

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

PEDRO HENRIQUE BUSSULAR SANT'ANA

ESTUDO SOBRE O ATLAS EÓLICO DO ESPÍRITO SANTO

VITÓRIA – ES

2023

PEDRO HENRIQUE BUSSULAR SANT'ANA

ESTUDO SOBRE O ATLAS EÓLICO DO ESPÍRITO SANTO

Pesquisa apresentada como parte do programa PET, pelo aluno em nome do grupo PET Engenharia Mecânica UFES com o intuito de cumprir com o planejamento anual.

VITÓRIA – ES

2023

RESUMO

Estudo realizado com o intuito de observar as diversas informações apresentadas no Atlas Eólico do Espírito Santo, com o objetivo de analisar a viabilidade da construção de um parque eólico em uma determinada região, observando desde dados de potência gerada pelas turbinas a fatores ambientais, analisando também as regiões onde já existem licitações para a construção de parques eólicos.

ABSTRACT

Study conducted with the purpose of observing the various information presented in the Wind Atlas of Espírito Santo, aiming to analyze the feasibility of building a wind farm in a specific region, considering data such as power generated by the turbines and environmental factors. It also analyzes regions where there are already bids for the construction of wind farms.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Velocidade sazonal do vento (100m) anual.....	6
Figura 2- Média mensal (poligonais).....	6
Figura 3 - Regiões em Guarapari	8
Figura 4 - Média mensal (Guarapari).....	8
Figura 5 - Poligonais (Ampliação, sul do Espírito Santo).....	10
Figura 6 - Linhas de transmissão e subestações.....	11
Figura 7 - Exemplo de parque eólico Offshore	12
Figura 8 - Hipsometria do Espírito Santo	13
Figura 9 - Batimetria do Espírito Santo	14
Figura 10 - Locais ideais para instalações fixas ou flutuantes	15
Figura 11 - UC e APCB do Espírito Santo	18
Figura 12 - Ocorrência de aves no Espírito Santo	19
Figura 13 - UC e APCB com foco em Guarapari	22
Figura 14 - Áreas especiais com foco em Guarapari.....	22
Figura 15 - Ocorrência de aves com foco em Guarapari	23
Figura 16 - Áreas urbanas com foco em Guarapari.....	23
Figura 17 - Rodovias MAPBIOMAS com foco em Guarapari.....	24
Figura 18 - Componentes básicos de uma turbina	29
Figura 19 - Sistema Grid-Tie.....	30
Figura 20 - Sistema Off-Grid.....	31
Figura 21 - Região de Anchieta	33
Figura 22 - Divisa com Minas Gerais no noroeste do Espírito Santo.....	33
Figura 23 - Divisa entre Santa Leopoldina e Viana.....	34
Figura 24 - Divisa entre São Roque do Canaã e Santa Teresa.....	34
Figura 25 - Região de Governador Lindenberg	35
Figura 26 - Guarapari, parte de Vila Velha e Alfredo Chaves	35
Figura 27 - Região de Marataízes	36
Figura 28 - Região montanhosa do Espírito Santo (sudoeste)	36
Figura 29 - Região sul de Alegre	37
Figura 30 - Legenda velocidade dos ventos	37
Figura 31 - Gráfico V x P na região Offshore.....	39

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Número de turbinas e geração de energia	10
Tabela 2 - Potência gerada por 96 turbinas.....	27
Tabela 3 - Potência gerada por 144 turbinas.....	27
Tabela 4 - Potência média anual por região	38

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	4
2	RECURSO EÓLICO	5
2.1	Estações do ano	5
2.2	Offshore	5
2.3	Onshore	7
3	INFRAESTRUTURA DE ENERGIA	9
3.1	Futuros parques eólicos	9
3.2	Linhas de transmissão e subestações	11
3.3	Exemplo de instalação Offshore	12
4	ASPECTOS FISIAGRÁFICOS	13
4.1	Hipsometria	13
4.2	Batimetria	14
5	IMPACTO SOCIOAMBIENTAL	16
5.1	Offshore	16
5.2	Guarapari	20
6	GERAÇÃO DE ENERGIA	25
6.1	A Lei de Betz	25
6.2	Geração de energia	26
6.3	Turbinas de eixo horizontal	28
6.4	Turbinas de eixo vertical	28
6.5	Componentes básicos de uma turbina	29
6.6	Sistemas Grid-Tie e Off-Grid	30
6.6.1	Grid-tie	30
6.6.2	Off-grid	31
7	CONCLUSÃO	32
7.1	Onshore	32
7.2	Offshore	38
	REFERÊNCIAS	40

1 INTRODUÇÃO

Pesquisa desenvolvida entre os projetos de extensão Eólica e o PET de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), com o objetivo de analisar o atlas eólico do Espírito Santo publicado na segunda metade do ano de 2022 e apontar locais ideais para a instalação de turbinas eólicas no estado.

Sendo missão desta pesquisa observar desde fatores de potencial eólico a fatores ambientais para garantir a melhor região, sem causar danos à natureza, tendo como objetivo final poder afirmar as melhores localizações para a implantação de turbinas eólicas.

Os pontos de maior importância a serem observados para a escolha do local de implantação de uma turbina eólica são: impactos ambientais e na qualidade de vida da população, potencial eólico da região, a infraestrutura elétrica e a potência gerada pelas turbinas naquela localização e aspectos fisiológicos.

2 RECURSO EÓLICO

2.1 Estações do ano

Observamos que de maneira geral, tanto nas áreas onshore quanto offshore, que durante o período de verão (dezembro, janeiro e fevereiro) e primavera (setembro, outubro e novembro) as velocidades do vento são maiores, existindo também uma maior variação entre as velocidades onshore e offshore nesses períodos, já no inverno (junho, julho e agosto) e outono (março, abril e maio) as velocidades são inferiores porém a diferença entre as velocidades onshore e offshore são menores, sendo o outono o período com menor variância.

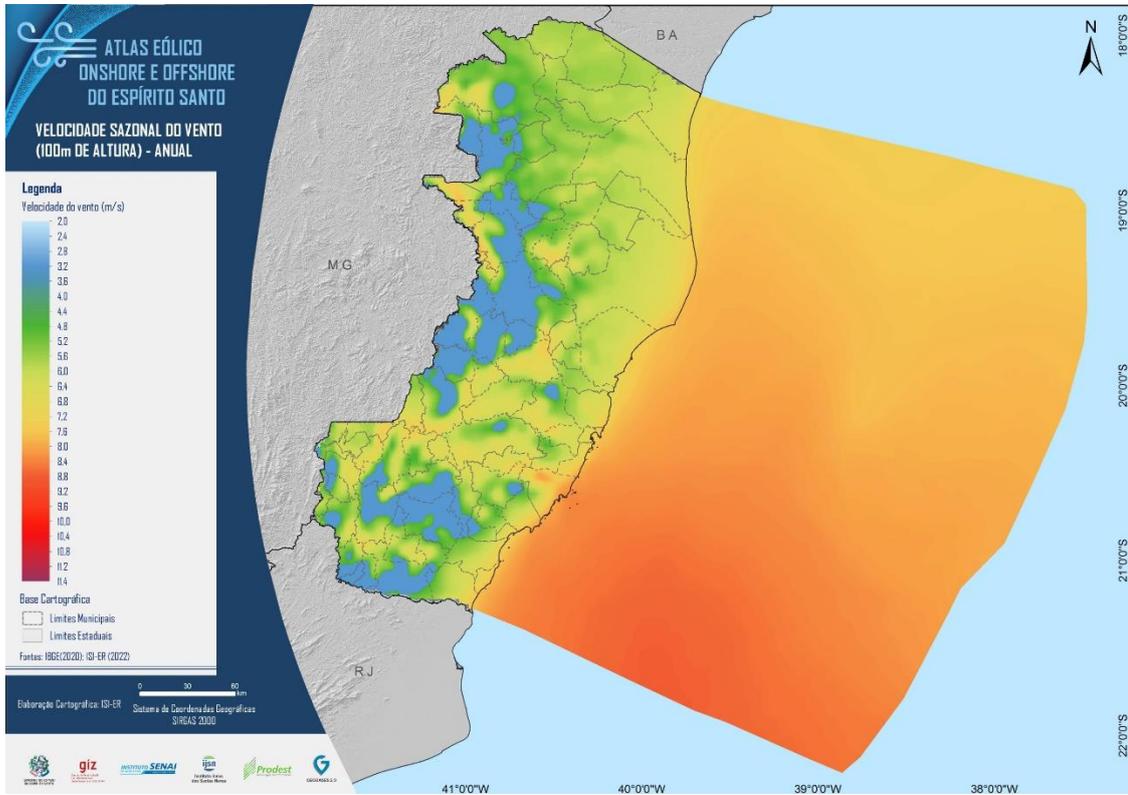
2.2 Offshore

Analisando os mapas de velocidade dos ventos na Figura 1 pudemos observar que as áreas offshore apresentam geração de energia vastamente superior as áreas no continente, foi possível observar também que a parte sul da costa do estado, indo de parte de Vila Velha até a divisa com o estado do Rio de Janeiro apresenta ventos com maior velocidade que as parte mais ao norte, tendo média de 10m/s na região sul e 7m/s na região norte, as duas médias a 100m de altura.

É importante ressaltar que parques offshore apresentam vantagens e desvantagens em relação aos parques onshore, tendo como benefícios: maior velocidade dos ventos e menor impacto visual e acústico. Porém a construção de parques offshore apresenta um desafio técnico e de engenharia, tanto em sua instalação quanto em seu funcionamento e manutenção.

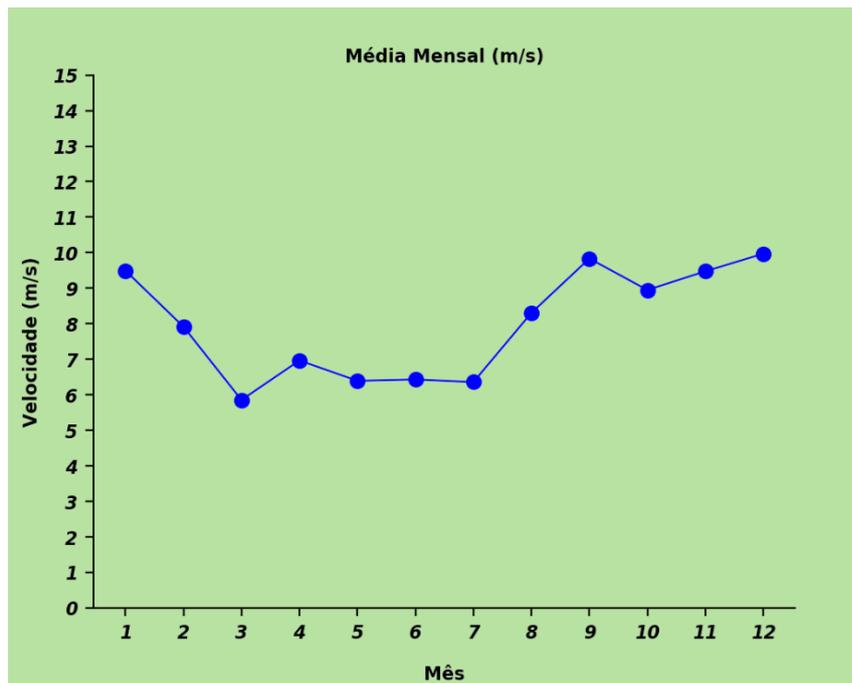
Atualmente existem quatro planos de parques eólicos offshore com solicitação de licença ambiental junto ao IBAMA na região litoral do Espírito Santo, sendo elas Votu Winds, Vitória Offshore, Quesnelia e Projeto Ubu, mais sobre elas adiante, mas pudemos observar na Figura 2 o gráfico da média da velocidade dos ventos mensal no local de instalação dos parques eólicos desses empreendimentos.

Figura 1 - Velocidade sazonal do vento (100m) anual



Fonte: Atlas Eólico do Espírito Santo (2022)

Figura 2- Média mensal (poligonais)



Fonte: Atlas Eólico do Espírito Santo (2022)

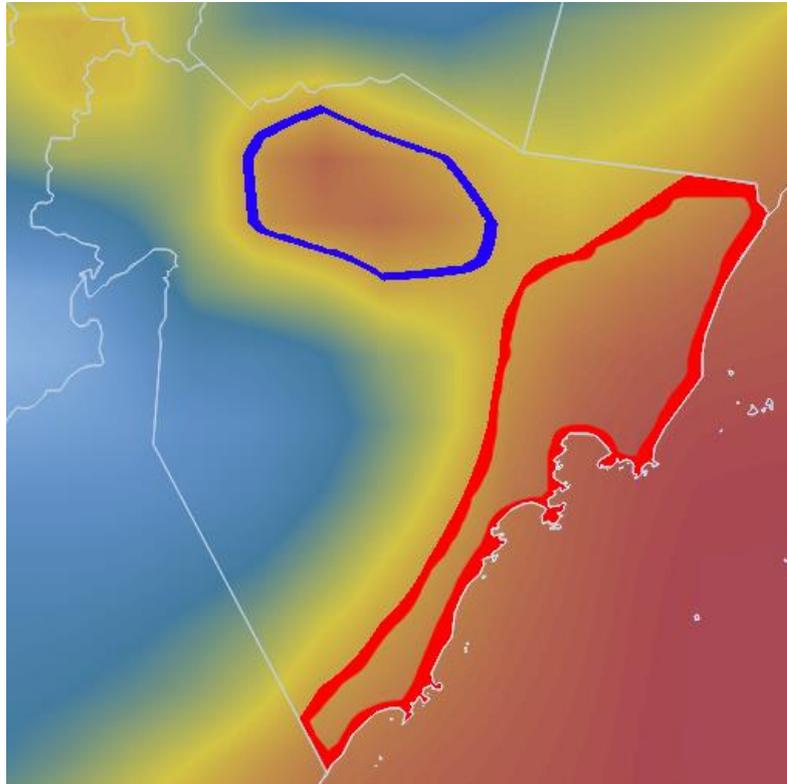
2.3 Onshore

Observando as velocidades dos ventos onshore comparados com as velocidades offshore observamos uma grande redução, também percebe-se que as regiões litorâneas na maioria das vezes apresentam ventos com velocidades maiores que regiões mais continentais, contudo ainda sim existem lugares com índices grandes de recurso eólico.

Um destaque é a cidade de Guarapari onde pode se perceber que existem duas áreas principais, apresentadas na Figura 3, uma costeira e mais próxima de centros urbanos e uma mais no interior do território.

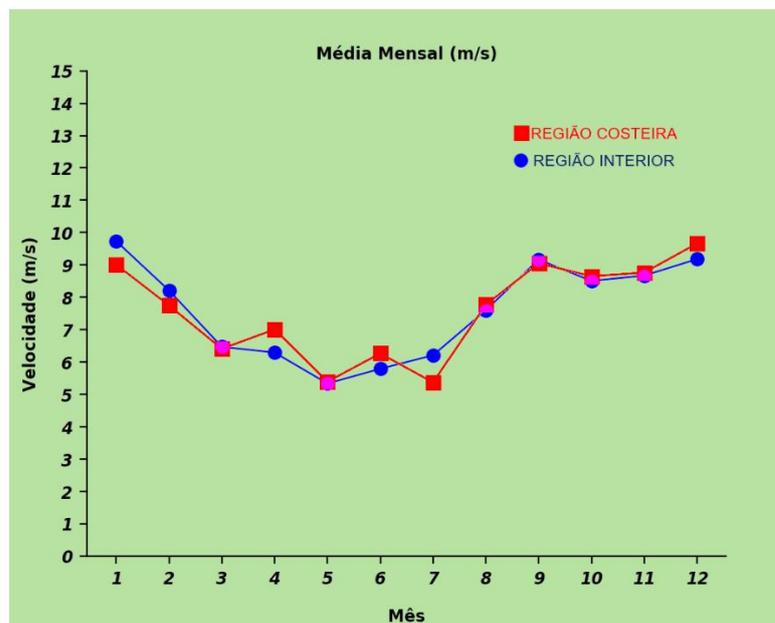
Visualizando o gráfico de média mensal da velocidade dessas regiões, Figura 4 pudemos observar que os valores se apresentam de maneira bem similar, tendo maior velocidade de vento nos períodos de setembro a janeiro e uma velocidade menor de fevereiro a agosto.

Figura 3 - Regiões em Guarapari



Fontes: Atlas Eólico do Espírito Santo (2022)

Figura 4 - Média mensal (Guarapari)



Fonte: Atlas Eólico do Espírito Santo (2022)

3 INFRAESTRUTURA DE ENERGIA

3.1 Futuros parques eólicos

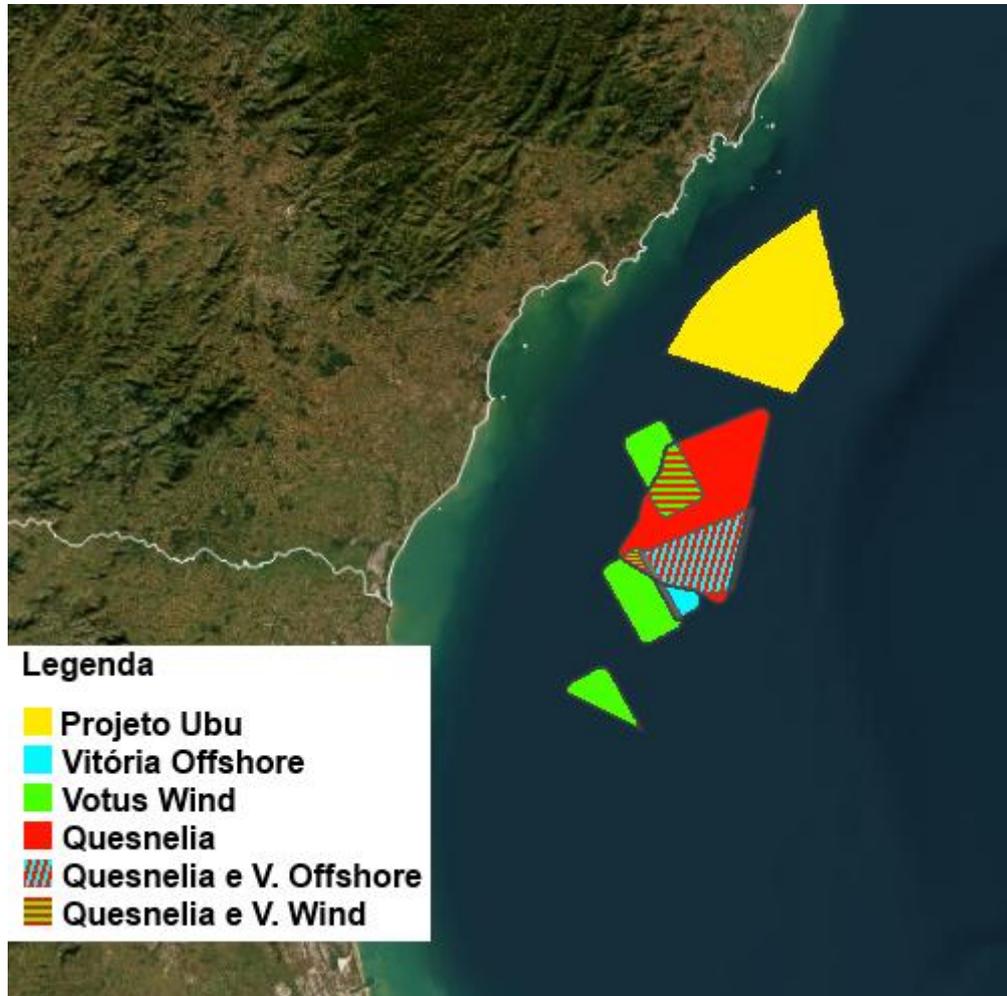
As poligonais da Votus Winds, Quesnelia, Vitória Offshore e Projeto Ubu podem ser vistos na Figura 5, sendo a Votus Winds e a Quesnelia já com seus modelos de aerogeradores definidos.

A Votus Winds vem com o modelo de aerogerador SG 10.0-193 DD-193 DD desenvolvido pela empresa Siemens Gamesa, que apresenta turbina com faixa de 10 MW, que apresenta uma área de varredura de 29.300 m², capaz de operar em ventos de velocidade variável.

Já Quesnelia, projeto da empresa BlueFloat Energy, planeja utilizar o aerogerador WEC 265 20 MW, esse que é atualmente é apenas um modelo conceitual, não sendo produzido em escalas comerciais no momento, ele é desenvolvido pela Wind Power Limited sendo desenvolvido para funcionar gerando 20 MW de potência, dados sobre sua área de varredura não foram encontrados.

Os empreendimentos Vitória Offshore das empresas Corio Generation Limited e Servtec Energia e o Projeto Ubu da Shell New Energies não possuem modelos específicos de turbina disponíveis ao público, contudo a geração máxima de cada turbina deve ser em torno de 14 MW para o Projeto Ubu e 15 MW para Vitória Offshore, esse número sendo encontrado pela divisão da capacidade pelo número de turbinas, podendo existir inconsistências que alteram os valores reais. Observamos na Tabela 1 o número de turbinas da poligonal e a estimada capacidade de geração de potência de cada empreendimento.

Figura 5 - Poligonais (Ampliação, sul do Espírito Santo)



Fonte: Atlas Eólico do Espírito Santo (2022)

Tabela 1 - Número de turbinas e geração de energia

Responsável	Nº de turbinas	Capacidade
Votus Wind	96 - 144	960 MW - 1440 MW
Quesnelia	62	1240 MW
Vitória Offshore	33	495 MW
Projeto Ubu	180	2520 MW

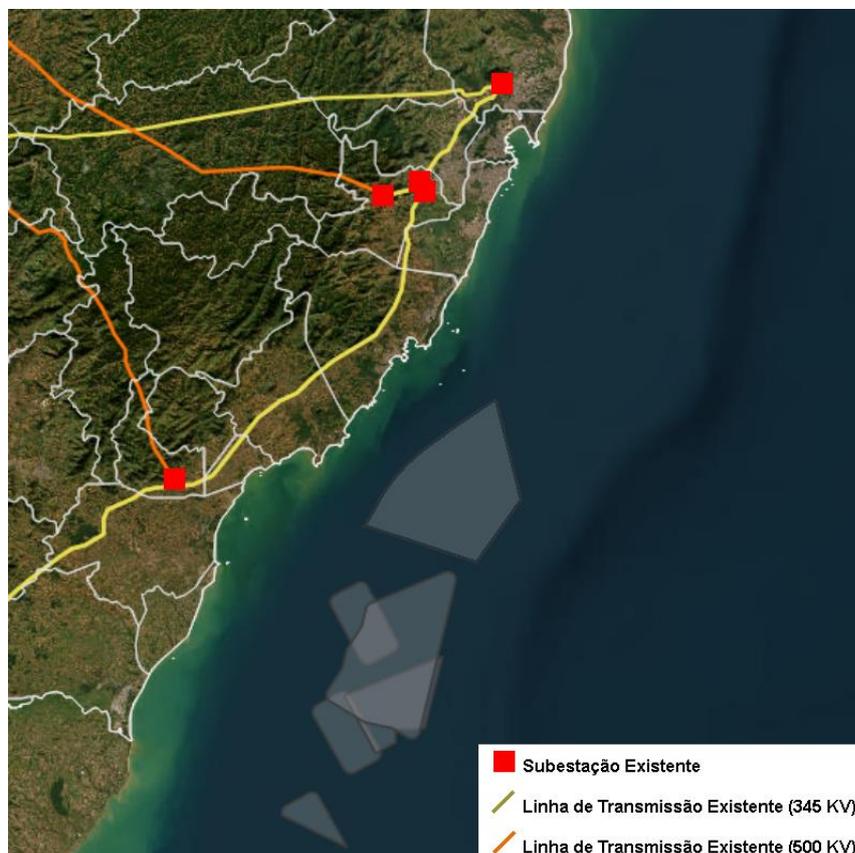
Fonte: 4C OFFSHORE (2023)

3.2 Linhas de transmissão e subestações

Observando a Figura 6, conseguimos visualizar a existência de uma subestação próxima aos locais dos possíveis parques eólicos, sendo essa a possível subestação onshore, contudo pode existir a necessidade da construção de uma subestação marítima com o objetivo de aumentar a tensão evitando assim perdas elétricas. Os futuros parques eólicos apresentam distância média da costa de 36 km e a subestação mais próxima se encontra a 15 km da costa para o interior do continente.

Existem algumas linhas de transmissão e subestações em planejamento no estado, porém elas não apresentam grandes avanços para os parques offshore, sendo a estação localizada próximo a João Neiva – ES e as novas linhas de transmissão sendo construídas mais para o interior do continente.

Figura 6 - Linhas de transmissão e subestações



Fontes: Atlas Eólico do Espírito Santo (2022)

3.3 Exemplo de instalação Offshore

Na Figura 7 podemos observar um exemplo de instalação Offshore desenvolvido pelo Grupo Iberdrola, que hoje é referência mundial no setor de energias renováveis.

Figura 7 - Exemplo de parque eólico Offshore



4 ASPECTOS FISIAGRÁFICOS

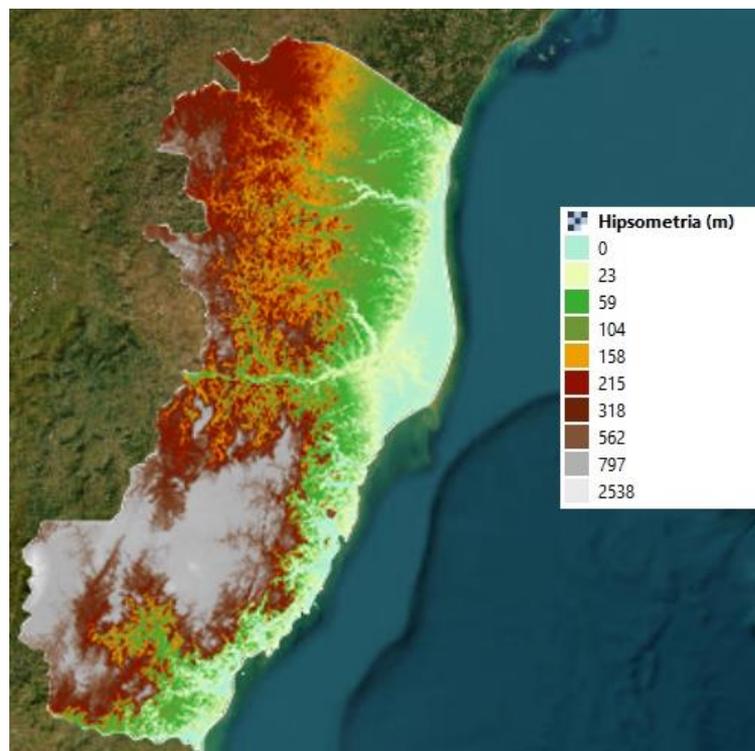
4.1 Hipsometria

A hipsometria é uma técnica muito conhecida na Geografia e Topografia, baseada na representação gráfica de altitudes por meio de cores. Ou seja, os mapas hipsométricos são representações gráficas da elevação de uma determinada área por meio de cores. Na Figura 8 podemos visualizar a hipsometria do estado do Espírito Santo.

Ao comparar a Figura 7 com a média anual da velocidade dos ventos (200m) pudemos observar que existe uma maior velocidade em alguns pontos das áreas com maior altitude, porém esse valor não é muito elevado ou constante por toda a área.

Sendo importante citar que as montanhas servem como uma barreira natural contra o vento, diminuindo assim as velocidades dos ventos ao seu redor e nos vales entre elas.

Figura 8 - Hipsometria do Espírito Santo



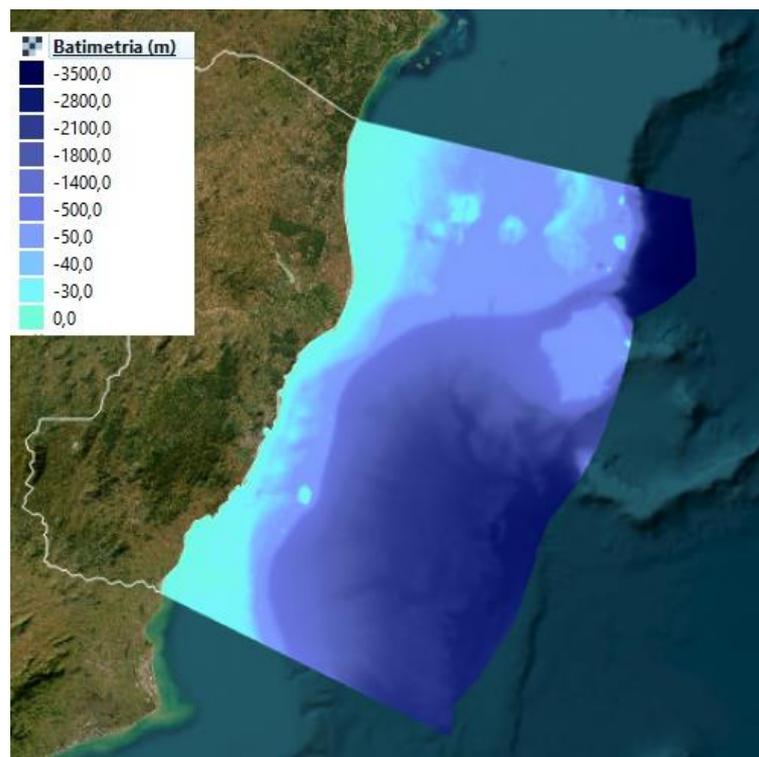
Fonte: Atlas Eólico do Espírito Santo (2022)

4.2 Batimetria

A batimetria ou mapeamento batimétrico é a mensuração da profundidade das massas de água (lagos, rios, canais, reservatórios, etc.) para determinação da topografia do seu leito. Através deste estudo é possível analisar a morfologia de relevos submarinos, ajudando a traçar o perfil topográfico de determinada região. Na Figura 9 pudemos observar a batimetria da zona costeira do estado do Espírito Santo.

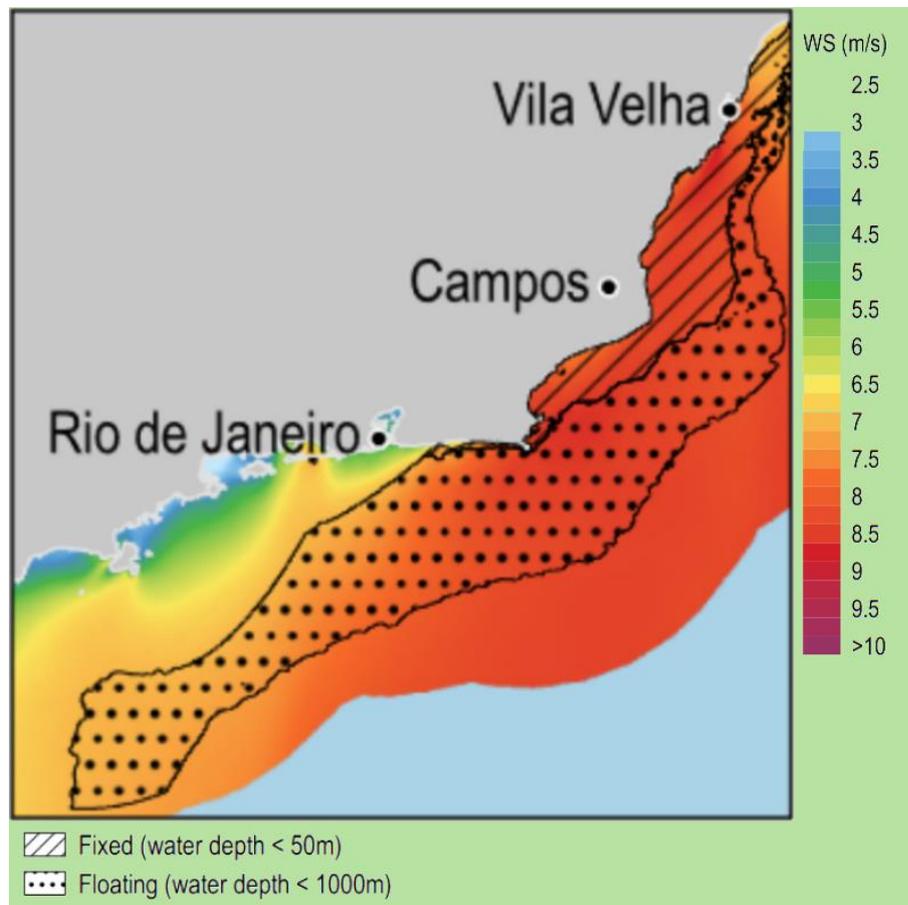
Parques offshore fixos são ideais para profundidades de até 50m, já parques flutuantes vão de 50m a 1000m de profundidade, na Figura 10 pudemos observar as áreas ideais onde possíveis instalações fixas e flutuantes podem ser desenvolvidas.

Figura 9 - Batimetria do Espírito Santo



Fonte: Atlas Eólico do Espírito Santo (2022)

Figura 10 - Locais ideais para instalações fixas ou flutuantes



Fonte: World Bank Group, ESMAP (2020)

5 IMPACTO SOCIOAMBIENTAL

De acordo com o AMBIENTE-CONAMA (1986):

Considera-se impacto ambiental qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matérias ou energia resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente, afetam a saúde, a segurança e 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.

Com isso em mente se vê necessário averiguar quão impactante a instalação da turbina seria na qualidade de vida da população, flora e fauna de cada região.

5.1 Offshore

Observando a Figura 11 sobre unidades de conservação (UC) e áreas prioritárias para conservação da biodiversidade (APCB) no estado pudemos observar que os próprios investimentos futuros se encontram em área demarcadas como prioritárias para conservação da biodiversidade da zona costeira e marinha em nível extremamente alto.

As Áreas Prioritárias para a Conservação, Utilização Sustentável e Repartição dos Benefícios da Biodiversidade são um instrumento de política pública que visa à tomada de decisão, de forma objetiva e participativa, sobre planejamento e implementação de medidas adequadas à conservação, à recuperação e ao uso sustentável de ecossistemas.

A definição de áreas prioritárias se baseia na metodologia de Planejamento Sistemático da Conservação (PSC). Nesse processo, é feita, de forma simultânea, a coleta e o processamento de informações espaciais sobre a ocorrência de espécies e

ecossistemas, custos e oportunidades para a conservação. É um processo contínuo de busca de subsídios e validação de resultados, que resulta na construção do mapa das áreas e definição de ações prioritárias para conservação da biodiversidade em todos os grandes biomas e na Zona Costeira e Marinha, além de um banco de dados com informações sobre as áreas.

Além disso, a Figura 12, ocorrência de aves, mostra que boa parte da costa apresenta ocorrência de aves ameaçadas.

Com isso existem passos que devem ser realizados antes da implantação do parque eólico nesta área. É importante realizar uma avaliação ambiental completa da área, analisando os impactos potenciais da construção no ambiente.

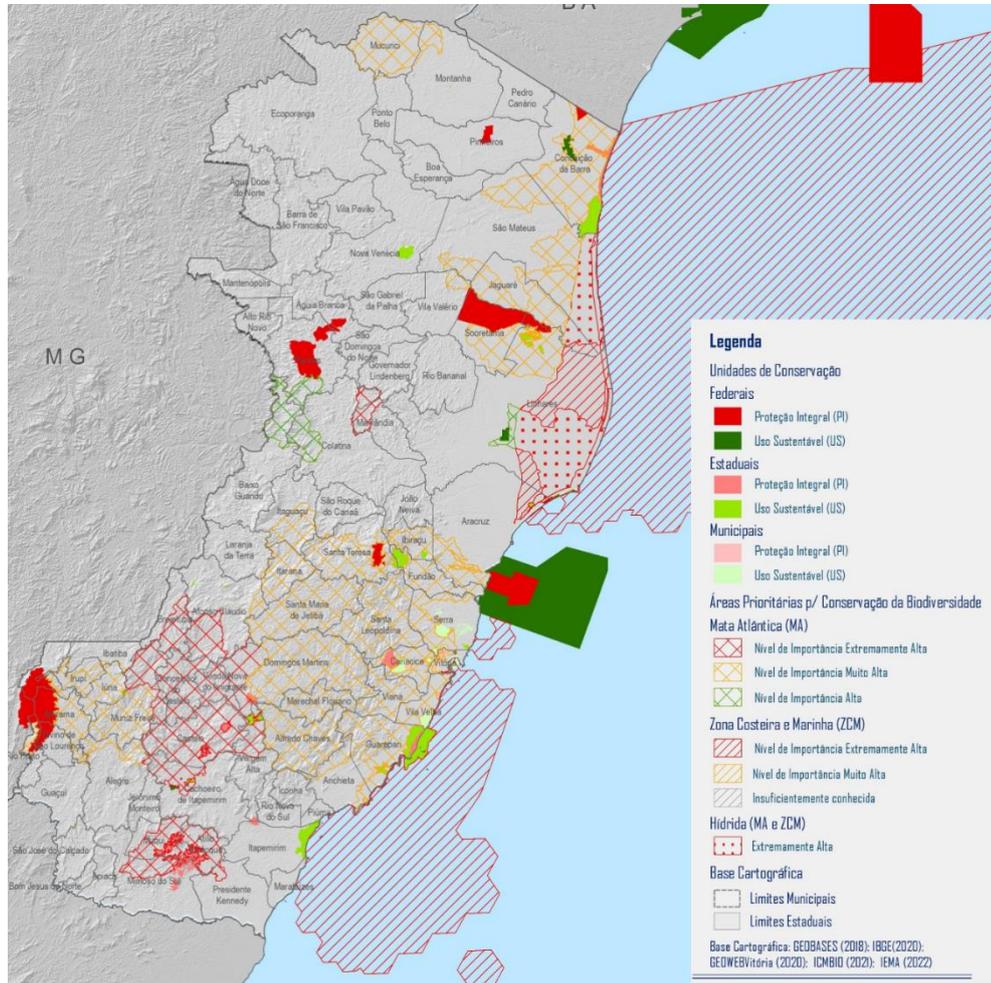
A verificação de regulamentações especiais também é necessária, sendo essencial cumprir as leis e regulamentos locais para garantir a proteção adequada da biodiversidade.

É recomendado evitar áreas sensíveis, como recifes de coral, estuários, manguezais e zonas de desova de animais marinhos. Facilitando assim uma mitigação dos impactos, sendo também importante considerar tecnologias que diminuam os danos causados durante a construção.

O tratamento de efluentes também é de suma importância para evitar a poluição dos ecossistemas marinhos.

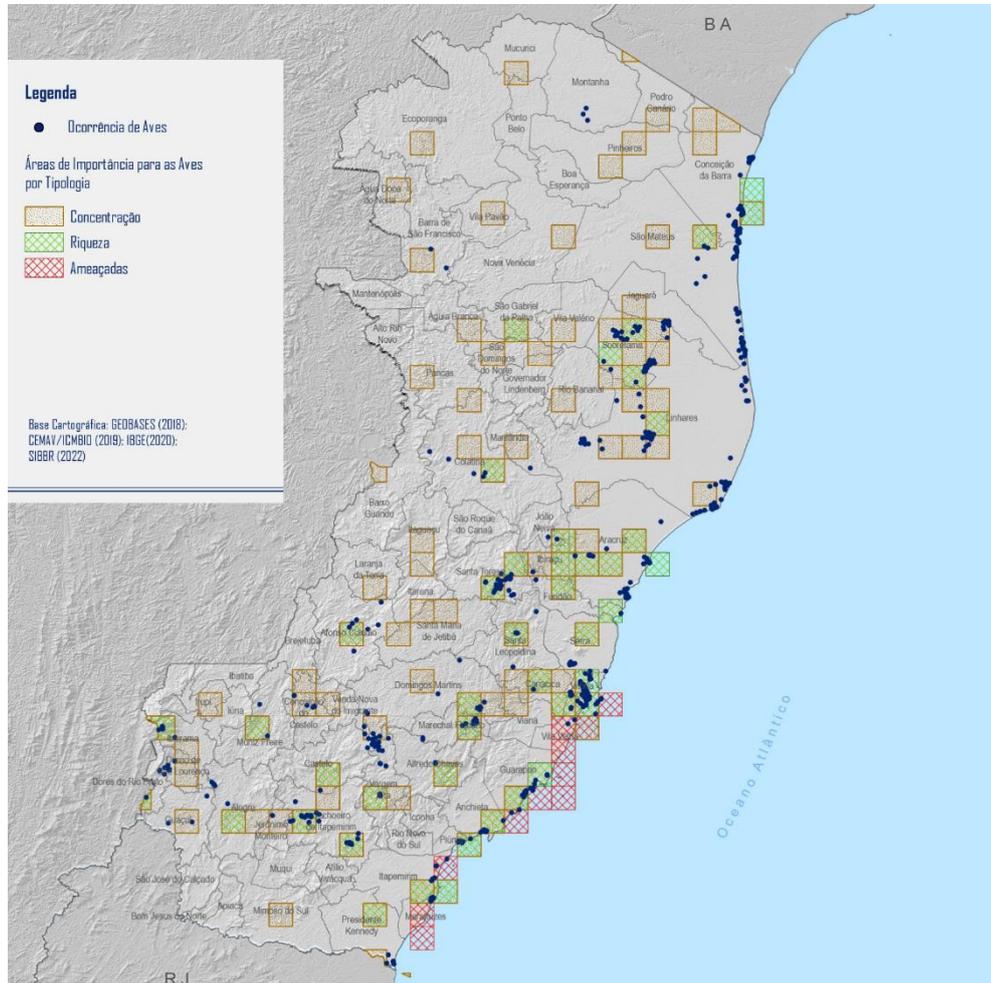
Especialistas devem ser contratados com intuito de realizar todos esses passos e garantir que o investimento esteja de acordo com as normas estabelecidas para o determinado local.

Figura 11 - UC e APCB do Espírito Santo



Fonte: Atlas Eólico do Espírito Santo (2022)

Figura 12 - Ocorrência de aves no Espírito Santo



Fonte: Atlas Eólico do Espírito Santo (2022)

5.2 Guarapari

Para a região costeira pudemos observar na Figura 13, ampliação da Figura 11 com foco em Guarapari, unidades de conservação tanto de uso sustentável quanto de proteção integral o que limita as áreas de implantação da tupina tendo em mente que em geral, a construção em unidades de conservação de uso sustentável é permitida, desde que sejam cumpridas as regulamentações e restrições específicas da unidade de conservação em questão. As construções devem ser planejadas e realizadas de forma a minimizar os impactos sobre o ambiente, como a redução da área natural protegida, a fragmentação de habitats, a poluição do solo, água e ar, entre outros.

Já em áreas de proteção integral é proibida, de acordo com a Lei do Sistema Nacional de Unidades de Conservação (SNUC) no Brasil. As unidades de conservação de proteção integral têm como principal objetivo a preservação da biodiversidade e dos ecossistemas naturais, sem permitir o uso direto dos recursos naturais pelos seres humanos. Essas áreas são consideradas de alta sensibilidade ambiental e são protegidas por lei para evitar qualquer tipo de atividade que possa prejudicar a biodiversidade e os processos ecológicos essenciais para a manutenção do equilíbrio ambiental. Isso inclui a proibição de construções, estradas, mineração, exploração de recursos naturais, entre outras atividades humanas.

Observamos também que quase todo o território de Guarapari se encontra com a classificação de área prioritárias para conservação da biodiversidade (Mata Atlântica) com nível de importância muito alta, nessas áreas a construção é regulamentada por leis e normas ambientais específicas, que visam garantir a preservação dos ecossistemas e da biodiversidade. É importante ressaltar que cada caso deve ser avaliado individualmente, levando em conta as particularidades da área e os impactos potenciais sobre a biodiversidade, para que sejam adotadas medidas adequadas de gestão e conservação ambiental.

Observamos também na Figura 14 a existência de sítios arqueológicos na região costeira, o que acarreta em áreas onde a implantação não é permitida, pois esses locais possuem grande importância histórica e cultural, além de serem

protegidos pela legislação brasileira. De acordo com a Lei Federal nº 3.924/1961, os bens arqueológicos são considerados como patrimônio histórico e cultural da nação e, portanto, devem ser preservados.

Analisando a Figura 15, ampliação da Figura 12 sobre ocorrência de aves com foco em Guarapari, observamos que a área costeira também apresenta áreas de concentração, riqueza e ameaçadas, tanto quanto a ocorrência de aves. A implantação de turbinas eólicas em áreas de ocorrência de aves pode ser permitida, desde que sejam tomadas medidas de mitigação dos impactos ambientais. As turbinas eólicas são conhecidas por causar riscos às aves, especialmente as de grande porte, que podem colidir com as pás das turbinas em movimento. No entanto, com o uso de técnicas de avaliação de impacto ambiental e a adoção de medidas mitigadoras, é possível minimizar esses riscos.

A Figura 16 apresenta as grandes áreas urbanas da região. A implantação de turbinas eólicas próximas a áreas urbanas apresenta alguns empecilhos, como a restrições de altura, já que podem existir regulamentações locais que restrinjam a altura máxima das edificações, o que pode limitar a possibilidade de instalar as turbinas em determinadas áreas.

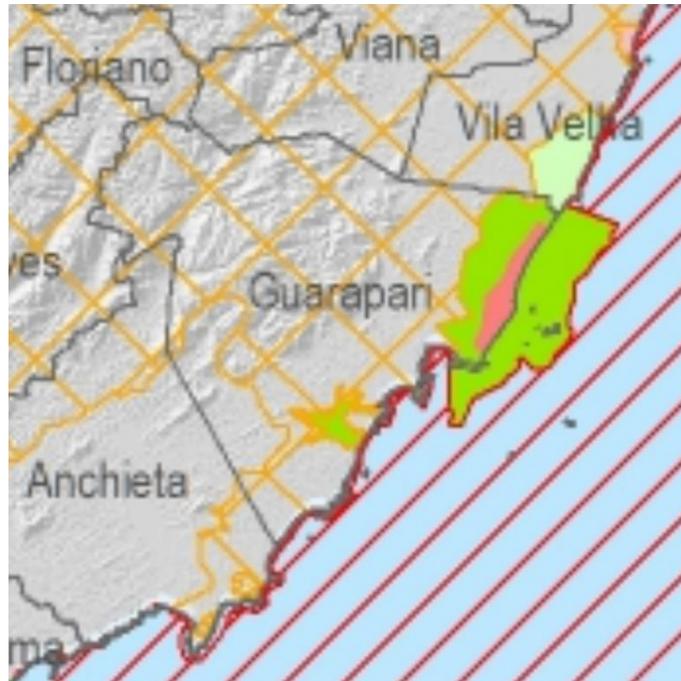
As turbinas eólicas também podem ter um impacto visual significativo, o que pode ser uma preocupação em áreas urbanas. Algumas cidades podem ter regulamentações que restringem a aparência das edificações ou equipamentos instalados, o que pode dificultar a instalação das turbinas.

A poluição sonora é outra questão, pois turbinas eólicas podem gerar ruído, especialmente se instaladas em áreas densamente povoadas.

A segurança é um ponto importante, pois as turbinas eólicas podem representar riscos se não forem instaladas corretamente. É importante que os equipamentos sejam instalados de acordo com as normas técnicas e de segurança aplicáveis.

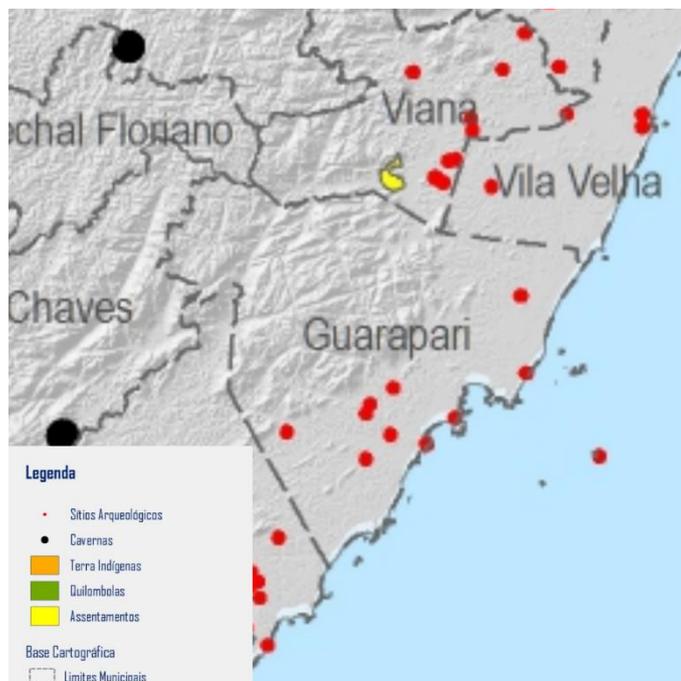
Por fim, a Figura 17 nos mostra a existência de estradas em algumas partes das regiões selecionadas, o que é de grande importância tanto para facilitar a implantação quanto para realização de manutenções periódicas.

Figura 13 - UC e APCB com foco em Guarapari



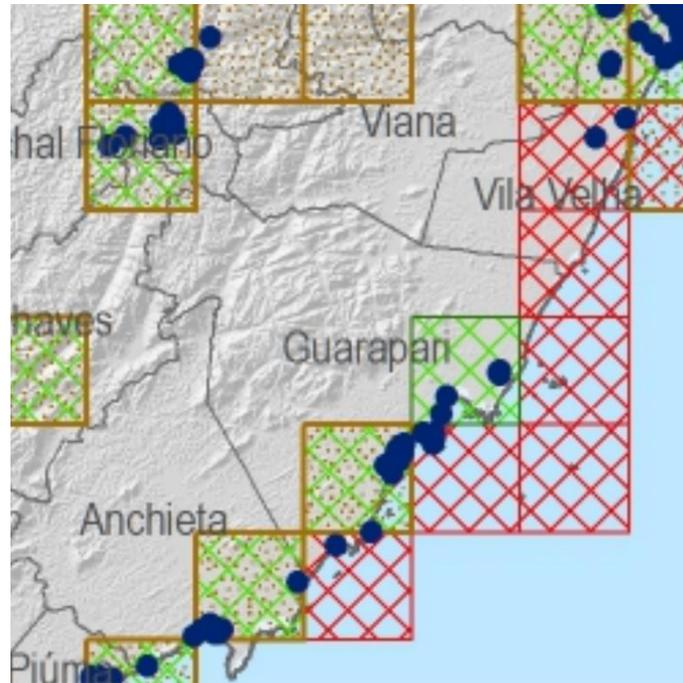
Fonte: Atlas Eólico do Espírito Santo (2022)

Figura 14 - Áreas especiais com foco em Guarapari



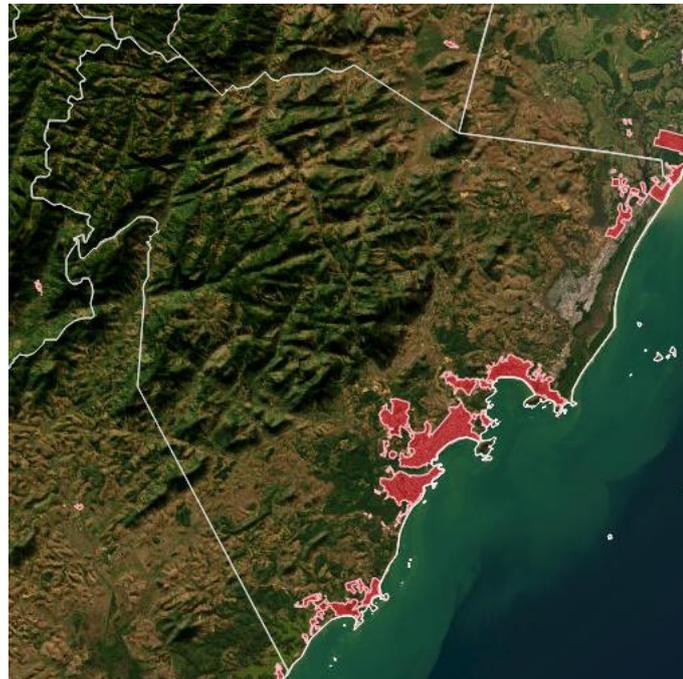
Fonte: Atlas Eólico do Espírito Santo (2022)

Figura 15 - Ocorrência de aves com foco em Guarapari



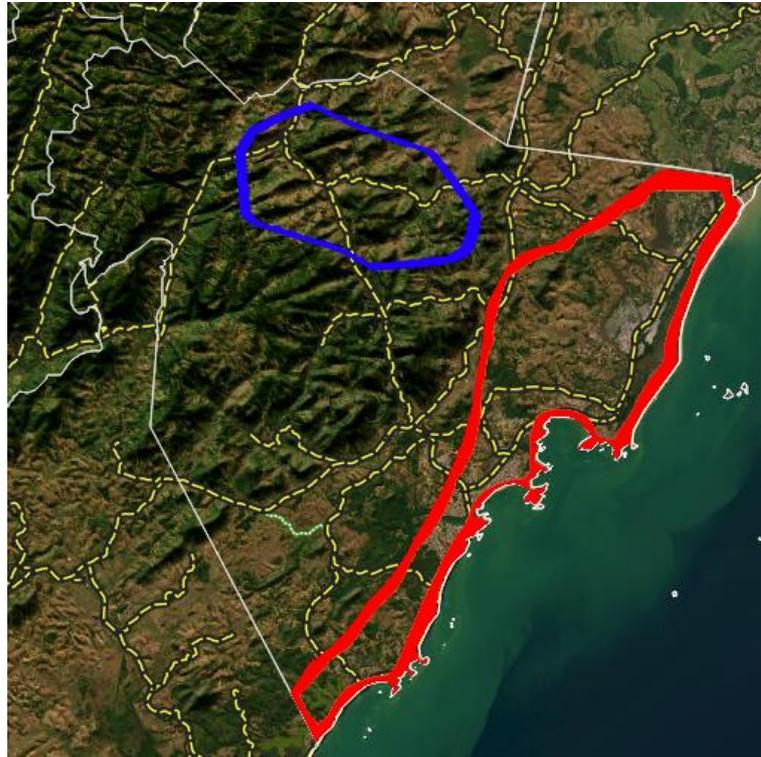
Fonte: Atlas Eólico do Espírito Santo (2022)

Figura 16 - Áreas urbanas com foco em Guarapari



Fonte: Atlas Eólico do Espírito Santo (2022)

Figura 17 - Rodovias MAPBIOMAS com foco em Guarapari



Fonte: Atlas Eólico do Espírito Santo (2022)

6 GERAÇÃO DE ENERGIA

6.1 A Lei de Betz

Em aerodinâmica a Lei de Betz indica a potência máxima que pode ser extraída do vento, independente do projeto de uma turbina. Foi publicado em 1919 por Albert Betz, físico alemão. A Lei deriva dos princípios de conservação de massa e momento de um fluxo de ar. De acordo com a Lei de Betz, nenhuma turbina consegue capturar mais de $16/27$ (59,3%) da energia cinética do ar. O fator $16/27$ (0.593) é conhecido como o coeficiente de Betz.

Esse limite existe, pois caso toda energia do vento fosse absorvida pela turbina a velocidade do vento após passar pela turbina seria zero, caso isso ocorresse não seria possível a entrada de novo vento na turbina, já que o vento em velocidade zero bloqueia a passagem, por isso em ordem de manter o vento circulando pela turbina é necessário a existência de movimento no vento após atravessar a turbina, logo ele precisa ter velocidade e com isso energia cinética.

Em realidade, as turbinas não conseguem alcançar o limite de Betz, e apresentam mais comumente eficiência de 35% a 50%. Essa porcentagem é usada para o cálculo de geração de energia de turbinas sendo ela o C_p (Coeficiente de performance).

O C_p é influenciado pelo formato do aerofólio, já que um aerofólio bem desenvolvido apresenta uma boa distribuição de pressão sob a superfície do aerofólio que gera sustentação com arrasto mínimo. O ângulo de ataque também apresenta influência sobre o C_p .

6.2 Geração de energia

É possível então calcular e ter uma expectativa da quantidade de energia gerada por uma turbina considerando:

$$P = 0.5 * C_p * \rho * A * V^3$$

Onde ρ é a densidade do ar, A é área de varredura do rotor da turbina, V é a velocidade do ar. Sendo P dado em watts (W).

Utilizando a área de varredura da turbina *SG 10.0-193 DD-193 DD*, sendo essa a turbina a ser utilizada pela *Votu Winds* em seu parque eólico offshore, com $A = 29.300 \text{ m}^2$, tomando $\rho \cong 1,225 \text{ kg/m}^3$, um $C_p = 35\%$ e $V = 8 \text{ m/s}$, temos:

$$P = 0,5 * 0,35 * 1,225 \text{ kg/m}^3 * 29.300 \text{ m}^2 * 6^3 \text{ m/s}$$

$$P \cong 1,36 \text{ MW}$$

Sendo esse valor por turbina em um dos piores casos, com um coeficiente de potência inferior ao esperado por uma turbina de alta qualidade e a menor velocidade dos ventos apresentado na Figura 2.

Quando consideramos um $C_p = 50\%$ e $V = 10\text{m/s}$, temos:

$$P = 0,5 * 0,5 * 1,225 \text{ kg/m}^3 * 29.300 \text{ m}^2 * 10^3 \text{ m/s}$$

$$P \cong 8,97 \text{ MW}$$

Com isso é possível elaborar a Tabela 2, onde serão utilizadas 96 turbinas no parque eólico, e a Tabela 3, com a utilização de 144 turbinas.

Observando esses dados enxergamos como a velocidade do vento apresenta maior alteração no valor da potência, isso ocorre pois a V é elevada ao cubo, enquanto que o C_p é elevado a potência um.

Tabela 2 - Potência gerada por 96 turbinas

Cp e V	Potência
35% e 6 m/s	130,25 MW
50% e 6 m/s	186,07 MW
35% e 10 m/s	602,99 MW
50% e 10 m/s	861,42 MW

Fonte: Autoria própria (2023)

Tabela 3 - Potência gerada por 144 turbinas

Cp e V	Potência
35% e 6 m/s	195,37 MW
50% e 6 m/s	279,10 MW
35% e 10 m/s	904,49 MW
50% e 10 m/s	1292,13 MW

Fonte: Autoria própria (2023)

6.3 Turbinas de eixo horizontal

As turbinas eólicas de eixo horizontal são o tipo mais comum de turbinas eólicas que existem. Elas possuem um rotor com lâminas aerodinâmicas montadas em um eixo horizontal, que gira para captar a energia do vento. Essas turbinas são capazes de girar em torno de seu próprio eixo para apontar em direção ao vento, utilizando um mecanismo de orientação.

As turbinas de eixo horizontal geralmente têm três lâminas, embora possam ter mais em algumas aplicações, e são projetadas para operar em velocidades constantes ou variáveis, dependendo do modelo.

No entanto, elas têm algumas limitações, como a necessidade de um vento constante e relativamente forte para operar de forma eficiente e a necessidade de uma torre alta para suportar o rotor e garantir a segurança das pessoas e dos animais.

6.4 Turbinas de eixo vertical

As turbinas eólicas de eixo vertical têm um design diferente das turbinas de eixo horizontal, com um rotor que gira em torno de um eixo vertical. Em vez de lâminas longas, as turbinas de eixo vertical geralmente possuem um ou mais cilindros ou pás curvas montadas em um rotor vertical. À medida que o vento sopra sobre as pás, elas giram em torno do eixo vertical, movendo um gerador para produzir energia elétrica.

As turbinas eólicas de eixo vertical possuem algumas vantagens em relação às turbinas de eixo horizontal. Elas podem ser mais compactas, ocupando menos espaço em terra, e são capazes de capturar ventos de várias direções sem a necessidade de um mecanismo de orientação. Além disso, elas são mais silenciosas e têm menos impacto visual do que as turbinas de eixo horizontal.

No entanto, as turbinas eólicas de eixo vertical têm algumas limitações. Elas geralmente produzem menos energia do que as turbinas de eixo horizontal pois são menos eficientes em capturar energia do vento. Além disso, as pás de um rotor de

eixo vertical tendem a gerar mais arrasto do que as pás de um rotor de eixo horizontal, o que pode resultar em mais desgaste mecânico e menos durabilidade.

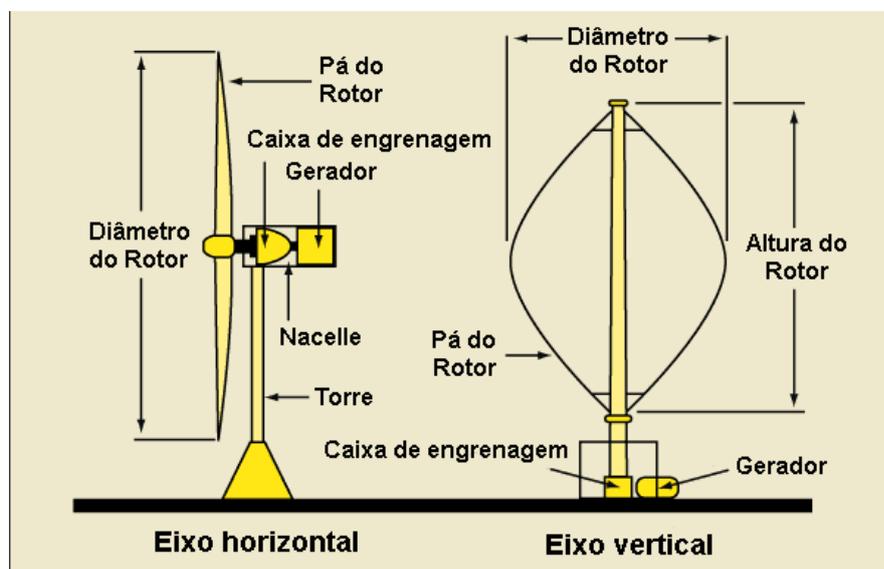
6.5 Componentes básicos de uma turbina

Na Figura 18 observamos os componentes principais de turbinas de eixo horizontal e vertical.

Na turbina de eixo horizontal o seu gerador se localiza, mais comumente, no topo da turbina, o gerador e a caixa de engrenagem se encontram dentro da nacelle, esse componente também encapsula o sistema yaw, esse que é responsável pelo alinhamento das turbinas eólicas à direção do vento e de extrema importância para o desempenho da conversão de energia eólica em elétrica.

A caixa de engrenagem está presente nas duas turbinas, ela tem a função de transformar as rotações que as pás transmitem pelo eixo de baixa velocidade (19 a 30 rpm), de modo a entregar ao gerador por meio de um outro eixo, velocidades de rotação altas (~1.500 rpm). O gerador então converte a energia mecânica em energia elétrica.

Figura 18 - Componentes básicos de uma turbina



Fonte: Urban Wind Engineering, American Wind Energy Association (2010)

6.6 Sistemas Grid-Tie e Off-Grid

6.6.1 Grid-tie

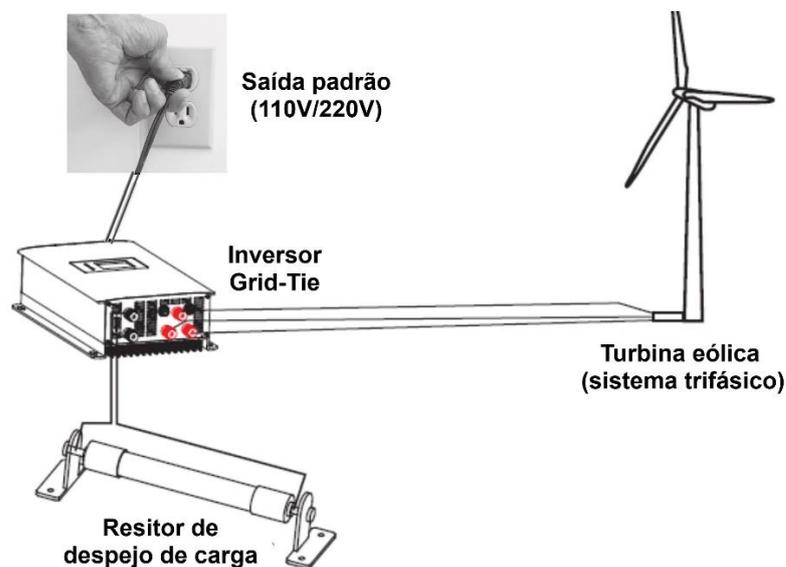
O sistema Grid-Tie são aqueles aos quais as turbinas estão integradas à rede pública, sendo o uso da energia gerada, disponível para toda a população abrangida por essa rede elétrica.

Os sistemas ligados à rede não requerem a existência de baterias e controladores de carga, isso os torna mais eficientes.

Em escala individual e privada esses sistemas podem ser utilizados para abastecer a residência ou, no caso de geração maior que o consumo, injetar a energia na rede elétrica.

Em relação aos componentes no sistema Grid-Tie temos, geradores, resistores, retificadores e inversores. Os inversores são responsáveis por alterar a corrente gerada pela turbina de contínua para alternada, além de sincronizar a corrente do sistema com a da rede pública, os resistores de despejo estão integrados ao sistema com o intuito de proteger os componentes caso energia em excesso seja produzida. Na Figura 19 observamos um exemplo de sistema Grid-Tie.

Figura 19 - Sistema Grid-Tie



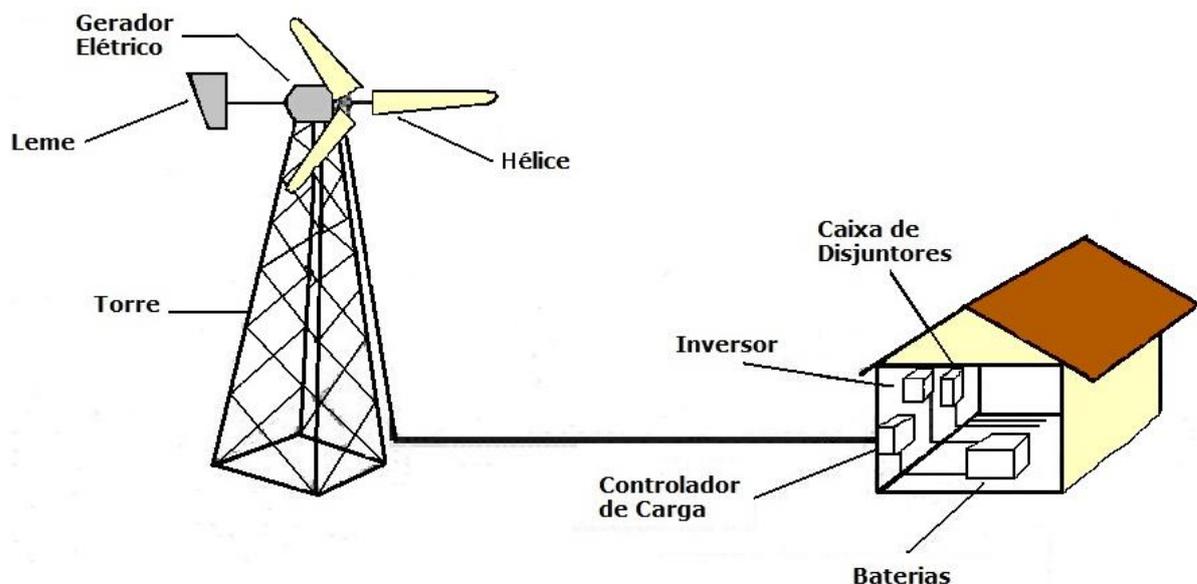
Fonte: Cutting Edge Power (2023)

6.6.2 Off-grid

Os sistemas Off-Grid, também conhecidos como sistemas autônomos ou isolados, são caracterizados por não estarem ligados à rede pública de energia. Eles são construídos com intuito de cumprir uma demanda local e específica. Sendo eles bastante utilizados em locais remotos onde a rede pública não abrange. Temos exemplos do uso desse sistema para energizar bombas, cercas elétricas, postes, estações replicadoras de sinal, residências, entre outros.

Esses sistemas requerem baterias, controladores de carga e inversores. Sendo os controladores de carga responsáveis por aumentar a vida útil da bateria, ao garantir o correto carregamento das mesmas, evitando sobrecargas. As baterias armazenam a energia elétrica para ser utilizada em momentos onde não exista energia sendo gerada. Os inversores têm a função de transformar a tensão da bateria, de por exemplo, 12V corrente contínua em 110V/220V corrente alternada, permitindo assim a utilização dessa energia em aparelhos da residência. Na Figura 20 observamos um exemplo de sistema Off-Grid.

Figura 20 - Sistema Off-Grid



Fonte: Eletrovento (2023)

7 CONCLUSÃO

Em um quadro geral pudemos concluir que as velocidades dos ventos apresentam seus valores maiores na região offshore do estado, tendo alguns picos de velocidade no interior do estado, contudo a existência de um relevo irregular, fatores de conservação ou de infraestrutura acabam por dificultar a construção de parques em solo.

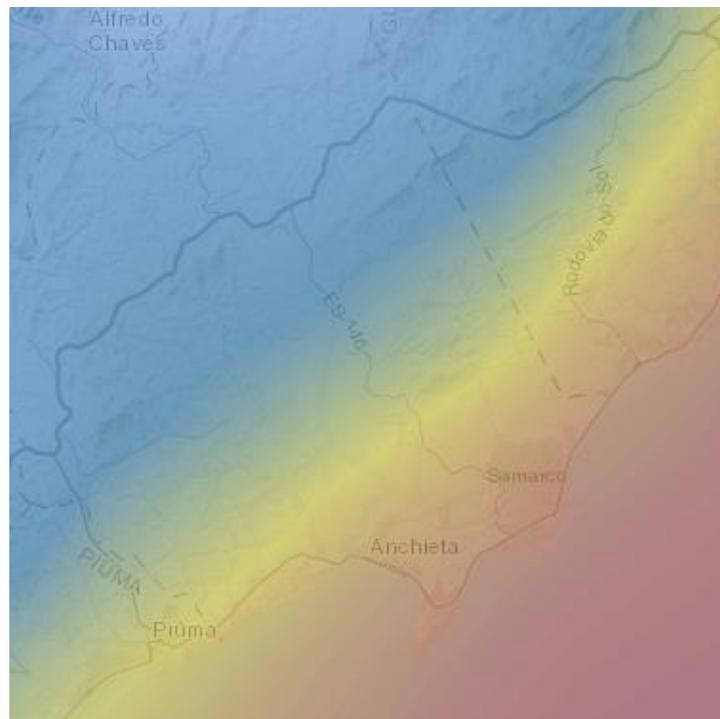
Sendo assim os investimentos offshore sendo os mais viáveis, principalmente mais ao sul do estado, permitindo assim até mesmo uma parceria com o estado do Rio de Janeiro a fim de desenvolver parques de grande escala, gerando uma quantidade abundante de energia.

7.1 Onshore

Contudo considerando a terra firme do estado do Espírito Santo, observamos nas Figuras 21 a 29 melhores áreas em relação à potência que pode ser gerado por uma turbina, tendo em vista a implantação de turbinas em menor escala, até mesmo unitárias, a fim de distribuir energia para regiões onde a rede estadual tem dificuldade de alcançar, nesses locais sistemas Off-Grid seriam os mais ideais, sendo esses sistemas capazes de funcionar desconectados da rede pública.

Considerando uma turbina com $A = 28 \text{ m}^2$, média em turbinas residências, tomando $\rho \cong 1,225 \text{ kg/m}^3$, um $C_p = 35\%$ e V sendo a média anual (100m) de determinada região, legenda na Figura 30, temos a Tabela x que apresenta a região e a potência média anual de uma turbina com as características anteriores. Assim observamos que em terra firme dentro do estado do Espírito Santo a região de Guarapari e proximidades apresenta a maior velocidade dos ventos.

Figura 21 - Região de Anchieta



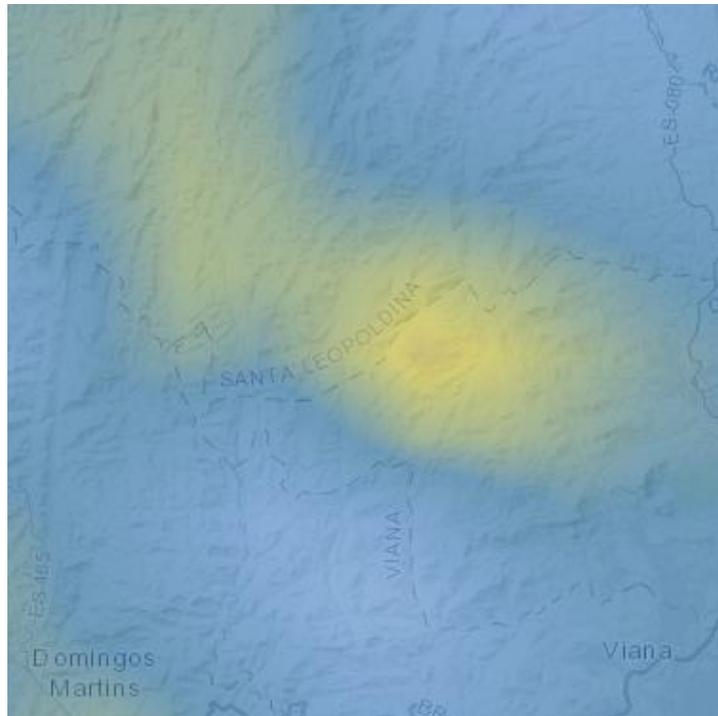
Fonte: Atlas Eólico do Espírito Santo (2023)

Figura 22 - Divisa com Minas Gerais no noroeste do Espírito Santo



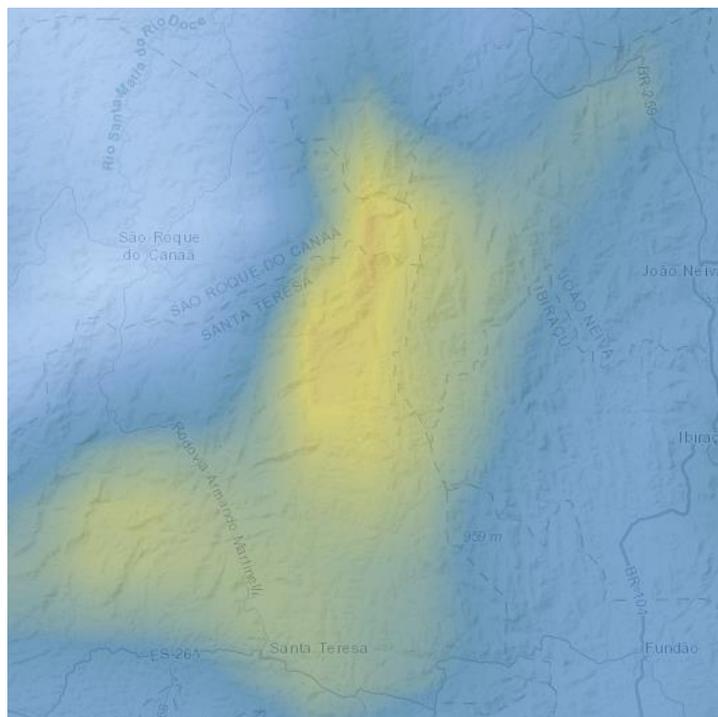
Fonte: Atlas Eólico do Espírito Santo (2023)

Figura 23 - Divisa entre Santa Leopoldina e Viana



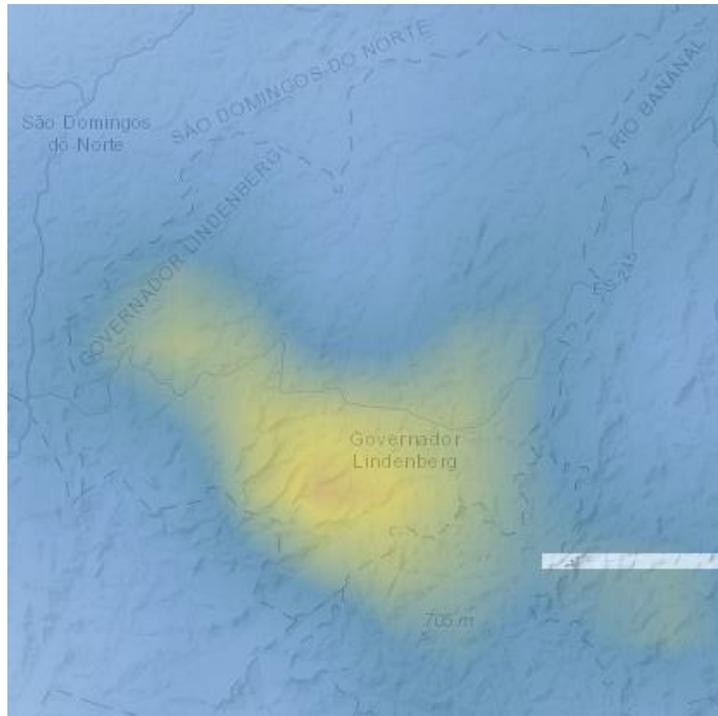
Fonte: Atlas Eólico do Espírito Santo (2023)

Figura 24 - Divisa entre São Roque do Canaã e Santa Teresa



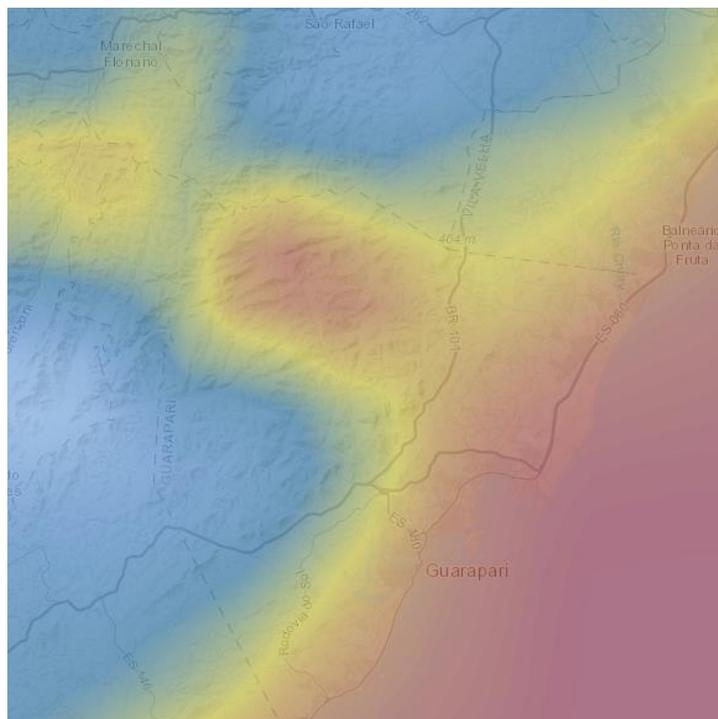
Fonte: Atlas Eólico do Espírito Santo (2023)

Figura 25 - Região de Governador Lindenberg



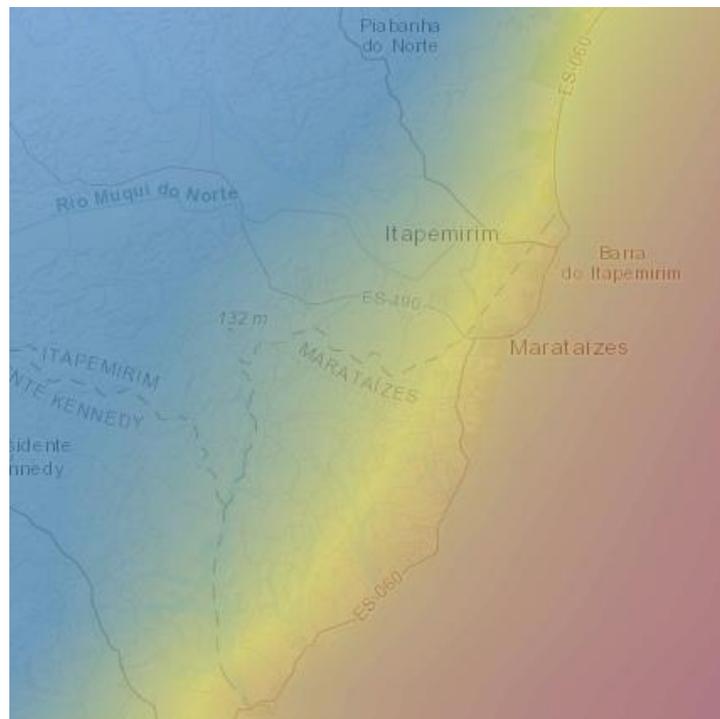
Fonte: Atlas Eólico do Espírito Santo (2023)

Figura 26 - Guarapari, parte de Vila Velha e Alfredo Chaves



Fonte: Atlas Eólico do Espírito Santo (2023)

Figura 27 - Região de Marataízes



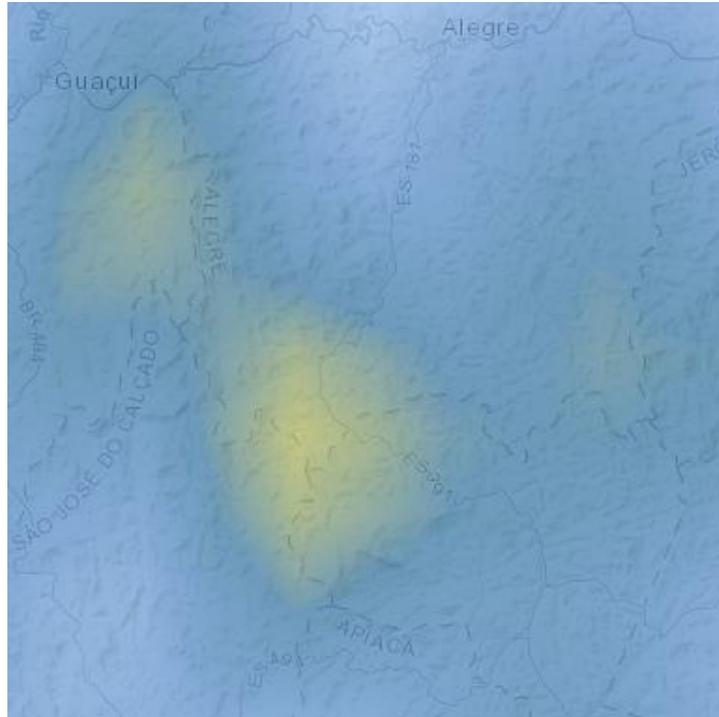
Fonte: Atlas Eólico do Espírito Santo (2023)

Figura 28 - Região montanhosa do Espírito Santo (sudeste)



Fonte: Atlas Eólico do Espírito Santo (2023)

Figura 29 - Região sul de Alegre

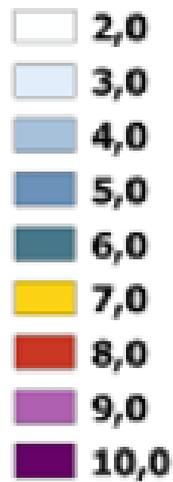


Fonte: Atlas Eólico do Espírito Santo (2023)

Figura 30 - Legenda velocidade dos ventos

Velocidade dos Ventos (100m) Média Anual

Velocidade (m/s)



Fonte: Atlas Eólico do Espírito Santo (2023)

Tabela 4 - Potência média anual por região

Região	Potência
Figura 21	2,21 KW
Figura 22	2,41 KW
Figura 23	2,21 KW
Figura 24	2,13 KW
Figura 25	2,33 KW
Figura 26	2,53 KW
Figura 27	2,21 KW
Figura 28	1,95 KW
Figura 29	1,78 KW

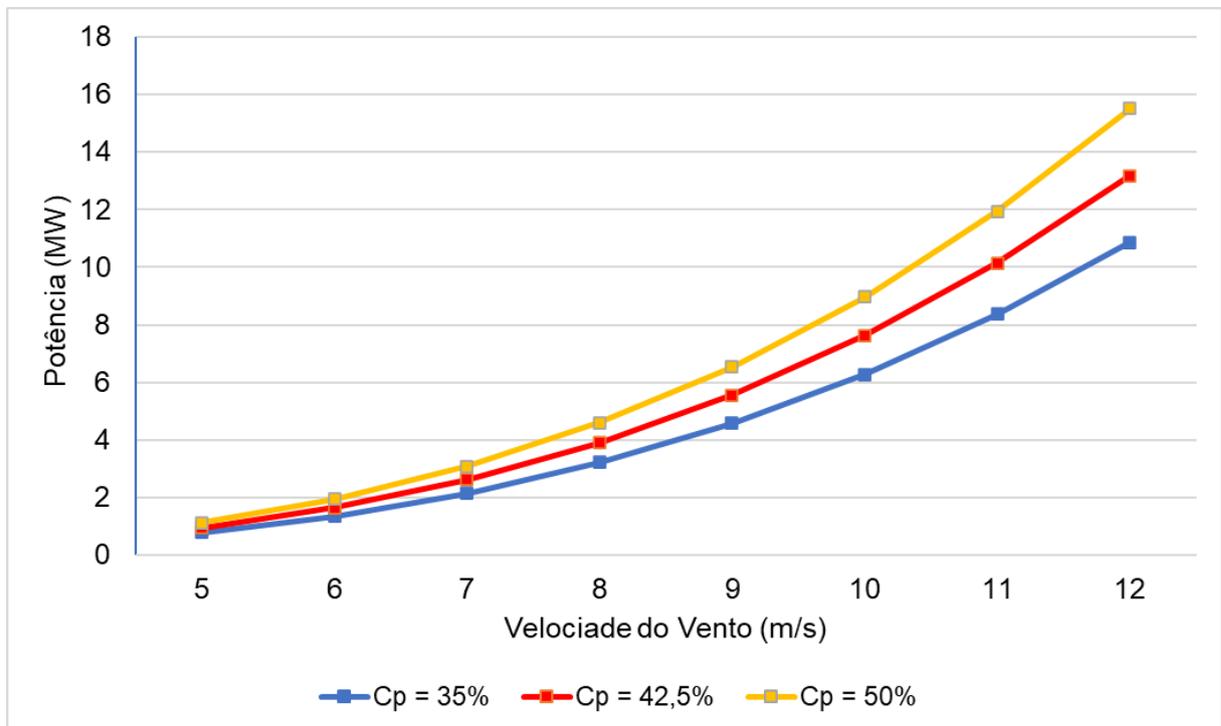
Fonte: Autoria própria (2023)

7.2 Offshore

Se tratando dos locais de instalação offshore pudemos observar que atualmente já existem empresas ocupando as melhores áreas, contudo ainda existe bastante espaço nesses locais e com o desenvolvimento de estruturas para esses processos, a implantação de novos parques será bastante facilitada.

A Figura 31 apresenta um gráfico que utiliza as dimensões da turbina SG 10.0-193 DD-193 DD, utilizada pela Votus Winds, para medir a potência com três diferentes Cp's e na faixa de velocidade dos ventos da região offshore. Mostrando o quão importante é o desenvolvimento de turbinas com Cp alto e também buscar por locais com médias de vento anual altas com valores constantes.

Figura 31 - Gráfico V x P na região Offshore



Fonte: Autoria própria (2023)

REFERÊNCIAS

4C OFFSHORE. **Global Offshore Renewable Map**. Reino Unido, 20--. Disponível em: <https://map.4c offshore.com/offshorewind/index.aspx?lat=-20.880&lon=-40.383&wfid=BR55>. Acesso em: 21 abr. 2023.

CUTTING EDGE POWER. **Grid Tie Inverter for Wind Turbine Generators for 3 Phase AC Turbines to 120V AC Grid Power**. EUA, 20--. Disponível em: <https://cuttingedgepower.com/products/1000w-on-grid-tie-power-inverter-ac-110v-for-3-phase-wind-turbine>. Acesso em: 29 maio 2023.

DONEV, Jason. **Betz limit**. Canada, Universidade de Calgary: Departamento de Física e Astronomia, 20--. Disponível em: https://energyeducation.ca/encyclopedia/Betz_limit. Acesso em: 16 abr. 2023.

ECOSSIS. **Batimetria**. Porto Alegre/Brasil, 20--. Disponível em: <https://ecossis.com/consultoria-ambiental/batimetria/>. Acesso em: 19 maio 2023.

ELETROVENTO ENERGIA ALTERNATIVA. **Sobre Energia Eólica**. São Paulo, Brasil, 20--. Disponível em: <https://www.eletrovento.com.br/site/pagina/saiba-mais/sobre-energia-eolica/47/>. Acesso em: 29 maio 2023.

ENGIE. **Quais materiais são usados para fazer turbinas eólicas?**. Brasil, 21 jul. 2022. Disponível em: <https://www.alemdaenergia.engie.com.br/quais-materiais-sao-usados-para-fazer-turbinas-eolicas/>. Acesso em: 27 maio 2023.

ESMAP. **Offshore Wind Technical Potential: Analysis and Maps**. Washington DC, EUA, 20--. Disponível em: https://www.esmap.org/esmap_offshorewind_techpotential_analysis_maps. Acesso em: 26 maio 2023.

IBERDROLA, S.A. **CONSTRUÇÃO DE UM PARQUE EÓLICO 'OFFSHORE'**: Tudo o que você precisa saber sobre a construção de parques eólicos 'offshore'. Brasil, 2 jun. 2023. Disponível em: <https://www.iberdrola.com/quem-somos/nossa-atividade/energia-eolica-offshore/construcao-parques-eolicos-offshore>. Acesso em: 20 maio 2023.

INSTITUTO SENAI DE INOVAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS - ISI-ER (Natal - RN). **ATLAS EÓLICO ONSHORE E OFFSHORE DO ESPÍRITO SANTO**. NATAL/RN, 2022. 1 atlas. Disponível em: <http://atlas.sectides.es.gov.br/atlas>. Acesso em: 15 abr. 2023.

MAPPA. **Mapa hipsométrico: o que é e como fazer mais rápido?**. Brasil, 22 abr. 2022. Disponível em: <https://mappa.ag/blog/mapa-hipsometrico-o-que-e-como-fazer/>. Acesso em: 19 maio 2023.

NEOENERGIA. **Você sabe como funciona um aerogerador?**. Brasil, 2023. Disponível em: <https://www.neoenergia.com/pt-br/te-interessa/meio-ambiente/Paginas/como-funciona-um-aerogerador.aspx>. Acesso em: 27 maio 2023.

SIEMENS GAMESA RENEWABLE ENERGY, S.A. **Generation V: power for generations**. Vizcaya, Espanha, 20---. Disponível em: <https://www.siemensgamesa.com/en-int/-/media/siemensgamesa/downloads/en/products-and-services/offshore/brochures/siemens-gamesa-offshore-wind-turbine-sg-10-0-193-dd-en-double.pdf>. Acesso em: 16 abr. 2023.

THE WORLD BANK. **Offshore Wind Technical Potential: in Brazil**. 2. ed. Washington DC, EUA, 2020. Disponível em: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/902341586847107376/pdf/Technical-Potential-for-Offshore-Wind-in-Brazil-Map.pdf>. Acesso em: 26 maio 2023.

THUNDER SAID ENERGY. **Windy physics: how is power of a wind turbine calculated?**. 2019-2023. Disponível em: <https://thundersaidenergy.com/downloads/wind-power-impacts-of-larger-turbines/>. Acesso em: 16 abr. 2023.

URBAN WIND ENGINEERING. **Turbine Options: Vertical Axis vs. Horizontal Axis**. Pensilvânia, EUA, 20---. Disponível em: <https://sites.google.com/a/temple.edu/urbanwind/services/turbine-options-and-specifications>. Acesso em: 27 maio 2023.

YANTAI BONWAY MANUFACTURER CO.LTD. **Caixa de engrenagens da transmissão de alta potência da turbina eólica**. China, 20---. Disponível em: <https://pt.sogears.com/Redutores-e-Motoredutores>. Acesso em: 29 maio 2023.

