

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

Faculdade de Engenharia Mecânica

PEDRO LUCAS SANCHES FONSECA SILVA

## Otimização do posicionamento de turbinas eólicas considerando restrição de ruído sonoro

Campinas

2023

# Otimização do posicionamento de turbinas eólicas considerando restrição de ruído sonoro

Dissertação de Mestrado Acadêmico apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, na Área de Mecânica dos Sólidos e Projeto Mecânico

Orientador: Prof. Dr. Alberto Luiz Serpa

ESTE TRABALHO CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO DEFEN-DIDA PELO ALUNO PEDRO LUCAS SANCHES FONSECA SILVA, E ORIEN-TADA PELO PROF. DR. ALBERTO LUIZ SERPA.

Campinas 2023

#### Ficha catalográfica Universidade Estadual de Campinas Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

Silva, Pedro Lucas Sanches Fonseca, 1996 Otimização do posicionamento de turbinas eólicas considerando restrição de ruído sonoro / Pedro Lucas Sanches Fonseca Silva. – Campinas, SP : [s.n.], 2023.
 Orientador: Alberto Luiz Serpa.
 Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Eaculdade

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

Energia eólica. 2. Otimização. 3. Algoritmo genético. 4. Impacto ambiental.
 Ruído. I. Serpa, Alberto Luiz, 1967-. II. Universidade Estadual de Campinas.
 Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

#### Informações Complementares

Título em outro idioma: Wind farm layout optimization considering noise constraint Palavras-chave em inglês: Wind energy Optimization Genetic algorithm noise propagation Environmental impact Noise Área de concentração: Mecânica dos Sólidos e Projeto Mecânico Titulação: Mestre em Engenharia Mecânica Banca examinadora: Alberto Luiz Serpa [Orientador] Eliane Aparecida Faria Amaral Fadigas Hélio Fiori de Castro Data de defesa: 21-11-2023 Programa de Pós-Graduação: Engenharia Mecânica

Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a) - ORCID do autor: https://orcid.org/0000-0001-9999-8357

- ORCID do autor: https://orcid.org/0000-0001-9999-8357 - Currículo Lattes do autor: http://lattes.cnpq.br/3938261779893414

## UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO

## Otimização do posicionamento de turbinas eólicas considerando restrição de ruído sonoro

Autor: Pedro Lucas Sanches Fonseca Silva Orientador: Prof. Dr. Alberto Luiz Serpa

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação de Mestrado Acadêmico:

Prof. Dr. Alberto Luiz Serpa Faculdade de Engenharia Mecânica - UNICAMP

Prof. Dra. Eliane Aparecida Faria Amaral Fadigas Escola Politécnica - USP

Prof. Dr. Helio Fiori de Castro Faculdade de Engenharia Mecânica - UNICAMP

A Ata de Defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no SIGA/Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese e na Secretaria do Programa da Unidade.

Campinas, 21 de novembro de 2023

### DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha amada avó, Maria das Dores Araujo Silva (in memoriam), por sempre ser luz em minha vida.

#### AGRADECIMENTOS

Acima de tudo, agradeço a Deus pelo dom da vida, pela coragem e sabedoria, pelas conquistas e lições, por estar sempre ao meu lado e pelas inspirações em abundância.

Agradeço com muita ternura a toda minha família, por nunca me deixarem desanimar. Em especial, aos meus pais, Claudio Araujo Silva e Francisca Maria Sanches Fonseca Silva, por todo amor e dedicação. Obrigado por estarem sempre comigo.

À minha esposa, Jennifer Slayder, pelo amor, pelo companheirismo, pela cumplicidade e por dividir comigo todas as alegrias e angústias desta caminhada.

Ao meu orientador, Dr. Alberto Luiz Serpa, pela inspiração, pelo auxílio constante e, sobretudo, pela paciência e confiança.

À Faculdade de Engenharia Mecânica – FEM/UNICAMP pela oportunidade de realização deste trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ), processo nº 144560/2019-4, pelo apoio financeiro.

Agradeço a todas as pessoas que contribuíram direta ou indiretamente para o desenvolvimento deste trabalho.

#### **RESUMO**

A otimização do posicionamento de turbinas eólicas é um problema complexo que consiste em definir o melhor rearranjo de aerogeradores em um parque eólico, visando o aumento do rendimento de energia produzida. Geralmente, a produção de energia e os custos de investimento são os principais objetivos deste problema. No entanto, as turbinas eólicas causam alguns impactos ambientais que devem ser levados em consideração. Um desses impactos ambientais é o ruído sonoro gerado, que é responsável por incômodos e distúrbios do sono em áreas residenciais.

Este estudo traz uma abordagem do problema de otimização do posicionamento de turbinas eólicas considerando a propagação de ruído e a produção de energia. Diferentes cenários são analisados e testados, respeitando as restrições básicas impostas de perímetro e distância entre as turbinas, perdas por efeito esteira e restrições quanto ao nível de pressão sonora produzido pelo parque. Para este trabalho, a otimização foi feita por meio de Algoritmo Genético, devido sua capacidade em encontrar boas soluções em grandes espaços de busca, melhorando o desempenho das avaliações em relação às trocas entre o nível de pressão sonora e a produção de energia.

Primeiramente, foi realizada a otimização sem restrição de ruído para uma configuração de posições iniciais aleatórias. A produção de energia apresentou um ganho de 2,77% em relação às configurações não otimizadas, porém, o ruído sonoro calculado excedeu o limite máximo previsto pela NBR 10151 em todas as simulações. Em seguida, o mesmo cenário foi otimizado, considerando limitações no nível de ruído sonoro gerado pelo parque eólico em diferentes situações. Nesse cenário, a produção de energia aumentou em 2,35% e os níveis de pressão sonora limitaram-se a valores inferiores a 45 dB(A).

De acordo com os resultados, este processo de otimização é capaz de encontrar soluções razoáveis para maximizar o rendimento energético e prevenir impactos ambientais atrelados ao excesso de ruído sonoro gerado nos parques eólicos.

**Palavras–chave**: energia eólica, otimização, algoritmo genético, propagação de ruído, impactos ambientais.

#### ABSTRACT

Wind farm layout optimization consists of setting the best position of the wind turbines to increase the wind farm yield. Usually, power production and investment costs are the main objectives of this problem. However, wind turbines cause some environmental impacts that should be taken into account. One of these environmental issues is noise, which is responsible for annoyance and sleeps disturbance in residential areas.

This study aims to address the layout optimization considering noise propagation and energy production. Several scenarios are analyzed concerning the distance among turbines, wake effect, and sound pressure level constraints.

The genetic algorithm is adopted for better performance due to its good results in finding a solution in large search spaces. Firstly, we performed the optimization without noise constraint for a random initial layout. The energy output increased by 2.77% compared to the unoptimized layout, but the sound pressure level exceeded the threshold for all scenarios. Then, the same layout was optimized considering conditions to reduce the noise level. For this scenario, energy production increased by 2.35% and sound pressure levels were limited to values below 45 dB(A).

According to the results, this optimization process is capable of finding reasonable solutions to maximize energy yield and avoid environmental impacts due to the noise of wind farms.

**Keywords**: wind energy, layout optimization, genetic algorithm, noise propagation, environmental impact.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 – Capacidade eólica anual adicionada (GW) - 2017 a 2021 (GWEC, 2022).	18
Figura 1.2 – Capacidade eólica adicionada em 2021 (GW) (GWEC, 2022)	18
Figura 1.3 – Componentes de um aerogerador.	19
Figura 1.4 – Otimização do posicionamento das turbinas eólicas nas coordenadas	
$x \in y$ do espaço do parque eólico	20
Figura 1.5 – Ilustração do ruído sonoro gerado por um parque eólico	21
Figura 2.1 – Efeito esteira em parque eólico <i>offshore</i> (Hasager <i>et al.</i> , 2013)	26
Figura 2.2 – Ilustração para formulação do Modelo de esteira de Jensen	27
Figura 2.3 – Propagação esférica de ruído sonoro.	29
Figura 2.4 – Regiões para determinação das atenuações de solo (ISO, 2019)	34
Figura 2.5 – Determinação da altura média, $h_m$ (ISO, 1996).	36
Figura 3.1 – Rotação das coordenadas (x e y: euclidianas; x' e y': downwind-	
crosswuind)	42
Figura 3.2 – Exemplo de troca individual de genes em cruzamento uniforme	48
Figura 3.3 – Etapas da rotina de otimização.	49
Figura 4.1 – Curva de potência (azul) e coeficiente de arrasto (laranja)	51
Figura 4.2 – Rosa dos ventos - com distribuição da direção e velocidade de vento.	52
Figura 4.3 – Mapa de contorno e distribuição de Weibull do regime de ventos	53
Figura 5.1 – Cenários com posicionamentos uniformes não otimizados.	57
Figura 5.2 – Otimização do posicionamento com 16 aerogeradores - sem restrição	
de ruído sonoro.	58
Figura 5.3 – Processo de otimização para 16 aerogeradores - sem restrição de ruído	
sonoro	59
Figura 5.4 – Nível de pressão sonora para 16 aerogeradores - sem restrição de ruído	
sonoro	59
Figura 5.5 – Otimização do posicionamento com 20 aerogeradores - sem restrição	
de ruído sonoro.	60
Figura 5.6 – Processo de otimização para 20 aerogeradores - sem restrição de ruído	
sonoro	61

Figura 5.7 – Nível de pressão sonora para 20 aerogeradores - sem restrição de ruído sonoro.
Figura 5.8 – Otimização do posicionamento com 36 aerogeradores - sem restrição de ruído sonoro.
Figura 5.9 – Processo de otimização para 36 aerogeradores - sem restrição de ruído sonoro.
Figura 5.10–Nível de pressão sonora para 36 aerogeradores - sem restrição de ruído sonoro.
Figura 5.11–Otimização de Posicionamento com 16 aerogeradores - com restrição de ruído sonoro.
Figura 5.12–Processo de otimização com 16 aerogeradores - com restrição de ruído sonoro.
Figura 5.13–Nível de pressão sonora para 16 aerogeradores - com restrição de ruído sonoro.
Figura 5.14–Otimização de posicionamento com 20 aerogeradores - com restrição de ruído sonoro.
Figura 5.15–Processo de otimização para 20 aerogeradores - com restrição de ruído sonoro.
Figura 5.16–Nível de pressão sonora para 20 aerogeradores - com restrição de ruído sonoro.
Figura 5.17–Otimização de posicionamento com 20 aerogeradores e 1 ponto de observação fora do perímetro do parque.
Figura 5.18–Processo de otimização para 20 aerogeradores com 1 ponto de obser- vação fora do perímetro do parque
Figura 5.19–Nível de pressão sonora para 20 aerogeradores com 1 ponto de obser- vação fora do perímetro do parque
Figura 5.20–Otimização de posicionamento com 20 aerogeradores e 4 pontos de observação fora do perímetro do parque
Figura 5.21–Processo de otimização para 20 aerogeradores com 4 pontos de obser- vação fora do perímetro do parque.
Figura 5.22–Nível de pressão sonora para 20 aerogeradores com 4 pontos de obser- vação fora do perímetro do parque.

### LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Coeficiente de atenuação atmosférica.    .	33
Tabela 2.2 – Expressões matemáticas utilizadas na atenuação do solo em bandas de	
oitavas	35
Tabela 3.1 – Tabulação das alocações de vento.	41
Tabela 3.2 – Coeficientes da ponderação em A.    .	44
Tabela 4.1 – Características das turbinas eólicas.       .	51
Tabela 4.2 – Limites dos níveis de pressão sonora pela NBR 10151 (ABNT, 2000).	53
Tabela 5.1 – Cenários simulados para turbinas distribuídas uniformemente	58
Tabela 5.2 – Cenário de otimização sem restrição de ruído sonoro.	64
Tabela 5.3 – Comparação dos posicionamentos uniformes com a otimização	64
Tabela 5.4 – Cenário de otimização com restrição de ruído sonoro e um ponto de	
observação dentro do perímetro do parque	69
Tabela 5.5 – Cenário de otimização com restrição de ruído sonoro e 1 ponto de	
observação fora do perímetro do parque.	74
Tabela 5.6 – Cenário de otimização com restrição de ruído sonoro e 4 pontos de	
observação fora do perímetro do parque.	74

### LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas ABNT AEP Annual Energy Production Faculdade de Engenharia Mecânica FEM GWEC Global Wind Energy Council ISO International Organization for Standardization NBR Norma Técnica Brasileira NPS Nível de Pressão Sonora NSGA Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm PAE Produção Anual de Energia PSO Particle Swarm Optimization UNICAMP Universidade Estadual de Campinas

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A_{atm}$	Atenuação por absorção atmosférica
$A_{bar}$	Atenuação devido a barreiras acústicas
$A_{div}$	Atenuação por divergência geométrica
$A_f$	Ponderação na escala A
AG	Algoritmo Genético
$A_{gr}$	Atenuação devido ao tipo de solo
$A_m$	Atenuações do solo em regiões intermediárias
$A_{misc}$	Atenuação por fatores miscelâneos
$A_r$	Atenuações do solo próximas ao receptor
$A_s$	Atenuações do solo próximas à fonte
$C_{met}$	Correções meteorológicas
$C_t$	Coeficiente de empuxo
d	Distância entre fonte e receptor
D	Diâmetro do rotor
$D_c$	Coeficiente de Diretividade
$d_{min}$	Distância mínima entre os aerogeradores
$D_{\Omega}$	Correção de diretividade
F	Somatório infinitesimal de pequenas áreas
g	Número de gerações iniciais
G	Fator de propriedade acústica do solo
$G_{ev}$	Número de gerações evolutivas

h	Altura do aerogerador
$h_m$	Altura média da propagação
$H_r$	Altura do receptor
$H_s$	Altura da fonte
Ι	Intensidade de propagação de onda
j	Índices das frequências de bandas de oitava
$k_w$	Coeficiente de decaimento
$L_{AT}$	Nível de pressão sonora ponderado na escala A
$L_{ft}$	Nível de pressão sonora contínuo
$L_p$	Nível de pressão sonora
$L_w$	Potência entre a fonte e o receptor
n	Número de turbinas eólicas a montante
$n_i$	Número de contribuições i (fontes e caminhos)
$p_j$	Probabilidade de ocorrência das alocações de vento
$P_j$	Energia produzida por cada alocação de vento
R	Coeficiente de relação entre pares de cromossomos
$Ruído_{max}$	Máximo ruído sonoro permitido
V	Déficit de velocidade devido ao efeito esteira
$V_{eft}$	Velocidade efetiva de vento
$v_w$	Velocidades de vento discretizadas
x	Distância do ponto atrás da turbina de referência
$z_0$	Rugosidade média do terreno
α	Coeficiente de atenuação atmosférica
heta	Direções de vento discretizadas
	$h$ $h_m$ $H_r$ $H_s$ $I$ $J$ $k_w$ $L_{AT}$ $L_{ft}$ $L_p$ $L_w$ $n$ $n_i$ $p_j$ $P_j$ $R$ $Ruído_max$ $V$ $V_{eft}$ $v_w$ $x$ $z_0$ $\alpha$ $\theta$

## SUMÁRIO

1	Intr	odução	• • • • •		17		
	1.1	Revisã	io Bibliogr	áfica	21		
	1.2	Motiva	ação		24		
	1.3	Objeti	vos		25		
	1.4	Organi	ização do '	Trabalho	25		
2	Fun	dament	tação Teói	rica	26		
	2.1	Model	o de Efeito	o Esteira	26		
		2.1.1	Modelo d	de Jensen	27		
		2.1.2	Combina	ção de esteira	28		
	2.2	Model	o de Ruído	o Sonoro	29		
		2.2.1	Método d	de cálculo	31		
		2.2.2	Fatores d	le atenuações sonoras	32		
			2.2.2.1	Divergência geométrica - $A_{div}$	32		
			2.2.2.2	Absorção atmosférica - $A_{atm}$	33		
			2.2.2.3	Efeito do Solo - $A_{gr}$	33		
			2.2.2.4	Efeito do solo – método alternativo	36		
			2.2.2.5	Barreiras acústicas /Screening – $A_{bar}$	37		
			2.2.2.6	Condições meteorológicas – $C_{met}$	37		
3	Metodologia						
	3.1	Hipóte	eses iniciai	s e características físicas	39		
	3.2	Algori	tmo de En	ergia	40		
	3.3	Algori	tmo de Ru	ído Sonoro	43		
	3.4	Algori	tmo Genéi	tico	44		
		3.4.1	Contextu	alização	44		
		3.4.2	Esquema	s de codificação	46		
			3.4.2.1	Codificação binária	46		
			3.4.2.2	Codificação real	47		
		3.4.3	Estrutura	ção do algoritmo	47		
4	Test	es de O	timização		50		

<b>Resu</b> 5.1 5.2	4.1.1 4.1.2 Iltados Posicio Resulta 5.2.1	Base de dados	50 52 53 54 54 56 56
<b>Resu</b> 5.1 5.2	4.1.2 Iltados Posicio Resulta 5.2.1	Casos simulados	<ul> <li>52</li> <li>53</li> <li>54</li> <li>54</li> <li>56</li> <li>56</li> </ul>
<b>Resu</b> 5.1 5.2	<b>iltados</b> Posicio Resulta 5.2.1	4.1.2.1       Fase 1	<ul> <li>53</li> <li>54</li> <li>54</li> <li>56</li> <li>56</li> </ul>
<b>Resu</b> 5.1 5.2	<b>iltados</b> Posicio Resulta 5.2.1	4.1.2.2       Fase 2	54 54 <b>56</b> 56
<b>Resu</b> 5.1 5.2	<b>iltados</b> Posicio Resulta 5.2.1	4.1.2.3    Fase 3	54 <b>56</b> 56
<b>Resu</b> 5.1 5.2	<b>Iltados</b> Posicio Resulta 5.2.1	onamentos uniformes não otimizados	<b>56</b> 56
5.1 5.2	Posicio Resulta 5.2.1	onamentos uniformes não otimizados	56
5.2	Resulta 5.2.1	ados da Fase 1	
	5.2.1		58
		Otimização sem restrição de ruído sonoro para 16 aerogeradores .	58
	5.2.2	Otimização sem restrição de ruído sonoro para 20 aerogeradores .	60
	5.2.3	Otimização sem restrição de ruído sonoro para 36 aerogeradores .	62
	5.2.4	Compilação dos resultados para a Fase 1	64
5.3	Resulta	ados da Fase 2	65
	5.3.1	Otimização com restrição de ruído sonoro para 16 aerogeradores .	65
	5.3.2	Otimização com restrição de ruído sonoro para 20 aerogeradores .	67
	5.3.3	Compilação dos resultados para a Fase 2	69
5.4	Resulta	ados da Fase 3	69
	5.4.1	Otimização restrita - 1 ponto de observação fora do perímetro do	
		parque	69
	5.4.2	Otimização restrita - 4 pontos de observação fora do perímetro do	
		parque	72
	5.4.3	Compilação dos resultados para a Fase 3	74
Con	clusões	e Trabalhos Futuros	75
ferên	cias		77
PÊND	ICE A	Códigos em linguagem Python	81
A.1	Rotina	de otimização com algoritmo genético	81
	Rotina	para registro dos níveis de pressão sonora	01
	5.3 5.4 Con ferên PÊND A.1	5.2.3 5.2.4 5.3 Resulta 5.3.1 5.3.2 5.3.3 5.4 Resulta 5.4.1 5.4.2 5.4.2 5.4.3 Conclusões ferências PÊNDICE A A.1 Rotina	<ul> <li>5.2.3 Otimização sem restrição de ruido sonoro para 36 aerogeradores .</li> <li>5.2.4 Compilação dos resultados para a Fase 1</li></ul>

### 1 INTRODUÇÃO

A atual crise energética global reafirma cada vez mais os perigos da dependência de combustíveis fósseis como fonte de energia. A recente invasão Russa ao território Ucraniano deixou países inteiros na condição de reféns do fornecimento de energia, usado como principal ferramenta para atingir objetivos geopolíticos. O ano de 2021 apresentou uma alta histórica nas emissões globais de  $CO_2$ , colocando em cheque os objetivos de redução das emissões de gases do efeito estufa até 2050, *net zero carbon*, e até mesmo as metas estabelecidas no Acordo de Paris (GWEC, 2022).

Dessa forma, a única solução permanente para os problemas relacionados à segurança energética, mudanças climáticas e acessibilidade é um esforço conjunto e determinado para realizar a transição energética de forma célere, descontinuando o uso de combustíveis fósseis e priorizando energias renováveis.

Na contramão da alta nas emissões de  $CO_2$ , a instalação de parques eólicos cresceu de forma significativa na última década. Em um contexto global, a produção de energia elétrica através das correntes de vento atingiu 837 GW de capacidade total instalada no final de 2021. Segundo dados do *Global Wind Energy Council* (GWEC, 2022), esse número representa um aumento de 12,4% em relação a 2020, porém, apresenta uma queda de 1,8%, comparado ao mesmo ano, no que se refere a adição de novas unidades de geração eólica, como mostrado na figura 1.1.

Mesmo em face do segundo ano de pandemia da Covid-19, o mercado de energia eólica teve seu segundo melhor ano de produção, quase 94 GW de capacidade produtiva foram adicionados à matriz eólica mundial. Esse aumento deve-se principalmente ao crescimento explosivo dos maiores mercados eólicos mundiais, China e Estados Unidos, nos últimos dois anos, apontando para uma indústria eólica resiliente e ascendente. O Brasil divide a terceira posição com o Vietnã, contribuindo, cada um, com 4% da capacidade total instalada em 2021 (figura 1.2).

A configuração de um parque eólico se dá por aerogeradores, grandes estruturas (rotor variando de 40 a 50 m de raio) responsáveis por todo o processo de conversão de energia (figura 1.3). Normalmente, um parque comercial dispõe de alguns quilômetros de locação, podendo receber de 10 a 100 aerogeradores instalados (Manwell *et al.*, 2009).



Figura 1.1 – Capacidade eólica anual adicionada (GW) - 2017 a 2021 (GWEC, 2022).

Sob tais circunstâncias, a proximidade entre essas estruturas causa interações aerodinâmicas que afetam seus desempenhos. Logo, a maneira na qual os aerogeradores estão dispostos no espaço causa impacto direto na eficiência do parque eólico (Zhang, 2013).



Figura 1.2 – Capacidade eólica adicionada em 2021 (GW) (GWEC, 2022).

A otimização do posicionamento de turbinas eólicas consiste em redefinir a posição dos aerogeradores de tal forma que esta maximize os níveis de produção de energia (figura 1.4). Inicialmente, para os primeiros parques instalados, este problema foi resolvido através de formulações muito simples que resultavam em configurações retilíneas, onde os aerogeradores eram organizados em linhas idênticas e espaçados de forma conveniente. No entanto, com a aplicação de metodologias de otimização para o tratamento



Figura 1.3 – Componentes de um aerogerador.

deste problema, notou-se que configurações irregulares resultam em maiores níveis de produção. Porém, nestes casos, o alto grau de dependência entre as variáveis envolvidas no sistema cria situações difíceis de resolver de forma confiável, tornando complexa a otimização (Samorani, 2013).

Um dos fatores mais importantes na otimização do posicionamento dos aerogeradores dentro de um parque eólico é o fenômeno aerodinâmico que ocorre entre os aerogeradores conhecido como 'efeito esteira'. O impacto causado pelo efeito esteira na energia produzida pelos aerogeradores afeta diretamente o rendimento do parque eólico. Além da redução da capacidade de produção de energia (diminuição da velocidade de vento), a esteira ainda reduz a vida útil (aumento da intensidade de turbulências) das turbinas afetadas (Jourieh *et al.*, 2009).

Para resolver este problema, a fim de minimizar as perdas causadas pelo efeito



Figura 1.4 – Otimização do posicionamento das turbinas eólicas nas coordenadas x e y do espaço do parque eólico.

esteira, o arranjo de aerogeradores deve considerar todas as direções dos ventos incidentes no parque eólico. Também é importante que se analise a distância entre os aerogeradores e a intensidade da turbulência ambiente (Martínez, 2003).

Dessa forma, tão importantes no processo de otimização quanto a modelagem dos fenômenos físicos incidentes nas turbinas, são as características do terreno do parque eólico, a se considerar, rugosidade e orografia, e a distribuição dos ventos em velocidades e direções. Para se considerar tais aspectos, é feita a modelagem do fluxo de vento na área do parque utilizando modelos numéricos, geralmente, através de Fluidodinâmica Computacional.

A situação fica ainda mais complexa quando restrições aplicadas aos aerogeradores já instalados são consideradas, tais como a presença de cabos de força, as características geográficas do parque e as limitações ambientais (Yang *et al.*, 2019). É importante destacar que, dentre as limitações ambientais atribuídas à formulação do problema, a poluição sonora, decorrente da propagação de ruído sonoro produzido pelos aerogeradores, deve ser tratada com maior cautela, haja vista a possibilidade de causar impactos negativos à saúde.

Os aerogeradores geram sons indesejáveis, mecânicos e aerodinâmicos, durante seu funcionamento. Mesmo com os avanços tecnológicos e o desenvolvimento de turbinas mais silenciosas, o ruído sonoro produzido por esses aerogeradores continua sendo um fator importante a ser considerado durante a fase de planejamento do parque eólico (figura 1.5).



Figura 1.5 – Ilustração do ruído sonoro gerado por um parque eólico.

Nesse sentido, novas tecnologias precisam ser desenvolvidas com o intuito de reduzir impactos ao ambiente. Em paralelo, aperfeiçoar a modelagem dos fenômenos que configuram esse sistema é fundamental para entender o comportamento correto do ruído sonoro produzido pelos aerogeradores (Maia *et al.*, 2010).

Fica evidente que a otimização do *layout* de parques eólicos é um problema interessante e complexo. Os maiores desafios convergem para as características de alta dimensionalidade, multimodalidade e natureza descontínua do espaço de busca.

Diante desse panorama, dada a Energia Eólica uma fonte alternativa limpa de energia e pensada, à princípio, para ser ambientalmente correta, é importante levar em consideração, para além da capacidade de produção, os impactos causados pelo ruído sonoro gerado nesses parques. Assim, esta pesquisa busca contribuir com novos avanços para esse processo de otimização no que diz respeito à maximização da produção de energia e limitação do ruído sonoro gerado.

#### 1.1 Revisão Bibliográfica

Acompanhando a tendência do aumento de energias renováveis na matriz energética global, a importância de melhorias na produção de energia limpa e o crescimento da energia eólica nesse cenário, vários autores se propuseram a investigar as complexidades que envolvem o problema de otimização de parques eólicos. Um dos primeiros registros de proposta para solução do problema de otimização de *layout* de parques eólicos foi publicado por Mosetti *et al.* (1994) que propuseram a utilização de um Algoritmo Genético baseado em modelo discreto, mostrando a aplicabilidade dos algoritmos de otimização para este tipo de situação. As propostas que sucedem a publicação de Mosetti *et al.* (1994) podem ser divididas em cinco categorias: técnicas clássicas de otimização, técnicas de simulação, técnicas baseadas em inteligência artificial, técnicas meta-heurísticas e técnicas híbridas.

As técnicas clássicas de otimização são de natureza determinística. As contribuições se destacam na utilização de Programação Inteira Mista (Turner *et al.* (2014); Kuo *et al.* (2016); MirHassani e Yarahmadi (2017)), Programação Sequencial Convexa e Otimização Baseada em Gradiente (Park e Law (2015); Tingey e Ning (2017); King *et al.* (2017)). No entanto, devido à natureza complexa e descontínua do espaço de busca, alguns pesquisadores questionam o sucesso dessas técnicas (González *et al.* (2014)).

Técnicas de simulação baseadas em Monte-Carlo (Marmidis *et al.* (2008)) e técnicas de Inteligência Artificial baseadas em Redes Neurais (Ekonomou *et al.* (2012)) requerem grande quantidade de dados do recurso eólico e infraestrutura do parque para que se alcance bons resultados, o que é difícil de obter. Em heurística, alguns trabalhos de destaque utilizaram Algoritmos Genéticos (Grady *et al.* (2005); Huang (2007); Gao *et al.* (2015); Mayo e Daoud (2016); González *et al.* (2018)). Outras publicações relevantes fizeram uso de outros tipos de Algoritmos Evolutivos (Kusiak e Song (2010); Song *et al.* (2016)), Otimização por Enxame de Partículas (Wan *et al.* (2010); Hou *et al.* (2016); Pillai *et al.* (2017)), *Greedy Algorithm* (Elkinton *et al.* (2008)), *Simulated Annealing* (Rivas *et al.* (2009)), *Coral Reefs Optimization Algorithm* (Salcedo-Sanz *et al.* (2014)), Otimização Biônica (Song *et al.* (2013)), entre outros.

Publicações mais recentes começaram a implementar restrições de ruído sonoro em suas formulações. Alguns desses trabalhos foram amplamente consultados para o desenvolvimento desta dissertação.

Kwong *et al.* (2012) apresentam uma formulação considerando ruído sonoro e produção de energia como objetivos. Esta publicação utiliza otimização por *Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA II)* e identifica, por eficiência de Pareto, trocas importantes na relação entre propagação de ruído sonoro e geração de energia. O modelo é limitado por considerar velocidade de vento unidirecional, o que aumenta o nível de incerteza das análises.

Sorkhabi *et al.* (2016) desenvolveram uma metodologia diferente da apresentada pela ISO 9613-2, para modelagem acústica, e aplicaram o modelo FLORIS para os cálculos de efeito esteira. A proposta utiliza ainda velocidade de vento omnidirecional e chega a conclusões importantes. Nos estudos de caso apresentados, a formulação conseguiu aumentar a produção de energia anual em 3,6%, registrando um aumento de 5 dB no nível de pressão sonora. O trabalho mostra que a partir desse registro, a produção de energia reduziu consideravelmente à medida em que os níveis de pressão sonora aumentavam.

Park *et al.* (2019) fazem um estudo de caso do parque eólico de *Daegwallyeong* na Coréia do Sul, com restrições mais específicas de perímetro. O trabalho não aborda a propagação de ruído sonoro, porém, a formulação de otimização por algoritmo genético é muito próxima da utilizada nesta dissertação. Esta formulação ainda considera velocidade de vento omnidirecional e diferentes alturas de aerogeradores.

O estudo de Cao *et al.* (2020) propõe uma abordagem mais completa de otimização. Utilizando o modelo *NSGA II* de algoritmo genético, o trabalho faz uma análise multicritério, considerando propagação de ruído sonoro, produção de energia e custos de investimento em sua formulação. A publicação também considera velocidade de vento omnidirecional e múltiplos receptores de ruído sonoro.

Wu *et al.* (2020) descrevem, de maneira clara e concisa, uma metodologia bastante eficiente para o problema de otimização de parques eólicos considerando restrições de ruído sonoro. Na abordagem é utilizado um modelo evolutivo do algoritmo de *Particle Swarm Optimization (PSO)*, retornando bons resultados. Além disso, duas estratégias para a análise de ruído sonoro são apresentadas. A primeira considera o controle de ruído sonoro estrito, não aceitando resultados que excedam o nível de pressão sonora definido pela norma ISO 9613-2 (ISO, 2019). A outra abordagem é feita a partir de compensações econômicas, pagas à área residencial afetada por uma ligeira interferência de ruído sonoro.

Quaeghebeur *et al.* (2021) apresentam uma abordagem para o problema de otimização utilizando pseudo-gradientes. Os resultados fornecem uma base para a discussão sobre os pontos fortes da heurística, como velocidade e flexibilidade, e sobre os pontos fracos, como forte dependência de um *layout* de partida. A velocidade compu-

tacional da otimização baseada em pseudo-gradiente é uma das maiores vantagens para análises que, de outra forma, seriam computacionalmente impraticáveis.

O estudo de Cao *et al.* (2022) utiliza o NSGA-II em uma otimização multiobjetivo, visando o aumento da produção de energia e a diminuição da intensidade da turbulência produzida pelo efeito esteira nas turbinas eólicas. O ruído sonoro está diretamente relacionado a essas turbulências, logo, o estudo apresenta uma metodologia que corrobora com os objetivos deste trabalho, entretanto, não será utilizada uma abordagem multiobjetivo para as finalidades desta dissertação. Os resultados apontam para um ligeiro crescimento de 0,8% na produção de energia, porém, uma redução significativa de 8,1% na intensidade da turbulência nas turbinas eólicas.

Outra abordagem recente e muito relevante é encontrada no estudo de Nyborg *et al.* (2023), que apresentam uma otimização da operação de um parque eólico com restrição de ruído sonoro utilizando o modo operacional individual de cada aerogerador como variável para o objetivo de diminuição/limitação do ruído sonoro produzido. São utilizados dois modelos de propagação de ruído para comparação da performance. O modelo aplicado neste trabalho, ISO 9613-2, e o modelo de equação parabólica. Os resultados apontam que pequenas mudanças no modo operacional das turbinas eólicas podem diminuir o ruído sonoro produzido em até 53% para um parque eólico de pequeno porte.

Ao longo deste trabalho novas referências serão citadas. Estudos que de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento desta dissertação.

#### 1.2 Motivação

A busca pela melhor configuração de posição dos aerogeradores em um parque eólico, que leve em consideração restrições de ruído sonoro, é motivada principalmente por:

- Maximizar o rendimento do parque eólico em termos de produção de energia;
- Auxiliar o processo de tomada de decisão e implantação do empreendimento;
- Adequar os níveis de ruído sonoro dos aerogeradores aos padrões estabelecidos em norma;

- Definir a viabilidade econômico-financeira do projeto;
- Garantir as características ecológicas e de sustentabilidade à produção de energia eólica.

#### 1.3 Objetivos

#### Essa dissertação tem por objetivo principal:

• A otimização do posicionamento de turbinas eólicas visando a maximização da produção de energia, limitando o ruído sonoro produzido pelos aerogeradores.

#### Como objetivos específicos, pode-se destacar:

- Definir os critérios da formulação do problema de otimização, modelos de esteira e ruído sonoro;
- Analisar a relação entre produção de energia e propagação de ruído sonoro. Avaliar se estes são conflitantes ou não;
- Avaliar o desempenho do processo de otimização por algoritmo genético, implementado devido a sua simplicidade e robustez.

#### 1.4 Organização do Trabalho

Este trabalho possui outros cinco capítulos. O capítulo 2 descreve os modelos numéricos que envolvem a formulação desenvolvida, que inclui o modelo de efeito esteira e o modelo de propagação de ruído sonoro. O algoritmo de otimização é apresentado no capítulo 3. Então, no capítulo 4, são apresentados estudos de caso seguidos pelas análises dos resultados no capítulo 5. O capítulo final fica reservado para as conclusões deste trabalho.

### 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 2.1 Modelo de Efeito Esteira

O processo de extração e conversão de energia a partir das correntes de vento é acometido por uma série de condicionantes que diminuem seu rendimento. Quando o vento passa pelas pás de um aerogerador, ocorre uma perda de momento devido à diminuição da velocidade do fluxo e aumento da energia turbulenta atrás da turbina (Martínez, 2003). Esse efeito, chamado de esteira (figura 2.1), é um dos principais parâmetros a serem considerados no processo de otimização do posicionamento de turbinas eólicas (Jourieh *et al.*, 2009).



Figura 2.1 – Efeito esteira em parque eólico offshore (Hasager et al., 2013).

A região de esteira é dividida em duas: *near wake* (esteira próxima) e *far wake* (esteira distante). *Near wake* é a região onde o efeito do rotor influencia diretamente no perfil de velocidade. Na maioria dos casos, o maior impacto na velocidade de vento ocorre dentro dessa região e, geralmente, sua extensão está limitada a duas vezes o diâmetro do rotor. Já a região *far wake*, que inicia imediatamente onde termina a primeira região, tem o foco na influência do aerogerador no parque eólico. Nessa região são analisados o modelo de esteira, modelos de turbulência e os efeitos da topografia (Vermeer *et al.*, 2003). Em estudos que visam a otimização do posicionamento dos aerogeradores, proposta desta dissertação, a modelagem *far wake* é de fundamental importância.

Ao longo dos anos, vários modelos foram desenvolvidos com o intuito de estimar esse déficit de produtividade causado pelo fenômeno de esteira. Os modelos

com mais destaques em aplicações acadêmicas e comerciais são os modelos de Larsen, Frandsen e Jensen (Renkema, 2007). Devido a sua simplicidade e bom desempenho, adotou-se para o desenvolvimento desse trabalho o modelo de Jensen (1983), que será apresentado a seguir.

#### 2.1.1 Modelo de Jensen

O modelo de Jensen (1983) é baseado em uma expansão linear do diâmetro de esteira e resulta em uma relação não-linear entre velocidade de vento e distância entre o aerogeradores (figura 2.2). Essa formulação é uma das mais populares devido a sua praticidade de implementação, sendo utilizada em softwares comerciais como *WAsP*, *WindFarmer* e *WindPRO* (Renkema, 2007). Devido à simplicidade de suas considerações físicas, não é reconhecido como muito preciso na previsão de perdas de esteira sob condições específicas de fluxo atmosférico. No entanto, é considerado bastante preciso para prever perdas de esteira com base na produção anual de energia.



Figura 2.2 – Ilustração para formulação do Modelo de esteira de Jensen.

O diâmetro de esteira é obtido através do diâmetro do rotor (D), do coeficiente de decaimento de esteira  $(k_w)$  e da distância até o ponto atrás do aerogerador que se deseja calcular o déficit (x), ou seja,

$$D_w = D + 2k_w x. \tag{2.1}$$

Sendo

$$k_w = \frac{0,5}{\ln\left(\frac{h}{z_0}\right)},\tag{2.2}$$

em que, h é a altura do aerogerador e  $z_0$  é a rugosidade média da superfície do terreno.

De acordo com Renkema (2007), para parques eólicos *onshore*, é adotado um coeficiente de decaimento,  $k_w$ , igual a 0,075. Já para parques *offshore*, esse valor é de 0,04, podendo assumir outros valores, a depender das condições climáticas e topográficas.

Dessa forma, a equação que estima o déficit de velocidade devido a esteira induzida por um aerogerador a montante é dada por:

$$\frac{\Delta V}{V_{\infty}} = \left(1 - \sqrt{1 - C_T}\right) \left(\frac{D}{D + 2k_w x}\right)^2,\tag{2.3}$$

onde,  $\Delta V$  é a variação da velocidade de vento a uma distância x,  $V_{\infty}$  está relacionado à velocidade do fluxo de vento livre, que é a velocidade em que o vento chega às turbinas sem interferência de esteiras, e  $C_T$  é o coeficiente de arrasto, definido pela razão entre a força de arrasto do vento sobre o rotor e a força que o vento exerce sobre a máquina.

O coeficiente de arrasto varia de acordo com o modelo do aerogerador e é encontrado junto das especificações do fabricante, bem como os dados da curva de potência, igualmente necessários na formulação do modelo.

#### 2.1.2 Combinação de esteira

Outra característica importante a ser considerada no modelo é a combinação das regiões de esteira. Em parques eólicos, normalmente um aerogerador é afetado pela esteira de múltiplos outros aerogeradores, como mostra a figura 2.1. Nesses casos, é necessário calcular as perdas de velocidade sofridas por um aerogerador alvo devido ao efeito esteira de cada aerogerador a montante. Então, o déficit total sofrido por esse aerogerador alvo é calculado como a raiz quadrada da soma dos quadrados dos déficits de cada turbina a montante, ou seja,

$$\left(\frac{\Delta V}{V_{\infty}}\right)_{total} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \left(\frac{\Delta V}{V_{\infty}}\right)_{i}^{2}},$$
(2.4)

onde n é o número total de aerogeradores a montante e  $\left(\frac{\Delta V}{V_{\infty}}\right)_i$  é o déficit individual do *i*-ésimo aerogerador entre n. É importante destacar que essa formulação não considera esteiras parciais, ou seja, caso o centro de um aerogerador alvo não esteja completamente dentro de uma região de esteira, o efeito neste aerogerador é desconsiderado.

#### 2.2 Modelo de Ruído Sonoro

De acordo com a teoria acústica, o modelo que mais se assemelha à realidade da propagação do ruído sonoro de aerogeradores em um parque eólico é o modelo de onda esférica (figura 2.3). Nesse modelo, o ruído sonoro produzido por uma fonte pontual se propaga em meio isotrópico, como o ar, e a energia flui para todas as direções.



Figura 2.3 – Propagação esférica de ruído sonoro.

A intensidade de propagação em condições ideais, aumenta de acordo com a equação da esfera; logo, a área pela qual as ondas sonoras transferem sua energia é proporcional ao quadrado da distância entre fonte e receptor (Easton, 2010). Dessa forma, o nível de pressão sonora no receptor é minimizado ao passo que a distância até a fonte aumenta, isto é,

$$I = \frac{L_w}{4\pi r^2},\tag{2.5}$$

onde I é a intensidade de propagação da onda,  $L_w$  a potência da fonte emissora, em Watts, e r a distância entre fonte e receptor.

Sendo assim, o nível de pressão sonora,  $L_p$ , de uma onda esférica em função da potência sonora da fonte de ruído sonoro omnidirecional,  $L_w$ , e da distância r até o receptor, é dado por:

$$L_p = L_w - 20\log(r) - 11 \ [dB], \tag{2.6}$$

onde 11 dB é um fator advindo de uma série de constantes relacionadas a propriedades do ar.

No entanto, esse modelo difere em alguns aspectos do comportamento real da propagação de ruído sonoro em parques eólicos. Na prática, fatores atenuantes influenciam consideravelmente as ondas sonoras. Segundo Lamancusa (2009), essas atenuações possuem origens diversas, tais como a absorção do som pelo ar, a existência de fenômenos meteorológicos (turbulência e refração do ar), a existência de barreiras naturais (montanhas ou florestas), a absorção pelo próprio solo, dentre outros.

Um método padrão de cálculo para estimar a propagação de ruído sonoro considerando atenuações e ponderações é apresentado pela norma ISO 9613-2, publicada em 1996 (ISO, 2019). Apesar de algumas limitações, o método oferece uma robustez considerável, sendo utilizado em alguns softwares comerciais como *WindPro* e *OpenWind*. O modelo estima o nível de pressão sonora ponderado A, em decibels, sob condições meteorológicas favoráveis de propagação.

Algumas condições impostas pelo método são: a suposição de propagação a favor do vento (*downwind*), porosidade moderada (solo heterogêneo) para o terreno avaliado e o gradiente térmico vertical negativo, ou seja, a temperatura aumenta conforme a altura.

O algoritmo desenvolvido para este trabalho, baseado nas diretrizes da norma ISO 9613-2, separa, calcula, atenua e pondera concomitantemente as frequências nominais centrais em bandas de oitava, dadas por 63 Hz, 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz, 4000 Hz e 8000 Hz, para uma ou múltiplas fontes de ruído sonoro, estacionárias ou em movimento.

A metodologia apresentada pela ISO 9613-2 pode ser replicada no cálculo de ruído sonoro do tráfego, ruído sonoro industrial, atividades de construção e de muitas outras fontes sonoras. Porém, a norma não contempla a propagação sonora de aviões no ar, ruídos sonoros de mineração, atividades militares ou similares.

Como podemos observar, em virtude da aplicação adequada do método, devese estabelecer um conjunto de parâmetros relacionados à geometria da fonte sonora e do ambiente, características da superfície e nível de potência acústica da fonte em termos de bandas de oitava na direção de propagação avaliada.

Vale ressaltar que, por ser um método bastante simplificado de cálculo, a ISO 9613-2 traz uma série de limitações, o que influencia negativamente a precisão dos resultados. Entretanto, é comum que a norma apresente valores ligeiramente superiores a outros métodos de cálculo mais robustos, como o NORD2000, compensando a falta de precisão com resultados a favor da segurança. O algoritmo desenvolvido para este trabalho segue a metodologia apresentada pela norma ISO 9613-2. Uma análise semelhante é apresentada por Luz *et al.* (2018), que comparou os resultados da norma com o módulo DECIBEL do software comercial *WindPro* e confirmou boa precisão.

#### 2.2.1 Método de cálculo

Conforme mencionado anteriormente, o nível de pressão sonora contínuo downwind,  $L_{ft}$ , deve ser calculado para cada fonte emissora (aerogerador), em cada uma das oito frequências nominais centrais de 63 Hz a 8 kHz, através da equação

$$L_{ft} = L_w + D_c - A, \tag{2.7}$$

sendo  $L_w$  o nível de potência sonora da fonte na referida banda de oitava, em decibels.  $D_c$ é o coeficiente de diretividade que, de acordo com Lamancusa (2009), é nulo para uma fonte omnidirecional, também em decibels. A é o somatório das mais variadas atenuações que ocorrem entre a fonte emissora e o receptor, dado por

$$A = A_{div} + A_{atm} + A_{gr} + A_{bar} + A_{misc}, \qquad (2.8)$$

onde:

- A<sub>div</sub> atenuação por divergência geométrica;
- $A_{atm}$  atenuação por absorção atmosférica;
- A<sub>gr</sub> atenuação devido ao tipo de solo;
- $A_{bar}$  atenuação devido à barreiras acústicas;
- $A_{misc}$  atenuação por fatores diversos (miscelâneos).

O valor obtido através da eq. 2.7, no entanto, refere-se apenas ao nível de pressão sonora global, sendo necessário sua ponderação na escala A, com o intuito de adequar o valor à sensibilidade de audição humana. Dessa forma, o nível de pressão sonora contínuo ponderado na escala A,  $L_{AT}$ , pode ser determinado pela equação a seguir:

$$L_{AT} = 10 \log \left\{ \sum_{i=1}^{n} \left[ \sum_{j=1}^{8} 10^{0.1 \left[ L_{ft}(i,j) + A_f(j) \right]} \right] \right\} \quad [dB(A)],$$
(2.9)

onde:

- *n* é o número de contribuições *i* (fontes e caminhos);
- *j* é o índice de indicação das oito frequências nominais centrais padrão de 63 Hz a 8 kHz;
- $A_f$  indica a ponderação na escala A.

Para finalizar, correções meteorológicas,  $C_{met}$ , devem ser feitas a fim de garantir um nível de pressão sonora ponderado em A mais fiel a longo prazo. Logo,

$$L_{AT(LT)} = L_{AT} - C_{met}.$$
 (2.10)

#### 2.2.2 Fatores de atenuações sonoras

Nesta dissertação, estão incluídas as atenuações sonoras por: divergência geométrica, absorção atmosférica, efeito do solo, barreiras acústicas e efeitos diversos. Esta parte do trabalho reserva-se a evidenciar as características dessas atenuações, bem como as equações que as regem e que estão inseridas na forma de cálculo do ruído sonoro considerado.

#### 2.2.2.1 Divergência geométrica - $A_{div}$

Segundo Gayo (2006), o fenômeno de divergência geométrica é responsável pela distribuição da energia de emissão de uma onda sonora em superfícies. Conforme as frentes de onda aumentam, as superfícies também aumentam.

A equação que representa esse fenômeno é dada por:

$$A_{div} = 20\log(d) + 11 \ [dB], \tag{2.11}$$

onde d é a distância da fonte até o receptor, em metros.

2.2.2.2 Absorção atmosférica -  $A_{atm}$ 

De acordo com Lamancusa (2009), o fenômeno de absorção atmosférica acontece por dois motivos principais:

- a absorção clássica, devido à viscosidade, convertendo energia sonora em energia térmica através da fricção entre as moléculas do ar;
- os processos de relaxação, que acontecem quando a energia sonora é absorvida pelas moléculas de ar, que irão vibrar e rotacionar. Essas moléculas podem reemitir o som, interferindo em sua propagação.

Sendo assim, a absorção atmosférica devido à propagação por uma distância *d*, em metros, é dada pela equação

$$A_{atm} = \frac{\alpha d}{100},\tag{2.12}$$

onde  $\alpha$  é o coeficiente de atenuação atmosférica, em decibéis por quilômetro, para cada frequência nominal central de banda de oitava (tabela 2.1).

Tomporatura	omnoratura Umidada relativa		Coeficiente de atenuação atmosférica $\alpha$ , dB/km						
Temperatura	Ulliluaue I clauva	Frequências nominais centrais, Hz							
$^{\circ}C$	%	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
10	70	0,1	0,4	1,0	1,9	3,7	9,7	32,8	117
20	70	0,1	0,3	1,1	2,8	5,0	9,0	22,9	76,6
30	70	0,1	0,3	1,0	3,1	7,4	12,7	23,1	59,3
15	20	0,3	0,6	1,2	2,7	8,2	28,2	88,8	202
15	50	0,1	0,5	1,2	2,2	4,2	10,8	36,2	129
15	80	0,1	0,3	1,1	2,4	4,1	8,3	23,7	82,8

Tabela 2.1 – Coeficiente de atenuação atmosférica.

#### 2.2.2.3 Efeito do Solo - $A_{gr}$

A norma ISO 9613-2 apresenta um método geral e outro alternativo para calcular os efeitos de solo. Este tipo de atenuação é resultado da reflexão das ondas sonoras no solo durante a propagação. A condição *downwind* garante um fator atenuante com maior incidência nos arredores da fonte e do receptor. Para que o método seja aplicado, deve-se considerar um solo plano ou com inclinação constante. Desse modo, surgem três regiões de destaque, como mostra a figura 2.4:

- a região da fonte (source region) se estende da fonte até 30h<sub>s</sub> em direção ao receptor, com uma distância máxima d<sub>p</sub> (sendo h<sub>s</sub> a altura da fonte e d<sub>p</sub> a distância entre a fonte e o receptor);
- a região do receptor (*receiver region*) se estende do receptor até 30h<sub>r</sub> em direção à fonte, com uma distância máxima de d<sub>p</sub> (sendo h<sub>r</sub> a altura do receptor);
- uma região intermediária (*middle region*) se encontra entre a região da fonte e a região do receptor. Caso haja sobreposição das regiões da fonte e do receptor, não há região intermediária.



Figura 2.4 – Regiões para determinação das atenuações de solo (ISO, 2019).

Como podemos observar, a atenuação praticamente independe do tamanho da região intermediária, sendo as regiões da fonte e do receptor as que mais exercem influência em sua intensidade.

Outro fator importante que deve ser considerado é a propriedade acústica do solo. Essa propriedade é medida através de um fator G que apresenta três possibilidades. São elas:

- solos não porosos (*hard ground*) categoria das superfícies que possuem pouca porosidade. O fator, nesse caso, é nulo. Considera-se G = 0;
- solos porosos (*porous ground*) categoria das superfícies propícias ao crescimento de vegetação. Para esses casos, considera-se G = 1;

 solos mistos (*mixed ground*) – categoria de superfícies que possuem regiões tanto porosas quanto não-porosas. Para solos mistos, G varia de 0 a 1 de acordo com a porosidade do terreno.

Uma vez determinados tais fatores, calculam-se, então, as atenuações do solo próximo à fonte,  $A_s$ , do solo próximo ao receptor,  $A_r$  e do solo da região intermediária,  $A_m$ . Dessa forma, a atenuação dos efeitos de solo se dá pelo somatório das componentes, como mostra a equação a seguir:

$$A_{gr} = A_s + A_r + A_m. aga{2.13}$$

As equações necessárias para a definição dos coeficientes e fatores citados acima, são disponibilizadas pela norma ISO 9613-2 e podem ser consultadas na tabela 2.2. As equações abrangem todas as frequências nominais centrais das bandas de oitava.

Tabela 2.2 – Expressões matemáticas utilizadas na atenuação do solo em bandas de oitavas.

Frequência	\ \				
nominal central, Hz	$A_s$ ou $A_r^{a)}$ , dB	$A_m$ , dB			
63	-1, 5	$-3 \times q^{b}$			
125	$-1, 5 + G \times a'(h)$				
250	$-1, 5 + G \times b'(h)$				
500	$-1, 5 + G \times c'(h)$				
1000	$-1, 5 + G \times d'(h)$	$-3 \times q(1 - G_m)$			
2000	$-1,5\times(1-G)$				
4000	$-1,5\times(1-G)$				
8000	$-1,5\times(1-G)$				
$a'(h) = 1,5 + 3e^{-0,12(h-5)^2} \left(1 - e^{-\frac{d_p}{50}}\right) + 5,7e^{-2,8\times 10^6 d_p^2}$					
$b'(h) = 1, 5 + 8, 6e^{-0,09^2} \left(1 - e^{-d_p}{50}\right)^2$					
$c'(h) = 1,5 + 14e^{-0.46^2} \left(1 - e^{-d_p}{50}\right)'$					
$d'(h) = 1,5 + 5e^{-0,9^2} \left(1 - e^{\frac{-d_p}{50}}\right)'$					
a) Para calcular $A_s$ , considerar $G = G_s$ e $h = h_s$ ;					
Para calcular $A_r$ , considerar $G = G_r$ e $h = h_r$ .					
b) $q = 0$ , quando $d_p \leq 30(h_s + h_r)$ ;					
$q = 1 - 30 \left( rac{h_s + h_r}{d_p}  ight)$ , quando $d_p > 30(h_s + h_r)$ ,					

#### 2.2.2.4 Efeito do solo – método alternativo

O método alternativo de cálculo para atenuações de solo é utilizado apenas em situações específicas. Uma dessas situações é a ausência dos dados de nível de potência acústica da fonte dividido em bandas centrais de frequência, que é um dos parâmetros fundamentais do método geral de cálculo. Ademais, para que o método alternativo funcione, é necessário que:

- o interesse seja apenas no nível de pressão sonora no receptor;
- a propagação sonora seja majoritariamente em solo poroso;
- a não existência de tons puros.

Caso tais exigências sejam cumpridas, a atenuação dos efeitos de solo pode ser calculada por:

$$A_{gr} = 4, 8 - \left(\frac{2h_m}{d}\right) \times \left(17 + \frac{300}{d}\right) \ge 0 \quad dB,$$

$$(2.14)$$

onde  $h_m$  é a altura média em que se dá a propagação, em metros; d é a distância entre a fonte e o receptor.

O procedimento para o cálculo da altura média,  $h_m$ , é ilustrado pela figura 2.5 e consiste na relação entre a área formada pela linha que liga as alturas e o solo (F), e a distância entre fonte e receptor.



Figura 2.5 – Determinação da altura média,  $h_m$  (ISO, 1996).
Definidas área e distância, a altura média pode ser calculada pela relação a seguir:

$$h_m = \frac{F}{d},\tag{2.15}$$

onde F é o somatório de uma série infinitesimal de pequenas áreas.

Como o método alternativo não considera o aumento do nível de potência acústica, é necessário que seja feita uma correção de diretividade. Esse termo deve ser adicionado ao cálculo de ruído sonoro total como último ajuste. A equação se dá por:

$$D_{\Omega} = 10 \log \left[ 1 + \frac{d_p^2 + (h_s - h_r)^2}{d_p^2 + (h_s + h_r)^2} \right],$$
(2.16)

onde:

- $h_s$  é a altura da fonte;
- $h_r$  é a altura do receptor;
- $d_p$  é a distância entre a fonte e o receptor.

# 2.2.2.5 Barreiras acústicas /Screening – Abar

A atenuação por *Screening* acontece por meio de interferências na propagação de ondas acústicas causadas por barreiras. Nessas condições, segundo Vér e Beranek (2005), a penetração do som se dá por difração. Algumas características devem ser conferidas a um objeto, antes deste ser considerado uma barreira acústica, isto é:

- densidade superficial mínima de  $10 kg/m^2$ ;
- objeto sólido, sem grandes fendas ou brechas;
- dimensão horizontal do objeto deve maior que o comprimento de onda acústico da frequência nominal central de interesse.

# 2.2.2.6 Condições meteorológicas – $C_{met}$

A última etapa do cálculo das atenuações considera as condições meteorológicas. Esses aspectos são de fundamental importância para a determinação da propagação de ruído sonoro, uma vez que a equação final do nível de pressão sonora ponderado em A,  $L_{AT}$ , considera condições meteorológicas *downwind*, a favor do vento, assumindo a situação mais desfavorável ao ruído sonoro.

No caso da formulação para o nível de pressão sonora a longo prazo,  $L_{AT(LT)}$ , é levada em consideração a avaliação das condições meteorológicas durante um período de dois anos, analisando tanto situações favoráveis quanto desfavoráveis.

Para esses casos, as condições meteorológicas podem ser obtidas através da equação a seguir:

$$C_{met} = 0, se d_p \le 10 \times (h_s + h_r) C_{met} = C_0 \left[ 1 - \frac{10(h_s + h_r)}{d_p} \right], se d_p \le 10 \times (h_s + h_r) (2.17)$$

sendo  $C_0$  um fator, em decibels, que varia conforme a velocidade e direção do vento.

# **3 METODOLOGIA**

Nesta seção são apresentados os parâmetros e procedimentos utilizados na realização no processo de otimização do posicionamento de turbinas eólicas, considerando restrição de ruído sonoro.

O algoritmo principal é subdivido em três partes: cálculo da energia total produzida pelo parque, avaliação do nível de pressão sonora dos aerogeradores e otimização do processo por algoritmo genético.

#### 3.1 Hipóteses iniciais e características físicas

A formulação desenvolvida para esta dissertação, utilizada em todas as simulações, considera as seguintes hipóteses:

- Aerogeradores idênticos todas as turbinas eólicas simuladas possuem as mesmas especificações, ou seja, altura do cubo, diâmetro do rotor, potência nominal, curva de potência, coeficiente de arrasto etc;
- Sem esteiras parciais o efeito esteira só será estimado para aerogeradores alvo que estiverem com o centro do rotor inteiramente dentro da região de esteira de um ou mais aerogeradores a montante. Caso contrário, o efeito é desconsiderado para aquela turbina;
- Terreno plano a topografia do parque eólico é considerada plana em sua totalidade, sem barreiras acústicas ou qualquer outra restrição física que limite a produção de energia;
- Distribuição homogênea de vento significa que, caso não houvessem aerogeradores instalados ou não existisse a influência do efeito esteira, o vento seria igualmente distribuído para toda a área do parque eólico. Ou seja, teríamos a mesma velocidade em uma determinada direção de vento em qualquer ponto nas imediações do parque.

Uma vez conhecidas as hipóteses e características físicas do problema, apresentase o detalhamento dos algoritmos desenvolvidos para esta formulação.

## 3.2 Algoritmo de Energia

O algoritmo de energia consiste em calcular a Produção Anual de Energia (PAE), para um dado posicionamento dos aerogeradores. Esta etapa é responsável pelo processamento dos dados de entrada, tratamento primário destes dados, conversão dos dados de vento para preparação das iterações multidirecionais e estimativa do déficit de rendimento nos aerogeradores devido ao efeito esteira.

O algoritmo inicia com a leitura dos dados de entrada:

- Localização dos aerogeradores;
- Curva de potência e coeficiente de arrasto;
- Velocidade e direção de vento.

Segue, então, para a etapa de construção do que se chama aqui de alocações de vento. Essa etapa é fundamental para aumentar a robustez da formulação, garantindo características omnidirecionais às análises, ou seja, todas as direções de vento, bem como variações de velocidade, serão consideradas.

É necessário realizar uma 'discretização' do conjunto de dados disponíveis em pequenas partes chamadas de alocações de vento. Neste trabalho, as direções de 0 a 360° são divididas em partes de 40°, e as velocidades, de 0 a 32 m/s, em partes de 4 m/s. Dessa forma, teremos 9 (nove) divisões para as direções e 8 (oito) divisões para as velocidades. Os pontos de dados disponibilizados para direção e velocidade dos ventos que incidem no parque eólico, são, então, armazenados no intervalo de alocação correspondente. O total de alocações se dá pela multiplicação das divisões de direção pelas divisões de velocidade, sendo consideradas 72 alocações de vento.

Essa metodologia de armazenamento de dados ajuda a estimar a probabilidade de ocorrências dessas alocações de vento, que pode ser facilmente encontrada dividindo o número de pontos de dados em cada alocação pelo número total de pontos de dados. A probabilidade de ocorrência da j-ésima alocação de vento é denominada por  $p_j$ , e se pode escrever

$$\sum_{j=1}^{72} p_j = 1. \tag{3.1}$$

A tabela 3.1 apresenta a ideia de discretização das alocações de vento em formato tabular, correspondente a todas as direções ( $\theta$ ) e velocidades ( $v_w$ ) armazenadas.

	$0 \le v_w < 4$	$4 \le v_w < 8$	 	$24 \le v_w < 28$	$28 \le v_w < 32$
$\theta = 0 \ (360)$		•••	 		
$\theta$ = 40	•••	•••	 		•••
$\theta = 80$	•••	•••	 		
	•••	•••	 	•••	•••
$\theta = 280$	•••	•••	 		•••
$\theta = 320$			 	•••	•••

Tabela 3.1 – Tabulação das alocações de vento.

A próxima etapa, após o armazenamento de todos os pontos de dados, se dá pelo processo de iteração ao longo das alocações de vento. Primeiramente, é necessário rotacionar o quadro de referência de acordo com a direção do fluxo de vento. Uma característica importante das turbinas é a capacidade de orientar seus rotores automaticamente para aproveitamento do fluxo de vento em qualquer direção. Tal movimento, conhecido como mecanismo de guinada, é considerado nas características das turbinas utilizadas neste trabalho. Logo, para uma dada direção,  $\theta$  (radianos), as coordenas euclidianas dos aerogeradores (x,y) são convertidas para coordenadas *downwind-crosswind* (x',y'), conforme ilustrado na figura 3.1.

A conversão é feita para decompor as velocidades na direção das turbinas, de forma a alinhar o fluxo de direção de vento com o eixo x positivo, automatizando a orientação do rotor para determinado fluxo de vento. Dessa forma, as coordenadas *downwind-crosswind* são dadas por:

$$\begin{aligned} x' &= x \cos\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) - y \sin\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) \\ y' &= x \sin\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) + y \cos\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right). \end{aligned}$$
(3.2)

A etapa seguinte consiste em calcular a velocidade efetiva de vento em cada aerogerador, ou seja, utiliza-se o modelo de Jensen (1983) para estimar as implicações do efeito esteira no rendimento das turbinas eólicas.

Para uma determinada velocidade de vento  $V_{\infty}$ , são calculados os déficits em cada aerogerador, e a velocidade efetiva ( $V_{eft}$ ) pode ser definida como:

$$V_{eft} = V_{\infty} \left[ 1 - \left( \frac{\Delta V}{V_{\infty}} \right)_{total} \right].$$
(3.3)



Figura 3.1 – Rotação das coordenadas (x e y: euclidianas; x' e y': downwind-crosswuind).

Parte-se, então, para estimar a produção de energia no parque eólico para cada alocação de vento, individualmente. Nesta etapa, utilizam-se os dados de velocidade efetiva, calculados anteriormente, e os dados de curva de potência para calcular a energia produzida por cada aerogerador e, posteriormente, obter a produção total de energia somando as contribuições de cada turbina do parque eólico.

Chama-se de  $P_j$ , a energia produzida pela *j*-ésima alocação de vento, em termos de potência. O processo da primeira à terceira etapa é repetido para as demais alocações e os resultados de  $P_j$  são armazenados.

Por fim, multiplica-se  $P_j$  com a frequência de ocorrência  $(p_j)$  correspondente, para se obter a Produção Anual de Energia (PAE) total. Esse valor é ainda multiplicado por um fator de 8760, que é o número de horas em um ano, e o fator de  $10^3$  no denominador converte a energia para gigawatts-hora (GWh), ou seja,

$$PAE = \frac{8760}{10^3} \left( \sum_{j=1}^{72} p_j P_j \right).$$
(3.4)

## 3.3 Algoritmo de Ruído Sonoro

O algoritmo desenvolvido para a avaliação de ruído sonoro consiste em quantificar o nível de pressão sonora que é recebido por uma área residencial localizada nas imediações do parque. Essa etapa de análise é parte fundamental desta dissertação, uma vez que os dados de saída desse algoritmo serão utilizados na avaliação da principal restrição do problema de otimização.

A sequência lógica segue a metodologia apresentada pela norma ISO 9613-2, detalhada no capítulo 2 deste trabalho.

A primeira etapa do algoritmo é de leitura dos dados de entrada. São eles:

- Altura da fonte;
- Altura do receptor;
- Distância entre fonte e receptor;
- Porosidade do solo;
- Existência de barreiras;
- Nível de potência acústica do aerogerador.

Os dados podem ser editados previamente no corpo do próprio algoritmo, ou compilados em arquivo externo do tipo .*csv* para posterior leitura.

Na etapa seguinte é realizado o cálculo das atenuações sonoras devido a cada um dos efeitos de atenuação, já mencionados e discutidos no capítulo anterior. As atenuações são calculadas para cada uma das fontes sonoras nas oito bandas de frequências nominais centrais, de 63 a 8000 Hz.

Com todas as atenuações calculadas, passa-se, então, para a etapa de ponderação dos resultados na escala A. A ponderação em A tem por objetivo o ajuste do ruído sonoro à sensibilidade da audição humana e consiste em adequações simples que variam de acordo com a banda de frequência. Os coeficientes utilizados nesses ajustes se encontram na tabela 3.2.

Para finalizar o algoritmo, o nível de pressão sonora final é determinado pela soma das componentes de cada frequência, sendo feita ainda uma última atenuação atra-

Frequência nominal central, Hz	Curva A, dB
63	-26,2
125	-16,1
250	-8,6
500	-3,2
1000	0
2000	+1,2
4000	+1,0
8000	-1,1

Tabela 3.2 – Coeficientes da ponderação em A.

vés do coeficiente meteorológico. A determinação do coeficiente meteorológico necessita de  $C_0$ , um fator determinado pela própria norma ISO 9613-2.

# 3.4 Algoritmo Genético

O Algoritmo Genético (AG) é um dos mais famosos dentre a classe de algoritmos evolutivos. Isso acontece devido às suas propriedades específicas para fornecer um conjunto de soluções preliminares, procurando pela solução ótima entre as mais adequadas naquele conjunto e repetindo o processo até atingir o ótimo global, ou uma solução próxima que atenda os critérios exigidos.

# 3.4.1 Contextualização

Segundo Khanali *et al.* (2018), AG é uma técnica de otimização heurística que se originou dos princípios Darwinianos de genética e evolução observados na natureza. A primeira formulação de AG foi proposta por Holland (1975) como um meio de encontrar soluções razoáveis para problemas cujo tratamento computacional era, até então, impossível. Baseado em inteligência artificial, o AG é um método *population-based*, que utiliza populações para melhorar as soluções, buscando caminhos para o aperfeiçoamento do processo evolucionário ao longo de cada iteração.

A primeira etapa do algoritmo genético é a criação de um conjunto aleatório de soluções. Cada solução é chamada de *cromossomo*, e estes cromossomos são compostos por partes menores chamadas de *genes*, que são as características da solução, parâmetros que podem ser números reais, inteiros ou binários. O conceito de *população* em AG fica reservado à representação adotada para uma possível solução, ou seja, um algoritmo com dez populações terá dez conjuntos de soluções criados. Outro conceito característico

em AG é o de *geração*, que consiste em uma passagem iterativa completa, logo, cada iteração do algoritmo é uma geração. Após a formação de uma geração, deve ser avaliada a *fitness function*, que determina o quão distante estão os cromossomos da próxima geração em relação à solução ótima. As melhores soluções de cada geração serão, então, definidas através do valor de sua *fitness function*.

Na etapa seguinte, uma nova geração é criada utilizando uma série de operadores clássicos do algoritmo genético, que são: *seleção, cruzamento (crossover) e mutação.* A criação de uma nova geração se dá através do processo de *reprodução*, onde pares de genitores são escolhidos da população, com base em sua aptidão, pelo operador de seleção, dando origem a novos indivíduos. Durante o processo de reprodução é realizado o cruzamento, considerado o operador mais importante do AG. O cruzamento é responsável pela recombinação genética dos indivíduos. Após a reprodução, os cromossomos criados a partir do cruzamento são submetidos ao processo de mutação, que consiste na troca de posição de alguns genes com o objetivo de aumentar a diversidade da população. Após a criação de uma nova geração, é selecionada a melhor solução (cromossomo) dessa geração e comparada com a solução anterior. Esse processo é repetido até que o algoritmo atinja os critérios de parada estabelecidos.

O algoritmo genético altera dinamicamente o processo de busca de acordo com as probabilidades de cruzamento e mutação, atingindo, assim, a solução ótima. O algoritmo tem a capacidade de modificar genes e avaliar uma série de indivíduos, produzindo múltiplas soluções ótimas. Espera-se que o resultado gerado pelo cruzamento dos pares de cromossomos gerados seja melhor que o do esquema de cromossomos dos pais. Tal relação é definida por:

$$R = (G + 2\sqrt{g}/3G) \tag{3.5}$$

onde g é o número de gerações e G é o número total de gerações evolutivas definidas pelos cromossomos. Pode-se observar através da equação 3.5 que R é dinamicamente alterado e aumenta ao passo em que o número de gerações evolutivas também aumenta. No estágio inicial do AG, a similaridade entre os indivíduos é muito pequena. O valor de R deve ser baixo para garantir que a nova população não irá destruir o esquema de excelência genética dos indivíduos. Ao final da evolução, a similaridade entre os indivíduos será tão alta quanto o valor de R deverá ser.

De acordo com a metodologia de AG, o esquema original deve ser substituído pelo esquema modificado. Para manter a diversidade da população, o novo esquema mantém a população inicial durante o primeiro estágio da evolução. Ao final desta, o esquema apropriado será produzido, evitando qualquer distorção do conjunto genético de excelência.

Algoritmo 1: Algoritmo Genético (AG) Clássico.
Entrada:
Tamanho da População, n
Número Máximo de Iterações, $MAX_{it}$
Saída:
Solução Ótima, $Y_{best}$
início
Gerar a população inicial de <i>n</i> cromossomos $Y_i$ $(i = 1, 2,, n)$
Iniciar o contador de iterações $it = 0$
Calcular o valor de aptidão de cada cromossomo
repita
Selecionar um par de cromossomos da população inicial baseado
no seu valor de aptidão
Aplicar operador de cruzamento no par de cromossomos
selecionados
Aplicar operador de mutação no pares de cromossomos gerados
(filhos)
Substituir a população anterior pela nova população gerada
Incrementar a iteração atual <i>it</i> por 1
<b>até</b> $it < MAX_{it}$
<b>retorna</b> Solução Ótima, Y <sub>best</sub>

# 3.4.2 Esquemas de codificação

Para a maioria dos problemas computacionais, o esquema de codificação desempenha um importante papel. As informações fornecidas devem ser codificadas em uma cadeia de bits específica e os esquemas de codificação são diferenciados de acordo com o domínio do problema.

# 3.4.2.1 Codificação binária

A codificação binária é o esquema mais utilizado nas formulações de algoritmos genéticos. Cada gene ou cromossomo é representado como uma sequência de 0 ou 1, e cada bit representa uma característica da solução. Esse tipo de codificação permite a implementação mais rápida de operadores de cruzamento e mutação. No entanto, esse método demanda alta complexidade computacional devido às conversões e a precisão do algoritmo depende diretamente de tal processo. O fluxo de bits é alterado de acordo com o problema, não sendo apropriado para alguns problemas mais complexos de engenharia devido a epistasia e representação natural.

## 3.4.2.2 Codificação real

Na codificação real, o gene ou cromossomo é representado utilizando uma sequência de valores que podem ser reais, inteiros ou caracteres. Este tipo de codificação é mais adequado para a solução de problemas mais complexos, com os quais a codificação binária não consegue lidar. É um método mais robusto, eficiente e preciso. Porém, em casos específicos, pode apresentar convergência prematura. A codificação real é muito utilizada na aplicação de redes neurais para a determinação dos pesos ideais.

A formulação de Algoritmo Genético utilizado neste trabalho utiliza esquema de codificação real, por se tratar de um problema de otimização de maior complexidade.

# 3.4.3 Estruturação do algoritmo

A estruturação do Algoritmo Genético é baseada na determinação de três operadores fundamentais: operadores de seleção, de cruzamento e de mutação.

Os operadores de seleção desempenham o papel de definir se uma sequência específica participará ou não do processo de reprodução. As técnicas mais conhecidas são as de seleção por roleta, ranqueamento, torneio, boltzmann e elitismo, sendo esta última a técnica aplicada neste trabalho.

A seleção por Elitismo foi proposta por Jong (1975), como uma proposta de melhoramento da técnica de roleta. A utilização de elitismo no algoritmo garante que o indivíduo com maior aptidão dentro de uma população seja sempre propagado para a próxima geração. Se o indivíduo com o maior valor de aptidão não estiver presente na próxima geração após o procedimento de seleção normal, o processo de seleção elitista o incluirá automaticamente.

Os operadores de Cruzamento são utilizados na geração de novos indivíduos através da combinação de informações genéticas de dois ou mais pais. Neste trabalho, é aplicado o operador de cruzamento uniforme, no qual cada pai pode ter seus genes tratados separadamente, sem a necessidade de ser dividido em segmentos. O algoritmo decide aleatoriamente quando e onde deverá fazer a troca de genes na mesma localização em um cromossomo diferente (figura 3.2).



Figura 3.2 – Exemplo de troca individual de genes em cruzamento uniforme.

Já os operadores de mutação têm a função de preservar a diversidade genética de uma população para a próxima população. Neste trabalho foi aplicado o operador de mutação por deslocamento, que consiste em deslocar parte da sequência de uma solução dentro dela própria. O local de destino é definido aleatoriamente, porém, deve obedecer a premissa de que a solução resultante seja tão válida quanto a solução antes da mutação. É importante ressaltar que o deslocamento pode ser feito através de uma troca entre partes distintas da solução ou a inserção de uma parte em outro local.

Para as avaliações deste trabalho, foram utilizadas populações de 200 indivíduos, avaliados em 1000 gerações. As taxas de mutação, cruzamento, aleatoriedade e elitismo, foram ajustadas em 0.4, 0.5, 0.3 e 0.1, respectivamente.

A combinação do esquema de codificação com os operadores de seleção, cruzamento e mutação definidos para este trabalho está de acordo com as melhores práticas de Algoritmo Genético apresentadas por Katoch *et al.* (2021).

Dessa forma, como definido no capítulo anterior, este trabalho busca maximizar a Produção Anual de Energia (PAE) de um parque eólico, seguindo restrições de perímetro ( $x_{min}$ ,  $y_{min}$ ,  $x_{max}$ ,  $y_{max}$ ), distância entre os aerogeradores ( $d_{min}$ ) e nível de pressão sonora ( $L_{AT}$ ), que não deve exceder um certo limite ( $Ruído_{max}$ ). O problema de otimização fica definido como:



Figura 3.3 – Etapas da rotina de otimização.

A formulação desenvolvida para esta dissertação é ilustrada pelo fluxograma da figura 3.3. O esquema ilustra as etapas do processo de otimização utilizado nas análises aqui descritas, partindo da leitura dos dados iniciais, indispensáveis para o início da rotina, e retornando o posicionamento otimizado das turbinas eólicas, produção de energia e níveis de ruído sonoro, antes e após a otimização.

# 4 TESTES DE OTIMIZAÇÃO

Nesta seção, são discutidos os testes de otimização feitos para avaliar o desempenho do algoritmo utilizado nesse trabalho. Ademais, é apresentada a base de dados utilizada e outras características fundamentais das simulações.

#### 4.1 Características das simulações

#### 4.1.1 Base de dados

A base de dados utilizada nas simulações consiste em um conjunto de aferições reais de incidência de vento no período de um ano, com o total de 15.549 pontos de dados de velocidade e direção. A mesma base de dados fornece, ainda, as características das turbinas eólicas simuladas (tabela 4.1), suas curvas de potência e os coeficientes de arrasto (figura 4.1).

O coeficiente de arrasto é um número adimensional, usado na modelagem do efeito de esteira, que representa a força nas pás da turbina devido ao fluxo de vento incidente. Os dados dos coeficientes de potência e arrasto são eventualmente utilizados durante os cálculos da produção anual de energia, servindo como uma tabela de consulta.

Na figura 4.1, pode-se verificar o comportamento da potência (linha azul) e do coeficiente de arrasto (linha laranja) em relação à velocidade do vento. Através da imagem é possível observar a velocidade de vento *cut-in*, a velocidade *cut-out* e a potência nominal da turbina.

- Velocidade *cut-in* Velocidade na qual as pás do aerogerador começam a girar e gerar energia;
- Velocidade *cut-out* Velocidade na qual a turbina desliga para evitar exceder os limites de carga;
- Potência nominal Potência máxima que a turbina eólica consegue atingir em megawatts.

É importante destacar que as informações pertencem aos dados abertos da empresa Shell, que optou por não identificar o local ao qual pertencem os dados de vento,

Descrição	Especificação
Altura da turbina	100 m
Diâmetro do rotor	100 m
Número de pás	3
Potência nominal	3 MW
Velocidade Cut-in	4 m/s
Velocidade Cut-out	26 m/s

Tabela 4.1 – Características das turbinas eólicas.



Figura 4.1 – Curva de potência (azul) e coeficiente de arrasto (laranja).

bem como a especificação do modelo dos aerogeradores. As informações podem ser acessadas através do link *https://www.shell.in/energy-and-innovation/ai-hackathon.html*.

Ademais, as rotinas utilizadas para compilação dos resultados deste estudo foram desenvolvidas em linguagem de programação Python, e as simulações foram feitas em uma máquina de configurações básicas com processador intel core i3, 8 Gb de memória RAM e SSD de 240 Gb. Como já mencionado em capítulos anteriores, o algoritmo para determinação dos níveis de ruído sonoro foi implementado seguindo a metodologia da norma ISO 9613-2. Já a formulação para otimização com Algoritmo Genético foi uma adaptação da rotina encontrada no repositório Github, cujo perfil pode ser acessado através do link *https://github.com/Shariq03/WFLOP-using-Genetic-Algorithm*.

## 4.1.2 Casos simulados

Nos casos estabelecidos para este trabalho, o parque eólico é um terreno plano com dimensões de  $4 \ km$  de largura e  $4 \ km$  de comprimento. A avaliação é feita apenas em duas dimensões, 2D, não levando em consideração diferenças de altura entre os aerogeradores. O parque eólico é submetido ao regime de vento fornecido pela base de dados citada, cuja distribuição está apresentada na figura 4.2, através do diagrama polar na forma de rosa dos ventos. O mapa de contorno e a distribuição estatística contínua de Weibull são também apresentas (figura 4.3) para melhor visualização do comportamento do regime de ventos trabalhado nesta dissertação.



Figura 4.2 – Rosa dos ventos - com distribuição da direção e velocidade de vento.

A norma técnica ISO 9613-2 determina que o nível de pressão sonora máximo permitido em áreas residenciais é de 45 dB(A), valor ratificado pela NBR 10151 (ABNT, 2000) (tabela 4.2) e, portanto, estabelecido como limite da restrição de ruído sonoro nas simulações, parâmetro denominado de  $Ruído_{max}$ .

Outra restrição importante é a de proximidade entre os aerogeradores, estabelecida como oito vezes o diâmetro do rotor,  $8 \times D$ ; logo, 400 m é o valor da distância mínima entre as turbinas,  $d_{min}$ .



(a) Mapa de contorno

(b) Distribuição de Weibull

Figura 4.3 – I	Mapa de contorno e	e distribuição de	Weibull do regime	de ventos.
<i>(</i> ) · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·				

Tipos de áreas habitadas	Limites de níveis de pressão sonora dB(A)		
	Período Diurno	Período Noturno	
Área de residências rurais	40	35	
Área estritamente residencial urbana ou de hospitais ou de escolas	50	45	
Área mista predominantemente residencial	55	50	
Área mista com predominância de atividades comerciais e/ou administrativa	60	55	
Área mista com predominância de atividades culturais, lazer e turismo	65	55	
Área predominantemente industrial	70	60	

Tabela 4.2 – Limites dos níveis de pressão sonora pela NBR 10151 (ABNT, 2000).

Para este trabalho, os casos de simulação foram divididos em 3 (três) fases. Os objetivos e características de cada uma delas são descritos a seguir.

# 4.1.2.1 Fase 1

A fase 1 consistiu nos testes de escalabilidade e replicabilidade do algoritmo. Para isso, foram feitas simulações variando o número de aerogeradores, os tipos de entrada de localização das turbinas, configurações iniciais com aerogeradores igualmente espaçados e posições aleatórias. Dessa forma, conhecendo melhor o comportamento do algoritmo, foram estabelecidos parâmetros mais adequados para as demais simulações, como a utilização de configurações iniciais aleatórias das turbinas. Nos casos em que se utilizou posições iniciais aleatórias, atingiu-se resultados melhores com um número menor de iterações quando comparados com as simulações de posições iniciais pré-estabelecidas, confirmando o que havia sido encontrado em trabalhos anteriores, tais como: Ozturk e Norman (2004), Rivas *et al.* (2009) e Şişbot *et al.* (2010).

Ainda nesta primeira fase, foi adicionado um ponto receptor de ruído sonoro no centro do parque eólico, x = 2000 m e y = 2000 m, com o intuito de avaliar os níveis de pressão sonora para diferentes configurações. É importante salientar que nesta fase não se utilizou o nível de ruído sonoro como restrição. O acompanhamento dos níveis de pressão sonora foi realizado apenas para avaliação e posteriores comparações com o problema considerando então a restrição de ruído sonoro.

# 4.1.2.2 Fase 2

Na fase 2, testou-se o comportamento do algoritmo diante das restrições de ruído sonoro. Dessa forma, seguindo os parâmetros estabelecidos na fase 1, foram feitas simulações para diferentes configurações de turbinas no parque eólico com posições iniciais aleatórias.

O ponto receptor de ruído sonoro no centro do perímetro do parque eólico foi mantido e a otimização do posicionamento das turbinas, com restrição, foi testada para diferentes cenários.

## 4.1.2.3 Fase 3

Na última fase de simulações, continuou-se a testar o algoritmo com restrição de ruído sonoro, porém, desta vez, variando a localização e quantidade dos pontos receptores. Foram testadas otimizações com um e quatro pontos receptores fora do perímetro do parque eólico, simulando cenários mais condizentes com a realidade.

Ademais, foram feitas três otimizações completas na fase 1 para cada uma das configurações de 16, 20 e 36 aerogeradores no parque eólico. Das nove simulações totais, definiu-se o melhor conjunto de posição inicial randômica de cada configuração, que foi utilizado como posicionamento inicial dos demais cenários simulados.

Novamente, três simulações para cada cenário foram feitas, dessa vez com as posições iniciais das turbinas pré-estabelecidas, descartando os dois piores desempenhos.

Na fase 2 e fase 3, foram feitas novas simulações, repetindo-se três vezes o processo de otimização para cada situação, mantendo os parâmetros estabelecidos e compilando os melhores desempenhos para cada configuração de aerogeradores.

# **5 RESULTADOS**

Neste capítulo, serão apresentados os resultados das simulações realizadas em cada uma das fases de teste descritas no capítulo anterior. Especificamente, apresentam-se os comportamentos das otimizações ao longo das iterações, as posições dos aerogeradores antes e depois de cada simulação, e o Nível de Pressão Sonora (*NPS*) através do mapa de ruído sonoro do posicionamento otimizado das turbinas referente a um ou mais pontos de observação. É importante ressaltar que em todas as simulações realizadas, o critério de parada utilizado foi de 50 iterações em sequência sem alterações no resultado da otimização; logo, quando atinge-se esta condição o algoritmo é interrompido.

# 5.1 Posicionamentos uniformes não otimizados

Um passo anterior ao de apresentação dos resultados da fase 1, é o de apresentação dos resultados dos testes com configurações de posicionamento das turbinas eólicas uniformemente distribuídas, conforme citado no capítulo anterior. Dessa forma, o número de turbinas analisadas foi o mesmo utilizado nos três cenários das simulações dos demais testes, porém, com posicionamento inicial uniforme e sem aplicação de rotinas de otimização.

A figura 5.1 apresenta os três cenários simulados com 16, 20 e 36 turbinas eólicas, respectivamente. Esse tipo de posicionamento é comum à grande parte dos primeiros parques eólicos instalados. Os resultados da produção de energia e dos níveis de pressão sonora para um receptor localizado dentro do parque (x = 2000 m e y = 2000 m), podem ser acompanhados através da tabela 5.1.

A tabela 5.1 indica a produção de energia para as configurações com 16, 20 e 36 turbinas eólicas, respectivamente, distribuídas uniformemente ao longo do perímetro do parque eólico. É importante ressaltar que os níveis de pressão sonora registrados em um ponto de observação, localizado no centro do perímetro, excedem o limite de 45 dB(A) em todos os cenários.

Os resultados das simulações com turbinas eólicas posicionadas uniformemente serão fundamentais para as posteriores comparações com configurações otimizadas de posição.



(a) Parque com 16 turbinas eólicas



(b) Parque com 20 turbinas eólicas



(c) Parque com 36 turbinas eólicas

Figura 5.1 - Cenários com posicionamentos uniformes não otimizados.

PAE (GWh)	NPS (dB(A))	Aerogeradores	Ruído excedido (dB(A))
157,54	49,4	16	4,4
195,19	50,3	20	5,3
338,69	52,4	36	7,4

Tabela 5.1 – Cenários simulados para turbinas distribuídas uniformemente.

# 5.2 Resultados da Fase 1

# 5.2.1 Otimização sem restrição de ruído sonoro para 16 aerogeradores

Na figura 5.2 é apresentado o posicionamento inicial e o posicionamento otimizado para o melhor rendimento de um parque eólico com 16 aerogeradores, sob as condições de vento apresentadas neste trabalho. O processo de otimização pode ser acompanhado na figura 5.3, onde fica disposto o comportamento da produção anual de energia do parque eólico a cada iteração. Já na figura 5.4, apresenta-se o mapa de ruído sonoro do posicionamento otimizado com um ponto de observação localizado no interior do parque.



Figura 5.2 – Otimização do posicionamento com 16 aerogeradores - sem restrição de ruído sonoro.



Figura 5.3 – Processo de otimização para 16 aerogeradores - sem restrição de ruído sonoro.



Figura 5.4 – Nível de pressão sonora para 16 aerogeradores - sem restrição de ruído sonoro.

#### 5.2.2 Otimização sem restrição de ruído sonoro para 20 aerogeradores

Assim como nas figuras referentes à otimização para 16 turbinas, os resultados de validação para 20 aerogeradores são mostrados a seguir. A figura 5.5 apresenta o posicionamento inicial e o posicionamento otimizado para o melhor rendimento de um parque eólico com 20 aerogeradores. O processo de otimização é mostrado na figura 5.6, com a relação de produção de energia pelo número de iterações e a figura 5.7, apresenta o mapa de ruído sonoro do posicionamento otimizado.



(a) Posicionamento Inicial

(b) Posicionamento Otimizado

Figura 5.5 – Otimização do posicionamento com 20 aerogeradores - sem restrição de ruído sonoro.



Figura 5.6 – Processo de otimização para 20 aerogeradores - sem restrição de ruído sonoro.



Figura 5.7 – Nível de pressão sonora para 20 aerogeradores - sem restrição de ruído sonoro.

### 5.2.3 Otimização sem restrição de ruído sonoro para 36 aerogeradores

Para finalizar a fase 1 dos testes do algoritmo, pode-se acompanhar, através da figura 5.8, o posicionamento inicial e o posicionamento otimizado para o melhor rendimento de um parque eólico com 36 aerogeradores. O processo de otimização é apresentado pela figura 5.9 e o mapa de ruído sonoro do posicionamento otimizado é mostrado na figura 5.10.



Figura 5.8 – Otimização do posicionamento com 36 aerogeradores - sem restrição de ruído sonoro.



Figura 5.9 – Processo de otimização para 36 aerogeradores - sem restrição de ruído sonoro.



Figura 5.10 – Nível de pressão sonora para 36 aerogeradores - sem restrição de ruído sonoro.

### 5.2.4 Compilação dos resultados para a Fase 1

Nas figuras geradas a partir dos resultados encontrados nas simulações da fase 1, podemos destacar alguns pontos importantes. Pode-se ver que, independente do número de turbinas eólicas incluídas no processo, o algoritmo conclui a otimização. Vale destacar que o tempo de simulação acompanha o número de turbinas inseridas no parque, logo, quanto mais aerogeradores, mais tempo a simulação irá consumir. Caso o número de aerogeradores seja aumentado ainda mais, as restrições de proximidade entre eles, bem como o perímetro do parque eólico não permitiriam uma solução viável, sendo necessários ajustes nestas restrições.

PAE (GWh)	NPS (dB(A))	Aerogeradores	Ruído excedido (dB(A))
174,85	49,2	16	4,2
226,04	54,9	20	9,9
384,12	52,6	36	7,6

Tabela 5.2 – Cenário de otimização sem restrição de ruído sonoro.

A tabela 5.2 indica que, quando a restrição de ruído sonoro não é considerada, os níveis de pressão sonora registrados nos pontos de observação excedem o limite de 45 dB(A) em todos os cenários. No entanto, a produção de energia aumenta em 1,21%, 2,77% e 3,25% nas configurações de 16, 20 e 36 turbinas eólicas, respectivamente, após o processo de otimização. Para a simulação com 16 aerogeradores, registrou-se um nível de ruído sonoro excedido em 4,2 dB(A), que sobe para 7,6 dB(A) na simulação com 36 turbinas e para 9,9 dB(A) na configuração de 20 turbinas, atingindo o maior nível de ruído sonoro na fase 1.

Quando comparamos a energia produzida em configurações de posicionamento uniforme com o layout após o processo de otimização, temos uma diferença ainda maior. A tabela 5.3 mostra essa comparação e, em termos percentuais, a produção de energia tem um ganho de 10,1%, 15,8% e 13,4% nos parques com 16, 20 e 36 aerogeradores, respectivamente. Os níveis de ruído sonoro excederam os 45 dB(A) e apresentaram valores bem próximos dos cenários uniformes.

Tabela 5.3 – Comparação dos posicionamentos uniformes com a otimização.

Aerogeradores	PAE Uniforme (GWh)	NPS (dB(A))	PAE Otimizada (GWh)	NPS (dB(A))
16	157,54	49,4	174,85	49,2
20	195,19	50,3	226,04	54,9
36	338,69	52,4	384,12	52,6

No mapa de ruído sonoro apresentado para cada cenário, a distribuição é obtida através da quantificação do nível de pressão sonora em cada uma das fontes de ruído sonoro e, em seguida, é aplicado o método de propagação de onda esférica, cuja intensidade do nível de ruído sonoro varia de acordo com a equação da esfera, como mostrado na seção 2.2 deste trabalho.

## 5.3 Resultados da Fase 2

#### 5.3.1 Otimização com restrição de ruído sonoro para 16 aerogeradores

Assim como na fase anterior, a figura 5.11 apresenta o posicionamento inicial e o posicionamento otimizado para o melhor rendimento de um parque eólico com 16 aerogeradores sob a condição de nível de pressão sonora limitado a 45 dB(A). O processo de otimização pode ser acompanhado através da figura 5.12, que mostra o comportamento da produção anual de energia do parque eólico a cada iteração. Já a figura 5.13, apresenta o mapa de ruído sonoro do posicionamento otimizado com ponto de observação inserido nas mesmas coordenadas da fase 1. Para esta simulação, a produção anual de energia foi de 174,28 GWh, limitada a um nível de pressão sonora máximo de 44,9 dB(A).



Figura 5.11 – Otimização de Posicionamento com 16 aerogeradores - com restrição de ruído sonoro.



Figura 5.12 – Processo de otimização com 16 aerogeradores - com restrição de ruído sonoro.



Figura 5.13 – Nível de pressão sonora para 16 aerogeradores - com restrição de ruído sonoro.

#### 5.3.2 Otimização com restrição de ruído sonoro para 20 aerogeradores

Neste caso, a figura 5.14 apresenta o posicionamento inicial e o posicionamento otimizado para o melhor rendimento de um parque eólico com 20 aerogeradores. O processo de otimização é mostrado na figura 5.15, com a relação de produção de energia pelo número de iterações e a figura 5.16, apresenta o mapa de ruído sonoro do posicionamento otimizado. Esta simulação retornou uma produção anual de energia de 225,11 GWh, atingindo um nível de pressão sonora máximo de 44,7 dB(A).



(a) Posicionamento Inicial

(b) Posicionamento Otimizado

Figura 5.14 – Otimização de posicionamento com 20 aerogeradores - com restrição de ruído sonoro.



Figura 5.15 – Processo de otimização para 20 aerogeradores - com restrição de ruído sonoro.



Figura 5.16 – Nível de pressão sonora para 20 aerogeradores - com restrição de ruído sonoro.

## 5.3.3 Compilação dos resultados para a Fase 2

Para o primeiro caso em que as restrições de ruído sonoro são aplicadas, é importante destacar a posição do ponto de observação. Uma área residencial localizada dentro do perímetro de um parque eólico é muito improvável, porém, esta situação força o algoritmo a encontrar um ponto de ótimo em condições mais complexas. Essa complexidade fica evidente pelo tempo total de otimização e pelo número de iterações até que se atingissem os critérios de parada.

Tabela 5.4 – Cenário de otimização com restrição de ruído sonoro e um ponto de observação dentro do perímetro do parque.

PAE (GWh)	NPS (dB(A))	Aerogeradores	Ruído excedido (dB(A))
174.28	44.9	16	-0.1
225.11	44.7	20	-0.3

A tabela 5.4 indica que, quando é aplicada a restrição de ruído sonoro, o níveis de pressão sonora registrados nos pontos de observação ficam limitados a 45 dB(A) em todos os cenários. Ademais, a produção de energia aumenta em 1,03% e 2,35% nas configurações de 16 e 20 turbinas eólicas, respectivamente, após o processo de otimização. A produção de energia é ligeiramente em relação ao caso sem a restrição, uma diferença de cerca de 0,32% para 16 aerogeradores e cerca de 0,41% para 20 aerogeradores.

#### 5.4 Resultados da Fase 3

Na fase 3, os resultados são apresentados para situações mais condizentes com a realidade, onde os pontos de observação estão localizados fora do perímetro do parque eólico, simulando áreas residenciais ou afins. Dessa forma, mantiveram-se as restrições de ruído sonoro e os resultados das otimizações para 1 e 4 pontos de observação fora do perímetro de um parque eólico com 20 aerogeradores são apresentados a seguir.

5.4.1 Otimização restrita - 1 ponto de observação fora do perímetro do parque

A figura 5.17 apresenta o posicionamento inicial e o posicionamento otimizado para o melhor rendimento de um parque eólico cujo ponto de observação atende às coordenadas x = 4500 m e y = 2000 m. O processo de otimização é mostrado na figura 5.18, com a relação de produção de energia pelo número de iterações e, a figura 5.19 apresenta o mapa de ruído sonoro do posicionamento otimizado, assim como nos outros



casos. Este rearranjo dos aerogeradores resultou em uma produção anual de energia de 225,89 GWh, com um nível de pressão sonora máximo mais baixo, de 41,3 dB(A).

Figura 5.17 – Otimização de posicionamento com 20 aerogeradores e 1 ponto de observação fora do perímetro do parque.



Figura 5.18 – Processo de otimização para 20 aerogeradores com 1 ponto de observação fora do perímetro do parque.



Figura 5.19 – Nível de pressão sonora para 20 aerogeradores com 1 ponto de observação fora do perímetro do parque.

5.4.2 Otimização restrita - 4 pontos de observação fora do perímetro do parque

A figura 5.20 apresenta o posicionamento inicial e o posicionamento otimizado para o melhor rendimento de um parque eólico cujos pontos de observação atendem às coordenadas:

- Ponto  $1 \to x = 4500 \ m \ e \ y = 2000 \ m;$
- Ponto  $2 \to x = 2000 \ m \ e \ y = -500 \ m;$
- Ponto  $3 \to x = -500 \ m \ e \ y = 2000 \ m;$
- Ponto  $4 \to x = 2000 \ m \ e \ y = 4500 \ m$ .

O processo de otimização é mostrado na figura 5.21, com a relação de produção de energia pelo número de iterações e, a figura 5.22 apresenta o mapa de ruído sonoro do posicionamento otimizado. Ao final do processo de otimização, o resultado foi uma produção anual de energia de 225,56 GWh, e os nível de pressão sonora máximo para cada um dos 4 pontos de observação limitados a 41,1 dB(A), 43,4 dB(A), 44,6 dB(A) e 41,6 dB(A), respectivamente.



(a) Posicionamento Inicial

(b) Posicionamento Otimizado

Figura 5.20 – Otimização de posicionamento com 20 aerogeradores e 4 pontos de observação fora do perímetro do parque.


Figura 5.21 – Processo de otimização para 20 aerogeradores com 4 pontos de observação fora do perímetro do parque.



Figura 5.22 – Nível de pressão sonora para 20 aerogeradores com 4 pontos de observação fora do perímetro do parque.

## 5.4.3 Compilação dos resultados para a Fase 3

Com as simulações para pontos de observação fora do perímetro do parque eólico, pode-se evidenciar a versatilidade da formulação. Uma rápida análise dos processos de otimização para 1 ponto e 4 pontos, aponta uma diferença no desempenho do algoritmo. No primeiro caso, o número de iterações segue a média praticada nas simulações anteriores, atingindo um bom resultado de otimização. Já no segundo caso, os critérios de parada foram atingidos de maneira mais rápida, conseguindo também um bom resultado de Produção Anual de Energia (PAE). Isso se deve pela complexidade do espaço de busca quando se aumenta o número de pontos de observação, ou seja, quando o algoritmo consegue atingir um certo valor de produção de energia, as possibilidades de otimização deste valor diminuem a cada nova iteração. Dessa forma, o processo de otimização para 4 pontos esgotou essas possibilidades com menos de 300 iterações, retornando assim, um valor de PAE menor que o valor do primeiro caso.

Tabela 5.5 – Cenário de otimização com restrição de ruído sonoro e 1 ponto de observação fora do perímetro do parque.

PAE (GWh)	Aerogeradores	Receptor	NPS (dB(A))	Ruído excedido (dB(A))
225.89	20	1	41.3	-3.7

Tabela 5.6 – Cenário de otimização com restrição de ruído sonoro e 4 pontos de observação fora do perímetro do parque.

PAE (GWh)	Aerogeradores	Receptor	NPS (dB(A))	Ruído excedido (dB(A))
225.56	20	1	41.1	-3.9
		2	43.4	-1.6
		3	44.6	-0.4
		4	41.6	-3.4

As tabelas 5.5 e 5.6 indicam que o níveis de pressão sonora registrados nos pontos de observação ficam limitados a 45 dB(A) em ambos os casos. A produção de energia aumenta em 2,7% e 2,55% nas configurações com 1 ponto e 4 pontos de observação, respectivamente, após o processo de otimização. A produção de energia para 1 ponto é ligeiramente maior em relação ao caso com 4 pontos, uma diferença de cerca de 0,15%.

# 6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste estudo, foi proposta uma abordagem baseada em Algoritmo Genético para o problema de otimização do posicionamento de turbinas eólicas considerando restrição de ruído sonoro. Para tal, as simulações foram divididas em três fases com objetivos distintos e complementares. Na primeira fase, foi testada a escalabilidade do algoritmo com simulações de 16, 20 e 36 turbinas eólicas em um parque com dimensões de 4 por 4 km sem restrição de ruído sonoro. Na fase seguinte, as simulações foram feitas para 16 e 20 aerogeradores, aplicando a restrição de ruído sonoro a um ponto de observação inserido no centro do perímetro do parque, x = 2000 m e y = 2000 m. Na última fase, foram simulados dois casos com 1 e 4 pontos de observação fora do perímetro do parque, na tentativa de reproduzir cenários mais próximos da realidade.

Inicialmente, durante as simulações da fase 1, notou-se que os arranjos iniciais aleatórios de aerogeradores apresentaram melhores rendimentos em relação a arranjos pré-definidos, dispostos em fileiras e igualmente espaçados, confirmando o que já havia sido encontrado em trabalhos anteriores. Dessa forma, as simulações subsequentes seguiram com posicionamento inicial randômico. Ademais, considerando apenas as restrições básicas do problema, como a distância mínima entre as turbinas e os limites de perímetro do parque, o algoritmo teve bom desempenho, mesmo para um número de aerogeradores maior. A produção de energia aumentou em todos os cenários, porém houve excesso de ruído sonoro em todas as simulações.

Quando a restrição de ruído sonoro é considerada, as possibilidades de rearranjo dos aerogeradores fica mais limitada e em todos os cenários simulados notou-se uma redução do rendimento do parque eólico em relação ao caso em que a restrição não é aplicada. No entanto, a produção de energia continuou sendo otimizada e esta pequena redução no rendimento é justificada pela adequação dos níveis de ruído sonoro, que não excederam 45 dB(A) em nenhum dos cenários simulados. Dessa forma, fica evidente a execução adequada do algoritmo na otimização do posicionamento das turbinas eólicas, respeitando as restrições impostas, atingindo, assim, o objetivo estabelecido.

Considera-se que os resultados obtidos para o processo de modelagem e para os cenários de otimização simulados são bons. Entretanto, devido às diferentes abordagens existentes na elaboração do algoritmo de otimização, considera-se possível obter melhores resultados testando outros algoritmos ou, até mesmo, modificando algumas características do próprio algoritmo genético. Por exemplo, a aplicação da variação conhecida como *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II (NSGA-II)* (Kirchner-Bossi; Porté-Agel, 2021), já apresentou resultados expressivos em otimizações multi-objetivo.

Ao longo do desenvolvimento deste trabalho, fica evidenciada a importância de projetar cada etapa da modelagem do problema, as variáveis que serão consideradas, as restrições trabalhadas e, sobretudo, o algoritmo de otimização aplicado. Para problemas complexos, a qualidade e a quantidade de dados disponíveis é fundamental para o bom desempenho do processo de otimização.

Para trabalhos futuros, algumas contribuições importantes podem ser feitas:

- Avaliar o comportamento das otimizações para intervalos menores de direção e velocidade de vento;
- Estudar a influência da variação de outras características físicas do problema, tais como a diferença de altura entre as turbinas eólicas, instalação do parque em solos irregulares e com barreiras acústicas naturais, entre outras;
- Adicionar restrições para avaliação dos custos de investimento e analisar como estas se relacionam com os níveis de pressão sonora;
- Testar novos algoritmos de otimização, tais como Enxame de partículas, que apresenta bons resultados em otimizações complexas, e comparar com os resultados deste estudo;
- Testar outros modelos de efeito esteira e comparar os níveis de rendimento dos geradores eólicos.
- Analisar os mesmos cenários descritos neste estudo utilizando otimização multiobjetivo, visando a maximização da produção de energia e a minimização do nível de pressão sonora.

# REFERÊNCIAS

ABNT. Acústica: avaliação do ruído em áreas habitadas, visando o conforto da comunidade: NBR 10151. [S.l.]: Associação Brasileira de Normas Técnicas., 2000.

Cao, J. F.; Zhu, W. J.; Shen, W. Z.; Sørensen, J. N.; Sun, Z. Y. Optimizing wind energy conversion efficiency with respect to noise: A study on multi-criteria wind farm layout design. **Renewable Energy**, v. 159, p. 468–485, 2020.

Cao, L.; Ge, M.; Gao, X.; Du, B.; Li, B.; Huang, Z.; Liu, Y. Wind farm layout optimization to minimize the wake induced turbulence effect on wind turbines. **Applied Energy**, v. 323, p. 119599, 2022.

Easton, R. L. Fourier methods in imaging. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2010.

Ekonomou, L.; Lazarou, S.; Chatzarakis, G. E.; Vita, V. Estimation of wind turbines optimal number and produced power in a wind farm using an artificial neural network model. **Simulation Modelling Practice and Theory**, v. 21, n. 1, p. 21–25, 2012.

Elkinton, C. N.; Manwell, J. F.; McGowan, J. G. Algorithms for offshore wind farm layout optimization. **Wind Engineering**, v. 32, n. 1, p. 67–84, 2008.

Gao, X.; Yang, H.; Lin, L.; Koo, P. Wind turbine layout optimization using multipopulation genetic algorithm and a case study in hong kong offshore. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 139, p. 89–99, 2015.

Gayo, J. L. P. Acústica ambiental. [S.1.]: Universidad de Oviedo, 2006.

González, J. S.; Payán, M. B.; Santos, J. M. R. Optimal design of neighbouring offshore wind farms: A co-evolutionary approach. **Applied Energy**, v. 209, p. 140–152, 2018.

González, J. S.; Payán, M. B.; Santos, J. M. R.; González-Longatt, F. A review and recent developments in the optimal wind-turbine micro-siting problem. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 30, p. 133–144, 2014.

Grady, S.; Hussaini, M.; Abdullah, M. M. Placement of wind turbines using genetic algorithms. **Renewable energy**, v. 30, n. 2, p. 259–270, 2005.

GWEC, G. W. E. C. Global wind report 2022. Global Wind Energy Council: Brussels, Belgium, 2022.

Hasager, C. B.; Rasmussen, L.; Peña, A.; Jensen, L. E.; Réthoré, P.-E. Wind farm wake: The horns rev photo case. **Energies**, v. 6, n. 2, p. 696–716, 2013.

Holland, J. H. Adaptation in Natural and Artificial Systems. Ann Arbor, MI: University of Michigan Press, 1975. Second edition, 1992.

Hou, P.; Hu, W.; Chen, C.; Soltani, M.; Chen, Z. Optimization of offshore wind farm layout in restricted zones. **Energy**, v. 113, p. 487–496, 2016.

Huang, H.-S. Distributed genetic algorithm for optimization of wind farm annual profits. In: IEEE. **2007 International Conference on Intelligent Systems Applications to Power Systems**. [S.1.], 2007. p. 1–6.

ISO. Acoustics - Attenuation of sound during propagation outdoors - Part 2: General method of calculation. [S.1.], 2019.

Jensen, N. A note on wind generator interaction (risø-m-2411). **Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark**, 1983.

De Jong, K. A. **An analysis of the behavior of a class of genetic adaptive systems**. [S.l.]: Doctoral Thesis, University of Michigan., 1975.

Jourieh, M.; Massouh, F.; Kuszla, P.; Dobrev, I.; Maalouf, B. Impact of wind turbines interactions on power production. **19ème Congrès Français De Mécanique, Marseille**, 2009.

Katoch, S.; Chauhan, S. S.; Kumar, V. A review on genetic algorithm: past, present, and future. **Multimedia Tools and Applications**, v. 80, p. 8091–8126, 2021.

Khanali, M.; Ahmadzadegan, S.; Omid, M.; Keyhani Nasab, F.; Chau, K. W. Optimizing layout of wind farm turbines using genetic algorithms in Tehran province, Iran. **International Journal of Energy and Environmental Engineering**, v. 9, n. 4, p. 399–411, 2018.

King, R. N.; Dykes, K.; Graf, P.; Hamlington, P. E. Optimization of wind plant layouts using an adjoint approach. **Wind Energy Science**, v. 2, n. 1, p. 115–131, 2017.

Kirchner-Bossi, N.; Porté-Agel, F. Wind farm area shape optimization using newly developed multi-objective evolutionary algorithms. **Energies**, v. 14, n. 14, 2021.

Kuo, J. Y.; Romero, D. A.; Beck, J. C.; Amon, C. H. Wind farm layout optimization on complex terrains–integrating a cfd wake model with mixed-integer programming. **Applied Energy**, v. 178, p. 404–414, 2016.

Kusiak, A.; Song, Z. Design of wind farm layout for maximum wind energy capture. **Renewable energy**, v. 35, n. 3, p. 685–694, 2010.

Kwong, W. Y.; Zhang, P. Y.; Romero, D.; Moran, J.; Morgenroth, M.; Amon, C. Wind farm layout optimization considering energy generation and noise propagation. In: American Society of Mechanical Engineers. International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. [S.1.], 2012. v. 45028, p. 323–332.

Lamancusa, J. S. Outdoor sound propagation. Noise control, 2009.

Luz, E. P. d. *et al.* Simulação do ruído de aerogeradores em parques eólicos. **Monografia.** Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, 2018.

Maia, D. S. N. *et al.* Ruído de parques eólicos: análise e caracterização. Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2009/2010 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2010. Manwell, J.; McGowan, J.; Rogers, A. Aerodynamics of wind turbines. **Wind energy** explained, v. 2, p. 91–155, 2009.

Marmidis, G.; Lazarou, S.; Pyrgioti, E. Optimal placement of wind turbines in a wind park using monte carlo simulation. **Renewable Energy**, v. 33, n. 7, p. 1455–1460, 2008.

Martínez, A. C. Principios de conversión de la energia eólica. In: Rueda. Sistemas eólicos de producción de energía eléctrica. [S.l.], 2003. p. 28–95.

Mayo, M.; Daoud, M. Informed mutation of wind farm layouts to maximise energy harvest. **Renewable Energy**, v. 89, p. 437–448, 2016.

MirHassani, S. A.; Yarahmadi, A. Wind farm layout optimization under uncertainty. **Renewable Energy**, v. 107, p. 288–297, 2017.

Mosetti, G.; Poloni, C.; Diviacco, B. Optimization of wind turbine positioning in large windfarms by means of a genetic algorithm. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 51, n. 1, p. 105–116, 1994.

Nyborg, C. M.; Fischer, A.; Réthoré, P.-E.; Feng, J. Optimization of wind farm operation with a noise constraint. **Wind Energy Science**, v. 8, n. 2, p. 255–276, 2023.

Ozturk, U. A.; Norman, B. A. Heuristic methods for wind energy conversion system positioning. **Electric Power Systems Research**, v. 70, n. 3, p. 179–185, 2004.

Park, J.; Law, K. H. Layout optimization for maximizing wind farm power production using sequential convex programming. **Applied energy**, v. 151, p. 320–334, 2015.

Park, J. W.; An, B. S.; Lee, Y. S.; Jung, H.; Lee, I. Wind farm layout optimization using genetic algorithm and its application to daegwallyeong wind farm. **JMST Advances**, v. 1, n. 4, p. 249–257, 2019.

Pillai, A. C.; Chick, J.; Khorasanchi, M.; Barbouchi, S.; Johanning, L. Application of an offshore wind farm layout optimization methodology at middelgrunden wind farm. **Ocean Engineering**, v. 139, p. 287–297, 2017.

Quaeghebeur, E.; Bos, R.; Zaaijer, M. B. Wind farm layout optimization using pseudo-gradients. **Wind Energy Science**, v. 6, n. 3, p. 815–839, 2021.

Renkema, D. J. Validation of wind turbine wake models: Using wind farm data and wind tunnel measurements. 2007.

Rivas, R. A.; Clausen, J.; Hansen, K. S.; Jensen, L. E. Solving the turbine positioning problem for large offshore wind farms by simulated annealing. **Wind Engineering**, v. 33, n. 3, p. 287–297, 2009.

Salcedo-Sanz, S.; Gallo-Marazuela, D.; Pastor-Sánchez, A.; Carro-Calvo, L.; Portilla-Figueras, A.; Prieto, L. Offshore wind farm design with the coral reefs optimization algorithm. **Renewable Energy**, v. 63, p. 109–115, 2014.

Samorani, M. The wind farm layout optimization problem. In: Handbook of wind power systems. [S.l.]: Springer, 2013. p. 21–38.

Şişbot, S.; Turgut, Ö.; Tunç, M.; Çamdalı, Ü. Optimal positioning of wind turbines on gökçeada using multi-objective genetic algorithm. Wind Energy: An International Journal for Progress and Applications in Wind Power Conversion Technology, v. 13, n. 4, p. 297–306, 2010.

Song, M.; Chen, K.; He, Z.; Zhang, X. Bionic optimization for micro-siting of wind farm on complex terrain. **Renewable Energy**, v. 50, p. 551–557, 2013.

Song, Z.; Zhang, Z.; Chen, X. The decision model of 3-dimensional wind farm layout design. **Renewable Energy**, v. 85, p. 248–258, 2016.

Sorkhabi, S. Y. D.; Romero, D. A.; Yan, G. K.; Gu, M. D.; Moran, J.; Morgenroth, M.; Amon, C. H. The impact of land use constraints in multi-objective energy-noise wind farm layout optimization. **Renewable Energy**, v. 85, p. 359–370, 2016.

Tingey, E. B.; Ning, A. Trading off sound pressure level and average power production for wind farm layout optimization. **Renewable Energy**, v. 114, p. 547–555, 2017.

Turner, S.; Romero, D.; Zhang, P.; Amon, C.; Chan, T. A new mathematical programming approach to optimize wind farm layouts. **Renewable Energy**, v. 63, p. 674–680, 2014.

Vér, I.; Beranek, L. Noise and Vibration Control Engineering: Principles and Applications. Wiley, 2005. ISBN 9780471449423.

Vermeer, L.; Sørensen, J. N.; Crespo, A. Wind turbine wake aerodynamics. **Progress in aerospace sciences**, v. 39, n. 6-7, p. 467–510, 2003.

Wan, C.; Wang, J.; Yang, G.; Zhang, X. Optimal micro-siting of wind farms by particle swarm optimization. In: Springer. **International Conference in Swarm Intelligence**. [S.1.], 2010. p. 198–205.

Wu, X.; Hu, W.; Huang, Q.; Chen, C.; Jacobson, M. Z.; Chen, Z. Optimizing the layout of onshore wind farms to minimize noise. **Applied Energy**, v. 267, p. 114896, 2020.

Yang, K.; Kwak, G.; Cho, K.; Huh, J. Wind farm layout optimization for wake effect uniformity. **Energy**, v. 183, p. 983–995, 2019.

Zhang, P. Topics in wind farm layout optimization: analytical wake models, noise propagation, and energy production [master's thesis]. **Toronto, Canada: University of Toronto**, 2013.

# **APÊNDICE A – CÓDIGOS EM LINGUAGEM PYTHON**

### A.1 Rotina de otimização com algoritmo genético

```
import numpy as np
import pandas as pd
from ruído import sound_pressure_level
from datetime import datetime
import os
import warnings
warnings. filterwarnings ("ignore")
def check_distance_conflict (coords, coords_i):
    distance_mat = np. sqrt (np.sum(np.power((coords - coords_i), 2), axis=1))
    if (np.sum(distance_mat <= 400) > 1):
        return False
    else :
        return True
def randomly_create_windfarm_grid():
   N_TURBINES = n_aero
   def get_coordinates (random_shape):
        shape = np. array ([random_shape, random_shape])
        width_ratio = shape[1] / shape[0]
        num_y = np.int32(np. sqrt (N_TURBINES / width_ratio)) + 1
        num_x = np.int32(N_TURBINES / num_y) + 1
        x = np. linspace (0., shape[1]-1, num_x, dtype=np. float32)
        y = np. linspace (0, shape[0]-1, num_y, dtype=np. float32)
        coords = np. stack (np. meshgrid(x, y), -1). reshape (-1,2)
        init_dist = np.min((x[1]-x[0], y[1]-y[0]))
        MIN_DIST = 400
```

max\_movement = (init\_dist - MIN\_DIST)/2

```
noise = np.random.uniform(low=-max_movement, high=max_movement, size=(len(coords),
            2))
        coords += noise
        coords [:, 0] = coords [:, 0] + np.abs(np.min(coords [:, 0]))
        coords [:, 1] = coords [:, 1] + np.abs(np.min(coords [:, 1]))
        coords2 = coords[np.random.choice( list (range(0, coords.shape[0])),
            size=N_TURBINES, replace=False)]
        return coords2
    while(True):
        random_shape = np.random.choice([3600, 3650, 3700], size=1)
        coords2 = get_coordinates (random_shape[0])
        if ((np.sum([ check_distance_conflict (coords2, coords2[i]) for i in
            range(coords2.shape[0]) ]) == N TURBINES) & (np.max(coords2) <= 3900) &
            (np.min(coords2) \ge 0)):
            return coords2 + 50
def generate_populations ( population_size ):
   POPs_MATRIX = np.zeros((population_size, n_aero, 2))
    for i in range( population_size ):
        POPs_MATRIX[i] = randomly_create_windfarm_grid()
    return POPs_MATRIX
def loadPowerCurve(power_curve_file_name):
    powerCurve = pd.read_csv(power_curve_file_name, sep=', ', dtype = np. float32)
    powerCurve = powerCurve.to_numpy(dtype = np.float32)
    return(powerCurve)
def binWindResourceData(wind_data_folder_name):
    final = pd.DataFrame()
    path = os.path.join(wind_data_folder_name, "wind_data_2009.csv")
    temp = pd.read_csv(path)
    final = pd.concat([ final , temp], axis=0)
   # carrega os dados de vento e extrai os valores das colunas 'drct' e 'sped'
    wind_resource = final [['drct', 'sped']].to_numpy(dtype = np.float32)
```

```
= np. roll (np.arange(10, 361, 40, dtype=np. float32), 1)
    slices drct
    n\_slices\_drct = slices\_drct .shape[0]
    # intervalos de velocidade
    slices_sped = [0.0, 4.0, 8.0, 12.0, 16.0, 20.0, 24.0, 28.0, 32.0]
    n\_slices\_sped = len(slices\_sped) - 1
    binned_wind = np.zeros(( n_slices_drct , n_slices_sped ), dtype = np.float32 )
    # armazana os pontos de dados em instâncias de vento
    for i in range( n_slices_drct ):
        for j in range(n_slices_sped):
            foo = wind_resource[(wind_resource [:,0] == slices_drct [i])]
            foo = foo[(foo [:,1] \ge slices_sped [j]) & (foo [:,1] < slices_sped [j+1])]
            binned_wind[i, j] = foo.shape[0]
    wind_inst_freq = binned_wind/np.sum(binned_wind)
    wind_inst_freq
                    = wind_inst_freq . ravel ()
    return( wind_inst_freq )
def searchSorted (lookup, sample_array):
    lookup_middles = lookup[1:] - np. diff (lookup.astype('f'))/2
    idx1 = np. searchsorted (lookup_middles, sample_array)
    indices = np.arange(lookup.shape[0])[idx1]
    return indices
def preProcessing (power_curve):
    # número de turbinas
    n_turbs = n_aero
    slices drct
                  = np. roll (np.arange(10, 361, 40, dtype=np. float32), 1)
    n_slices_drct = slices_drct .shape[0]
    slices_sped = [0.0, 4.0, 8.0, 12.0, 16.0, 20.0, 24.0, 28.0, 32.0]
    n\_slices\_sped = len(slices\_sped) - 1
    # número de instâncias de vento
    n_wind_instances = ( n_slices_drct )*( n_slices_sped )
```

```
wind_instances = np.zeros ((n_wind_instances,2), dtype=np.float32)
    counter = 0
    for i in range( n_slices_drct ):
        for j in range(n_slices_sped):
            wind_drct = slices_drct [i]
            wind_sped = ( slices_sped [j] + slices_sped [j+1])/2
            wind_instances [ counter ,0] = wind_sped
            wind_instances[counter,1] = wind_drct
            counter += 1
    wind_drcts = np. radians (wind_instances [:,1] - 90)
    \cos_{dir} = np.\cos(wind_{drcts}).reshape(n_wind_{instances},1)
    sin_dir = np.sin(wind_drcts).reshape(n_wind_instances,1)
   wind sped stacked = np.column stack([wind instances [:,0]] * n turbs)
    indices = searchSorted (power_curve [:,0], wind_instances [:,0])
   C_t
           = power_curve[indices,1]
    C_t
            = np.column_stack([C_t]*(n_turbs*n_turbs))
   C t
            = C_t.reshape(n_wind_instances, n_turbs, n_turbs)
   return(n_wind_instances, cos_dir, sin_dir, wind_sped_stacked, C_t)
# rotina para cálculo da produção anual de energia
def getAEP(turb_rad, turb_coords, power_curve, wind_inst_freq,
            n_wind_instances, cos_dir, sin_dir, wind_sped_stacked, C_t):
    n turbs
                   = turb_coords.shape[0]
    assert n_turbs == n_aero
                    = np.zeros ((n_wind_instances, n_turbs, 2), dtype=np.float32)
    rotate coords
   # transformação das coordenadas. Rotação para coordenadas downwind/crosswind
    rotate_coords [:,:,0] = np.matmul(cos_dir,
        np. transpose (turb_coords [:,0]. reshape (n_turbs, 1))) - \
                           np.matmul(sin_dir,
                                np.transpose(turb_coords [:,1]. reshape(n_turbs,1)))
    rotate_coords [:,:,1] = np.matmul(sin_dir,
        np. transpose (turb_coords [:,0]. reshape(n_turbs,1))) +\
```

np.matmul(cos\_dir,

np. transpose (turb\_coords [:,1]. reshape(n\_turbs,1)))

```
x_dist = np.zeros((n_wind_instances, n_turbs, n_turbs), dtype=np.float32)
```

for i in range(n\_wind\_instances):

tmp = rotate\_coords [i ,:,0]. repeat (n\_turbs).reshape(n\_turbs, n\_turbs)
x\_dist[i] = tmp - tmp.transpose ()

y\_dist = np.zeros((n\_wind\_instances, n\_turbs, n\_turbs), dtype=np.float32)

for i in range(n\_wind\_instances):

tmp = rotate\_coords [i ,:,1]. repeat (n\_turbs).reshape(n\_turbs, n\_turbs)

 $y_dist[i] = tmp - tmp. transpose()$ 

```
y_dist = np.abs(y_dist)
```

```
# cálculo das contribuições dos dé ficits pelo Efeito Esteira
sped_deficit = (1-np. sqrt(1-C_t))*(( turb_rad /( turb_rad + 0.05*x_dist ))**2)
sped_deficit [(( x_dist <= 0) | (( x_dist > 0) & (y_dist > ( turb_rad + 0.05*x_dist ))))] = 0.0
sped_deficit_eff = np. sqrt(np.sum(np.square( sped_deficit ), axis = 2))
```

#### # velocidade de vento efetiva

wind\_sped\_eff = wind\_sped\_stacked\*(1.0- sped\_deficit\_eff )

indices = searchSorted (power\_curve [:,0], wind\_sped\_eff.ravel ())

power = power\_curve[indices ,2]

power = power.reshape(n\_wind\_instances, n\_turbs)

# produção de energia para uma instância de vento
power = np.sum(power, axis=1)

# soma da produção em todas as instâncias e conversão pelo número total de horas em um ano

AEP = 8760.0\*np.sum(power\*wind\_inst\_freq)

```
# converte MWh para GWh
AEP = AEP/1e3
```

```
return(AEP)
```

# rotina de preparação da otimização por algortimo genético

```
def select_N_best_layouts (POPs_MATRIX, top_n):
    AEP_array = []
    for counter, i in enumerate(range(POPs_MATRIX.shape[0])):
        turb_coords = POPs_MATRIX[i]
        AEP = getAEP(turb_rad, turb_coords, power_curve, wind_inst_freq, n_wind_instances,
            cos_dir, sin_dir, wind_sped_stacked, C_t)
        AEP_array.append(AEP)
    AEP_array = np. array (AEP_array)
    AEP_array_argsort = np. argsort (AEP_array*-1)
    return POPs_MATRIX[AEP_array_argsort[:top_n]], AEP_array[AEP_array_argsort]
def point_mutation(layout):
   max_{iter} = 0
    while(max iter <= 10):
        index = np.random.randint (low=-3, high=3, size=1)[0]
        layout_mutated = layout.copy()
        layout_mutated[index] = layout_mutated[index] + np.random.uniform(low=-10, high=10,
            size=2)
        if (np.sum([check_distance_conflict (layout_mutated, layout_mutated[i]) for i in
            range(layout_mutated.shape[0]) ]) == n_aero) & (np.max(layout_mutated) <= 3950) &
            (np.min(layout_mutated) >= 50):
            return layout_mutated
        max_iter+=1
    return layout
def cross_mutation(layout_male, layout_female):
    max iter = 0
    while(max_iter <= 10):
        layout_male_mutated, layout_female_mutated = layout_male.copy(), layout_female.copy()
        index_m, index_f = -1, -1
        while(index_m == index_f):
            index_m = np.random.randint(low=0, high=n_aero, size=1)[0]
            index_f = np.random.randint(low=0, high=n_aero, size=1)[0]
       x = layout_male_mutated[index_m]
       y = layout_female_mutated[index_f]
```

```
layout male mutated[index m][0] = y[0]
        layout_female_mutated[index_f][1] = x[1]
        condition1 = (np.sum([ check_distance_conflict (layout_male_mutated,
            layout_male_mutated[i]) for i in range(layout_male_mutated.shape[0])]) == n_aero)
             & (np.max(layout_male_mutated) <= 3950) & (np.min(layout_male_mutated) >= 50)
        condition2 = (np.sum([ check_distance_conflict (layout_female_mutated,
            layout_female_mutated[i]) for i in range(layout_female_mutated.shape[0])]) ==
            n_aero) & (np.max(layout_female_mutated) <= 3950) &
            (np.min(layout_female_mutated) >= 50)
        if ((condition1) & (condition2)):
            return layout_male_mutated, layout_female_mutated
        max iter += 1
    return layout_male, layout_female
def random_mutate_for_layout(layout):
    max_iter = 0
    while(max_iter <= 5):</pre>
        noise = np.random.uniform(low=-3, high=3, size=layout.shape)
        layout_mutated = layout + noise
        condition = (np.sum([ check_distance_conflict (layout_mutated, layout_mutated[i]) for i
            in range(layout_mutated.shape[0])]) == n_aero) & (np.max(layout_mutated) <= 3950)
            & (np.min(layout_mutated) \geq 50)
        if (condition):
            layout = layout_mutated.copy()
        max iter += 1
    return layout
def randomly_alter_the_layout (layout):
    max_{iter} = 0
    layout_mutated = layout.copy()
    while(max_iter <= 10):
        index_for_random_altration = np.random.randint(low=0, high=n_aero, size=1)[0]
        layout_mutated[index_for_random_altration] = np.random.uniform(low=50, high=3950,
             size =(1, 2))
        condition = (np.sum([ check_distance_conflict (layout_mutated, layout_mutated[i]) for i
            in range(layout_mutated.shape[0])]) == n_aero) & (np.max(layout_mutated) <= 3950)
```

```
& (np.min(layout_mutated) >= 50)
        if (condition):
            layout = layout_mutated.copy()
        max_iter += 1
   return layout
current_timestamp = str ( str ( datetime . now()). split (".") [0]. replace (":", "_"))
op_folder_path = os.path.join(os.getcwd(), current_timestamp)
if not os.path. exists (op_folder_path):
    os.makedirs(op_folder_path)
n aero = 16
turb_rad = 50
power curve = loadPowerCurve("data\power curve.csv")
wind_inst_freq = binWindResourceData(os.path.join(os.getcwd(),"data"))
n_wind_instances, cos_dir, sin_dir, wind_sped_stacked, C_t = preProcessing (power_curve)
POPULATION_SIZE = 200
elite_rate = 0.2
layout_mutate = 0.4
point_mutate = 0.5
crossover_mutate = 0.5
random_rate = 0.3
num_of_generations = 1000
print ("Started GA...")
POPs_MATRIX = generate_populations(2*POPULATION_SIZE)
print ("Selecting Initial Populations ... ")
best_POPs_MATRIX, _ = select_N_best_layouts(POPs_MATRIX, POPULATION_SIZE)
bestAEP = []
best_AEP = 0
AEP_unchanged_counter = 0
for generation in range(0, num_of_generations):
```

#### print ("Generation - "+str(generation))

elite\_layout\_number = int(POPULATION\_SIZE\*elite\_rate)
layout\_mutate\_number = int(POPULATION\_SIZE\*layout\_mutate)
point\_mutate\_number = int(POPULATION\_SIZE\*point\_mutate)
cross\_mutation\_number = int(POPULATION\_SIZE\*crossover\_mutate)
random\_population\_number = int(POPULATION\_SIZE\*random\_rate)

indexes\_for\_cross\_mutation = np.arange(cross\_mutation\_number)

#### #candidatos elite

best\_POPs\_MATRIX\_elite = best\_POPs\_MATRIX[:elite\_layout\_number].copy()

#### #mutação do posicionamento

best\_POPs\_MATRIX\_layout\_mutate = best\_POPs\_MATRIX[:layout\_mutate\_number].copy()
for i in range(best\_POPs\_MATRIX\_layout\_mutate.shape[0]):

best\_POPs\_MATRIX\_layout\_mutate[i] =

 $random\_mutate\_for\_layout(best\_POPs\_MATRIX\_layout\_mutate[i])$ 

#### #mutação pontual

best\_POPs\_MATRIX\_for\_point\_mutation = best\_POPs\_MATRIX[:point\_mutate\_number].copy()
for i in range(best\_POPs\_MATRIX\_for\_point\_mutation.shape[0]):

 $best\_POPs\_MATRIX\_for\_point\_mutation[i] = point\_mutation(best\_POPs\_MATRIX[i])$ 

#### #crossover

best\_POPs\_MATRIX\_for\_crossover\_mutation =

best\_POPs\_MATRIX[:cross\_mutation\_number].copy()

for i in range(best\_POPs\_MATRIX\_for\_crossover\_mutation.shape[0]):

cross\_mutation\_pair = np.random.choice( indexes\_for\_cross\_mutation , size =(2), replace=False)

best\_POPs\_MATRIX\_for\_crossover\_mutation[cross\_mutation\_pair[0]], best\_POPs\_MATRIX\_for\_crossover\_mutation[cross\_mutation\_pair[1]] = cross\_mutation(best\_POPs\_MATRIX\_for\_crossover\_mutation[cross\_mutation\_pair[0]], best\_POPs\_MATRIX\_for\_crossover\_mutation[cross\_mutation\_pair[1]])

#### #mutação eleatória

best\_POPs\_MATRIX\_for\_random\_mutation =

best\_POPs\_MATRIX[:random\_population\_number].copy()

for i in range(best\_POPs\_MATRIX\_for\_random\_mutation.shape[0]):

```
best_POPs_MATRIX_for_random_mutation[i] =
    randomly_alter_the_layout(best_POPs_MATRIX_for_random_mutation[i])
```

```
POPs_MATRIX_generationwise = np.vstack([best_POPs_MATRIX_elite,
    best_POPs_MATRIX_layout_mutate, best_POPs_MATRIX_for_point_mutation,
    best_POPs_MATRIX_for_crossover_mutation, best_POPs_MATRIX_for_random_mutation])
best_POPs_MATRIX, AEP_array =
    select_N_best_layouts(POPs_MATRIX_generationwise,POPULATION_SIZE)
print( sound_pressure_level (n_aero, best_POPs_MATRIX[0]))
print ("Melhor AEP na geração "+str(generation)+" é : "+str(AEP_array[0]))
bestAEP.append(AEP_array[0])
if (best_AEP < AEP_array[0]):
   best_AEP = AEP_array[0]
   AEP_unchanged_counter = 0
else :
    AEP_unchanged_counter += 1
if (AEP_unchanged_counter == 100):
    print ("AEP não teve altera ção em 100 itera ções ... Parada!")
    break
# salva o posicionamento a cada 50 iterações
if (generation \%50 == 0):
    np.save(os.path.join(op_folder_path, "geração_"+str(generation)+".npy"),
        best_POPs_MATRIX)
```

np.save(os.path.join(op\_folder\_path, "Best\_AEP.npy"), bestAEP)

# A.2 Rotina para registro dos níveis de pressão sonora

```
import numpy as np
def sound_pressure_level (n_aero, coord):
   def dist_i (i_coord,r_coord):
        aux = []
        for i in range(n_aero):
            p_i = np. sqrt ((r_coord[0] - i_coord[i, 0]) **2 + (r_coord[1] - i_coord[i, 1]) **2)
            aux.append(p_i)
        return aux
   def banda63(hs,hr,d,q,Adiv,resp,dif1,img,dif2,dss,dsr,a,e):
        # Nível de pressão sonora no aerogerador
        Lw = 118
        # Absorção atmosférica - Aatm (retirado da ISO 9613)
        alfa = 0.1
        Aatm = alfa * d/1000
        # Efeito do Solo - Agr
        As = -1.5
        Ar = -1.5
        Am = -3*q
        Agr = As + Ar + Am
        # Screening - Abar / atenuações causadas por barreiras
        lmbda = 343/63
        Abar = screening (resp, dif1, img, dif2, dsr, a, e, lmbda, d)
        # Nível de pressão sonora em 63Hz
        Lft = Lw - Adiv - Aatm - Agr - Abar
        return Lft
   def banda125(hs,hr,d,Gs,Gr,q,Gm,Adiv,resp,dif1,img,dif2,dss,dsr,a,e):
        # Nível de pressão sonora no aerogerador
        Lw = 113
```

```
# Absorção atmosférica - Aatm (retirado da ISO 9613)
alfa = 0.4
Aatm = alfa*d/1000
```

# Efeito do Solo - Agr

# solo na fonte

a1 = (1.5+3\*np.exp(-0.12\*(hs-5)\*\*2)\*(1-np.exp(-d/50))+5.7\*np.exp(-0.09\*hs\*\*2)\*(1-np.exp(-2.8\*1e-6\*d\*\*2))) As = -1.5+Gs\*a1

# solo no receptor

```
a2 = (1.5+3*np.exp(-0.12*(hr-5)**2)*(1-np.exp(-d/50))
+5.7*np.exp(-0.09*hr**2)*(1-np.exp(-2.8*1e-6*d**2)))
Ar = -1.5+Gr*a2
```

Am = -3\*q\*(1-Gm)Agr = As + Ar + Am

# Screening – Abar / atenuações causadas por barreiras lmbda = 343/125 Abar = screening (resp, dif1, img, dif2, dsr, a, e, lmbda,d)

# Nível de pressão sonora em 125HzLft = Lw - Adiv - Aatm - Agr - Abar

```
return Lft
```

 $\boldsymbol{def} \ banda250 (hs,hr,d,Gs,Gr,q,Gm,Adiv,resp,dif1\,,img,dif2\,,dss\,,dsr\,,a,e) \colon \\$ 

```
# Nível de pressão sonora no aerogerador
Lw = 109
```

# Absorção atmosférica - Aatm (retirado da ISO 9613) alfa = 1 Aatm = alfa\*d/1000

# Efeito do Solo – Agr

# solo na fonte

```
As = -1.5 + Gs * b1
```

# solo no receptor b2 = 1.5+8.6\*np.exp(-0.09\*hr\*\*2)\*(1-np.exp(-d/50)) Ar = -1.5+Gr\*b2

Am = -3\*q\*(1-Gm)Agr = As + Ar + Am

# Screening – Abar / atenuações causadas por barreiras lmbda = 343/250 Abar = screening (resp, dif1, img, dif2, dsr, a, e, lmbda,d)

# Nível de pressão sonora em 250Hz

Lft = Lw - Adiv - Aatm - Agr - Abar

#### return Lft

```
\label{eq:def} def \ banda500 (hs,hr,d,Gs,Gr,q,Gm,Adiv,resp,dif1,img,dif2,dss,dsr,a,e):
```

```
# Nível de pressão sonora no aerogerador
Lw = 106
```

# Absorção atmosférica - Aatm (retirado da ISO 9613)
alfa = 1.9
Aatm = alfa\*d/1000

# Efeito do Solo - Agr # solo na fonte c1 = 1.5+14\*np.exp(-0.46\*hs\*\*2)\*(1-np.exp(-d/50)) As = -1.5+Gs\*c1

# solo no receptor c2 = 1.5+14\*np.exp(-0.46\*hr\*\*2)\*(1-np.exp(-d/50)) Ar = -1.5+Gr\*c2

Am = -3\*q\*(1-Gm)Agr = As + Ar + Am

# Screening - Abar / atenuações causadas por barreiras

```
lmbda = 343/500
    Abar = screening (resp, dif1, img, dif2, dsr, a, e, lmbda, d)
    # Nível de pressão sonora em 500Hz
    Lft = Lw - Adiv - Aatm - Agr - Abar
    return Lft
def banda1000(hs,hr,d,Gs,Gr,q,Gm,Adiv,resp,dif1,img,dif2,dss,dsr,a,e):
    # Nível de pressão sonora no aerogerador
    Lw = 103
    # Absorção atmosférica - Aatm (retirado da ISO 9613)
    alfa = 3.7
    Aatm = alfa * d/1000
    # Efeito do Solo - Agr
    # solo na fonte
    d1 = 1.5 + 5 * np.exp(-0.9 * hs * *2) * (1 - np.exp(-d/50))
    As = -1.5 + Gs * d1
    # solo no receptor
    d2 = 1.5+5*np.exp(-0.9*hr**2)*(1-np.exp(-d/50))
    Ar = -1.5 + Gr * d2
    Am = -3*q*(1-Gm)
    Agr = As + Ar + Am
    # Screening - Abar / atenuações causadas por barreiras
    1mbda = 343/1000
    Abar = screening (resp, dif1, img, dif2, dsr, a, e, lmbda, d)
    # Nível de pressão sonora em 1000Hz
    Lft = Lw - Adiv - Aatm - Agr - Abar
    return Lft
```

**def** banda2000(hs,hr,d,Gs,Gr,q,Gm,Adiv,resp,dif1,img,dif2,dss,dsr,a,e):

# Nível de pressão sonora no aerogerador

```
Lw = 99
    # Absorção atmosférica - Aatm (retirado da ISO 9613)
    alfa = 9.7
    Aatm = alfa * d/1000
    # Efeito do Solo - Agr
    # solo na fonte
    As = -1.5*(1-Gs)
    # solo no receptor
    Ar = -1.5*(1-Gr)
    Am = -3*q*(1-Gm)
    Agr = As + Ar + Am
    # Screening - Abar / atenuações causadas por barreiras
    lmbda = 343/2000
    Abar = screening (resp, dif1, img, dif2, dsr, a, e, lmbda, d)
    # Nível de pressão sonora em 2000Hz
    Lft = Lw - Adiv - Aatm - Agr - Abar
    return Lft
def banda4000(hs,hr,d,Gs,Gr,q,Gm,Adiv,resp,dif1,img,dif2,dss,dsr,a,e):
    # Nível de pressão sonora no aerogerador
    Lw = 92
    # Absorção atmosférica - Aatm (retirado da ISO 9613)
    alfa = 32.8
    Aatm = alfa * d/1000
    # Efeito do Solo - Agr
    # solo na fonte
    As = -1.5*(1-Gs)
    # solo no receptor
    Ar = -1.5*(1-Gr)
```

```
Am = -3*q*(1-Gm)
    Agr = As + Ar + Am
    # Screening - Abar / atenuações causadas por barreiras
    1mbda = 343/4000
    Abar = screening (resp, dif1, img, dif2, dsr, a, e, lmbda, d)
    # Nível de pressão sonora em 4000Hz
    Lft = Lw - Adiv - Aatm - Agr - Abar
    return Lft
def banda8000(hs,hr,d,Gs,Gr,q,Gm,Adiv,resp,dif1,img,dif2,dss,dsr,a,e):
    # Nível de pressão sonora no aerogerador
    Lw = 82
    # Absorção atmosférica - Aatm (retirado da ISO 9613)
    alfa = 117
    Aatm = alfa * d/1000
    # Efeito do Solo - Agr
    # solo na fonte
    As = -1.5*(1-Gs)
    # solo no receptor
    Ar = -1.5*(1-Gr)
    Am = -3*q*(1-Gm)
    Agr = As + Ar + Am
    # Screening - Abar / atenuações causadas por barreiras
    lmbda = 343/8000
    Abar = screening (resp, dif1, img, dif2, dsr, a, e, lmbda, d)
    # Nível de pressão sonora em 8000Hz
    Lft = Lw - Adiv - Aatm - Agr - Abar
```

96

## return Lft

```
def screening (resp, dif1, img, dif2, dsr, a, e, lmbda,d):
    Abar = 0
    return Abar
# Ponderação em A
def aweigh(Lft63,Lft125,Lft250,Lft500,Lft1000,Lft2000,Lft4000,Lft8000):
    aw = np. array ([-26.2, -16.1, -8.6, -3.2, 0, 1.2, 1, -1.1])
    Lat63 = 10 * * (0.1 * (Lft63 + aw[0]))
    Lat125 = 10 * * (0.1 * (Lft125 + aw[1]))
    Lat250 = 10 ** (0.1 * (Lft250 + aw[2]))
    Lat500 = 10 * * (0.1 * (Lft500 + aw[3]))
    Lat1000 = 10 * (0.1 * (Lft1000 + aw[4]))
    Lat2000 = 10 ** (0.1 * (Lft2000 + aw[5]))
    Lat4000 = 10 * (0.1 * (Lft4000 + aw[6]))
    Lat8000 = 10**(0.1*(Lft8000+aw[7]))
    pondA_i = Lat63+Lat125+Lat250+Lat500+Lat1000+Lat2000+Lat4000+Lat8000
    return pondA_i
def total_noise (A_i):
    pondA_total = np.sum(A_i)
    Lat = 10*np.log10(pondA_total)
    return Lat
pos_r = np. array ([2000, 2000])
aero_coord = coord
aero_dist = dist_i (aero_coord, pos_r)
dist_to_receptor = np. array ( aero_dist ). reshape (n_aero, 1)
```

# altura da fonte [m]

hs = 100# altura do receptor [m] hr = 4# porosidade do solo na fonte (0 a 100%) Gs = 0# porosidade do solo no receptor (0 a 100%) Gr = 0# porosidade do solo ente ambos (0 a 100%) G = 0# Coeficientes relacionados a existência de barreiras # Como não se aplica neste trabalho, todos são nulos resp, dif1, img, dif2, dss, dsr, a, e = 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0 # lmbda = 0# Cálculo das atenuações d0 = 1 $pond_Aux = []$ **for** i **in range**(n\_aero): d = dist\_to\_receptor [i,0] **if** d <= 30\*(hs+hr): q = 0Gm = 0else : q = 1 - (30\*(hs+hr)/d)Gm = G/100Adiv = 20\*np.log10(d/d0)+11Lft63 = banda63(hs,hr,d,q,Adiv,resp,dif1,img,dif2,dss,dsr,a,e) Lft125 = banda125(hs,hr,d,Gs,Gr,q,Gm,Adiv,resp,dif1,img,dif2,dss,dsr,a,e) Lft250 = banda250(hs,hr,d,Gs,Gr,q,Gm,Adiv,resp,dif1,img,dif2,dss,dsr,a,e) Lft500 = banda500(hs,hr,d,Gs,Gr,q,Gm,Adiv,resp,dif1,img,dif2,dss,dsr,a,e) Lft1000 = banda1000(hs,hr,d,Gs,Gr,q,Gm,Adiv,resp,dif1,img,dif2,dss,dsr,a,e)Lft2000 = banda2000(hs,hr,d,Gs,Gr,q,Gm,Adiv,resp,dif1,img,dif2,dss,dsr,a,e)

Lft4000 = banda4000(hs,hr,d,Gs,Gr,q,Gm,Adiv,resp,dif1,img,dif2,dss,dsr,a,e)

```
Lft8000 = banda8000(hs,hr,d,Gs,Gr,q,Gm,Adiv,resp,dif1,img,dif2,dss,dsr,a,e)

aux = aweigh(Lft63,Lft125,Lft250,Lft500,Lft1000,Lft2000,Lft4000,Lft8000)

pond_Aux.append(aux)

pond_A = np.sum((np.array(pond_Aux)).reshape(n_aero,1))

Lftotal = total_noise (pond_A)
```

return Lftotal