

PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E INOVAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL  
MESTRADO EM ENGENHARIA AMBIENTAL  
*MODALIDADE PROFISSIONAL*

IMPLANTAÇÃO DE PARQUE EÓLICO NO MUNICÍPIO DE MACAÉ-RJ: UMA ANÁLISE DOS  
ASPECTOS AMBIENTAIS, TÉCNICOS E ECONÔMICOS

ROSE ANGELA HILDA WANZELER BRAGA

MACAÉ-RJ

2023

ROSE ANGELA HILDA WANZELER BRAGA

IMPLANTAÇÃO DE PARQUE EÓLICO NO MUNICÍPIO DE MACAÉ-RJ: UMA ANÁLISE DOS  
ASPECTOS AMBIENTAIS, TÉCNICOS E ECONÔMICOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense, área de concentração Sustentabilidade Regional, linha de pesquisa Desenvolvimento, Sustentabilidade e Inovação.

Orientador(a): Doutor Augusto Eduardo Miranda Pinto

Coorientador(a): Doutora Eliane Barbosa Santos

MACAÉ-RJ

2023

## Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

- B813i Braga, Rose Angela Hilda Wanzeler, 1973-.  
Implantação de parque eólico no município de Macaé: uma análise dos aspectos ambientais, técnicos e econômicos / Rose Angela Hilda Wanzeler Braga. — Macaé, RJ, 2023.  
xvi, 73 p.: il. color.
- Orientador: Augusto Eduardo Miranda Pinto, 1963-.  
Coorientadora: Eliane Barbosa Santos, 1986-.  
Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) — Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense, Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Macaé, RJ, 2023.  
Inclui referências.  
Área de concentração: Sustentabilidade Regional.  
Linha de Pesquisa: Desenvolvimento, Sustentabilidade e Inovação.
1. Energia eólica. 2. Energia - Fontes alternativas. 3. Geradores de energia. 4. Ventos. 5. Desenvolvimento sustentável. I. Pinto, Augusto Eduardo Miranda, 1963-, orient. II. Santos, Eliane Barbosa, 1986-, coorient. III. Título.
- CDD 621.312136 (23. ed.)

Dissertação intitulada **IMPLANTAÇÃO DE PARQUE EÓLICO NO MUNICÍPIO DE MACAÉ-RJ: UMA ANÁLISE DOS ASPECTOS AMBIENTAIS, TÉCNICOS E ECONÔMICOS**, elaborada por **Rose Angela Hilda Wanzeler Braga** e apresentada, publicamente perante a Banca Examinadora, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental do Instituto Federal Fluminense - IFFluminense, na área concentração Sustentabilidade Regional, linha de pesquisa Desenvolvimento, Sustentabilidade e Inovação.

Aprovado em: 08 de agosto de 2023

Banca Examinadora:



---

Augusto Eduardo Miranda Pinto / Doutor em Direito / Universidade do Estado do Rio de Janeiro (RJ), Instituto Federal Fluminense (IFFluminense) – Orientador

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** ELIANE BARBOSA SANTOS  
Data: 09/08/2023 09:51:42-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

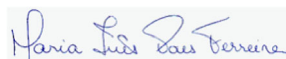
---

Eliane Barbosa Santos, Doutora em Ciências Climáticas / Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF) - Coorientadora



---

Marcos Antônio Cruz Moreira / Doutor em Engenharia Elétrica / COPPE - Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Instituto Federal Fluminense (IFFluminense)



---

Maria Inês Paes Ferreira, Doutora em Ciência e Tecnologia de Polímeros / Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Instituto Federal Fluminense (IFFluminense)

**DEDICATÓRIA**

Ao que vive e reina pelos séculos dos séculos, dedico.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, dono de toda ciência e sabedoria, por conduzir meus passos nessa caminhada.

À minha família, pelo apoio incondicional, em especial aos meus filhos Gabriela, Arthur e Isabela, por me proporcionarem os mais doces sorrisos nesta vida.

Às integrantes da Célula *El Shammah*, da *Gileade Church* Macaé, por sonharem comigo os sonhos de Deus.

Ao meu orientador, Prof. PhD. Augusto Eduardo Miranda Pinto, pela inspiração e grande incentivo para concretizar este desafio.

À minha coorientadora, Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Eliane Barbosa Santos, pelo apoio e dedicação sempre presentes.

Ao Prof. Me. Matheus Ferreira de Barros, pela prontidão em compartilhar seus profundos conhecimentos em engenharia econômica e financeira.

Ao Escritório de Gestão de Indicadores e Metas (EGIM), da Prefeitura Municipal de Macaé, por fornecer os dados de posição, forma e atributos de feições geográficas (*shapefiles*) necessários ao desenvolvimento do presente estudo.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense, pelo ensino gratuito e de qualidade.

Aos demais professores do PPEA, por cumprirem, com *louveor*, a missão de multiplicar conhecimentos.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

Minha eterna gratidão.

**EPIGRAFE**

“Quem é este que até o vento e o mar lhe obedecem?”  
Marcos 4:41”.

## LISTA DE FIGURAS

### ARTIGO CIENTÍFICO 1:

Figura 1 – Fluxograma da Implantação de uma Usina Eólica no Brasil. ....	10
Figura 2 – Localização do município de Macaé, Rio de Janeiro. ....	21
Figura 3 – Distritos do município de Macaé e respectivos perímetros urbanos. ....	22
Figura 4 – Macrozonas de Ambiente Natural e Urbano – Macaé. ....	23
Figura 5 – Mapa da hidrografia de Macaé. ....	25
Figura 6 – Mapa esquemático das áreas de interesse ambiental em Macaé. ....	26
Figura 7 – Mapa de zoneamento urbano de Macaé. ....	28

### ARTIGO CIENTÍFICO 2:

Figura 1 – Mapa hipsométrico de Macaé/RJ. ....	444
Figura 2 – Localização do município de Macaé, no estado do Rio de Janeiro, com destaque para as zonas em estudo. ....	44
Figura 3 – Classes de rugosidade de acordo com o Atlas Eólico Europeu. ....	47
Figura 4 – Distribuição espacial da velocidade do vento (m/s) a partir dos dados da reanálise (ERA5-Land), por estação do ano, para Macaé: Verão (DJF), Outono (MAM), Inverno (JJA) e Primavera (SON). ....	53
Figura 5 – Boxplot da velocidade do vento (m/s) dos dados observados (INMET) e da reanálise (ERA5-Land), por hora do dia durante as estações do ano. ....	54
Figura 6 – Densidade de frequência da velocidade do vento dos dados observados (INMET) e da reanálise (ERA5-Land) por estação do ano. ....	55
Figura 7 – Velocidade média (m/s) horária do vento nas estações do ano, a 10 metros, a partir dos (a) dados observados (INMET) e (b) da reanálise (ERA5-Land). ....	56
Figura 8 – Rosa dos ventos a partir dos dados observados (INMET), por estação do ano, para Macaé: Verão (DJF), Outono (MAM), Inverno (JJA) e Primavera (SON). ....	57
Figura 9 – Velocidade média (m/s) horária do vento nas estações do ano, a 50 metros, a partir dos (a) dados observados (INMET) e (b) da reanálise (ERA5-Land). ....	58
Figura 10 – Densidade de Potência (DP) com base nos dados observados (INMET) e da reanálise (ERA5-Land) na altura de 50 metros. ....	59
Figura 11 – Imagem e curva de potência da turbina eólica modelo VERNE 555. ....	61



## LISTA DE TABELAS

### ARTIGO CIENTÍFICO 1:

Tabela 1 – Categorias das Unidades de Conservação.....	12
--	----

### ARTIGO CIENTÍFICO 2:

Tabela 1 – Estrutura do fluxo de caixa.....	51
Tabela 2 – Características da turbina eólica Verne 555, da ENERSUD Energia Limpa. ....	61
Tabela 3 – Produção de energia Verne 555 (KW.h/mês).....	62

## LISTA DE GRÁFICOS

### ARTIGO CIENTÍFICO 2:

Gráfico 1 – Valor presente de série periódica uniforme.....	49
Gráfico 2 – Gráfico da TIR. ....	50
Gráfico 3 – Fluxo de caixa do acumulado. ....	65

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABEEÓLICA – Associação Brasileira de Energia Eólica

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

APA – Área de Preservação Ambiental

APP – Área de Preservação Permanente

CDO - *Climate Data Operators*

CE – Corredor Ecológico

CF – Constituição Federal

COMMADS – Conselho Municipal de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

DJF – Dezembro, Janeiro e Fevereiro

DP – Densidade de Potência

ECMWF – *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*

EIA – Estudo de Impacto Ambiental

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

ERA – *European Reanalysis*

FC – Fluxo de Caixa

FCA – Fluxo de Caixa Acumulado

FUNAI – Fundação Nacional do Índio

FUNDAM – Fundo Ambiental

GEE – Gases de Efeito Estufa

IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ICMBIO – Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade

IEC – Comissão Eletrotécnica Internacional

INEA – Instituto Estadual do Ambiente

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

IRR – *Internal Rate of Return*

JJA – Junho, Julho e Agosto

LC – Lei Complementar

LI – Licença de Instalação

LO – Licença de Operação

LOM – Lei Orgânica de Macaé

LP – Licença Prévia

MAM – Março, Abril e Maio

MAN – Macrozona de Ambiente Natural

MAU – Macrozona de Ambiente Urbano

MMA – Ministério do Meio Ambiente

MPF – Ministério Público Federal

MW – *Megawatts*

NPV – *Net Present Value*

ODS – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

O&M – Operação e Manutenção

ONU – Organização das Nações Unidas

PD – Plano Diretor

PL – Projeto de Lei

PMMA – Plano Municipal de Conservação e Recuperação da Mata Atlântica

PNMA – Política Nacional do Meio Ambiente

PROINFA – Programa de Incentivos a Fontes Alternativas de Energia Elétrica

QGIS – *Quantum* Sistema de Informação Geográfica

RAS – Relatório Ambiental Simplificado

RBJA – Rede Brasileira de Justiça Ambiental

RIMA – Relatório de Impacto Ambiental

RJ – Rio de Janeiro

RPPN – Reserva Particular do Patrimônio Natural

SEAS – Secretaria de Estado do Ambiente e Sustentabilidade do Rio de Janeiro

SEMMA – Secretaria de Meio Ambiente e Sustentabilidade

SIMMA – Sistema Municipal de Meio Ambiente

SNUC – Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza

SON – Setembro, Outubro e Novembro

SPA – Setores Especiais de Preservação Ambiental

SPH – Setores Especiais de Preservação Histórico-Cultural

SRU – Setores Especiais de Requalificação Urbano-Ambiental

SVE – Setores Viários Estruturais

SVS – Setores Viários de Serviços

TBL – *Triple Bottom Line*

TCU – Tribunal de Contas da União

TIR – Taxa Interna de Retorno

TMA – Taxa Mínima de Atratividade

UC – Unidades de Conservação

VPL – Valor Presente Líquido

WECP – *World Energy Cities Partnership*

WRPLOT – *Wind Rose Plots*

ZA – Zona de Amortecimento

ZEIA – Zonas Especiais de Interesse Ambiental

ZEIS – Zonas Especiais de Interesse Social

ZEU – Zonas de Expansão Urbana

ZI – Zonas Industriais

ZR – Zonas Residenciais

ZUD – Zonas de Uso Diversificado

ZUI – Zonas de Uso Institucional

# IMPLANTAÇÃO DE PARQUE EÓLICO NO MUNICÍPIO DE MACAÉ-RJ: UMA ANÁLISE DOS ASPECTOS AMBIENTAIS, TÉCNICOS E ECONÔMICOS

## RESUMO

Neste trabalho busca-se analisar o processo de implantação de empreendimento eólico para geração de energia elétrica em Macaé-RJ, avaliando aspectos ambientais, técnicos e econômicos relativos à instalação de um parque eólico no município. O estudo fundamenta-se, inicialmente, numa análise espacial do território municipal, com o intuito de identificar zonas ambientalmente propícias à implantação de usina eólica, sob o enfoque dos princípios ambientais e dos conceitos de desenvolvimento sustentável. Em continuidade, foi realizada a análise técnica da viabilidade do parque eólico, a partir da caracterização do regime de ventos incidentes (velocidade e direção) e da estimativa da potência eólica. Além disso, foi efetuado o dimensionamento de turbinas eólicas para composição de um parque hipotético visando à geração de energia, semelhante à produção do único parque eólico instalado no estado do Rio de Janeiro, o Parque Eólico Gargaú, em São Francisco de Itabapoana-RJ. Por fim, foi realizada a análise de viabilidade econômica do projeto, baseada nos principais métodos aplicáveis à tomada de decisão sobre alternativas de investimento, quais sejam, Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR) e *Payback* descontado. Trata-se de pesquisa descritiva, documental, bibliográfica e exploratória por meio de estudo de caso no município de Macaé, com base na legislação vigente e nos aspectos socioeconômicos da cidade objeto de estudo. As informações obtidas por meio do referencial teórico mostram que, à luz da sustentabilidade, há alternativas locais para implantação de empreendimentos eólicos no município, bem como há zonas que têm um grau de viabilidade menor por apresentarem algum tipo de impedimento legal, cultural, social ou ambiental envolvido. Constatou-se que, em razão do regime de ventos na região, há viabilidade técnica para geração de aproximadamente 6MW de potência ao mês. Entretanto, com base nos indicadores analisados, os custos demandados para implantação do projeto são mais elevados do que sua rentabilidade.

**Palavras-chave:** Energia Eólica. Sustentabilidade. Potencial Eólico. Dimensionamento Energético. Viabilidade Econômica.

**IMPLEMENTATION OF A WIND FARM IN THE MUNICIPALITY OF MACAÉ-RJ: AN ANALYSIS OF ENVIRONMENTAL, TECHNICAL, ECONOMIC AND FINANCIAL ASPECTS**

**ABSTRACT**

*This work seeks to analyze the implementation process of a wind farm to generate electricity in Macaé-RJ, evaluating environmental, technical and economic aspects related to the installation of a wind farm in the municipality. The study is based, initially, on a spatial analysis of the municipal territory, with the aim of identifying environmentally favorable zones for the implantation of a wind power plant, under the focus of the environmental principles and the concepts of sustainable development. Next, a technical analysis of the viability of the wind farm was carried out, based on the characterization of the incident wind regime (speed and direction) and the estimation of wind power. In addition, wind turbines were dimensioned for the composition of a hypothetical park aimed at generating energy, similar to the production of the only wind farm installed in the state of Rio de Janeiro, the Gargaú Wind Farm, in São Francisco de Itabapoana-RJ. Finally, an economic feasibility analysis of the project was carried out, based on the main methods applicable to decision-making on investment alternatives, namely, Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR) and Discounted Payback. This is a descriptive, documental, bibliographical and exploratory research through a case study in the municipality of Macaé, based on current legislation and socioeconomic aspects of the city under study. The information obtained through the theoretical framework shows that, in the light of sustainability, there are locational alternatives for the implementation of wind farms in the municipality, as well as there are areas that have a lower degree of viability because they present some type of legal, cultural, social or environmental impediment. environment involved. It was found that, due to the wind regime in the region, there is technical feasibility for generating approximately 6MW of power per month. However, based on the analyzed indicators, the costs required to implement the project are higher than its profitability.*

**Keywords:** *Wind Energy. Sustainability. Wind Potential. Energy Sizing. Economic viability.*

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	viii
LISTA DE TABELAS .....	ix
LISTA DE GRÁFICOS.....	ix
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....	ix
RESUMO .....	xiii
<i>ABSTRACT</i> .....	xiv
APRESENTAÇÃO DA DISSERTAÇÃO .....	2
<b>ARTIGO CIENTÍFICO 1: IMPLANTAÇÃO DE PARQUES EÓLICOS ONSHORE À LUZ DO PRINCÍPIO DA SUSTENTABILIDADE: UM ESTUDO DE CASO DO MUNICÍPIO DE MACAÉ-RJ</b> .....	5
1. INTRODUÇÃO.....	6
2. METODOLOGIA .....	7
3. REVISÃO TEÓRICA .....	8
3.1. A energia eólica como ferramenta para o desenvolvimento sustentável.....	8
3.2. A prospecção de áreas ambientalmente viáveis para construção de projetos eólicos .....	10
3.3. A criação de áreas protegidas visando à integridade de recursos naturais.....	11
3.4. O licenciamento ambiental como instrumento para prevenção de impactos ao meio ambiente	14
3.5. Estudos para identificação de impactos ambientais .....	17
3.6. Macaé e a proteção do meio ambiente .....	19
3.7. Análise do local para implantação de parque eólico em Macaé.....	26
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	30
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	31
<b>ARTIGO CIENTÍFICO 2: ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA PARA IMPLANTAÇÃO DE UM PARQUE EÓLICO NO MUNICÍPIO DE MACAÉ-RJ</b> .....	40
1. INTRODUÇÃO.....	41
2. METODOLOGIA .....	433
2.1. Caracterização da área de estudo.....	433
2.2. Análise da viabilidade técnica.....	44
2.3. Estimativa do potencial eólico .....	466
2.4. Análise da viabilidade econômica.....	48
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	52
3.1. Análise do comportamento do vento.....	52
3.2. Estimativa do potencial eólico .....	58

3.3. Análise da viabilidade econômica.....	60
4. CONCLUSÃO.....	66
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	68
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	72
APÊNDICE A – CATÁLOGO COMERCIAL DA TURBINA EÓLICA VERNE 555 DA ENERSUD ENERGIA LIMPA .....	73



## APRESENTAÇÃO

A energia eólica é a energia cinética associada ao ar em movimento, que pode ser convertida em energia elétrica por turbinas eólicas ou aerogeradores. A rotação das pás de um aerogerador, que é ocasionada pela força do vento que as percorre, tem gerado energia limpa e renovável, que auxilia na diversificação da matriz elétrica do país, na redução de emissões de gases de efeito estufa (GEE), além de complementar as demais atividades econômicas desenvolvidas na região de sua geração (ABEEÓLICA, 2022).

As primeiras outorgas para implantação de parques eólicos no Brasil foram concedidas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) entre os anos de 2000 e 2004. Com crescimento inicial discreto, foi a partir de 2014 que houve um aumento exponencial nas outorgas para implantação e ampliação desses empreendimentos, mormente pela severa estiagem que atingiu o país naquele ano, situação em que ficou evidenciada a necessidade de se complementar a fonte de energia predominante no Brasil: a hidráulica (OLIVEIRA *et al.*, 2020). Isto posto, a fonte eólica tem assumido importante papel no setor, não só em relação à complementaridade do abastecimento energético, mas também por incrementar a renda das regiões produtoras, posto que confere uma nova dinâmica à economia, promovendo a capacitação da mão de obra local e acrescentando 15 novos postos de trabalho a cada megawatt (MW) instalado na região (ABEEÓLICA, 2022).

Nesse contexto, é importante destacar que o aproveitamento da energia eólica tem potencial para contribuir fortemente para o alcance dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) propostos pela Organização das Nações Unidas (ONU), destacando-se os de número 7 (energia acessível e limpa), 8 (emprego digno e crescimento econômico), 9 (indústria, inovação e infraestrutura), 11 (cidades e comunidades sustentáveis), 13 (combate às alterações climáticas) e 15 (vida sobre a terra), dentre outros.

A cidade de Macaé, localizada no estado do Rio de Janeiro, é conhecida como a Capital Nacional do Petróleo e tem relevante destaque no segmento de óleo e gás, não obstante as frequentes crises enfrentadas pelo setor desde a década de 70, sinalizando a necessidade de se fomentar outros meios ligados às vocações regionais, sobretudo no que diz respeito à diversidade de suas indústrias (BORBA; OLIVEIRA; SILVA NETO, 2007). Macaé, no entanto, também é conhecida como a Princesinha do Atlântico, detentora de inigualável beleza cênica e privilegiada diversidade de recursos naturais, com rios, cachoeiras, serras, mangues, restingas, praias, lagoas e ilhas, características que

devem ser exaustivamente avaliadas quando da instalação de empreendimentos que, de alguma forma, possam comprometer o meio ambiente ou a saúde e bem-estar de sua população.

A análise e o entendimento dos princípios ambientais auxiliam fortemente nesta investigação, indicando, em consonância com a legislação municipal (Plano Diretor, Código Ambiental, Código de Urbanismo, dentre outras), as áreas onde atividades de grande porte podem ser desenvolvidas, de forma a contribuir para a preservação do bem maior do ser humano: sua vida (JONAS, 2006). Além dos aspectos ambientais, a viabilidade técnica é essencial para o sucesso da implementação de um projeto eólico em uma determinada área ou local. É necessário um estudo aprofundado da região, considerando vários fatores, como a velocidade e direção dos ventos, a topografia do terreno e a presença de obstáculos. Ao avaliar a viabilidade técnica, é possível determinar se o projeto atenderá aos requisitos de produção de energia elétrica e se é viável economicamente.

Portanto, para o planejamento e desenvolvimento de projetos de energia eólica bem-sucedidos e sustentáveis, é de suma importância o conhecimento e o monitoramento espacial da cidade, com vistas à conservação ambiental, bem como dos parâmetros técnicos relativos à geração eólica (velocidade e direção do vento). Diante do exposto, neste trabalho visa-se analisar as questões ambientais, técnicas e econômicas relativas à implantação de um parque eólico em Macaé/RJ, e se o mesmo seria economicamente viável como alternativa sustentável para descarbonização da economia do município.

Como objetivos específicos, pretende-se:

- I. Identificar locais ambientalmente viáveis para implantação de parque eólico para geração de energia no município de Macaé, à luz dos princípios ambientais e da legislação vigente;
- II. Analisar o comportamento espacial e sazonal dos ventos no município, a fim de selecionar áreas que apresentem viabilidade, tanto ambiental quanto técnica, para o investimento;
- III. Estudar o comportamento do vento (velocidade e direção) e estimar o potencial eólico nas zonas identificadas como coincidentemente viáveis (ambiental e técnica) à implantação do empreendimento;
- IV. Dimensionar turbinas eólicas a serem implantadas, de acordo com o regime de ventos da região, a fim de se obter uma capacidade de produção semelhante a de um parque eólico modelo (Parque Eólico Gargaú, em São Francisco de Itabapoana-RJ, único do estado), de forma a permitir a estimativa do custo total de implementação da fonte energética;

V. Verificar a viabilidade econômica do projeto por meio das ferramentas Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR) e *Payback* descontado.

Esta dissertação está organizada da seguinte forma: Na presente seção (seção 1 - APRESENTAÇÃO), constam descritos a contextualização da pesquisa, a justificativa, o problema e os objetivos. Na seção 2 (ARTIGO CIENTÍFICO 1) descreve-se uma pesquisa com abordagem exploratório-descritiva realizada por meio de estudo bibliográfico (livros, sites oficiais e periódicos nacionais e internacionais) acerca dos princípios que norteiam o direito ambiental, bem como uma análise do espaço geográfico do município de Macaé, no qual constam as zonas propícias à implantação de empreendimentos eólicos consonantes com as três dimensões da sustentabilidade especificadas no modelo *Triple Bottom Line* (TBL), que são: econômica, ambiental e social. Na seção 3 (ARTIGO CIENTÍFICO 2) apresenta-se um estudo de viabilidade técnica e econômica para implantação de parque eólico na cidade, realizado a partir da análise do comportamento do vento e do potencial eólico estimado no município, além do dimensionamento de turbinas eólicas adequadas ao perfil de ventos identificado. Esses valores serviram de referência para a análise de custos, a qual conta com a utilização dos principais métodos aplicáveis à tomada de decisão quanto a alternativas de investimentos, mais precisamente as técnicas baseadas em fluxos de caixa, quais sejam, os indicadores Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR) e *Payback* descontado.

## ARTIGO CIENTÍFICO 1

### IMPLANTAÇÃO DE PARQUES EÓLICOS ONSHORE À LUZ DO PRINCÍPIO DA SUSTENTABILIDADE: UM ESTUDO DE CASO DO MUNICÍPIO DE MACAÉ-RJ<sup>1</sup>

#### *IMPLANTATION OF ONSHORE WIND FARMS IN LIGHT OF THE PRINCIPLE OF SUSTAINABILITY: A CASE STUDY IN THE MUNICIPALITY OF MACAÉ-RJ*

Rose Angela Hilda Wanzeler Braga - IFF/PPEA

Augusto Eduardo Miranda Pinto -IFF/PPEA

Eliane Barbosa Santos - UENF/LAMET

#### RESUMO

A implantação de parques eólicos está associada a diversas dificuldades técnicas e ambientais, como o adequado regime de ventos e a prospecção de extensas áreas para sua instalação. Neste trabalho, objetiva-se avaliar o espaço geográfico do município de Macaé, localizado no estado do Rio de Janeiro, com o intuito de identificar, à luz do princípio da sustentabilidade, mormente o conceito *Triple Bottom Line* (TBL), áreas com viabilidade ambiental para implantação de parque eólico para geração de energia. Como metodologia, adotou-se a pesquisa exploratória e documental, fundamentada em princípios do direito ambiental e nos conceitos de desenvolvimento local e de sustentabilidade. Verifica-se que, do ponto de vista ambiental e ressalvados os demais estudos pertinentes, há alternativas locacionais propícias à instalação de empreendimentos dessa tipologia no município.

**Palavras chave:** Desenvolvimento; Energia Eólica; Meio Ambiente; Direito à Vida; Impactos Ambientais.

#### ABSTRACT

*The implantation of wind farms is associated with several technical and environmental difficulties, such as the adequate wind regime and the prospection of extensive areas for their installation. This work aims to evaluate the geographic space of the city of Macaé, located on the state of Rio de Janeiro, in order to identify, in light of the principle of sustainability, areas with environmental feasibility for*

---

<sup>1</sup> Artigo aceito para publicação no Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego – Essentia Editora – Instituto Federal Fluminense (IFF)

*the implementation of a wind farm for energy generation. As a methodology, exploratory and documentary research was adopted, based on principles of environmental law and on the concepts of local development and sustainability. It appears that, from an environmental point of view and with the exception of other relevant studies, there are locational alternatives favorable to the installation of projects of this typology in the municipality.*

**Keywords:** *Development; Wind Energy; Environment; Right to Life; Environmental Impacts.*

## 1. INTRODUÇÃO

A geração de energia eólica não emite gases de efeito estufa (GEE), por isso é considerada energia limpa (PINTO; MARTINS; PEREIRA, 2017). No entanto, a implantação de parques eólicos causa inúmeros impactos na região de sua instalação, sejam eles sociais, econômicos, culturais ou ambientais, os quais decorrem, dentre outros, do ruído dos equipamentos, da alteração na paisagem natural ou da intervenção na fauna e na flora locais (SPELLMAN, 2014).

O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) define impacto ambiental como qualquer alteração das propriedades (física, química ou biológica) ocorrida no meio ambiente, resultante da atividade humana, que possa afetar a saúde, a segurança, o bem-estar da população, as atividades sociais e econômicas, a biota, as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente e a qualidade dos recursos ambientais (CONAMA, 1986). Nesse passo, Silva, Becker e Martins (2015) destacam que, de forma orquestral, o uso do solo para atividades econômicas deve harmonizar-se com meio ambiente sadio, além de outros direitos fundamentais e sociais conferidos pela Lei Maior do País.

Em setembro de 2020, Macaé, no estado do Rio de Janeiro, tornou-se a representante brasileira na Parceria Mundial de Cidades Energéticas (*World Energy Cities Partnership – WECP*), que reúne as principais cidades energéticas do mundo, todas comprometidas com a transição para um futuro mais sustentável (MACAÉ, 2020). A parceria destaca o estudo da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), que aponta ventos favoráveis na região dos lagos e no norte fluminense, onde se localiza Macaé, predizendo potencial para implantação de futuros projetos de energia eólica no município.

Importante ressaltar que, não obstante o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro aponte as citadas mesorregiões como promissoras para aproveitamento eólico (AMARANTE; SILVA; RIOS FILHO, 2003), o estado do Rio de Janeiro conta com apenas 1 (um) parque eólico instalado: o Parque Eólico Gargaú. Este parque, localizado no município de São Francisco de Itabapoana (Praia de Gargaú), na

região Norte Fluminense, tem capacidade instalada de 28 MW de potência e 5 km<sup>2</sup> de extensão, energia suficiente para abastecer uma cidade de 80 mil habitantes (BOENTE *et al.*, 2015).

Nesse cenário, considerando os mesmos parâmetros do único parque eólico do estado, e que Macaé tem população estimada de 261.501 habitantes e território de 1.216 km<sup>2</sup> (IBGE, 2020), seria necessária uma área de aproximadamente 17 km<sup>2</sup> para a implantação de um parque eólico que gerasse 92 MW de energia para atendimento à demanda local. Entretanto, embora tal extensão represente apenas 1,4% de seu território, o município tem importantes mananciais hídricos, fragmentos de Mata Atlântica, diversas áreas protegidas, além de desenvolver programas e projetos sustentáveis, o que reduz consideravelmente as alternativas locais para abrigar empreendimentos de grande porte.

Tem-se, de um lado, um promissor potencial de energia a ser aproveitado e, de outro, a preocupação com a preservação do meio ambiente, sendo necessário, portanto, avaliar o projeto de desenvolvimento local em toda a sua complexidade, sem desconsiderar qualquer de suas escalas sociais ou ambientais (LOUREIRO *et al.*, 2014), confrontando a economia de caráter predatório, que cria desigualdades sociais e segregação do espaço urbano (CENCI, 2015). Milaré (2016) aponta que as limitações técnicas e científicas do homem levam-no a maltratar o seu entorno, destruindo o ecossistema em que vive. Alerta que a agressão aos recursos da natureza é também uma afronta à vida, posto que, uma vez dilapidado o patrimônio natural, os bens esgotados jamais serão recriados, implicando um desequilíbrio ecológico danoso à continuidade da raça humana.

Nessa congregação de valores, torna-se imperiosa a elaboração de um plano municipal de desenvolvimento baseado em critérios técnicos de avaliação, cujo objetivo específico seja o mapeamento das áreas com potencial eólico adequado, mas que sejam, ao mesmo tempo, ambientalmente viáveis para implantação de empreendimentos dessa tipologia. Esta estratégia de desenvolvimento deve ser corroborada pelo devido processo de licenciamento ambiental, de modo a mitigar os impactos gerados no município, sejam eles ambientais, culturais ou socioeconômicos (MELLO, 2014).

## **2. METODOLOGIA**

A metodologia utilizada neste trabalho consiste em revisão bibliográfica, documental e exploratória de caráter descritivo, com o intuito de, à luz do princípio da sustentabilidade, e em consonância com as dimensões econômica, ambiental e social promovidas pelo modelo *Triple Bottom Line* (TBL): (i) examinar as regiões de relevância ambiental no município de Macaé, identificando

aquelas em que há impedimentos legais para exploração econômica; (ii) mapear as zonas ambientalmente inviáveis para implantação de empreendimentos eólicos onshore e (iii) avaliar, do ponto de vista ambiental, se existem áreas na cidade cuja localização seja propícia para instalação de projetos desta tipologia, ressalvada a necessidade dos demais estudos pertinentes.

### **3. REVISÃO TEÓRICA**

#### **3.1. A energia eólica como ferramenta para o desenvolvimento sustentável**

O comportamento coletivo é o primeiro dever a ser observado, pelo homem, durante a era da tecnologia destrutiva. Esse dever, em solidariedade ao futuro da humanidade, está também atrelado ao futuro da natureza, considerando que o homem tornou-se um risco tanto para si quanto para a biosfera. Assim, a postura de proteger a natureza é condição vital para a continuidade da raça humana e para a integridade de sua existência (JONAS, 2006).

De acordo com Vieira (2012), os primeiros registros acerca da preocupação com o meio ambiente e a proteção ambiental surgiram com a publicação do livro *Limites de Crescimento (The Limits to Growth)*, na segunda metade do século XIX. A partir de então, diversos princípios e premissas têm sido elaborados de forma a conscientizar a humanidade de que o desenvolvimento está diretamente relacionado à preservação ambiental.

A Conferência de Estocolmo, realizada em 1972, alertou para a prudência necessária ao se lidar com o meio ambiente, ressaltando que os danos ambientais podem ser irreversíveis e irreparáveis, diante da impossibilidade de restabelecimento do status quo. Desde então, a prevenção e a precaução têm se configurado como importantes princípios que norteiam o direito ambiental (MOTA, 2006). Barcellos (2011) ressalta ainda que os princípios auxiliam na interpretação de regras gerais, constitucionais ou não, de forma que se obtenha o melhor efeito pretendido, dada a considerável subjetividade envolvida.

De acordo com Machado (2015), o princípio da precaução evita que a prática de medidas que possam causar degradação ambiental seja continuada, mesmo na ausência absoluta de certeza científica quanto aos possíveis danos. Em complementação, Antunes (2005) assevera que este princípio tem grande repercussão nas instâncias judiciais, nos meios de comunicação e em toda a sociedade, posto que, diferentemente do direito tradicional, a área ambiental é substancialmente transdisciplinar, motivo pelo qual tal certeza nem sempre pode ser manifestada pela ciência. Já a prevenção do dano ambiental se aplica a risco conhecido (confirmado por pesquisas, dados, informações ou ocorrências) e visa à antecipação de medidas para prevenir impactos ambientais (CIELO, 2012).

Numa visão ampla, considerando que cada região do globo possui características próprias, como fauna e flora típicas (ecossistemas e biodiversidade), tais princípios devem ser considerados quando do pensar em desenvolvimento econômico da sociedade, mesmo não havendo legislação específica (MOTA, 2006). Nesse cenário, considerando a busca pela harmonização entre a lógica capitalista e o meio ambiente, de forma a manter o equilíbrio da qualidade da vida, surgem os conceitos de sustentabilidade e de desenvolvimento sustentável, que representam o alinhamento entre as preocupações ambientais e os problemas socioeconômicos (FIGUEIREDO, 2011).

Segundo Vieira (2012), por meio da sustentabilidade busca-se o prolongamento do tempo de uso de recursos naturais existentes, enquanto desenvolvimento sustentável trata de atender às necessidades do presente sem comprometer a possibilidade de as futuras gerações atenderem a suas próprias necessidades. No entanto, há antagonismo entre os termos desenvolvimento e sustentabilidade, tendo em vista a evidente desatenção dada aos aspectos ambientais, frente aos econômicos, quando da tomada de decisões. Essa é uma característica própria de “crescimento”, a qual deve ser substituída por sua forma qualitativa, a fim de gerar melhoria nos padrões e na qualidade de vida das pessoas, o desenvolvimento (MACHADO, 2015).

Nesse contexto, Milaré (2016) explica que é preferível falar em sustentabilidade a falar em desenvolvimento sustentável, já que este é tão somente um processo, enquanto aquela é fator necessário ao se tratar de recursos ambientais. De acordo com Munõz-Torres *et al.* (2018), a integração entre avanço econômico, proteção do meio ambiente e justiça social está evidenciada, dentre outros, no conceito TBL, modelo clássico que visa ao equilíbrio e à obtenção de resultados positivos nas três vertentes da sustentabilidade: econômica, ambiental e social.

A Constituição Federal (CF) reconhece que todos tem direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado e impõe, ao Poder Público e à coletividade, o dever de defendê-lo e preservá-lo, para as presentes e futuras gerações, o que extrapola limites territoriais e envolve toda a humanidade (BRASIL, 1988). No Brasil, essa preocupação ganhou maior relevância a partir da Primeira Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente, realizada no Rio de Janeiro no ano de 1992, a RIO-92, a partir da qual o país passou a buscar modelos de desenvolvimento e normas específicas que direcionassem, às áreas ambiental e social, a importância devida (PAULA, 2012). Cita-se, por exemplo, a Lei nº 10.438, de 26 de abril de 2002, por meio da qual o governo federal criou o Programa de Incentivos às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), visando a ampliar a participação de fontes alternativas na matriz elétrica brasileira (BRASIL, 2002).

O aproveitamento dos ventos é considerado uma ferramenta relevante nesse cenário, já que, como fonte alternativa de energia limpa, contribui para a alteração do modelo atual de geração no país

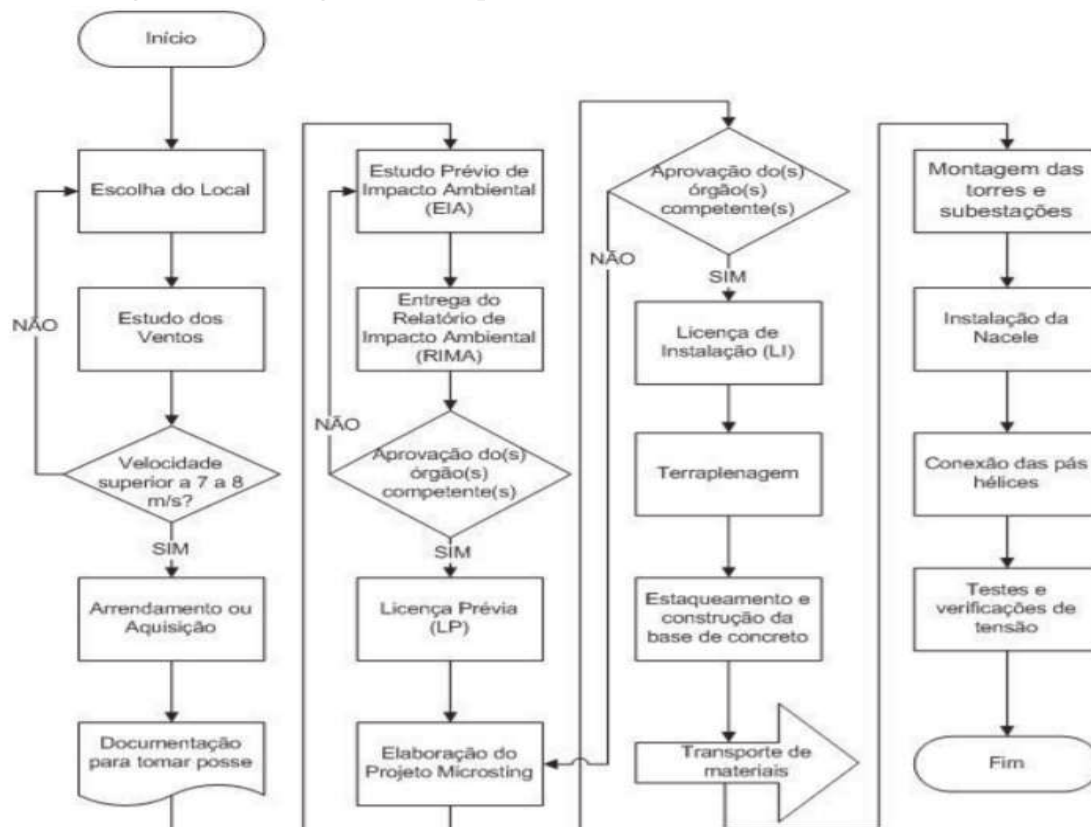


e promove a redução na emissão de GEE na atmosfera (VIEIRA, 2012), em consonância com os princípios analisados. Para Guimarães e Ferreira (2020), o conceito de desenvolvimento sustentável relaciona crescimento econômico e meio ambiente, materializando-se nos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) propostos pela Organização das Nações Unidas (ONU), os quais promovem a junção equilibrada das três dimensões envolvidas: econômica, social e ambiental. A energia eólica é uma fonte renovável de energia que auxilia diretamente no combate às mudanças climáticas do planeta, contribuindo, portanto, para o cumprimento dos ODS que tratam do uso de energia acessível e limpa e do combate às alterações climáticas.

### 3.2. A prospecção de áreas ambientalmente viáveis para construção de projetos eólicos

A Figura 1 ilustra os procedimentos para implantação de parques eólicos onshore no Brasil (SILVA *et al.*, 2015). A ilustração mostra que a escolha do local é item inicial a ser observado, o que suscita atenção, posto que interessam, não somente as análises técnicas quanto à velocidade e direção dos ventos no local, mas também o exame da integração de todos os demais recursos existentes (relevo, vegetação, hidrografia, solo, etc.), que deve ser referenciado por um estudo normativo que estabeleça os limites legais para ocupação da área de interesse (MELLO, 2014).

Figura 1 – Fluxograma da Implantação de uma Usina Eólica no Brasil.



Fonte: SILVA *et al.* (2015).

Spellman (2014) aponta que, para que seja garantida a existência de recursos essenciais à vida humana, as implicações ambientais decorrentes da implantação de parques eólicos devem ser investigadas de forma integrada, sobretudo para identificar se as fragilidades daquele ambiente específico não serão ainda mais comprometidas pela intensa ação antrópica iminente. A identificação da sensibilidade da área para a atividade econômica em comento deve ser observada para evitar a degradação do meio, já que cada ambiente é único, com funções físicas e biológicas específicas para um ecossistema, demandando estratégias para minimização de impactos.

Leuzinger e Coutinho (2019) afirmam que, além dessa dinâmica ecológica, deve-se atentar para as interferências desencadeadas na comunidade que habita o entorno da área pleiteada, já que a atividade do parque eólico provoca, dentre outros impactos, perturbações acústicas que podem levar à perda auditiva, devendo ser observada a distância recomendada de grandes áreas urbanas e de residências, a fim de minimizar tais efeitos na população. O turismo é outro ramo que pode ser afetado pela implantação de tais empreendimentos, em razão do impacto cênico nas belezas naturais, ocasionando efeitos econômicos negativos, por vezes, irreversíveis.

Assim, a escolha do local para implantação de parques eólicos depende de minuciosa análise espacial da região pretendida, com o mapeamento de áreas urbanas, residenciais, de interesse social, de relevância ambiental, Unidades de Conservação (UC), Áreas de Preservação Ambiental (APA), Áreas de Preservação Permanente (APP), dentre outras, complementada por estudos detalhados da legislação pertinente, que vão conferir segurança a investidores e ao meio ambiente (MELLO, 2014).

### **3.3. A criação de áreas protegidas visando à integridade de recursos naturais**

De acordo com Boas e Mattos (2021), o modelo atual de preservação do meio ambiente no Brasil visa à conservação de ecossistemas por meio da criação de áreas com restrições de uso, que contenham importantes atributos ecológicos e significativos exemplares da fauna e da flora nacionais. O Brasil é um país de megadiversidade biológica, cuja conservação tornou-se prioridade nas últimas décadas, o que pode ser constatado pelo histórico de políticas voltadas ao meio ambiente e outros mecanismos de regulação, fiscalização e controle do uso (legislação, plano de manejo, etc.), a fim de preservar recursos naturais e genéticos (IRVING, 2015).

Nesse panorama, foram criadas diversas normas com o intuito de preservar a qualidade ambiental no país, como a Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000, que instituiu o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza (SNUC), que engloba áreas de relevância ambiental, seja pela representatividade do ecossistema, seja pela beleza cênica constatada. Segundo a referida norma, as

UC integrantes do sistema podem ser Unidades de Proteção Integral ou Unidades de Uso Sustentável, sendo que, nas unidades de uso sustentável, é autorizado o uso sustentável de parcela dos recursos naturais disponíveis e, nas unidades de proteção integral, é permitido apenas o uso indireto dos recursos existentes (BRASIL, 2000). A Tabela 1 especifica as categorias das UC de acordo com a mencionada lei.

Tabela 1 – Categorias das Unidades de Conservação.

<b>PROTEÇÃO INTEGRAL</b>	<b>USO SUSTENTÁVEL</b>
Estação Ecológica	Área de Proteção Ambiental (APA)
Reserva Biológica	Área de Relevante Interesse Ecológico
Parque Nacional	Floresta Nacional
Monumento Natural	Reserva Extrativista
Refúgio de Vida Silvestre	Reserva de Fauna
	Reserva de Desenvolvimento Sustentável
	Reserva Particular do Patrimônio Natural (RPPN)

Fonte: Autores.

A lei do SNUC permite a exploração comercial de serviços obtidos ou desenvolvidos a partir de recursos naturais existentes nas UC, exceto em APA e RPPN, o que depende de prévia autorização do órgão ambiental competente, por meio de procedimento administrativo específico (licenciamento ambiental), fundamentado em Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e respectivo Relatório de Impacto Ambiental (RIMA). O aludido regramento estabelece que as UC, à exceção de APA e RPPN, devem possuir uma Zona de Amortecimento (ZA), cuja dimensão é definida por estudos técnicos que considerem as características de cada unidade e onde as atividades humanas se sujeitam a normas e restrições próprias, a fim de minimizar os impactos negativos sobre a unidade (BRASIL, 2000).

De forma a conferir maior proteção, a Resolução CONAMA n° 428, de 17 de dezembro de 2010, dispõe que o licenciamento de empreendimentos de significativo impacto ambiental, assim considerados pelo órgão licenciador, que possam afetar uma UC ou sua ZA, só poderá ser concedido após autorização do órgão responsável pela administração da UC ou, no caso das RPPN, pelo órgão responsável por sua criação (CONAMA, 2010).

O SNUC cria ainda os Corredores Ecológicos (CE), que têm a função de promover a conexão entre fragmentos de áreas naturais, configurando porções de ecossistemas que ligam UC diferentes,

possibilitando o movimento da biota e a dispersão de espécies, visando à recolonização de áreas degradadas e à manutenção de populações que necessitam habitar áreas maiores do que aquelas das unidades individuais. As regras de utilização e ocupação dos CE, bem como seu planejamento, devem constar do plano de manejo da UC a que estiver atrelado, incluindo ações que tratam da integração com as comunidades próximas (BRASIL, 2000).

Destaca-se a Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012, que dispõe sobre a proteção da vegetação nativa do país. O chamado Código Florestal versa sobre espaços territoriais especialmente protegidos, como Área de Preservação Permanente (APP) e a Reserva Legal, estabelecendo situações específicas em que a supressão de vegetação nativa protetora de nascentes, dunas e restingas poderá ser autorizada, como em casos de utilidade pública (obras de infraestrutura destinadas às concessões e aos serviços públicos de energia, por exemplo), desde que realizado o licenciamento pelo órgão ambiental competente (BRASIL, 2012).

Segundo a Resolução CONAMA nº 303, de 20 de março de 2002, as APP são espaços de relevante interesse ambiental que integram o desenvolvimento sustentável, como, por exemplo, as restingas como fixadoras de dunas ou estabilizadoras de mangues (BRASIL, 2012). No entanto, embora protegidas integralmente em virtude da importância ambiental estratégica, as APP podem ser utilizadas nas situações previstas na Resolução CONAMA nº 369, de 28 de março de 2006, dentre as quais encontra-se a permissão para a intervenção ou a supressão de vegetação do local no caso de obras essenciais de infraestrutura destinadas a serviços públicos de energia (utilidade pública) (CONAMA, 2006).

Por sua vez, a Lei nº 11.428, de 22 de dezembro de 2006, dispõe sobre a utilização e proteção da vegetação nativa do Bioma Mata Atlântica, autorizando a supressão da vegetação nativa em idêntica situação, não obstante tenha, como objetivos específicos, a salvaguarda da biodiversidade, da saúde humana, dos valores paisagísticos, estéticos e turísticos, do regime hídrico e da estabilidade social (BRASIL, 2006). Silva (2005) esclarece que, em que pese a Mata Atlântica tenha sido declarada patrimônio nacional pela Lei Maior, tal fato se deu para que a utilização de seus recursos naturais ocorra dentro de condições seguras ao meio ambiente, e não para torná-la efetivamente preservada.

Nota-se, pelo extrato da regulamentação da matéria, a preocupação com a preservação de áreas naturais, a qual estipula procedimentos e ações que visam à integridade dos ecossistemas e processos ecológicos envolvidos. Em contrapartida, constam previstas situações em que é autorizada a intervenção em áreas protegidas, como no caso de obras de infraestrutura destinadas a serviços públicos de energia, o que engloba a instalação de usinas eólicas, dada a natureza energética deste empreendimento. Importante destacar que, em que pese a previsão legal, muitos impasses judiciais

decorrem de tal permissão, considerando a dificuldade em se estabelecer o alcance do comprometimento das funções ambientais em virtude da supressão da vegetação (AMARAL; PEDREIRA; BLEIL, 2011).

Por todo o exposto, resta evidente que a localização geográfica é fator primordial a ser considerado quando da implantação de projetos eólicos, cuja prospecção da região requer atenção, já que tais empreendimentos exigem terrenos extensos para abrigar gigantescos aerogeradores, os quais podem coincidir com áreas de importância ambiental, demandando minucioso estudo prévio de viabilidade técnico-ambiental a fim de minimizar os impactos decorrentes de sua implantação.

#### **3.4. O licenciamento ambiental como instrumento para prevenção de impactos ao meio ambiente**

O aproveitamento dos ventos para geração de energia vem apresentando expressivo crescimento no Brasil e no mundo, e já corresponde a 8,8 % da matriz elétrica nacional (EPE, 2021). Contudo, muito embora seja considerada energia limpa e renovável, os empreendimentos desta tipologia podem causar diversos efeitos ao meio ambiente, assim como desencadear impactos econômicos, sociais e culturais nas comunidades do entorno, durante todas as fases de execução do projeto (LEUZINGER; COUTINHO, 2019).

Odum e Barret (2006) asseveram que a retirada da vegetação da área selecionada promove a fragmentação dos ecossistemas locais, podendo extinguir espécies que se fixam pelo tipo de vegetação existente. Ainda, pode haver a morte de aves pela colisão com as hélices ou com as linhas de transmissão, além de alterações comportamentais quanto à reprodução, alimentação e migração de alguns grupos da fauna local.

Para Spellman (2014), a área ocupada pode ser degradada permanentemente, em virtude de desmatamento e de terraplenagem, que podem causar alterações na cobertura vegetal, introdução de material sedimentar em corpos hídricos superficiais e subterrâneos próximos, ou interferir em sítios arqueológicos existentes no local. Tais ações podem influenciar no controle da erosão e na disponibilidade de água, causando a supressão de habitats e alterações na paisagem natural. A impermeabilização do solo, a supressão da vegetação e a ocupação das margens dos recursos hídricos podem acentuar os efeitos das ilhas de calor, gerando desconforto térmico na cidade e alterando a dinâmica de chuvas (ALVIM; KATO; ROSIN, 2015).

A Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA), instituída pela Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, objetiva preservar a qualidade do meio ambiente e do equilíbrio ecológico em conjunto com o desenvolvimento econômico-social. Para tanto, atribuiu ao Ministério do Meio Ambiente (MMA), órgão central da Administração Ambiental, a incumbência de planejar e supervisionar a PNMA, e ao

Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), a função de executar tal Política (BRASIL, 1981).

Neste sentido, a atual redação do art. 10 da PNMA, conferida pela Lei Complementar nº 140, de 08 de dezembro de 2011, estabelece a necessidade de prévio licenciamento ambiental para construção, instalação, ampliação e funcionamento de estabelecimentos e atividades utilizadores de recursos ambientais, efetiva ou potencialmente poluidores ou capazes, sob qualquer forma, de causar degradação ambiental (BRASIL, 2011). Segundo Vasconcelos e Coriolano (2008), este procedimento requer capacidade técnica e conhecimento científico para sua execução, sob pena de, em caso de negligência, acarretar prejuízos irreparáveis à sociedade. Além disso a ética ambiental deve permear a conduta dos envolvidos, com valores e posturas de respeito ao meio ambiente, mesmo se contrários à lógica mercadológica capitalista (SANTOS; JAPIASSÚ, 2006).

Além da regulamentação trazida pela PNMA, a Resolução CONAMA nº 01, de 23 de janeiro de 1986, estabelece diretrizes gerais e critérios básicos para elaboração do EIA/RIMA, a serem submetidos a aprovação do órgão estadual competente (CONAMA, 1986). Nesse contexto, a Resolução CONAMA nº 237, de 19 de dezembro de 1997, reafirmou os princípios instituídos pela PNMA e pela CF/88, definindo licenciamento ambiental como regulador das atividades e empreendimentos que utilizam os recursos naturais e que podem causar degradação ambiental no local de sua instalação (CONAMA, 1997). Referida norma elenca as atividades e empreendimentos sujeitos obrigatoriamente a licenciamento ambiental, não abrangendo, no entanto, a implantação e operação de parques eólicos.

Tal complementação foi trazida pela Resolução CONAMA nº 462, de 24 de julho de 2014, que estabelece procedimentos específicos para o licenciamento ambiental de empreendimentos de geração de energia elétrica a partir de fonte eólica em superfície terrestre. Esta norma não considera tais projetos como sendo de baixo impacto ambiental, devendo, o órgão licenciador, observar o porte, a localização e o potencial poluidor da atividade (CONAMA, 2014). Segundo a referida Resolução, além de EIA/RIMA, são necessárias audiências públicas visando à participação popular no planejamento da cidade, no caso de licenciamento de empreendimentos cujo impacto não seja considerado baixo e que se localizem, dentre outros (PONTES; FARIA, 2012):

- No bioma Mata Atlântica e implicar corte e supressão de vegetação primária e secundária no estágio avançado de regeneração;
- Na Zona Costeira e implicar alterações significativas das suas características naturais;

- Em zonas de amortecimento de unidades de conservação de proteção integral, adotando-se o limite de 3 km (três quilômetros) a partir do limite da unidade de conservação, cuja zona de amortecimento não esteja estabelecida.

A Resolução CONAMA nº 237/1997 estabelece que é de competência do IBAMA o licenciamento ambiental de empreendimentos e atividades com significativo impacto ambiental (âmbito nacional ou regional), o qual, constatando a adequação da área sugerida para a implantação do empreendimento, concederá as licenças ambientais devidas, nos termos da citada norma (CONAMA, 1997).

Nessa esteira, a Lei Complementar (LC) nº 140/2011 definiu que, dentre as ações administrativas da União, está o licenciamento ambiental de empreendimentos e atividades localizados ou desenvolvidos em UC instituídas pela União, exceto em APA. Ainda, estabeleceu que é de competência municipal promover o licenciamento ambiental das atividades ou empreendimentos que causem ou possam causar impacto ambiental de âmbito local e os localizados em UC instituídas pelo município, à exceção de APA. Além disso, em decorrência de sua competência residual, aos estados cabe o licenciamento ambiental dos empreendimentos que não se enquadrem nas competências da União ou do município, ressaltando-se que, em virtude da competência comum prevista na CF/88, na inexistência de órgão ambiental municipal, a competência passa a ser estadual e, na ausência de órgão ambiental estadual, a competência é da União (BRASIL, 1988; BRASIL, 2011).

Amaral, Pedreira e Bleil (2011) informam que o licenciamento ambiental visa identificar possível dano antes da sua ocorrência, atestando a viabilidade ambiental inicial do empreendimento proposto. No entanto, por atuar no campo preventivo, somente após a concessão das licenças pertinentes será possível avaliar efetivamente a abrangência do impacto gerado, podendo haver inclusive mudanças quanto ao órgão ambiental que deu início ao licenciamento. Logo, por se tratar de um procedimento complexo, que demanda estudos bem elaborados, pareceres de órgãos intervenientes e cumprimento de exigências, devem ser observadas a dominialidade do bem, a tipologia e a localização do projeto, além das atividades a serem desenvolvidas, visando à segurança jurídica quanto à definição do órgão competente e à celeridade no licenciamento pretendido.

No que diz respeito ao tempo de duração do referido procedimento, o Tribunal de Contas da União (TCU) realizou auditoria no IBAMA, no final de 2018, para avaliar os procedimentos do licenciamento ambiental federal. O relatório respectivo destacou a tempestividade na atuação do órgão, evidenciando que, na maioria dos casos, o atraso é ocasionado pela demora na realização das correções no EIA/RIMA por parte dos empreendedores, além do período necessário para análise de órgãos intervenientes (TCU, 2019)

Entretanto, não obstante o constatado pelo TCU nos autos do Processo nº TC 024.048/2018-6, o Projeto de Lei (PL) nº 3729/2004 (Marco Legal do Licenciamento Ambiental), aprovado na Câmara dos Deputados em 13/05/2021, propõe a flexibilização do modelo atual, implantando mudanças processuais que visam a conferir maior celeridade a este procedimento (BRASIL, 2004). O referido PL prevê casos de dispensa de licenciamento e outras situações em que o procedimento pode ocorrer em apenas uma ou duas fases, além de propor a criação do “autolicensing”, que permite a emissão de licenças automáticas, sem a análise técnica do órgão ambiental competente, mediante uma “declaração de adesão e compromisso” do proponente, manifestando a intenção de cumprir os requisitos estabelecidos pelo órgão licenciador.

Ruaro, Ferrante e Fearnside (2021) destacam que, nesse último caso, o referido PL elimina a participação pública no processo, inclusive de órgãos como o Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBIO) e a Fundação Nacional do Índio (FUNAI), que são responsáveis pelas UC e por assegurar os direitos dos povos indígenas, respectivamente. Nesse passo, já considerado inconstitucional pelo Ministério Público Federal (MPF) (GISI; LEITE, 2017), este PL segue para o Senado brasileiro, que anunciou a intenção de realizar audiências públicas antes da votação em plenário (SENADO, 2021).

### **3.5. Estudos para identificação de impactos ambientais**

Segundo Antunes (2005), de regra, o licenciamento ambiental e os estudos pertinentes materializam o princípio da prevenção, e não o da precaução, por envolverem certezas científicas quanto à conduta adotada, tornando-se o principal instrumento para evitar, mitigar ou minimizar danos decorrentes da intervenção humana. Mello (2014) afirma que, considerando a exigência de apresentação de EIA/RIMA para o licenciamento de parques eólicos, tais documentos devem ser cuidadosamente elaborados pelos interessados e contundentemente analisados pelo órgão licenciador competente, sobretudo quanto às alternativas locais e recursos afetados, tendo em vista a irreversibilidade dos possíveis danos decorrentes do projeto.

O EIA é um documento técnico detalhado, que tem como finalidade identificar os impactos ambientais gerados por atividades ou empreendimentos potencialmente poluidores, ou que possam causar degradação ambiental, subsidiando a adoção de medidas mitigadoras e de controle ambiental que busquem garantir o uso sustentável do recurso natural. Já o RIMA é o relatório que resume as conclusões do EIA, de forma clara e objetiva, por meio de ilustrações, mapas, gráficos e tabelas, a fim de facilitar o entendimento dos parâmetros pesquisados. Os mapas e plantas de localização devem ser entregues em escalas apropriadas, abrangendo o local da usina, sua área de influência, obstáculos,



benfeitorias e outros detalhes exigidos pelo o órgão ambiental competente. Deve apresentar, pelo menos (CONAMA, 1986):

- Área de influência, descrição, objetivos e justificativas do projeto;
- Compatibilidade com os programas, planos e políticas governamentais;
- Matéria-prima a ser utilizada;
- Resultados do diagnóstico ambiental da área de influência do projeto;
- Prováveis impactos em todas as fases do projeto;
- Impactos não corrigíveis e grau de alteração decorrente;
- Perspectivas da qualidade ambiental na área de influência do empreendimento;
- Efeitos desejados após aplicação das medidas mitigadoras;
- Programa de acompanhamento e monitoramento dos impactos negativos.

EIA e RIMA são elaborados para a obtenção da Licença Prévia (LP), sendo necessária a emissão de outras duas licenças, quais sejam, a Licença de Instalação (LI) e a Licença de Operação (LO). A LI é obtida após a aprovação do layout da usina, contendo todas os parâmetros técnicos envolvidos, e a LO, depende do cumprimento das licenças anteriores, desde que adotadas as medidas de controle ambiental e as condicionantes determinadas (SILVA *et al.*, 2015).

Silva *et al.* (2015) destacam que as licenças concedidas não têm caráter definitivo, podendo constar inválidas (se decorrido o prazo legal pertinente), suspensas ou canceladas (em virtudes de inadequações do projeto quando da renovação das mesmas), o que possibilita revisões sistemáticas relativas ao cumprimento das condicionantes estabelecidas. Isso faz parte de uma legislação que vai de encontro ao capitalismo moderno baseado na premissa desenvolvimentista de transformação do território e da apropriação da natureza para fins privados (PEREZ; GOMES, 2014).

Além disso, é possível obter a concessão de Licença Única (Licenciamento Ambiental Simplificado), em caso de empreendimentos elétricos com pequeno potencial de impacto ambiental, mediante apresentação de Relatório Ambiental Simplificado (RAS), que deve conter, dentre outras, informações concernentes ao diagnóstico ambiental da região, sua caracterização, a identificação dos impactos ambientais e das medidas de controle, de mitigação e de compensação pertinentes (CONAMA, 2001). Essa licença aplica-se desde que cumpridas algumas exigências, como (SILVA *et al.*, 2015):

- Distância mínima de 350m, incluindo subestações e entorno, de comunidades circunvizinhas;
- Localização fora da ZA de UC de Proteção Integral;

- Ausência de Intervenção física em formações dunares móveis, planícies fluviais e de deflação e mangues, em qualquer fase do empreendimento ou de suas obras associadas;
- Ausência de supressão de vegetação nativa (arbórea ou arbustiva) na área da poligonal do empreendimento.

Apesar das diretrizes técnicas estabelecidas, Pena *et al.* (2016) argumentam que o licenciamento ambiental no Brasil experimenta fragilidades decorrentes do contraste entre a proposta teórica e sua efetiva execução, sobretudo por estar sujeito à influência política e de interesses econômicos. Em razão disso, não obstante tenha sido criado para ser um instrumento de avaliação, o EIA transformou-se num instrumento político para a legitimação de intervenções ambientais, ou seja, uma espécie de viabilizador de projetos, exatamente por conferir credibilidade ao empreendimento junto à sociedade.

Por meio do EIA, grandes projetos de desenvolvimento afastam a oposição ambiental, tornando-se econômica e politicamente interessantes, embora potencialmente causadores de impactos ambientais. Isso acontece também porque a centralização das decisões facilita a influência dos grupos favoráveis aos projetos, enquanto a parcela da sociedade, que efetivamente sofrerá os impactos negativos, tem pouco acesso à tomada de decisão (PENA *et al.*, 2010). Assim, as deliberações, as quais deveriam ser voltadas ao interesse da coletividade, adotam um viés econômico, em prol de um interesse particular (ZHOURI, 2008).

Além disso, as empresas contratadas para realizar o EIA, buscando atingir os objetivos do contratante, podem adotar linguagem técnica nos estudos e pareceres, mas com argumentos subjetivos, o que dificulta o profundo conhecimento do projeto (FARIA, 2011). Ainda, a realização de audiências em locais distantes das áreas impactadas, aliada a uma publicidade insuficiente, podem ser escolhas deliberadas para alcançar a decisão almejada (RBJA, 2009). Faria (2011) afirma que a politização dos cargos gerenciais do órgão licenciador, a deficiência na capacitação técnica dos agentes públicos para análise do EIA e a exigência de rapidez na avaliação de projetos prioritários também são entraves do procedimento de licenciamento ambiental no país.

### **3.6. Macaé e a proteção do meio ambiente**

O respeito a todas as formas de vida, e aos seus locais de abrigo, reflete o compromisso do homem com toda a raça humana e com sua própria vida (ANTUNES, 2005). Silva (2005) destaca que a CF/88 impõe postura conservacionista a todos aqueles que direta ou indiretamente possam causar danos ao meio ambiente, dando ênfase à atuação preventiva, sem descuidar das medidas repressivas cabíveis. Assim, a proteção do meio ambiente é competência comum de todos os entes da federação,

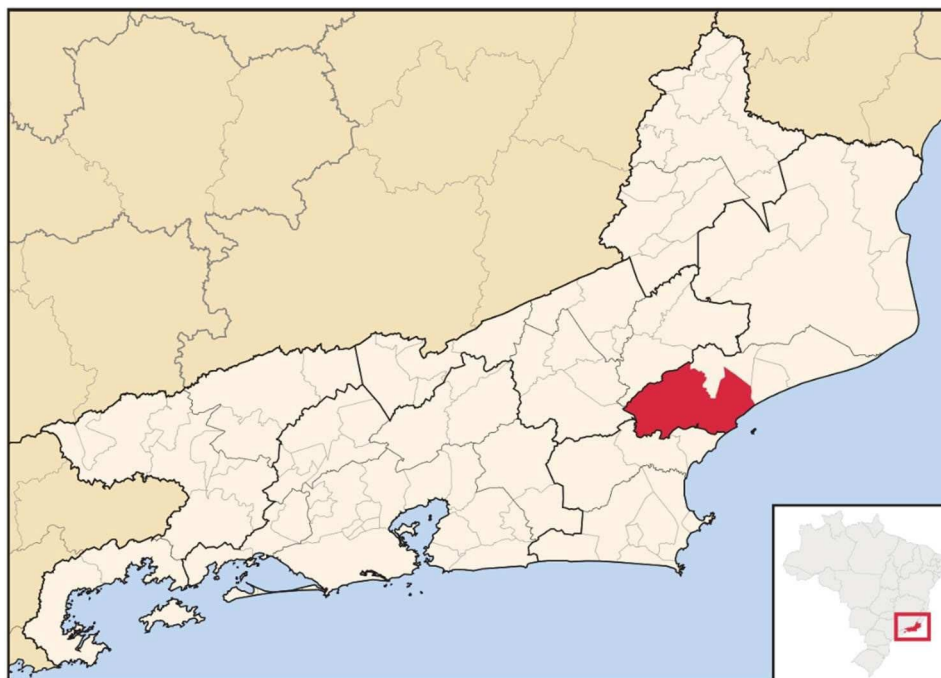
com normas gerais fixadas pela União, competência residual por parte dos Estados e interesses locais a cargo do município. A atuação do município se restringe ao seu território, mas alcança todos os elementos que afetem sua população, devendo promover, na seara ambiental, o controle da poluição e a preservação de recursos naturais (BRASIL, 1988).

Nesta consonância, segundo Piérola e Almeida (2016), a Política Urbana (Lei nº 10.257, de 10 de julho de 2001) define os instrumentos para regulamentação do território, dentre eles, o Plano Diretor (PD), que apresenta diretrizes, estratégias e ações para ordenar o crescimento da cidade, e o Zoneamento Urbano, que estabelece um planejamento visando a atribuir o adequado lugar para cada atividade e indivíduo. Nessa égide, o PD é definido como uma ferramenta legal e competente para implementação das políticas de desenvolvimento urbano sustentável, inclusive para solução de conflitos urbanísticos, devendo organizar espaços habitáveis de modo a propiciar melhores condições de vida à população (BARBOZA; QUINTEIRO, 2007).

De forma interdisciplinar, considerando a natureza dinâmica, sistêmica e complexa da cidade, torna-se necessário o alinhamento entre a política urbana e os princípios da sustentabilidade, na busca pela harmonia dos direitos econômicos, sociais, ambientais, políticos e culturais, a fim de estabelecer um ambiente urbano onde prevaleça a liberdade individual e a dignidade da pessoa humana (LEITE; AWAD, 2012). De acordo com Barcellos (2011), os direitos humanos dizem respeito àquilo que o homem necessita para desenvolver uma vida digna, o que inclui o direito a um meio ambiente ecologicamente equilibrado, que lhe confira o direito a ter uma vida saudável. Sarlet (2001) complementa que jamais haverá dignidade humana se não houver respeito à vida e à integridade física do homem, consubstanciada também na preservação do meio natural.

A cidade de Macaé, fundada em 29/07/1813, é cercada pelo mar e por floresta (Figura 2), o que lhe confere inigualável beleza cênica e privilegiada diversidade de recursos naturais, incluindo rios, cachoeiras, serras, mangues, restingas, praias, lagoas e ilhas. Embora se destaque como a Capital Nacional do Petróleo, devido à indústria do “óleo de pedra” que se consolidou na região desde meados de 1970, a Princesinha do Atlântico, como também é conhecida, desenvolve inúmeros projetos voltados à preservação do meio ambiente, de forma a contribuir para o desenvolvimento sustentável (LOUREIRO *et al.*, 2014).

Figura 2 – Localização do município de Macaé, Rio de Janeiro.



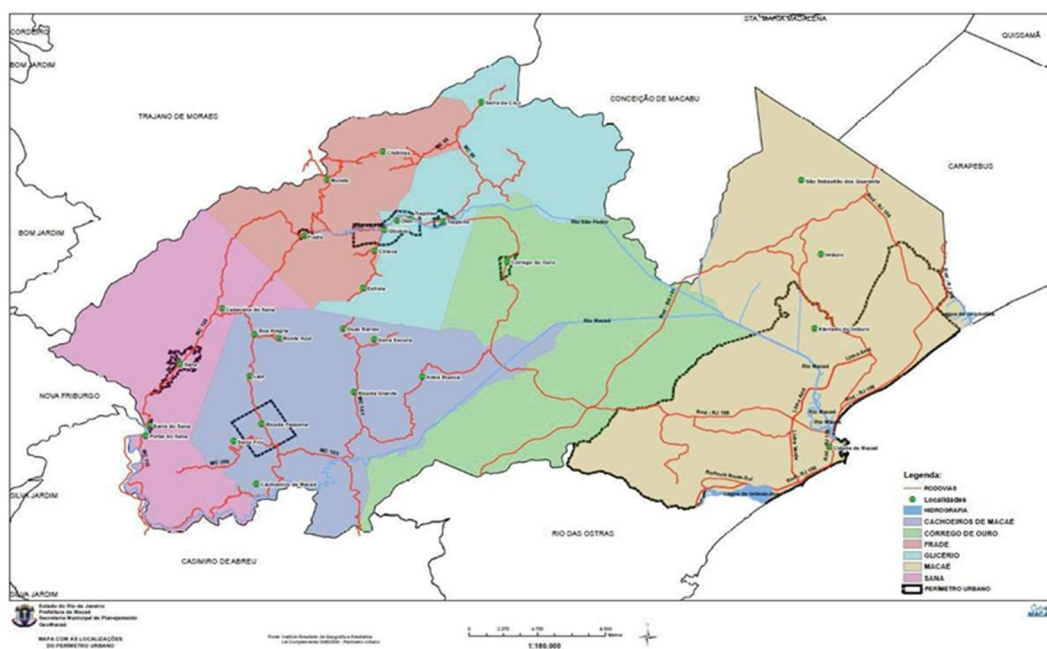
Fonte: Macaé (2021).

Por outro lado, em virtude da intensa atividade petrolífera, há constantes preocupações quanto aos impactos ambientais gerados pelas empresas do setor, demandando uma estrutura governamental robusta para assegurar a proteção, controle e fiscalização do ambiente (RÉGIS; MOREIRA; PINTO, 2016). Loureiro *et al.*, (2014) destacam que a indústria do petróleo gerou diversos impactos econômicos, sociais e ambientais na região, como a ocupação desordenada do território, geradora de bolsões de pobreza, que fragmentaram a vegetação e alteraram importantes ecossistemas naturais.

Conforme determina o Código Municipal do Meio Ambiente, instituído pela Lei Complementar nº 027/2001, a estrutura do governo local dispõe de Secretaria voltada ao meio ambiente e à sustentabilidade (SEMMA), subsidiada por coordenadorias que tratam de licenciamento ambiental, de fiscalização de controle ambiental, de arborização e paisagismo e da fauna silvestre. Há também o Conselho Municipal de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (COMMADS), órgão colegiado autônomo de caráter consultivo, deliberativo e normativo do Sistema Municipal de Meio Ambiente (SIMMA), que tem, como atribuições, auxiliar na definição da política ambiental do município, apresentar sugestões para a reformulação do PD, no que concerne às questões ambientais, e propor a criação de UC, dentre outras. O município conta ainda com o Fundo Ambiental (FUNDAM) para fomentar os projetos que visem ao uso racional e sustentável de recursos naturais, atendendo, dentro da legalidade e dos princípios constitucionais, as solicitações para prover instalações, funcionamento e atividades da SEMMA, do COMMADS e das UC municipais (MACAÉ, 2001).

A Lei Orgânica de Macaé (LOM), consolidada até a Emenda 068/2011, divide administrativamente o município em 6 (seis) distritos, quais sejam, Cidade de Macaé, Córrego do Ouro, Cachoeiros de Macaé, Glicério, Frade e Sana, cujos respectivos perímetros urbanos constam indicados na Figura 3, onde se observa extensa área urbanizada na cidade de Macaé (MACAÉ, 2011).

Figura 3 – Distritos do município de Macaé e respectivos perímetros urbanos.



Fonte: Macaé (2011).

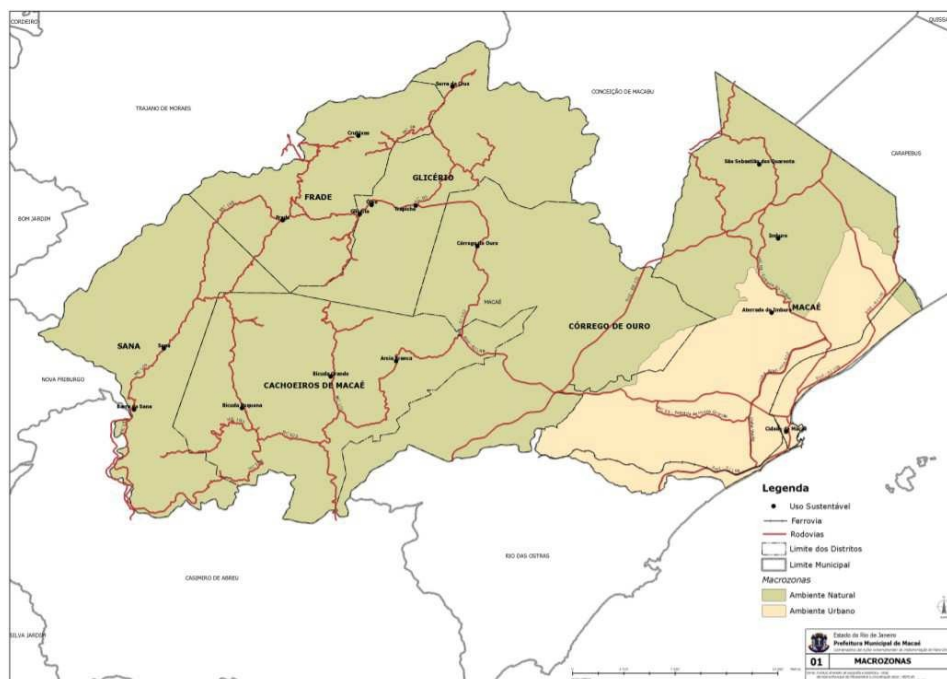
A legislação que dispõe sobre a Política de Desenvolvimento Urbano e o PD de Macaé (LC nº 076/2006 e nº 279/2018) visam a definir a melhor forma de usar cada parte da cidade, considerando a intensa urbanização, os elevados índices de crescimento demográfico, os fluxos migratórios, bem como a desigualdade social que leva à ocupação de áreas de risco ou protegidas (LOUREIRO *et al.*, 2014). Silva (2005) reforça que a política de desenvolvimento urbano busca ordenar o pleno desenvolvimento da função social da cidade, assim como garantir o bem-estar da comunidade, ficando, o uso do solo urbano, sujeito às leis urbanísticas e ao PD.

Nessa esteira, o PD do município tem, como uma de suas diretrizes, ampliar áreas verdes, priorizando aquelas de interesse ambiental, as quais, após estudos prévios, poderão ser transformadas em UC ou ter padrões diferenciados no que diz respeito ao uso e ocupação do solo. Além disso, a norma busca desenvolver política ambiental para preservação e recuperação de espaços territoriais com atributos ambientais relevantes e orienta a atuação em sintonia com as políticas de uso e ocupação

do solo, pretendendo, em especial, a implantação de corredores ecológicos urbanos (MACAÉ, 2006; MACAÉ, 2018).

Nesse sentido, o PD divide o território macaense em 2 (duas) macrozonas: Macrozona de Ambiente Natural (MAN) e Macrozona de Ambiente Urbano (MAU), destacando-se a extensa região do município alocada como de ambiente natural (Figura 4), que conta com espaços protegidos e desenvolvimento de programas e projetos para preservar e proteger a fauna, a flora e as belezas naturais do município (MACAÉ, 2006). A cidade abriga, em seu território, diversas UC, a saber: APA do Sana (Lei nº 2.172/2001), APA do Morro de Santana (Lei nº 1.463/1993), APA e Parque Natural Municipal do Arquipélago de Santana (Lei nº 1.216/1989), APA Rio Novo (Lei 4.753/2021), Parque Natural Municipal do Atalaia (Lei nº 1596/1995), Parque Natural Municipal da Restinga do Barreto (Decreto nº 139/2016), RPPN Ponte do Baião (Portaria INEA 256/2011 e Portaria INEA 349/2012), RPPN Fazenda Barra do Sana (Portaria MMA 65/1999), RPPN Sítio Sumidouro e RPPN Sítio Peito de Pomba (Portaria MMA 156/1998), RPPN Mario e Alba Corral (Portaria INEA 416/2013) e Monumento Natural do Pico do Frade (Lei 4.747/2021).

Figura 4 – Macrozonas de Ambiente Natural e Urbano – Macaé.



Fonte: Macaé (2006).

A cidade contempla 35,5% da vegetação do bioma Mata Atlântica e desenvolve projeto para elaboração do Plano Municipal de Conservação e Recuperação da Mata Atlântica (PMMA), cujo objetivo é, dentre outros, mapear os remanescentes florestais e indicar áreas prioritárias para

conservação e/ou recuperação, nos termos da Lei nº 11.428, de 22 de dezembro de 2006, que trata da utilização e proteção da vegetação nativa (BRASIL, 2006; MACAÉ, 2021). De acordo com Zaú (1998), esse bioma é um dos mais degradados pela agropecuária, restando apenas fragmentos pouco conhecidos ou protegidos. O PMMA integra o projeto "Biodiversidade e Mudanças do Clima na Mata Atlântica", que engloba 10 municípios do estado e tem coordenação do MMA e da Secretaria de Estado do Ambiente e Sustentabilidade do Rio de Janeiro (SEAS) (MACAÉ, 2021a).

O município abriga áreas de proteção integral federais, quais sejam, o Parque Nacional da Restinga de Jurubatiba, que serve de abrigo para diversas espécies de fauna e flora das restingas que em outros locais do país estão em risco de extinção, e a Reserva Biológica União (Decreto s/nº - 1998/Decreto s/nº - 2017), cujo objetivo é assegurar a proteção e a recuperação de remanescentes da Mata Atlântica, e da fauna típica (onça-parda, mico-leão-dourado, dentre outros) que dela depende (ICMBIO, 2021a; ICMBIO, 2021b).

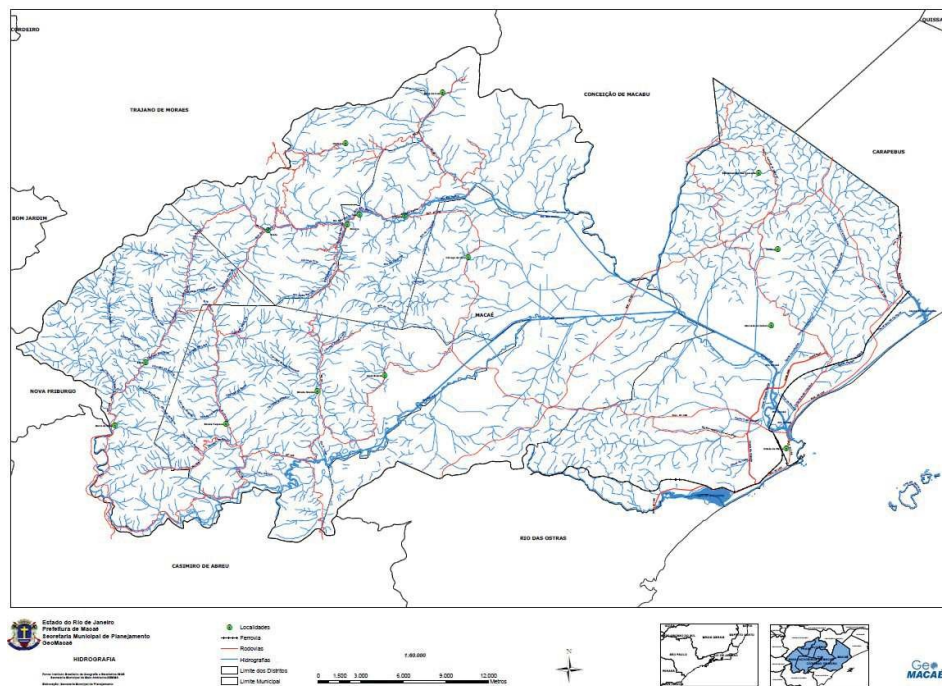
Em Macaé, há também uma área de uso sustentável estadual, a APA Macaé de Cima (Decreto Estadual nº 29.213/2001), criada em virtude do inestimável patrimônio florestal, em ótimo estado de conservação, responsável pelo abrigo de inúmeras espécies da fauna e flora nativas, endêmicas, raras e/ou ameaçadas de extinção (INEA, 2001). A criação dessa APA decorre ainda da necessidade de proteção das bacias dos mananciais existentes, como a do Rio Macaé, que é um manancial de importância nacional, por abastecer cidades estratégicas para o desenvolvimento do país (BOAS; MATTOS, 2021).

Outras ações englobam: o Projeto para Transformação do Parque Natural Municipal da Restinga do Barreto em uma UC do tipo Refúgio de Vida Silvestre, o Projeto Caminhos Geológicos em Macaé, para identificação da estrutura geológica das áreas do município, e o Projeto Carbono Zero (Decreto nº 156/2011), que tem a finalidade de, por meio do plantio e manutenção de mudas nativas, neutralizar GEE a partir da retirada de gás carbônico (CO<sub>2</sub>) da atmosfera. Além desses, há ações direcionadas à restauração da Restinga da Praia do Pecado, um ecossistema costeiro, ocupado por espécies nativas. Macaé desenvolve, em parceria com o Estado do Rio de Janeiro, o Programa Florestas do Amanhã, planejando o plantio de dez mil mudas de árvores nativas em áreas da cidade e da serra macaense, com foco no reflorestamento da mata ciliar de Macaé e de outros canais, objetivando o fortalecimento dos corpos hídricos (MACAÉ, 2021b).

Dada a riqueza hídrica, conforme mostra a Figura 5, o Código de Urbanismo Municipal (LC nº 141/2010) estabelece que nenhum curso d'água poderá ser alterado, canalizado ou tubulado sem autorização prévia do órgão municipal responsável, devendo conter parecer favorável do órgão estadual ou federal competente. Ainda, orienta que, ao longo dos corpos hídricos e margens de lagoas,

deverão ser projetadas, preferencialmente, vias de circulação, ciclovias e áreas verdes, privilegiando o uso coletivo e favorecendo a paisagem natural, respeitadas as Faixas Marginais de Proteção previstas na legislação pertinente (MACAÉ, 2010).

Figura 5 – Mapa da hidrografia de Macaé.

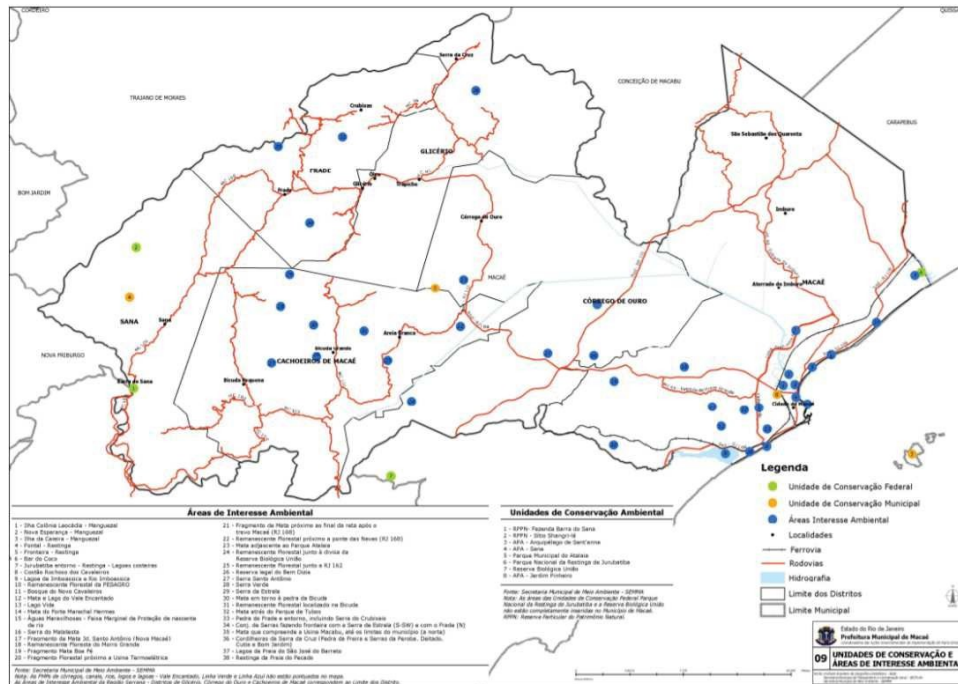


Fonte: Macaé (2010).

Macaé também se destaca pelo turismo, sobretudo no distrito do Sana, que tem sido considerado um dos dez melhores destinos para aproveitar o inverno no estado (MACAÉ, 2021c). Contudo, não obstante seus atrativos naturais, a região do Sana possui morros e encostas íngremes outrora desmatados para ampliação de cafezais e pastagens, o que causou fragmentação e degradação do solo, além da redução de águas superficiais (DEAN, 1996). Nesse sentido, a Lei Orgânica de Macaé estabelece que o município deverá incentivar o turismo alternativo e histórico-cultural, tentando proteger o patrimônio ecológico e divulgando as potencialidades culturais, históricas e paisagísticas da cidade (MACAÉ, 2011). A Figura 6 traz um mapa esquemático de algumas áreas de interesse ambiental do município (MACAÉ, 2021d).



Figura 6 – Mapa esquemático das áreas de interesse ambiental em Macaé.



Fonte: Macaé (2021d).

Por todo o exposto, restou evidenciada a riqueza de recursos ambientais disponíveis e as experiências sustentáveis desenvolvidas no município com o intuito de assegurar a preservação da biodiversidade, o que deve ser considerado quando da instalação de atividades econômicas no local. Mello (2014) alerta para as fragilidades das áreas protegidas e as implicações ambientais provocadas por parques eólicos, recomendando uma análise integrada de todos os temas interligados ao ambiente, na impossibilidade de mantê-los intocados, tendo em vista a dificuldade em se mensurar, na íntegra, os impactos ambientais decorrentes dessa implantação. Jonas (2006) confirma que a reação da natureza, mediante uma agressão intensificada, pode ser inesperada, sobretudo porque os limites de tolerância, quando ultrapassados, podem trazer efeitos nocivos que suplantem os ganhos almejados, colocando em risco o sistema por inteiro.

### 3.7. Análise do local para implantação de parque eólico em Macaé

De acordo com Antunes (2005), prevenir danos ambientais é, implicitamente, escolher dentre os diversos riscos que se apresentam, fazendo prevalecer aquele de menor gravidade, mediante a tomada de uma decisão racional. Dito isto, em atenção ao princípio do equilíbrio, que preceitua uma análise integrada das implicações provenientes de uma intervenção humana, as deliberações acerca das políticas e do direito, em matéria ambiental, devem observar as repercussões econômicas e sociais

do projeto a ser implantado, bem como sua utilidade à comunidade, sem, no entanto, implicar riscos aos ecossistemas ou à vida humana.

Jonas (2006) complementa que o primeiro dever da ética do futuro é projetar os efeitos de longo prazo, e que, em que pese não haver experiências passadas ou presentes, os males do futuro devem ser visualizados como se já tivessem sido experimentados, não podendo, a existência do ser humano, servir como objeto de experimentos da tecnologia. Tal experiência pode ser feita tão somente com recursos excedentes e não com aqueles essenciais à vida.

Macaé abriga diversas áreas que são destinadas à preservação do meio ambiente, sejam elas federais, estaduais ou municipais, além de outras acobertadas por projetos e programas ambientais em andamento. Assim sendo, a priori, o ambiente natural do município revela-se o espaço mais inviável para implantação de usinas de vento, em razão das grandes dimensões exigidas e dos possíveis impactos ambientais decorrentes. Isto posto, as áreas com menor grau de inviabilidade seriam as localizadas no ambiente urbano do município, o que reduziria a interferência antrópica à biodiversidade da região.

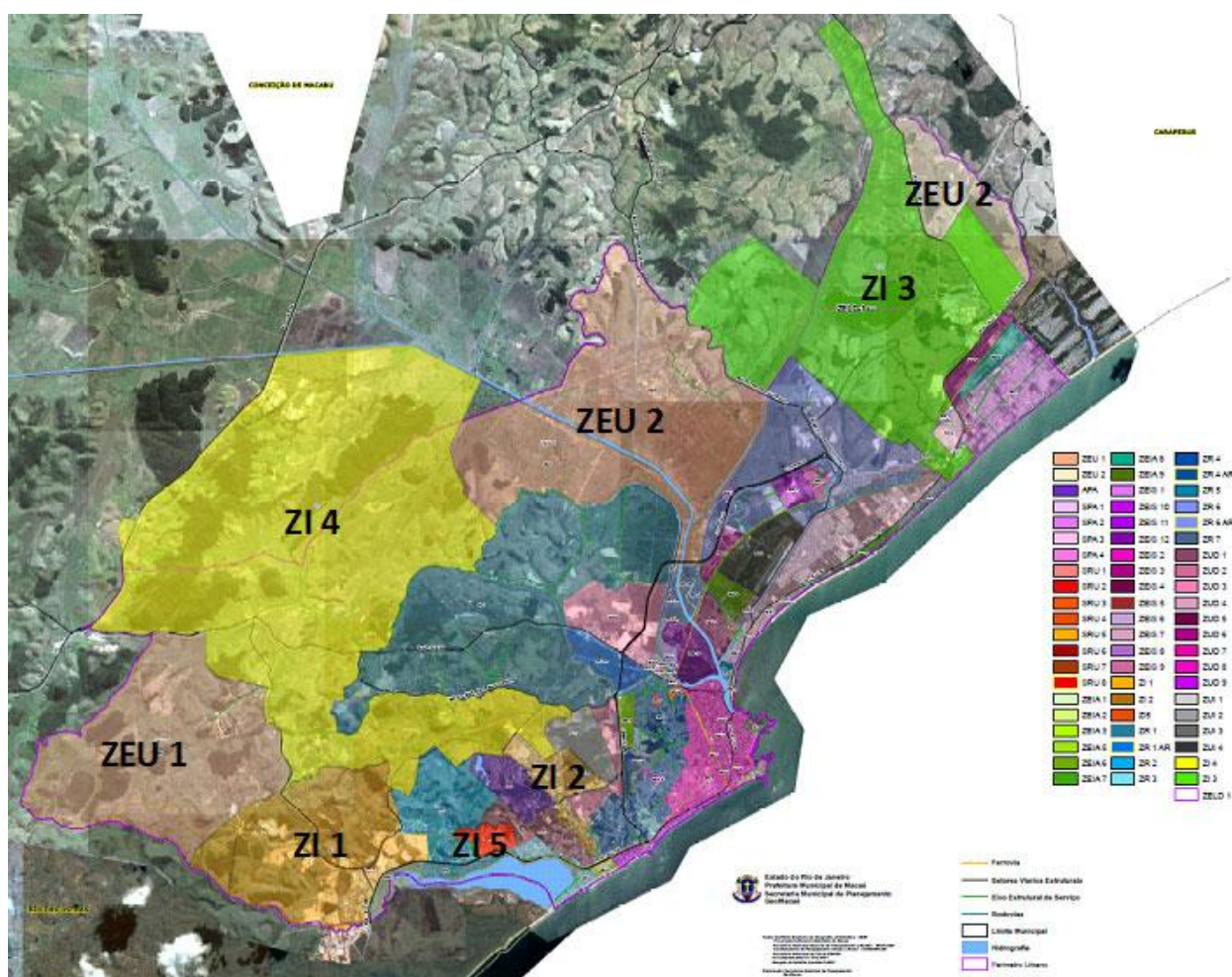
O conceito de cidade sustentável tem como parâmetro básico a delimitação do território urbano em zonas, mediante a segregação de perímetros destinados a usos permitidos, como habitação, indústrias, comércio e lazer, de forma a garantir a qualidade de vida por meio de relações equilibradas entre centro e periferia e entre espaços público e privado (COMPANS, 2001). Nesse sentido, Silva (2005) destaca que o lazer, além de direito social, é também uma manifestação do direito urbanístico, tendo em vista a necessidade de lugares apropriados para a recreação, a qual fortalece a relação entre o homem e o meio ambiente equilibrado.

Nessa seara, o PD e o Código de Urbanismo Municipal estabelecem a ordenação do território buscando minimizar a interferência econômica no ambiente natural e em áreas de relevância ambiental (MACAÉ, 2006; MACAÉ, 2010). A delimitação da área urbana em zonas busca também evitar ocupações em áreas “verdes”, diante da fragilidade ambiental e das relações ecossistêmicas existentes (LEITE; AWAD, 2012). No que concerne ao uso do ambiente urbano em Macaé, o referido código de urbanismo traz o mapa de zoneamento, com a divisão do espaço urbano em zonas e setores, inclusive com regiões especiais para proteção do meio ambiente, conforme ilustra a Figura 7, e como segue (MACAÉ, 2010):

- Zonas Residenciais (ZR);
- Zonas de Uso Diversificado (ZUD);
- Zonas de Uso Institucional (ZUI);
- Zonas Industriais (ZI);

- Zonas Especiais de Interesse Social (ZEIS);
- Zonas Especiais de Interesse Ambiental (ZEIA);
- Zonas de Expansão Urbana (ZEU);
- Setores Especiais de Requalificação Urbano-Ambiental (SRU);
- Setores Especiais de Preservação Ambiental (SPA);
- Setores Especiais de Preservação Histórico-Cultural (SPH);
- Setores Viários Estruturais (SVE);
- Setores Viários de Serviços (SVS).

Figura 7 – Mapa de zoneamento urbano de Macaé.



Fonte: Macaé (2010).

Segundo Silva, Becker e Martins (2015), do ponto de vista holístico, Macaé é um sistema composto de elementos interdependentes. Portanto, a escolha de áreas para implantação de parques eólicos deve observar não só as perspectivas técnicas de qualificação da área selecionada, mas também

todas as fragilidades ambientais da região (MELLO, 2014). Sob esse enfoque, neste estudo interessa analisar tão somente as ZEU e as ZI da Figura 7, por não envolverem questões ambientais, culturais, sociais, institucionais ou relativas ao sistema viário local, em consonância com a sustentabilidade já analisada. Corroborando a temática, Antunes (2005) ensina que a atividade industrial deve, concomitantemente, conciliar a produção com baixos níveis de incômodo a terceiros, devendo ser mantidas as condições de salubridade ambiental à região.

No que diz respeito às zonas de expansão urbana ZEU 1 e ZEU 2, destaca-se que, embora possam se apresentar como espaços viáveis para o projeto, essas zonas são, a princípio, predispostas à atividade agropecuária, direcionada para o abastecimento local, e à implantação de condomínios/loteamentos, além de representarem o remanescente de uma faixa de transição entre os ambientes urbano e rural, indispensável para minimizar interferências da urbanização nos sistemas protegidos (MACAÉ, 2010).

Em relação às zonas industriais ZI 1, ZI 2, ZI 3, ZI 4 e ZI 5, à luz da sustentabilidade, analisa-se:

- A ZI 1, localizada no extremo sul do território municipal, pode ser considerada como alternativa locacional para usinas eólicas, devendo-se observar, no entanto, que tal zona engloba o reduzido Setor Especial de Requalificação Urbano-Ambiental SRU 8 (Imboassica);
- As ZI 2 e ZI 5 não representam áreas viáveis para essa tipologia de empreendimento, por ocuparem posições estratégicas no ambiente urbano, sendo cercadas por área de relevante interesse ambiental, zonas residenciais, institucionais e de uso diversificado;
- A ZI 3, localizada no extremo norte do território municipal, também pode, inicialmente, representar uma área viável para implantação de parques eólicos, atentando-se para possíveis interferências na ZEIA 9 - localizada em seu interior, relativa à vegetação contígua ao Terminal de Cabiúnas, além da proximidade com o Parque Nacional da Restinga de Jurubatiba e seu entorno;
- A ZI 4 pode ser uma alternativa espacial para o projeto, devendo-se considerar que a referida área ocupa faixa de transição para a macrozona de ambiente natural, bem como contém Fragmento da Mata Boa Fé, área de interesse ambiental para o município, conforme ilustrou a Figura 6.

Assim, as zonas industriais – ZI 1, ZI 3, ZI 4 – e as zonas de expansão urbana – ZEU 1 e ZEU 2 – despontam como alternativas locais para implantação de empreendimentos eólicos no município, ressalvados os estudos necessários quanto a relevo, solo, vegetação, recursos hídricos, geologia e efetivo potencial eólico correspondentes, dentre outros, tendo em vista o caráter holístico do ambiente.

#### **4. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

A existência humana depende de um meio ambiente equilibrado, logo, preservar a natureza é assegurar o direito fundamental à vida. Alguns conflitos teóricos, no entanto, permeiam o conceito de desenvolvimento urbano sustentável, pois o ambiente urbano é dinâmico, o que pode se opor à manutenção de ecossistemas naturais, trazendo dificuldades na harmonização de interesses diversos, num mesmo espaço. Nesse cenário, o planejamento urbano busca minimizar tais confrontos e auxiliar na busca pelo bem-estar da coletividade, frente aos interesses individuais. Em razão disso, a sustentabilidade nas cidades deve ser contextualizada de forma a subsidiar a implantação de atividades econômicas, a fim de que haja o efetivo controle das alterações espaciais e das possíveis interferências no meio.

A energia eólica, embora considerada limpa, traz consigo impactos ao meio ambiente que vão além da área de instalação dos aerogeradores e, por isso, a implantação de usinas para aproveitamento da força dos ventos deve ser avaliada de forma integrada, para identificação de danos ambientais e possíveis compensações. No presente trabalho, procurou-se identificar, sob o enfoque ambiental, as regiões do município de Macaé que podem ser melhor abordadas na fase de prospecção de locais para implantação de parque eólico, ainda na fase inicial do projeto, sem impactar significativamente o seu bioma.

As zonas estabelecidas pelo Código de Zoneamento Municipal foram analisadas, de forma a reputá-las viáveis ou não para receber empreendimentos desse porte, considerando a existência de diversas áreas de relevância ambiental na região. Como resultado, foram identificados espaços alinhados aos princípios do direito ambiental e aos conceitos de sustentabilidade e desenvolvimento, propondo-se áreas que não enfrentem, a princípio, questões ambientais, culturais, sociais, institucionais ou relativas ao sistema viário local.

Por fim, em síntese, observou-se que, ressalvados os estudos complementares relativos aos demais recursos envolvidos, e à luz da sustentabilidade, das 51 (cinquenta e uma) zonas indicadas no mapa relativo ao Código de Zoneamento do município, somente as zonas industriais ZI 1, ZI 3 e ZI 4,

bem como as zonas de expansão urbana ZEU 1 e ZEU 2, surgem como alternativas locacionais para implantação de empreendimentos eólicos no município, uma vez que as demais zonas apresentam um grau de viabilidade menor por apresentarem algum tipo de impedimento legal, cultural, social ou ambiental envolvido.

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVIM, Angélica Tanus Benatti; KATO, Volia Regina Costa; ROSIN, Jeane Rombi de Godoy. A urgência das águas: intervenções urbanas em áreas de mananciais. Dossiê: águas urbanas. **Cadernos Metr pole**, São Paulo, v.17, n. 33, p. 83-107, 2015.

AMARAL, Cristiano Abij o; PEDREIRA, Adriana Coli; BLEIL, Júlia Rechia. Direito Ambiental no Brasil – Análise do Licenciamento Ambiental de Usinas Eólicas em áreas de Preserva o Permanente. **Revista PCH Notícias e SHP News**, São Paulo, ano 13, n. 49, abril/maio/junho 2011.

AMARANTE, Odilon Ant nio Camargo do; SILVA, Fabiano de Jesus Lima da; RIOS FILHO, Luiz Gonzaga. **Atlas Eólico**, Secretaria da Energia, da Indústria Naval e do Petróleo do estado do Rio de Janeiro, 2003. Disponível em: <[http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas\\_eolico/AtlasEolicoRJ.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas_eolico/AtlasEolicoRJ.pdf)>. Acesso em: 6 ago. 2021.

ANTUNES, Paulo de Bessa. **Direito ambiental**. 12. ed. Rio de Janeiro: Lumen Juris, 2010.

BARBOZA, Jovi Vieira; QUINTEIRO, Wilson Luiz Darienzo. **Do plano diretor**. 1. ed. Maringá: Projus, 2007.

BARCELLOS, Ana Paula de. **A eficácia jurídica dos princípios constitucionais: O princípio da dignidade da pessoa humana**. 3. ed. revista e atualizada. Rio de Janeiro: Renovar, 2011.

BOAS, Guilherme Hissa Villas; MATTOS, Cristiane Passos de. A(s) natureza(s) da APA Macaé de Cima (Rio de Janeiro - Brasil): percep es, dilemas e conflitos. **Sociedade & Natureza**, Uberlândia, 2021, v. 33. DOI: <https://doi.org/10.14393/SN-v33-2021-56556>. Disponível em: <http://www.seer.ufu.br/index.php/sociedadnatureza/article/view/56556>. Acesso em: 6 ago. 2021.

BOENTE, Alfredo Nazareno Pereira; SOUZA, Cassia Maria Alves de; NUNES, Estephany Cristina Nascimento; PINHO, Lucas Cordeiro; FERREIRA, Luiz Eduardo Saboia. Produ o de energia limpa para redu o dos impactos ambientais: estudo de caso do parque eólico de Gargaú no estado do Rio de Janeiro. In: SIMPÓSIO DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO E TECNOLOGIA – SEGET, 7., 2015, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: Associa o Educacional Dom Bosco, 2015.

BRASIL. **Lei n  6.938, de 31 de agosto de 1981**. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formula o e aplica o, e dá outras providências. Brasília,

DF: Presidência da República. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/LEIS/L6938.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L6938.htm). Acesso em: 6 ago. 2021.

BRASIL. [Constituição (1988)]. **Constituição da República Federativa do Brasil de 1988**. Brasília, DF: Presidência da República. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/constituicao/constituicaocompilado.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicaocompilado.htm). Acesso em: 6 ago. 2021.

BRASIL. **Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000**. Regulamenta o art. 225, § 1o, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/19985.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19985.htm). Acesso em: 6 ago. 2021.

BRASIL. **Lei nº 10.257, de 10 de julho de 2001**. Regulamenta os arts. 182 e 183 da Constituição Federal, estabelece diretrizes gerais da política urbana e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/leis\\_2001/110257.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/leis_2001/110257.htm). Acesso em: 17 mar. 2022.

BRASIL. **Lei nº 10.438, de 26 de abril de 2002**. Dispõe sobre a expansão da oferta de energia elétrica emergencial, recomposição tarifária extraordinária, cria o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa), a Conta de Desenvolvimento Energético (CDE), dispõe sobre a universalização do serviço público de energia elétrica, dá nova redação às Leis no 9.427, de 26 de dezembro de 1996, no 9.648, de 27 de maio de 1998, no 3.890-A, de 25 de abril de 1961, no 5.655, de 20 de maio de 1971, no 5.899, de 5 de julho de 1973, no 9.991, de 24 de julho de 2000, e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/2002/110438.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/2002/110438.htm). Acesso em: 6 ago. 2021.

BRASIL. **Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012**. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nºs 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nºs 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória nº 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2011-2014/2012/lei/112651.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/112651.htm). Acesso em: 6 ago. 2021.

BRASIL. **Lei Complementar nº 140, de 8 de dezembro de 2011**. Fixa normas, nos termos dos incisos III, VI e VII do caput e do parágrafo único do art. 23 da Constituição Federal, para a cooperação entre a União, os Estados, o Distrito Federal e os Municípios nas ações administrativas decorrentes do exercício da competência comum relativas à proteção das paisagens naturais notáveis, à proteção do meio ambiente, ao combate à poluição em qualquer de suas formas e à preservação das florestas, da fauna e da flora; e altera a Lei no 6.938, de 31 de agosto de 1981. Brasília, DF: Presidência da República. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/lcp/lcp140.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/lcp/lcp140.htm). Acesso em: 6 ago. 2021.

BRASIL. **Lei nº 11.428, de 22 de dezembro de 2006**. Dispõe sobre a utilização e proteção da vegetação nativa do Bioma Mata Atlântica, e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2004-2006/2006/lei/111428.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2006/lei/111428.htm). Acesso em: 6 ago. 2021.

BRASIL. **Projeto de Lei nº 3729, de 08 de junho de 2004**. Dispõe sobre o licenciamento

ambiental; regulamenta o inciso IV do § 1º do art. 225 da Constituição Federal; altera as Leis nºs 9.605, de 12 de fevereiro de 1998, e 9.985, de 18 de julho de 2000; revoga dispositivo da Lei nº 7.661, de 16 de maio de 1988; e dá outras providências. Brasília, DF: Câmara dos Deputados. Disponível em: <https://www.camara.leg.br/buscaProposicoesWeb/?wicket:interface=:2:1:::> . Acesso em: 2 out. 2021.

CENCI, Daniel Rubens. Direito à Cidade: sustentabilidade e desenvolvimento no meio urbano. **Revista de Direito da Cidade**, Rio de Janeiro, v. 7, n. 1, p. 166-180, 24 fev. 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.12957/rdc.2015.15203>. Disponível em: <https://www.e-publicacoes.uerj.br/index.php/rdc/article/view/15203>. Acesso em: 6 ago. 2021.

CIELO, Patrícia Fortes Lopes Donzele; SANTOS, Flávia Raquel dos; STACCIARINI, Letícia Santana; SILVA, Viviane Gonçalves da. Uma leitura da Prevenção e da Precaução e seus reflexos no Direito Ambiental. *Revista CEPPG - CESUC - Centro de Ensino Superior, Catalão, ano XV, n. 26, p. 196-207, jan./jun. 2012.* Disponível em: [http://www.portalcatalao.com/painel\\_clientes/cesuc/painel/arquivos/upload/temp/a3ccfaf6c2acd18f4fceff16c4cd0860.pdf](http://www.portalcatalao.com/painel_clientes/cesuc/painel/arquivos/upload/temp/a3ccfaf6c2acd18f4fceff16c4cd0860.pdf). Acesso em: 6 ago. 2021.

COMPANS, Rose. 2001. Cidades sustentáveis, cidades globais. Antagonismo ou complementaridade? *In: ASCELRAD, Henri (org.). A duração das cidades: a sustentabilidade e risco nas políticas urbanas.* Rio de Janeiro: DP&A/CREA-RJ. p. 105-137.

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 01/1986, de 23 de janeiro de 1986.** Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente. Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/res/res86/res0186.html>. Acesso em: 6 ago. 2021.

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 237/1997, de 19 de dezembro e 1997.** Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente. Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/res/res97/res23797.html>. Acesso em: 6 ago. 2021.

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 279/2001, de 27 de junho de 2001.** Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente. Disponível em: [https://www.icmbio.gov.br/cepsul/images/stories/legislacao/Resolucao/2001/res\\_conama\\_279\\_2001\\_licenciamentoambientalsimplificadoparaempreendimentoseltricos.pdf](https://www.icmbio.gov.br/cepsul/images/stories/legislacao/Resolucao/2001/res_conama_279_2001_licenciamentoambientalsimplificadoparaempreendimentoseltricos.pdf). Acesso em: 18 mar. 2022.

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 303/2002, de 20 de março de 2002.** Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente. Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=299>. Acesso em: 6 ago. 2021.

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 369/2006, de 28 de março de 2006.** Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente. Disponível em: <http://www.ibama.gov.br/sophia/cnia/legislacao/MMA/RE0369-280306.PDF>. Acesso em: 6 ago. 2021.

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 428/2010, de 17 de dezembro de 2010.** Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente. Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=641>. Acesso em: 6 ago. 2021.



CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 462/2014, de 24 de julho de 2014**. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente. Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=703>. Acesso em: 6 ago. 2021.

DEAN, Warren. **A ferro e fogo: A história e a devastação da Mata Atlântica brasileira**. 1. ed. São Paulo: Companhia das Letras, 1996.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. 2021. **Balço Energético Nacional – BEN**. Relatório Síntese/Ano Base 2020. Ministério de Minas e Energia, Brasília. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-601/topico-588/BEN\\_S%C3%ADntese\\_2021\\_PT.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-601/topico-588/BEN_S%C3%ADntese_2021_PT.pdf). Acesso em: 18 mar. 2022.

FARIA, Ivan Dutra. Ambiente e energia: crença e ciência no licenciamento ambiental. Parte III: sobre alguns dos problemas que dificultam o licenciamento ambiental no Brasil. Núcleo de Estudos e Pesquisas do Senado. 2011. Disponível em: <https://www12.senado.leg.br/publicacoes/estudos-legislativos/tipos-de-estudos/textos-para-discussao/td-99-ambiente-e-energia-crenca-e-ciencia-no-licenciamento-ambiental.-parte-iii-sobre-alguns-dos-problemas-que-dificultam-o-licenciamento-ambiental-no-brasil>. Acesso em: 2 out. 2021.

FIGUEIREDO, Cristina Brunet de. **A Influência dos Eventos Externos em Prol do Desenvolvimento Sustentável na Adaptação Estratégica das Corporações - Um Estudo Multicaso da Indústria do Petróleo Mundial**. 2011. Dissertação (Mestrado em Sistema de Gestão-MSG) – Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2011.

GISI, Mario José; LEITE, Felipe Bogado, 2017. **Nota Técnica 4<sup>a</sup>CCR Nº 6/2017**. Ministério Público Federal 4<sup>a</sup> Câmara de Coordenação e Revisão Meio Ambiente e Patrimônio Cultural, Rio de Janeiro. Disponível em: <http://www.mpf.mp.br/pgr/documentos/NT620174CCRGTEPL3729.pdf>. Acesso em: 2 out. 2021.

GUIMARÃES, Édson; FERREIRA, Maria Inês. Na contramão dos objetivos do desenvolvimento sustentável: avaliação da pobreza hídrica na região estuarina do rio Macaé, Macaé/RJ. **Saúde e Sociedade**, v. 29, n. 2, p. 1-15, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s0104-12902020190070>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/sausoc/a/YSfb9jFHSV6dxPXQjv3LKfB/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 6 ago. 2021.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Demográfico: Panorama das cidades**. 2020. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rj/macaee/panorama>. Acesso em: 6 ago. 2021.

ICMBIO. Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. 2021a. **Parque Nacional da Restinga de Jurubatiba**. Disponível em: <https://www.icmbio.gov.br/parnajurubatiba/guia-do-visitante.html>. Acesso em: 6 ago. 2021.

ICMBIO. Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. 2021b. **Rebio União**. Disponível em: <https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/biodiversidade/unidade-de->

conservacao/unidades-de-biomas/mata-atlantica/lista-de-ucs/rebio-uniao. Acesso em: 6 ago. 2021.

INEA. Instituto Estadual do Ambiente. **Área de Proteção Ambiental de Macaé de Cima**. 2001. Disponível em: <http://www.inea.rj.gov.br/biodiversidade-territorio/conheca-as-unidades-de-conservacao/apa-de-macae-de-cima/>. Acesso em: 6 ago. 2021.

IRVING, Marta de Azevedo. Turismo, áreas protegidas e inclusão social: uma triangulação necessária em planejamento, no caso brasileiro. *In*: IRVING, Marta de Azevedo; RODRIGUES, Camila Gonçalves de Oliveira; RABINOVICI, Andrea; COSTA, Helena Araújo (org.). **Turismo, Áreas Protegidas e Inclusão Social: Diálogos entre saberes e fazeres**. 1. ed. Rio de Janeiro: Folio Digital, 2015. v. 1, p. 51-80.

JONAS, Hans. 1903-1993. **O princípio responsabilidade: ensaio de uma ética para a civilização tecnológica** / Tradução: Marijane Lisboa, Luiz Barros Montez - Rio de Janeiro: Contraponto: Ed. PUC-Rio, 2006.

LEITE, Carlos; AWAD, Juliana di Cesare Marques. **Cidades sustentáveis, cidades inteligentes: desenvolvimento sustentável num planeta urbano**. 1. ed. Porto Alegre: Bookman, 2012.

LEUZINGER, Márcia Dieguez; COUTINHO, Gabriel Leuzinger. A implantação de parques eólicos e os impactos socioambientais em populações indígenas e tradicionais. **Direito Ambiental e Sociedade**, Caxias do Sul, v. 9, n. 2, p. 91-114, 1 set. 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.18226/22370021.v9.n2.04>. Disponível em: <http://www.ucs.br/etc/revistas/index.php/direitoambiental/article/view/7882>. Acesso em: 6 ago. 2021.

LOUREIRO, Walter Luiz de Mello; VIEIRA NETO, Júlio; SILVA NETO, Romeu e; BARROS, Sergio Ricardo da Silveira. A Indústria do Petróleo em Macaé: características e impactos socioeconômicos sob a ótica do desenvolvimento sustentável. *Vértices*, v.16, n.2, p.189-220, 2014. DOI: <https://doi.org/10.5935/1809-2667.20140026>. Disponível em: <https://essentiaeditora.iff.edu.br/index.php/vertices/article/view/1809-2667.20140026>. Acesso em: 6 ago. 2021.

MACAÉ. Macaé é reconhecida como uma das principais cidades energéticas mundiais. **Município de Macaé**, Rio de Janeiro, 10 set. 2020, 15:38. Disponível em: <http://www.macae.rj.gov.br/sedec/leitura/noticia/macae-e-reconhecida-como-uma-das-principais-cidades-energeticas-mundiais>. Acesso em: 6 ago. 2021.

MACAÉ. **Projeto de Elaboração do Plano Municipal de Conservação e Recuperação da Mata Atlântica – PMMA**. 2021a. Macaé: Prefeitura Municipal. Disponível em: <http://www.macae.rj.gov.br/sema/conteudo/titulo/plano-de-mata-atlantica-do-municipio>. Acesso em: 6 ago. 2021.

MACAÉ. Prefeitura e Inea firmam parceria visando conter os alagamentos. 2021b. **Município de Macaé**, Rio de Janeiro, 01 jul. 2021, 18:17. Disponível em: <http://www.macae.rj.gov.br/sema/leitura/noticia/prefeitura-e-inea-firmam-parceria-visando-conter-os-alagamentos>. Acesso em: 6 ago. 2021.

MACAÉ. Sana está entre os dez melhores destinos para aproveitar o inverno no Rio. 2021c. **Município de Macaé**, Rio de Janeiro, 19 jul. 2021, 10:39. Disponível em: <http://www.macaerj.gov.br/sedec/leitura/noticia/sana-esta-entre-os-dez-melhores-destinos-para-aproveitar-o-inverno-no-rio>. Acesso em: 6 ago. 2021.

MACAÉ. **Município de Macaé, Rio de Janeiro**. Mapa esquemático das Áreas de Interesse Ambiental. 2021d. Disponível em: <http://www.macaerj.gov.br/midia/conteudo/arquivos/1270003370.pdf>. Acesso em: 7 ago. 2021.

MACAÉ. **Lei Complementar nº 027/2001**. Dispõe sobre o Código Municipal de Meio Ambiente, e dá outras providências. Macaé: Prefeitura Municipal. Disponível em: [http://www.macaerj.gov.br/midia/uploads/Lei%20Complementar%20n%C2%BA\\_%20027%20de%202001%20-%20C%C3%B3digo%20Municipal%20de%20Meio%20Ambiente.pdf](http://www.macaerj.gov.br/midia/uploads/Lei%20Complementar%20n%C2%BA_%20027%20de%202001%20-%20C%C3%B3digo%20Municipal%20de%20Meio%20Ambiente.pdf). Acesso em: 6 ago. 2021.

MACAÉ. **Lei Complementar nº 076/2006**. Plano Diretor do Município de Macaé. Macaé: Prefeitura Municipal. Disponível em: <http://www.macaerj.gov.br/midia/conteudo/arquivos/1270002165.pdf>. Acesso em: 6 ago. 2021.

MACAÉ. **Lei Orgânica do Município de Macaé (Consolidada até a Emenda 068/2011)**. Macaé: Prefeitura Municipal. Disponível em: <http://www.macaerj.gov.br/midia/conteudo/arquivos/1322671708.pdf>. Acesso em: 6 ago. 2021.

MACAÉ. **Lei Complementar nº 279/2018**. Dispõe sobre a Política de Desenvolvimento Urbano e o Plano Diretor do Município de Macaé. Macaé: Prefeitura Municipal. Disponível em: <http://www.macaerj.gov.br/midia/conteudo/arquivos/1610492739.pdf>. Acesso em: 6 ago. 2021.

MACAÉ. **Lei Complementar nº 141/2010**. Dispõe sobre o Código de Urbanismo do Município de Macaé e dá outras providências. Macaé: Prefeitura Municipal. Disponível em: <http://www.macaerj.gov.br/midia/conteudo/arquivos/1471911913.pdf>. Acesso em: 6 ago. 2021.

MACHADO, Paulo Affonso Leme. **Direito ambiental brasileiro**. 24. ed. São Paulo: Malheiros Editores, 2015.

MELLO, Mariana Torres Correia de. **Estudo de viabilidade técnico-ambiental para implantação de parques eólicos: um estudo de caso em um fragmento do litoral setentrional do Rio Grande do Norte/Brasil**. 2014. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Centro de Ciências Humanas, Letras e Artes, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.

MILARÉ, Édís. **Relação jurídica à danosidade ambiental: contribuição para o delineamento de um microsistema de responsabilidade**. 2016. Tese (Doutorado em Direito) – Pontifícia Universidade Católica de São Paulo – PUC-SP, São Paulo, 2016.

MOTA, Maurício. Princípio da precaução no direito ambiental: uma construção a partir da razoabilidade e da proporcionalidade. **Revista Brasileira de Direito do Petróleo, Gás e Energia**, Rio de Janeiro, v. 2, n. 2, p. 1-42, jun. 2006. Disponível em: <https://www.e-publicacoes.uerj.br/index.php/rbdp/article/view/5723/4163>. Acesso em: 6 ago. 2021.

MUNÓZ-TORRES, María Jesús; FERNÁNDEZ-IZQUIERDO, María Ángeles; RIVERA-LIRIO, Juana; FERRERO-FERRERO, Idoya; ESCRIG-OLMEDO, Elena; GISBERT-

NAVARRO, José Vicente; MARULLO, María Chiara. An Assessment Tool to Integrate Sustainability Principles into the Global Supply Chain. **Sustainability**. 2018; 10(2):535. <https://doi.org/10.3390/su10020535>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/10/2/535>. Acesso em: 30 abr. 2022.

ODUM, Eugene Pleasants; BARRET, Gary W. **Fundamentos de ecologia**. 5. ed. Boston, Massachusetts, Eua: Cengage Learning, 2006.

PAULA, Manoel Browne de. Modelo brasileiro do desenvolvimento sustentável e suas perspectivas. **Revista de Direito da Cidade**, Rio de Janeiro, v. 4, n. 1, p. 215-233, 20 jun. 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.12957/rdc.2012.9704>. Disponível em: <https://www.e-publicacoes.uerj.br/index.php/rdc/article/view/9704>. Acesso em: 6 ago. 2021.

PENA, Caroline Brasileiro; PINHEIRO, Aleson Lameck; SARAIVA, André Felipe; RODRIGUES, João Paulo; RODRIGUES, Luiza Amarante Adler.

As Fragilidades do Sistema de Licenciamento Ambiental no Brasil com Base no Estudo de Caso da Companhia Siderúrgica do Atlântico. **Revista Científica Interdisciplinar**. ISSN: 2358-8411 N° 4, volume 3, artigo n° 4, Outubro/Dezembro 2016 D.O.I: <http://dx.doi.org/10.17115/2358-8411/v3n4a4>. Acesso em: 6 ago. 2021.

PEREZ, Mercedes Solá; GOMES, Jorge Ramón Montenegro. Políticas de desenvolvimento da pesca e aquicultura: conflitos e resistência nos territórios dos pescadores e pescadoras artesanais da vila do Superagüi, Paraná, Brasil. **Sociedade & Natureza**. Uberlândia. 2014, v. 26, n. 1, p. 35-47. DOI: <https://doi.org/10.1590/1982-451320140103>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/sn/a/LBbyh6CGknRYdxkPMXPzYWr/abstract/?lang=pt#>. Acesso em: 6 ago. 2021.

PIÉROLA, Luís Gregório; ALMEIDA, Paulo Santos de. Cidade sustentável: análise das delimitações de ocupação do solo, novo plano diretor estratégico (lei nº 16.050/2014) e minuta participativa do projeto de lei de uso e ocupação do solo 2014 da cidade de São Paulo. **Revista de Direito da Cidade**, Rio de Janeiro, v. 8, n. 1, p. 29-66, 11 fev. 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.12957/rdc.2016.19809>. Disponível em: <https://www.e-publicacoes.uerj.br/index.php/rdc/article/view/19809>. Acesso em: 6 ago. 2021.

PINTO, Lucía Iracema Chipponelli; MARTINS, Fernando Ramos; PEREIRA, Enio Bueno. O mercado brasileiro da energia eólica, impactos sociais e ambientais. **Ambiente e Água**, [online]. 2017, v. 12, n. 6 DOI: <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.2064>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ambiagua/a/5b77GB9j4yPTzkS4pjxyhvH/?lang=pt#>. Acesso em: 6 ago. 2021.

PONTES, Daniele Regina; FARIA, José Ricardo Vargas de. Direito municipal e urbanístico. ed. rev. Curitiba: IESDE Brasil S.A, 2012.

RBJA. Boletim Justiça Ambiental. no 4. Rio de Janeiro: Rede Brasileira de Justiça Ambiental, 2009.

RÉGIS, Edinilson Oliveira; MOREIRA, Marcos Antônio Cruz; PINTO, Augusto Eduardo Miranda. Fiscalização ambiental de Macaé/RJ: relação entre as características socioeconômicas do município e as multas aplicadas entre 2005 e 2014. **Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego**, Macaé, v. 10, n. 1, p. 23-50, 30 dez. 2016. DOI:

<http://dx.doi.org/10.19180/2177-4560.v10n12016p23-50>. Disponível em: <https://essentiaeditora.iff.edu.br/index.php/boletim/article/view/7291>. Acesso em: 6 ago. 2021.

RUARO, Renata; FERRANTE, Lucas; FEARNSIDE, Philip. Licenciamento ambiental do Brasil condenado. **Amazônia Real**. Disponível em: <https://amazoniareal.com.br/licenciamento-ambiental-do-brasil-condenado/>. Acesso em: 2 out. 2021.

SANTOS, Adriana Paula Oliveira; JAPIASSÚ, Maria Cristina. **Ética no licenciamento ambiental**. 2006. Trabalho apresentado ao I Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte Nordeste de Educação Tecnológica - I CONNEPI. Natal/RN, 2006.

SARLET, Ingo Wolfgang. **Dignidade da pessoa humana e direitos fundamentais na Constituição Federal de 1988**. 4. ed. Porto Alegre: Livraria do Advogado, 2001.

SENADO FEDERAL. Senado vai analisar projeto com novas regras para o licenciamento Ambiental. Agência Senado. 2021. Disponível em: <https://www12.senado.leg.br/noticias/materias/2021/05/15/senado-vai-analisar-projeto-com-novas-regras-para-o-licenciamento-ambiental>. Acesso em: 2 out. 2021.

SILVA, Jorge Adalberto Aziz da; BECKER, Beatriz Rohden; MARTINS, Rodrigo Lemes. Macaé e a sustentabilidade do projeto de “capital nacional do petróleo”. **Espaço e Economia**, v. 7, n. 7, p. 1-21, 17 dez. 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.4000/espacoeconomia.1875>. Disponível em: <http://journals.openedition.org/espacoeconomia/1875>. Acesso em: 5 ago. 2021.

SILVA, José Afonso Da. **Curso de Direito Constitucional Positivo**. 25. ed. rev. atual. São Paulo: Malheiros, 2005.

SILVA, Leilton Cavalcanti da; SILVA, Anderson Rafael Melo da; BARBOSA, Aline dos Santos; SANTOS, Delbra Katiana Andrade dos; ROCHA, Fernanda Barreto de Almeida. **Implantação de parques eólicos no Brasil: perspectivas globais para a engenharia de produção**. 2015. Trabalho apresentado ao XXXV Encontro Nacional de Engenharia de Produção – ENEGEP, Fortaleza, 2015.

SPELLMAN, Frank R. **Environmental impacts of renewable energy**. Boca Raton: CRC Press, 2015. *E-book*.

TCU. Tribunal de Contas da União. **Relatório de Auditoria**. Auditoria Operacional. IBAMA. Licenciamento Ambiental. 2021. Disponível em: <https://portal.tcu.gov.br/data/files/CA/C6/59/28/7AE4C6105B9484B6F18818A8/024.048-2018-6-%20Licenciamento%20ambiental.pdf>. Acesso em: 2 out. 2021.

VASCONCELOS, Fábio Perdigão; CORIOLANO, Luzia Neide Menezes Teixeira. Impactos Sócio - Ambientais no Litoral: Um Foco no Turismo e na Gestão Integrada da Zona Costeira no Estado do Ceará/Brasil. **Revista de Gestão Costeira Integrada**, v. 8, p. 259-275, dez. 2008. DOI: 10.5894/rgci134. Disponível em: <https://www.aprh.pt/rgci/rgci134.html>. Acesso em: 5 ago. 2021.

VIEIRA, Juliana de Souza Reis. Cidades Sustentáveis. **Revista de Direito da Cidade**, Rio de Janeiro, v. 4, n. 2, p. 1-39, 31 dez. 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.12957/rdc.2012.9710>.

Disponível em: <https://www.e-publicacoes.uerj.br/index.php/rdc/article/view/9710>. Acesso em: 6 ago. 2021.

ZAÚ, André Scarambone. Fragmentação da Mata Atlântica: aspectos teóricos. **Floresta e Ambiente**, v. 5, n. 1, p. 160 – 70, jan./dez.1998. Disponível em: <https://floram.org/article/588e2257e710ab87018b4744>. Acesso em: 5 ago. 2021.

ZHOURI, Andréa. Justiça ambiental, diversidade cultural e accountability: desafios para a governança ambiental. **Revista Brasileira de Ciências Sociais**. v. 23, n. 68, p. 97–107, 2008. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcsoc/a/gL9s5ytDQ9jvzVH5GvtsbXw/?lang=pt>. Acesso em: 2 out. 2021.

## ARTIGO CIENTÍFICO 2

### ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA PARA IMPLANTAÇÃO DE UM PARQUE EÓLICO NO MUNICÍPIO DE MACAÉ-RJ

*TECHNICAL AND ECONOMIC VIABILITY STUDY FOR THE IMPLEMENTATION OF A WIND FARM IN THE MUNICIPALITY OF MACAÉ-RJ*

Rose Angela Hilda Wanzeler Braga - IFF/PPEA

Augusto Eduardo Miranda Pinto -IFF/PPEA

Eliane Barbosa Santos - UENF/LAMET

#### RESUMO

O desenvolvimento da economia de um país está diretamente atrelado à produção de energia, sendo fundamental uma matriz elétrica que contenha fontes complementares de geração, de forma a garantir a segurança do fornecimento de energia ao longo de todo ano. No presente trabalho objetiva-se realizar um estudo de viabilidade técnica e econômica para implantação de um parque eólico no município de Macaé. Adotou-se, como método de pesquisa, a caracterização do regime de ventos incidentes (velocidade e direção) e a estimativa do potencial eólico, utilizando-se dados observados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e dados da reanálise meteorológica ERA5-Land. Na análise de viabilidade econômica do projeto, considerou-se turbina adequada ao regime de vento local (Turbina Eólica VERNE 555, da ENERSUD Energia Limpa), bem como foi baseada nos principais métodos aplicáveis à tomada de decisão sobre alternativas de investimento, quais sejam, Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR) e *Payback* descontado. Com os resultados obtidos, constatou-se que, em razão do regime de ventos fracos atuantes no município, há viabilidade técnica para geração de baixas potências, como, por exemplo, de aproximadamente 6MW por mês, entretanto, com base nos indicadores analisados, os custos demandados para implantação do empreendimento são mais elevados do que sua rentabilidade.

**Palavras chave:** Energia Eólica. Energia Sustentável. Viabilidade Técnico-Econômica.

## **ABSTRACT**

*The development of a country's economy is directly linked to energy production, and an electrical matrix that contains complementary sources of generation is fundamental, in order to guarantee the security of energy supply throughout the year. In the present work, the aim is to carry out a technical and economic feasibility study for the implementation of a wind farm in the municipality of Macaé. As a research method, the characterization of the incident wind regime (speed and direction) and the estimation of the wind potential were adopted, using observed data from the National Institute of Meteorology (INMET) and data from the ERA5-Land meteorological reanalysis. In the economic feasibility analysis of the project, a turbine suitable for the local wind regime was considered (wind turbine VERNE 555, from ENERSUD Energia Limpa), as well as it was based on the main methods applicable to decision-making on investment alternatives, namely, Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR) and Discounted Payback. With the results obtained, it was found that, due to the light wind regime operating in the municipality, there is technical feasibility for the generation of low powers, such as, for example, approximately 6MW per month, however, based on the analyzed indicators, the costs demanded for the implantation of the enterprise are higher than its profitability.*

**Keywords:** *Wind Energy. Sustainable energy. Technical-Economic Feasibility.*

## **1. INTRODUÇÃO**

A preocupação constante com a crescente demanda energética, agravada pela escassez de recursos não renováveis, tem motivado a busca por fontes alternativas de energia, objetivando, além do suprimento energético, a redução de consequências indesejáveis para o meio ambiente e para a vida (OLABI *et al.*, 2021). O Brasil é um dos líderes mundiais na geração de energia renovável, com 78,1% da matriz elétrica nacional, dos quais 53,4% são provenientes de fontes hidráulicas, 12,8% de gás natural, e 10,6% de eólica, refletindo a antiga estratégia de investimentos majoritários no potencial hidráulico do país. Nesse cenário, considerando que o sistema elétrico brasileiro possui alta dependência da geração de energia hidráulica, e, conseqüentemente, do intermitente regime hidrológico do país, é importante destacar que, em 2021, a escassez de chuvas provocou a redução do nível dos reservatórios das principais hidrelétricas do país, ocasionando a redução na oferta de hidreletricidade e a necessidade de compensação por outras fontes de energia (EPE, 2022).



De acordo com Caldas (2010), projetos eólicos vêm se tornando mais atrativos, uma vez que as tecnologias refinaram suas características operacionais, diminuindo gastos com manutenção e tornando a geração eólica mais competitiva em relação a outras fontes de energia. Entretanto, para Pinheiro Neto *et al.* (2018), o investimento na produção de energia eólica é de alto risco, considerando o impacto da aleatoriedade do vento no fluxo de caixa do projeto, razão pela qual são necessários estudos que analisem a viabilidade, tanto técnica quanto econômica, de forma a verificar se há vantagem competitiva em relação a outras fontes de energia limpa.

Dutra e Tolmasquim (2002) reforçam que detalhar aspectos econômicos de um projeto de investimento é tão importante quanto proceder à análise de viabilidade técnica do mesmo, acrescentando que a análise dos dados técnicos, aliada a um planejamento econômico, aumenta as chances de um empreendimento ser bem-sucedido. Dessa forma, a realização de um estudo acerca do regime de ventos locais, baseado em dados confiáveis relativo à intensidade da velocidade e à direção dos ventos, permite evitar áreas com baixo potencial eólico e auxilia na escolha de turbinas adequadas, o que reduz sobremaneira o tempo e os custos, maximizando o aproveitamento dos recursos a serem investidos.

Importante frisar, entretanto, que a busca por uma matriz elétrica diversificada requer uma análise holística dos benefícios percebidos, já que a implantação de empreendimentos para geração de energia não pode ser vista apenas sob os aspectos técnicos e econômicos, devendo-se considerar, sobretudo, os benefícios sociais decorrentes do projeto, como os atinentes à saúde, educação e saneamento básico, em conformidade com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU), os quais têm a finalidade de promover a junção equilibrada das três dimensões do desenvolvimento sustentável: econômica, social e ambiental.

Macaé tem, na exploração petrolífera, sua principal vocação regional (SILVA; BECKER; MARTINS, 2015). Diversamente, a implementação de termelétricas no território municipal vem sendo estimulada (MACAÉ, 2023), não obstante o intensivo consumo de água exigido por essas usinas, a emissão de GEE resultante do processo e os elevados custos da geração térmica, os quais resultam em cobranças adicionais aos usuários de acordo com as bandeiras tarifárias (EPE, 2022; ANEEL, 2023), reforçando a relevância de estudos para diversificação da matriz elétrica nacional a partir de fontes renováveis de energia.

Isto posto, torna-se indispensável a análise técnico-econômica de um projeto eólico para verificar se os custos para produção de eletricidade, por meio dessa fonte, serão tecnicamente viáveis e se sua implantação será economicamente praticável. Destaca-se que as diversas etapas e previsões envolvidas embasam a tomada de decisão, sobretudo porque investidores necessitam de elementos

confiáveis, tendo em vista o caráter sazonal do regime de ventos e as incertezas associadas ao processo, que poderão influenciar nos fluxos de caixa futuros do empreendimento e comprometer a rentabilidade do negócio.

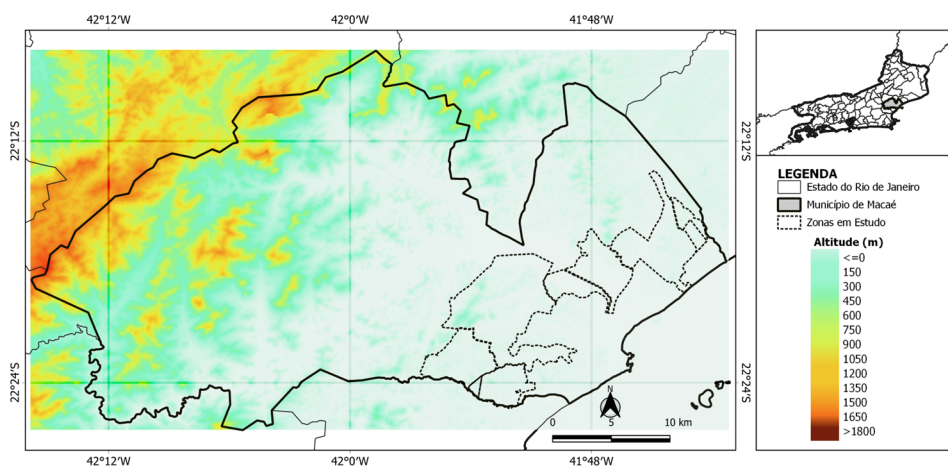
## **2. METODOLOGIA**

### **2.1. Caracterização da área de estudo**

O município de Macaé está localizado no norte do estado do Rio de Janeiro, a uma latitude de 22° 22' 33" Sul e longitude de 41° 46' 30" Oeste De acordo com a classificação climática de *Köppen* (1936), o município apresenta clima tropical (Aw), com inverno (Junho, Julho e Agosto - JJA) seco e verão (Dezembro, Janeiro e Fevereiro - DJF) chuvoso. As temperaturas médias variam de 18°C a 30°C, tendo amplitude térmica considerável, em virtude da circulação dos ventos entre o litoral e a região serrana macaense. No que diz respeito ao regime de chuvas, a precipitação média anual é de 1659 mm, ocorrendo em torno de 108 dias ao longo do ano (PORTELLA; SOUZA; SANTOS, 2021). Já o relevo do município é composto por região de planície na faixa litorânea, pequenos morros, maciços costeiros e por áreas montanhosas com alta declividade e encostas íngremes, tendo como ponto culminante o Pico do Frade, a 1429 metros de altitude (MANHÃES, 2020).

No mapa hipsométrico da Figura 1 consta o perfil do relevo macaense, evidenciando as diferentes altitudes das regiões do município, onde as áreas mais claras correspondem a baixas altitudes (planícies) e, as mais escuras, representam as mais elevadas, o que pode causar interferências no padrão de escoamento dos ventos locais. Com base na divisão estabelecida pelo Código de Zoneamento de Macaé, neste estudo, foram destacadas as Zonas Industriais 1, 3 e 4 (ZI 1, ZI 3 e ZI 4) e as Zonas de Expansão Urbana 1 e 2 (ZEU 1 e ZEU 2) do município, que representam alternativas locais ambientalmente viáveis para implantação de empreendimentos eólicos, visto que não apresentam impedimento legal, cultural, social ou ambiental envolvido.

Figura 1 – Mapa hipsométrico de Macaé/RJ.

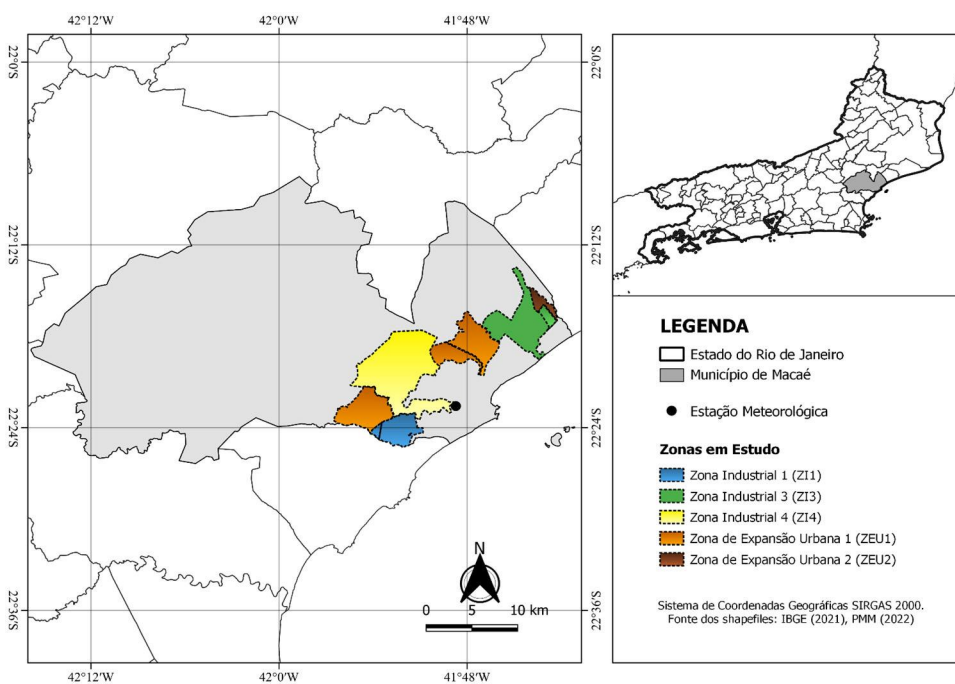


Fonte: Autores.

## 2.2. Análise da viabilidade técnica

Neste trabalho, foram utilizados dados horários de velocidade e direção do vento obtidos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), medidos a 10 (dez) metros de altura, para o período de 01/01/2007 a 31/12/2021. A estação selecionada (Latitude  $-22.376318^\circ$  Sul, Longitude  $-41.812053^\circ$  Oeste) está localizada nas proximidades da ZI 4, conforme mostrado na Figura 2.

Figura 2 – Localização do município de Macaé, no estado do Rio de Janeiro, com destaque para as zonas em estudo.



Fonte: Autores.

Considerando que há dificuldades na obtenção de dados confiáveis para todas as regiões do globo, inclusive para a área em estudo, a técnica da reanálise meteorológica torna-se uma solução alternativa para tal inconsistência, uma vez que usa modelos de previsão do tempo para processar, simultaneamente, grande quantidade de dados obtidos a partir de fontes variadas: estações meteorológicas, aviões, navios, radares, satélites, radiossondas, dentre outros (PINTO *et al.*, 2009). Assim, além dos dados observados (INMET), foram utilizados dados da Reanálise ERA5-Land, do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* – ECMWF, relativos ao mesmo período, com o intuito de verificar a viabilidade de aplicação desta série em estudos relativos a outras áreas de interesse no município.

ERA5-Land é uma versão da ERA5 (resolução de 31 km), quinta geração de reanálises atmosféricas do ECMWF, e é executada com uma resolução horizontal de 9 km. Essa reanálise fornece apenas as componentes leste-oeste (zonal - u) e norte-sul (meridional - v) do vento, razão pela qual foi utilizada a Equação 1, para cálculo da velocidade ( $\bar{V}$ ) do vento, e a Equação 2 para obtenção da direção ( $\bar{D}$ ) do mesmo. Ressalta-se que a direção é verificada a partir de onde o vento sopra, cujos valores correspondentes às coordenadas norte, leste, sul e oeste, são, respectivamente, 360°, 90°, 180° e 270° (FONSECA; RAMALHO, 2018; STÜKER *et al.*, 2016).

$$\bar{V} = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (1)$$

$$\bar{D} = -\arctg\left(\frac{u}{v}\right) \quad (2)$$

Os dados da reanálise foram extraídos do ponto mais próximo da estação meteorológica em estudo. Objetivando avaliar a capacidade da reanálise em reproduzir o comportamento dos dados observados nas demais áreas do município, foi realizado um comparativo (horário e sazonal) com os dados observados. Foram elaborados gráficos de análise descritiva e de dispersão para auxiliar na avaliação comparativa entre as séries estudadas (reanálise e observação). No período analisado (2007 a 2021), os dados horários do INMET apresentaram 5.18% de falhas.

Para identificação do padrão de ventos de Macaé, foram confeccionados mapas temáticos da velocidade do vento para todo o município, por estação do ano, visando a identificar regiões com coincidência de características técnicas e ambientais, compatíveis com a implantação de empreendimentos eólicos. Os dados de reanálise foram tratados com auxílio do *software Climate Data Operators* (CDO) e o *software R*, versão 4.1.2, foi utilizado na análise dos dados e para execução dos cálculos necessários. A plotagem de mapas foi realizada com auxílio do *software QGIS* e foi utilizado

o *software* WRPLOT *View*, desenvolvido pela *Lakes Environmental*, para gerar gráficos do tipo rosa dos ventos, que exibem a direção dos mesmos.

### 2.3. Estimativa do potencial eólico

A avaliação do potencial eólico foi realizada através do cálculo da densidade de potência, utilizando os dados observados e de reanálise, por meio da Equação 3 (TEIXEIRA; CAMELO, 2013). Nota-se que a velocidade do vento é fator principal no cálculo do potencial eólico, uma vez que esta é diretamente proporcional ao cubo da velocidade média no ponto em estudo, sendo que pequenas mudanças na velocidade do vento acarretam significativas alterações na energia produzida.

$$\frac{P}{A} = \frac{1}{2} \rho V^3 \quad (3)$$

onde:

$\frac{P}{A}$  = Densidade de potência (Watts/m<sup>2</sup>),

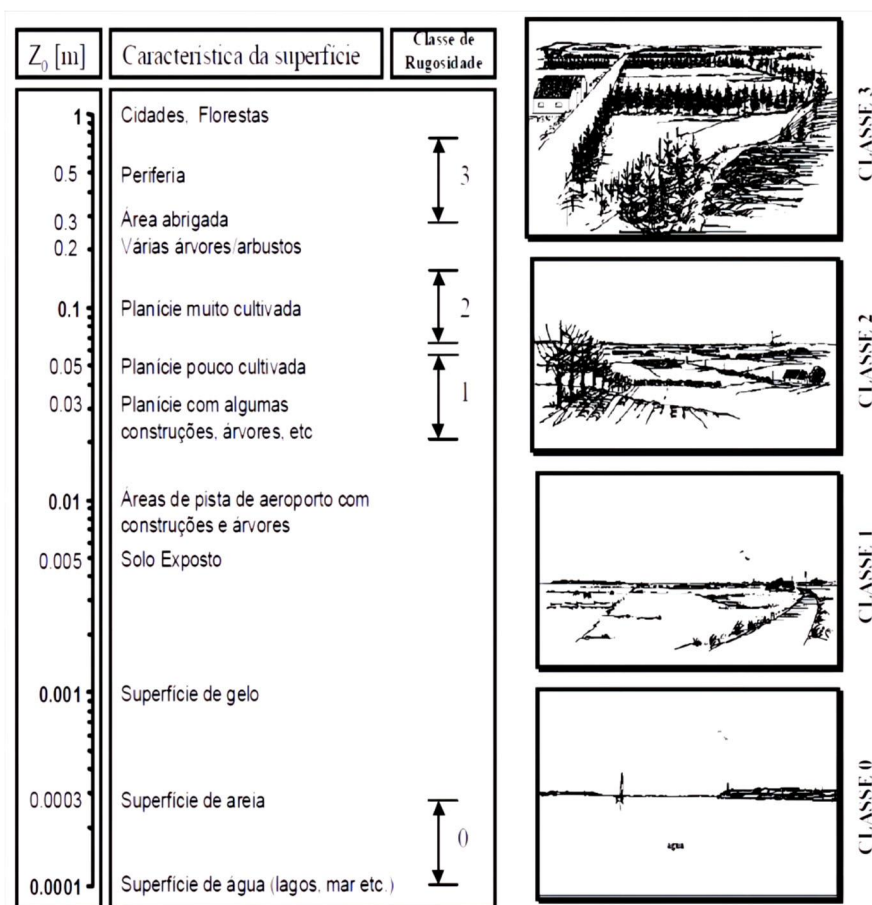
$\rho$  = Densidade do ar seco de 1,255 (Kg/m<sup>3</sup>)

V = Velocidade do vento na altura em estudo (m/s)

Para uma análise mais precisa dos recursos eólicos disponíveis na região, foi considerada a rugosidade superficial do terreno, uma vez que interferências no escoamento da massa de ar (obstáculos, topografia, vegetação, usos do solo, relevo, etc) causam desaceleração dos ventos e, conseqüentemente, redução no potencial eólico disponível (KRÜGER, 2016). Quanto mais próximo à superfície, maior a rugosidade e, conseqüentemente, maior a interferência do terreno na velocidade do vento, sendo que, terrenos planos apresentam baixa rugosidade, enquanto terrenos irregulares implicam alta rugosidade (FADIGAS, 2011).

Para quantificar a influência dessa interferência no perfil do vento, a rugosidade superficial é parametrizada em uma escala de comprimento, que compila o tamanho e a distribuição dos elementos que a compõem e é denominada comprimento de rugosidade  $Z_0$  (Figura 3). Neste estudo, considerando a paisagem existente nas zonas a serem analisadas, o comprimento de rugosidade aplicado para representar o efeito conjunto dos elementos do terreno (vegetação, condições do mar, tipos de agricultura, usos do solo, etc) foi de  $Z_0=0,5$  m (Periferia), posto que compatível com as características da superfície da região (MORTENSEN, 1993; TROEN, 1989).

Figura 3 – Classes de rugosidade para diferentes tipos de superfície.



Fonte: Mortensen (1993) e Troen (1989).

Para estimar a densidade de potência, considerando que a velocidade do vento varia em função da altura de monitoramento (AGUIEIRAS JUNIOR, 2011), foi realizada a extrapolação da velocidade média do vento para 50 metros de altura, altura de instalação de aerogeradores, a partir da velocidade de referência (10 m), por meio da Equação 4:

$$V(Z) = V(Z_R) \frac{\ln\left(\frac{Z}{Z_0}\right)}{\ln\left(\frac{Z_R}{Z_0}\right)} \quad (4)$$

onde:

$V(Z)$  = velocidade do vento na altura  $Z$

$V(Z_R)$  = velocidade do vento na altura de referência (ERA5-Land)

$Z$  = altura desejada

$Z_R$  = altura de referência

$Z_0$  = comprimento de rugosidade local

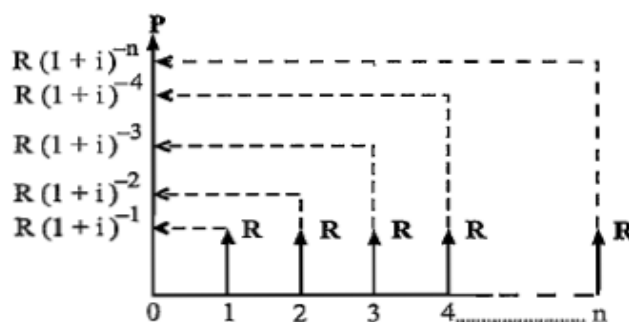
## 2.4. Análise da viabilidade econômica

Após a identificação do comportamento (horário e sazonal) dos ventos e do potencial eólico disponível na região (a 50 m), foi realizado o dimensionamento do projeto com a escolha da turbina eólica adequada ao padrão identificado. Como a potência produzida por uma turbina depende da velocidade do vento que a percorre, e também de suas características construtivas, tais equipamentos são caracterizados por sua curva de potência, descrita no manual de especificação de cada máquina (CECI, 2016). Essa curva é um diagrama que relaciona a potência de saída com as diversas velocidades de vento incidente, estimando-se o desempenho do equipamento em determinada localidade, a partir dos dados de velocidades de ventos a que é submetida (EPALANGA *et al.*, 2013). Muito embora as turbinas eólicas sejam projetadas para geração da máxima potência (potência nominal) a uma velocidade do vento específica (velocidade nominal), há de se observar também a velocidade mínima para o arranque do aerogerador (*cut-in*) e a velocidade de corte da turbina (*cut-out*), a qual, quando atingida, interrompe o funcionamento do equipamento com a finalidade de manter a integridade do sistema (AMARANTE; SILVA; RIOS FILHO, 2003).

Neste trabalho, foram selecionadas turbinas eólicas em conformidade com as velocidades acima indicadas, sobretudo com a velocidade *cut-in*, a partir da análise da curva de potência obtida através do catálogo do fabricante dos equipamentos. Além da velocidade de partida, outro fator importante considerado foi o tamanho das pás, que maximizam a captação dos ventos e, com isso, o aproveitamento eólico da região. Buscou-se, inicialmente, a geração média mensal efetiva de 6,4MW (ABEEÓLICA; 2021), semelhante ao Parque Eólico Gargaú, em São Francisco de Itabapoana, único do estado, sendo que a quantidade de equipamentos foi apurada de forma a evitar superdimensionamentos, que acarretam investimentos além do necessário. O valor total correspondente ao conjunto de turbinas serviu de referência para a análise de custos do projeto.

A análise de viabilidade econômica, a qual envolve os custos de todas as etapas do empreendimento (os recursos necessários para implantação do projeto e as informações relativas à rentabilidade do negócio), foi realizada por meio dos três métodos mais utilizados para tomada de decisão sobre alternativas de investimento: Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR) e *Payback* descontado (Tempo de Retorno do Capital). De acordo com Ceci (2016), o VPL traz, para uma mesma data, a fim de compará-los, o investimento realizado e o rendimento obtido em determinado prazo, observando o valor do dinheiro no tempo por meio da aplicação de uma taxa de juros estabelecida (Gráfico 1). Essa taxa, conhecida como Taxa Mínima de Atratividade (TMA), indica se vale a pena (ou não) fazer uma determinada aplicação financeira, mediante a análise dos custos envolvidos (ALVES, 2021).

Gráfico 1 – Valor presente de série periódica uniforme.



Fonte: Samanez (2007).

Dessa forma, o VPL é a somatória algébrica de todos os valores envolvidos, em todos os períodos considerados, os quais são reduzidos a um instante inicial, observada uma taxa de juros comparativa, a qual reflete o retorno esperado frente a um uso alternativo àqueles recursos aplicados (SAMANEZ; 2002). A Equação 5 explicita como este índice é calculado (SAMANEZ, 2007). Na prática, o investimento torna-se interessante se o valor presente dos fluxos futuros for superior à disponibilidade atual ( $VPL > 0$ ), pois representará incremento no valor da empresa e, com isso, a maximização da sua riqueza. No entanto, a principal dificuldade na aplicação deste método consiste na definição da TMA do mercado, sobretudo quando se refere a longos fluxos. Neste estudo, foi utilizada a TMA de 10%, taxa de juros comumente utilizada em estudo financeiros para referenciar se o projeto é atraente (ou não) ao investidor (FONSECA; BRUNI, 2003).

$$VPL = -I + \sum_{t=1}^n \frac{FC}{(1+i)^t} \quad (5)$$

onde:

$VPL$  é o valor presente líquido

$I$  é o investimento inicial

$FC$  é o fluxo de caixa verificado no projeto durante o período  $t$

$i$  é a taxa de desconto de cada entrada de caixa, ou seja, a TMA ou valor dos juros

$t$  é o período de investimento

$n$  é o tempo de desconto do último fluxo de caixa, ou seja, o tempo de vida útil do projeto

Para o cálculo da TIR, que representa a taxa mínima de desconto que garante a remuneração do capital investido, foi utilizada a Equação 6 (SAMANEZ, 2007), cujo resultado foi comparado à



TMA, com a finalidade de identificar se o referido investimento será mais rentável se direcionado a outro uso alternativo previamente considerado (BARBIERI; ÁLVARES; MACHLINE, 2007). O confronto entre essas taxas indica se haverá ou não retorno ao se executar o projeto proposto, sendo que, se  $TMA < TIR$  (taxa de desconto que reflete o nível de risco do projeto for menor do que a taxa máxima de juros que o projeto suporta), os projetos são rentáveis economicamente; se  $TMA > TIR$ , o projeto deve ser rejeitado economicamente; se  $TMA = TIR$ , há indiferença na aplicação dos recursos financeiros (MELO, 2012).

$$0 = -I + \sum_{t=1}^n \frac{FC}{(1+i)^t} \quad (6)$$

onde:

$I$  é o investimento inicial

$FC$  é o fluxo de caixa verificado no projeto durante o período  $t$

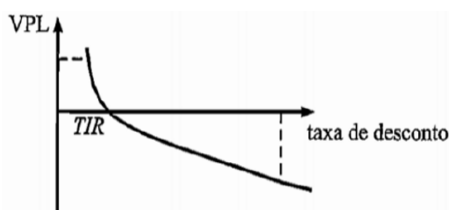
$i$  é a taxa de desconto de cada entrada de caixa, ou seja, a TMA (TIR) ou valor dos juros

$t$  é o período de investimento

$n$  é o tempo de desconto do último fluxo de caixa, ou seja, o tempo de vida útil do projeto

Sob outro enfoque, a TIR é a taxa de desconto capaz de anular o VPL do projeto de investimento, igualando, em determinado momento, as receitas e os custos previstos no caixa (SAMPAIO FILHO, 2008). Assim, quanto maior a TIR, mais viável será o investimento (Gráfico 2).

Gráfico 2 – Gráfico da TIR.



Fonte: Samanez (2002).

Objetivando a apuração do *Payback* descontado, o qual aponta o tempo mínimo para recuperação do capital, foi utilizada a Equação 7 (SAMANEZ, 2007). A tomada de decisão a partir do *payback* confronta o tempo de retorno com o tempo de vida útil do projeto, sendo certo que, se a vida útil for maior que o tempo de retorno do investimento, o projeto é viável economicamente, já que o

mesmo apresentará lucro antes do final da sua vida útil. Além disso, tem-se que, quanto menor o período de *payback*, mais líquido é o investimento (logo, menos arriscado). Neste estudo, tendo em vista que o tempo de vida útil do principal componente de uma turbina eólica (gerador) é de 20 anos (DUTRA; TOLMASQUIM, 2002), este também foi considerado como o tempo de vida útil do projeto.

$$I = \sum_{t=1}^n \frac{FC}{(1+i)^t} \quad (7)$$

onde:

$I$  é o investimento inicial

$FC$  é o fluxo de caixa verificado no projeto durante o período  $t$

$i$  é a taxa de desconto de cada entrada de caixa, ou seja, a TMA (TIR) ou valor dos juros

$t$  é o tempo de retorno do investimento (*payback*)

$n$  é o tempo de desconto do último fluxo de caixa, ou seja, o tempo de vida útil do projeto

O fluxo de caixa ( $FC$ ) do projeto, que estima a rentabilidade por meio da análise dos investimentos aplicados e dos gastos necessários para assegurar a permanência e o crescimento do negócio (SAMANEZ, 2007), foi composto pela apuração da receita bruta, dos principais custos envolvidos (iniciais e de operação e manutenção), bem como do lucro operacional estimado (Tabela 1). A elaboração dos cálculos e dos gráficos respectivos foram realizadas com o auxílio do *software Excel*, versão 2019.

Tabela 1 – Estrutura do fluxo de caixa.

<b>FLUXO DE CAIXA</b>
(+) Receita operacional anual com a energia
<b>Receita operacional bruta</b>
(-) Despesa anual fixa com O&M
<b>Lucro operacional</b>

Fonte: Autores

Explica-se que os custos iniciais envolvem principalmente os gastos com aquisição e instalação dos equipamentos e componentes, sendo que, neste trabalho, a aquisição dos equipamentos, bem como a instalação dos mesmos, foi considerada como compra à vista, sem a utilização de financiamentos.

Foi estimado que o valor dos equipamentos representa a parcela mais significativa dos custos iniciais, cerca de 80%, o que minimiza (20%) os demais gastos em relação ao total de investimento (DUTRA; TOLMASQUIM, 2002). Já os custos com operação e manutenção foram estimados em 2% do investimento inicial, a cada ano (RIBEIRO, 2017), e dizem respeito, sobretudo, à manutenção preventiva dos componentes ao longo da vida útil do projeto.

De forma conservativa, para o cálculo de receita bruta anual do projeto, considerou-se que toda a energia anualmente gerada foi vendida pelo preço da tarifa energética em vigor (bandeira verde, classe residencial normal B1, da Enel Rio), qual seja, 0,88834 R\$/KWh, de acordo com a Resolução nº 3.177, de 14/03/2023, da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), com vigência a partir de 15 de março de 2023 (ENEL, 2023). A aplicação dessa tarifa é necessária para remunerar o serviço adequadamente, bem como viabilizar a estrutura e a qualidade dos serviços (ANEEL, 2023).

Importante destacar que tanto o valor da tarifa de energia elétrica, a qual influencia na receita bruta estimada, quanto o custo fixo do projeto, que afeta a despesa do mesmo, sofrem os efeitos da inflação anual. Nesse sentido, em razão dos efeitos aproximados resultantes, adotou-se que tais parcelas (tarifa e custos) são passíveis de reajustes na mesma proporção ao longo dos anos, permitindo, assim, a desconsideração da projeção de seus reajustes, por se compensarem mutuamente durante a vida útil do projeto. Foram desconsiderados, ainda, os efeitos da depreciação, da exaustão, da perda de eficiência dos equipamentos, de seguros, de custos com arrendamento do terreno, de impostos, dentre outros.

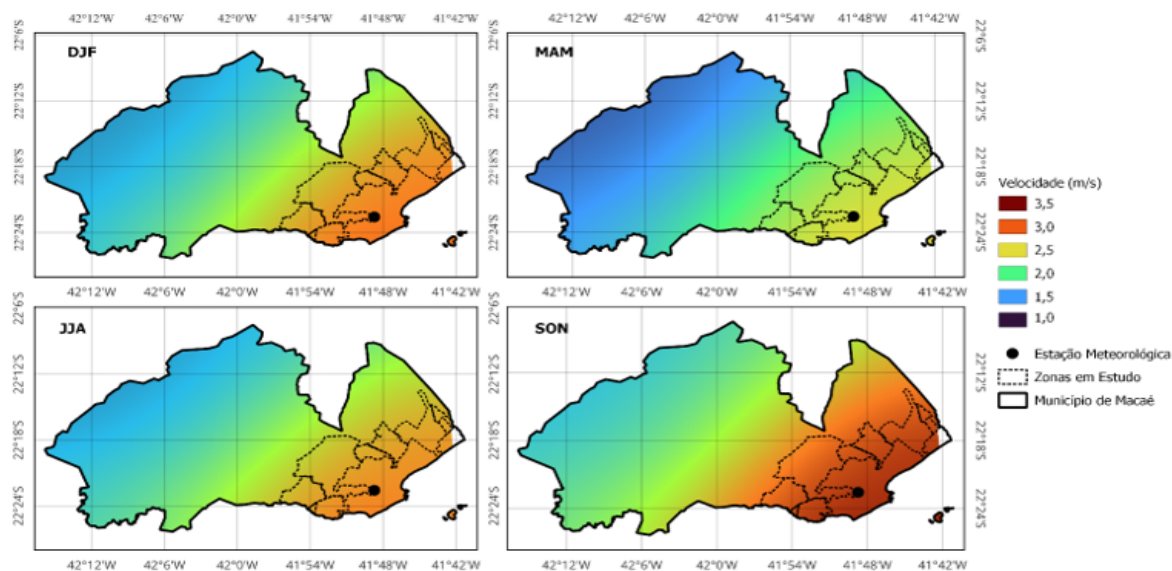
### **3. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

#### **3.1. Análise do comportamento do vento**

Para determinar as áreas em que seria viável um empreendimento eólico em Macaé, primeiramente, foi analisada a distribuição espacial da velocidade média do vento, por estação do ano, conforme ilustrado na Figura 4, utilizando os dados da reanálise ERA5-Land do período de 2007-2021. Constata-se que as menores velocidades (em média) são registradas no outono (Março, Abril e Maio - MAM) e no inverno (JJA) e, as maiores, no verão (DJF) e sobretudo na primavera (Setembro, Outubro e Novembro - SON), quando ventos de 3 m/s a 3,5 m/s, a 10 m de altura, atingem o litoral e a zona urbana do município. As zonas objetos desse estudo, quais sejam, as zonas industriais ZI 1, ZI 3 e ZI 4 e as zonas de expansão urbana ZEU 1 e ZEU 2, recebem ventos com velocidade média que variam de 2,5 m/s a 3 m/s, durante todas as estações do ano. Tais valores estão em consonância com os obtidos por Pereira *et al.* (2022), ao realizarem uma análise sazonal dos ventos de superfície para diversos

municípios do estado do Rio de Janeiro, inclusive o município de Macaé.

Figura 4 – Distribuição espacial da velocidade do vento (m/s) a partir dos dados da reanálise (ERA5-Land), por estação do ano, para Macaé: Verão (DJF), Outono (MAM), Inverno (JJA) e Primavera (SON).



Fonte: Autores.

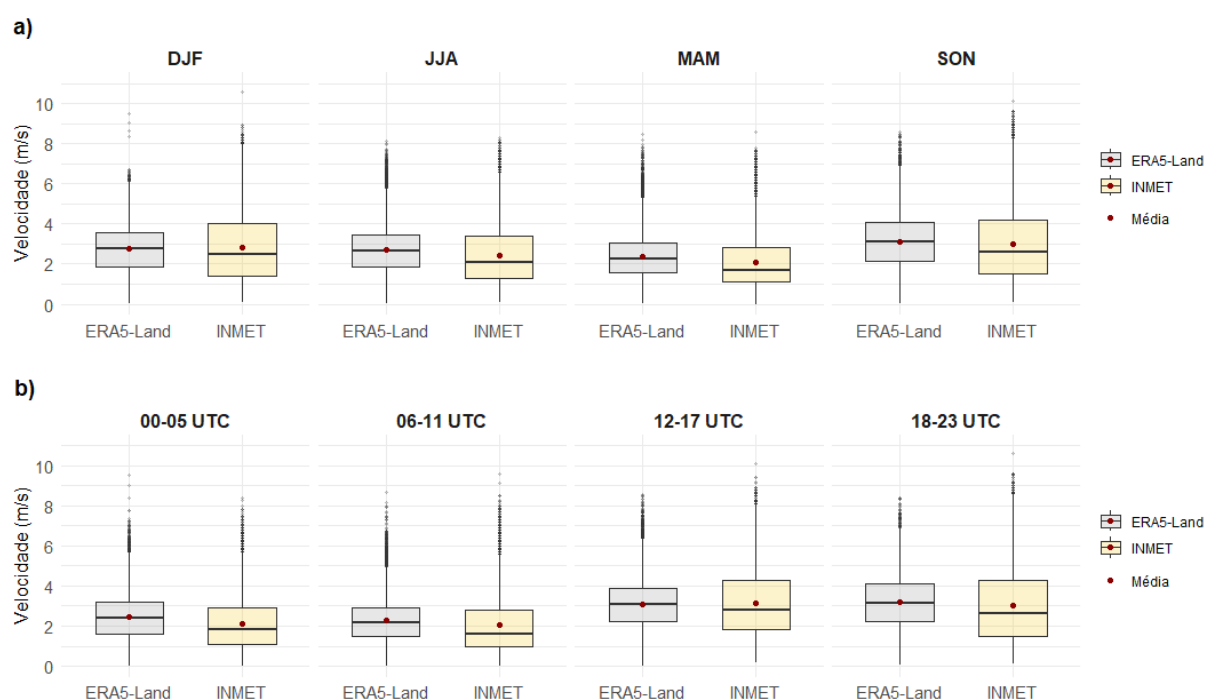
Com base nos valores obtidos, merece destaque o Arquipélago de Santana, um Parque Natural Municipal, que recebe ventos de 3 m/s a 3,5 m/s durante as estações do ano, exceto no outono (MAM), quando os ventos têm, em média, 2,5 m/s. Importante destacar que a velocidade do vento é menor na região oeste do município, com ventos de, no máximo, 2 m/s em todas as estações do ano, exceto na primavera (SON) quando ventos ligeiramente mais fortes, de até 2,5 m/s, atingem o local. Frisa-se que estas regiões do município tem maiores altitudes e a ocorrência de ventos mais fracos pode estar relacionada à topografia acentuada do local, com cachoeiras e serras, que representam obstáculos para a circulação da massa de ar.

Objetivando avaliar a capacidade da reanálise em reproduzir o comportamento dos dados observados, foi realizada a comparação (sazonal e horária) dos dados obtidos na estação meteorológica do INMET, a qual se encontra na região de melhores condições de velocidade do vento, com a série temporal do ERA5-Land, extraída do ponto mais próximo à estação.

Na Figura 5 estão ilustrados os *boxplots* da velocidade do vento dos dados observados (INMET) e da reanálise (ERA5-Land) durante as estações do ano e na escala horária. Observa-se que as séries apresentam comportamentos semelhantes, muito embora os dados observados constem ligeiramente mais dispersos do que os da reanálise, sendo que as maiores diferenças encontram-se na

primavera (SON) e no verão (DJF), bem como no intervalo de 12h às 23h. Já as medidas de tendência central (média e mediana) denotam que o ERA5-Land apresenta uma predisposição em superestimar os valores da velocidade do vento. Constatase, ainda, uma boa concordância entre os dados no que tange à existência de outliers (valores extremos), como se observa principalmente no outono (MAM) e no inverno (JJA).

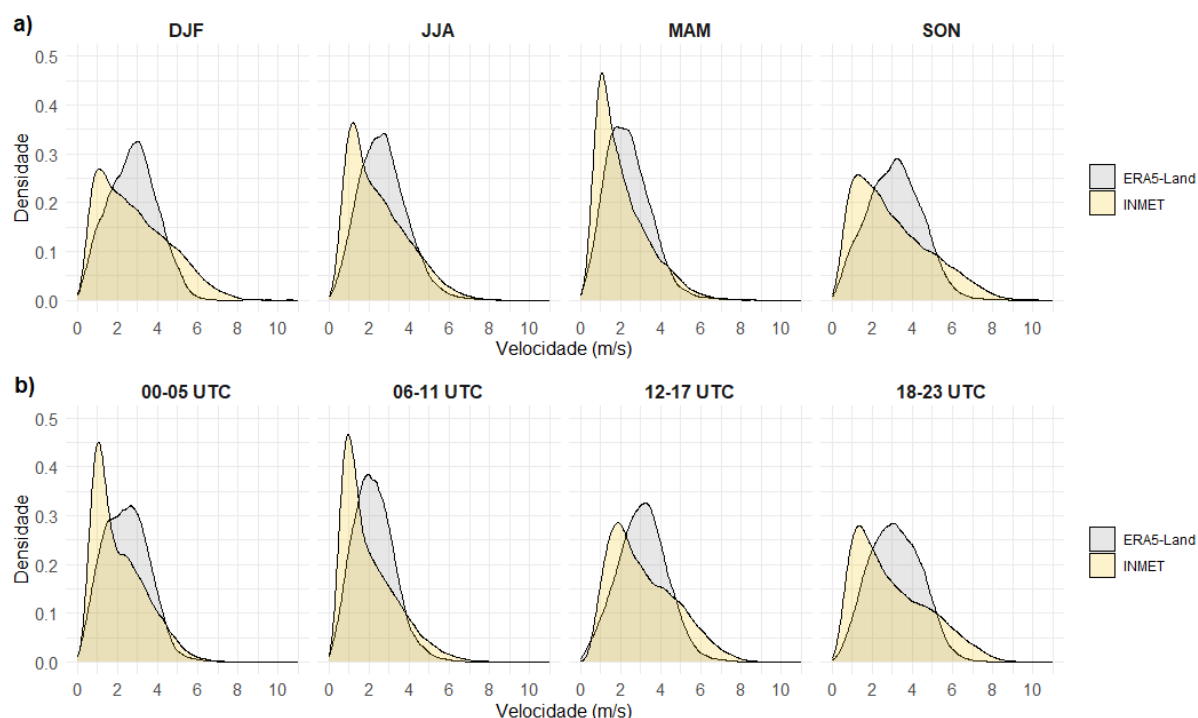
Figura 5 – Boxplot da velocidade do vento (m/s) dos dados observados (INMET) e da reanálise (ERA5-Land): a) por estação do ano e b) de 6 em 6 horas (UTC).



Fonte: Autores.

Ainda para efeitos comparativos, na Figura 6 está ilustrada a densidade de frequência da velocidade do vento (observação e reanálise) durante as estações do ano e na escala horária. É possível verificar que há boa concordância no comportamento das séries, com maiores diferenças ocorrendo no verão (DJF) e na primavera (SON), assim como no intervalo de 18h às 23h. Nesses períodos, os dados observados indicam maior ocorrência de ventos com velocidades acima de 5 m/s, o que não é reproduzido pela reanálise em estudo. Ademais, a análise comparativa mostra que os dados observados indicam maior frequência de ventos nas menores faixas de velocidade enquanto o ERA5-Land aponta para maior espalhamento dos dados, com concentração nas faixas de velocidade um pouco mais elevadas, demonstrando uma tendência do produto em superestimar também a frequência de ocorrência de velocidades mais altas.

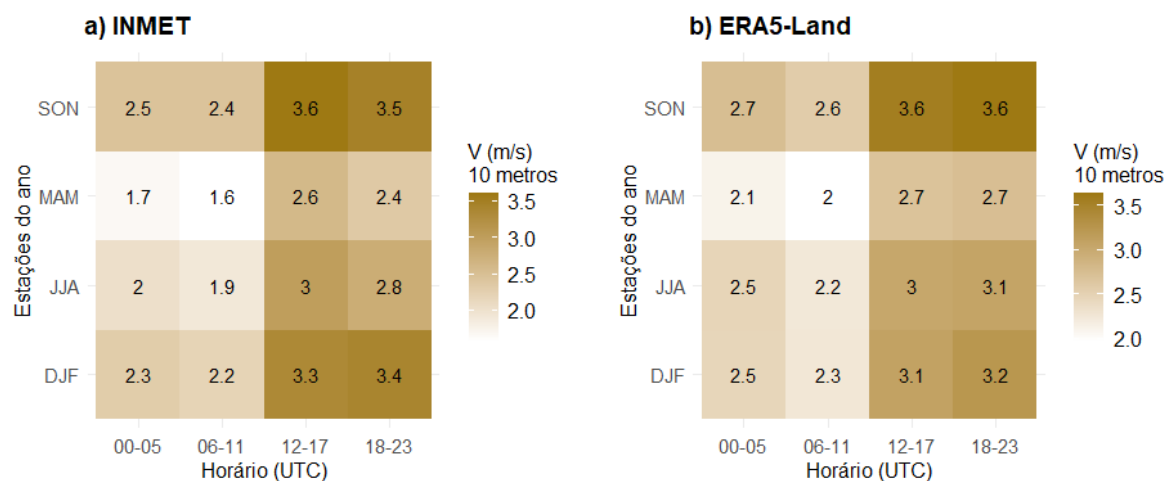
Figura 6 – Densidade de frequência da velocidade do vento dos dados observados (INMET) e da reanálise (ERA5-Land): a) por estação do ano e b) de 6 em 6 horas (UTC).



Fonte: Autores.

No que diz respeito à velocidade média (2007 – 2021) do vento no município, os valores médios obtidos (reanálise e observação), por estação do ano e de 6 em 6 horas (UTC), constam indicados na Figura 7. As velocidades médias observadas a 10 m (entre 1,6 m/s e 3,6 m/s para a observação e entre 2 m/s e 3,6 m/s para a reanálise) denotam a predominância de ventos lentos e suaves na região em estudo (SIEFERT *et al.*, 2021). As maiores velocidades foram registradas no intervalo de 12h às 23h, em todas as estações do ano, sobretudo na primavera (SON) e no verão (DJF), para ambas as séries, e as menores velocidades ocorrem no intervalo de 00h às 11h durante todo o ano, sobretudo no outono (MAM).

Figura 7 – Velocidade média (m/s) horária do vento por estação do ano e de 6 em 6 horas (UTC), a 10 metros, a partir dos dados: a) observados (INMET) e b) da reanálise (ERA5-Land).



Fonte: Autores.

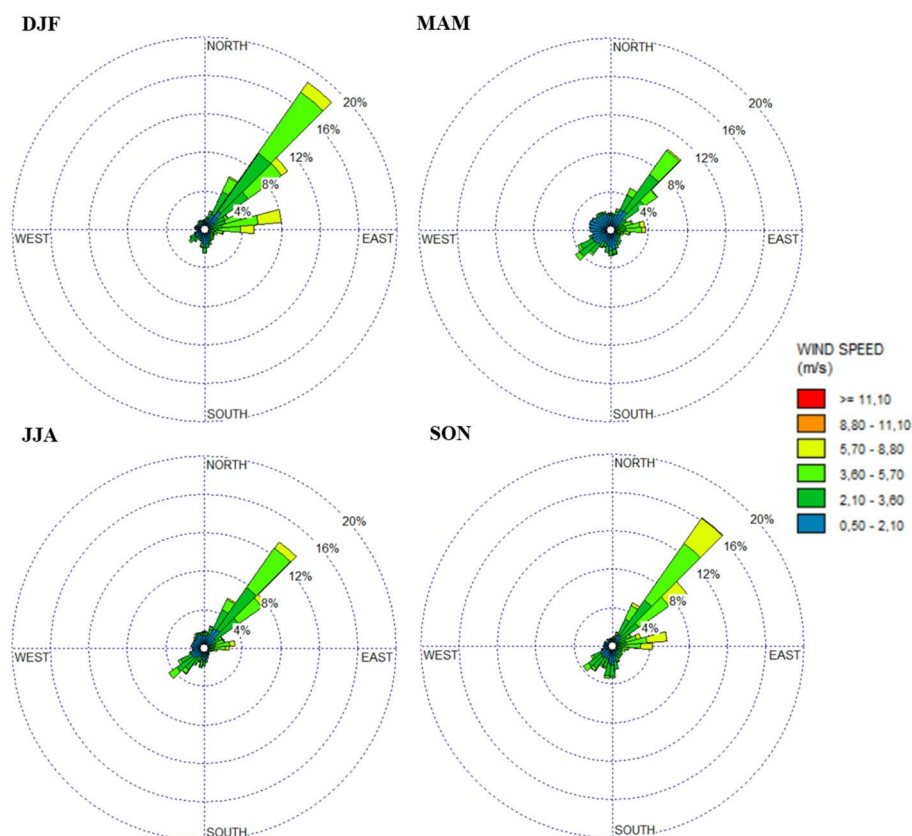
Constata-se que as velocidades médias provenientes da reanálise foram sempre acima das médias dos dados observados, exceto no intervalo de 12h às 23h do verão (DJF), quando houve a subestimativa dos valores em 0,2 m/s (erro de aproximadamente 6%). Em contrapartida, no intervalo de 12h às 17h, na primavera (SON) e no inverno (JJA), ambas as séries indicam valores de velocidade média (3,6 m/s e 3 m/s, respectivamente) aproximadamente iguais. De forma geral, a velocidade da reanálise apresenta tendência de superestimativa em relação à velocidade observada, sendo que as maiores diferenças (maiores erros) foram encontradas no intervalo de 0h às 11h, nas estações do ano em que os ventos são mais fracos, quais sejam, de 00h às 05h do inverno (JJA) e de 06h às 11h do outono (MAM), com 25% de diferença. Já as menores discordâncias, encontram-se no intervalo do dia compreendido entre 12h e 23h, nas estações com melhores ventos, principalmente na primavera (SON).

Em suma, a 10 m, esta reanálise superestima os valores da velocidade horária do vento num percentual médio de 16% (00h às 05h), 13% (06h às 11h) e 9% (18h às 23h). Já para o horário de 12h às 17h, ou houve subestimativa de valores pela reanálise ou ocorreu correspondência semelhante das séries, exceto no outono (MAM), quando a média da reanálise superestimou em 4% a observada. Em termos sazonais, a reanálise superestima a velocidade do vento em 6% na primavera (SON), 16% no outono (MAM), 17% no inverno (JJA) e 7% no verão (DJF), revelando que os menores erros são identificados nas estações do ano com maiores velocidades do vento. Em relação a essas divergências, Siefert *et al.* (2021) afirmam que a comparação direta entre séries de reanálise e observação pode ser comprometido pela diferença no modo como tais valores são obtidos, já que os dados observados são

medidos instantaneamente, enquanto que os provenientes da reanálise correspondem à média da variável em um intervalo de tempo.

No que concerne à direção dos ventos incidentes no município, estudo comparativo realizado por Braga, Santos e Barros (2021), que considerou o período de 01/01/2007 a 31/12/2018, indica que há boa concordância (sazonal) entre a série da reanálise ERA5-Land e a observada, com predominância de ventos de nordeste ao longo das estações do ano, sobretudo no verão (DJF), cuja frequência é de aproximadamente 41%. Na escala horária, de 6 em 6 horas, identificaram a predominância de nordeste entre 00 e 11 horas (UTC) e de leste entre 18 e 23 horas (UTC), para ambas as séries. No entanto, verificaram divergências no intervalo entre 12 e 17 horas (UTC), com reanálise indicando ventos de nordeste (40%) e dados observados apontando predominância de leste (25%). Na Figura 8, elaborada a partir dos dados observados de 2007 a 2021, consta a direção dos ventos incidentes no município durante as estações, confirmando a predominância de nordeste ao longo do ano.

Figura 8 – Rosa dos ventos a partir dos dados observados (INMET), por estação do ano, para Macaé: Verão (DJF), Outono (MAM), Inverno (JJA) e Primavera (SON).



Fonte: Autores.

Observa-se que a persistência do vento na direção nordeste é maior no verão (DJF) e na



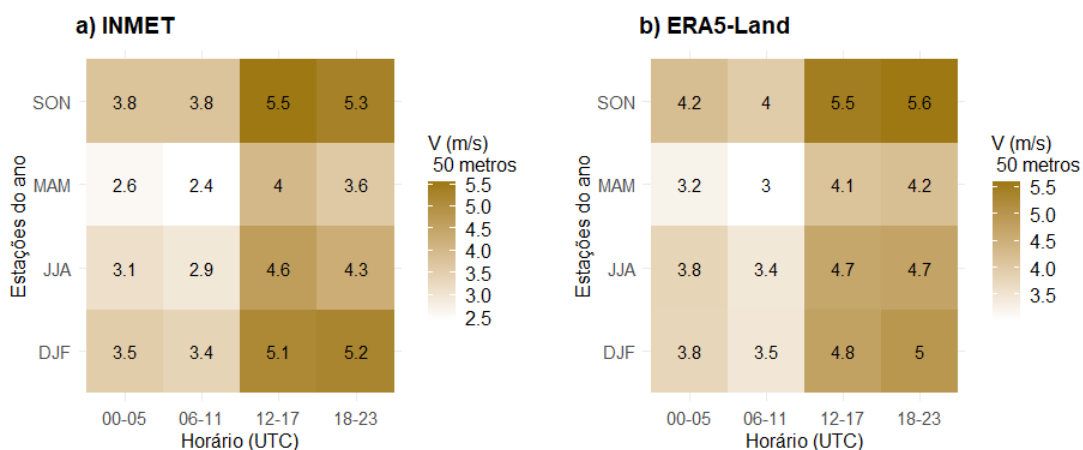
primavera (SON) e que, embora haja predominância na referida direção em todas as estações do ano, o vento apresenta padrão de vários quadrantes no outono (MAM) e inverno (JJA), confirmando o resultado obtido por Aguietas Junior (2011) ao analisar as características do vento em Macaé. No que diz respeito à intensidade da velocidade, constata-se que a frequência é maior nas faixas de menores velocidades, como no outono (MAM) e inverno (JJA), épocas em que aproximadamente metade (57% e 49%, respectivamente) dos ventos incidentes têm velocidade entre 0,5 m/s e 2,10 m/s.

Ante o exposto, considerando que há boa concordância entre os dados da reanálise ERA5-Land e os dados observados do INMET, esse banco de dados apresenta-se como alternativa viável para utilização nas demais áreas do município, resguardando-se a cautela no que diz respeito à tendência de superestimativa de valores e os percentuais médios de erro acima constatados. Destaca-se que as zonas em estudo encontram-se localizadas nas regiões de melhores condições de velocidade do vento no município, havendo, com isso, coincidência de boas características ambientais e técnicas, o que pode ser considerado para implantação de empreendimentos eólicos na região.

### 3.2. Estimativa do potencial eólico

Para estimar o potencial eólico disponível, foi realizada a extrapolação da velocidade média do vento a 10 metros (altura de referência) para 50 metros (altura de instalação de aerogeradores), visando ao melhor aproveitamento dos recursos eólicos disponíveis. Os resultados, por estação do ano e de 6 em 6 horas (UTC), constam na Figura 9, na qual se observa que, mesmo a 50 m, a intensidade média dos ventos é relativamente baixa, o que minimiza o potencial eólico estimado para a região.

Figura 9 – Velocidade média (m/s) horária do vento por estação do ano e de 6 em 6 horas (UTC), a 50 metros, a partir dos dados: a) observados (INMET) e b) da reanálise (ERA5-Land).

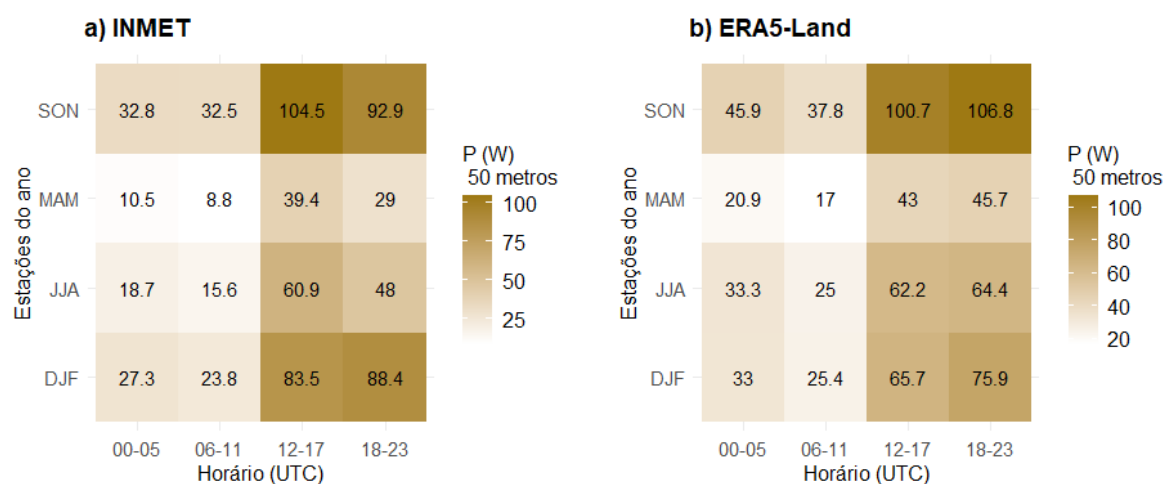


Fonte: Autores.

Nota-se que, a 50 metros, a velocidade da reanálise mantém a tendência de superestimativa em relação à velocidade observada, sendo que as maiores diferenças (aproximadamente 23%) foram encontradas novamente no intervalo de 0h às 11h, principalmente de 00h às 05h do inverno (JJA) e de 06h às 11h do outono (MAM). Já as menores discordâncias (em torno de 2%), encontram-se no intervalo do dia compreendido entre 12h e 23h, sobretudo na primavera (SON). Consta-se ainda que, em termos horários, a reanálise superestima os valores da velocidade do vento nos mesmos percentuais de erro médio encontrados para o sobrevalor a 10 m, exceto de 18h às 23h, quando a diferença é maior a 50 m (11% frente aos 9% estimados a 10 m). Houve subestimativa de valores pela reanálise apenas no verão (DJF), de 12h às 23h, e ocorreu a correspondência exata (média) das séries apenas de 12h às 17h, na primavera (SON). No que diz respeito às estações do ano, os percentuais de superestimativa pela reanálise, a 50 m, são de 7% na primavera (SON), 17% no outono (MAM), 13% no inverno (JJA) e 6% no verão (DJF), confirmando a premissa de que os menores erros são identificados nas estações do ano com maiores velocidades do vento.

Na Figura 10 está indicado o potencial eólico estimado a 50 m de altura, por estação do ano e de 6 em 6 horas (UTC), considerando os dados observados e da reanálise. Tem-se que os maiores potenciais são registradas nos horários e nas estações do ano cujos ventos são mais intensos, quais sejam, de 12h às 23h, em todas as estações do ano, sobretudo na primavera (SON), com até 104,5 W/m<sup>2</sup> (12h às 17h) de acordo com os dados INMET e de 106,8 W/m<sup>2</sup>, de 18h às 23h, a partir dos dados do ERA5-Land.

Figura 10 – Densidade de Potência (DP) por estação do ano e de 6 em 6 horas (UTC), a 50 metros, com base nos dados: a) observados (INMET) e b) da reanálise (ERA5-Land).



Fonte: Autores.

Considerando os valores máximos obtidos, destaca-se que, de acordo com Lopez (2012), para que a energia eólica seja considerada tecnicamente aproveitável, a densidade de potência deve ser maior ou igual a  $500 \text{ W/m}^2$ , a uma altura de 50 m, o que requer velocidade mínima do vento de 7 a 8 m/s, valores bem acima dos registrados na região de estudo. Os resultados da Figura 10, evidenciam ainda a discrepância gerada pelas séries de dados, pois pequenas diferenças entre as velocidades médias obtidas acarretam diferenças relevantes no potencial estimado, considerando a potência cúbica a que esta variável está submetida. Com isso, o potencial eólico estimado com base nos dados do ERA5-Land atinge, em alguns casos, aproximadamente o dobro do valor obtido com base nos dados observados, como ocorreu de 00h às 11h no outono (MAM), o que configura uma fragilidade na aplicação dessa série em estudos de aproveitamento eólico.

### **3.3. Análise da viabilidade econômica**

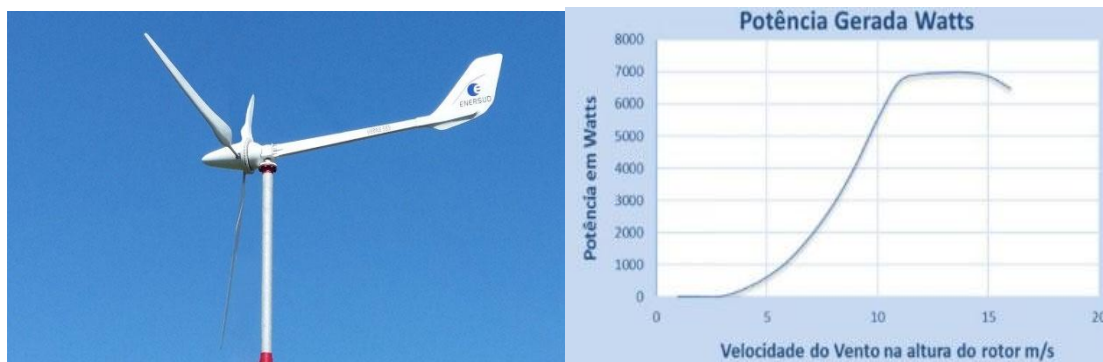
Com o objetivo de dimensionar o empreendimento pretendido, foi escolhida turbina eólica adequada ao regime de ventos identificado. Explica-se que, de acordo com a escala de Beaufort, as velocidades médias observadas em Macaé, a 10 m, quais sejam, entre 1,6 m/s e 3,6 m/s para a observação (2 m/s e 3,6 m/s para a reanálise), correspondem a brisas leves ou fracas, suficientes apenas para agitação de folhas de árvores e início de operação de moinhos de vento. Já a 50 m, tais valores podem corresponder a brisas moderadas (até 5,5 m/s), suficientes para mover galhos de árvores. Entretanto, essa faixa de velocidade não consta na classificação de turbinas de grande porte estabelecida pela Comissão Eletrotécnica Internacional (IEC, 2008), cujo menor valor de velocidade média anual para utilização desses equipamentos é de 6 m/s (turbinas eólicas de classe IV).

Assim, considerando a incidência de ventos abaixo do limite mínimo previsto pela IEC no município, resta inviável a utilização de equipamentos de grande porte, motivo pelo qual se optou pelo uso de aerogeradores de pequenas dimensões, mais adequados ao padrão de ventos identificado na região. Frisa-se a reduzida oferta de aerogeradores nacionais de pequeno porte que consigam atuar no regime de ventos do município, sobretudo aqueles que disponham de baixa velocidade de partida, necessária para que o equipamento entre em rotação. Neste cenário, para estimar a energia gerada pelos ventos incidentes nas zonas de estudo, selecionou-se uma turbina eólica horizontal, de fabricação regional, de forma a fomentar o mercado eólico nacional.

Foi escolhida a turbina eólica VERNE 555, da fabricante ENERSUD Energia Limpa, com sede na cidade de Maricá/RJ, a qual foi desenvolvida para atender às demandas rurais e industriais que superam o consumo individual, tendo sido projetada para captar energia em condições de baixas

velocidades do vento. Este equipamento entra em rotação a uma velocidade “*cut-in*” de 2,2 m/s, compatível com o regime de ventos locais, e pode gerar até 6 KW, dependendo da velocidade do vento no local de instalação. A curva de potência do equipamento (Figura 11) mostra a relação entre a velocidade dos ventos incidentes, em m/s, e a potência gerada pelo produto (Watts). Na Tabela 2 estão relacionadas as principais características do aerogerador selecionado.

Figura 11 – Imagem e curva de potência da turbina eólica modelo VERNE 555.



Fonte: ENERSUD (2023).

Tabela 2 – Características da turbina eólica Verne 555, da ENERSUD Energia Limpa.

<b>Característica / Desempenho</b>	<b>Valor</b>
Potência Nominal	6000W
Velocidade Nominal	12,5 m/s
Velocidade de Partida	2,2 m/s
Velocidade Máxima	137 km/h
Diâmetro da hélice	5,5 m
Número de pás	3
Altura da torre	50 m

Fonte: ENERSUD (2023).

Destaca-se que, não obstante a turbina selecionada tenha sido projetada para atuar com ventos fracos, a mesma atinge sua potência nominal com ventos de 12,5 m/s (Tabela 2), velocidade notadamente superior àquelas identificadas na região. Ressalta-se que os ventos mais importantes foram observados das 12h às 17h, na primavera (SON), com velocidade média de 5,5 m/s (50m), a qual é 44% da velocidade nominal do equipamento. Dessa forma, embora o equipamento seja

adequado ao regime de ventos locais em razão da baixa velocidade de partida (*cut-in*), ele resta subutilizado em todos os períodos analisados, por não atingir a capacidade nominal nas melhores condições de vento.

Importante ressaltar que a escolha da turbina eólica Verne 555 foi baseada sobretudo na baixa velocidade de partida do equipamento (2,2 m/s), o que garantiria sua operação ao longo de todo o ano, se instalada a 50 m de altura. Na Tabela 3 está a produção de energia mensal de 1 (uma) turbina do modelo escolhido, de acordo com as velocidades indicadas pelo fabricante. Para maiores detalhes, ver catálogo comercial da turbina eólica VERNE 555, da ENERSUD Energia Limpa no Apêndice A.

Tabela 3 – Produção de energia Verne 555 (KW.h/mês).

PRODUÇÃO DE ENERGIA VERNE 555 (kw.h/mês)										
Altura / Velocidade	5 m/s	5,5 m/s	6 m/s	6,5 m/s	7 m/s	8 m/s	9 m/s	10 m/s	11 m/s	12 m/s
50 m	661	840	1025	1208	1383	1686	1908	2047	2114	2122
25 m	505	654	816	983	1150	1464	1725	1918	2044	2108
18 m	442	577	726	886	1043	1353	1625	1838	1989	2080
15 m	409	537	679	830	985	1292	1566	1789	1952	2057
12 m	372	491	624	767	916	1217	1493	1726	1903	2024

Fonte: ENERSUD (2019).

Verifica-se que, a 50 m, a geração considerável da turbina, de acordo com o fabricante, se dá com ventos a partir de 5 m/s, o que, no presente estudo, ocorre tão somente de 12h às 23h da primavera (SON) e do verão (DJF). Diante disso, observa-se que não seria possível a geração ininterrupta de energia pelo equipamento e a fonte eólica poderia ser usada de forma complementar a outras fontes de energia, com geração ocorrendo apenas nos períodos do ano com melhores condições de vento. Nesse caso, com base nas informações prestadas pelo fabricante, a turbina eólica em exame estaria em operação efetiva todos os dias da primavera (SON) e do verão (DJF), sempre no período de 12h às 23h, mas restaria inoperante (ou com geração irrisória) nos demais períodos, não obstante tenha sido ultrapassada a velocidade de partida.

Para fins de dimensionamento do projeto, enfatiza-se que o conjunto gerará energia apenas durante 6h do dia (12h às 23h), reduzindo pela metade a produção indicada na referida tabela. Ademais, uma vez que a operação se dará apenas por 6 meses ao longo do ano (SON e DJF), tendo-se por base a menor velocidade média de referência a 50 m (5 m/s), tem-se que, para obtenção da geração média pretendida (6,4 MW mensais), seria necessário o quantitativo aproximado de 20 aerogeradores do modelo em análise (com geração individual de 330,5 KWh/mês) para uma produção mensal (anual) conjunta de 6610 KWh/mês (39660 KWh/ano).

Na Tabela 4 constam as características do projeto, com base nos preços dos equipamentos obtidos junto ao fabricante (FIGUEIREDO; 2019), a estimativa dos demais gastos para implantação

do empreendimento, bem como os demais parâmetros envolvidos, desconsiderados os efeitos da inflação (reajustes no valor da tarifa de energia elétrica e dos custos de O&M), dos impostos, de exaustão, de seguros, de custos com arrendamento do terreno, dentre outros. Para o cálculo de receita bruta anual do projeto, foi considerado que toda a energia anualmente gerada pelo empreendimento (39.660 KWh/ano) será vendida pelo preço da tarifa energética em vigor (bandeira verde, classe residencial normal B1, da Enel Rio), qual seja, 0,88834 R\$/KWh (ENEL, 2023). Já os custos com operação e manutenção foram estimados em 2% do investimento inicial, por ano, perfazem o montante fixo de R\$ 14.750,00.

Tabela 4 – Características do projeto para implantação de 20 turbinas eólicas em Macaé.

<b>CATEGORIA</b>	<b>VALOR (R\$)</b>
Valor unitário de cada equipamento (80%)	29.500,00
Demais gastos para implantação (20%)	7.375,00
Custo individual	36.875,00
Quantidade de turbinas eólicas	20
Investimento Inicial	737.500,00
Potência mensal gerada pelo conjunto	6.610 KWh/mês
Potência total anual gerada pelo conjunto	39.660 KWh/ano
Tarifa energética em vigor	0,88834 R\$/KWh
Receita anual	35.231,56
Custo anual fixo com O&M	14.750,00

Fonte: Autores.

A partir da estimativa dos parâmetros acima, foi elaborado o fluxo de caixa anual do projeto, conforme Tabela 5, de forma a possibilitar a análise de viabilidade econômica por meio dos indicadores selecionados. A referida tabela traz valores que não atendem às expectativas econômicas, sobretudo porque a receita obtida é irrisória frente ao elevado custo inicial despendido. Nota-se que a receita anual é de apenas 4,7% do investimento inicial, o que é agravado pelos elevados custos de O&M do projeto, e é insuficiente para promover o retorno do valor investido durante o tempo de vida útil do mesmo. De acordo com Santos (2020), os custos de produção, operação e manutenção da energia eólica ainda são elevados por se tratar de uma tecnologia relativamente nova, com falta de estrutura para a indústria e mão-de-obra especializada, os quais tendem a diminuir com a maturidade da indústria e incentivos governamentais.

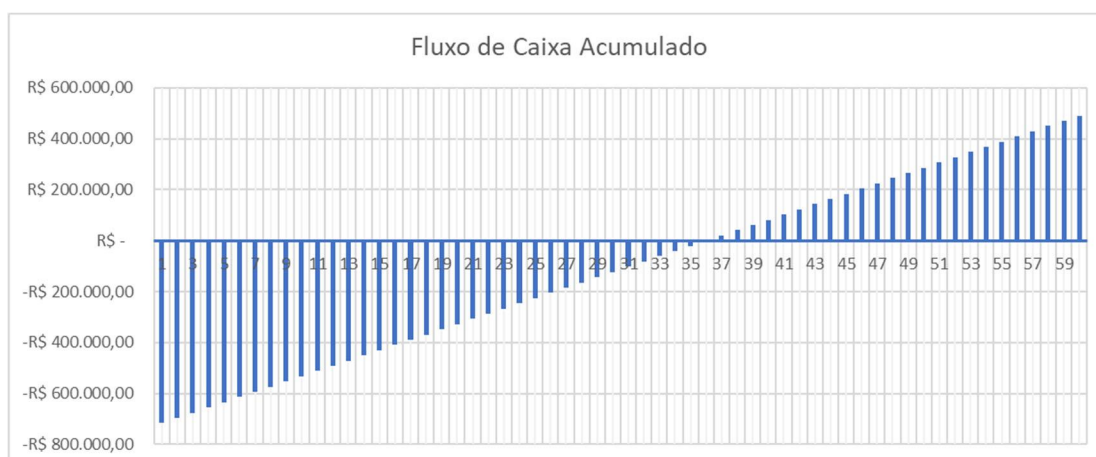
Tabela 5 – Fluxo de caixa do projeto.

<b>ANO</b>	<b>RECEITA ANUAL</b>	<b>DESPESA ANUAL (CUSTO FIXO O&amp;M)</b>	<b>FC</b>	<b>FCA</b>
0	-R\$ 737.500,00	0	0	0
1	35.231,56	R\$ 14.750,00	R\$ 20.481,56	-R\$ 717.018,44
2	35.231,56	R\$ 14.750,00	R\$ 20.481,56	-R\$ 696.536,87
3	35.231,56	R\$ 14.750,00	R\$ 20.481,56	-R\$ 676.055,31
4	35.231,56	R\$ 14.750,00	R\$ 20.481,56	-R\$ 655.573,74
5	35.231,56	R\$ 14.750,00	R\$ 20.481,56	-R\$ 635.092,18
6	35.231,56	R\$ 14.750,00	R\$ 20.481,56	-R\$ 614.610,61
7	35.231,56	R\$ 14.750,00	R\$ 20.481,56	-R\$ 594.129,05
8	35.231,56	R\$ 14.750,00	R\$ 20.481,56	-R\$ 573.647,48
9	35.231,56	R\$ 14.750,00	R\$ 20.481,56	-R\$ 553.165,92
10	35.231,56	R\$ 14.750,00	R\$ 20.481,56	-R\$ 532.684,36
11	35.231,56	R\$ 14.750,00	R\$ 20.481,56	-R\$ 512.202,79
12	35.231,56	R\$ 14.750,00	R\$ 20.481,56	-R\$ 491.721,23
13	35.231,56	R\$ 14.750,00	R\$ 20.481,56	-R\$ 471.239,66
14	35.231,56	R\$ 14.750,00	R\$ 20.481,56	-R\$ 450.758,10
15	35.231,56	R\$ 14.750,00	R\$ 20.481,56	-R\$ 430.276,53
16	35.231,56	R\$ 14.750,00	R\$ 20.481,56	-R\$ 409.794,97
17	35.231,56	R\$ 14.750,00	R\$ 20.481,56	-R\$ 389.313,41
18	35.231,56	R\$ 14.750,00	R\$ 20.481,56	-R\$ 368.831,84
19	35.231,56	R\$ 14.750,00	R\$ 20.481,56	-R\$ 348.350,28
20	35.231,56	R\$ 14.750,00	R\$ 20.481,56	-R\$ 327.868,71

Fonte: Autores.

Percebe-se que o reduzido lucro (R\$ 20.481,56) ocorre em razão da baixa geração anual de energia, que produz fluxo de caixa também reduzido, prolongando o tempo de retorno do capital aplicado. No Gráfico 3 está demonstrado que não haverá retorno do investimento inicial durante a vida útil do projeto, mas somente no 36º ano de operação. Diante disso, considerando que o tempo de retorno do investimento (*payback*) só ocorre 16 anos após o tempo de vida útil estimado (20 anos), o sistema é considerado economicamente inviável.

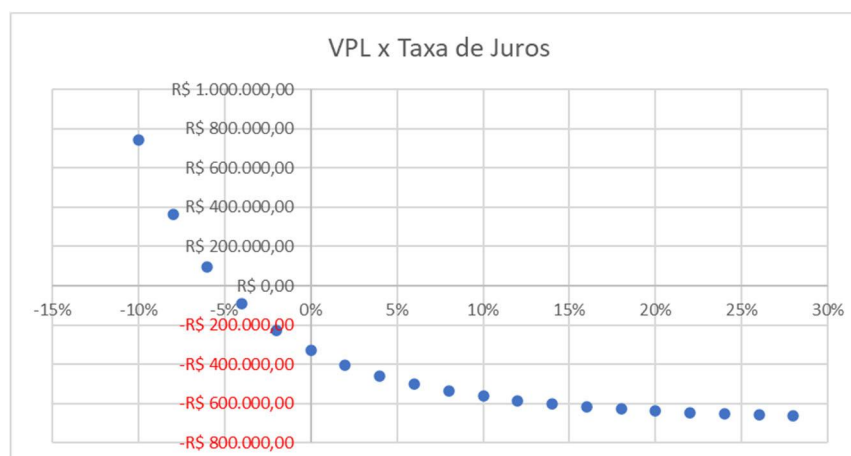
Gráfico 3 – Fluxo de caixa do acumulado.



Fonte: Autores.

O VPL do projeto é negativo, no valor de R\$ -R\$ 563.128,90 e a TIR também é negativa (-5,05%), ou seja, inferior à Taxa Mínima de Atratividade (TMA) de 10% considerada, confirmando a inviabilidade econômica do empreendimento. No Gráfico 4 consta a relação obtida entre o VPL e a Taxa de Juros do projeto.

Gráfico 4: Taxa interna de retorno (TIR).



Fonte: Autores.

Entretanto, em que pese a inviabilidade econômica apontada pelos indicadores analisados, é importante destacar que a produção anual de energia das turbinas em exame é de 39660 KWh/ano, a qual, de acordo com a Instituição CO2Zero (2023), poderia evitar a liberação de aproximadamente 2,7 toneladas de CO<sub>2</sub>, por ano, na atmosfera terrestre. Destaca-se que, embora seja um gás essencial à vida na terra, o excesso de CO<sub>2</sub> gera desequilíbrio no efeito estufa, elevando a temperatura do globo e



ocasionando, dentre outras adversidades, mudanças climáticas que podem comprometer a integridade da biosfera e a sobrevivência do homem no planeta (ODUM; BARRET, 2006).

Nesse cenário, a economia do carbono surge como uma estratégia que visa a mitigar as emissões dos GEE, por agregar o ecossistema e o sistema econômico, possibilitando que projetos dessa tipologia se tornem viáveis, mediante a disponibilização dos incentivos fiscais necessários, priorizando fatores ambientais que suplantam o ponto de vista econômico. Desse modo, a viabilidade técnica detectada, revela a necessidade de realização de novos estudos na região, com a utilização de outros modelos de aerogeradores, que apresentem maior eficiência na presença de ventos fracos, instalados em diferentes alturas, visando um melhor aproveitamento dos recursos eólicos disponíveis no município.

#### 4. CONCLUSÃO

Este estudo consistiu em analisar a viabilidade técnica e econômica para implantação de um parque eólico no município de Macaé, no estado do Rio de Janeiro. Para isso, foi identificado o comportamento dos ventos incidentes, a partir de dados da reanálise ERA5-Land e de dados da estação meteorológica automática do INMET, localizada na Zona Industrial 4 (ZI 4) do município. Ainda, objetivou-se avaliar a capacidade da reanálise em reproduzir o comportamento dos dados observados, mediante a comparação dos dados de velocidade do vento fornecidos pelo ERA5-Land com dados do INMET, a fim de subsidiar a aplicação dessa série nas demais áreas do município. Com os valores médios das velocidades dos eventos, foi estimada a densidade de potência local, possibilitando a seleção de turbina eólica adequada ao padrão de ventos identificado, com respectivos custos, os quais embasaram a aplicação dos principais métodos para tomada de decisão sobre alternativas de investimento, que são, Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR) e Payback descontado (Tempo de Retorno do Capital).

Diante dos resultados obtidos, conclui-se que há uma boa concordância entre os dados da reanálise ERA5-Land e os dados observados do INMET, pois conseguem reproduzir o comportamento sazonal e horário da velocidade do vento. No entanto, embora o ERA5-Land se apresente como uma alternativa para regiões nas quais existem dificuldades na obtenção de dados, a utilização dessa série deve ser feita com prudência, sobretudo no que diz respeito ao aproveitamento eólico, sendo necessária atenção quanto à tendência de superestimativa de valores. Ressalta-se que tais diferenças geram discrepâncias entre as densidades de potência estimadas, já que a potência eólica é diretamente proporcional ao cubo da velocidade do vento. Neste estudo, algumas estimativas de densidade de

potência, a partir dos dados da reanálise, foram de aproximadamente o dobro daquelas relativas aos dados do INMET, exigindo cautela na aplicação para estimativa de potencial eólico nas regiões do município.

Com relação à direção dos ventos incidentes em Macaé, há predominância de ventos de nordeste, com persistência maior no verão (DJF), em todas as estações do ano. De forma geral, as maiores velocidades (dados observados e reanálise) foram registradas na primavera (SON) e, as menores, no outono (MAM). Na análise horária, o período que apresentou maior velocidade foi entre 12 e 23 horas (UTC). As zonas industriais ZI 1, ZI 3 e ZI 4, bem como as zonas de expansão urbana ZEU 1 e ZEU 2, estão localizadas nas regiões de melhores condições de velocidade do vento no município, havendo, dessa forma, coincidência de características ambientais e técnicas, ou seja, compatibilidade com a implantação de empreendimentos eólicos.

Considerando que há predominância de ventos lentos e suaves na região, identificou-se que o maior valor estimado de densidade de potência no município permite apenas a utilização de aerogeradores de pequenas dimensões, como, por exemplo, a turbina eólica Verne 555, da fabricante regional Enersud Energia Limpa. Concluiu-se que, mesmo dispondo de baixa velocidade de partida e instalado a 50 metros de altura, com a utilização desse aerogerador não seria possível a geração ininterrupta de energia, em razão dos ventos ainda fracos, incidentes no intervalo de 00h às 11h e no outono (MAM) e inverno (JJA). Entretanto, a geração eólica pode ser utilizada de forma complementar a outras fontes de energia, se observados os períodos com melhores condições de vento.

No que diz respeito à viabilidade econômica, tendo em vista o elevado custo inicial para implantação do projeto, os métodos para tomada de decisão aplicados revelaram que não haverá retorno do investimento inicial durante a vida útil do projeto utilizando a turbina eólica VERNE 555. Além disso, O VPL e a TIR do projeto apresentaram valores negativos, o que confirma a inviabilidade econômica do empreendimento.

Não obstante a inviabilidade econômica apontada pelos indicadores analisados, é importante destacar que a implantação de empreendimentos para geração de energia não pode ser vista apenas sob os aspectos técnicos e econômicos, devendo-se considerar que a produção anual de energia das turbinas em exame poderia evitar a liberação de toneladas de CO<sub>2</sub>, por ano, na atmosfera terrestre, o que auxiliaria no controle do efeito estufa, que pode comprometer a integridade da biosfera e a sobrevivência do homem no planeta.

Para trabalhos futuros nessa linha de pesquisa, sugere-se investigar a viabilidade econômica a partir da utilização de outros modelos de aerogeradores, que apresentem maior eficiência na presença de ventos fracos, instalados em diferentes alturas, visando um melhor aproveitamento dos recursos eólicos disponíveis no município. Sugere-se também a utilização de outras tarifas de energia para o cálculo dos indicadores aplicados, sobretudo aquelas relativas à bandeira vermelha, o que pode resultar em receita suficiente para apontar a viabilidade econômica de projetos dessa tipologia em Macaé. Adicionalmente, propõe-se estabelecer menor referência para geração anual de energia (inferior à do parque eólico modelo utilizado), resultando em projeto hipotético com menores dimensões, o que é mais sustentável em termos de ocupação do território municipal e envolveria menores custos de implantação.

Ainda, sugerem-se estudos que verifiquem a possibilidade de operação complementar da energia eólica com outras fontes alternativas, mediante planejamento energético que comporte a complementaridade entre as diversas fontes, para acesso principalmente quando ocorrer escassez de geração proveniente de fontes hidráulicas. Por fim, estudos financeiros são necessários de forma a verificar se projetos dessa tipologia podem se tornar viáveis se utilizadas linhas de financiamento ou incentivos fiscais pertinentes.

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABEEÓLICA. Associação Brasileira de Energia Eólica e Novas Tecnologias. **Boletim anual 2021**. São Paulo, 2021. Disponível em: <https://abeeolica.org.br/energia-eolica/dados-abeeolica/>. Acesso em: 02 mar. 2023.

AGUIEIRAS JUNIOR, Roberto Luiz. **Caracterização Preliminar da Direção e Velocidade do Vento na Cidade de Macaé, RJ**. 2011. Monografia (Graduação em Engenharia Agrônômica) – Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2011.

ALVES, Alex da Silva. **Análise de Investimentos e Viabilidade de Projetos**. 2021. Apostila de sala de aula. Universidade Federal Fluminense. Polo Universitário de Rio das Ostras. Rio de Janeiro.

AMARANTE, Odilon Antônio Camargo do; SILVA, Fabiano de Jesus Lima da; RIOS FILHO, Luiz Gonzaga. **Atlas Eólico**, Secretaria da Energia, da Indústria Naval e do Petróleo do estado do Rio de Janeiro, 2003. Disponível em: [http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas\\_eolico/AtlasEolicoRJ.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas_eolico/AtlasEolicoRJ.pdf). Acesso em: 6 mar. 2022.

ANEEL Agência Nacional de Energia Elétrica. **Tarifas**. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/tarifas>. Acesso em: 20 jan. 2023.

BARBIERI, José Carlos; ÁLVARES, Antônio Carlos Teixeira; MACHLINE, Claude. **Taxa Interna de Retorno: controvérsias e interpretações**. GEPROS – Gestão da Produção, Operação e Sistemas – Ano 2, Vol. 5, out-dez/2007, p.131 – 142. Disponível em: [https://pesquisa-eaesp.fgv.br/sites/gvpesquisa.fgv.br/files/arquivos/barbieri\\_-\\_taxa\\_interna\\_de\\_retorno\\_controversias\\_e\\_interpretacoes.pdf](https://pesquisa-eaesp.fgv.br/sites/gvpesquisa.fgv.br/files/arquivos/barbieri_-_taxa_interna_de_retorno_controversias_e_interpretacoes.pdf). Acesso: Acesso em 16 fev. 2022.

BRAGA, Rose Angela Hilda Wanzeler; SANTOS, Eliane Barbosa; BARROS, Matheus Ferreira de. Validação de dados de vento da reanálise ERA5-Land para estimativa de potencial eólico no Estado do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Energia** | Vol. 27, Nº 4, 4º Trimestre de 2021.

CALDAS, Danilo Monteiro. **Estudo do Potencial Eólico e Estimativa de Geração de Energia de um Projeto Eólico na Cidade do Rio de Janeiro Utilizando o WINDPRO e o WASP**. 2010. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

CECI, Raoni Stefano de Lima. **Estudo de Viabilidade Econômica para Implantação de uma Fonte de Energia Renovável em uma Unidade Consumidora de Grande Porte**. 2016. 68 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Paraná, 2016. Disponível em: <http://riut.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/12581/1/viabilidadeimplanta%C3%A7%C3%A3oenergiarenov%C3%A1vel.pdf>. Acesso em: 07 mar. 2022.

CO2Zero. **Calculadora de Co2** - Pegada de carbono. Disponível em: <https://co2zero.eco.br/calculadora-carbono/>. Acesso em: 22 fev. 2023.

DUTRA, Ricardo Marques; TOMALSQUIM, Maurício Tiomno (2002). Estudo de viabilidade econômica para projetos eólicos com base no novo contexto do setor elétrico. **Revista Brasileira de Energia**, 9(1), 135-158. Disponível em: <https://sbpe.org.br/index.php/rbe/article/view/159/142>. Acesso em: 07 mar. 2022.

ENEL Energia Elétrica. Rio de Janeiro. **Taxas, Tarifas e Impostos**. 2023. Disponível em: <https://www.enel.com.br/content/dam/enel-br/one-hub-brasil---2018/tarifas-taxas-impostos/rio/Tarifas-ENEL-RJ.pdf>. Acesso em: 08 abr. 2023.

ENERSUD Energia Limpa. **Catálogo Verne 555**. 2019. Disponível em: <http://repositorio.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10028417.pdf>. Acesso em: 20 jan. 2023

ENERSUD Energia Limpa. **Turbina Eólica VERNE 555**. 2023. Disponível em: <https://www.enersud.com.br/turbina-eolica-verne-555/>. Acesso em: 20 jan. 2023.

EPALANGA, Oteniel A. Siliveli *et al.* **ENERGIA EÓLICA-Viabilidade Técnica de Projeto Eólico na Região de Urubici**. 2013.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. 2022. **Balço Energético Nacional – BEN 2022**. Relatório Síntese/Ano Base 2021. Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados->

abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-631/BEN\_S%C3%ADntese\_2022\_PT.pdf. Acesso em: 06 abr. 2023.

FADIGAS, Eliane A. Faria Amaral. **Energia Eólica**. 1. Ed. São Paulo: Editora Manole, 2011.

FIGUEIREDO, Ana Clara Valente Salgueiro. **Avaliação de viabilidade de aplicação de aerogerador de pequeno porte em uma pousada em Arraial do Cabo**. 2019. 68 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Escola Politécnica, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: <http://repositorio.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10028417.pdf>. Acesso em: 02 mar. 2023.

FONSECA, Bianca Siqueira da; RAMALHO, Hellen Franco. **Estudo de caso: análise da viabilidade da implantação de um micro aerogerador no campus Ecoville da UTFPR**. Curitiba. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

FONSECA, Yonata Daltro. BRUNI, Adriano Leal. 2003. **Técnicas de avaliação de investimentos: uma breve revisão da literatura**. Artigo de Periódico. Universidade Federal da Bahia. Repositório Institucional da UFBA. 2003. Disponível em: <https://repositorio.ufba.br/handle/ri/25449>. Acesso: Acesso em 16 fev. 2022.

IEC International Electrotechnical Commission. 2008. IEC 61400-1: **Wind Turbines – Part 1: Design Requirements**, 3ª Edição, 2005-08

KÖPPEN, W. Das geographische System der Klimate. In: KÖPPEN, W., GEIGER, R. **Handbuch der Klimatologie**. Berlin: Gebrüder Borntraeger, p.1-44, 1936.

KRÜGER, Eduardo Alexandre. **Análise de Viabilidade técnica de Turbinas de Vento Canalizado na Geração de Energia Eólica**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, 2016.

LOPEZ, Ricardo Aldabó., 2012. **Energia Eólica**. Artliber Editora Ltda. São Paulo – SP.

MACAÉ. Macaé viabiliza transição energética nacional. 2023. **Município de Macaé**, Rio de Janeiro, 30 jun. 2023, 11:38. Disponível em: <https://www.macaerj.gov.br/noticias/leitura/noticia/macaer-viabiliza-transicao-energetica-nacional>. Acesso em: 8 ago. 2023.

MANHÃES, Alfredo Luiz Pessanha. **Análise do Espaço Geográfico do Município de Macaé – RJ com o apoio da Cartografia Temática**. 2020. Disponível em: <https://macaerj.gov.br/midia/conteudo/arquivos/1574386599.pdf>. Acesso em 19 fev. 2023.

MELO, Marcelo Silva de Matos. **Energia Eólica: Aspectos técnicos e econômicos**. 2012. 154p. Dissertação de Mestrado (Planejamento Estratégico) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <http://www.ppe.ufrj.br/index.php/en/publicacoes/dissertacoes/2012/555-energia-eolica-aspectos-tecnicos-e-economicos>. Acesso em 16 dez. 2021.

MORTENSEN, N. G.; L. LANDBERG, I. T.; PETERSEN, E. L. **Wind Atlas Analysis and Application Program (WasP)**. User's Guide, Ris National Laboratory. Roskilde, 1993.

OLABI, A.G.; ONUMAEGBU, C.; WILBERFORCE, Tabbi; RAMADAN, Mohamad; ABDELKAREEM, Mohammad Ali; AL – ALAMI, Abdul Hai. Critical review of energy storage systems. **Energy**. Volume 214, 2021, 118987, ISSN 0360-5442, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118987>.

PEREIRA, Donisete da Silva; MOTTA JÚNIOR, Paulo Jacy Venturini da; SANTOS, Paulo Guilherme Terra dos; FORTES, Isabele de Brito; SANTOS, Hans Schmidt; SOARES, Ariane Raposo Nogueira; SOARES, Rogério Manhaes; FREITAS, Felipe Barbosa Venâncio de. Análise sazonal dos ventos de superfície do estado do Rio de Janeiro com base em dados do período 2007-2015. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v.8, n.8, p. 58366-58386, aug., 2022

PINHEIRO NETO, Daywes; DOMINGUES, Elder Geraldo; CALIXTO, Wesley Pacheco; ALVES, Aylton José. Methodology of Investment Risk Analysis for Wind Power Plants in the Brazilian Free Market. **Electric Power Components and Systems**, v. 46, n. 3, p. 316–330, 2018.

PINTO, Lucia Iracema Chipponelli Pinto; COSTA, Marcos Heil; LIMA, Francisca Zenaide de; DINIZ, Luciana Mara Freitas; SEDIYAMA, Gilberto C.; PRUSKI, Fernando Falco. Comparação de Produtos de Precipitação para a América do sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.24, n.4, 461 - 472, 2009.

PORTELLA, Larissa Mercadante Góes; SOUZA, Tâmilis Ferreira de; SANTOS, Eliane Barbosa. 2021. **Análise da precipitação e do número de dias de chuva para o município de Macaé-RJ**. Simpósio em Clima, Água, Energia e Alimentos - SIMCLEA. Disponível em: <https://proceedings.science/simclea-2021/trabalhos/analise-da-precipitacao-e-do-numero-de-dias-de-chuva-para-o-municipio-de-macaee-r>. Acesso em: 19 fev. 2023.

RIBEIRO, Luiza. **Um Estudo Sobre Energia Eólica No Brasil**. 2017. 71 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal de Ouro Preto, Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas. Departamento de Engenharia Elétrica, Minas Gerais, 2017. Disponível em: [https://www.monografias.ufop.br/bitstream/35400000/356/1/MONOGRAFIA\\_EstudoEnergiaE%C3%B3lica.pdf](https://www.monografias.ufop.br/bitstream/35400000/356/1/MONOGRAFIA_EstudoEnergiaE%C3%B3lica.pdf). Acesso em: 07 mar. 2022.

SAMANEZ, Carlos Patrício Mercado. **Matemática Financeira: Aplicações à Análise de Investimentos**. 3 ed. São Paulo: Prentice Hall, 2002.

SAMANEZ, Carlos Patrício Mercado. **Gestão de Investimentos e Geração de Valor**. São Paulo: Pearson, 2007.

SAMPAIO FILHO, Antonio Carlos Souza. **Taxa interna de retorno modificada: proposta de implementação automatizada para cálculo em projetos não-periódicos, não necessariamente convencionais**. 2008. Dissertação (Mestrado em Administração) – Programa de Pós-Graduação e Pesquisa em Administração e Economia. Faculdades Ibmecc, Rio de Janeiro, 2008. Disponível em: [http://s3.amazonaws.com/public-cdn.ibmec.br/portallibmec-content/public/arquivos/df/dis\\_2008\\_10\\_-\\_antonio\\_carlos\\_de\\_souza\\_sampaio\\_filho.pdf](http://s3.amazonaws.com/public-cdn.ibmec.br/portallibmec-content/public/arquivos/df/dis_2008_10_-_antonio_carlos_de_souza_sampaio_filho.pdf). Acesso em: 07 mar. 2022.

SANTOS, Barbara Pravatto. **Análise Preliminar de Viabilidade de uma Turbina Eólica Offshore no Brasil**. 2020. 46 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Escola Politécnica, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020. Disponível em: <http://repositorio.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10032071.pdf>. Acesso em: 07 mar. 2022.

SIEFERT, Cesar Augusto Crovador, Dombrowski NETTO, Nicolas Dombrowski, MARANGON, Fernando Helmuth Syring, SCHULTZ, Gilson Bauer, SILVA, Luan Marcus dos Reis, FONTENELLE, Thiago Henriques, SANTOS, Irani dos. Avaliação de Séries de Velocidade do Vento de Produtos de Reanálises Climáticas para o Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 36, n. Rev. bras. meteorol., 2021 36(4), out. 2021.

STÜKER, Eduardo; SCHUSTER, Jean Jonathan; SANTOS, Daniel Caetano; MEDEIROS, Luis Eduardo; COSTA, Felipe Denardin; DEMARCO, Giuliano; PUHALES, Francisco Scremin. Comparação entre os Dados de Vento das Reanálises Meteorológicas ERA-Interim e CFSR com os Dados das Estações Automáticas do INMET no Rio Grande do Sul. **Revista Ciência e Natura**, v.38, Ed. Especial- IX Workshop Brasileiro de Micrometeorologia, p. 284– 290, 2016. Disponível em: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=467547689046>. Acesso em: 07 mar. 2022.

TEIXEIRA, Wesley F.; CAMELO, Henrique do N. Análise da Densidade de Potência Eólica em Regiões de Serra e Litoral do Estado do Ceará. **Revista Ciência e Natura**, Santa Maria EISSN: 2179- 460X, Edição Esp. Dez. 2013, p. 459 – 462, 2013.

TROEN, I.; E. L. PETERSEN. **European Wind Atlas**. Ris National Laboratory. Roskilde, Denmark, 1989.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABEEÓLICA. Associação Brasileira de Energia Eólica e Novas Tecnologias. **INFOVENTO 28**. São Paulo, 2022. Disponível em: <https://abeeolica.org.br/energia-eolica/dados-abeeolica/?slug=infovento&ano=2022&mes=11>. Acesso em: 02 mar. 2023.

BORBA, Rafael Corrêa; OLIVEIRA, Vinicius de Moura; SILVA NETO, Romeu. 2007. **A influência do petróleo na dinâmica econômica das cidades: um estudo comparativo entre Macaé (Brasil) e Aberdeen (Reino Unido)**. II Jornada Nacional da Produção Científica em Educação Profissional e Tecnológica. São Luís/MA. 2007. Disponível em: <https://royaltiesdopetroleo.ucam-campos.br/wp-content/uploads/2017/05/A-influ%C3%Aancia-do-petr%C3%B3leo-na-din%C3%A2mica-econ%C3%B4mica-das-cidades-um-estudo-comparativo-entre-Maca%C3%A9-Brasil-e-Aberdeen-Reino-Unido.pdf>. Acesso em: 19 fev. 2023.

JONAS, Hans. 1903-1993. **O princípio responsabilidade: ensaio de uma ética para a civilização tecnológica** / Tradução: Marijane Lisboa, Luiz Barros Montez - Rio de Janeiro: Contraponto: Ed. PUC-Rio, 2006.

OLIVEIRA, Gesner; CURI, Andréa Zaitune; FELINI, Patrícia Silva; FICARELLI, Thomas R A. **Impactos socioeconômicos e ambientais da geração de energia eólica no Brasil**. São Paulo, 2020. Disponível em: [https://epbr.com.br/wp-content/uploads/2021/02/ABEEolica\\_GO-Associados-V.-Final.pdf](https://epbr.com.br/wp-content/uploads/2021/02/ABEEolica_GO-Associados-V.-Final.pdf). Acesso em: 02 mar. 2023.

## APÊNDICE A – CATÁLOGO COMERCIAL DA TURBINA EÓLICA VERNE 555 DA ENERSUD ENERGIA LIMPA



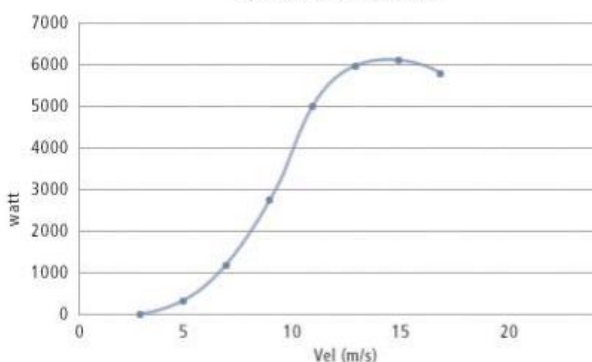
A turbina eólica VERNE 555 foi desenvolvida para atender às necessidades de energia que superam o consumo individual. Dependendo da velocidade do vento a turbina VERNE 555 pode gerar até 6 kw e é ideal para alimentar pequenos conjuntos residenciais, suprir de energia localidades isoladas como ilhas e atender a demandas industriais ou rurais.

O VERNE 555 pode ser aplicado em sistemas isolados (uso de baterias) e conectados à rede por meio de inversores de potência.

### CARACTERÍSTICAS VERNE 555

Diâmetro da hélice	5,55 m
Potência a 12 m/s	6000 Watt
Rotação a 12 m/s	240 rpm
Número de pás	3
Tipo de pás	Torcida (10 aerofólios)
Velocidade de partida	2,2 m/s
Torque de partida	0,3 Nm
Controle de velocidade	Stall
Proteção contra altas velocidades	Active Stall (Controle de Passo)
Sistema magnético	Neodímio
Sistema elétrico	Trifásico
Tensão de saída	120 / 240 / 400 volts
Topologia	Fluxo Axial (com estator encapsulado em resina epóxi)
Peso total (alternador+pás+ cab.Rot.)	198 Kg
Material Anti Corrosão	Alumínio / Inox / Mat.Galvanizado
Balaceamento	Estático (confirmação após pintura)

Curva de Potência VERNE 555 operando em baterias



### PRODUÇÃO DE ENERGIA VERNE 555 (kw.h/mês)

Altura / Velocidade	5 m/s	5,5 m/s	6 m/s	6,5 m/s	7 m/s	8 m/s	9 m/s	10 m/s	11 m/s	12 m/s
50 m	661	840	1025	1208	1383	1686	1908	2047	2114	2122
25 m	505	654	816	983	1150	1464	1725	1918	2044	2108
18 m	442	577	726	886	1043	1353	1625	1838	1989	2080
15 m	409	537	679	830	985	1292	1566	1789	1952	2057
12 m	372	491	624	767	916	1217	1493	1726	1903	2024

A tabela acima se refere a uma estimativa de energia gerada, em diferentes alturas de torres, considerando um ajuste dos dados de vento medidos a 50 metros de altura e fornecidos pelo mapa eólico Brasileiro.

[http://www.cresesb.cepel.br/atlas\\_eolico/index.php](http://www.cresesb.cepel.br/atlas_eolico/index.php)

### DIFERENCIAIS ENERSUD

- Produtos fabricados com tecnologia 100% nacional.
- Turbinas com melhor relação peso / potência do mercado.
- Patentes deferidas e outras submetidas.
- Garantia de Fábrica e assistência técnica.
- Produtos simples e robustos de fácil instalação.
- Empresa há 12 anos no mercado.
- Índice de nacionalização superior a 90% permitindo uso de cartão BNDES e FINAME.



**ENERSUD**  
energia limpa

Rua das Pitangueiras, Q10, L31  
Inoã, Maricá, RJ - CEP 24.942-970  
enersud@enersud.com.br Tel: 021 37100896