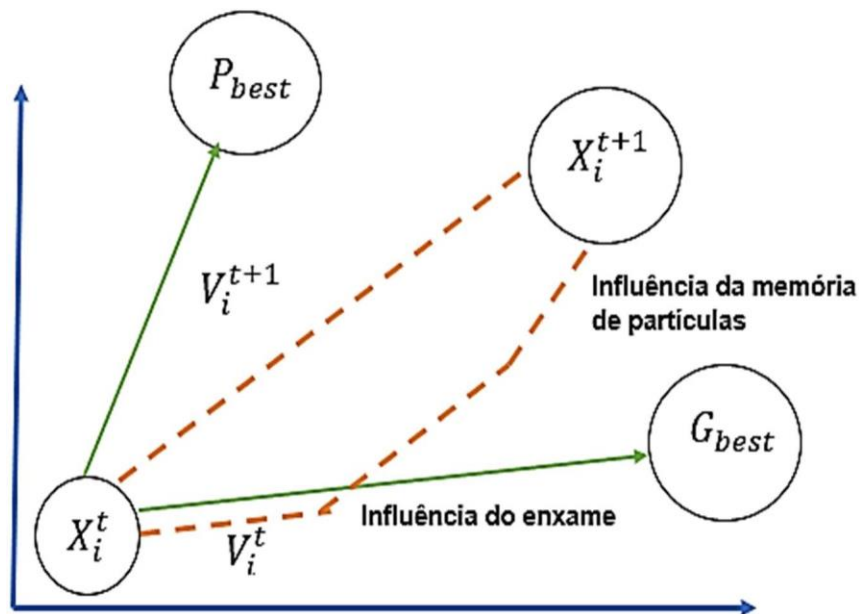
k é o índice de iteração

O PSO é uma técnica evolutiva baseada em população que possui muitas vantagens-chave sobre outras técnicas de otimização, tais como:

- É um algoritmo livre de derivadas, ao contrário de muitas técnicas convencionais.
- Tem a flexibilidade de ser integrado a outras técnicas de otimização para formar ferramentas híbridas.
- É menos sensível à natureza da função objetivo, ou seja, à convexidade ou continuidade.
- Possui menos parâmetros para ajustar em comparação com muitas outras técnicas evolutivas concorrentes.
- Tem a capacidade de escapar de mínimos locais.
- É fácil de implementar e programar com operações matemáticas e lógicas básicas.

- Pode lidar com funções objetivo de natureza estocástica, como no caso de representar uma das variáveis de otimização como aleatória.
- Não requer uma boa solução inicial para iniciar seu processo de iteração.

Figura 4-1 – Representação do modelo de otimização por enxame de partículas



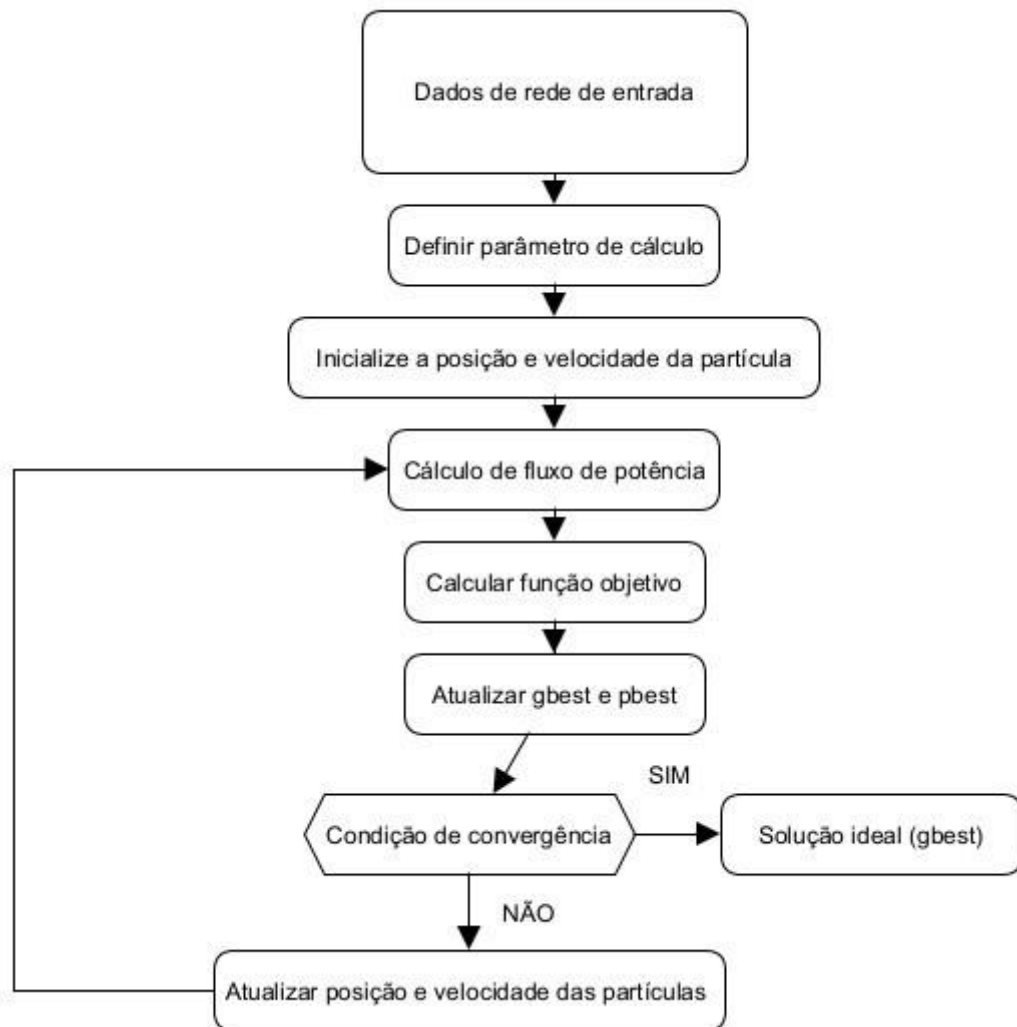
Fonte: Próprio Autor

No presente trabalho, devido à natureza inteira das variáveis relacionadas à construção de linhas de transmissão, uma etapa de arredondamento das variáveis inteiras com valor corrente não inteiro foi implementada. A etapa consiste apenas em arredondar os valores não inteiros para o inteiro mais próximo.

Resolver problemas de otimização com variáveis inteiras, como o TNEP usando o algoritmo PSO apresenta diversas dificuldades. Abaixo estão algumas das principais:

1. Natureza discreta das variáveis inteiras: Os problemas com variáveis inteiras são inerentemente discretos, o que significa que as soluções possíveis são limitadas a valores inteiros. Isso contrasta com problemas de otimização contínua, onde as soluções podem assumir qualquer valor real dentro de um intervalo. A natureza discreta aumenta a complexidade, pois a busca por soluções ótimas deve ser feita em um espaço de solução não contínuo.

Figura 4-2 – Fluxograma para resolução do TNEP usando PSO



Fonte: Próprio Autor

2. Característica combinatorial e complexidade computacional: O número de combinações possíveis de variáveis inteiras cresce exponencialmente com o aumento do número de variáveis e dos seus possíveis valores. No contexto do TNEP, isso pode significar avaliar milhares ou milhões de combinações de possíveis expansões e configurações. Esse crescimento combinatorial torna o problema computacionalmente intensivo e difícil de resolver em um tempo razoável.
3. Adaptação do algoritmo PSO: O algoritmo PSO foi originalmente desenvolvido para problemas de otimização contínua. Adaptá-lo para lidar com variáveis inteiras requer modificações significativas. As principais adaptações incluem a maneira como as partículas são atualizadas e movimentadas no espaço de

soluções. Em problemas contínuos, as partículas se movem suavemente, mas em problemas discretos, o movimento deve ser ajustado para garantir que as posições das partículas correspondam a valores inteiros válidos.

4. Manutenção da diversidade da população: Manter a diversidade da população de partículas é crucial para evitar a convergência prematura em soluções subótimas. Em problemas de variáveis inteiras, é mais difícil manter essa diversidade, pois a movimentação discreta das partículas pode levar a uma exploração insuficiente do espaço de soluções. Estratégias como mutação ou reinicialização periódica das partículas podem ser necessárias para assegurar uma busca mais ampla e eficiente.
5. Restrições do problema: Problemas reais, como TNEP, frequentemente envolvem muitas restrições (e.g., limitações de capacidade). Incorporar essas restrições em um algoritmo PSO adaptado para variáveis inteiras adiciona uma camada adicional de complexidade, pois cada movimento das partículas deve ser avaliado não apenas em termos de qualidade da solução, mas também em conformidade com todas as restrições impostas.
6. Avaliação da função objetivo: A função objetivo em problemas de planejamento de sistemas de transmissão pode ser complexa e demorada de calcular, especialmente quando envolve simulações detalhadas do sistema de energia elétrica. Cada iteração do algoritmo PSO pode exigir muitas avaliações da função objetivo, tornando o processo ainda mais computacionalmente custoso.
8. Convergência e qualidade da solução: Garantir a convergência para uma solução ótima ou próxima do ótimo é mais desafiador em problemas com variáveis inteiras devido à natureza discreta do espaço de soluções. Métodos heurísticos como PSO não garantem encontrar a solução ótima, e é necessário um cuidado extra para garantir que as soluções encontradas sejam de alta qualidade.

5 PLANEJAMENTO DE EXPANSÃO DE TRANSMISSÃO BASEADO EM OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS

A maior parte do TNEP decorre do contínuo aumento na demanda por eletricidade. Mesmo com melhorias significativas na eficiência dos aparelhos elétricos e no uso por uma população crescente e uma economia em expansão, isso resulta em uma demanda crescente de energia elétrica. O problema de TNEP envolve duas tarefas intimamente relacionadas: o subproblema de investimento e o de operação. O planejamento da expansão da transmissão em sistemas elétricos de potência é uma tarefa complexa, que requer a determinação de onde, quando e quais instalações devem ser construídas para garantir um fornecimento econômico e confiável da carga prevista até o ano horizonte. Posteriormente, o planejador deve determinar o plano de custo mínimo, levando em consideração os dados iniciais disponíveis e alguns critérios de confiabilidade. Esses dados incluem a topologia do ano-base, circuitos candidatos, previsões de geração e demanda para o horizonte de planejamento, restrições de investimento, entre outros. Técnicas como programação dinâmica, programação linear, programação não linear, programação inteira mista, decomposição hierárquica e método branch and bound têm sido empregadas e são classificadas como abordagens baseadas em otimização matemática (Warudkar et al., 2017).

Os problemas de otimização em sistemas elétricos de potência apresentam uma grande variedade e podem ser classificados de acordo com as características da função objetivo e/ou o tipo de restrições envolvidas. São comumente denominados como problemas de otimização linear, não linear, inteira e/ou mista, com restrições. Tradicionalmente, uma técnica de otimização baseada em derivadas é empregada para lidar com um problema específico, conforme sua formulação, que demanda, entre outros requisitos, diferenciabilidade. No entanto, a técnica PSO pode ser facilmente adaptada para atender a várias categorias de problemas de otimização com pequenas modificações. Essa característica fundamental torna o PSO um otimizador de propósito geral capaz de resolver uma ampla gama de problemas de otimização. As aplicações do PSO em sistemas elétricos de potência seguem padrões semelhantes aos de diferentes áreas de pesquisa, uma vez que uma formulação comum é estabelecida. No entanto, a calibração dos parâmetros do PSO pode variar

de uma aplicação para outra (Alrashidi et al., 2009).

Na formulação do problema TNEP, geradores artificiais são considerados em cada barra de demanda, com uma capacidade de geração igual à demanda de potência ativa correspondente da barra no qual está instalado. O preço de geração de um gerador artificial é Υ MUS\$/MW. O nível total de geração de todos os geradores artificiais representa o corte de carga de uma proposta de expansão. Portanto, é uma medida de inviabilidade de uma proposta de solução. Para ser viável, uma proposta de solução deve apresentar um corte total de carga igual a zero.

Se o número de linhas a serem construídas em cada corredor for conhecido (determinado pela meta-heurística), o problema TNEP se torna um problema de programação linear (PL), no qual a função objetivo é minimizar o custo de geração dos geradores artificiais. Esse modelo resultante, quando o número de linhas em cada corredor está fixo, é um problema de fluxo de potência ótimo (OPF, do *inglês optimal power flow*) DC.

O MATPOWER é usado para resolver esse problema resultante de OPF DC para cada proposta de solução a fim de determinar o desligamento total de carga. Observa-se que o custo de investimento pode ser facilmente calculado por $\vec{C}\vec{x}_i$, onde $\vec{C}$ é o vetor de custos e $\vec{x}_i$ é a i -ésima proposta de solução. Seja r_i o corte de carga na barra i , então o valor da função objetivo, $v''(\vec{x}_i)$, é apresentado a seguir:

$$v''(\vec{x}_i) = \vec{C}\vec{x}_i + \Upsilon \sum_{i \in \Omega_N} r_i \quad (23)$$

Na formulação proposta, toda solução variável $\vec{x}_i$ apresentará um corte total de carga igual a zero, enquanto as soluções inviáveis apresentarão um corte total de carga (ou valor de geração artificial) maior que zero. Além disso, observe que o problema DC OPF sempre será viável, pois é possível atender à demanda por meio da geração artificial.

Conforme mencionado anteriormente, uma geração artificial é considerada em cada barramento de carga, representando um corte de carga, com uma capacidade igual à demanda de energia no barramento. Para cada gerador artificial, é atribuído um custo de geração (penalização por corte de carga) de $\Upsilon = 10^9$ MUS\$/MW. As

plantas de geração existentes têm um custo de geração igual a zero. O plano de expansão fornecido pela meta-heurística deve apresentar, portanto, um valor total de geração artificial (corte de carga) igual a zero para ser considerado viável.

Finalmente, note que cada corredor ij tem valores diferentes para N_{ij}^0 , o número de linhas existentes no corredor ij , X_{ij} , a reatância de uma linha no corredor ij , $\overline{F}_{ij}$, a capacidade de uma linha no corredor ij , e C_{ij} , o custo de construção de uma linha no corredor ij .

O modelo DC para o problema TNEP é apresentado a seguir:

$$\text{minimizar } v = \sum_{ij \in \Omega_B} C_{ij} n_{ij} + Y \sum_{i \in \Omega_N} r_i \quad (24)$$

Sujeito a:

$$\sum_{ji \in \Omega_B} f_{ji} - \sum_{ij \in \Omega_B} f_{ij} + G_i + r_i = D_i \quad \forall i \in \Omega_N \quad (25)$$

$$f_{ij} = (N_{ij}^0 + n_{ij}) \frac{(\theta_i - \theta_j)}{X_{ij}} \quad \forall ij \in \Omega_B \quad (26)$$

$$|f_{ij}| \leq \overline{F}_{ij} (N_{ij}^0 + n_{ij}) \quad \forall ij \in \Omega_B \quad (27)$$

$$0 \leq r_i \leq D_i \quad \forall i \in \Omega_N \quad (28)$$

$$0 \leq n_{ij} \leq N_{ij} \quad \forall ij \in \Omega_B \quad (29)$$

$$n_{ij} \in \mathbb{Z} \quad \forall ij \in \Omega_B \quad (30)$$

Neste modelo, Ω_N é o conjunto de barras e Ω_B é o conjunto de ramos (ou corredores). Os parâmetros são: C_{ij} é o custo de construção de uma linha no corredor ij , Y é o custo de corte de carga, G_i é a geração de potência ativa na barra i , D_i é a

demanda ativa na barra i , N_{ij}^0 é o número de linhas existentes no corredor ij , X_{ij} é a reatância de uma linha no corredor ij , $\bar{F}_{ij}$ é a capacidade de uma linha no corredor ij , e $\bar{N}_{ij}$ é o número máximo de linhas que podem ser construídas no corredor ij . As variáveis são: n_{ij} é o número de linhas construídas no corredor ij , r_i é o corte de carga na barra i , f_{ij} é o fluxo de potência ativa no corredor ij , e θ_i é o ângulo de fase de tensão na barra i .

A função objetivo (24) minimiza o custo de investimento para construção de novas linhas de transmissão e o custo total de corte de carga. A equação (25) representa a lei de Kirchhoff da corrente em cada barra do sistema. A restrição (26) representa a aplicação da lei de Kirchhoff da tensão em cada laço fundamental do sistema. A restrição (27) determina os limites de capacidade de transmissão dos corredores considerando o número de linhas existentes e novas linhas. Nessa restrição, o uso do valor absoluto é necessário porque os fluxos são bidirecionais. A restrição (28) é o limite de corte de carga nos barramentos. A restrição (29) representa o limite para o número de novas linhas que podem ser instaladas em cada corredor. Finalmente, (30) indica que a variável n_{ij} deve ser inteira, representando a maior fonte de complexidade no problema. Além disso, θ_i deve ser fixado em zero na barra de referência. Este é um problema de MINLP não convexo, que também é multimodal e muito difícil de resolver para instâncias grandes.

Se n_{ij} for fixado em $n_{ij}^* \forall ij \in \Omega_B$, então o modelo resultante se torna o problema de programação linear (PL) apresentado a seguir:

$$\text{minimizar } v' = Y \sum_{i \in \Omega_B} r_i \quad (31)$$

Sujeito a

$$\sum_{ji \in \Omega_B} f_{ji} - \sum_{ij \in \Omega_B} f_{ij} + G_i + r_i = D_i \quad \forall i \in \Omega_N \quad (32)$$

$$f_{ij} = (N_{ij}^0 + n_{ij}^*) \frac{(\theta_i - \theta_j)}{X_{ij}} \quad \forall ij \in \Omega_B \quad (33)$$

$$|f_{ij}| \leq F_{ij}(N_{ij}^o + n_{ij}^*) \quad \forall ij \in \Omega_B \quad (34)$$

$$0 \leq r_i \leq D_i \quad \forall i \in \Omega_N \quad (35)$$

Neste modelo, o corte de carga é minimizado na função objetivo (31). As restrições (32) e (33) são a aplicação das leis de Kirchhoff ao sistema, (34) é o limite de capacidade de transmissão e (35) é o limite de corte de carga em cada barramento. Além disso, θ_i deve ser fixado em zero no barramento de referência.

Este modelo fornece o corte de carga para uma proposta de solução $n_{ij}^* \forall ij \in \Omega_B$ fornecida pela meta-heurística. Note que uma proposta de solução n_{ij}^* é viável apenas se o valor correspondente do corte de carga, v' , em (31) for zero. Este é um problema de fluxo de potência ótimo em corrente contínua (DC OPF), que pode ser construído e resolvido usando o MATPOWER e um solucionador de programação linear (PL).

A função objetivo para uma dada proposta de solução, v'' , é mostrada a seguir:

$$v'' = \sum_{ij \in \Omega_B} C_{ij} n_{ij}^* + Y \sum_{i \in \Omega_N} r_i \quad (36)$$

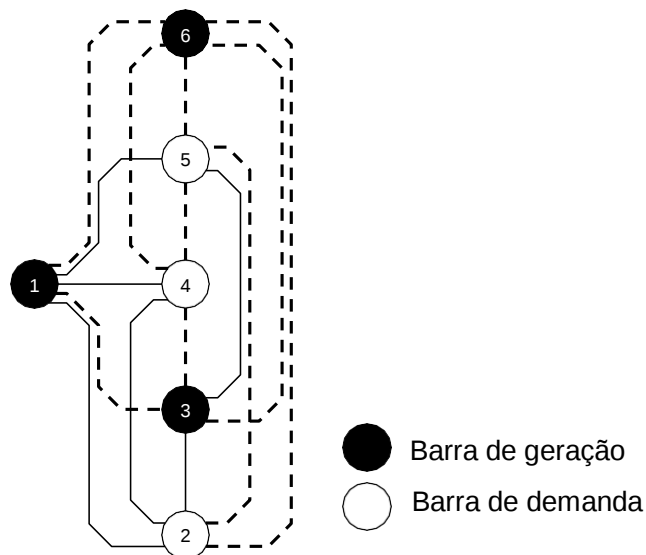
A primeira parte de v'' é calculada multiplicando cada elemento de uma proposta de solução, n_{ij}^* , pelo custo correspondente, C_{ij} , e somando os valores. O segundo termo, que representa o corte de carga, é fornecido pela resolução de um problema de fluxo de potência ótimo em corrente contínua (DC OPF) usando o MATPOWER.

6 TESTES E RESULTADOS

6.1 DADOS DO PROBLEMA

O sistema Garver é um sistema teste clássico utilizado no planejamento da expansão da transmissão de energia elétrica. Como mostra a Figura 6-1 o sistema é composto por seis barras, 15 ramos candidatos e uma demanda total de 760 MW. Este sistema apresenta um desafio ideal para avaliar a eficácia de algoritmos de otimização, como o PSO, pois a solução ótima é conhecida.

Figura 6-1 – Rede original do sistema Garver de seis barras



Fonte: (Warudkar et al., 2017).

Para testar o algoritmo PSO no Matlab, utiliza-se os seguintes parâmetros:

- População de Partículas: 100
- Iterações: 30
- Coeficientes de Peso: $c_1 = 2,05$, $c_2 = 2,05$
- Peso de inércia: $w = 0,5$

A função objetivo foi projetada para considerar tanto o custo total de construção das linhas de transmissão quanto a capacidade do sistema de atender à demanda de

760 MW sem violar as restrições operacionais. Utiliza-se a modelagem de fluxo de carga ótimo DC no MATPOWER para garantir que as soluções obtidas sejam viáveis.

Figura 6-2 – Dados sistema Garver de 6 barras no MATPOWER

```

10 function mpc = case_garver_redespacho
11
12
13
14 %% MATPOWER Case Format : Version 2
15 mpc.version = '2';
16
17 %%----- Power Flow Data -----%%
18
19 %% system MVA base
20 mpc.baseMVA = 100;
21
22 %% bus data
23 % bus_i type Pd Qd Gs Bs area Vm Va baseKV zone Vmax Vmin
24 mpc.bus = [
25     1 3 80.00 0.00 0 0 1 1 0 550 1 1.1 0.9;
26     2 1 240.00 0.00 0 0 1 1 0 550 1 1.1 0.9;
27     3 1 40.00 0.00 0 0 1 1 0 550 1 1.1 0.9;
28     4 1 160.00 0.00 0 0 1 1 0 550 1 1.1 0.9;
29     5 1 240.00 0.00 0 0 1 1 0 550 1 1.1 0.9;
30     6 1 0.00 0.00 0 0 1 1 0 550 1 1.1 0.9;
31 ];
32
33 %% generator data
34 % bus Pg Qg Qmax Qmin Vg mBase status Pmax Pmin Pc1 Pc2 Qc1min Qc1max Qc2min Qc2max ramp_agc ramp_10 ramp_30 ramp_q apf
35 mpc.gen = [
36     1 0.00 0 0 0 1 100 1 150 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
37     3 0.00 0 0 0 1 100 1 360 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
38     6 0.00 0 0 0 1 100 1 600 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
39 %artificial
40     2 0.00 0 0 0 1 100 1 240 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
41     4 0.00 0 0 0 1 100 1 160 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
42     5 0.00 0 0 0 1 100 1 240 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
43 ];
44
45 %% branch data
46 % fbus tbus r x b rateA rateB rateC ratio angle status angmin angmax
47 mpc.branch = [
48     1 2 0.00000 0.4000 0.00000 100 100 100 0 0 1 -360 360;
49     1 3 0.00000 0.3000 0.00000 100 100 100 0 0 1 -360 360;
50     1 4 0.00000 0.6000 0.00000 80 80 80 0 0 1 -360 360;
51     1 5 0.00000 0.2000 0.00000 100 100 100 0 0 1 -360 360;
52     1 6 0.00000 0.6800 0.00000 70 70 70 0 0 1 -360 360;
53     2 3 0.00000 0.2000 0.00000 100 100 100 0 0 1 -360 360;
54     2 4 0.00000 0.4000 0.00000 100 100 100 0 0 1 -360 360;
55     2 5 0.00000 0.3100 0.00000 100 100 100 0 0 1 -360 360;
56     2 6 0.00000 0.3000 0.00000 100 100 100 0 0 1 -360 360;
57     3 4 0.00000 0.5900 0.00000 82 82 82 0 0 1 -360 360;
58     3 5 0.00000 0.2000 0.00000 100 100 100 0 0 1 -360 360;
59     3 6 0.00000 0.4800 0.00000 100 100 100 0 0 1 -360 360;
60     4 5 0.00000 0.6300 0.00000 75 75 75 0 0 1 -360 360;
61     4 6 0.00000 0.3000 0.00000 100 100 100 0 0 1 -360 360;
62     5 6 0.00000 0.6100 0.00000 78 78 78 0 0 1 -360 360;
63 ];
64
65 %%----- OPF Data -----%%
66
67 %% generator cost data
68 % 1 startup shutdown n x1 y1 ... xn yn
69 % 2 startup shutdown n c(n-1) ... c0
70 mpc.genCost = [
71     2 0 0 2 0 0;
72     2 0 0 2 0 0;
73     2 0 0 2 0 0;
74 %artificial
75     2 0 0 2 1 0;
76     2 0 0 2 1 0;
77     2 0 0 2 1 0;
78 ];

```

Fonte: Próprio Autor

6.2 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O PSO identificou a adição de uma linha no ramo 3-5 e três linhas no ramo 4-6, com custo total de MUS\$ 110 garantindo a capacidade de atender à demanda de 760 MW. Essa solução foi obtida com um tempo computacional de aproximadamente 35 segundos na geração do enxame número 7.

Os resultados dos testes indicam que o PSO é altamente eficaz para o planejamento da expansão da transmissão em sistemas de pequeno porte. A capacidade do algoritmo de explorar e refinar a solução permite encontrar rapidamente soluções viáveis e econômicas. No caso do sistema Garver, o PSO mostrou excelente desempenho na identificação de uma configuração de expansão

que minimiza custos e atende às necessidades operacionais.

7 CONCLUSÃO

A proposta do trabalho apresentado é de otimizar o planejamento das linhas de transmissão usando o algoritmo de enxame de partículas, que demonstrou uma grande eficiência para o problema proposto no trabalho.

O uso do algoritmo de enxame de partículas no problema de expansão do sistema Garver demonstrou ser promissor, evidenciando sua capacidade de lidar com a complexidade e as restrições associadas ao planejamento da transmissão de energia elétrica. Com parâmetros bem definidos e uma função de objetivo adequada, o PSO se prova uma ferramenta valiosa para engenheiros e planejadores no setor de energia.

Resolver problemas de otimização com variáveis inteiras usando o algoritmo PSO é uma tarefa desafiadora devido à natureza discreta das variáveis, a complexidade combinatorial, e a necessidade de adaptações significativas do algoritmo. No contexto do planejamento da expansão de sistemas de transmissão de energia elétrica, essas dificuldades são ampliadas pelas complexas restrições e pela necessidade de avaliações detalhadas da função objetivo. No entanto, com abordagens adaptativas e estratégias de manutenção de diversidade, o PSO pode ser uma ferramenta poderosa para abordar esses problemas complexos.

REFERÊNCIAS

ALRASHIDI, M. R. et al. A survey of particle swarm optimization applications in electric power systems. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, v. 13, n. 4, p. 913-918, 4 ago. 2009. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5075740>. Acesso em: 12 maio 2024.

ALGUACIL, N. et al. Transmission expansion planning: A mixed-integer LP approach. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 18, n. 3, p. 1070-1077, 2003. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1217322>. Acesso em: 12 maio 2024.

ANDERLINDE, J. B. **Planejamento da expansão de sistemas de transmissão usando algoritmos tipo dual simplex especializados em uma estrutura branch and bound**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, UNESP, [s. l.], 2013.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Perdas de energia elétrica na distribuição**. [s. l.], jan. 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/distribuicao/perdas-de-energia>. Acesso em: 12 maio 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Perdas de energia**. [s. l.], 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/distribuicao/perdas-de-energia>. Acesso em: 12 maio 2024.

BAHIENSE, L. et al. A mixed integer disjunctive model for transmission network expansion. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 16, n. 3, p. 582-589, ago. 2001. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/932295>. Acesso em: 12 maio 2024.

BINATO, S. et al. A new benders decomposition approach to solve power transmission network design problems. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 16, n. 2, p. 235-240, 2001. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/917928>. Acesso em: 12 maio 2024.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Empresa de Pesquisa Energética**. Desafios da transmissão no longo prazo. Documento de apoio ao PNE 2050, [s. l.], dez. 2018. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/a-epe/o-que-fazemos#:~:text=A%20EPE%20atua%20em%20diversas,Estudos%20Socioambientais%20e%20Planejamento%20Energ%C3%A9tico>. Acesso em: 10 maio 2024.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Empresa de Pesquisa Energética**. Plano de expansão de energia: plano decenal de expansão de energia 2027. [s. l.], 2018. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/areas-de-atuacao/energia-eletrica/planejamento-da-transmissao>. Acesso em: 16 maio 2024.

BRASIL. **Lei nº 9.074, de 7 de julho de 1995**. Estabelece normas para outorga e prorrogações das concessões e permissões de serviços públicos e dá outras providências. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9074cons.htm. Acesso em: 12 maio 2024.

BRASIL. **Lei nº 9.427, de 26 de dezembro de 1996**. Institui a Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, disciplina o regime das concessões de serviços públicos de energia elétrica e dá outras providências. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9427cons.htm. Acesso em: 12 maio 2024.

BUENO, F. **Métodos heurísticos**: teoria e implementações. São Paulo: ABC, 2009. 37 p.

CRUZ, M. R. **Estudo sobre as linhas de transmissão de energia elétrica**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia Elétrica, Anhanguera, [s. l.], 2022.

DELGADO, M. A. J. A modified branch and bound algorithm to solve the transmission expansion planning problem. In: **CONFERENCE ON ENVIRONMENTAL AND ELECTRICAL ENGINEERING**, 13., 2013, Wroclaw. International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC) [...]. [S. l.: s. n.], 2003. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6549587>. Acesso em: 12 maio 2024.

GLOVER, F. W. et al. **Handbook of metaheuristics**. USA: Kluwer, 2003.

HAFFNER, S. et al. Branch and bound algorithm for transmission system expansion planning using a transportation model. **IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution**, v. 147, n. 3, p. 149-156, maio 2000. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/848479>. Acesso em: 12 maio 2024.

HONG, S.; CHENG, H.; ZENG, P. N-K constrained composite generation and transmission expansion planning with interval load. **IEEE Access**, v. 5, p. 12775-12784, 2017. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8024001>. Acesso em: 12 maio 2024.

KENNEDY, J. et al. **Swarm intelligence**. [s. l.: s. n.] Morgan Kaufmann, 2001.

LEZAMA, F. et al. Evolutionary computation in the energy domain: operation and planning applications. In: **WCCI(CEC)/GECCO 2023 COMPETITION**, Guidelines. [s. l.], jan. 2023. Disponível em: https://www.gecad.isep.ipp.pt/ERM-competitions/wp-content/uploads/2023/01/CEC_GECCO_Guidelines_2023_v1.pdf. Acesso em: 12 maio 2024.

MARTÍNEZ, J. M. et al. **Métodos computacionais de otimização**. 1995. Dissertação (Mestrado em Matemática Aplicada) - IMECC-UNICAMP, [s. l.], 1998.

MAJIDI-QADIKOLAI, M. et al. A generalized decomposition framework for large-scale transmission expansion planning. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 33, n. 4, p. 3868-3878, 2018. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8334547>. Acesso em: 12 maio 2024.

MONTICELLI, A. J; GARCIA, A. **Introdução a sistemas de energia elétrica**. [S. l.]: Unicamp, 1999. 264 p.

MONTICELLI, A. et al. **Planejamento a longo prazo da expansão de sistema de transmissão de energia elétrica**. [s. l.: s. n.], 2000.

PEREIRA, M. R. **Estabelecimento de metodologia multicritérios para planejamento da expansão de sistemas de distribuição**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Engenharia de Sistemas Elétricos de Potência) - Universidade Federal de Minas Gerais, [s. l.], 2014.

RIDER, M. et al. Transmission system expansion planning by a branch-and-bound algorithm. **IET Generation, Transmission & Distribution**, v. 2, n. 1, p. 90-99, 2008. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4408538>. Acesso em: 12 maio 2024.

SERAPIÃO, A. B. de S. Fundamentos de otimização por inteligência de enxames: uma visão geral. **Revista Controle & Automação**, São Paulo, v. 20, n. 3, p. 299-312, jul./set. 2009. Sociedade Brasileira de Automática.

SOUZA, Z. J. de; AZEVEDO, P. F. de. Geração de energia elétrica excedente no setor sucroalcooleiro: um estudo a partir das usinas paulistas. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 44, n. 1, p. 179-199, jan./mar. 2006. São Paulo: Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural.

TALBI, E. G. **Metaheuristics from design to implementation**. [s. l.: s. n.] aris: Wiley-ISTE, 2009.

VIEIRA, D. M. et al. Os desafios para a expansão da oferta de energia elétrica. **Revista do TCU**, [s. l.], p. 44-53, 10 maio 2012.

VIEIRA, I. S. **Expansão do sistema de transmissão de energia elétrica no Brasil**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade de Brasília, [s. l.], 2009.

WARUDKAR, M. Y. et al. Particle swarm optimization based transmission expansion planning. In: **International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA)**, [s. l.], 2017. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8212830>. Acesso em: 12 maio 2024.

ZANETTA, L. C. **Fundamentos de sistemas elétricos de potência**. 1. ed. São Paulo: Livraria da Física, 2006.