

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

Alex Itczak

OTIMIZAÇÃO DO CABEAMENTO INTERCONECTOR DE
AEROGERADORES EM PARQUES EÓLICOS *ONSHORE*

Alegrete
2020

Alex Itczak

**OTIMIZAÇÃO DO CABEAMENTO INTERCONECTOR DE
AEROGERADORES EM PARQUES EÓLICOS *ONSHORE***

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia Elétrica (PPGEE) da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Sistemas de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Machado dos Santos

Alegrete

2020

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

I88o Itczak, Alex
Otimização do cabeamento interconector de aerogeradores em
parques eolicos onshore / Alex Itczak.
75 p.

Dissertação(Mestrado)-- Universidade Federal do Pampa,
MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, 2020.

"Orientação: Eduardo Machado dos Santos".

1. energia eólica. 2. parque eólico onshore. 3.
interconexão de aerogeradores. 4. Árvore Geradora Mínima. 5.
otimização. I. Título.

ALEX ITCZAK

OTIMIZAÇÃO DO CABEAMENTO INTERCONECTOR DE
AEROGERADORES EM PARQUES EÓLICOS *ONSHORE*

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia Elétrica (PPGEE) da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

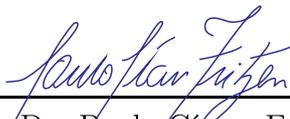
Área de concentração: Sistemas de Energia.

Dissertação defendida e aprovada em 07 de Agosto de 2020.

Banca examinadora:



Prof. Dr. Eduardo Machado dos Santos
Orientador
UNIPAMPA



Prof. Dr. Paulo Cícero Fritzen
UTFPR



Prof. Dr. Chrystian Dalla Lana da Silva
UNIPAMPA

Dedico este trabalho aos meus pais,
Avelino e Inês, meu irmão Alan, à minha
esposa Rita e a todos meus amigos que
me acompanharam e apoiaram durante a
trajetória.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pelo dom da vida e por ter me cercado de pessoas especiais. Minha eterna gratidão aos meus pais, Avelino e Inês, ao meu irmão Alan, pelo amor, pelas lições de vida, pelo carinho, incentivo e pela fé depositada em mim. Muito obrigado por toda dedicação, apoio e paciência para que esse sonho se tornasse realidade.

A minha esposa Rita, sempre compreensiva, paciente e preocupada, estando sempre ao meu lado em todas as horas, apoiando, revisando, incentivando. Sem você não teria ido tão longe. Aos meus sogros Elder e Maria Ceci, por todo apoio e incentivo recebido.

Em especial ao meu orientador e amigo Dr. Eduardo Machado dos Santos, pela orientação, incentivo, confiança e pelos ensinamentos compartilhados durante o desenvolvimento deste trabalho, principalmente por acreditar em mim até quando eu havia desistido.

Aos colegas e amigos que fizeram a diferença nesta trajetória. Aos amigos que se tornaram irmãos Arian Fagundes, Davi Bevilaqua Heinz John Jefferson Antunes Saldanha, Marcel Stalter e Paulo Ricardo Fiuza Marques.

Aos membros e ao Grupo de Energia e Sistemas Elétricos de Potência (GESEP). Ao pessoal da 10ª Coordenadoria de Obras de Uruguaina, Eduardo, Gonçalo, Luciano e Vera, com quem tive a honra de trabalhar durante um período e se tornaram amigos para uma vida toda, muito obrigado pelos ensinamentos, conselhos e incentivo prestados.

Aos professores do Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica da Unipampa pelos ensinamentos, pela oportunidade ímpar de crescimento profissional e aprendizado.

A todos que de maneira direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

“Se vi mais longe, foi por estar sobre
ombros de gigantes.
(Isaac Newton)

RESUMO

Ao longo da história das civilizações, a utilização da energia eólica sempre teve seu espaço. Estima-se que, por volta de 2800 AC, os egípcios utilizavam este recurso e, atualmente, a força dos ventos pode ser utilizada para gerar energia elétrica em diversos níveis de demanda, auxiliando pequenas comunidades isoladas a utilizar os benefícios desta energia. Por outro lado, parques eólicos com um grande número de aerogeradores contribuem de forma significativa para a matriz energética brasileira, já que os ventos são mais intensos nos meses de Junho a Dezembro, período em que a intensidade pluviométrica é menor. Desta forma, a energia eólica se torna uma importante fonte suplementar de energia por ser considerada uma energia limpa, evitando o uso de usinas que geram impacto ambiental. Nesse contexto, a presente pesquisa visa desenvolver a otimização do cabeamento interconector de aerogeradores em parques eólicos onshore, visto que uma parcela considerável do custo destes parques é decorrente do cabeamento. Assim, propõe-se otimizar a rede de interconexão dos aerogeradores com o auxílio do Problema da Árvore Geradora Mínima, resolvido através de três metaheurísticas, que são: o Algoritmo dos Vagalumes, o Algoritmo Otimização por Enxame de Partículas e o Algoritmo Competitivo Imperialista. Para a aplicação dos métodos de otimização foram escolhidos os parques eólicos onshore Cerro Chato e Chuí, ambos no estado do Rio Grande do Sul, sendo que cada um apresenta um tipo diferente de interconexão entre as turbinas eólicas, onde o primeiro tem sua rede coletora aérea, enquanto o segundo apresenta esta em forma subterrânea. Para ambos os casos, respeitou-se o posicionamento dos aerogeradores, bem como das subestações, sendo analisados apenas o percurso do cabeamento de interconexão entre as turbinas. Neste estudo, não foram considerados possíveis obstáculos entre os geradores. Verificou-se, portanto, que todos os métodos foram eficientes quanto a otimização, quando comparadas ao atual layout e o valor do cabeamento. Por fim, destaca-se o desempenho do Algoritmo dos Vagalumes, o qual apresentou em sua resposta o menor comprimento do cabeamento em ambos os casos, mostrando que as metaheurísticas são eficazes para a solução deste problema.

Palavras-chave: Energia Eólica. Parque Eólico *Onshore*. Interconexão de Aerogeradores. Árvore Geradora Mínima. Otimização.

ABSTRACT

Throughout the history of civilizations, the use of wind energy has always had its place. It is estimated that, around 2800 BC, the Egyptians used this resource and, currently, the wind force can be used to generate electrical energy at different levels of demand, helping small isolated communities to use the benefits of this energy. On the other hand, wind farms with a large number of wind turbines contribute significantly to the Brazilian energy matrix, since the winds are more intense in the months of June to December, a period in which the rainfall intensity is lower. In this way, wind energy becomes an important supplementary source of energy as it is considered clean energy, avoiding the use of plants that generate environmental impact. In this context, the present research aims to develop the optimization of the interconnector cabling of wind turbines in onshore wind farms, since a considerable share of the cost of these farms is due to cabling. Thus, it is proposed to optimize the interconnection network of the wind turbines with the aid of the Minimum Generation Tree Problem, solved through three metaheuristics, these being the Firefly Algorithm, the Particle Swarm Optimization Algorithm and the Imperialist Competitive Algorithm. Cerro Chato and Chuí onshore wind farms were chosen for the application of optimization methods, both in the state of Rio Grande do Sul, each of which has a different type of interconnection between wind turbines, where the first has its overhead collection network, while the second presents this in an underground form. For both cases, the positioning of the wind turbines, as well as the substations, was respected, with only the interconnection cabling path between the turbines being analyzed. In this study, possible obstacles between generators were not considered. Therefore, it was found that all methods were efficient in terms of optimization, when compared to the current layout and the cabling value. Finally, we highlight the performance of the Firefly Algorithm, which presented in its response the shortest cabling length in both cases, showing that metaheuristics are effective for solving this problem.

Key-words: Wind Energy. Onshore Wind Farm. Interconnection of Wind Turbines. Minimum Generation Tree.Optimization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Composição básica de um sistema elétrico de um parque eólico <i>onshore</i>	32
Figura 2 – Aerogerador de eixo horizontal e alguns de seus componentes	34
Figura 3 – Detalhes dos componentes da nacelle de um aerogerador	35
Figura 4 – Efeito esteira em um parque eólico na Dinamarca	35
Figura 5 – Efeito esteira em um parque eólico na Dinamarca	36
Figura 6 – Efeito esteira em um parque eólico na Dinamarca	37
Figura 7 – Esquemático de rede interconectora radial de um parque eólico até a subestação coletora	38
Figura 8 – Arranjo radial simples, interconectando aerogeradores e a subestação coletora no parque eólico Horns Rev 2	38
Figura 9 – Exemplo de arranjo ramificado do sistema interconector de um parque eólico	39
Figura 10 – Desenho esquemático da rede subterrânea	40
Figura 11 – Desenho esquemático das topologias de rede aérea	40
Figura 12 – Grafo com 6 arestas e 4 vértices (a) e (b) Árvore Geradora Mínima	41
Figura 13 – Comportamento dos Vagalumes	45
Figura 14 – Fluxograma Algoritmo do Vagalume	47
Figura 15 – Fluxograma Enxame de Partículas	49
Figura 16 – Fluxograma Algoritmo Competitivo Imperialista	52
Figura 17 – Esquemático da interconexão entre os geradores no parque Eólico Cerro Chato	55
Figura 18 – Configuração Atual Complexo Eólico Cerro Chato	57
Figura 19 – <i>Layout</i> otimizado com o Algoritmo Vagalume	57
Figura 20 – Característica de convergência do Algoritmo Vagalume	58
Figura 21 – <i>Layout</i> otimizado com o Algoritmo Otimização por Enxame de Partículas	59
Figura 22 – Característica de convergência do Algoritmo Otimização por Enxame de Partículas	59
Figura 23 – <i>Layout</i> otimizado com o Algoritmo Competitivo Imperialista	60
Figura 24 – Característica de convergência do Algoritmo Competitivo Imperialista	61
Figura 25 – Esquemático da interconexão entre os geradores no parque Eólico Chuí	62
Figura 26 – Configuração Atual Complexo Eólico Chuí	64
Figura 27 – <i>Layout</i> otimizado com o Algoritmo Vagalume	64
Figura 28 – Característica de convergência do Algoritmo Vagalume	65
Figura 29 – <i>Layout</i> otimizado com o Algoritmo de Otimização por Enxame de Partículas	65
Figura 30 – Característica de convergência do Algoritmo de Otimização por Enxame de Partículas	66

Figura 31 – <i>Layout</i> otimizado com o Algoritmo Competitivo Imperialista	66
Figura 32 – Característica de convergência do Algoritmo Competitivo Imperialista .	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros utilizados como base na precificação por km	53
Tabela 2 – Parâmetros utilizados no FA para o caso 1	55
Tabela 3 – Parâmetros utilizados no PSO para o caso 1	56
Tabela 4 – Parâmetros utilizados no ACI para o caso 1	56
Tabela 5 – Parâmetros utilizados no FA para o caso 2	62
Tabela 6 – Parâmetros utilizados no PSO para o caso 2	62
Tabela 7 – Parâmetros utilizados no ACI para o caso 2	63
Tabela 8 – Resultados e custo de implantação dos cabamentos sugeridos.	67

LISTA DE SIGLAS

AC Antes de Cristo

ACI Algoritmo de Competitivo Imperialista - *Imperialist Competitive Algorithm*

AGM Árvore Geradora Mínima

E Aresta

FA Algoritmo dos Vagalumes - *Firefly Algorithm*

G Grafo

GW Gigawatt

kV kilo-Volt

MT Média Tensão

MW Megawatt

PSO Otimização por Enxame de Partículas - *Particle Swarm Optimization*

PVC Policarbonato de Vinila

SIN Sistema Interligado Nacional

V Vértice

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Peso do Movimento
γ	Constante de Absorção de Luz
λ	Coefficiente de Assimilação
ω	Coefficiente de Inércia
$r1$ e $r2$	Números Aleatórios entre 0 e 1
ζ	Coefficiente de Custo médio das Colônias
c	custo de um país
C_n	Custo do i-ésimo imperialista
c_n	Custo normalizado
C_1	Componente Cognitivo
C_2	Componente Social
d	Distância entre a colônia e o imperialista
I_0	Intensidade de luz em $r=0$
N_C	Colônias que representam um império
N_{var}	Número de Variáveis do Problema
V_{j+1}	Nova Velocidade da Partícula
V_j	Velocidade Atual da Partícula
$X_{GBest,j}$	Posição do melhor valor de aptidão de todas as partículas
$x_i(t)$	Posição atual do Vagalume i
$X_{PBest,j}$	Posição de melhor aptidão de todas as partículas
β_0	Atratividade em $r=0$
β	Atratividade

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	25
1.1	Considerações iniciais	25
1.2	Objetivos gerais	26
1.3	Motivação	26
1.4	Revisão Bibliográfica	27
1.5	Estrutura do Trabalho	29
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	31
2.1	Histórico Sobre a Utilização da Energia Eólica	31
2.2	Aerogeradores	32
2.2.1	Aerogeradores de Eixo Horizontal	33
2.3	Interconexão dos aerogeradores - Composição e Principais Arranjos	37
2.4	Redes de Interconexão Subterrâneas e Aéreas	39
2.5	O Problema da Árvore Geradora Mínima	40
2.6	Considerações Finais	42
3	MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO	43
3.1	Heurísticas	43
3.1.1	Algoritmo dos Vagalumes (<i>Firefly Algorithm</i>)	44
3.1.1.1	Atratividade	46
3.1.1.2	Distância e Movimento	46
3.1.2	Otimização Por Enxame de Partículas	48
3.1.3	Algoritmo Competitivo Imperialista	49
3.2	Considerações do Capítulo	52
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	53
4.1	Cerro Chato	54
4.1.1	Configuração de Parâmetros para o Algoritmo de Otimização de Vagalumes	54
4.1.2	Configuração de Parâmetros para o Algoritmo de Otimização por Enxame de Partículas	55
4.1.3	Configuração de Parâmetros para o Algoritmo de Otimização Competitiva Imperialista	56
4.1.4	Resultados	56
4.2	Sistema Teste 2 – Parque Eólico Chuí	60
4.2.1	Configuração de Parâmetros para o Algoritmo de Otimização de Vagalumes	61

4.2.2	Configuração de Parâmetros para o Algoritmo de Otimização por Enxame de Partículas	62
4.2.3	Configuração de Parâmetros para o Algoritmo de Otimização Competitiva Imperialista	63
4.2.4	Resultados	63
4.2.5	Considerações Finais	67
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	69
5.1	Conclusão	69
5.2	Trabalhos Futuros	70
5.3	Trabalhos Desenvolvidos	70
	REFERÊNCIAS	71
	Índice	75

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

Acredita-se que os egípcios foram os primeiros a utilizar a força do vento de maneira prática, por volta de 2800 anos Antes de Cristo (AC). Tal força era utilizada como auxílio para embarcações a remo, enquanto os fenícios, em torno de 1000 anos AC faziam o uso de embarcações movidas totalmente a velas. Em 644 anos AC, há relatos de que foram construídos moinhos de vento para a moagem de grãos e água. Também é relatado que o conquistador mongol Gêngis Khan (1162-1227) pode ter importado moinhos para a China do Oriente Médio, sendo a primeira referência a um moinho de vento chinês com data do ano de 1219 (PINTO et al., 2013).

Apesar da importância da energia eólica ter diminuído durante o século XIX, as pesquisas relacionadas ao aproveitamento dessa forma de energia persistiram. Um fato histórico foi a criação do primeiro cata-vento destinado a produção de energia eólica, o qual foi proposto por Charles Francis Brush (1842 – 1929) (DUTRA, 2008).

Também, vale destacar que, durante a Segunda Guerra Mundial, as grandes potências envolvidas no conflito precisavam economizar combustível fóssil para outros fins, financiando grandes projetos para outras fontes de energia, tais como o desenvolvimento de geradores de grande porte.

Na década de 70, deu-se início a nova era da energia eólica, com o avanço tecnológico e o desenvolvimento de novos materiais, fazendo com que o crescimento desta fonte de energia fosse alavancado, também devido aos incentivos fiscais promovidos pelos governantes de diversos países, além da redução dos custos dos equipamentos (DUTRA, 2008). Assim, constata-se, portanto, que ao longo da história da humanidade, a força dos ventos e/ou energia eólica sempre esteve presente.

Atualmente, os Parques Eólicos são classificados pela forma onde são alocados, denominando-se *onshore* quando estes são instalados em superfícies terrestres e *offshore*, quando em superfícies aquáticas. Os parques *onshore* apresentam como benefícios o baixo custo da fixação da estrutura das torres quando comparado aos respectivos custos das plantas *offshore*, além do fácil acesso a manutenção e conexão com o sistema de transmissão. Porém, os pontos a serem levados em consideração estão relacionados com a escolha do local que o parque será instalado, devido a poluição sonora causada e, além disso, preferencialmente, não devem existir obstáculos naturais ou artificiais no ponto de instalação.

A energia eólica oriunda de parques *onshore* pode ser utilizada em diversos níveis de demanda, podendo ser instalada em comunidades distantes de redes de transmissão. Já os parques em maior escala podem contribuir com a energia para o Sistema Interligado Nacional (SIN), pois no Brasil os ventos são mais intensos nos meses de Junho a Dezembro, consequentemente, com potencial de energia eólica maior, coincidindo com os

meses de menor intensidade pluviométrica. Dessa forma, a energia eólica se torna uma fonte suplementar da energia que não é gerada pelas hidrelétricas, evitando que outras fontes mais caras e poluentes entrem em operação, como as termelétricas. Assim, o Brasil tem uma parte da sua matriz energética concentrada na energia eólica, tornando-a uma importante fonte de energia (FARIAS; COUTO, 2013).

Hoje em dia, o Brasil é o maior produtor de energia eólica da América Latina e está entre os 10 maiores produtores mundiais. Em dezembro de 2019, o Brasil atingiu a marca de 15,1 Gigawatt (GW) de capacidade instalada, distribuídas em 619 parques eólicos contando com 7578 aerogeradores (AMBIENTAIS, 2020). Estima-se que para 2030 a geração de energia eólica deva atingir 1787 GW e, em 2050, a previsão da capacidade instalada está em torno de 5044 GW (IRENA, 2019).

O crescimento do aproveitamento da energia eólica traz consigo a oportunidade de novos campos de pesquisa e desenvolvimento neste setor, buscando progressos que devem ser explorados em benefício da sociedade.

Neste contexto, é importante a busca pela otimização do cabeamento interconector entre aerogeradores, a fim de reduzir custos de projetos que envolvem parques eólicos, viabilizando cada vez mais a implantação dessa fonte de energia.

1.2 Objetivos gerais

Por objetivo geral, cita-se a otimização do cabeamento interconector de aerogeradores em parques eólicos onshore, utilizando de métodos de otimização baseados na Árvore Geradora Mínima, utilizando três metaheurísticas para sua resolução, sendo estas Algoritmo dos Vagalumes - *Firefly Algorithm* (FA), a Otimização por Enxame de Partículas - *Particle Swarm Optimization* (PSO) e o Algoritmo de Competitivo Imperialista - *Imperialist Competitive Algorithm* (ACI).

Como objetivos específicos, citam-se:

- Avaliar a redução no comprimento do cabeamento interconector, através dos algoritmos de otimização FA, PSO e ACI;
- Avaliar e comparar os resultados obtidos com a realidade atual dos parques estudados; e
- Desenvolver uma ferramenta robusta e flexível, capaz de analisar diversos tipos de sistemas.

1.3 Motivação

Tendo em vista o aproveitamento da energia eólica, afirma-se que cada vez mais estudos têm sido realizados nesta área. O presente trabalho teve como motivação desenvolver um estudo relacionado à otimização da topologia da interconexão de aerogeradores

em parques eólicos *onshore*. Para isso, estudos preliminares sobre o posicionamento de aerogeradores e subestações foram realizados, obtendo-se as coordenadas geográficas de tais elementos em relação à planta eólica estudada, além da proposição do cabeamento de interconexão destes elementos.

A interconexão de aerogeradores representa uma fatia considerável dos custos envolvidos na construção do parque eólico. Assim, a otimização deste sistema visa alcançar a redução nos custos globais do projeto, contribuindo para que a energia eólica se torne uma fonte de energia mais atraente do ponto de vista financeiro do mercado.

A fim de auxiliar no planejamento de projetos de parques eólicos, é de extrema importância desenvolver novas ferramentas computacionais. Assim, no presente trabalho é desenvolvida uma ferramenta para este fim no ambiente Matlabz[®]. Por fim, ressalta-se que a Árvore Geradora Mínima foi escolhida como formulação para o problema de otimização por ser uma ferramenta consolidada na solução de problemas semelhantes, como por exemplo, a otimização do caminho de cabeamentos telefônicos, linhas férreas e linhas de transmissão.

1.4 Revisão Bibliográfica

Esta Seção apresenta a revisão bibliográfica sobre otimização do cabeamento interconector de aerogeradores em parques eólicos *onshore* e *offshore*.

Nesse contexto, Nandigam e Dhali (2008) apresentaram uma abordagem para a otimização do layout dos parques eólicos offshore, utilizando um algoritmo baseado na programação geométrica. A função objetivo encontrada pelos autores visa minimizar os custos de cabos e transformadores, além de reduzir as perdas elétricas nestes componentes. Para isto, os autores criaram um modelo que estima as perdas em tais elementos e calcula sua confiabilidade.

No ano seguinte, Lingling, Yang e Xiaoming (2009) tratam do aumento de interesse quanto ao aproveitamento da energia eólica vinda de parques *offshore*. Porém, frisam para a necessidade de maior atenção com as questões econômicas do sistema elétrico. Em seu trabalho, os autores se basearam em parques eólicos *offshore* existentes e no custo de investimento dos componentes elétricos para o modelo de otimização proposto. Para tal, consideraram um grupo de fatores, dentre eles, nível de tensão do sistema de distribuição, nível de tensão da subestação transformadora, localização das subestações e topologia de interconexão entre as subestações e os aerogeradores. A função objetivo visava minimizar os custos com os equipamentos (transformadores, conectados na base de cada aerogerador, subestações, e cabos de interconexão). Segundo os autores, o algoritmo foi testado em um sistema fictício, com 580 aerogeradores, e os resultados foram positivos quanto a sua eficácia.

Também, Braz et al. (2006) propuseram uma metodologia para resolução do planejamento dos cabos interconectores, a qual apresentava a definição de topologia de rede,

além do dimensionamento das interligações. Para isso, foi desenvolvido um Algoritmo Genético Convencional. A função objetivo proposta pelos autores busca minimizar o investimento na construção da rede coletora e as perdas de energia ao longo de um horizonte de planejamento. Porém, tanto o método quanto o algoritmo de otimização foram validados através de testes em um parque eólico fictício, com 74 aerogeradores de 2,0 Megawatt (MW) e uma subestação coletora de 34,5 kilo-Volt (kV).

??) utilizaram a Teoria dos Grafos junto com o Algoritmo *Fuzzy c-means* aprimorado com o objetivo de otimizar o sistema coletor em parques eólicos. O algoritmo funciona em três etapas: a primeira utiliza a lógica *Fuzzy* para posicionar as subestações do parque e dividi-lo em subáreas (onde cada subárea tem influência de uma subestação). Na etapa dois, a subárea era dividida novamente, fazendo com que os aerogeradores sejam separados em blocos, determinando o modo com que eles seriam interconectados. A terceira e última etapa fazia uso da Teoria dos Grafos para determinar o melhor caminho a partir das possibilidades de conexão dos aerogeradores entre si e com a respectiva subestação. Uma planta eólica offshore com 616 aerogeradores foi utilizada como sistema teste. Diversos cenários foram utilizados nas simulações, apresentando melhor resultado a configuração com 5 subáreas.

Gonzalez-Longatt (2013) apresentou uma abordagem de algoritmo genético em que a função aptidão visava minimizar os custos dos cabos e transformadores presentes na saída de cada aerogerador. A disposição dos aerogeradores era representada por genes do cromossomo. Nesta proposta, foi considerada apenas a existência de uma subestação transformadora e o número de aerogeradores por alimentador era um fator que dependia do número de aerogeradores do parque eólico. Para isso, um Algoritmo Genético modificado, baseado no problema do “Caixeiro Viajante”, foi elaborado para a resolução deste problema. O autor cita que o algoritmo genético é indicado para lidar com problemas não lineares, com espaço de solução muito grande, como para o caso estudado, onde o número de combinações cresce de acordo com o número de aerogeradores.

No mesmo ano, Jenkins, Scutariu e Smith (2013) utilizaram duas técnicas de otimização: *Greedy Algorithm* e o Algoritmo Genético. Tal metodologia permitia os arranjos radiais simples e ramificado. A função objetivo buscava minimizar o comprimento total dos cabos de interconexão, custos dos cabos e perdas operacionais.

Wu et al. (2013) propuseram uma metodologia para otimizar o arranjo de ligação do parque eólico e a localização de cada unidade geradora em parques eólicos *offshore*. Para isso, os pesquisadores desenvolveram um algoritmo de Otimização por Colônia de Formigas junto com o Algoritmo Genético. O algoritmo de Colônia de Formigas foi utilizado para determinar a melhor localização dos aerogeradores, de acordo com condições ambientais. Por sua vez, o Algoritmo Genético visa encontrar o melhor arranjo de conexão do cabeamento, minimizando custos com este.

Ainda, Oliveira (2016) frisa que os cabos interconectores constituem uma parcela

considerável dos custos globais de um parque eólico. A ferramenta proposta visa minimizar os custos e respeitar os critérios técnicos estabelecidos. Para isso, propôs um algoritmo baseado no Algoritmo Genético modificado para a otimização da rede interconectora dos parques eólicos, englobando a determinação das tecnologias de conexão entre os aerogeradores e a subestação coletora. Foram utilizados parques fictícios para testar o método e, segundo a autora, os resultados obtidos comprovam que o algoritmo pode ser utilizado para otimizar o *layout* da rede de distribuição interna dos parques eólicos, sejam estes *onshore* ou *offshore*.

Rese et al. (2017) propuseram uma análise de algoritmos da Árvore Geradora Mínima para reconfiguração de redes de distribuição. Os autores afirmam que as redes de distribuição de energia podem ser representadas por grafos, onde os vértices são as barras do sistema elétrico e as arestas são as linhas de distribuição. Desta forma, pode-se utilizar o problema da árvore geradora mínima para obter o caminho que resulta no menor peso total e atinge todos os vértices. Para resolver o problema são empregados quatro algoritmos, (i) Kruskal; (ii) Exclusão Reversa; (iii) Prim e (iv) Boruvka. A Árvore Geradora Mínima se mostrou eficiente na resolução do problema proposto nos quatro algoritmos utilizados, porém, o algoritmo de Prim se destacou.

No trabalho publicado por Srikakulapu e Vinatha (2017), foi proposto um método de otimização do *layout* dos parques eólicos *offshore* visando reduzir os custos de instalação do sistema interconector. Para tal, os autores propuseram um método de otimização que combina o algoritmo de otimização por Colônias de Formigas com o Problema do Caixeiro Viajante. Os autores também propõem a alteração do espaçamento entre os aerogeradores, para reduzir o comprimento do cabo. Para comprovar a eficácia da metodologia proposta, foi utilizado como sistema teste o parque eólico *offshore* de *North Hoyle*, instalado na costa Norte do País de Gales.

Tendo em vista o crescente interesse da comunidade científica em energias que não causem tanto impacto ambiental, a energia eólica se torna uma boa alternativa. Observa-se também que, com o advento de grandes parques eólicos, a utilização de algoritmos de otimização pode ter fundamental importância para o planejamento desses parques, de modo a torná-los cada vez mais eficientes e com menores custos, aumentando a atratividade por investimentos em empreendimentos relacionados a este tipo de energia. Nesse contexto, esse trabalho alia o algoritmo da Árvore Geradora Mínima a métodos heurísticos de otimização, na tentativa de prover uma ferramenta capaz de minimizar os custos com o cabeamento interconector entre aerogeradores em parques eólicos *onshore*.

1.5 Estrutura do Trabalho

O Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica, trazendo um breve relato histórico sobre o uso da energia eólica. Também, apresenta importantes conceitos envolvendo parques eólicos, destacando o sistema interconector, sua composição e principais arranjos,

além dos tipos construtivos destes sistemas. Por fim, o capítulo apresenta o problema da Árvore Geradora Mínima (AGM), mostrando como este pode ser aplicado na determinação do menor caminho do cabo interconector.

No Capítulo 3, são apresentados os algoritmos de otimização utilizados para resolver o problema da Árvore Geradora Mínima, sendo estes o Algoritmo de otimização dos Vagalumes, Otimização por Enxame de Partículas e Algoritmo Competitivo Imperialista.

O Capítulo 4 apresenta o sistema teste, a função objetivo, os parâmetros utilizados em cada Algoritmo de Otimização e os resultados obtidos a partir das simulações. O referido Capítulo também faz um comparativo entre o comprimento do cabeamento instalado com aqueles sugeridos pelos métodos de otimização.

Por fim, o Capítulo 5 é destinado às conclusões e também às sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo apresenta um breve histórico sobre a utilização da força dos ventos pela humanidade, além de falar um pouco sobre a matriz elétrica brasileira. Também é visto os tipos de aerogeradores utilizados bem como as topologias e os arranjos de interconexão dos aerogeradores. Por fim é explanado o Problema da Árvore Geradora Mínima.

2.1 Histórico Sobre a Utilização da Energia Eólica

No Brasil, a principal fonte de geração de energia elétrica provém de usinas hidrelétricas, que, apesar de ser uma fonte renovável e estabelecida no país, enfrenta muitas dificuldades para sua expansão. Muitas dessas dificuldades são ambientais e isso proporciona que outras fontes geradoras recebam maior destaque no cenário nacional. Diante desse panorama, pode-se citar a energia eólica, que vem adquirindo cada vez mais espaço.

Ao investigar a ocorrência desse tipo de utilização de energia ao longo do tempo, verificou-se que a força do vento era utilizada na Pérsia há 200 anos AC na moagem de grãos e no bombeamento da água, bem como civilizações mais antigas que já utilizavam moldes arcaicos para o aproveitamento desta energia. Com o término das Cruzadas, o uso dos moinhos foi difundido por toda a Europa (ELÉTRICA-CEPEL, 2008).

A Segunda Guerra Mundial contribuiu muito para o desenvolvimento de aerogeradores de médio e grande porte. Isso se deu, pois era necessário economizar combustíveis fósseis para outros fins. Assim, várias pesquisas foram financiadas para encontrar e viabilizar a utilização de outras fontes para a obtenção de energia (ELÉTRICA-CEPEL, 2008). Dessa forma, os EUA elaboraram um projeto de construção do maior aerogerador até então projetado (Smith Putnan). Ele media 53,3 m de diâmetro, 33,5 m de altura e possuía duas pás de aço de 16 toneladas (VOADEN, 1943).

Ao término da guerra, um estudo econômico mostrou que gerar energia eólica não era competitivo e os combustíveis fósseis voltaram a se destacar no cenário mundial. Porém, pode-se dizer que este foi um projeto pioneiro de uma parceria universidade-indústria, que fomentou pesquisas no desenvolvimento de tecnologias relacionadas à geração de energia (ELÉTRICA-CEPEL, 2008).

Na década de 70, várias pesquisas foram desenvolvidas na Alemanha, Estados Unidos, França, Inglaterra e Dinamarca, e, a partir da década de 80, tal tecnologia apresentou um desenvolvimento expressivo, devido, principalmente, às políticas de incentivo à expansão desse tipo de energia (ELÉTRICA-CEPEL, 2008).

A partir da década de 90 até os dias atuais, o aumento da capacidade de energia eólica instalada no mundo tem chamado a atenção das companhias elétricas e pesquisadores, fazendo com que cresça a variedade de tipos e modelos de turbinas no mercado (SALINO, 2011).

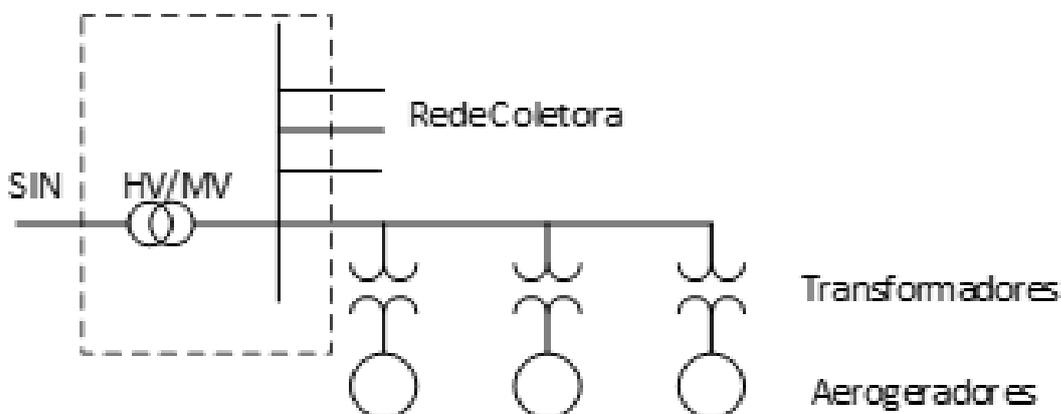
2.2 Aero geradores

A energia eólica pode ser empregada em diversos níveis de demanda. Pequenas centrais podem ser instaladas em comunidades remotas, distantes do sistema de transmissão, tendo caráter social de universalização do atendimento. Os grandes parques contribuem significativamente para suprir uma grande parte do Sistema Interligado Nacional, apresentando diversas vantagens, tais como:

- Melhoria no meio ambiente, reduzindo a queima de combustíveis fósseis em usinas termelétricas, diminuindo a emissão de poluentes atmosféricos; e
- Reduz a necessidade de construção de reservatórios de grande porte, além de diminuir o risco da sazonalidade hidrológica, pois, como visto anteriormente, os ventos são mais intensos no período de menor intensidade de chuvas, tornando a energia eólica uma importante fonte suplementar à energia gerada por hidroelétricas.

Os parques eólicos são formados por uma grande quantidade de aerogeradores, devido a vários fatores, como a limitação de capacidade de produção de um único aerogerador, a velocidade do vento e os custos de construção e instalação dos aerogeradores (MOSKALENKO; RUDION; ORTHS, 2010). Tais máquinas são conectadas à uma rede coletora de média tensão através de transformadores elevadores presentes nas bases das torres de sustentação. Este equipamento tem a finalidade de elevar a tensão de saída das turbinas (geralmente 690V), para a Média Tensão (MT), utilizada no sistema interconectado de distribuição (com variação na faixa de 13,8 à 40 kV). A composição típica de um parque eólico *onshore* pode ser visualizada na Figura 1

Figura 1 – Composição básica de um sistema elétrico de um parque eólico *onshore*.



Fonte: Elaborado pelo autor.

2.2.1 Aerogeradores de Eixo Horizontal

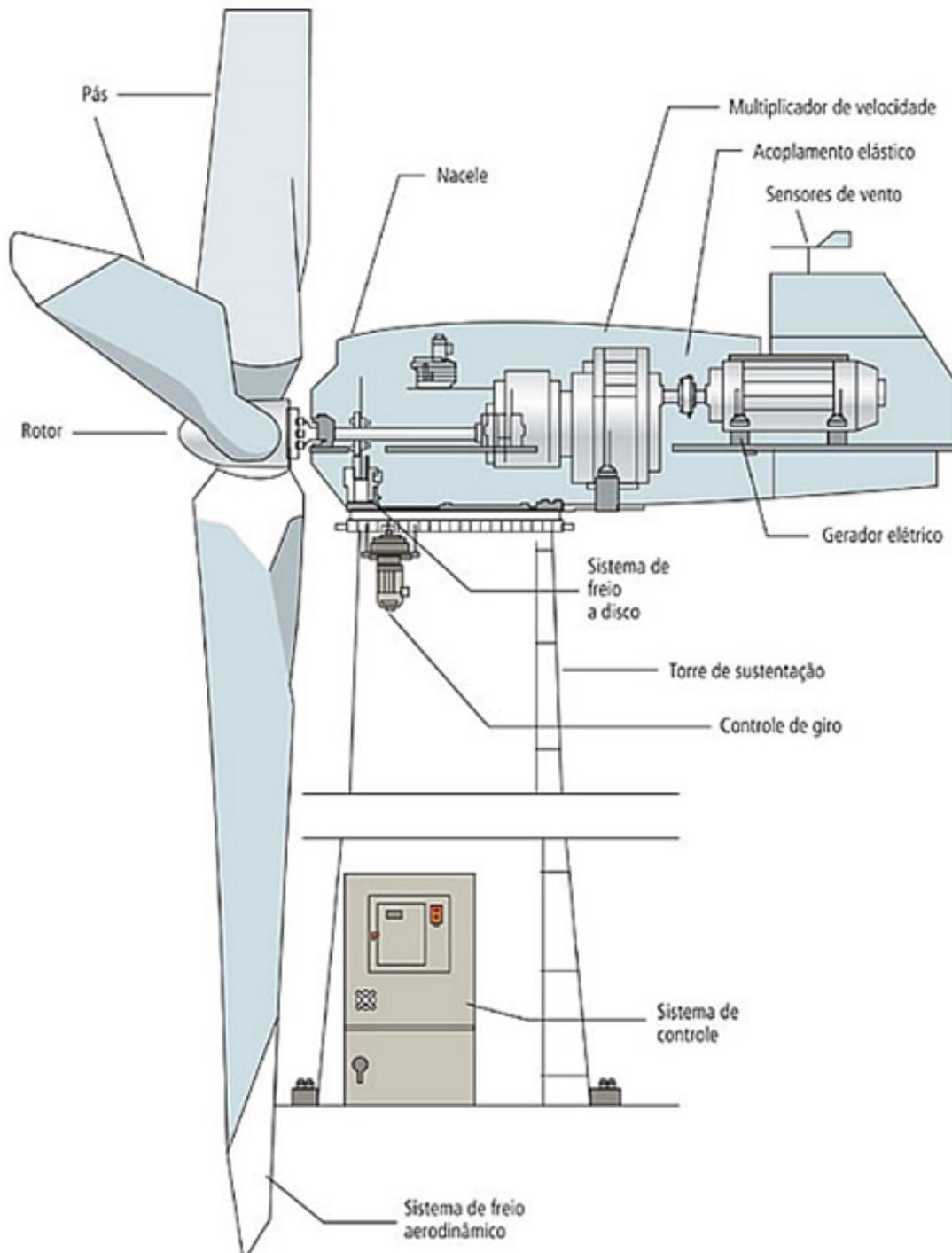
Os geradores de eixo horizontal são os mais utilizados em parques eólicos. A Figura 2 ilustra este modelo que tem alguns elementos típicos, os quais, de acordo com (PAVINATTO, 2005), são:

- Nacele: também chamada de gondola, é composta pelos principais componentes da turbina eólica, tais como: gerador, caixa de engrenagens, sistema de controle e medição do vento, motores para rotação do sistema, conversor, entre outros;
- Rotor: é a parte girante formada pelo cubo e por três pás. O diâmetro do rotor se dá pela circunferência formada pelo giro das pás.
- Pás, cubos e eixos: as pás têm a função de captar a energia do vento e possuem diversos formatos, referentes a cada fabricante. As pás são dispostas no cubo. O conjunto formado por pás, eixo e cubo é o responsável pela transformação da energia cinética do vento em energia elétrica;
- Transmissão e caixa multiplicadora: tem como finalidade transmitir energia mecânica das pás até o gerador, tendo na sua composição eixos, mancais, engrenagens de transmissão e acoplamento;
- Gerador: transforma a energia cinética em energia elétrica;
- Torre de sustentação: estruturas geralmente formadas por concreto ou totalmente em aço, são responsáveis por promover a elevação da nacele, além de posicionar o rotor a uma altura conveniente, onde seja possível desfrutar de ventos com maiores velocidades.

A Figura 3 mostra a vista geral da nacele da maioria dos modelos de turbinas eólicas de grande porte instaladas atualmente, por esta podemos ver em detalhes o interior da nacele que abriga importantes equipamentos, dentre eles, gerador, rotor, caixa multiplicadora de velocidades, freios de bloqueio equipamento de proteção contra descargas atmosféricas também estão inseridos sobre a nacele. Vale ressaltar que dependendo do modelo construtivo, alguns aerogeradores possuem o sistema de transformação instalados dentro da nacele, evitando com que seja necessário destinar um local para este sistema junto a base do equipamento. Geralmente o sistema de transformação embutido à nacele é para turbinas eólicas mais modernas e de maior diâmetro.

Na realização de estudos para o posicionamento das unidades geradoras em um parque eólico, leva-se em consideração o comportamento do vento no local escolhido e a natureza da superfície do terreno, a fim de garantir a viabilidade econômica do projeto. A presença de obstáculos é um dos elementos que mais impactam no posicionamento dos

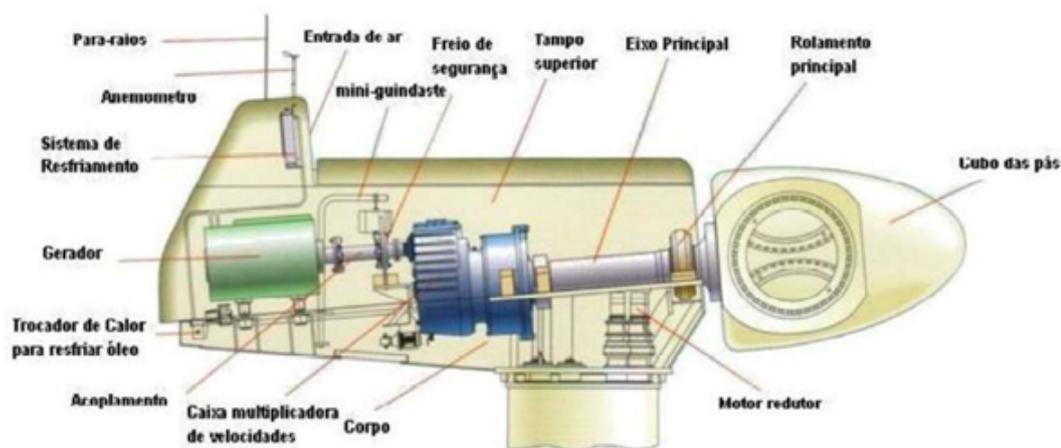
Figura 2 – Aerogerador de eixo horizontal e alguns de seus componentes



Fonte: Brasil (2010)

aerogeradores. Os obstáculos causam efeitos indesejáveis, tais como redução da velocidade, mudança na direção do vento, além do aumento de turbulência. Tais efeitos geram o efeito esteira, mostrado na Figura 4. Sendo assim, é importante considerar tal efeito no projeto de *layout* de parques eólicos, a fim de maximizar a energia produzida, além de

Figura 3 – Detalhes dos componentes da nacele de um aerogerador



Fonte: Almeida e Silva (2011)

aumentar a vida útil dos equipamentos.

Figura 4 – Efeito esteira em um parque eólico na Dinamarca



Fonte: Moskalenko, Rudion e Orths (2010)

Atualmente, embora existam softwares específicos para a simulação da dinâmica atmosférica, que permitem encontrar o distanciamento ótimo dos aerogeradores, ainda são consideradas as seguintes regras, as quais são ilustradas na Figura 5:

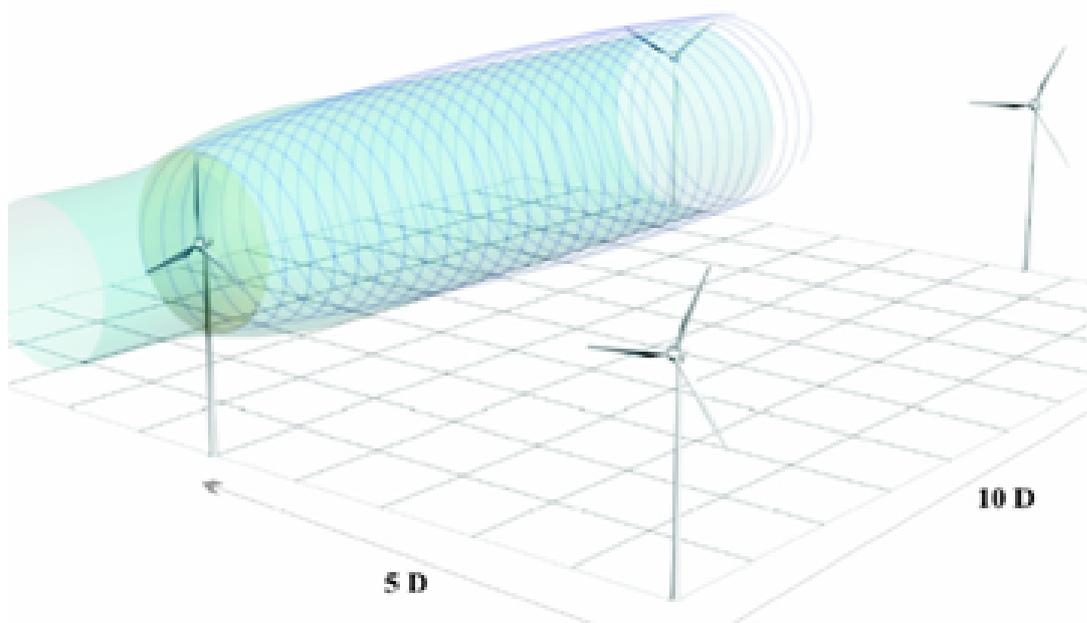
- Distanciamento da ordem de 10 vezes o diâmetro das turbinas para aerogeradores instalados perpendicularmente a direção do vento; e
- Distanciamento na ordem de 5 vezes o diâmetro das turbinas para aerogeradores instalados na direção do vento.

Tais condições de distanciamento são utilizadas para reduzir a perda de eficiência no parque eólico, causada por vários motivos, dentre eles, pode citar-se os efeitos “Sombreamento da Torre” e “Efeito Esteira”, além de também preservar a integridade física dos aerogeradores.

O efeito denominado sombreamento da torre, o qual ocorre quando a pá do aerogerador passa diante da sua própria torre de sustentação, pode causar uma perda de 20% no torque da pá, bem como pode causar flutuação da potência mecânica aplicada no eixo do gerador, provocando flutuações de tensão e de potência elétrica, podendo injetar estas variações na rede de distribuição, caso estas turbinas não possuam controladores de velocidade. Tal efeito ocorre devido a turbulência gerada entre a pá e a estrutura de sustentação do aerogerador, no momento em que ocorre a passagem desta diante da respectiva torre.

Já o efeito esteira cria uma área de turbulência atrás da turbina eólica, fazendo com a velocidade do vento diminua para as turbinas que estão atrás. Por isso, se justifica a importância de se respeitar os distanciamentos entre os aerogeradores. Na Figura 5, é possível observar que os aerogeradores que estão instalados na direção perpendicular ao vento são colocados no meio dos vãos dos aerogeradores da sua linha de frente.

Figura 5 – Efeito esteira em um parque eólico na Dinamarca

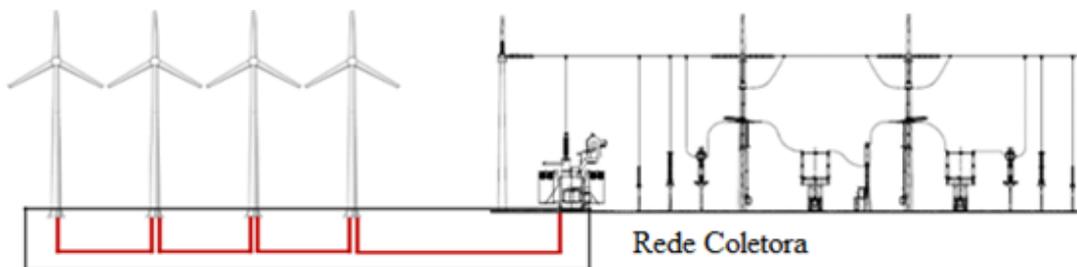


Fonte: Elétrica-CEPEL (2001)

2.3 Interconexão dos aerogeradores - Composição e Principais Arranjos

A rede coletora concentra a saída dos aerogeradores de uma planta eólica em um único ponto de conexão com a subestação de transformação, como pode ser visto na Figura 6. A instalação de uma rede coletora é similar a das redes urbanas de distribuição, sendo que, geralmente, é utilizada a ligação subterrânea. Porém, também podem ser utilizados arranjos com cabos aéreos ou mistos. As redes coletoras de parques eólicos podem ser ligadas em diferentes arranjos físicos, buscando sempre o ponto ótimo em relação a confiabilidade e o investimento. Dentre tantos arranjos, podem-se citar dois, os quais são utilizados com mais frequência.

Figura 6 – Efeito esteira em um parque eólico na Dinamarca



Fonte: Secco (2015)

O arranjo mais comum utilizado nos parques eólicos brasileiros é o radial simples, ilustrado na Figura 7. Tal topologia é composta por um único cabo alimentador, interligando desde o ponto de origem da primeira máquina geradora do agrupamento até a subestação coletora. Por se tratar de um arranjo mais simples, também é o que tem melhor custo e maior rapidez na instalação.

A Figura 8 apresenta a utilização da topologia radial simples na rede coletora do parque eólico *offshore Horns Rev 2* (210 MW), sendo composta por 91 aerogeradores e uma subestação coletora *offshore* (CONBOTASSUCIAS, 2013).

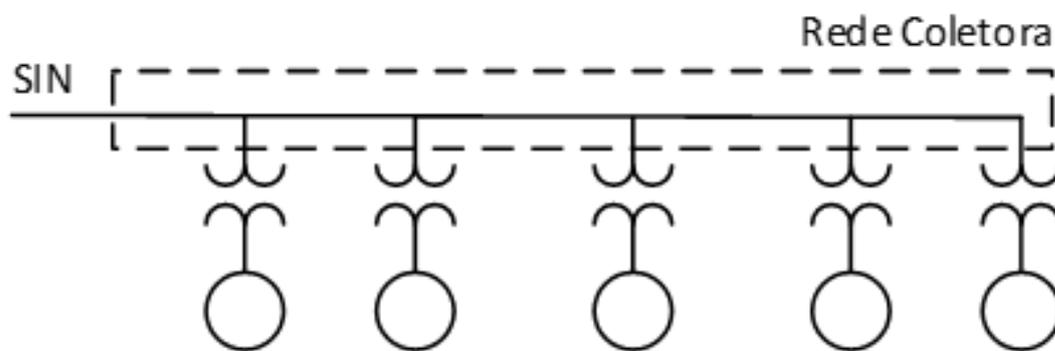
Outro arranjo muito utilizado em parques eólicos é de topologia ramificada, a qual é mostrada na Figura 9. Tal arranjo permite derivações em seu condutor primário. Além disso, o número de máquinas geradoras dos alimentadores secundários, ou terciários, é variável, tendo como limite apenas a capacidade de condução dos cabos.

O arranjo ramificado, quando comparado ao arranjo radial simples, apresenta maior confiabilidade ao sistema, além de possibilitar economia na aquisição de condutores, pois, nos ramos secundários, a seção do condutor pode ser menor, além de garantir menor perda de energia. Por esta constatação, tal topologia é adotada neste trabalho para a resolução do problema de otimização da interconexão dos aerogeradores.

A rede coletora representa um valor considerável nos custos totais de um parque

eólico. O cabeamento custa em torno de 11% do custo total da obra, ficando atrás apenas do custo das turbinas eólicas e da fundação, que representam, respectivamente, 64% e 16% do custo total de implantação (YAN, 2015). Desta forma, a otimização da rede coletora se torna uma maneira de reduzir os custos totais da obra, tornando a energia eólica mais atrativa e competitiva para o setor elétrico.

Figura 7 – Esquemático de rede interconectora radial de um parque eólico até a subestação coletora



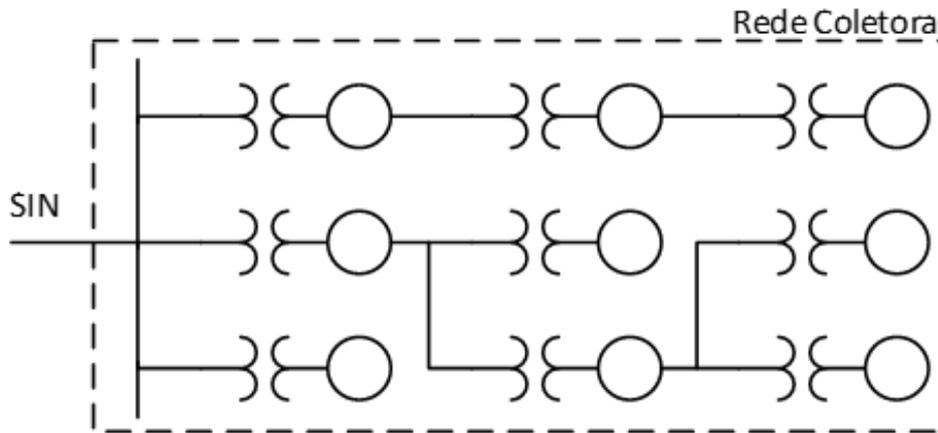
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 8 – Arranjo radial simples, interconectando aerogeradores e a subestação coletora no parque eólico Horns Rev 2



Fonte: CONBOTASSUCIAS (2013)

Figura 9 – Exemplo de arranjo ramificado do sistema interconector de um parque eólico



Fonte: Elaborado pelo Autor.

2.4 Redes de Interconexão Subterrâneas e Aéreas

Há basicamente dois tipos construtivos de interconexão de aerogeradores que podem ser utilizados para os arranjos citados anteriormente. São eles:

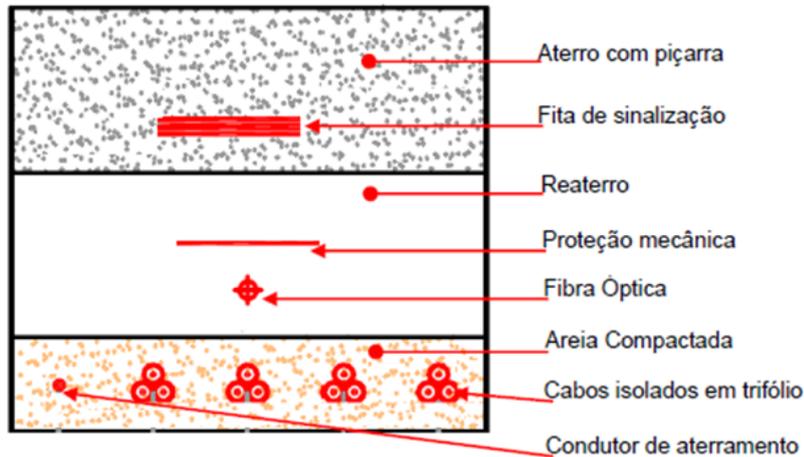
- Rede subterrânea: são utilizados cabos isolados especiais (Linha Wind, dos principais fabricantes, com isolamento contra umidade). A instalação é feita em valas escavadas, geralmente ao longo das vias de acesso no interior dos parques eólicos.

Para a cobertura dos cabos, é utilizada areia compactada com intuito de obter melhor dissipação térmica dos condutores. Como as normas utilizadas em parques eólicos costumam ser as mesmas para o sistema de distribuição de energia, deve-se identificar onde há cabos enterrados. Nos parques eólicos, geralmente, são utilizados marcos de Policarbonato de Vinila (PVC) ou de concreto para identificar o trajeto da rede, advertindo contra a escavação próxima aos cabos interconectores. Os condutores subterrâneos devem ser dimensionados respeitando os as normas Técnicas (2005) e Técnicas (2011). Na Técnicas (2005) consta que, caso a rede subterrânea seja do tipo F, os cabos devem ser dispostos em trifólio, protegidos por um banco de dutos, ou eletrodutos. Caso estes cabos sejam diretamente enterrados, a referida norma classifica este método de instalação como Tipo H. Juntamente com estes cabos, independente do tipo de instalação, os cabos de aterramento e fibra óptica devem ser inseridos no leito. A Figura 10 apresenta um desenho esquemático de uma rede subterrânea de um parque eólico.

- Rede aérea: possui método de instalação muito parecido com o utilizado nas redes aéreas de distribuição urbana tradicionais (Figura 11, a esquerda), onde são utilizados cabos nus de Liga de Alumínio ou Alumínio com Alma de Aço. Outra

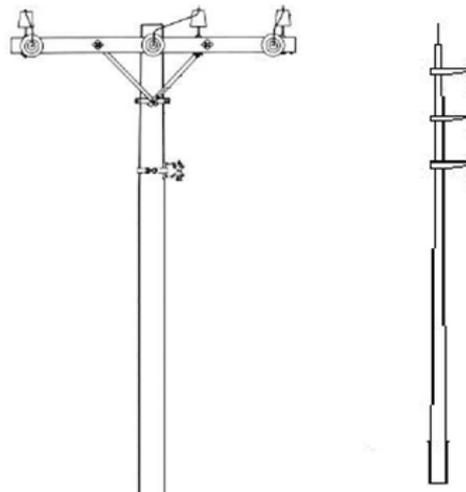
alternativa de instalação são as redes compactadas (Figura 11, a direita) que podem ser utilizadas com cabos semi-isolados (SECCO, 2015).

Figura 10 – Desenho esquemático da rede subterrânea



Fonte: Modificada de Secco (2015)

Figura 11 – Desenho esquemático das topologias de rede aérea



Fonte: Elaborada pelo autor.

2.5 O Problema da Árvore Geradora Mínima

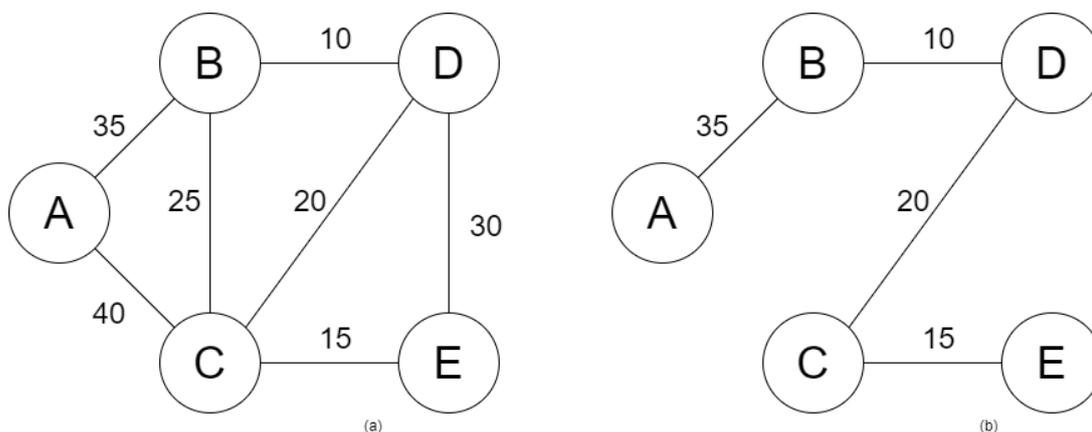
Seja um grafo não direcionado, o qual é conectado e associado a cada arco com valor não negativo. Deseja-se encontrar uma estrutura de conexão que conecta todos os

nós por um único caminho. Tal estrutura deve possuir o menor valor possível, visto que o valor se dá pela soma dos valores das arestas escolhidas.

Matematicamente, um Grafo (G) é dado por: $G = (V, E)$, onde Vértice (V) é o conjunto de vértices e Aresta (E) representa o conjunto de arestas. Assim, pode-se dizer que uma AGM é um subconjunto de E que conecta todos os nós de V , partir de um ponto fixo, a um custo mínimo (HO et al., 1991).

O princípio da AGM descreve que uma rede que contém n nós, requer $n-1$ arcos para fornecer um caminho entre os nós. Logo, como a Árvore Geradora é formada por $n-1$ arcos, basta encontrar a árvore com o menor comprimento total, a partir de um ponto de partida. A Figura 12 mostra um exemplo da Árvore Geradora Mínima (AGM) em um grafo, partindo do ponto D.

Figura 12 – Grafo com 6 arestas e 4 vértices (a) e (b) Árvore Geradora Mínima



Fonte: Modificada de Almeida, Yamakami e Takahashi (2007)

O Problema da Árvore Geradora Mínima pode ser empregado em uma série de aplicações, dentre elas, a determinação do menor caminho para linhas de transmissão de energia ou telefônicas, bem como na determinação da menor rota em um conjunto de cidades, aproveitando a estrutura das rodovias (CHUNDE, 1996). Também, pode ser utilizada na análise de clusters e armazenamento de informações entre outras coisas que também podem ser resolvidas a partir desta modelagem (AHYJA; ORLIN; MAGNANTI, 1993).

Como visto anteriormente, os arranjos dos cabeados, geralmente, são do tipo radial simples ou ramificado. Valendo-se do problema da ÁGM, o cabeamento interconector entre aerogeradores em parques eólicos pode ser representado computacionalmente através de grafos $G = (V, E)$, onde os aerogeradores são os vértices V e a rede de coleta representam as arestas E entre os vértices. Logo, o referido sistema pode ser considerado como uma árvore.

2.6 Considerações Finais

Neste Capítulo, foram apresentados alguns conceitos sobre parques eólicos e as características dos aerogeradores mais utilizados em parques de grande porte, bem como são mostradas as topologias de ligação utilizadas e os respectivos tipos de ligação. Por fim, o Capítulo traz o problema da Árvore Geradora Mínima, alguns exemplos de aplicações e como ele pode ser utilizado para resolver o problema proposto.

No Capítulo seguinte são apresentadas as heurísticas utilizadas nesse trabalho para resolver o Problema da Árvore Geradora Mínima Aplicado a parques eólicos *onshore*.

3 MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO

Este Capítulo apresenta as heurísticas utilizadas para resolver o problema da Árvore Geradora Mínima, a qual considera uma rede não direcionada, associada a cada arco uma distância, com o objetivo de encontrar o menor caminho entre os nós. A utilização desta técnica se dá pela eficiência ao resolver problemas em aplicações parecidas como no projeto de redes de telecomunicação, projetos de rodovia, ferrovias e, também, em projetos de redes de transmissão de energia. Assim, para resolver o problema da árvore geradora mínima foram utilizadas as heurísticas descritas a seguir.

3.1 Heurísticas

As heurísticas são um conjunto de regras que levam à descoberta da melhor solução para certos problemas de otimização através de algoritmos. Ressalta-se que tais métodos encontram as possíveis melhores soluções para o problema, porém, não são soluções exatas ou definitivas.

De maneira genérica, os problemas de otimização podem ser escritos na forma de Yang (2010):

$$\begin{aligned} \min_{x \in \mathcal{R}} \quad & f_i(x), \quad (i = 1, 2, \dots, M), \\ \text{s. a.} \quad & h_j(x) = 0, \quad (j = 1, 2, \dots, J), \\ & g_k(x) \leq 0, \quad (k = 1, 2, \dots, K), \end{aligned} \tag{3.1}$$

onde $f_i(x), h_i(x), g_i(x)$ são funções do vetor $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$.

Existem vários métodos de otimização para a solução destes problemas. Um conjunto de parâmetros deve ser escolhido a fim de obter uma solução que atenda os requisitos do problema (FRANÇA, 2005).

Assim, uma função pode ser otimizada de diferentes maneiras, como por exemplo, por programação matemática e métodos heurísticos. Há diversos métodos de programação matemática que podem ser utilizadas para resolver problemas de otimização, tais como programação linear, programação inteira e programação dinâmica. Tais métodos utilizam informação de gradiente para procurar um espaço de soluções através de uma partida inicial. Nesse contexto, é possível afirmar que os métodos baseados em gradientes têm conversão mais rápida e têm solução com maior precisão quando comparados com abordagens estocásticas na execução da tarefa de busca local (KAVEH; TALATAHARI, 2010).

A implementação efetiva dos métodos baseados em gradientes, tanto para as variáveis, quanto para a função custo, devem ser contínuas. Porém, não é possível aplicá-los em muitos problemas por causa da não convexidade e das zonas restritas, entre outras restrições.

Os algoritmos de otimização são classificados em determinísticos ou estocásticos, onde os determinísticos se definem por terem um comportamento que pode ser previsto, já que eles mantêm o mesmo número de entradas, seguindo os mesmos passos e realizando sempre os mesmos cálculos, garantindo uma solução ótima em um tempo finito. Por outro lado, os algoritmos estocásticos encontram soluções em um período de tempo razoável. No entanto, não há certezas de que as soluções ótimas sejam alcançadas e, tampouco, se o algoritmo funcionará, pois, em muitas vezes, a complexidade do problema não permite que sejam pesquisadas todas as soluções possíveis ou as combinações existentes. Assim, os algoritmos estocásticos são classificados como métodos eficientes, capazes de produzir boas soluções, sendo que, dentre estas, espera-se que algumas sejam ótimas, porém, não há garantias de tal otimização (YANG; DEB, 2009).

Algoritmos estocásticos são divididos em heurísticas e metaheurísticas. A diferença entre eles é que as metaheurísticas utilizam aleatorização. Tal aleatoriedade é uma boa forma de realizar uma pesquisa global com maior eficiência, pois foge da busca local (YANG, 2010). Também, vale ressaltar que, na literatura, não há definições acordadas para heurísticas e metaheurísticas, sendo os dois termos utilizados como sinônimos por alguns autores.

Uma metaheurística deve balancear dois elementos importantes para qualquer algoritmo: a diversificação e a intensificação. A diversificação procura garantir que a busca tenha uma boa cobertura no espaço de busca global, evitando com que ela fique confinada em uma pequena região do espaço total. Ao contrário, a intensificação busca uma melhor solução naquela região, buscando um resultado ótimo, próximo da solução atual. O ideal é balancear esses dois elementos para garantir que a otimização global seja alcançada.

3.1.1 Algoritmo dos Vagalumes (*Firefly Algorithm*)

O *Firefly Algorithm* é um algoritmo metaheurístico que possui como base o comportamento de vagalumes.

Os vagalumes, em seu comportamento natural, utilizam bioluminescência, ou seja, brilho projetado de seu abdômen, como meio atrativo de possíveis parceiros, do qual, quanto maior for a intensidade da luz emitida, mais forte se torna a atração entre eles.

O contexto do algoritmo FA é o cálculo do valor da função objetivo em diversos pontos do domínio, escolhidos inicialmente de forma aleatória, considerando que cada um desses pontos é um vagalume. Cada vagalume representa um vetor contendo um valor para cada uma das variáveis livres e possui um valor de função custo. A intensidade de luz desses vagalumes é relacionada com o valor da função custo calculada para o vetor de valores que cada vagalume corresponde (ponto no domínio). Em seguida, são realizadas iterações, no seguimento de certas regras, objetivando fazer com que os valores convirjam

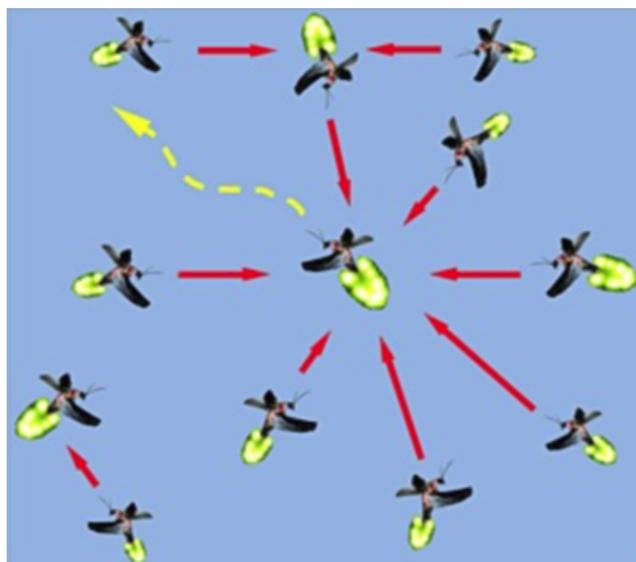
para o ponto que gere maior brilho, obtido no ponto onde a função apresenta o valor ótimo (ou o melhor conhecido). A atratividade de cada vagalume está diretamente relacionada à intensidade da luz emitida (que é proporcional à qualidade daquela solução). Assim, a intensidade da luz diminui conforme o aumento da distância (YANG, 2010).

Diante das informações descritas acima, foram formuladas algumas regras para o algoritmo, as quais são citadas a seguir (YANG, 2010):

- Todos os vagalumes são considerados assexuados. Logo, um vagalume pode ser atraído por qualquer outro;
- A atração é proporcional ao brilho. Um vagalume com brilho menos intenso irá se mover em direção ao mais brilhante;
- A atração é proporcional a intensidade do brilho e inversamente proporcional à distância;
- Se os brilhos forem iguais, os vagalumes se moverão aleatoriamente; e
- O brilho de um vagalume é determinado pela função objetivo.

A Figura 13 demonstra de maneira simples o funcionamento do algoritmo em relação a atratividade que os vagalumes exercem uns sobre os outros. O vagalume que apresenta melhor brilho atrai os demais. Porém, os vagalumes mais distantes são atraídos por vagalumes mais próximos, os quais apresentam maior brilho, sendo este menor do que aquele apresentado pela melhor solução, pois a distância é inversamente proporcional a intensidade de brilho.

Figura 13 – Comportamento dos Vagalumes



3.1.1.1 Atratividade

Analisando algumas características encontradas em vagalumes, é possível comparar essas particularidades biológicas com o FA. Dessa forma, consideram-se dois aspectos significativos, sendo estes a intensidade da luz que é emitida (ou brilho) e a atratividade, a qual depende da distância de onde está sendo observado. Embora esses conceitos sejam semelhantes, eles divergem em seus significados.

Desta forma, entende-se que a atratividade da luz emitida pelo vagalume relaciona-se à função a ser avaliada e a potência da luz observada que pode ser escrita como $I(r)$, onde ocorre um decréscimo à medida que o observador se distancia da fonte geradora. Diante disso, o poder de atratividade entre ambos, será menor a medida em que a distância entre eles aumentar e, de forma contrária, corresponde a um aumento na atratividade a redução dessa distância.

A redução de intensidade de luz emitida pelo vagalume obedece à lei do quadrado inverso, onde a potência da luz I diminui à medida que a distância r aumenta em termos de $I = 1/r^2$. Também, importante considerar que o meio absorve a luz, que tende a se tornar mais tênue proporcionalmente ao aumento da distância. Dessa forma, com as reduções causadas pelas distâncias e pela absorção do meio, tem-se a Equação 3.2 para a intensidade do brilho observada.

$$I(r) = I_0 e^{-\gamma r^2} \quad (3.2)$$

Assim, em 3.2, r é a distância entre os vagalumes, γ é a constante de absorção da luz que estabelece o quanto a intensidade decresce com a distância e I_0 é a intensidade natural da luz em $r=0$.

Dessa forma, como a atratividade de um vagalume é relacionada à luz percebida pelos vagalumes adjacentes, a atratividade (β) pode ser descrita como 3.3.

$$\beta(r) = \beta_0 e^{-\gamma r^2} \quad (3.3)$$

Na Equação 3.3, β_0 é a atratividade em $r=0$.

3.1.1.2 Distância e Movimento

A Equação 3.4 descreve a distância euclidiana entre dois vagalumes (i e j).

$$r_{ij} = \|x_i - x_j\| = \sqrt{\sum_{k=1}^N (x_{i,k} - x_{j,k})^2} \quad (3.4)$$

Onde, N é o número de dimensões.

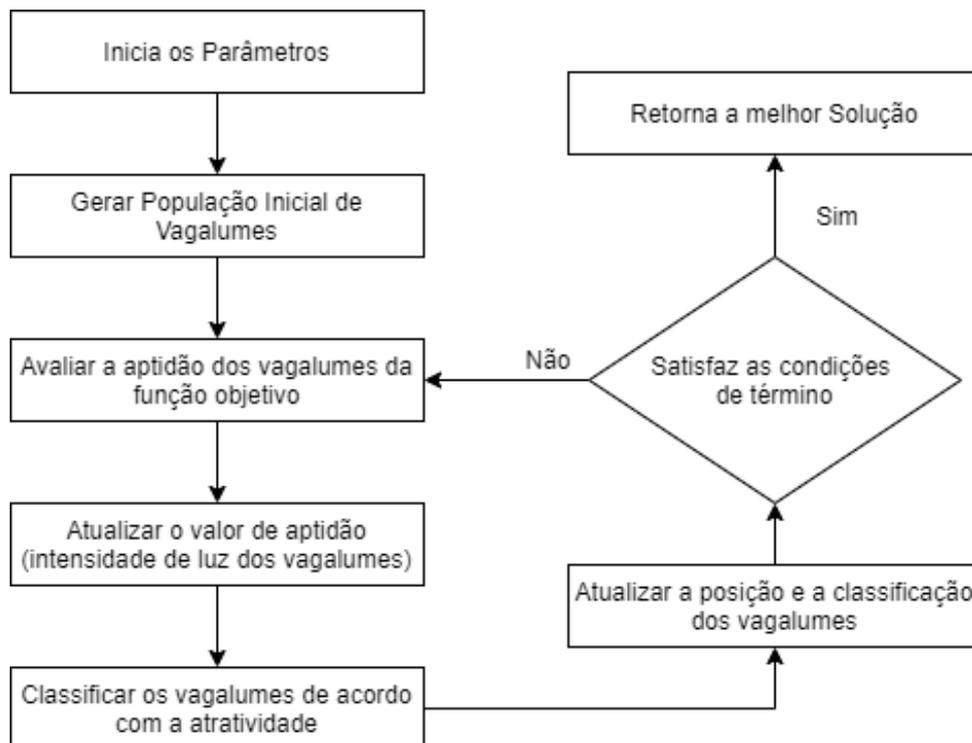
O movimento do vagalume i atraído por outro vagalume j , é dado por 3.5.

$$x(t+1) = x(t) + \beta_0 e^{-\gamma r_{ij}^2} (x_j(t) - x_i(t)) + \alpha(\text{rand} - 1/2) \quad (3.5)$$

Na equação 3.5, $x_i(t)$ corresponde à posição atual do vagalume i , $\beta_0 e^{-\gamma_{ij}^2} (x_j(t) - x_i(t))$ é a fração do movimento correspondente à atratividade provocada pelo vagalume j e $(rand1/2)$ corresponde à parcela aleatória do movimento, onde $rand$ equivale a um valor aleatório que pode variar entre 0 e 1. Além disso, a variável α representa o peso deste movimento. O fator γ é de fundamental importância para estabelecer a velocidade na qual o algoritmo converge. Na teoria, pode-se admitir qualquer valor maior que zero. Na prática, ele é definido baseando-se na distância original do sistema a ser otimizado. Seu valor, usualmente, pode variar entre 0,01 e 100 (YANG, 2010).

Ressalta-se que ocorrem duas situações particulares relevantes, onde a primeira é quando $\gamma \rightarrow \infty$ e a segunda, quando $\gamma \rightarrow 0$. Logo, a atratividade sempre é constante quando $\gamma \rightarrow 0$, o que representa a possibilidade de visualizar todos os vagalumes espalhados num ambiente ideal, independentemente da distância entre eles e onde sempre seriam atraídos os vagalumes de menor brilho em direção ao de maior brilho. Já com $\gamma \rightarrow \infty$, encontra-se uma situação inversa, pois nenhum vagalume consegue ser observado por outro, mesmo quando próximos, ocasionando uma movimentação completamente aleatória da população de vagalumes. Essa situação correspondente às metodologias de busca aleatória (RIBEIRO, 2014). Este parâmetro pode ser adaptado para os dois pontos opostos. Sendo assim, o FA pode buscar ótimos globais e locais de maneira muito satisfatória. A Figura 14 mostra o fluxograma com as etapas do algoritmo dos vagalumes.

Figura 14 – Fluxograma Algoritmo do Vagalume



3.1.2 Otimização Por Enxame de Partículas

A otimização por enxame de partículas é um método de otimização baseado no comportamento de animais sociais como um enxame de insetos, um bando de pássaros ou um cardume, buscando imitar o comportamento destes organismos. Dessa forma, cada indivíduo em um enxame apresenta um comportamento distribuído conforme a sua inteligência e a inteligência coletiva do grupo. Assim, se um indivíduo encontra um caminho para obter seu alimento, os demais do grupo o seguirão neste caminho.

Na otimização, o enxame é composto por um número determinado de partículas, onde cada uma é inicialmente localizada em uma posição aleatória no espaço de busca multidimensional. Ao mesmo tempo, cada partícula possui duas características: posição e velocidade. Cada partícula se desloca pelo espaço de busca e armazena a melhor posição encontrada (com relação à função objetivo do problema). As partículas comunicam-se entre si repassando as boas posições, ajustando suas posições individuais e respectivas velocidades, baseando-se nas informações recebidas (RAO, 2006).

Conforme Rao (2006), a implementação computacional do PSO, considerando um problema de minimização sem restrições, possui os seguintes passos:

1. Definir o número de partículas do enxame;
2. Inicializar aleatoriamente a posição de cada partícula dentro de seus limites inferior e superior;
3. Inicializar as velocidades aleatoriamente ou defini-las como zero;
4. Para cada partícula:
 - a) Calcular o valor da função objetivo (valor de aptidão);
 - b) Se o valor de aptidão calculado é menor que o melhor valor de aptidão na história da partícula ($pBest$), definir o valor atual como o novo $pBest$;
5. Escolher a partícula com o menor valor de aptidão de todas as partículas como o $gBest$ (melhor valor do enxame);
6. Para cada partícula:
 - a) Calcular a velocidade da partícula de acordo com a Equação 3.6. Caso a velocidade calculada seja maior que a velocidade máxima, definir velocidade como o valor máximo;

$$v_{j+1} = \omega V_j + C_1 r_1 (X_{pBest,j} - X_j) + C_2 r_2 (X_{gBest,j} - X_j) \quad (3.6)$$

Onde: V_{j+1} é a nova velocidade da partícula j , V_j é a velocidade atual da partícula j , X_j é a posição atual da partícula j , r_1 e r_2 são números aleatórios,

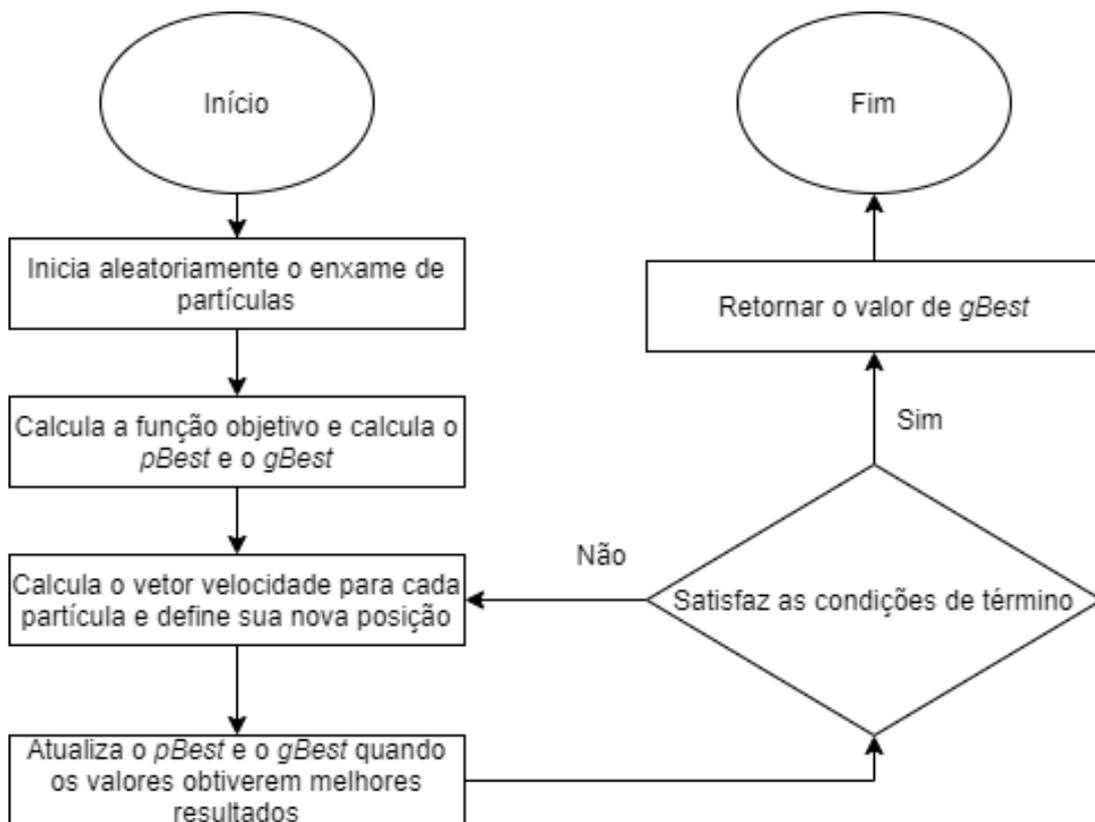
que retorna um único número randômico uniformemente distribuído no intervalo (0,1) garantindo maior diversidade ao algoritmo, X_pBest , j é a posição do melhor valor de aptidão na história da partícula j , X_gBest é a posição do melhor valor de aptidão de todas as partículas e $c1$ e $c2$ são os componentes cognitivo e social, respectivamente, por fim, ω é o coeficiente de inércia, este, qual é responsável por controlar a influência dos valores de X_pBest , j e X_gBest no cálculo da velocidade atual.

b) Atualizar a posição da partícula de acordo com a Equação 3.7;

$$X_{j+1} = X_j + V_{j+1} \quad (3.7)$$

Em 3.7, X_{j+1} é a nova posição da partícula j . Para melhorar o entendimento, a Figura 15 apresenta um fluxograma com as etapas do algoritmo de Otimização por Enxame de Partículas.

Figura 15 – Fluxograma Enxame de Partículas



Fonte: Adaptado de (EBERHART; SHI; KENNEDY, 2001)

3.1.3 Algoritmo Competitivo Imperialista

O algoritmo evolutivo proposto por Atashpaz-Gargari e Lucas (2007) baseia-se em uma população inicial aleatória dividida entre colônias e imperialistas. Cada indivíduo

da população é chamado de país, onde aquele que apresentar o menor custo, devido ao algoritmo ser de minimização, é o selecionado para ser o imperialista. O restante são as colônias desse imperialista. As colônias estarão divididas entre os imperialistas de acordo com seu poder. Se uma colônia de um determinado império apresentar menor custo que seu imperialista, ocorre a troca de posição entre a colônia e seu imperialista.

No ACI os países são representados por uma matriz de $1 \times N_{var}$, demonstrada na Equação 3.8.

$$p = (p_1, p_2, p_3, \dots, p_{N_{var}}) \quad (3.8)$$

Sendo N_{var} o número de variáveis do problema.

A Equação 3.9, mostra que o custo de um país é realizado através das variáveis da função objetivo.

$$c = p = (p_1, p_2, p_3, \dots, p_{N_{var}}) \quad (3.9)$$

O ACI inicia quando o tamanho da população N_p for gerado. Define-se também N_{im} como sendo os países com maior poder, estes formarão um império. As colônias que representarão cada império são designadas por N_c . O número de Impérios N_{imp} , determina a quantidade de países mais poderosos. Assim o poder dos imperialistas define onde cada colônia será distribuída, conforme definido pela Equação 3.10, a qual determina o custo normalizado.

$$C_n = c_n - \max_i(C_i) \quad (3.10)$$

Onde c_n é o custo do n –ésimo imperialista e o custo normalizado é dado por C_n . Definindo o valor para o custo normalizado C_n , pode-se encontrar o valor do poder normalizado p_n de cada imperialista através da Equação 3.11.

$$p_n = \frac{|C_n|}{\left| \sum_{i=1}^{N_{im}} c_i \right|} \quad (3.11)$$

Também, deve ser definido o poder normalizado de um imperialista, que se dá pela quantidade de colônias iniciais que estão atribuídas a ele. O valor do poder normalizado é dado pela equação 3.12.

$$N_{C_n} = \text{round}(p_n N_c) \quad (3.12)$$

Onde N_{C_n} é o número inicial de colônias que será atribuído ao i –ésimo imperialista, onde *round* atribui o valor inteiro mais próximo. Seguindo o ACI, o próximo passo é movimentar as colônias em direção aos seus imperialistas, sendo esta é a operação principal do algoritmo. Sendo assim, tal movimento é dado através de dois parâmetros do algoritmo: o coeficiente de assimilação (λ) e o coeficiente angular de Assimilação (ζ). A Equação 3.13 descreve este movimento.

$$pos_{i+1} = pos_i + \lambda \zeta d \quad (3.13)$$

Onde pos_i é o vetor de posicionamento das colônias, λ é um valor maior que 1, ζ um valor entre 0 e 1 e d é a distância entre a colônia e o imperialista. Apesar de tudo, ainda é possível que uma colônia se mova de maneira aleatória. A probabilidade disto ocorrer é um parâmetro ajustável que é denominado taxa de revolução. Assim, no final das movimentações, caso uma colônia tenha um custo melhor que seu imperialista, ocorre a troca de posição entre a colônia e o imperialista. O custo total do império é formado pelo custo total do império e uma porcentagem do custo de suas colônias. Este custo é dado pela Equação 3.14.

$$T_{C_n} = C_{im} + \zeta \mu \quad (3.14)$$

Sendo T_{C_n} o custo total do império, C_{im} o custo do imperialista, λ o coeficiente do custo médio das colônias (valor entre 0 e 1) e μ a média dos custos das colônias do imperialista. A Equação 3.15 define o custo normalizado dos impérios após ocorrer a competição imperialista, onde a colônia mais fraca do império considerado mais fraco tem chances de ser conquistada por um império de maior poder.

$$N_{T_{C_n}} = T_{C_n} - \max_i(T_{C_i}) \quad (3.15)$$

Onde:

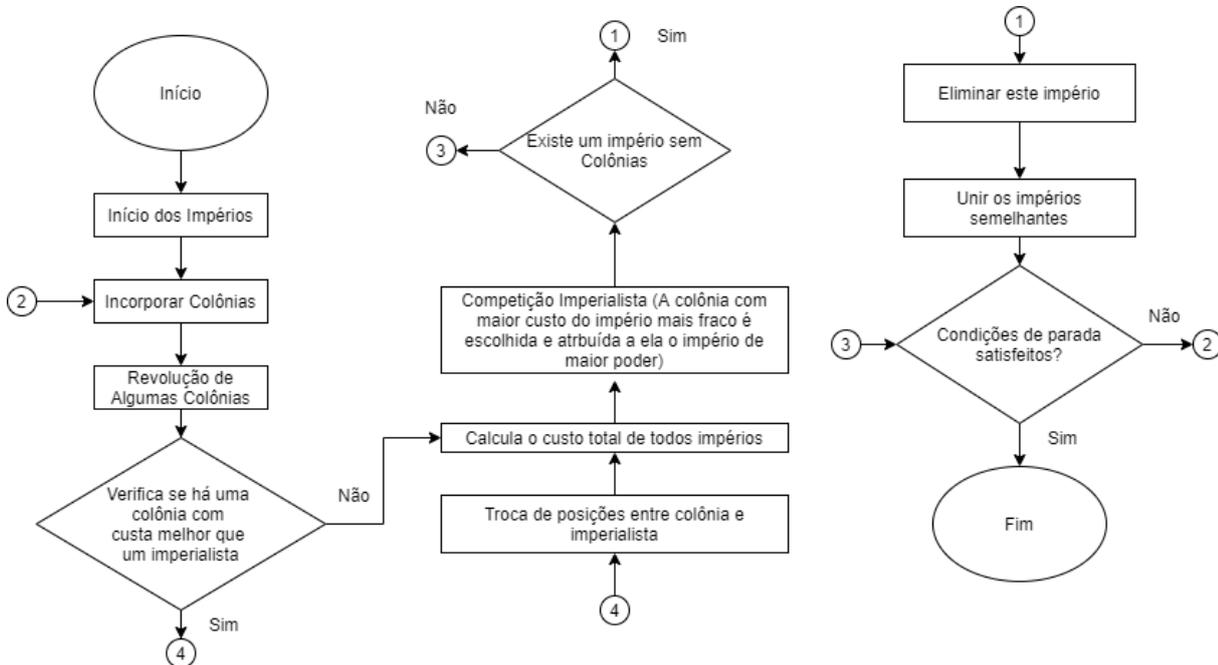
- a) $N_{T_{C_n}}$ define o custo normalizado do n –ésimo império de valor maior que zero;
- b) $\max_i(T_{C_i})$ custo total do império com maior custo entre todos.

Algumas colônias de cada império também passam por um processo de revolução. Tal operação tem objetivo de explorar melhor o espaço em busca das melhores soluções globais. A Equação 3.16 calcula o número de colônias rebeldes de cada império.

$$N_{Rev} = \text{round}(P_{Rev} N_{col}) \quad (3.16)$$

onde, N_{Rev} , é o número de colônias rebeldes do império, P_{Rev} corresponde a taxa de revolução, N_{col} é o número total de colônias do império e round uma função que arredonda o número de colônias rebeldes para o número inteiro mais próximo. Por fim, o algoritmo analisa se existem impérios sem colônias. Caso existam, estes serão eliminados. Na sequência, ocorre a união de impérios semelhantes até todos impérios serem eliminados, exceto o mais forte que, por sua vez, terá todas colônias sob seu domínio e todos (colônias e imperialistas) estarão na mesma posição, concluindo a competição imperialista. A Figura 16 apresenta o fluxograma do ACI.

Figura 16 – Fluxograma Algoritmo Competitivo Imperialista



Fonte: Adaptado de (ATASHPAZ-GARGARI; LUCAS, 2007)

Assim, um país imperialista e suas colônias formam um império, onde o poder deste império é a soma do poder das colônias e do país imperialista. Dessa forma, os impérios mais poderosos tendem, ao longo do tempo, a conquistar os impérios com menor poder, ocorrendo a convergência do conjunto de países a um único império. Este império possuirá todas as colônias em seu domínio estando essas na mesma posição do imperialista. Não havendo mais diferenças entre colônia e imperialista, termina-se a competição. Comparando um algoritmo genérico clássico com o Algoritmo Competitivo imperialista, percebe-se que os países representam as possíveis soluções dentro do espaço de busca desconhecido.

3.2 Considerações do Capítulo

Neste Capítulo, foram apresentados os conceitos gerais de otimização que foram utilizados para resolver o Problema da Árvore Geradora Mínima que, por sua vez, é utilizada para otimizar as redes interconectoras dos Parques Eólico Cerro Chato e Complexo Eólico Chuí. O Capítulo seguinte apresenta os sistemas teste utilizados, a modelagem do problema, os parâmetros utilizados pelos algoritmos de otimização e os resultados obtidos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este Capítulo apresenta a aplicação dos métodos de otimização para dois parques eólicos *onshore*, sendo estes Cerro Chato e Parque Eólico Chuí. Para o primeiro é considerado um cabeamento interconector em média tensão (MT) aéreo, já para o caso 2, Parque Eólico Chuí, considera-se que este é interligado a partir de uma rede subterrânea, ambas de 34,5 kV. Vale ressaltar que, para o procedimento, não foram alterados o posicionamento dos aerogeradores, bem como, da subestação, apenas o percurso do cabeamento de interconexão entre as turbinas.

Objetivando comparar custos de ambos cabeamentos, foi seguido como base os dados do Complexo eólico Ventania, com potência instalada de 123 MW, tendo uma rede coletora de aproximadamente 70 km e tensão de transmissão em MT de 34,5 kV. Com estes dados Kawabata (2018) e a partir de cotações atuais, fez-se uma estimativa de valores das redes aérea e subterrânea. Utilizando estes dados, foi calculada uma estimativa de preço por km do cabeamento interconector MT aéreo e subterrâneo. Estes valores são mostrados na Tabela 1. A partir destes dados, o custo estimado por km da rede aérea é de R\$ 185.214,60 e R\$ 337.741,00 de custo para o km do cabeamento subterrâneo.

Tabela 1 – Parâmetros utilizados como base na precificação por km

Preço do Cabeamento	Materiais (R\$)	Serviços (R\$)	Custo Total (R\$)
Rede Aérea	8.352.912,81	4.612.391,19	12.965.304,00
Rede Subterrânea	18.558.411,83	5.064.561,44	23.622.973,27

Fonte: Adaptado de Kawabata (2018)

Neste trabalho, a função objetivo a ser minimizada depende diretamente da distância entre os aerogeradores. A modelagem do problema de otimização do cabeamento de interconexão dos aerogeradores é apresentada de forma compacta na Equação ??.

$$\begin{aligned}
 \min \quad & f(z) \\
 \text{s. a.} \quad & g(z) = 0, \\
 & h(z) \leq 0, \\
 & z_{min} \leq z \leq z_{max},
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

Onde: $f(z)$ é a função objetivo a ser otimizada, $g(z) = 0$ representa as restrições de radialidade e conectividade, $h(z) \leq 0$, são as restrições de desigualdade, z é considerada a variável do problema de otimização dada pelo caminho da interconexão.

A função objetivo deste problema deve encontrar uma configuração radial ótima, que realize a interconexão entre os aerogeradores e a subestação, fazendo com que o

comprimento total seja minimizado. A função objetivo z é apresentada na Equação 4.2.

$$z = \sum_{j=1}^{N_{ramos}} l_j \quad (4.2)$$

Onde:

- N_{ramos} = número de ramos da rede coletora;
- l_j = Comprimento do ramo j [km].

4.1 Cerro Chato

Tal sistema é composto por 44 aerogeradores que fazem parte do Parque Eólico Cerro Chato, localizado no município de Santana do Livramento – RS. Cada turbina tem potência de 2 MW. A área analisada do parque conta com aproximadamente 8,5 km².

A interligação dos aerogeradores é feita através de linhas aéreas de transmissão em corrente alternada (CA), com tensão operacional de 34,5 kV. No parque eólico em questão, as turbinas tem espaçamentos variados, com uma formação não convexa entre elas. Além disso, o comprimento da linha de transmissão que interliga os geradores com a subestação é de 42 km.

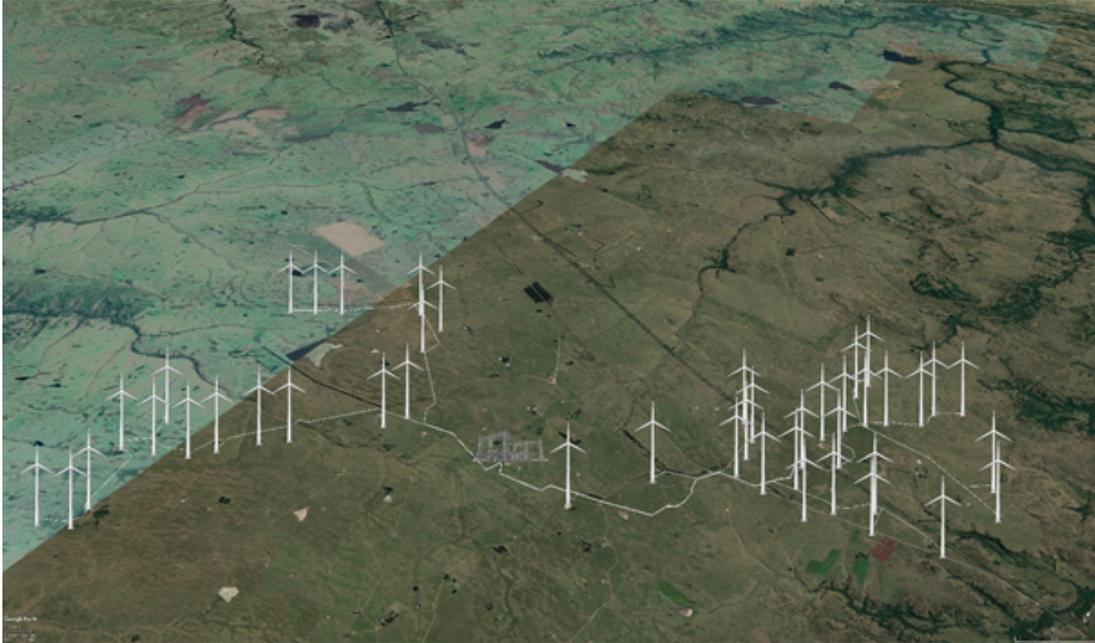
A Figura 17 apresenta o layout atual de parte do complexo Cerro Chato, onde a interconexão ocorreu através de uma rede aérea, tal configuração para este caso é interessante pois é instalada na região da fronteira oeste do Rio Grande do Sul, distante da região litorânea, diferente do caso 2 onde o parque eólico Chuí está próximo à costa. Outro ponto a ser destacado na Figura 17 é a proximidade entre os aerogeradores deste parque eólico, especialmente no lado direito da figura, onde estes, certamente, não respeitam os distanciamentos mínimos recomendados para aumentar a eficiência do parque e reduzir o efeitos esteira e sombreamento, o quê, como dito anteriormente, traz vários prejuízos gerais ao sistema, podendo inclusive causar problemas de afundamento de tensão e potência no complexo gerador.

4.1.1 Configuração de Parâmetros para o Algoritmo de Otimização de Vagalumes

A partir da utilização do software Matlab[®], foram realizadas diversas simulações para o sistema Teste, proporcionando o desmembramento do complexo Eólico Cerro Chato. Assim, atingindo o objetivo de adaptar as heurísticas de otimização ao problema proposto e, dessa forma, realizando a calibragem de alguns parâmetros do algoritmo, onde vale ressaltar que para cada mudança, o algoritmo foi executado 10 vezes.

Para o FA, fixou-se o número de 1000 iterações, variando-se o número de vagalumes de 50 até 300, com passos de 10, sendo a melhor configuração escolhida a que resultou

Figura 17 – Esquemático da interconexão entre os geradores no parque Eólico Cerro Chato



Fonte: Google Earth

na melhor resposta (menor comprimento). Portanto, neste caso, foi considerado um circuito radial que possui 4 barramentos, 4 relés direcionais de sobrecorrente e 1 gerador (fonte de alimentação do sistema).

A partir dos testes, a melhor configuração dos parâmetros para o algoritmo FA é mostrada na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros utilizados no FA para o caso 1

Parâmetro	População	α	β	λ
Valor	150	0,2	0,99	0,97

Fonte: Elaborado pelo Autor.

4.1.2 Configuração de Parâmetros para o Algoritmo de Otimização por Enxame de Partículas

Utilizando o mesmo sistema teste, o algoritmo PSO também foi calibrado. Os passos seguidos foram idênticos ao FA, sendo fixado o número de iterações em 1000. O tamanho do enxame variou de 100 até 300 com passos de 10 e, para cada mudança, o algoritmo foi executado 10 vezes.

A melhor configuração para o sistema com o algoritmo PSO, a qual também foi escolhida a partir da melhor resposta (menor comprimento total), é mostrada na Tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros utilizados no PSO para o caso 1

Parâmetro	População	ω	$C1$	$C2$
Valor	150	0,5	0,97	1

Fonte: Elaborado pelo Autor.

4.1.3 Configuração de Parâmetros para o Algoritmo de Otimização Competitiva Imperialista

Utilizando o mesmo sistema teste, o algoritmo ACI também foi calibrado. Da mesma forma verificada para o algoritmo anterior, os passos seguidos para a respectiva calibragem foram idênticos ao FA, sendo fixado o número de iterações em 1000. O tamanho da população variou de 150 a 350 com passos de 10, sendo que, para cada mudança, o algoritmo foi executado 10 vezes. A Tabela 4 apresenta os parâmetros para o Algoritmo de Otimização Competitiva Imperialista, os quais foram verificados para a melhor resposta.

Tabela 4 – Parâmetros utilizados no ACI para o caso 1

Parâmetro	N_P	N_{imp}	λ	P_{Rev}
Valor	250	3	0,9	0,5

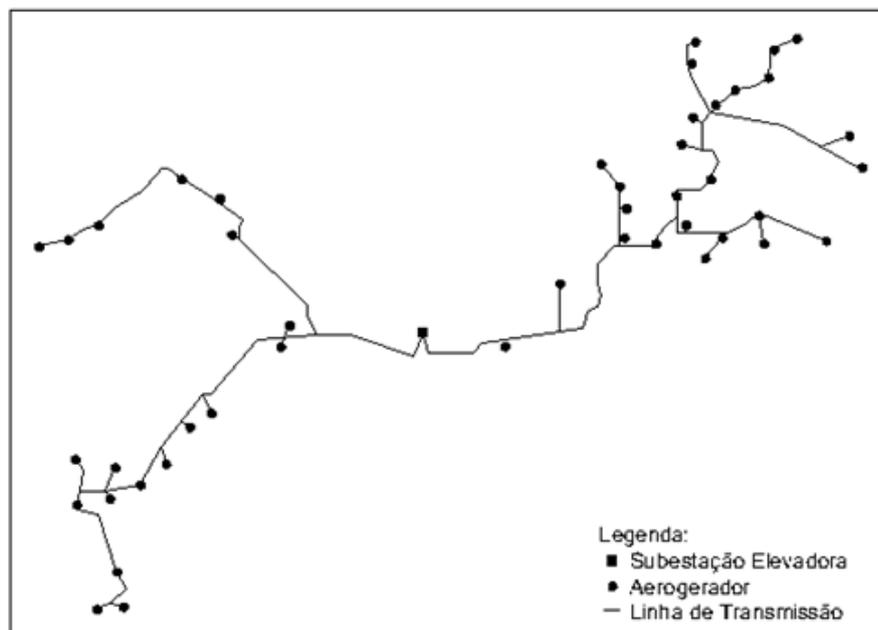
Fonte: Elaborado pelo Autor.

4.1.4 Resultados

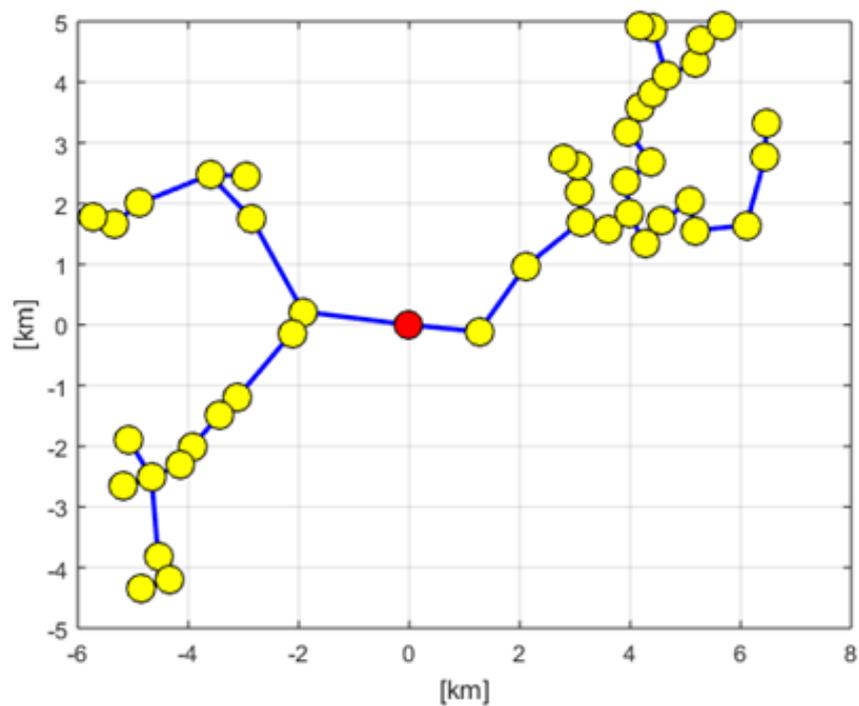
Após escolhida a configuração de parâmetros que resulta em uma melhor resposta, os algoritmos foram novamente executados 10 vezes cada, para reduzir a convergência do algoritmo para os mínimos locais. A análise da árvore geradora mínima com aplicações dos algoritmos FA, PSO e ACI para realização do cabeamento interconector dos aerogeradores é mostrada a seguir, sendo estes resultados comparados com o *layout* atual do parque.

A configuração original do parque está representada na Figura 18, o qual, atualmente, apresenta um cabeamento interconector de 42 km de comprimento. Essa configuração serve como modelo a ser otimizado. Já a Figura 19 apresenta o comprimento otimizado do condutor de interconexão pelo Algoritmo dos Vaga-lumes

Figura 18 – Configuração Atual Complexo Eólico Cerro Chato



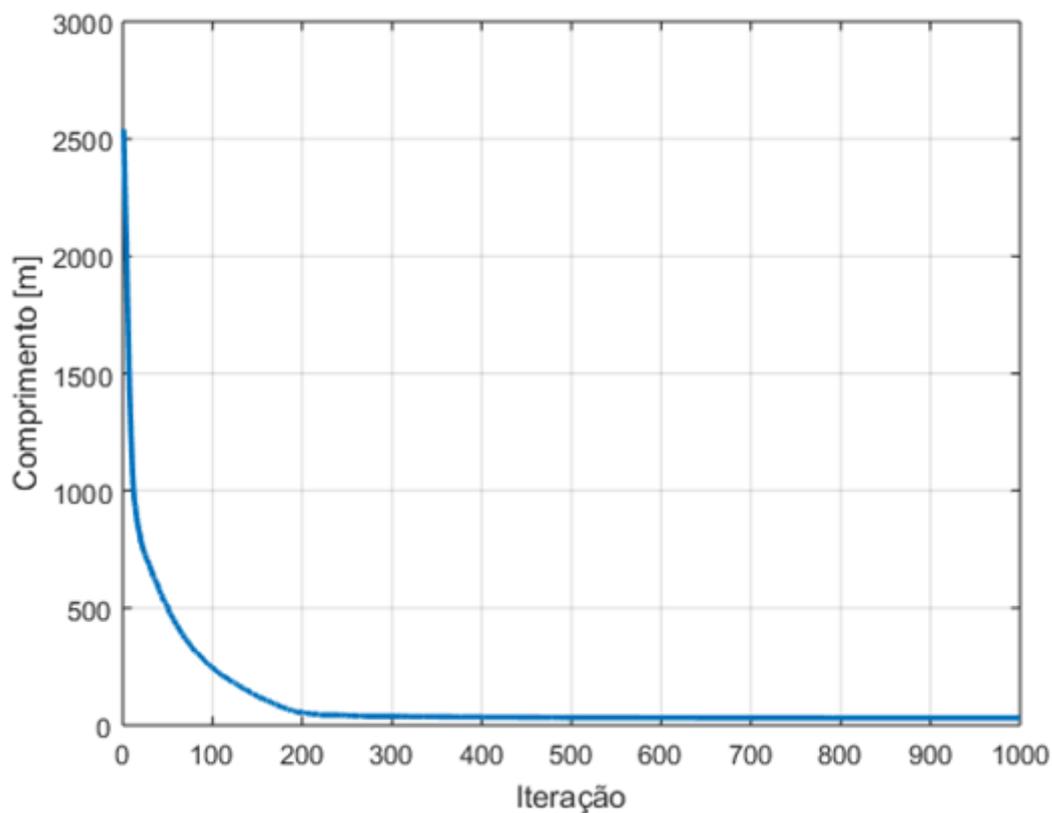
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 19 – *Layout* otimizado com o Algoritmo Vagalume

Fonte: Elaborado pelo Autor

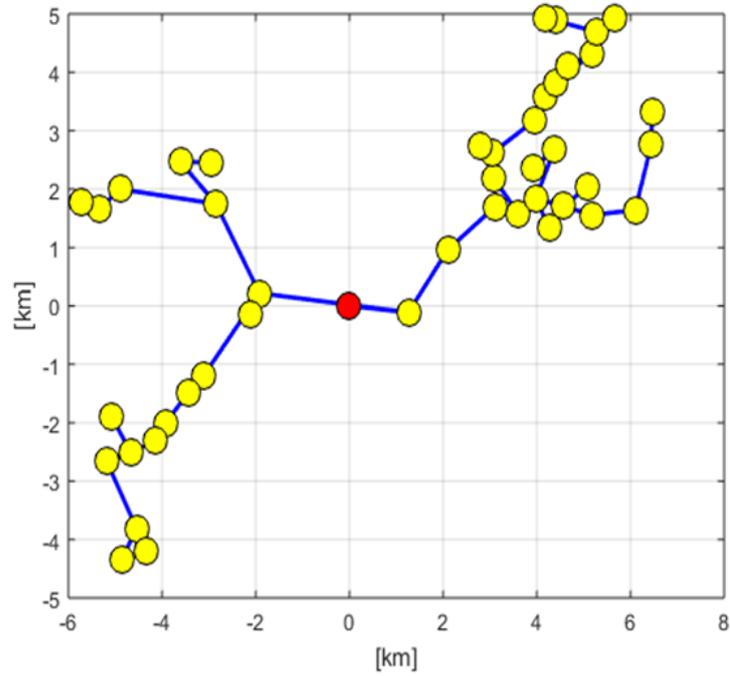
Segundo o FA, obteve-se o comprimento do condutor de conexão igual a 31,11 km, acarretando em uma redução de 25,92% em relação à topologia de conexão utilizada atualmente. Assim, o resultado do método de otimização, de acordo com o funcionamento do mesmo, pode ser melhor observado na Figura 20, a qual mostra a convergência da resposta, onde é possível verificar que está ocorrendo após 300 iterações. Pode-se considerar que o resultado obtido com a aplicação do FA foi bem sucedido, apresentando uma redução considerável no comprimento do cabo.

Figura 20 – Característica de convergência do Algoritmo Vagalume



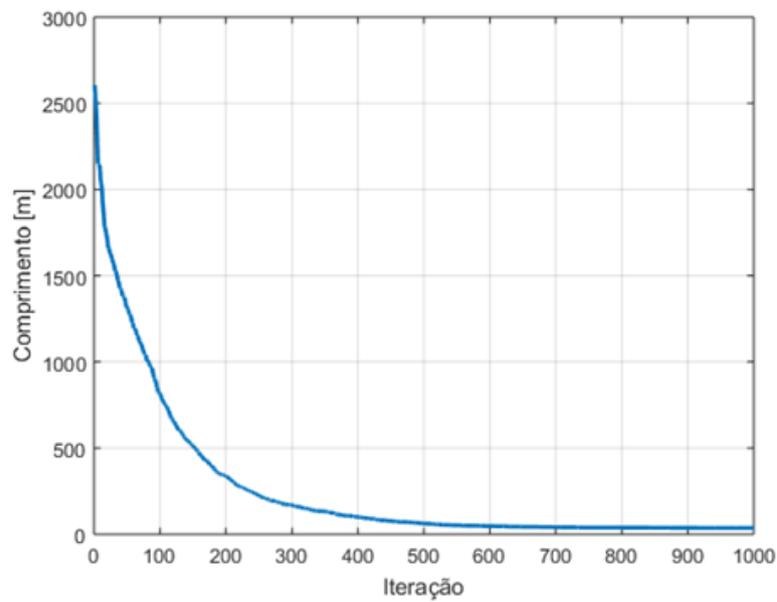
Fonte: Elaborado pelo Autor

A Figura 21 mostra o *layout* de interconexão sugerido utilizando o algoritmo PSO. Tal algoritmo teve como resultado um comprimento total de interconexão de 33,75 km, reduzindo em 19,65% quando comparado ao *layout* atual (42 km). Do mesmo modo em que foi apresentado para o algoritmo FA, o resultado do método de otimização PSO, de acordo com seu funcionamento, pode ser melhor observado na Figura 22, a qual apresenta sua característica de convergência, que ocorre em torno de 800 iterações.

Figura 21 – *Layout* otimizado com o Algoritmo Otimização por Enxame de Partículas

Fonte: Elaborado pelo Autor

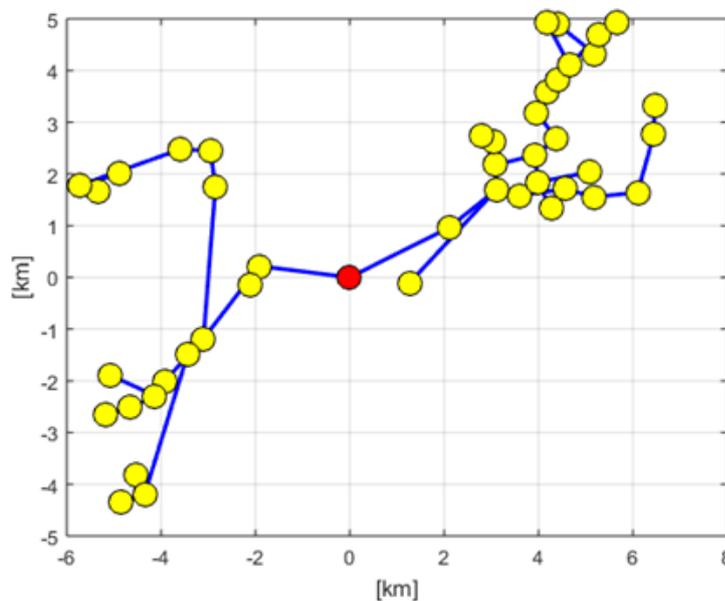
Figura 22 – Característica de convergência do Algoritmo Otimização por Enxame de Partículas



Fonte: Elaborado pelo Autor

Por fim, o ACI sugeriu o *layout* mostrado na Figura 23, apresentando um comprimento mínimo do condutor de conexão de 38,2 km, reduzindo em apenas 9,05% o comprimento do layout atual. O resultado do método de otimização, em termos de sua convergência, pode ser observado na Figura 24. Pode-se afirmar, que as 1000 iterações utilizadas não são suficientes para a convergência da resposta, uma vez que, conforme a Figura 24, observa-se que a linha do gráfico demonstra uma tendência decrescente, indicando que o algoritmo precisa de mais iterações para convergir para uma resposta mínima, mas que está em torno do que foi observado na última iteração.

Figura 23 – *Layout* otimizado com o Algoritmo Competitivo Imperialista



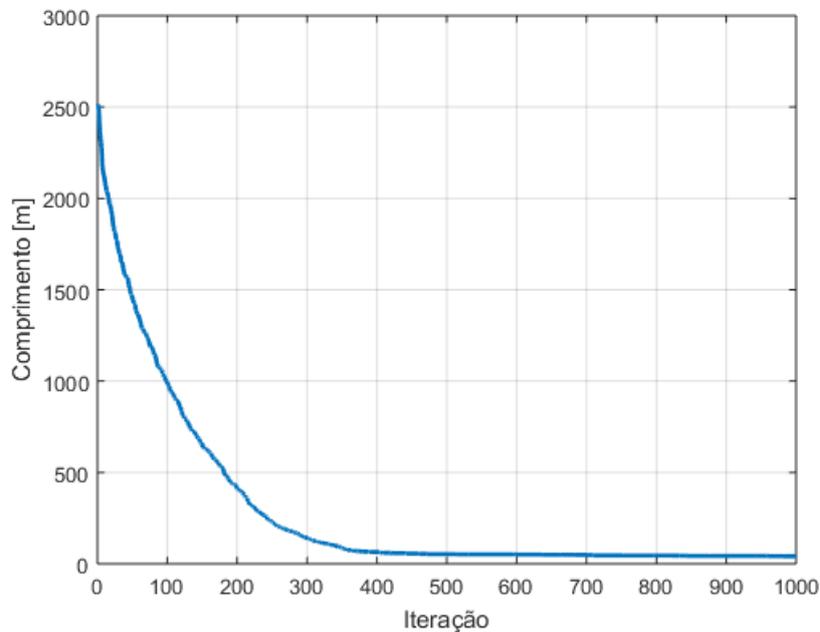
Fonte: Elaborado pelo Autor

4.2 Sistema Teste 2 – Parque Eólico Chuí

O Parque Eólico Chuí faz parte de um dos maiores complexos eólicos da América Latina, denominado Campos Neutrais, o qual está situado no extremo sul do Rio Grande do Sul e é composto também pelos parques eólicos Geribatu e Hermenegildo. O complexo como um todo tem uma potência instalada de 583 MW, com capacidade de abastecimento para 3,3 milhões de pessoas. O parque eólico Chuí contribui para este complexo com 144 MW de potência instalada a partir de 81 aerogeradores distribuídos em cerca de 67 km².

O principal motivo para este parque contar com uma rede coletora subterrânea é a proximidade com o litoral. Assim como ocorre no parque eólico Cerro Chato, a interligação dos aerogeradores é feita em corrente alternada (CA), com tensão operacional de 34,5 kV. Outro detalhe que é importante ressaltar é a diferença na organização dos aerogeradores.

Figura 24 – Característica de convergência do Algoritmo Competitivo Imperialista



Fonte: Elaborado pelo Autor

Enquanto as turbinas são dispostas de forma não ordenadas em Cerro Chato, no parque Chuí, percebe-se uma organização coerente, que respeita o distanciamento entre cada unidade geradora. O comprimento desenvolvido pelo cabeamento interconector instalado no sistema teste do caso 2 é de 50,29 km. A Figura 25 apresenta o layout atual do parque eólico Chuí.

4.2.1 Configuração de Parâmetros para o Algoritmo de Otimização de Vagalumes

Assim como ocorreu para o caso 1, os algoritmos também foram calibrados através do Matlab[®], onde foram realizadas diversas simulações para o sistema teste do segundo caso. Assim, objetivando adaptar as heurísticas de otimização ao novo problema e, dessa forma, realizando a calibragem de alguns parâmetros do algoritmo, como ocorreu no primeiro caso, para cada mudança, o algoritmo foi executado 10 vezes.

Para o FA, fixou-se o número de 2000 iterações, variando-se o número de vagalumes de 50 até 300, com passos de 10, sendo eleita a melhor configuração a que resultou na melhor resposta (menor comprimento), da mesma maneira que no primeiro caso. A Tabela 5 apresenta o melhor resultado para os testes de configuração dos parâmetros do FA para o parque Chuí.

Figura 25 – Esquemático da interconexão entre os geradores no parque Eólico Chuí



Fonte: Google Earth®

Tabela 5 – Parâmetros utilizados no FA para o caso 2

Parâmetro	População	α	β	λ
Valor	150	0,9	0,99	0,99

Fonte: Elaborado pelo Autor.

4.2.2 Configuração de Parâmetros para o Algoritmo de Otimização por Enxame de Partículas

Utilizando o mesmo sistema teste do caso 2, o algoritmo PSO também foi calibrado. Os passos seguidos foram idênticos ao FA, sendo fixado o número de iterações em 2000. O tamanho do enxame variou de 100 até 300 com passos de 10 e, para cada mudança, o algoritmo foi executado 10 vezes.

A Tabela 6 mostra os resultados que apresentaram melhor configuração para o sistema com o algoritmo PSO, sendo este também o menor comprimento total.

Tabela 6 – Parâmetros utilizados no PSO para o caso 2

Parâmetro	População	ω	$C1$	$C2$
Valor	150	0,5	0,97	1

Fonte: Elaborado pelo Autor.

4.2.3 Configuração de Parâmetros para o Algoritmo de Otimização Competitiva Imperialista

Para finalizar, o trabalho de calibragem do algoritmo ACI para o sistema teste do parque eólico Chuí foi feito seguindo os passos do primeiro caso, onde também foram fixadas 2000 iterações. A população foi variada de 150 a 750 indivíduos, com passos de 10, sendo que, para cada mudança, o algoritmo também foi executado 10 vezes. Desta maneira, a Tabela 7 sintetiza os parâmetros para o Algoritmo de Otimização Competitiva Imperialista, os quais foram verificados para a melhor resposta.

Tabela 7 – Parâmetros utilizados no ACI para o caso 2

Parâmetro	N_P	N_{imp}	λ	P_{Rev}
Valor	550	3	2	0,9

Fonte: Elaborado pelo Autor.

4.2.4 Resultados

Para fins de comparação com o resultado final da otimização, a Figura 26 apresenta o *layout* da configuração original do parque em questão. Na sequência, a Figura 27, mostra o *layout* sugerido para o cabeamento interconector segundo a otimização feita pelo FA.

Utilizando o FA, obteve-se o comprimento do condutor de conexão igual a 44,45 km, acarretando em uma redução de 11,6% em relação à topologia de conexão utilizada atualmente. Assim, a Figura ?? apresenta o gráfico da convergência da resposta, mostrando que esta converge após cerca de 800 iterações.

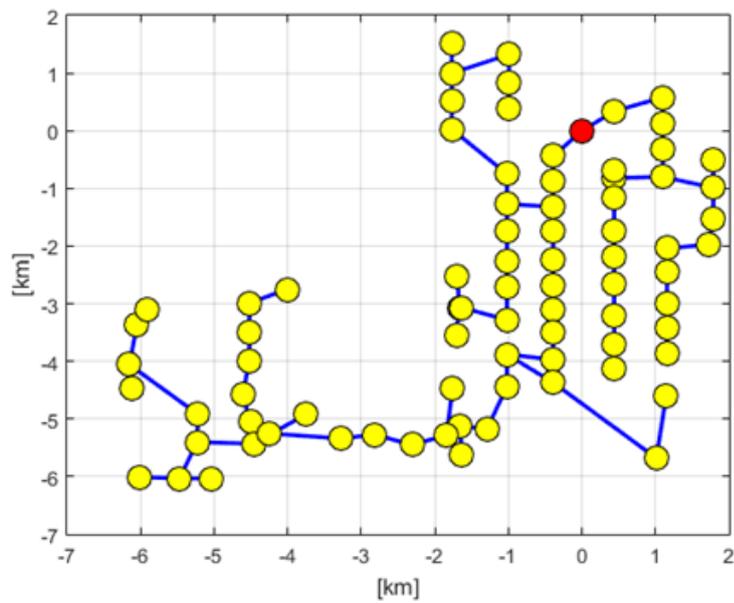
Comparando os dois casos simulados utilizando o FA, pode-se considerar que o resultado obtido através dessa técnica de otimização foi bem sucedido, apresentando uma redução considerável no comprimento do cabo no primeiro caso. Já para o caso 2, a redução não atingiu valores tão elevados quanto aqueles observados no caso 1, o que ocorre devido ao fato de que o atual *layout* do parque eólico Chuí está melhor projetado do que aquele visto para o parque Cerro Chato, mostrando que, em seu planejamento, houve uma real preocupação com a redução de custos e eficiência do sistema, diminuindo o comprimento empregado para o cabeamento interconector.

O algoritmo PSO apresentou uma melhora de apenas 3,17% na otimização da configuração atual do Parque eólico Chuí, reduzindo de 50,3 km para 48,7 km o comprimento total do cabeamento interconector. Tal configuração é demonstrada na Figura 29. Assim como foi demonstrado para todos os métodos no Caso 1, a Figura 30 apresenta a característica de convergência da do PSO para o Caso 2, mostrando que, para este caso, a resposta converge após 1900 iterações.

Figura 26 – Configuração Atual Complexo Eólico Chuí

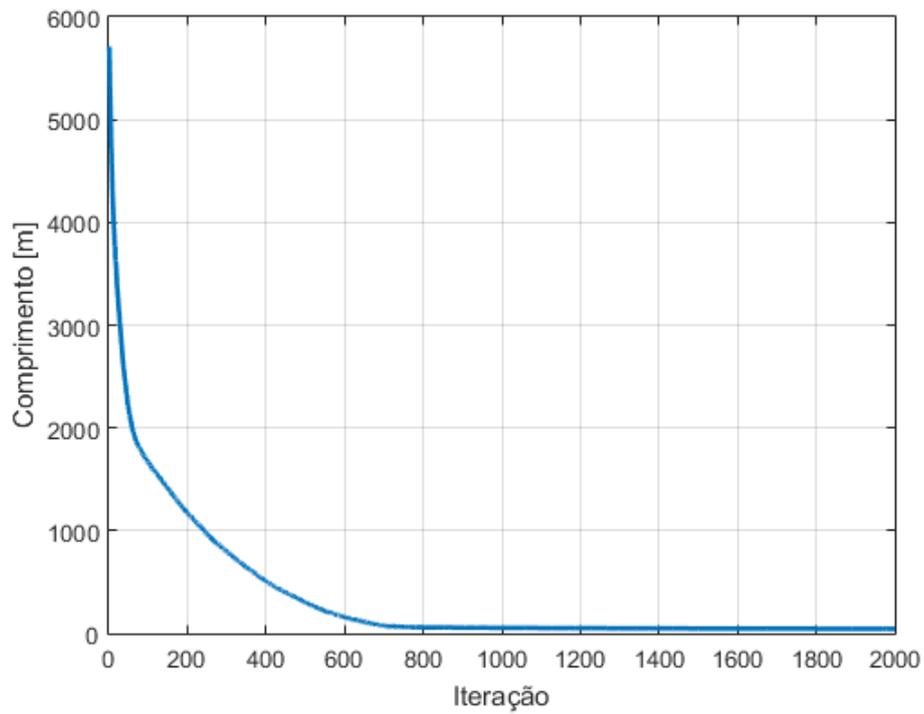


Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 27 – *Layout* otimizado com o Algoritmo Vagalume

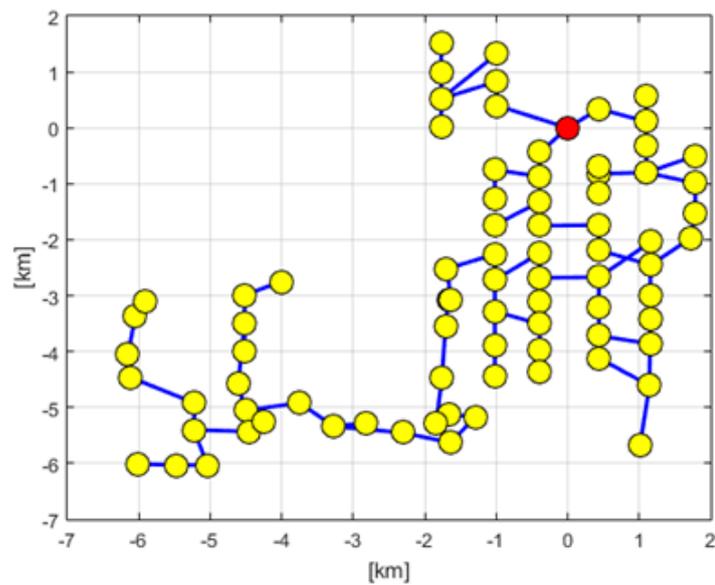
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 28 – Característica de convergência do Algoritmo Vagalume



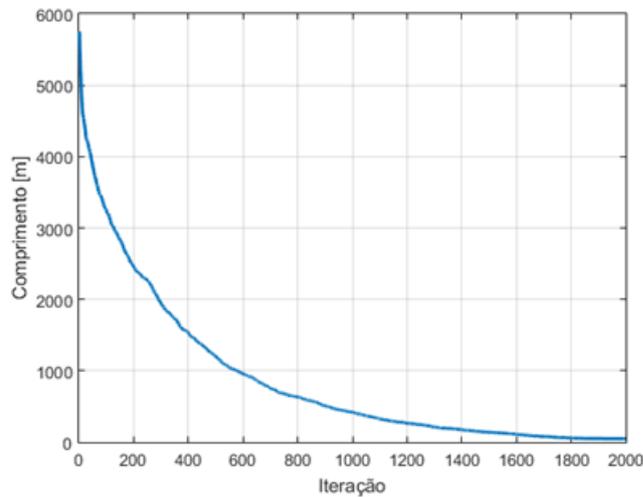
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 29 – Layout otimizado com o Algoritmo de Otimização por Enxame de Partículas



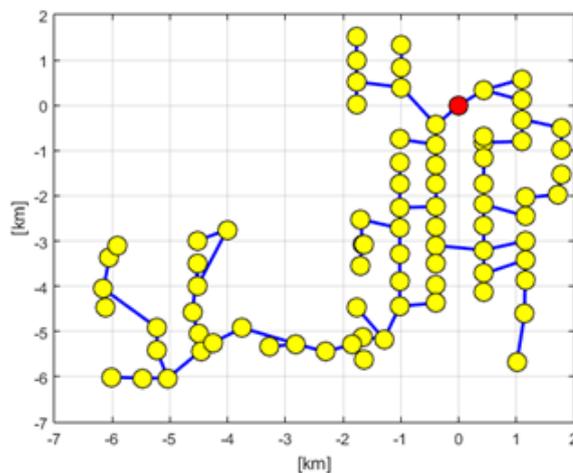
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 30 – Característica de convergência do Algoritmo de Otimização por Enxame de Partículas



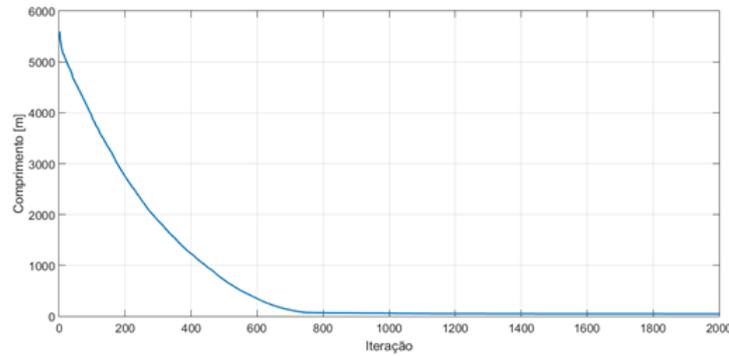
Fonte: Elaborado pelo Autor

O ACI, por sua vez, sugeriu o *layout* mostrado na Figura 31, apresentando um comprimento mínimo do condutor de conexão de 46,95 km, reduzindo em 6,65% o comprimento do layout atual, que é de 50,29 km. O resultado para este método de otimização, em relação a sua característica de convergência, pode ser observado na Figura 32, onde se verifica que o método não teria atingido sua convergência para o número de iterações estipuladas, mas que este iria convergir com mais iterações para um valor próximo ao atingido na última iteração realizada.

Figura 31 – *Layout* otimizado com o Algoritmo Competitivo Imperialista

Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 32 – Característica de convergência do Algoritmo Competitivo Imperialista



Fonte: Elaborado pelo Autor

4.2.5 Considerações Finais

A Tabela 8 mostra de maneira resumida o comprimento dos cabos para os 3 algoritmos implementados, bem como o custo de implantação do cabeamento, comparando-os com os comprimentos instalados em cada parque eólico. É válido ressaltar que os *layouts* aqui apresentados podem sofrer alteração caso sejam implementados na prática, uma vez que não foram considerados obstáculos entre os aerogeradores. Porém, mesmo não considerando tais fatores, é pouco provável que se tornem inviáveis os caminhos sugeridos pelos métodos de otimização aqui apresentados. Pela Tabela 8, pode-se observar que, para o caso 2, a redução no comprimento do cabo foi baixa, quando comparado com os resultados do caso 1. Porém, a economia gerada é o grande diferencial, por se tratar de um sistema que tem um custo de instalação muito maior. Por fim, a utilização dos algoritmos demonstraram ser uma ferramenta robusta e eficaz no que tange a reduzir custos e caminhos, tornando cada vez mais viável a utilização da energia eólica como fonte geradora de energia elétrica.

Tabela 8 – Resultados e custo de implantação dos cabeamentos sugeridos.

Usina	Alg.	Comp. do Cabo (km)		Valor R\$x1000		Redução	
		Real	Otimizado	Real	Otimizado	(%)	R\$x1000
Cerro Chato	FA		31,11		5772	25,92	2001
	PSO	42	33,75	7779	6251	19,65	1528
	ACI		38,2		7075	9,05	704
Chuí	FA		44,85		15000	11,61	1970
	PSO	50,29	48,7	16971	16435	3,17	537
	ACI		46,95		15844	6,65	1127

Todos os métodos foram eficientes quanto a otimização. Entretanto, destaca-se o

desempenho do FA, cuja resposta reduziu em, aproximadamente, $1/4$ o comprimento total atual, para o caso da Usina de Cerro Chato.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Conclusão

Neste Trabalho, é abordado um estudo sobre a otimização do cabeamento de interconexão entre os aerogeradores do Parque Eólico Cerro Chato e Parque Eólico Chuí. Para isso, foi proposto e implementado o modelo de árvore geradora mínima, sendo implementadas três metaheurísticas para sua solução: FA, PSO e ACI. As respostas obtidas foram comparadas com os *layouts* implantados nos parques.

Para que fosse possível a realização das otimizações do caminho percorrido pelo cabeamento, foram obtidos os pontos de instalação dos aerogeradores a partir de suas coordenadas geográficas. Também, foram obtidos os comprimentos reais dos cabeamentos nos parques. Assim, foi possível analisar, comparar e apresentar os resultados alcançados neste trabalho, tanto em termos da redução de comprimento, bem como em termos da redução de custo.

Com base nos testes, os três métodos apresentaram redução no comprimento do cabeamento de interconexão. Para o parque Cerro Chato, o FA se mostrou mais eficaz quando comparado aos métodos PSO e ACI, tendo uma redução de 25,92% no comprimento do cabo, reduzindo este de 42 km para 31,11 km, o que corresponde a uma economia de mais de R\$ 2.000.000,00 em relação ao custo do cabeamento atual. Já o PSO apresentou uma redução de 19,65% no comprimento do cabo, reduzindo-o para 33,75 km e gerando uma economia de R\$ 1.528.000,00. Por fim, a metodologia ACI obteve uma redução de 9,05% para o comprimento do cabeamento, correspondendo a um cabeamento final de 38,2 km, o que equivale a uma diferença de R\$ 704.000,00 em relação ao custo de implantação do *layout* atual.

Para o caso 2, as três metaheurísticas também apresentaram redução no comprimento do cabeamento, quando comparado ao atual. Porém estes resultados foram mais singelos, uma vez que tal parque foi melhor projetado. O FA também apresentou melhor desempenho neste caso, reduzindo o comprimento da rede coletora em 11,6%, ficando este em 44,45 km. Já o PSO apresentou o pior resultado, reduzindo apenas 3,17%, enquanto o ACI reduziu em 6,65% o comprimento do cabeamento. Vale ressaltar que, apesar de apresentar resultados relativamente baixos para o complexo eólico Chuí, quando estes valores são transformados em valores monetários, percebe-se que a economia gerada aplicando estes métodos é considerável, tendo em vista que a rede coletora do parque eólico Chuí é subterrânea e seus custos são representativos quando comparados com custos do cabeamento aéreo. Porém por se tratar de uma região litorânea, os custos da manutenção de uma rede aérea não são viáveis.

5.2 Trabalhos Futuros

Como sugestão para trabalhos futuros, citam-se: para a sequência desta dissertação:

- Associar a problema da árvore geradora mínima a outros métodos de otimização;
- Analisar o desempenho dessa metodologia aplicada a parques de porte maior do que o daqueles observados neste estudo;
- Usar tal metodologia para determinar a melhor alocação dos aerogeradores;
- Utilizar as heurísticas associadas a outras ferramentas para solução de problemas de caminho, como a técnica do caixeiro viajante, para fins de otimização dos cabamentos em parques eólicos.
- Calcular o diâmetro dos cabamentos a partir da corrente de cada trecho, otimizando ainda mais os custos do cabamento interconector dos parques eólicos; e
- Calcular o centro de cargas, a partir da potência de cada aerogerador, afim de encontrar o melhor local para a instalação da subestação coletora, visando diminuir custos com o diâmetro do cabamento.

5.3 Trabalhos Desenvolvidos

- **Optimization of Cabling Wind Turbine Interconnector in Onshore Wind Farms.** XIII Congresso Latino-Americano de Geração e Transmissão de Eletricidade (CLAGTEE), Santiago do Chile. 2019.

Situação: Apresentado e Publicado.

REFERÊNCIAS

- AHYJA, R. K.; ORLIN, J. B.; MAGNANTI, T. L. **Network flows: theory, algorithms, and applications**. [S.l.]: Prentice-Hall, 1993. Citado na página 41.
- ALMEIDA, A. T. P. d.; SILVA, M. M. d. **Desenvolvimento e montagem de um gerador eólico com pás compósitas**. 84 p. Monografia (Graduação) — Universidade de Brasília, Brasília,DF, 2011. Citado na página 35.
- ALMEIDA, T. A.; YAMAKAMI, A.; TAKAHASHI, M. T. Sistema imunológico artificial para resolver o problema da árvore geradora mínima com parâmetros fuzzy. **Pesquisa Operacional**, SciELO Brasil, v. 27, n. 1, p. 131–154, 2007. Disponível em: https://bdm.unb.br/bitstream/10483/2903/1/2011_MicaelSilva_AntenordeAlmeida.pdf. Acesso em: 10 setembro de 2018. Citado na página 41.
- AMBIENTAIS, L. **Nordeste Gera 85% da Energia Eólica do Brasil**. 2020. Disponível em: <https://letrasambientais.org.br/posts/nordeste-gera-85-da-energia-eolica-do-brasil>. Acesso em: 01 jun. 2020. Citado na página 26.
- ATASHPAZ-GARGARI, E.; LUCAS, C. Imperialist competitive algorithm: an algorithm for optimization inspired by imperialistic competition. In: **2007 IEEE Congress on Evolutionary Computation**. [S.l.]: IEEE, 2007. p. 4661–4667. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4425083?tp&arnumber=4425083>. Acesso em: 05 fev. 2020. Citado 2 vezes nas páginas 49 e 52.
- BRASIL, A. N. E. E. L. **Atlas da Energia Elétrica / Agência Nacional de Energia Elétrica**. Brasília: ANEEL, 2010. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/Atlas/download.ht>. Acesso em: 01 ago. 2018. Citado na página 34.
- BRAZ, H. D. et al. Planejamento da rede coletora de um parque de geração eólica usando algoritmos genéticos. **Anais do SPTEE**, 2006. Disponível em: <https://www.xxvsnp tee.com.br/acervo-tecnico/>. Acesso em: 06 fev. 2020. Citado na página 27.
- CHUNDE, Y. On the optimization problem of spanning tree in fuzzy network. **The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications**, v. 3, n. 2, 1996. Citado na página 41.
- CONBOTASSUCIAS. **Parque Eólico de Horns Ver**. 2013. Disponível em: <https://conbotassucias.wordpress.com/2013/04/10/parque-eolico-de-horns-rev>. Acesso em: 10 jan. 2019. Citado 2 vezes nas páginas 37 e 38.
- DUTRA, R. Energia eólica: Princípios e tecnologia. **Rio de Janeiro: Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Britto**, 2008. Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial_eolica_2008_e-book.pdf. Acesso em: 21 out. 2019. Citado na página 25.
- EBERHART, R. C.; SHI, Y.; KENNEDY, J. **Swarm intelligence**. [S.l.]: Elsevier, 2001. Citado na página 49.

- ELÉTRICA-CEPEL, C. de Pesquisas de E. **Brasileiro, Atlas do Potencial Eólico**. Brasília, 2001. Disponível em: encurtador.com.br/gyIU9. Acesso em: 04 ago. 2018. Citado na página 36.
- ELÉTRICA-CEPEL, C. de Pesquisas de E. **Tutorial de Energia Eólica**. Brasília, 2008. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/content.php?cid=201>. Acesso em: 09 maio 2019. Citado na página 31.
- FARIAS, B.; COUTO, T. G. d. Posicionamento de aerogeradores em parque eólico utilizando algoritmo genético. **UNB - Universidade de Brasília**, 2013. Disponível em: <https://www.bdm.unb.br/handle/10483/4850>. Acesso em: 21 out. 2019. Citado na página 26.
- FRANÇA, F. O. d. **Algoritmos bio-inspirados aplicados à otimização dinâmica**. 140 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Campinas - Unicamp, Campinas - SP, 2005. Citado na página 43.
- GONZALEZ-LONGATT, F. M. Optimal offshore wind farms collector design based on the multiple travelling salesman problem and genetic algorithm. In: IEEE. **2013 IEEE Grenoble Conference**. [S.l.]: IEEE, 2013. p. 1–6. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6652234>. Acesso em: 05 jun. 2019. Citado na página 28.
- HO, J.-M. et al. Minimum diameter spanning trees and related problems. **SIAM Journal on Computing**, v. 20, n. 5, p. 987–997, 1991. Disponível em: encurtador.com.br/bcDXZ. Acesso em: 21 out. 2019. Citado na página 41.
- IRENA. **Future of Wind**. [S.l.], 2019. 88 p. Disponível em: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Oct/IRENA_Future_of_wind_2019.pdf. Acesso em: 20 jul. 2020. Citado na página 26.
- JENKINS, A.; SCUTARIU, M.; SMITH, K. Offshore wind farm inter-array cable layout. In: IEEE. **2013 IEEE Grenoble Conference**. [S.l.]: IEEE, 2013. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6652477>. Acesso em: 05 jun. 2019. Citado na página 28.
- KAVEH, A.; TALATAHARI, S. A novel heuristic optimization method: charged system search. **Acta Mechanica**, v. 213, n. 3-4, p. 267–289, 2010. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6652477>. Acesso em: 21 set. 2019. Citado na página 43.
- KAWABATA, D. M. T. **Avaliação de custos para implantação de redes coletoras de energia para centrais eólicas**. 68 p. — UTFPR - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2018. Disponível em: http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/15448/1/CT_CEER_IV_2018_02.pdf. Acesso em: 29 jun. 2020. Citado na página 53.
- LINGLING, H.; YANG, F.; XIAOMING, G. Optimization of electrical connection scheme for large offshore wind farm with genetic algorithm. In: IEEE. **2009 International Conference on Sustainable Power Generation and Supply**. [S.l.]: IEEE, 2009. p. 1–4. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5348118>. Acesso em: 12 jun. 2020. Citado na página 27.

MOHANTY, D. K. Gravitational search algorithm for economic optimization design of a shell and tube heat exchanger. **Elsevier**, v. 107, n. 3-4, p. 184–193, 2016. Disponível em: encurtador.com.br/cefgI. Acesso em: 26 set. 2019. Citado na página 47.

MOSKALENKO, N.; RUDION, K.; ORTHS, A. Study of wake effects for offshore wind farm planning. In: IEEE. **2010 Modern Electric Power Systems**. [S.l.]: IEEE, 2010. p. 1–7. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6007187>. Acesso em: 02 jul. 2020. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 35.

NANDIGAM, M.; DHALI, S. K. Optimal design of an offshore wind farm layout. In: IEEE. **2008 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion**. [S.l.]: IEEE, 2008. p. 1470–1474. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4581308>. Acesso em: 27 jul. 2019. Citado na página 27.

OLIVEIRA, K. L. M. d. **Otimização da Rede Coletora de Média Tensão de Parques Eólicos Utilizando um Algoritmo Genético Modificado**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Juiz de Fora, Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Juiz de Fora-MG, 2016. Citado na página 28.

PAVINATTO, E. F. **Ferramenta para auxílio à análise de viabilidade técnica da conexão de parques eólicos à rede elétrica**. Dissertação (Mestrado), 2005. Citado na página 33.

PINTO, M. d. O. et al. **Fundamentos de energia eólica**. 1. ed. Rio de Janeiro - RJ: LTC, 2013. 392 p. Citado na página 25.

RAO, S. S. **Engineering optimization: theory and practice**. Indiana: John Wiley & Sons, 2006. 903 p. Citado na página 48.

RESE, A. L. R. et al. Algoritmos da árvore geradora mínima para reconfiguração de redes de distribuição de energia elétrica. **Anais do Computer on the Beach**, p. 416–425, 2017. Disponível em: <https://siaiap32.univali.br/seer/index.php/acotb/article/view/10583>. Acesso em: 20 jan. 2020. Citado na página 29.

RIBEIRO, L. A. D. **Otimização estrutural de treliças utilizando o algoritmo firefly**. 114 p. — UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina, 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/127383>. Acesso em: 22 jun. 2019. Citado na página 47.

SALINO, P. J. **Energia eólica no Brasil: uma comparação do PROINFA e dos novos leilões**. 114 p. — UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Fevereiro 2011. Disponível em: <http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10001705.pdf>. Acesso em: 22 ago. 2019. Citado na página 31.

SECCO, G. P. **Procedimento para estudo de coordenação das proteções elétricas em centrais de geração eólica**. Dissertação (Mestrado) — Escola Politécnica de São Paulo, São Paulo, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 37 e 40.

SRIKAKULAPU, R.; VINATHA, U. Optimized design of collector topology for offshore wind farm based on ant colony optimization with multiple travelling salesman problem.

Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, SGEPRI, v. 6, n. 6, p. 1181–1192, 2017. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9026394>. Acesso em: 26 fev. 2020. Citado na página 29.

TÉCNICAS, A. B. de N. **NBR 14039: Instalações Elétricas de Média Tensão de 1,0 a 36,2 kV**. [S.l.], 2005. Disponível em: <https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=1099>. Acesso em: 15 nov. 2019. Citado na página 39.

TÉCNICAS, A. B. de N. **NBR NM 280:2011: Condutores de Cabos Isolados**. [S.l.], 2011. Disponível em: <https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=86665>. Acesso em: 10 nov. 2019. Citado na página 39.

VOADEN, G. The simith-putnam wind turbine—a step forward in aero-electric power research. **Turbine Topics**, v. 1, n. 3, p. 34–42, 1943. Citado na página 31.

WU, Y.-K. et al. Optimization of the wind turbine layout and transmission system planning for a large-scale offshore windfarm by ai technology. **IEEE Transactions on Industry Applications**, IEEE, v. 50, n. 3, p. 2071–2080, 2013. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6607158>. Acesso em: 04 mar. 2020. Citado na página 28.

YAN, J. **Handbook of Clean Energy Systems, 6 Volume Set**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2015. v. 5. Citado na página 38.

YANG, X.-S. **Nature-inspired metaheuristic algorithms**. [S.l.]: Luniver press, 2010. Citado 4 vezes nas páginas 43, 44, 45 e 47.

YANG, X.-S.; DEB, S. Cuckoo search via lévy flights. In: **2009 World congress on nature & biologically inspired computing (NaBIC)**. [S.l.]: IEEE, 2009. p. 210–214. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5393690>. Acesso em: 15 fev. 2020. Citado na página 44.

ZHOU, G.-D. et al. Energy-aware wireless sensor placement in structural health monitoring using hybrid discrete firefly algorithm. **Structural Control and Health Monitoring**, Wiley Online Library, v. 22, n. 4, p. 648–666, 2015. Disponível em: onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/stc.1711. Acesso em: 29 mai. 2019. Citado na página 45.

ÍNDICE

AC, 25
ACI, 26
AGM, 30

E, 41

FA, 26

G, 41
GW, 26

kV, 28

MT, 32
MW, 28

PSO, 26
PVC, 39

SIN, 25

V, 41