



Análise técnico-económica de soluções de geração de energia eólica em Cabo Verde – Perspetivas de otimização do sector.

Elber Renato Gomes Leite Moreira

Dissertação apresentada à Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Bragança para obtenção do Grau de Mestre em Energias Renováveis e Eficiência Energética, no âmbito da dupla diplomação com a Universidade da Corunha.

Orientado por:

Prof. Dr. Orlando Manuel de Castro Ferreira Soares

Prof. Dr. Cristian Méndez Sanmartín

Bragança

2024



**Análise técnico-económica de soluções de geração de energia eólica em
Cabo Verde – Perspetivas de otimização do sector.**

Elber Renato Gomes Leite Moreira

Dissertação apresentada à Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Bragança para obtenção do Grau de Mestre em Energias Renováveis e Eficiência Energética, no âmbito da dupla diplomação com a Universidade da Corunha.

Bragança

2024

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me permitir chegar até aqui!

Aos meus pais pelo apoio incondicional de sempre, por serem pessoas simples e honestas, e por sempre acreditarem em mim!

Aos amigos e conhecidos que tive o prazer de conhecer e dividir experiências, frustrações e alegria, que fizeram parte desta caminhada, minha gratidão!

Por fim, agradeço o meu orientador, o IPB, e a oportunidade que tive de participar no Programa de Dupla Diplomação com a Universidade da Coruña (Espanha)!

RESUMO

Com a redução do custo de operação e manutenção, e a otimização da eficiência do processo de conversão das energias renováveis em eletricidade com o passar do tempo, é quase que lógica a intensificação por sua procura, sem falar no seu benefício ao ambiente. Cabo Verde não foge à regra e procura cada vez mais diversificar a sua matriz elétrica, por apresentar uma forte dependência em combustíveis fósseis para produção de eletricidade. Neste sentido, pensou-se no aumento da matriz renovável através da energia eólica offshore. O objetivo geral deste trabalho consiste em analisar a matriz elétrica de Cabo Verde e apontar formas de otimização deste setor. Disto isso, analisou-se o potencial eólico do país, destacando seu potencial offshore, sua viabilidade técnica e financeira. Constatou-se através das simulações que o potencial eólico offshore é bastante parecido ao onshore para alturas diferentes em termos de velocidade de vento, para 50 metros de altura encontrou-se nas ilhas mais ao norte uma média de velocidade de 9 a 10 m/s, sendo as ilhas de São Vicente, Santo Antão e São Nicolau, nas ilhas ao Sul ainda no território offshore se destacam a ilha do Fogo e a ilha da Brava. A análise de viabilidade económica seria um desafio para Cabo Verde mediante a uma obra desta envergadura, com valores encontrados totalizando quase 52 milhões de euros. A viabilidade técnica também apresentaria limitações para o país, pois o mesmo não domina a tecnologia, e os custos em operação e manutenção seriam dispendiosos. Para uma outra forma de otimização do setor elétrico do país considerou-se estudar a viabilidade da utilização de termelétricas a gás, através do uso de turbinas aeroderivativas, por sua alta eficiência, flexibilidade operacional e capacidade rápida de resposta devido à fragmentação do território do país.

Palavras-chave:

Energias Renováveis, Auditoria Energética, Energia eólica offshore, Aerogeradores, Estudo de potencial eólico.

ABSTRACT

With the reduction in operating and maintenance costs and the optimization of the efficiency of converting renewable energy into electricity over time, the increased demand for these energy sources is almost inevitable, not to mention their environmental benefits. Cabo Verde is no exception and seeks to increasingly diversify its electricity matrix, as it heavily depends on fossil fuels for electricity production. In this context, increasing the share of renewable energy through offshore wind power was considered. The main objective of this study is to analyze Cabo Verde's electricity matrix and suggest ways to optimize this sector. To this end, the country's wind potential was analyzed, highlighting its offshore potential and assessing its technical and financial feasibility. Simulations revealed that offshore wind potential is quite similar to onshore potential at different heights in terms of wind speed. At 50 meters above ground, average wind speeds of 9 to 10 m/s were recorded in the northernmost islands, particularly São Vicente, Santo Antão, and São Nicolau. In the southern islands, within the offshore territory, Fogo and Brava stand out. The economic feasibility analysis posed a challenge for Cabo Verde given the scale of such a project, with estimated costs totaling nearly 52 million euros. Technical feasibility would also present limitations for the country, as it lacks expertise in this technology, and the costs of operation and maintenance would be substantial. To explore another approach to optimizing the country's electrical sector, the feasibility of using gas-fired thermoelectric plants was considered, employing aeroderivative turbines due to their high efficiency, operational flexibility, and rapid response capability, especially given the fragmentation of the country's territory.

Keywords:

Renewable Energies, Energy Audit, Offshore Wind Energy, Wind Turbines, Wind Potential Study.

LISTA DE SIGLAS E ACRÓNIMOS

ARME – Agência de Regulação Multisectorial da Economia

IEA – Agência Internacional de Energia

PIB – Produto Interno Bruto

Electra SA – Empresa de Energia e Água de Cabo Verde

ERV – Energia Renovável Variável

GWEC – Global Wind Energy Council

HEWT – Horizontal Axis Wind Turbines

INE – Instituto Nacional de Estatística

VAB – Valor Acrescentado Bruto

PIB – Produto Interno Bruto

SWA – Water, Sanitation, Hygiene

ECV – Escudos Caboverdianos

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Mudança global relativa anual da procura de eletricidade de 2015-2025.....	8
Figura 2 Consumo de eletricidade residencial e industrial de principais economias mundiais.	9
Figura 3 Penetração de energia eólica/solar e o descarte	10
Figura 4 Distribuição da Matriz Elétrica de Cabo Verde no ano de 2022	19
Figura 5 Distribuição da energia produzida em 2022 pela empresa Cabeólica.	20
Figura 6 Ventos dominantes do mês de janeiro	23
Figura 7 Ventos dominantes do mês de junho	23
Figura 8 Discretização das velocidades do vento em forma de histograma.....	27
Figura 9 Função de densidade de probabilidade de Weibull com fator de forma (k) igual a 1, 2 e 3, e fator de escala (c) igual a 8.....	28
Figura 10 Função de densidade de probabilidade de Rayleigh com variação do fator de escala (c).	29
Figura 11 Característica mecânica típica de uma turbina eólica	33
Figura 12 Potencial Eólico a 50 metros de altura.....	39
Figura 13 Densidade média de potência a 50 metros de altura	39
Figura 14 Velocidade média do vento a 50 metros de altura.....	40
Figura 15 Potencial Eólico a 100 metros de altura.....	40
Figura 16 Densidade média de potência a 100 metros de altura	41
Figura 17 Velocidade média do vento a 100 metros de altura.....	41
Figura 18 Potencial Eólico Offshore a 50 metros de altura.....	42
Figura 19 Potencial Eólico Offshore a 50 metros de altura para as ilhas de Santo Antão, São Vicente e São Nicolau.....	43
Figura 20 Potencial Eólico Offshore a 50 metros de altura para as ilhas de Fogo e Brava	43
Figura 21 Potencial Eólico Offshore a 50 metros de altura para as ilhas do Sal, Boa Vista, Santiago e Maio.....	44
Figura 22 Potencial Eólico Offshore a 100 metros de altura para todas as ilhas	45
Figura 23 Curva de Potência do aerogerador V52/850 da Vestas	46
Figura 24 Curva de Potência do aerogerador V100/1800 da Vestas	48

Figura 25 Curva de Potência do aerogerador V39/500 da Vestas	49
Figura 26 Potencial Eólico Offshore de Cabo Verde.....	50

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 Distribuição dos aerogeradores offshore a serem instalados por ilha.....	51
--	----

ÍNDICE GERAL

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
1.2. Motivações	2
1.3. Objetivos geral e específicos	4
1.4. Estrutura do trabalho	5
CAPÍTULO 2 - ESTADO DA ARTE	7
2.1. Matriz Energética Mundial	7
2.1.1. Energia Renovável Variável no Mundo	9
2.1.2. Transição Energética	11
2.2. Sistemas Eólicos	12
2.2.1. Energia Eólica Mundial e perspectivas para o Futuro	13
2.3. A situação de Cabo Verde	14
2.3.1. Contextualização da área de Estudo	15
2.3.2. Matriz Elétrica de Cabo Verde	16
2.3.3. Produção e consumo de energia termoelétrica, eólica onshore e solar fotovoltaica.	18
2.3.4. Potencial eólico onshore no país	19
2.3.5. Redes de transmissão de energia elétrica do país	20
CAPÍTULO 3 - ENERGIA EÓLICA	22
3.1. Comportamento ou movimento das massas de Ar	22
3.1.1. Variações Temporais da Velocidade dos Ventos	24
3.1.2. Parâmetros que influenciam na velocidade do Vento	24
3.1.3. Variação da velocidade do vento com a altura com relação ao solo	25
3.1.3. Natureza estocástica do vento	26
3.2. Aerogeradores: Aspectos Técnicos	30
3.2.1. Rotor de Eixo Vertical	31
3.2.2. Rotor de Eixo Horizontal	31
3.3. Equação para cálculo de Potência Eólica	32
3.3.1 Regulação da Potência da Turbina	33
3.4. Tecnologia dos geradores utilizados na conversão de energia mecânica em energia elétrica	34
CAPÍTULO 4 – METODOLOGIA E CASO DE ESTUDO	36

4.1. Avaliação de potencial Eólico no país.....	37
4.1.1 Software utilizado nas Modelagens	37
4.1.2. Potencial Onshore	38
4.1.3. Análise do Potencial Eólico Offshore no país	42
4.2. DIMENSIONAMENTO DE AEROGERADORES	45
4.2.1. Aerogerador de 850 kW	46
4.2.2. Aerogerador de 1800 kW	47
4.2.3. Aerogerador de 500 kW	48
CAPÍTULO 5 - ANÁLISE DE RESULTADOS E DA VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÓMICA	50
5.1. Análise quantitativa e escolha de localização dos parques eólicos offshore	50
5.2. Desenvolvimento do Projeto	51
5.3. Análise Económica da Venda e Distribuição de energia em Cabo Verde	54
5.4. Tempo de Retorno de Investimento	56
5.5. Programas de Eficiência Energética desenvolvido em Cabo Verde	56
5.5.1. Sugestões de melhoria do Sistema Elétrico de Cabo Verde	57
5.6. Contribuições ambientais com a implementação de parques eólicos na matriz elétrica de Cabo Verde	58
CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES	60
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1. Introdução ao Tema

Com a evolução do mundo como um todo, e com o aumento da população, alterações nos padrões de consumo e desenvolvimento das novas tecnologias, as populações estão cada vez mais sujeitas à dependência de energia elétrica. Consequentemente, o estudo da produção, transmissão, distribuição e armazenamento de toda energia produzida, até chegar ao consumidor final, são ainda alvos de muito estudo, principalmente quando se pretende cada vez mais inserir energias renováveis e automatizar formas de produção e as redes de distribuição.

A energia elétrica hoje em dia desempenha uma função primordial para o desenvolvimento em diversos sectores, como da economia, saúde, conforto e bem-estar geral da população, com o funcionamento de sistemas de iluminação, aquecimento, ventilação e ar condicionado. A energia também é utilizada na indústria para sistemas de força.

De acordo com a IEA (International Energy Agency), a eletricidade é cada vez mais fundamental para as sociedades modernas e tornar-se-á cada vez mais por expansão nas áreas de transporte e aquecimento, por ser cada vez mais comum a utilização de veículos elétricos e bombas de calor. Ainda a mesma agência alerta que a produção de energia elétrica é atualmente a maior fonte de emissões de CO₂ a nível mundial, mas também é o setor que lidera a transição para emissões líquidas zero através de fortes investimentos e implantação de energias renováveis como a eólica e a solar.

A transmissão de energia elétrica é feita em Alta Tensão ou Média Tensão até chegar na fase final a um Posto de Transformação antes de chegar ao consumidor, onde é entregue em Baixa Tensão. Cada vez mais tenta-se produzir energia mais próximo do consumidor final para que se evitem perdas em grandes distâncias e grandes investimentos em cabos para esse efeito. Dito isso, dependendo da fonte de energia renovável, pode-se eliminar a questão da distância aos grandes centros de consumo, por exemplo com a produção de energia através de sistemas solares fotovoltaicos.

O Banco Mundial afirma que Cabo Verde tem um progresso económico significativo ao longo do tempo e a grande responsável por esse feito seria o rápido desenvolvimento do turismo, representando 25% do PIB.

1.2.Motivações

Cabo Verde é considerado um exemplo de democracia em África, em grande parte devido à sua estabilidade política e isso se traduz em apoios de instituições globais como o do Banco Mundial, que tem financiado alguns projetos em fase de preparação e outros novos projetos que se refletem para Cabo Verde em programas multissetoriais para o turismo, pesca e agricultura mas também projetos de estratégia de descarbonização em alguns setores e instalações de centrais de energia renováveis mais particularmente a solar fotovoltaica e a eólica.

Uma das propostas do governo atual em termos de energia elétrica seria a transição energética, a continuação do investimento em implementação de energias renováveis (eólica e solar) e programas de eficiência energética, não só devido a questões ambientais, mas também devido à volatilidade do preço dos derivados de petróleo.

A energia Solar Fotovoltaica é hoje, segundo algumas fontes, uma das formas de produção que mais cresce no mundo em termos de potência instalada, apesar da questão da eficiência no processo de conversão e armazenamento do excedente de produção ainda apresentarem algumas debilidades. Estudos nesse sentido apontam melhorias na escolha de matéria-prima para fabricação de painéis solares fotovoltaicos e na acessibilidade nos preços das baterias para armazenamento. Dito isso, esse sistema de produção de energia elétrica tem-se mostrado confiável, de fácil acesso, e tem um bom retorno do montante investido.

Estudos afirmam que o país tem um bom potencial solar, e devido a acessibilidade no mercado, incentivos fiscais e diminuição dos custos de implementação e manutenção, sendo também bem aceite pela população e empresários em geral. O país contém um dos maiores preços de energia por kWh de África devido à dependência da matriz elétrica, maioritariamente dependente de combustíveis fósseis. Por esse motivo, pequenos

consumidores e principalmente o sector de empreendimentos turísticos e o sector do comércio, pequenas e grandes empresas cada vez mais procuram essa forma de produção de energia elétrica como forma de reduzir as despesas referente à fatura de energia.

Já a energia eólica é bastante expressiva, desde estudos para a fase de conceção do projeto, dependendo do local da instalação. Em termos de concessões, da viabilidade técnica até à sua comercialização, são necessários realizar técnicas de engenharia mais sofisticadas, e métodos apropriados para garantir que os objetivos sejam alcançados.

Em Cabo Verde a eólica representa cerca de um pouco menos de um quarto da matriz elétrica. Os parques onshore estão instalados nas ilhas com mais concentração de pessoas e indústria. Mas ainda representando uma pequena fração da energia produzida necessária para essas ilhas, que são complementadas, na sua maior parte, por termelétricas a diesel, sendo a outra parcela bem menor, constituída por solar fotovoltaico.

Considera-se por estudos realizados anteriormente pela empresa de auditoria energética, a Gesto Energy, mostra que as ilhas têm bom potencial eólico para produção de energia eólica onshore. A literatura em diversos trabalhos recomenda que estudos mais detalhados de potencial eólico e de viabilidade técnica e financeira sejam realizados com o intuito de inserir uma maior parcela de energia eólica desta vez offshore, por Cabo Verde apresentar uma vasta área marítima e por se acreditar que a velocidade e densidade do vento na costa sejam bastante superiores.

A eólica offshore tem ganhado mercado e permite tirar proveito de maiores potências instaladas, com aerogeradores consideravelmente maiores, com melhor eficiência e melhor aproveitamento da velocidade de vento.

Também a eficiência energética é um conceito relativamente novo para Cabo Verde e tem um longo caminho pela frente quando se refere a esse tema. Em termos de gestão de energia, tecnologias eficientes, criação de consciência energética e políticas adotadas, o país tem melhorado com o tempo nesse aspeto, mas precisa-se fazer mais, principalmente num país onde a principal fonte de produção de energia é devido à queima de derivados de petróleo.

Como referido anteriormente, no país queima-se um número considerável de toneladas de derivados de petróleo para a produção de energia elétrica, dentre eles o Fuel Óleo 180, o Fuel Óleo 380, e o gasóleo que são bastante nocivos ao meio ambiente provocando a formação de gases efeito estufa na atmosfera e conseqüentemente a poluição do ar, além de outros impactos na biodiversidade. Portanto, formas de produção de energia mais limpas e sustentáveis no país são cada vez mais necessárias.

1.3. Objetivos geral e específicos

Assim, o objetivo geral deste trabalho é propor soluções de geração de energia eólica em Cabo Verde. Mostrar o panorama atual na distribuição da matriz elétrica, apontar, estudar e propor melhorias neste sector, e ainda propor uma maior parcela de integração com a energia eólica. Nesse sentido é necessário estudar detalhadamente o potencial eólico, a viabilidade técnica e financeira da implementação de outros parques eólicos tanto onshore como offshore. Por último, propor medidas de eficiência energética e outras formas de automação na produção de energia no país.

Para alcançar o objetivo geral desta pesquisa, buscou-se, portanto:

- Apresentar detalhadamente a matriz elétrica do país, tentando entender o porquê de esta estar distribuída de tal forma, e analisar os insumos utilizados na produção no caso da termelétrica, e otimizações que podem ser feitas neste setor.
- Descrever os estudos já realizados sobre o potencial das energias renováveis (eólica e solar) no país, e procurar na literatura outros trabalhos de investigação mais recentes nessa temática.
- Mostrar a contribuição das energias renováveis na matriz elétrica, apontando melhorias a serem feitas, e políticas adotadas para melhor inserção de energia renovável.
- Apontar e analisar a alta percentagem de perdas na rede, sejam técnicas ou não técnicas, e apontar medidas de eficiência energética nesse sentido.
- Analisar mapas de velocidade e densidade do vento.
- Analisar o potencial eólico, viabilidade técnica e financeira da implementação de parques eólicos (Onshore e Offshore) para o caso de Cabo Verde.

- Descrever os impactos ambientais que derivam das principais formas de produção de energia referidas anteriormente.

Para a realização deste trabalho optou-se por uma revisão do estado da arte em livros, dissertações, revistas e artigos científicos. Usou-se também trabalhos elaborados por empresas de auditoria energética, dados disponibilizados por relatórios oficiais, sites de lançamento de dados por parte de órgãos do governo atual e, por último, sites de simulação de vento, para obtenção de mapas, direção e velocidade de vento. A pesquisa foi delimitada para o cenário da energia elétrica em Cabo Verde, mais concretamente a análise da energia renovável neste país. Os dados analisados são disponibilizados pelo governo local em sites oficiais e outros dados importantes foram obtidos de relatórios técnicos das principais empresas do sector no país como a Electra SA e a Cabeólica.

1.4.Estrutura do trabalho

Este Trabalho está estruturado da seguinte forma:

- No capítulo 1 foi elaborada a parte introdutória do trabalho, onde se estabeleceu o contexto, o porquê da escolha do tema e a sua importância nos dias atuais.
- O capítulo 2 apresenta o estado da arte, onde se preocupou em trazer o que a literatura tem publicado recentemente em teses, dissertações, artigos e revistas científicas sobre o tema a ser abordado. Por último foi elaborada a contextualização da área de estudo, onde se preocupou em detalhar temas pertinentes ao trabalho sobre o país. Preocupou-se em dissertar então, desde a localização, economia, problemas que o país enfrenta atualmente, até chegar na matriz elétrica do país.
- No capítulo 3, deu-se a conhecer o comportamento do vento em determinadas situações, a parte técnica em geral, as equações e leis e funções que regem a energia eólica.
- No Capítulo 4, descreveu-se a metodologia que se utilizou para elaboração deste trabalho, e posteriormente descreveu-se sobre o caso de estudo.
- No Capítulo 5, foi apresentado e discutido mais resultados, principalmente das simulações feitas, e as análises elaboradas através dos relatórios das principais

empresas de produção de energia no país. Por último, utilizou-se da literatura para embasar e complementar os resultados.

- Para o último capítulo, foram apresentadas as conclusões do trabalho.

CAPÍTULO 2 - ESTADO DA ARTE

2.1. Matriz Energética Mundial

Segundo a Electricity Market Report 2023, uma revista publicada pela Agência Internacional de Energia, a energia elétrica global teve uma ligeira desaceleração do crescimento em relação a 2022 apesar da crise energética provocada pela invasão da Rússia à Ucrânia. [IEA, 2023]

A procura aumentou quase 2% em comparação com a média, que é de 2.4%, que seria a taxa de crescimento observada durante o período de 2015-2019. Ainda segundo a mesma fonte, o que contribuiu para esse aumento a nível mundial foram os setores de transporte com a venda recorde de veículos elétricos, e o setor de aquecimento com bombas de calor vendidos em 2022. (IEA, 2023)

Um dos impactos da covid-19, foi na economia mundial afetando também a energia com recorde de aumento dos preços. O aumento nos preços de carvão e gás natural também foram bastante expressivos, que, conseqüentemente, aumentaram os custos de geração de energia e contribuíram para um rápido aumento da inflação. Portanto, com o aumento nos preços da eletricidade ficou condicionado esse crescimento e procura de eletricidade em diversas regiões ao redor do mundo.

Está previsto que a geração global de eletricidade a partir do gás natural e do carvão se mantenha praticamente estável entre 2022 e 2025. Na União Europeia prevê-se que a produção de gás diminua, mas em contrapartida o crescimento significativo do Médio Oriente irá compensar essa diminuição. Da mesma forma, as quedas de produção de carvão da Europa e nas Américas serão acompanhadas por um aumento na Ásia-Pacífico. Na China ainda é onde ocorre a metade da geração a carvão no mundo, e está previsto que o consumo global no país aumente um-terço até 2025, nos próximos 3 anos mais de 70% do crescimento global da demanda de eletricidade está previsto para China, Índia e Sudeste da Ásia combinados. (IEA, 2023)

No gráfico da figura 1 pode-se analisar o crescimento da procura de eletricidade durante os últimos 9 anos, onde pode-se notar que o crescimento a nível mundial de dá em média em torno de 2%, exceto no ano de 2019 para 2020 que foi o ano da Pandemia Mundial de

Covid-19, onde o sector da produção, indústria, e a aviação tiveram que diminuir ou até fechar suas atividades por um tempo.

Electricity Market Report, aponta ainda baixas históricas da procura elétrica industrial em vários países em 2022. Em 2021 os países estavam a retornar às atividades económicas normais, mas alguns países como é o caso da China permaneceram em *lockdown* o que teve um impacto no consumo de eletricidade nas duas frentes tanto na parte residencial como na Industrial. Em países como o Reino Unido e a Espanha também houve o consumo mais baixo de eletricidade dos últimos 20 anos em 2022. A atividade industrial espanhola que utiliza eletricidade de forma intensiva nas suas atividades foi duramente atingida pelo aumento dos preços de eletricidade. (IEA, 2023)

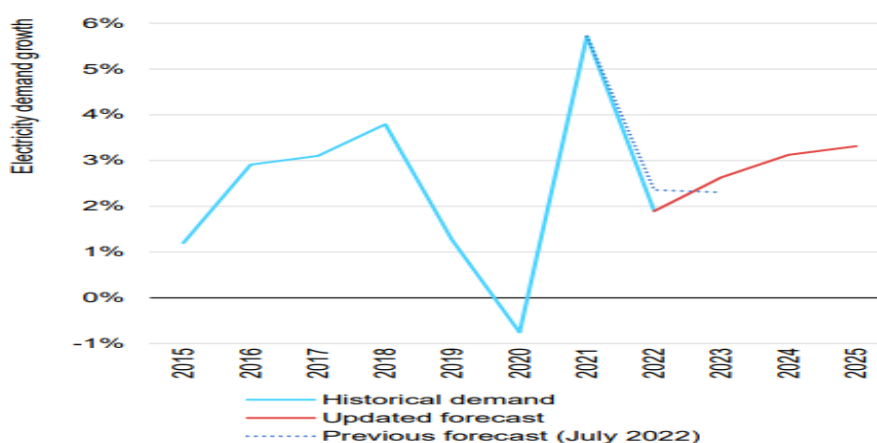


Figura 1 Mudança global relativa anual da procura de eletricidade de 2015-2025

Fonte: Electricity Market Report (2023)

Dos países pesquisados, Reino Unido e Espanha tiveram um aumento mais acentuado nos preços médios grossistas de eletricidade. A Espanha por ter o segundo nível mais alto, adotou a exceção ibérica, que colocava um limite máximo para o preço do gás, preço adotado para reduzir o custo de eletricidade. (IEA, 2023)

Os gráficos da figura 2 mostram a realidade das principais economias mundiais em termos de eletricidade consumida tanto residencial como industrial nos anos pós pandemia de Covid-19.

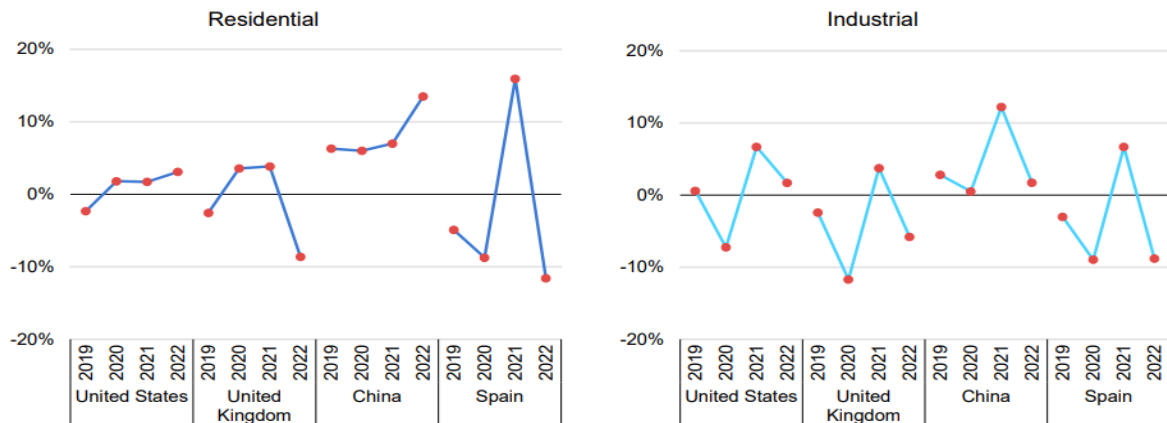


Figura 2 Consumo de eletricidade residencial e industrial de principais economias mundiais.

Fonte: Electricity Market Report (2023)

A IEA acredita que no continente Africano até 2030 abrigará cerca de um-quinze da população mundial o que deverá desempenhar um papel cada vez mais importante no ecossistema energético global. Ainda segundo a mesma fonte, a procura de energia cresce em toda região, mas o uso de energia moderna per capita continua a ser um dos mais baixos do mundo, apesar dos grandes recursos energéticos em todo continente. O continente Africano é responsável apenas por 6% da utilização global de energia e por menos de 3% de emissões globais de CO₂ relacionados com a energia. (IEA, 2023)

2.1.1. Energia Renovável Variável no Mundo

As energias renováveis vêm tendo um papel cada vez mais fundamental na matriz energética mundial, diminuindo o consumo de derivados de petróleo tanto para a produção de eletricidade como para o transporte de pessoas e mercadorias através de biocombustíveis, ou ainda através de veículos elétricos carregados nos de postos de carregamento através de energia solar fotovoltaica.

Holtinen, Groom, Kennedy et al. (2021), afirma que as energias eólica e solar fotovoltaica estão sendo instaladas em quantidades crescentes ao redor do mundo e são fortemente estimuladas devido a grandes ambições de programas como o carbono-zero que estados individuais ou até mesmo países ao redor do mundo almejam atingir. Países como os da União Europeia têm estipulado para 2050 atingir a neutralidade de carbono.

O primeiro ministro do Japão anunciou em 2020 que queria atingir a mesma meta, o governo chinês estipulou a mesma meta e ainda acrescentou no seu programa metas de picos de emissão de carbono antes de 2030. (HASSAN, VIKTOR, AL-MUSAWI ET. AL, 2024)

A mesma fonte ainda afirma, recordes de alta penetração na rede através de energia solar fotovoltaica e eólica em 2020. Isso se deve parcialmente à queda considerável de consumo de energia elétrica em países ao redor do mundo devido a pandemia. Na Europa a energia eólica passou dos 15% e solar acima dos 8%, nos Estados Unidos da América atingiram cerca de 8% a eólica e 3% a solar, enquanto que na China 9.5% a eólica e solar, sendo que nas cidades de Qinghui e Ningxia ultrapassou 30%. (HASSAN, VIKTOR, AL-MUSAWI ET. AL, 2024)

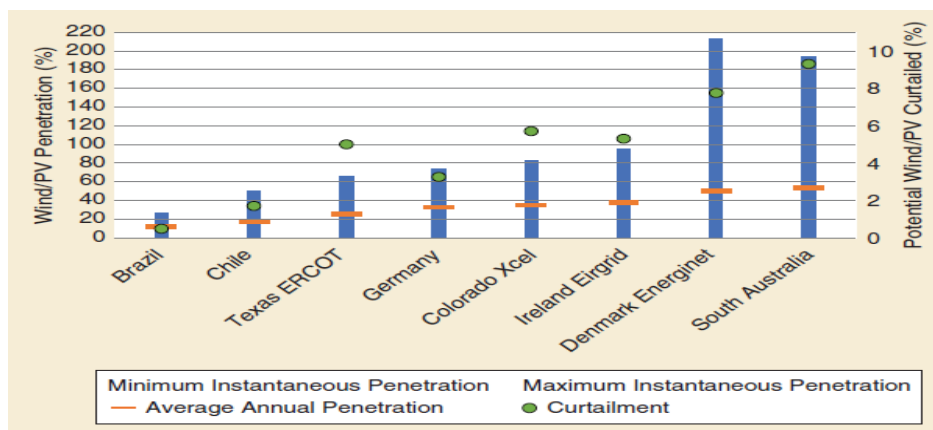


Figura 3 Penetração de energia eólica/solar e o descarte

Fonte: Holttinen, Groom, Kennedy et al. (2021)

As barras azuis na figura 3, mostram a faixa de compartilhamento instantâneo de Energias Renováveis Variáveis (ERV) na rede, enquanto o compartilhamento médio da procura é representado por marcadores laranjas.

A figura 3 ainda mostra o quanto são altas as parcelas horárias de ERV podem ser quando a participação média estiver a quase 40-50% da eletricidade de consumo, também mostra a taxa de ERV descartada, principalmente a eólica.

Os autores Holttinen, Groom, Kennedy et al. (2021), do artigo ainda destaca como e porquê se dão essas reduções ou restrições, nomeadamente:

No caso da Dinamarca mais de 90% da limitação (redução deliberada na produção) são devido aos excedentes de produção alemã. Na Irlanda, a limitação refere-se à redução da geração eólica por motivos sistêmicos (onde a redução de qualquer ou de todos os geradores eólicos aliviaria o problema) e não por motivos localizados na rede.

Na Dinamarca, a ERV superou a procura por 845 horas e atingiu um pico de 213% de demanda em 2020. Na parte Oeste da Dinamarca foram registradas parcelas superiores a 100% durante 2.117 horas e superiores a 350% na hora mais extrema (3.637 MW de ERV e 1.041 MW de procura).

No Sul da Austrália, em outubro de 2020 houve um novo recorde de geração de energia solar fotovoltaica ultrapassando 100% da procura. É importante destacar que 77% da geração solar fotovoltaica foi distribuída, principalmente por sistemas residenciais de energia solar fotovoltaica. Isso resultou numa procura muito baixa no sistema de transmissão, pois a maioria do consumo dos clientes foram supridas pela produção solar distribuída.

Um caso a destacar também na Austrália é da ilha da Tasmânia onde a penetração assíncrona do sistema em janeiro de 2021, atingiu mais de 90%, devido à capacidade de geração hidrelétrica e eólica local. Essa alta penetração assíncrona foi possível devido a uma combinação de importação de corrente contínua de alta voltagem (HVDC).

Nos Estados Unidos a empresa Xcel Energy de Colorado, registrou uma penetração horária de ERV de 83% e um recorde mensal de 46% da carga de dezembro de 2020. Nesse mesmo ano, 36% da demanda dos clientes foi atendida por ERV, principalmente por meio da energia eólica. (HASSAN, VIKTOR, AL-MUSAWI ET. AL, 2024)

2.1.2. Transição Energética

A escassez de fontes não renováveis, a volatilidade do preço dos derivados de petróleo e gás, questões ambientais, e a melhoria da eficiência energética, desde processos como a produção, transmissão e distribuição, vem sendo preocupações crescentes na sociedade.

A transição energética tem como objetivo principal a mudança no sector de produção e consumo de energia a fim de torná-lo mais sustentável, eficiente e ambientalmente aceitável. A busca nesse sentido para soluções inovadoras, implementação de tecnologias mais recentes, limpas e eficientes são pilares para que se tenha uma transição sem grandes constrangimentos.

Um outro assunto que chama atenção neste tema é a gestão da procura e produção de energia, portanto, melhorias em sistemas de produção e redes integrados e automatizados, vão proporcionar melhorias significativas em segurança energética, e são necessidades crescentes desta indústria.

A transição energética reflete-se da urgência da mudança do seguimento da trajetória mundial anterior no que diz respeito à produção de energia, onde as emissões de CO₂ só aumentavam com o passar do tempo, e um dos pilares desse aumento era a produção de energia através de combustíveis fósseis.

Segundo Hassan, Viktor, Al-Musawi et. al (2024), os pilares da transição energética revolucionária revelam-se na combinação de uma maior participação de energias renováveis e eficiência energética aprimorada. Essa colaboração ou combinação das duas tecnologias podem alcançar uma impressionante redução de 95% nas emissões até 2050.

O mesmo autor ainda complementa prevendo um cenário onde a sinergia entre as fontes renováveis e medidas de eficiência energética não apenas complementam a matriz, mas dominam o cenário de potenciais soluções. Enquanto a eficiência energética, que é considerada a pedra angular das práticas de energia sustentável, cria uma base ao reduzir o consumo e o desperdício desnecessário, as energias renováveis avançam para atender à procura de energia com pegadas de carbono mínimas. Então as energias renováveis seriam responsáveis por uma redução na margem dos 41% aos impressionantes 55% das emissões totais. (HASSAN, VIKTOR, AL-MUSAWI ET. AL, 2024)

2.2. Sistemas Eólicos

A energia dos ventos foi inicialmente pensada para a moagem de grãos, para bombear água de um lugar para outro em zonas rurais e em salinas. Uma das formas de

aproveitamento foi através de moinhos de vento, onde transforma a energia cinética do vento em energia mecânica, a força do vento empurra as pás fazendo-as girar em torno do eixo de transmissão principal.

Depois essa tecnologia foi aperfeiçoada para gerar eletricidade, acoplando o movimento rotativo do eixo principal a um gerador elétrico, convertendo assim a energia mecânica gerada pelo vento em energia elétrica. Inicialmente esses sistemas forneciam energia elétrica a sistemas autônomos.

No final do século XIX, surgiram na Dinamarca as primeiras turbinas eólicas para a geração de energia elétrica da Europa. Em 1929, foi instalada na França a primeira turbina de grande porte, que acabou sendo destruída por ventos de grandes intensidades, assim como muitas na mesma época. Atualmente, com o desenvolvimento dessa tecnologia e melhoria dos materiais utilizados na construção dos aerogeradores esse problema foi completamente superado. (ALDABÓ, 2022)

2.2.1. Energia Eólica Mundial e perspectivas para o Futuro

Segundo os dados do Global Wind Energy Council (GWEC) a energia eólica no mundo cresceu em 2022 e situa-se em 906 GW de potência instalada. Países como a China, EUA, Índia e Espanha são os cinco principais mercados do mundo e representam cerca de 71% das instalações realizadas em 2022, sendo 77.6% são novas instalações e foram conectadas à rede em 2022. Este número foi 3.7% a menos que em 2021, por China e EUA os maiores mercados do mundo perderem conjuntamente uma taxa de 5% do mercado em comparação a 2021. (GWEC, 2023)

O relatório de 2023 do Global Wind Energy Council (GWEC), indica que a energia eólica atingirá a marca de 1 TW de operação, e que até 2030 espera-se a marca de 2 TW encerrando uma década de acentuada aceleração.

O relatório ainda afirma que a energia eólica mudou o sector da energia no mundo ao longo das últimas quatro décadas e que as instalações eólicas não estão mais concentradas apenas em alguns países europeus e alguns estados dos EUA, mas sim se nota uma presença crescente em vários países do mundo. (GWEC, 2023)

Algumas contribuições da energia eólica offshore e tecnologias inovadoras, como fundações flutuantes, prometem fornecer grandes quantidades de energia eólica em locais onde a sua implantação teria sido inimaginável até muito recentemente.

Esse mesmo documento ainda aponta também riscos que poderiam afetar esse crescimento da energia eólica. Sabendo que o mundo passa por uma recuperação pós-pandemia, pressões inflacionárias e uma guerra na. Mas, mesmo assim, os sinais têm mostrado crescimento e a importância da energia eólica no cenário mundial.

Para um futuro próximo, em 2024, as previsões da GWEC é que a eólica onshore passe a marca dos 100 GW de instalação anual, enquanto que a eólica offshore a previsão seria para mais de 25 GW instalados em apenas um ano pela primeira vez em 2025. A ambição por energia verde por causa das mudanças climáticas vai fazer com que as instalações continuem de forma acelerada e se prevê uma marca de 680 GW de capacidade eólica instalada até 2027 e 130 GW dessa capacidade seria Offshore. (GWEC, 2023)

2.3. A situação de Cabo Verde

As ilhas de Cabo Verde formam um arquipélago de dez ilhas, seis ao norte e quatro ao sul, sendo uma ilha não habitada e cinco ilhéus principais. Cabo Verde é uma pequena nação de origem vulcânica situada a 550 km da costa ocidental africana, e possui em população cerca de 500 mil habitantes. As ilhas são banhadas pelo oceano atlântico e possuem uma superfície aproximada de 4.033 km². As ilhas pertencentes ao grupo barlavento são Santo Antão, São Vicente, Santa Luzia, São Nicolau, Boavista e Sal, e o grupo Sotavento as ilhas do sul, Maio, Santiago, Fogo e Brava.

Cabo Verde foi colónia portuguesa até 1975, e hoje é considerado um exemplo de democracia em África, devido grande parte à estabilidade política do país desde a independência. As eleições no país têm decorrido de forma pacífica e com resultados transmitidos eletronicamente, permitindo também que emigrantes fora do país exerçam o seu direito de voto.

2.3.1. Contextualização da área de Estudo

O território do país possui recursos minerais e naturais bastante limitados, e terra arável. Por ter um território fragmentado e com distâncias consideráveis entre as ilhas rodeadas pela água do mar, o isolamento entre as ilhas cria problemas significativos de conectividade e limitação da prestação de serviços como fornecimento de energia, água, saneamento e saúde.

Em termos de contexto económico, os dados de 2023 do Banco Mundial afirmam que o país registou uma desaceleração do crescimento económico na ordem de 4,8%, impulsionado por uma estabilização das exportações de serviços após a recuperação do turismo do período pós-Covid19. Uma outra preocupação ainda seria a dívida pública, que representa cerca de 115,3% do PIB, que se deve a políticas adotadas para financiar o crescimento da economia do país.

O Instituto Nacional de Estatística (INE) do país, indica que a contribuição do Valor Acrescentado Bruto (VAB) de cada ilha na formação da economia apresenta uma distribuição linear e desigual. A ilha de Santiago (capital do país), representa cerca de 52% do Produto Interno Bruto (PIB), seguido da ilha de São Vicente com 16% e a ilha do Sal com 12%. A nível setorial, também se verificam assimetrias tendo o sector terciário impulsionado pelo turismo, com cerca de 70% do VAB, seguido pelo sector secundário (indústrias de transformação) representando 19%, e o último o sector primário (agricultura nas ilhas de Santiago, Santo Antão e Fogo), representando 11% do VAB. (INE, 2023)

O país é incapaz de produzir toda a gama de alimentos que a população precisa para se auto satisfazer, por isso, mais de 80% desses produtos são adquiridos pela importação fazendo com que o país dependa cada vez mais da importação. Essa escassez de produtos alimentícios se dá porque apenas 10% da superfície do país (40.000) hectares tem vocação agrícola. A escassez e a irregularidade das chuvas provocam secas cíclicas, déficit hídrico permanente e uma desertificação acentuada. (INE, 2023)

As precipitações médias em regiões com altitude variadas, declarando que a precipitação média anual não ultrapassa 300 mm para as zonas situadas a menos de 400 m de altitude, para zonas situadas a mais de 500 m de altitude são expostas a ventos alísios e as

precipitações podem ultrapassar os 700 mm. Os autores ainda afirmam que a tendência das precipitações no país é de redução que ocorre desde da década de 60, causando mais impactos negativos não só nas condições de exploração agrícolas, mas também no abastecimento de água. As temperaturas médias máximas no país ocorrem no trimestre agosto a outubro, e que também coincide com o período chuvoso, enquanto as mínimas no trimestre de dezembro a fevereiro. (NEVES, 2016)

Dados mais recentes de um estudo elaborado pelas Nações Unidas (a SWA, Water, Sanitation, Hygiene for all, always and everywhere, 2022) afirma que, o arquipélago se situa na zona do Sahel, é caracterizada pela sua extrema aridez e precipitação média de 230 mm/ano, o que se traduz na contribuição de somente 13% para a alimentação das águas subterrâneas. Com o agravamento das mudanças climáticas e o crescimento populacional torna-se cada vez mais crítico a disponibilidade de água tornando o desenvolvimento socioeconómico mais comprometido. (RELATÓRIO SWA, 2022)

Ainda o mesmo artigo ressalta a clara dependência de água potável que é utilizada para o consumo, que advém dos sistemas de dessalinização de água. Portanto, cerca de 80% da água utilizada para consumo doméstico no país é dessalinizada, o que faz com que tenha uma implicação direta na tarifa, considerada uma das mais elevadas em África. (RELATÓRIO SWA, 2022)

Os resíduos sólidos vêm se tornando num dos mais preocupantes problemas para a proteção ambiental devido a sua produção e acumulação atingirem níveis acima da capacidade de recolha. Os principais descartes desses resíduos continuam sendo em lixeiras, o que constituem um risco para a saúde humana, pois contém contaminantes que podem chegar no ar, solo ou água. Nestas lixeiras são lançados resíduos domésticos, de construção, industriais, e um dos mais nocivos ao ambiente que são os resíduos hospitalares, portanto, são lançados sem prévios tratamentos ou separação adequada, causando não só futuros problemas ambientais, mas incômodos como cheiros e fumos quando incinerados a céu aberto e danos à saúde pública em geral.

2.3.2. Matriz Elétrica de Cabo Verde

Não se pode falar em energia elétrica em Cabo Verde sem mencionar a energia produzida pelas termelétricas, o país tem uma forte dependência térmica para a geração de eletricidade.

As termelétricas a Diesel do grupo Caterpillar, utilizam combustíveis como o Gasóleo, Fuel Oil 380 e o Fuel Oil 180, e representam quase 83.2% da matriz elétrica. (RELATÓRIO ELECTRA, 2022)

Já as energias renováveis exploradas até o momento no país são apenas a eólica onshore e a solar fotovoltaica totalizando 16.8% da matriz. Dessa energia a eólica onshore é a mais expressiva com 15.4% e a energia solar fotovoltaica tem apenas cerca de 1.4%. (RELATÓRIO ELECTRA, 2022)

Estudos de auditoria energética realizados já a algum tempo mostram que Cabo Verde tem um excelente potencial energético, mais concretamente para a energia eólica onshore e para a energia solar fotovoltaica, e serão discutidos mais abaixo em outro capítulo.

A energia eólica offshore é inexistente no país ainda, mas com estudos de viabilidade económica e ambiental, estudos de geologia e de engenharia adequados para a área, e a construção de infraestruturas de apoio podem ser um começo para que se instigue o investimento nesta tecnologia no país.

As políticas de eficiência energética desde a geração de energia e procura de formas mais eficientes de produção, e a redução de perdas principalmente na distribuição que apresenta sérios problemas de roubo, fraudes e furtos de energia, que são constrangimentos que já se vem arrastando em anos, devem ser contempladas e revistas principalmente quando o preço do kWh for elevado como é o caso de Cabo Verde.

O governo local tem trabalhado junto a empresas públicas, privadas e bancos na promoção de incentivos fiscais e monetários, e ainda na facilitação das mercadorias junto a órgãos alfandegários para a promoção de energias renováveis para microprodutores e produtores independentes que tem como propósito investir na área. Em 2016 foram elaboradas metas ambiciosas e infundadas de aumentar a penetração de energias renováveis na rede na ordem dos 50% até 2020, mas sem nenhum sucesso aparente. As taxas de energia renovável no país são praticamente as mesmas desde 2012 com a entrada

da empresa Cabeólica SA, empresa responsável pela exploração da energia eólica no país. A empresa é responsável por uma taxa de penetração de energia elétrica na rede na ordem dos 15 a 18% da matriz elétrica. (RELATÓRIO ELECTRA, 2022)

2.3.3. Produção e consumo de energia termoelétrica, eólica onshore e solar fotovoltaica.

Segundo a Electra SA (Empresa de eletricidade e água de Cabo Verde), a produção de energia elétrica no país é dada por 3 tipos de tecnologia já referidos neste trabalho (Diesel, Eólica e Solar). Em 2022 constam 14 centrais térmicas de dimensões e potências variadas, um parque eólico e dois parques solares. A potência disponível neste ano para esta empresa foi de quase 125 GW, sendo 93.8% térmica, 5.4% solar fotovoltaica e 0.7% eólico. (RELATÓRIO ELECTRA, 2022)

Em termos globais, incluindo produtores independentes de energia solar e eólica no país a matriz fica distribuída da seguinte forma para o ano de 2022:

A produção de eletricidade atingiu o valor de 468.9 GWh, sendo 83.2% de origem térmica, 15.4% eólica e 1.4% solar fotovoltaica, como apresentado na figura 4. Em relação ao ano de 2021 registou-se um aumento da produção de eletricidade em 6.2% em relação ao ano de 2020, que consequentemente teve-se que se aumentar a produção térmica em 8.1%, diminuiu-se então a produção eólica em 2.2% e a produção solar em 2.3%. Segundo o mesmo relatório, um dos motivos desse aumento na produção foi a retomada da atividade turística e hoteleira da ilha do Sal após período pandêmico. (RELATÓRIO ELECTRA, 2022)

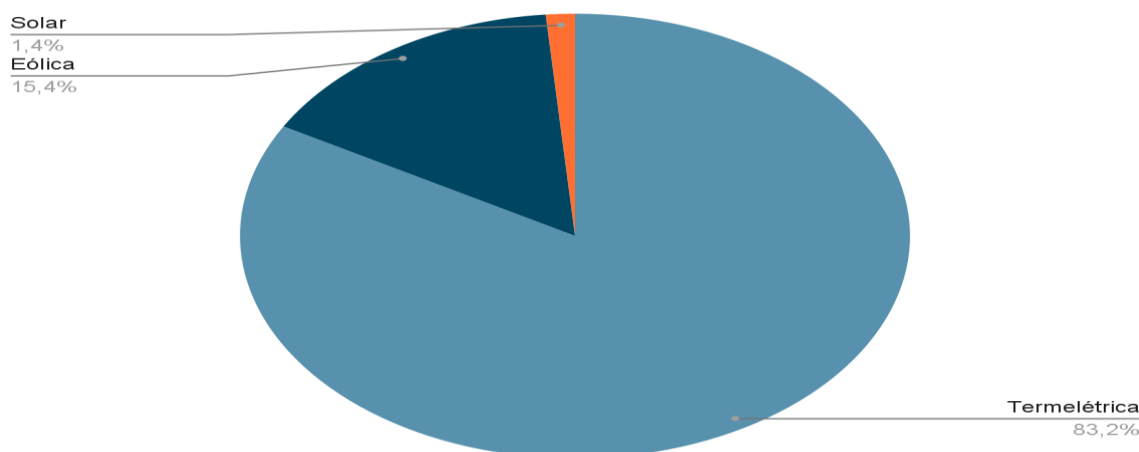


Figura 4 Distribuição da Matriz Elétrica de Cabo Verde no ano de 2022

Fonte: Autor (2024)

A produção através das termelétricas ciclo diesel no país é dada pelos grupos de produção de fabrico da MaK, Caterpillar e Wartsila, onde utiliza-se os combustíveis como o gasóleo, marine diesel, FO 180 cst e o FO 380 cst.

2.3.4. Potencial eólico onshore no país

Em Cabo Verde, a Cabeólica é a principal empresa de exploração de energia eólica no país, segundo o relatório de 2022 disponibilizado pela mesma. Ela foi responsável por 15% da taxa de penetração global na matriz elétrica do país. Tem uma capacidade instalada de 25.5 MW, a uma taxa de disponibilidade de 77% no ano. A produção de eletricidade foi cerca de 72294 MWh, e a velocidade média do vento regista durante esse ano foi de 8.5 m/s. Com essa produção foram evitadas ao equivalente a 47261 toneladas de CO₂, elevando o total de emissões de CO₂ evitadas da empresa para 559864 toneladas. Ainda, segundo o mesmo relatório a empresa opera com uma potência instalada de 25MW divididos em 4 parques eólicos, constituídos por aerogeradores do modelo da Vestas, V52, com potência nominal de 850 kW.

Ao todo são 30 aerogeradores distribuídos em 4 ilhas da seguinte forma: Ilha de Santiago com 11 e potência instalada de 9.35 MW, a ilha do Sal com 9 e potência instalada de 7.65MW, a ilha de São Vicente com 7 e potência instalada de 5.95 MW, e por último a ilha da Boa Vista com 3 e potência instalada de 2.55 MW. A taxa de disponibilidade média

anual dos parques gira em torno de 95.9% para o ano de 2022, que foi um pouco menor do ano anterior com uma taxa de 97.8%.

A empresa dá a conhecer ainda uma redução da produção de energia nos parques eólicos do país, impactada pelas condições de vento adversas, portanto, observou-se uma redução de 11% da energia eólica disponível potencial face ao ano anterior. A distribuição da energia produzida, que foi de 72 294 MWh, e se distribui de acordo com a figura 5.

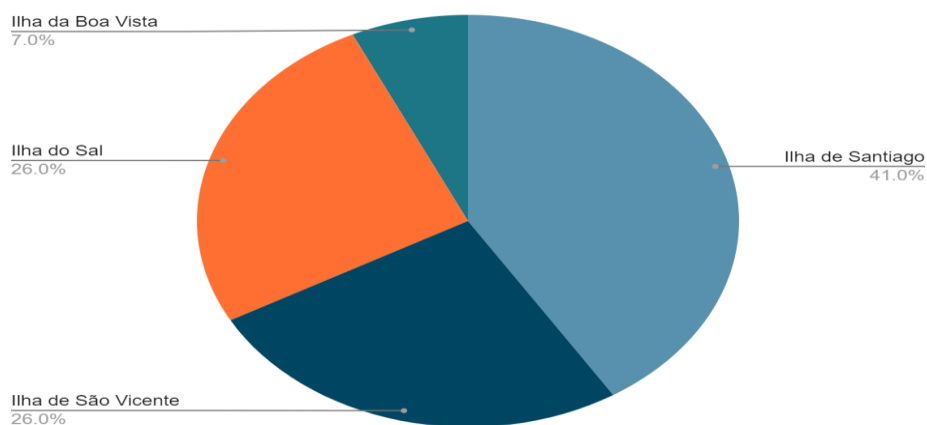


Figura 5 Distribuição da energia produzida em 2022 pela empresa Cabeólica.

Fonte: Cabeólica, 2022

Outra empresa, embora muito pequena em termos de potência instalada, é a Electric Wind com apenas com 3 aerogeradores de 300 kW, que é explorada pela Electra SA que é a principal empresa de produção e distribuição de energia do país como já mencionado anteriormente. Fica situada na ilha de São Vicente na zona de Matiota, mas não tem dados concretos de sua produção, contribuição na matriz e dados de disponibilidade do parque eólico. Isso leva a crer que a contribuição dessa empresa para a matriz elétrica nacional deve ser mínima, isso devido a sua potência nominal instalada.

2.3.5. Redes de transmissão de energia elétrica do país

Um lançamento do boletim oficial (2019), dá a conhecer a aprovação do Código de Rede Elétrica de Cabo Verde, onde não só se passa a estabelecer as exigências técnicas de instalações geradoras de energia elétrica e sistemas de armazenamento que devem ser

ligados à rede elétrica no território nacional, mas também dá a conhecer categorias em níveis de tensão, e fica assim distribuídos:

- Alta Tensão (AT), tensão nominal composta de 35 kilovolt (kV) ou superior;
- Média Tensão (MT), tensão nominal de 20 kV;
- Baixa Tensão (BT), tensão nominal de 1 kilovolt (kV) ou inferior, sendo a tensão típica no nível de baixa tensão de 400 V (trifásico) e 230 V (monofásico);
- O valor nominal da frequência elétrica do sistema nacional é estabelecido em 50 hertz (Hz);

O Relatório Base para Cabo Verde (2014), elaborado em cooperação entre a Direção Geral de Energia e o Centro para as Energias Renováveis e Eficiência Energética da CEDEAO (ECREEE), informa que a distribuição de energia é efetuada na maioria das ilhas em redes de média tensão de 20 kV, com um total de 297.6 km de linhas aéreas e 538.7 km de linhas subterrâneas. Apenas a ilha de Santiago tem redes de 60 kV, e tem cerca de 43 km de extensão. O mesmo relatório ainda informa que em algumas ilhas essas redes estão sendo reforçadas para suportar maior penetração de energia de origem renovável.

CAPÍTULO 3 - ENERGIA EÓLICA

3.1. Comportamento ou movimento das massas de Ar

O movimento do ar é influenciado por diversos fatores, alguns desses fatores são, a radiação solar, que é maior na zona equatorial do que nos pólos e isso resulta em uma distribuição desigual de temperatura ao redor do globo, a rotação da terra, que produz o efeito Coriolis que influencia na direção do movimento do ar, fazendo com que o vento se desvie para direita no hemisfério norte e para a esquerda no hemisfério sul, e por último, a ação das massas de ar causadas pelas diferenças de pressão atmosféricas que se originam devido a diferentes superfícies terrestres e orografia. (LOPÉZ, 2012)

Ainda segundo o mesmo autor, em cada hemisfério se distinguem três grandes núcleos, sendo elas, a tropical, temperados e polares.

Nas latitudes equatoriais, a depressão originada pelo aquecimento das camadas inferiores da troposfera exerce um efeito de sucção de ar em ambos os hemisférios, provocando ventos alísios de componente este, de caráter muito regular, em direção ao equador, e se estendem até os 30 graus de latitude norte e sul.

Já os núcleos temperados estão separados pelas zonas tropicais de altas pressões situadas aos 30 graus de latitude, são zonas calmas, de fracas precipitações, e encontram-se em grandes desertos como o do Saara, Arabia, Kalahari e Austrália. Nessas zonas de altas pressões divergem tanto por ventos alísios como ventos do Oeste que se caracterizam por ser ventos fracos.

As zonas polares são consideradas geralmente por altas pressões e pouca precipitação. Delas são originados um fluxo aproximadamente da direção este, em direção a zonas de baixa pressão situada em latitudes próximas aos 60 graus.

As figuras 6 e 7 abaixo mostram os ventos predominantes nos meses de janeiro e junho:

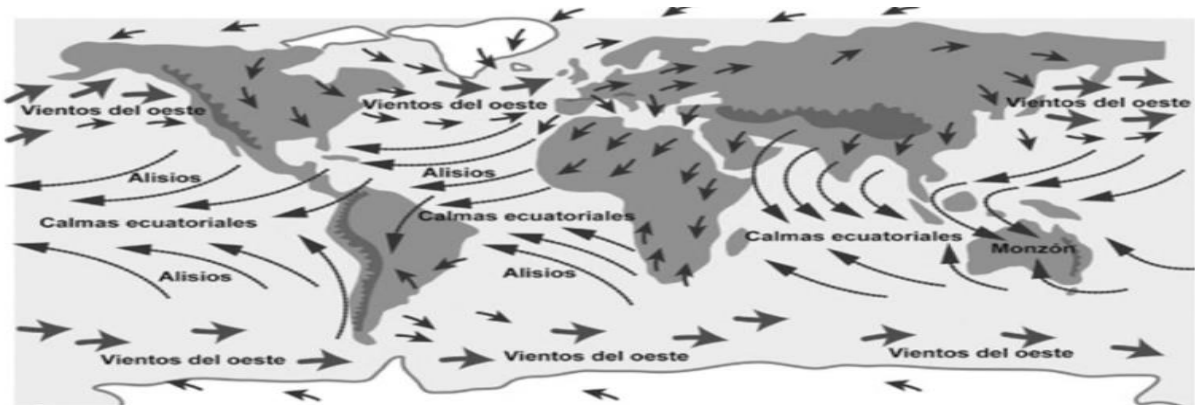


Figura 6 Ventos dominantes do mês de janeiro

Fonte: Lopéz (2012)

Os ventos Oeste, ainda apresentam maior descontinuidade que os ventos alísios tropicais, têm uma grande intensidade.



Figura 7 Ventos dominantes do mês de junho

Fonte: Lopéz (2012)

Destacam-se os ventos de monções, ventos úmidos que penetram as áreas tropicais do hemisfério norte, afetando principalmente a Ásia.

3.1.1. Variações Temporais da Velocidade dos Ventos

Outro fator importante a levar em consideração para fins de produção de energia elétrica através do aproveitamento da energia eólica são os tipos de variações temporais da velocidade dos ventos.

Então, torna-se necessário distinguir os vários tipos de variações temporais da velocidade dos ventos:

Variações anuais, quando são realizadas medições por pelo menos cinco anos, a velocidade média anual dos ventos em determinado local em maior quantidade de dados, permite que a determinação do regime dos ventos torne-se mais confiável.

As variações sazonais, que são originários do aquecimento desigual da Terra durante as estações do ano, provocam variações significativas na velocidade média ao longo dos meses. A utilização de médias anuais ao invés de médias sazonais pode levar a resultados menos realistas.

Variações diárias, onde o aquecimento desigual da superfície terrestre, em função da variação ao longo do dia da quantidade de radiação solar incidente, provoca alterações na velocidade do vento em regiões de diferentes latitudes. Em função da altitude também ocorrem variações e tem um comportamento diferente.

Variações de curta duração, são associadas a pequenas flutuações como também rajadas de vento. Estas variações são de importante conhecimento porque podem afetar a integridade estrutural do sistema eólico. (FADIGAS, 2004)

3.1.2. Parâmetros que influenciam na velocidade do Vento

O perfil de vento sofre influência de acordo com os parâmetros do local, e estes devem ser conhecidos quando se pretende estimar o regime de vento do determinado local. Os fatores que influenciam na velocidade do vento são, os obstáculos próximos ao local de medição, a rugosidade do terreno, identificando o tipo de vegetação, tipo de construção e utilização da terra, e por último, a orografia do terreno para localização de colinas e depressões existentes no local. Essas informações sobre o contorno do local podem ser

adquiridas através de dados topográficos, dados de satélites ou visitas ao local. (FADIGAS, 2004)

3.1.3. Variação da velocidade do vento com a altura com relação ao solo

Experimentos elaborados em mecânica dos fluidos mostram que a velocidade de um fluido que escoar próximo a uma superfície é nula, em função do atrito entre o ar e a superfície do solo. Levantando-se o perfil de velocidade do fluido com a altura, verifica-se que, no sentido perpendicular à altura, a velocidade passa de um valor nulo e atinge uma velocidade de escoamento V . Pode-se verificar que esta mudança é mais acentuada próxima a superfície e menos acentuada a grandes alturas. A mudança que ocorre no valor da velocidade na região junto à superfície é conhecida como camada limite. Na camada limite, normalmente o ar escoar com uma certa turbulência, devido à influência dos fenômenos como a densidade e viscosidade do fluido, o acabamento da superfície (rugosidade), a forma da superfície (presença de obstáculos).

A potência contida no vento então, é em função da densidade do ar, que por sua vez é em função da temperatura e pressão, sendo estes variáveis com a altura em relação ao solo.

Em estudos de aproveitamento energético dos ventos, dois modelos ou leis matemáticas são usualmente utilizados para representar o perfil vertical dos ventos: Lei da Potência e Lei Logarítmica. (FADIGAS, 2004)

3.1.2.1. Lei da potência

A autora afirma que a lei da potência resultou de estudos da camada limite sobre uma placa plana, é a mais simples de ser aplicada, mas não apresenta uma precisão muito apurada, e é dado por:

$$V = V_r (H/H_r)^n \quad (1)$$

Onde, V é a velocidade do vento na altura desejada, V_r é a velocidade do vento na altura de referência (medida), H é a altura desejada, H_r altura de referência e o fator n sendo o expoente da lei de potência. O fator n é diferente para os tipos de superfícies estudados e é um valor que se encontra tabelado. (FADIGAS, 2004)

3.1.2.2. A lei logarítmica

O modelo baseado na lei logarítmica é o mais complexo, pois leva em conta que o escoamento na atmosfera é altamente turbulento, pois é utilizado o parâmetro conhecido como L que é designado como o comprimento de mistura que por sua vez é definido com a utilização da constante de Von Kármán, K_c , e do comprimento da rugosidade, Z_o , que considera que a superfície da Terra nunca se apresenta totalmente lisa.

Então, para velocidades elevadas, o perfil do vento usando a lei logarítmica é dada pela equação 2:

$$V(z) = \frac{v_o}{K_c} \ln \frac{z}{z_o} \quad (2)$$

Onde, $V(z)$ é a velocidade do vento na altura z , z_o é o comprimento de rugosidade (caracteriza a rugosidade do terreno), K_c é a constante de Von Kármán ($K_c = 0,4$) e v_o é a velocidade de atrito, que é relacionada com a tensão de cisalhamento na superfície e a massa específica do ar. (FADIGAS, 2004)

Já para o caso de velocidades moderadas também segundo a mesma fonte, o perfil vertical do vento se desvia do perfil logarítmico quando z for superior a algumas dezenas de metros devido à turbulência, então neste caso acrescenta-se à rugosidade, os parâmetros necessários para descrever o fluxo de calor da superfície. Para fins genéricos utiliza-se:

$$V(z) = \frac{v_o}{K_c} \left[\ln\left(\frac{z}{z_o}\right) - \Psi\left(\frac{z}{L}\right) \right] \quad (3)$$

Onde Ψ é uma função empírica e o parâmetro L sendo a mistura de comprimento e é definido por:

$$L = \frac{T_o}{k_c g} \frac{C_p v_o^3}{H_o} \quad (4)$$

Onde, T_o é a temperatura absoluta, H_o é o fluxo de calor na superfície, C_p é o calor específico do ar à pressão constante, g é a aceleração da gravidade. (FADIGAS, 2004)

3.1.3. Natureza estocástica do vento

Um evento que ocorre de forma aleatória é dado como estocástico. O vento, por exemplo, tem características estocásticas e sua velocidade é uma variável aleatória contínua. Em tais casos é necessário discretizar os dados para facilitar a análise do vento. Essa discretização é mostrada na figura 8. (PINTO, 2014)

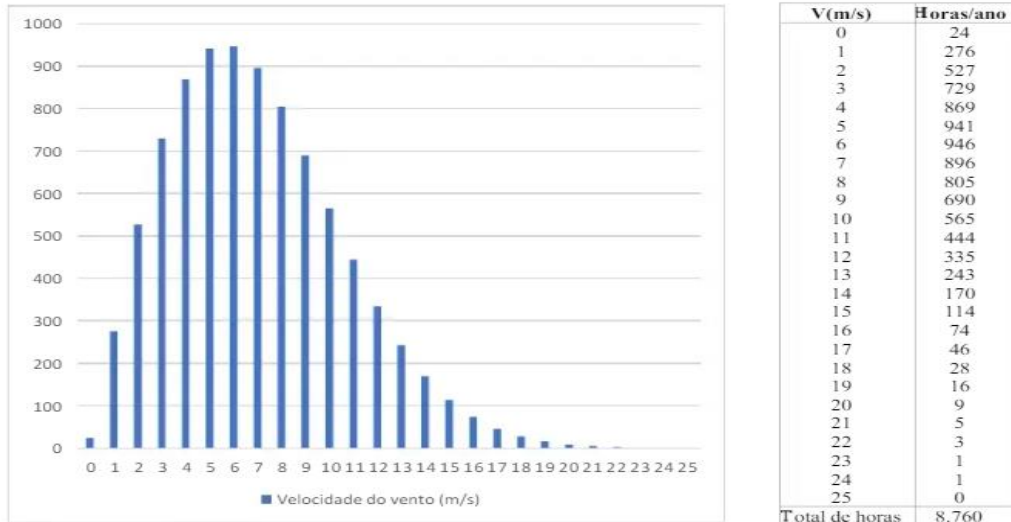


Figura 8 Discretização das velocidades do vento em forma de histograma

Fonte: Masters (2004)

Posteriormente, pode-se representar a distribuição da velocidade do vento da figura 6, por uma função de densidade de probabilidade $f(v)$, dada pela equação 5:

$$V = \int_0^{\infty} f(v)dv \quad (5)$$

Em estatística, há dois tipos de distribuição de probabilidade, a distribuição contínua e a distribuição discreta. A função de densidade de probabilidade que mais se ajusta à distribuição do vento é a chamada de distribuição de Weibull. (PINTO, 2014)

3.1.3.1. Função de Distribuição de Weibull

A função é frequentemente utilizada como ponto de partida para caracterizar as estatísticas da velocidade do vento, é chamada de função de densidade de probabilidade de Weibull, e é dada pela equação 6:

$$f(v) = (k/c) (v/c)^{k-1} e^{-(v/c)^k} \quad (6)$$

Em que v é a velocidade do vento (m/s), k é o fator de forma (m/s) e c é o fator de escala (adimensional).

O autor ainda apresenta como a variação do fator de forma k muda o formato da curva da função, mostrado abaixo. (PINTO, 2014)

Fixando o fator de escala em $c = 8$, e variando o fator de forma para $k = 1$, $k = 2$ e $k = 3$, tem-se o gráfico da figura 7:

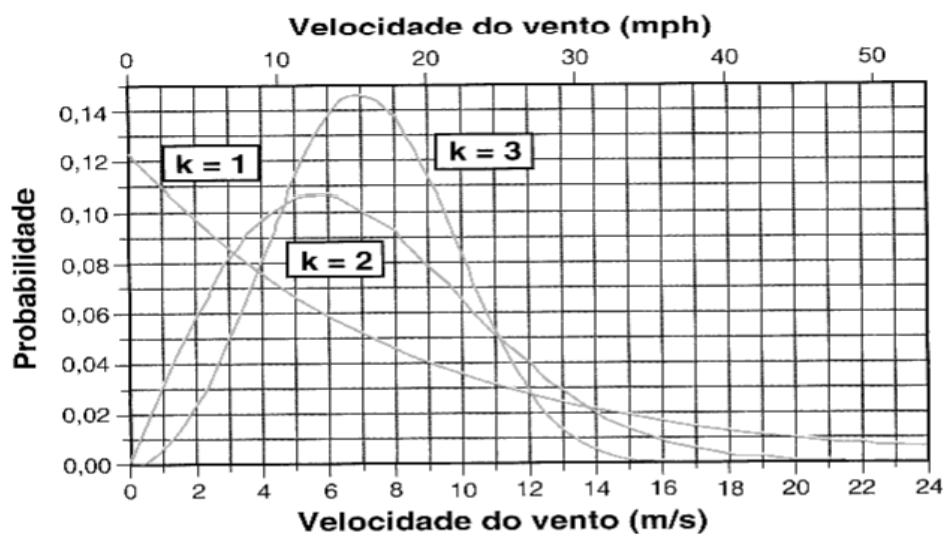


Figura 9 Função de densidade de probabilidade de Weibull com fator de forma (k) igual a 1, 2 e 3, e fator de escala (c) igual a 8

Fonte: Masters (2004)

Portanto para o gráfico a figura 9, vê-se que para $k = 1$ a curva se assemelha a uma função exponencial com decaimento, e provavelmente não seria uma boa região para as turbinas eólicas, já que a maioria dos ventos está em baixas velocidades. Para $k = 2$, o vento sopra moderadamente constante, mas há períodos em que o vento sopra bem mais firme do que a maioria das velocidades localizadas próximas ao pico da função. Para $k = 3$, a função se assemelha ao formato familiar de um sino, e a região da curva estaria onde boa parte dos ventos sopra, moderadamente constantes como os ventos alísios. Dessas três condições, o autor nos leva a achar que a curva em que $k = 2$ é a mais realista para a

provável área de ação de uma turbina eólica, área de ventos fortes, com períodos de vento bem baixos, como também alguns com alto valor. (PINTO, 2014)

3.1.3.1. Função de Distribuição de Rayleigh

Quando se conhece pouca coisa sobre o regime do vento, um bom ponto de partida é assumir $k = 2$, nesse caso, a função de densidade de probabilidade se chama distribuição de Rayleigh, usada geralmente em estudos preliminares, quando basta o conhecimento da velocidade média do vento para encontrar a sua frequência de distribuição. (PINTO, 2014)

Assim, com $k = 2$, a equação 7 abaixo, é dada por:

$$f(v) = (2v/c^2) e^{-(v/c)^2} \quad (7)$$

É importante observar as consequências da mudança do fator escala (c) para a distribuição de Rayleigh, conforme figura 10.

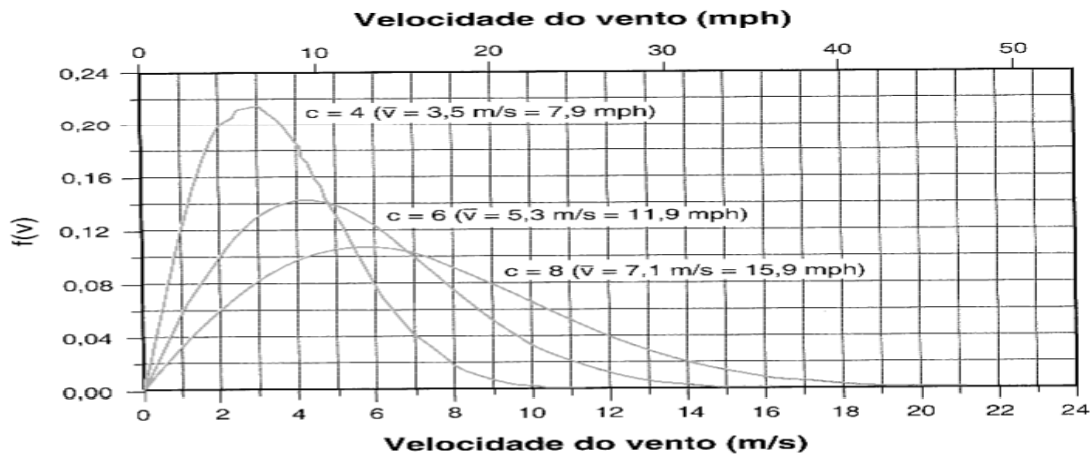


Figura 10 Função de densidade de probabilidade de Rayleigh com variação do fator de escala (c).

Fonte: Masters (2004)

A figura 10 acima mostra que um parâmetro de escala superior corresponde a uma velocidade média de vento maior.

A velocidade média do vento é dada pela equação 5, que é uma distribuição da velocidade do vento e pode ser representada por uma função densidade de probabilidade $f(v)$. Substituindo a equação 7 em 5, e indo na tabela de integrais, chega-se a:

$$\bar{v} = \int v \cdot f(v) dv = \int \frac{2v^2}{c^2} \exp \left[-\left(\frac{v}{c}\right)^2 \right] = \frac{\sqrt{\pi}}{2} c \cong 0,886c \quad (8)$$

Ou, ainda, a:

$$c = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \bar{v} \cong 1,128\bar{v} \quad (9)$$

Substituindo a equação 9 em 7, chega-se à distribuição de Rayleigh em termos da média da velocidade média:

$$\mathbf{f}(v) = \frac{\pi v}{2\bar{v}^2} \exp \left[-\frac{\pi}{4} \left(\frac{v}{\bar{v}}\right)^2 \right] \quad (10)$$

Em que, \bar{v} é a velocidade média do vento (m/s) e v é a velocidade do vento (m/s).

3.2. Aerogeradores: Aspetos Técnicos

Os aerogeradores são utilizados para a conversão de energia cinética do vento em energia elétrica, foram originalmente projetados para utilização em meio agrícola para moagem de grãos e mais recentemente é utilizado para transformar a energia eólica em energia elétrica. O funcionamento desses aerogeradores começa na captura do vento, onde as pás são projetadas para a captura da energia cinética do vento e são posicionadas de forma a garantir maior extração possível da energia do vento predominante. Com o giro das pás através do vento incidente provoca um movimento de rotação que é acoplado ao eixo do gerador. O eixo do gerador por sua vez converte a energia mecânica rotativa em energia elétrica, esse gerador pode ser do tipo síncrono ou de indução explicados mais abaixo neste trabalho.

Esse sistema então produz energia elétrica na forma de corrente alternada (CA), que pode posteriormente passar por uma subestação onde é feita a elevação ou rebaixamento da tensão dependendo do propósito. Essa energia ainda pode ser armazenada em baterias para ser utilizada posteriormente.

Recentemente, como forma de otimização, os aerogeradores modernos já são equipados com sistemas de controle, onde monitoram a velocidade do vento e ajustam automaticamente a orientação das pás de forma que o impacto do vento sobre as pás seja maior, e conseqüentemente, otimize o processo de produção de energia. O aerogerador neste caso irá operar de maneira mais eficiente, segura e em condições de vento diversas.

Os Aerogeradores diferenciam-se em dois tipos de configuração, quanto ao eixo do rotor que pode ser tanto horizontal como vertical.

3.2.1. Rotor de Eixo Vertical

São comumente denominadas de Darreius, fazem uso de aerofólios simétricos e ligeiramente curvados em forma de “C”. Essas turbinas foram desenvolvidas e comercializadas nos anos de 1970. A maior turbina de eixo vertical de maior potência foi instalada no Canadá e totaliza uma capacidade de 2.200 kW.

Esse tipo de turbina apresenta algumas conveniências como o fato que elas operam independentemente da direção do vento e também por possuírem a parte eletromecânica (rotor, caixa de transmissão e gerador) alocadas a nível de solo, reduzindo, portanto, os custos de instalação e manutenção.

Essa tecnologia também apresenta algumas inconveniências como elevados níveis de flutuação no binário em cada giro, não apresenta capacidade de auto-partida, limitada capacidade de regulação em altas velocidades e possui uma menor capacidade de produção de energia devido a velocidade do vento no solo ser muito baixa.

Face a resultados insatisfatórios referentes à sua pouca flexibilidade a ajustes a diferentes perfis de vento e, em especial, devido ao seu rendimento mostrar-se inferiores aos registrados pelas turbinas de eixo horizontal, as turbinas Darrieus tiveram seus desenvolvimentos e pesquisas interrompidas quase que mundialmente a partir do final dos anos de 1980. (SILVA, 2006)

3.2.2. Rotor de Eixo Horizontal

Essa tecnologia é claramente a mais eficiente, e conseqüentemente a que possui um maior custo. Esse aerogerador pode ser dividido em multipás e os rotores apresentam binário de arranque alto, possuem força de arrasto e de sustentação com maior eficiência em ventos fracos.

Todos os aerogeradores de maior potência são construídos com turbinas de eixo horizontal - Horizontal Axis Wind Turbines (HEWT). Elas consistem em uma torre e uma nacela, sendo a nacela montada no topo da torre. Na nacela se abrigam o gerador elétrico, a caixa de transmissão de velocidade e o rotor. Para a orientação do rotor na direção do vento os aerogeradores de eixo horizontal utilizam diferentes tecnologias dependendo do porte dessas turbinas. Nas turbinas de menores potências, o rotor e a nacela são orientados para a direção do vento através de um leme. Já em grandes turbinas, essa orientação é comandada por motores e automatismos, via sinal recebido de um anemômetro também instalado na parte superior da nacela. (SILVA, 2006)

3.3. Equação para cálculo de Potência Eólica

Como referido acima, os aerogeradores utilizam geradores síncronos e de indução para a conversão de energia mecânica de rotação das pás em energia elétrica.

A potência elétrica gerada em watts é dada pela função da velocidade ao cubo do vento conforme equação 11, e é apresentada abaixo:

$$P = \frac{1}{2} \eta \cdot C_p \cdot \gamma \cdot (\pi R^2) \cdot v^3 \quad (11)$$

Onde η seria a eficiência do aerogerador, considerando já as perdas no conjunto das transmissões mecânicas e perdas no gerador.

O C_p representa o coeficiente aerodinâmico de potência do rotor, cujo valor máximo C_{Pm} é de 0,593 e o valor usual assume 0,45. (BATISTELA ET. AL., 2000)

O termo γ equivale a $1,225 \text{ kg/m}^3$ a nível do mar e representa a massa específica do ar a $15 \text{ }^\circ\text{C}$. O termo R representa o raio do rotor da turbina em metros, e v a velocidade do vento em metro por segundo. (BATISTELA ET. AL., 2000)

3.3.1 Regulação da Potência da Turbina

Para a regulação da potência da turbina é necessário considerar variantes como a velocidade do vento e a velocidade angular.

A figura 11, ilustra a característica mecânica típica de uma turbina eólica evidenciando quatro zonas para distintas condições de vento. (MELO, 2008)

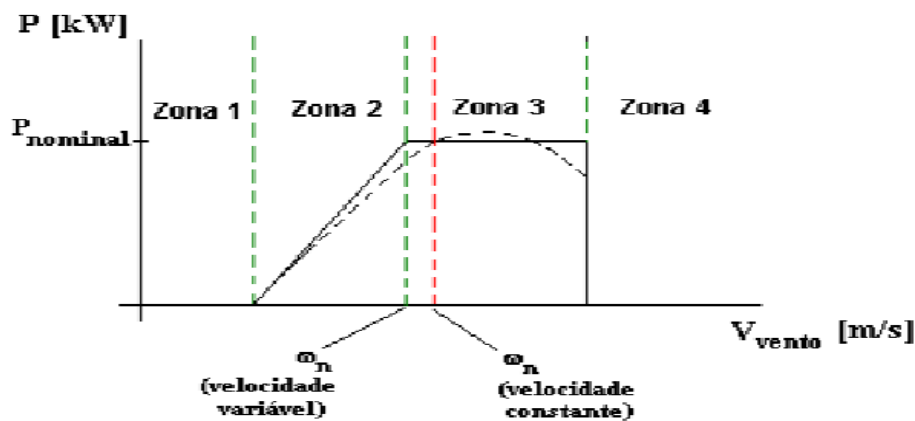


Figura 11 Característica mecânica típica de uma turbina eólica

Fonte: Melo (2008)

A linha a cheio representa velocidade variável e a linha tracejada a velocidade constante. O autor descreve cada zona do esquema acima, a zona 1 é dada pelos valores baixos de energia cinética do vento, portanto não permitindo a conversão de energia; na zona 2 os valores de potência convertidas são inferiores à potência nominal, aqui já se deve garantir que o valor de C_p seja máxima, o que só é possível nos sistemas de velocidade variável; na zona 3 já a potência convertida corresponde ao valor nominal da turbina, a energia cinética do vento nessa zona é superior à potência nominal, o valor de C_p deve ser reduzido, isso pode-se dar através desajuste do ângulo de ataque das pás, fazendo que a turbina opere a uma velocidade de rotação inferior à ideal as condições de vento para diminuir a eficiência, e aumento do arrasto aerodinâmico, sob a pena do sistema poderá entrar em sobrecarga; por último a zona 4 que representa o cenário oposto ao da zona 1, isto é, o valor elevado da velocidade do vento poderá danificar a turbina, sendo esta normalmente desligada. (MELO, 2008)

3.4. Tecnologia dos geradores utilizados na conversão de energia mecânica em energia elétrica

Existem várias configurações de sistemas de geradores para a conversão de energia mecânica gerada pelo aproveitamento eólico em energia elétrica, dito isso, falar-se-á apenas dos principais. Então, quando se refere ao tipo de gerador elétrico para esse tipo de geração são considerados dois grandes grupos, os geradores de indução trifásica e os geradores síncronos trifásicos.

Os sistemas de rotação fixa, baseados em máquinas de indução trifásicas (com rotor em gaiola de esquilo nas primeiras gerações, posteriormente, geradores de rotor bobinado), que são sistemas que hoje em dia quase não se utilizam, por serem menos eficientes e por não conseguirem extrair o máximo possível da capacidade do vento. São compostos por caixas de transmissão mecânica para compensar variações de rotação provenientes das alterações do vento.

Já nos geradores síncronos trifásicos (com rolamento de excitação e posteriormente, ímãs permanentes) pertencem a sistemas de rotação variável. São sistemas modernos de geração eólica e são parcialmente responsáveis pelo ótimo desenvolvimento da tecnologia energia eólica a nível mundial. Nesta configuração se pode utilizar geradores de gaiola de esquilo, geradores de indução duplamente alimentados ou os geradores síncronos a ímãs permanentes, que são atualmente os mais utilizados na indústria, pois operam em larga escala de velocidade, aproveitando melhor as curvas de potência.

Nos grupos de potência menores que 1 MW, o gerador síncrono apresenta velocidade de operação bem superior à da turbina exigindo um amplificador de velocidade acoplado entre a turbina e o gerador. Nos grupos de maior potência, maior de 1 MW, normalmente o gerador síncrono é fabricado com um número muito grande de pólos e para frequência nominal baixa, fazendo com que sua velocidade de operação seja da mesma ordem da turbina, não necessitando do multiplicador de velocidade, mas sim de um acoplamento planetário entre a turbina e o gerador. (MELO, 2008)

CAPÍTULO 4 – METODOLOGIA E CASO DE ESTUDO

É evidente os esforços que o país tem feito nesse quesito, onde a promoção da energia renovável e a transição energética têm sido pilares em temas de vários debates e políticas adotadas. Essa tecnologia já é mais estudada e consolidada no mercado, para que se tenha uma maior contribuição na matriz elétrica no país. Alguns estudos de auditoria energética, estudos de potencial de recursos renováveis e estudos de viabilidade técnica e financeira já foram também realizados no sentido de dar a conhecer a investidores e a população em geral que o país possui potencial renovável, principalmente a eólica e a solar, e que também políticas adotadas regionalmente está procurando formas de incentivar esse processo.

Portanto, no momento a eólica e a solar são as mais consolidadas no país, e estudos como o Relatório Base para Cabo Verde (2014) aponta outras conclusões na análise do potencial energético renovável em Cabo Verde, o referido relatório aponta recursos como o eólico com uma capacidade de instalação de aproximadamente 220 MW de potência; o recurso solar que é abundante no país com capacidade de instalação de aproximadamente 1500MW, estimando-se um potencial de produção anual de 2700 GWh/ano; o recurso hidrelétrico que não tem nenhum potencial energético no país mas o relatório considera como uma promissora tecnologia para armazenamento de energia eólica e solar através de um ciclo hidrológico fechado com aproveitamentos hidrelétricos reversíveis de bombagem de água, essa tecnologia permite armazenamento de energia em larga escala permitindo transferir a energia das horas de vazio para as horas de maior consumo; o recurso geotérmico considerada para uma das ilhas mais precisamente a ilha do Fogo onde recentemente teve atividades vulcânicas, essa tecnologia é considerada uma oportunidade para a ilha em específico por o sistema elétrico da ilha ser de reduzidas dimensões; por último o relatório considera que as ilhas mais a norte e nordeste possui algum potencial marítimo, devido ao país possuir um vasto território marítimo e as ondulações predominantes serem nesse sentido.

4.1. Avaliação de potencial Eólico no país

O Global Wind Atlas permite realizar consultas online e fornece conjuntos de dados disponíveis para download gratuitamente, baseados nos últimos dados de entrada e metodologias de modelação. Os utilizadores podem baixar mapas de alta resolução sobre o potencial de recursos eólicos para uso em ferramentas SIG a nível global.

4.1.1 Software utilizado nas Modelagens

O software Global Wind Atlas (GWA), é uma aplicação gratuita baseada na web desenvolvida para ajudar os responsáveis por formular políticas, planejadores e investidores a identificar zonas de ventos fortes para a geração de energia eólica em praticamente toda parte do mundo, e depois realizar os cálculos preliminares.

O software utiliza um processo de redução de escala, onde começa com dados climáticos de vento em larga escala e termina com dados climáticos de vento em microescala. Os dados climáticos de vento em larga escala são obtidos a partir de dados de reanálise atmosférica. Na versão 3.0 do GWA, é utilizado o conjunto de dados ERA5 do Centro Europeu de Previsões Meteorológicas a Médio Prazo (ECMWF) e os dados estão em uma grade com espaçamento de aproximadamente 30 Km. Esses dados são usados para forçar o modelo WRF (Modelo de Pesquisa e Previsão Meteorológica) de mesoescala utilizando um espaçamento de grade de 3 Km. Depois do processo de generalização desses dados, o resultado é um conjunto de dados de climas eólicos generalizados que têm o mesmo espaçamento que os dados de mesoescala usados para criá-los. (GLOBAL WIND ATLAS, 2024)

Em seguida, pega-se esse conjunto de climas eólicos generalizados e os aplica-se no sistema de modelação em microescala (DTU Wind Energy) em todo mundo (exceto os polos norte e sul e zonas oceânicas distantes da costa). O processo de modelação baseia-se em um cálculo do WAsP dos climas eólicos locais para cada 250 metros em cinco alturas: 10 m, 50 m, 100 m, 150 m, 200 m. Nessa escala de 250 m, há uma estimativa dos climas eólicos locais para cada nó, e no site do GWA, podem ser consultados conjuntos

de dados e ferramentas para analisar estatísticas baseadas nos valores da grade de 250 m. (GLOBAL WIND ATLAS, 2024)

Esta ferramenta foi desenvolvida em pelo Technical University of Denmark (DTU) em colaboração com o Banco Mundial e o ESMAP (Energy Sector Management Assistance Program).

4.1.2. Potencial Onshore

Abaixo é apresentado alguns dos resultados das modelações elaboradas para território onshore para as alturas de 50 e 100 metros.

4.1.2.1. Atlas realizada para 50 m de altura

Na figura 12 é apresentada a primeira modelação gerada para 50 metros de altura no Global Wind Atlas, percebe-se claramente a variação de velocidades de vento no país, variando desde a menor velocidade em alguns pontos da ilha do Fogo com 1.8 m/s até 13.87 m/s na ilha de São Vicente. No software, a modelação ainda dá a conhecer uma média de velocidade de 8.8 m/s para as áreas mais ventosas, o que se considera um bom potencial eólico para exploração para a altura considerada de 50 metros.

Os gráficos das figuras 13 e 14 apresentam a Densidade Média de Potência e a Velocidade Média do Vento para Cabo Verde, à altura de 50 metros.

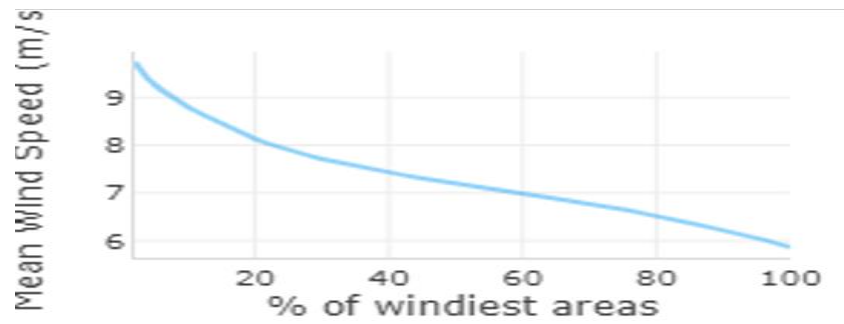


Figura 14 Velocidade média do vento a 50 metros de altura

Fonte: Autor, 2024

4.1.2.2. Atlas realizada para 100 m de altura

Para a altura de 100 metros foi gerado a figura 15, onde a modelação realizada no software chegou a uma velocidade média é de 9.98 m/s para as áreas mais ventosas, e a densidade média de potência para a área selecionada seria de 897 W/m².

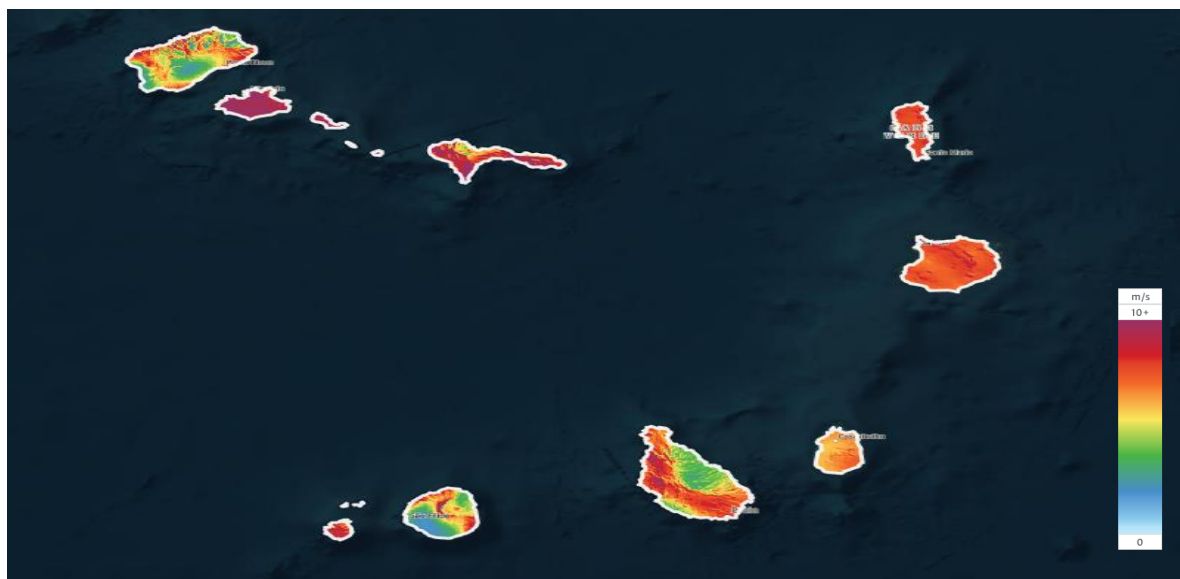


Figura 15 Potencial Eólico a 100 metros de altura

Fonte: Autor, 2024

Os gráficos das figuras 16 e 17, mostram a Densidade Média de Potência e a Velocidade Média do Vento para Cabo Verde, à altura de 100 metros:

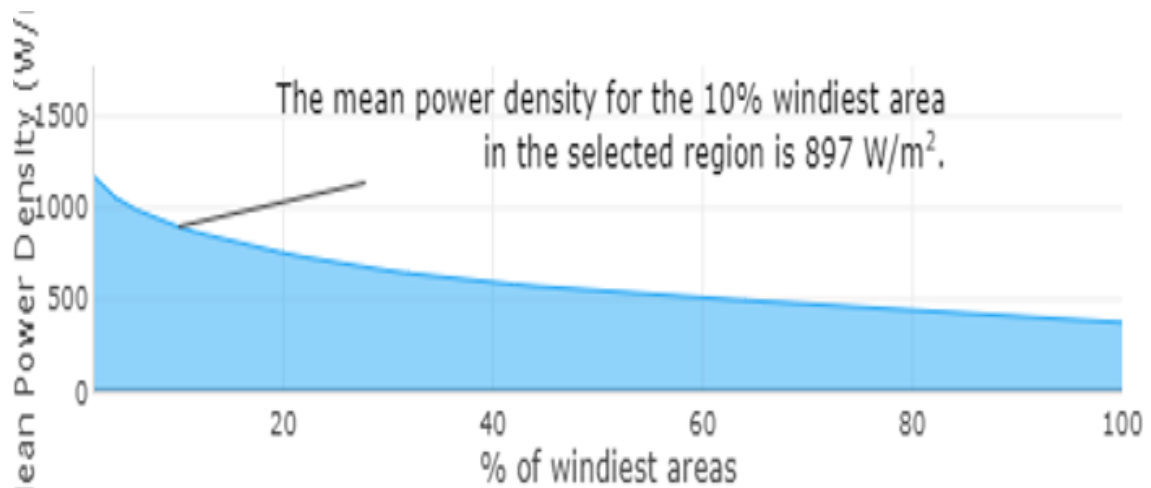


Figura 16 Densidade média de potência a 100 metros de altura

Fonte: Autor, 2024

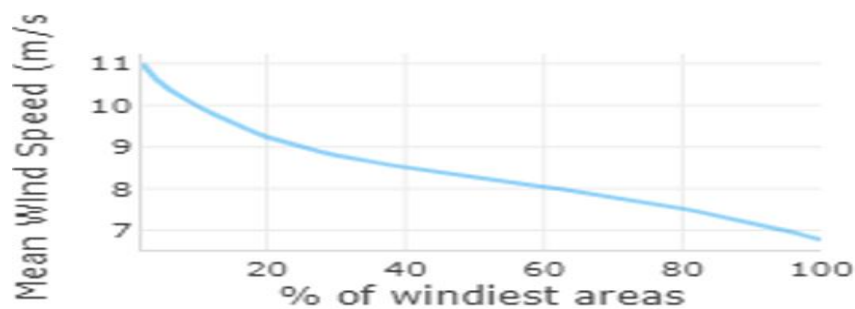


Figura 17 Velocidade média do vento a 100 metros de altura

Fonte: Autor, 2024

A densidade de potência média é uma das métricas cruciais para o estudo da energia eólica, contribuindo para quantificar a média de energia cinética disponível no vento por unidade de área e tempo. A variação dessa métrica se dá quando se varia a altitude, pressão atmosférica e a temperatura.

A velocidade do vento também é um dos requisitos mais importantes quando se fala da eólica, portanto, permite saber desde a escolha do aerogerador/turbina até estimar a produção anual de energia.

4.1.3. Análise do Potencial Eólico Offshore no país

Por causa de limitações do software utilizado, foi analisada apenas a velocidade de vento no território offshore nas alturas consideradas de 50 e 100 metros, apresentadas nas figuras 18 a 22, onde se pode observar algum potencial offshore.

4.1.3.1. Atlas realizada para 50 m de altura

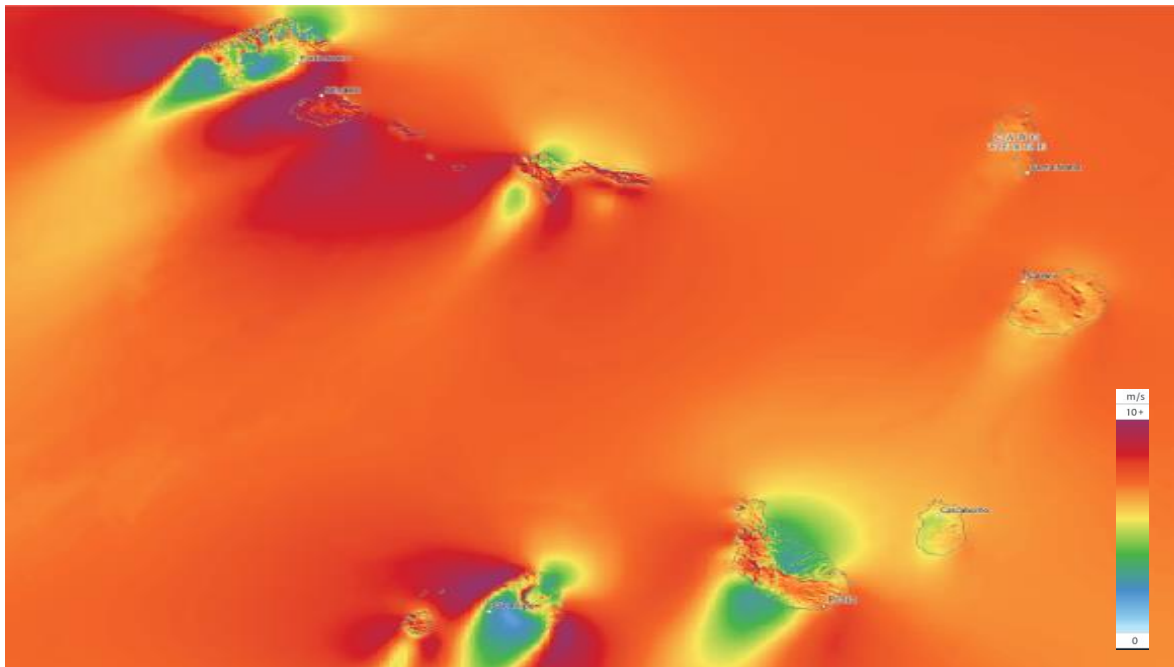


Figura 18 Potencial Eólico Offshore a 50 metros de altura

Fonte: Autor, 2024

5.5.1.1. Atlas realizado para 50 m de altura para algumas ilhas ao Norte

A figura 19 apresenta as ilhas ao Norte, Santo Antão, São Vicente e São Nicolau são ilhas que na costa de cada ilha apresentam velocidades consideráveis entre 9 a 10 m/s.

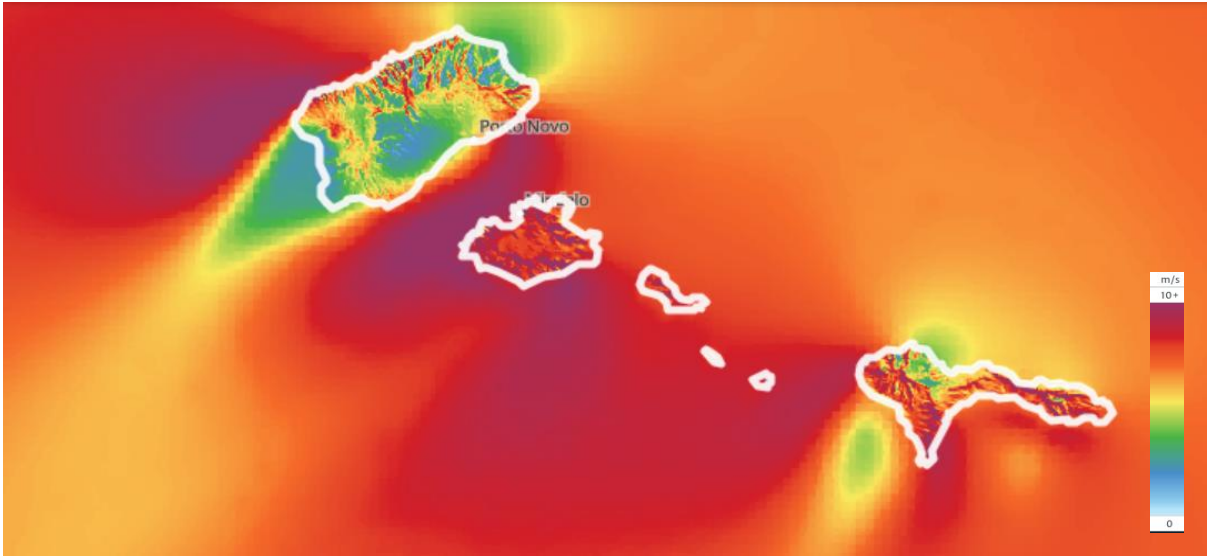


Figura 19 Potencial Eólico Offshore a 50 metros de altura para as ilhas de Santo Antão, São Vicente e São Nicolau

Fonte: Autor, 2024

Ao sul na figura 20, as ilhas com ótimo potencial eólico offshore são apenas as ilhas do Fogo e da Brava com velocidades variando também entre 8 e 9 m/s.

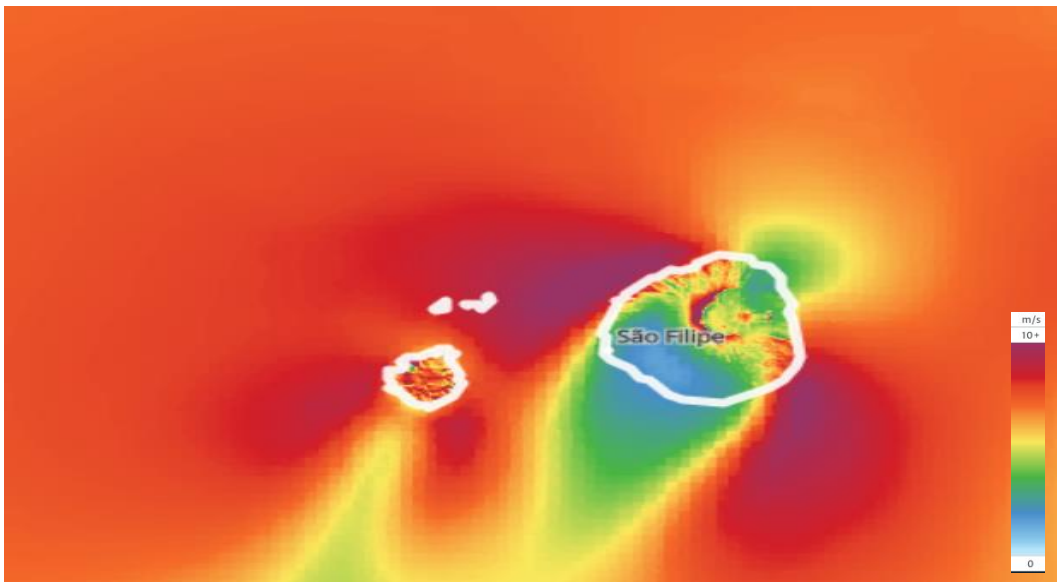


Figura 20 Potencial Eólico Offshore a 50 metros de altura para as ilhas de Fogo e Brava

Fonte: Autor, 2024

O restante das ilhas, como a ilha do Sal, Boa Vista, Santiago e Maio, mostradas na figura 21, são ilhas em que o potencial eólico à essa altura de 50 metros, é praticamente o mesmo tanto para alguns territórios onshore como para o offshore. As velocidades dos ventos nestas ilhas variam entre 6 a 8 m/s.

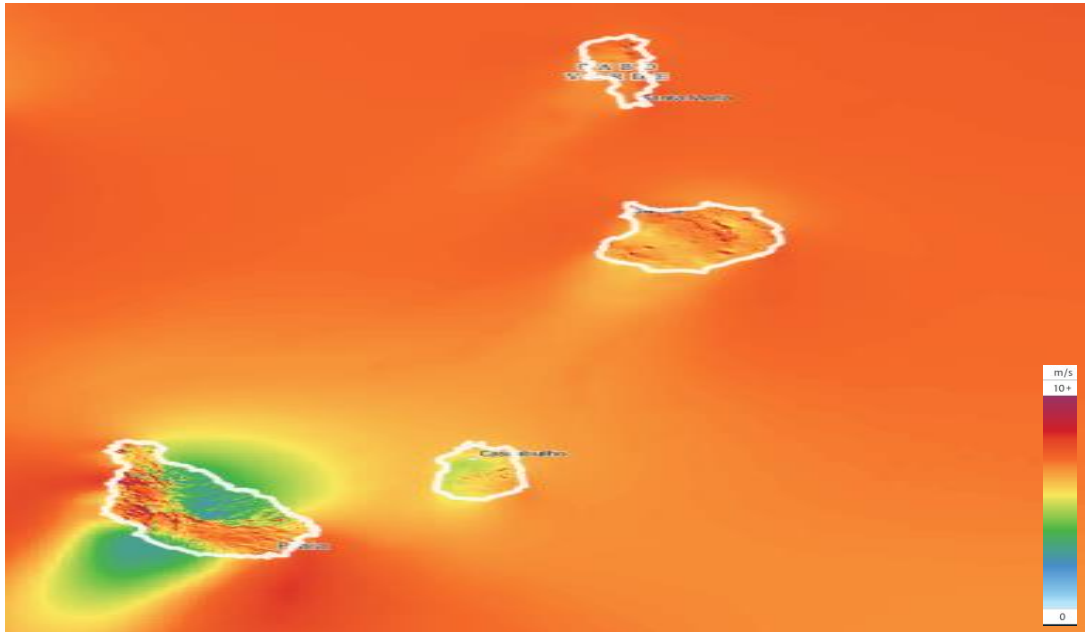


Figura 21 Potencial Eólico Offshore a 50 metros de altura para as ilhas do Sal, Boa Vista, Santiago e Maio

Fonte: Autor, 2024

4.1.3.3. Atlas realizada para 100 m de altura

Pelas análises elaboradas a 100 metros de altura, gerou-se a figura 22, onde se constata que existe potencial eólico offshore com velocidades mais ao norte do país variando entre os 9 e 11 m/s entre as ilhas de Santo Antão, São Vicente, Santa Luzia (ilha desabitada) e São Nicolau, considerado um ótimo potencial eólico para exploração. Mais ao Sul do país pode-se considerar a ilha de Santiago com pontos ao Norte e a Sul de Santiago variando entre os 8 e 9 m/s, a ilha do Fogo e Brava também com ótimo potencial entre os 9 e os 10 m/s.

Para essa altura de 100 metros, considera-se um aumento de mais ou menos 1 m/s em todo o território, tanto para o Onshore como para o Offshore a 50 metros da simulação anterior.

Então para a altura de 100 metros, considera-se um aumento de mais ou menos 1 m/s em todo o território, tanto para o Onshore como para o Offshore a 50 metros da simulação anterior. Os resultados dessa pequena alteração nas velocidades de vento entre um aerogerador de 50 metros para um de 100 metros, leva a crer que não se justificaria levando em conta o custo-benefício dos mesmos, pois o investimento seria maior em termos de equipamentos eólicos, mas também em termos de investimentos na rede elétrica e subestações de energia.

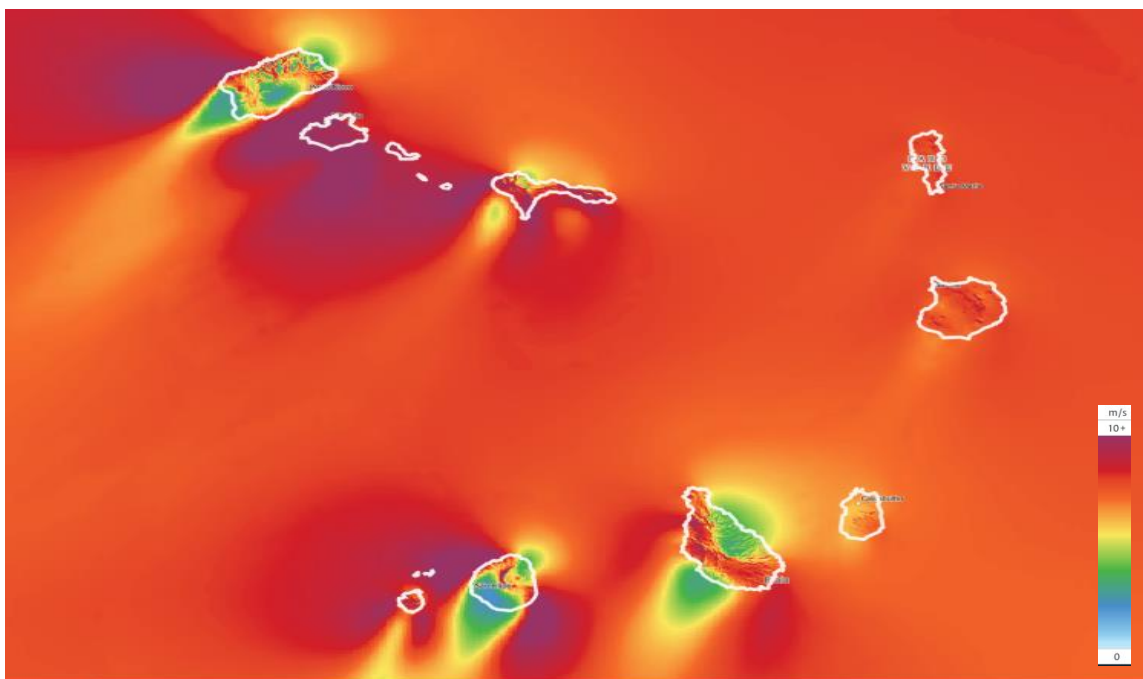


Figura 22 Potencial Eólico Offshore a 100 metros de altura para todas as ilhas

Fonte: Autor, 2024

4.2. DIMENSIONAMENTO DE AEROGERADORES

De acordo com as velocidades e potências de vento atrás encontradas, foram escolhidos 3 tipos diferentes de Aerogeradores, sendo 2 Onshore e 1 Offshore:

4.2.1. Aerogerador de 850 kW

O primeiro aerogerador escolhido, já instalado no país, é o do Modelo da Vestas V52, com potência nominal de 850 kW. Segundo o IEC (International Electrotechnical Commission), que define as classes de vento, esse aerogerador suporta ventos da classe I e II, que correspondem a ventos considerados altos e baixos respectivamente. A média anual de velocidade para a classe I é de 10 m/s e para a classe II de 8.5 m/s. O diâmetro do Rotor é de 52 metros, possui uma área varrida de 2124 m², número de pás 3. O peso total varia entre 109 a 143 toneladas, divididos entre a nacelle que pesa 22 toneladas, a torre pesa entre 77 a 111 toneladas, e o Rotor 10 toneladas. A velocidade do vento inicial seria de 3 m/s (cut-in wind speed), a velocidade nominal 14 m/s (rated wind speed) e a velocidade do vento de corte 25 m/s (cut-out wind speed). O gerador é do tipo assíncrono, velocidade máxima de 1947 r/min, voltagem de 690 V de saída, o seu fabricante é da ABB e da Weier. A torre tem um altura mínima de 40 m e a máxima de 65 m, no caso de Cabo Verde a altura da torre é de 55 metros e o fabricante é a Vestas.

A Curva de Potência do aerogerador V52/850 da Vestas, disponibilizado pela indústria é apresentado na figura 23.

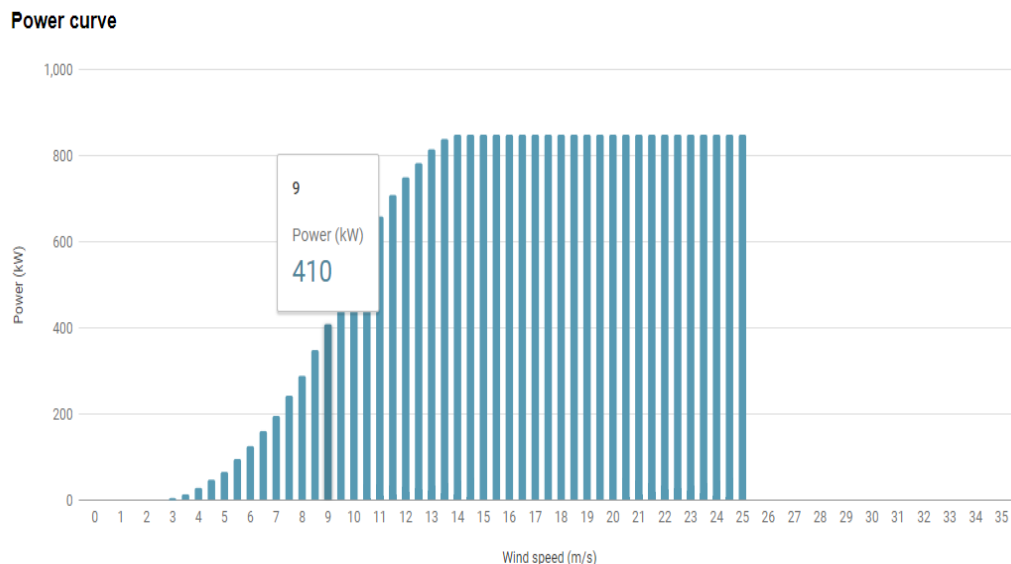


Figura 23 Curva de Potência do aerogerador V52/850 da Vestas

Fonte: The Wind Power (2024)

A Curva de Potência acima, levanta questionamentos referentes à escolha do referido aerogerador para o país. Dados dos relatórios da empresa Cabeólica, descritos acima, nos dá a conhecer o valor de 8.8 m/s de velocidade média anual, e outros dados obtidos na simulação elaborada pelo autor deste trabalho também apresentam velocidade não superior a 11 m/s na maioria do território nacional com a exceção da ilha de São Vicente com ventos chegando a 13 m/s. No gráfico de Curva de Potência destacou-se a velocidade de vento de 9 m/s que é mais ou menos a média em todo país e a potência gerada por esse aerogerador seria de 410 kW, o que seria praticamente um pouco mais da metade da potência nominal do aerogerador em destaque.

4.2.2. Aerogerador de 1800 kW

O segundo aerogerador proposto seria o modelo V100/1800 da Vestas com uma média de potência de 1800 kW, diâmetro de rotor de 100 metros, suporta ventos da classe III, considerados até ventos lentos com velocidade média de 7.5 m/s, possui área varrida de 7854 m², números de pás 3. No rotor a velocidade do vento inicial seria de 4 m/s (cut-in wind speed), a velocidade nominal 12 m/s (rated wind speed) e a velocidade do vento de corte 20 m/s (cut-out wind speed). O gerador é do tipo assíncrono. Na torre, a altura mínima é de 80 metros, e máxima de 120 metros.

A Curva de Potência do aerogerador V100/1800 da Vestas, disponibilizado pela revista científica *The Wind Power* nos dá a conhecer a figura 24.

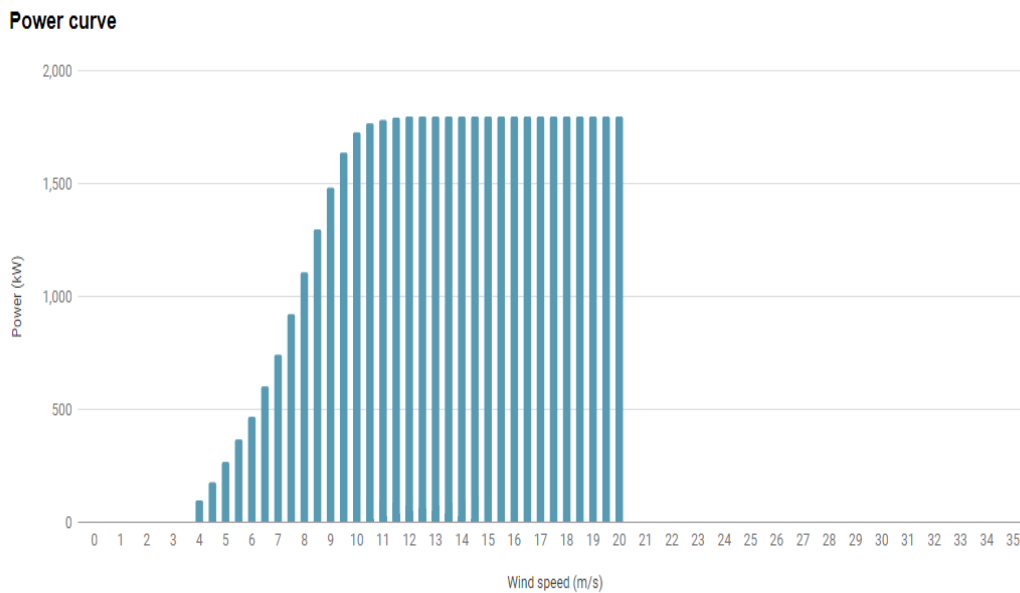


Figura 24 Curva de Potência do aerogerador V100/1800 da Vestas

Fonte: The Wind Power (2024)

Para considerar esse modelo, o país teria que fazer grandes investimentos em linhas de transmissão, redes de distribuição até subestações e postos de transformações de energia, e por último teria que se pensar em grandes sistemas de armazenamento de energia. Para velocidades médias registradas no país esse modelo geraria uma potência de mais ou menos 1500 a 1750 kW, o que implicaria um aumento significativo de penetração de energia renovável em algumas ilhas. A logística desde portos e estradas até chegar nos locais de instalação também teria alguns empecilhos.

4.2.3. Aerogerador de 500 kW

Este aerogerador da Vestas Modelo V39/500 que pode ser utilizado tanto Onshore como Offshore em distâncias curtas do continente, foi instalado na em uma ilha na Dinamarca a 5 Km de distância e foi instalado a uma profundidade de 5 metros. Tem uma potência nominal de 500 kW, diâmetro de rotor de 39 metros, área varrida de 1195 m², número de pás 3. O velocidade máxima do rotor é de 30 r/min, a velocidade inicial do vento seria de 4.5 m/s (cut-in wind speed), a velocidade nominal 15.5 m/s (rated wind speed) e a velocidade do vento de corte 25 m/s (cut-out wind speed). Opera a uma densidade de

potência de 418.4 W/m², O gerador é do tipo Assíncrono e tem uma tensão de saída de 690 V à uma frequência de 50 Hz. A torre é de aço e tem uma altura de 40.5 a 53 metros. O peso total seria de 85 toneladas.

A Curva de Potência do aerogerador V39/500 da Vestas, disponibilizado pela revista científica The Wind Power nos dá a conhecer o gráfico da figura 25 abaixo:

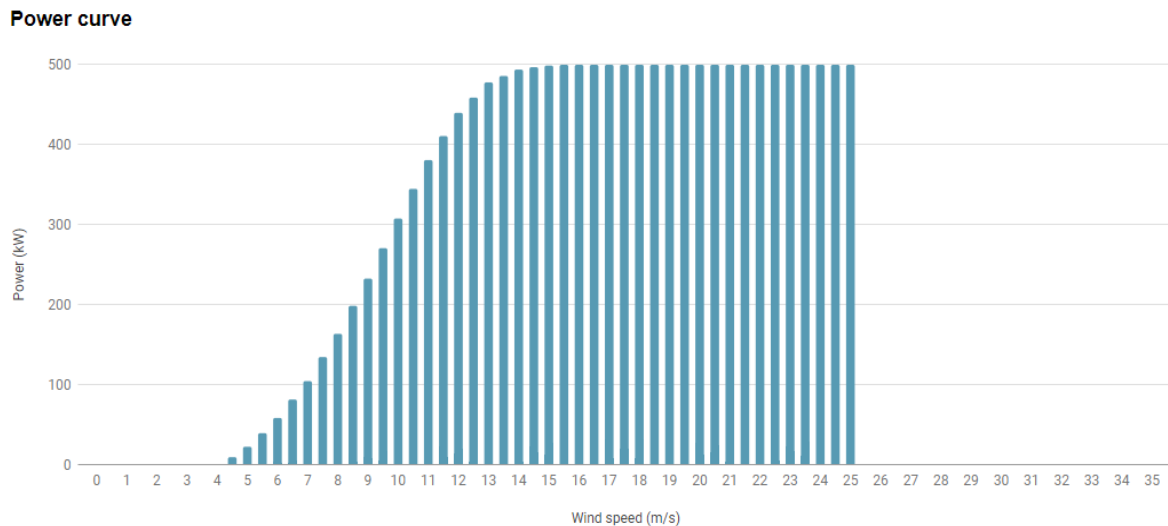


Figura 25 Curva de Potência do aerogerador V39/500 da Vestas

Fonte: The Wind Power (2024)

Esse último aerogerador Offshore tem características técnicas parecidas com o já instalado Onshore no país, portanto em termos de redes de transmissão, subestações e postos de transformação não se exigiria muitas mudanças técnicas. Mas, por ser uma tecnologia nova no país, a fundação dos aerogeradores no território marítimo e a disposição de cabos até chegar à subestação ou posto de transformação e a sua manutenção seria algo a se ter bastante atenção em relação ao seu custo-benefício.

CAPÍTULO 5 - ANÁLISE DE RESULTADOS E DA VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÓMICA

5.1. Análise quantitativa e escolha de localização dos parques eólicos offshore

O Aerogerador escolhido para os parques seria o descrito acima, o aerogerador da Vestas Modelo V39/500, de potência nominal de 500 kW, que pode ser utilizado tanto onshore e offshore. De acordo com as análises elaboradas acima a 50 metros de altura, as ilhas com melhores densidades e velocidades de vento na área offshore seriam Santo Antão, São Vicente, São Nicolau, ao norte, e a sul, Santiago e Fogo. A figura 26 ilustra esse fato.

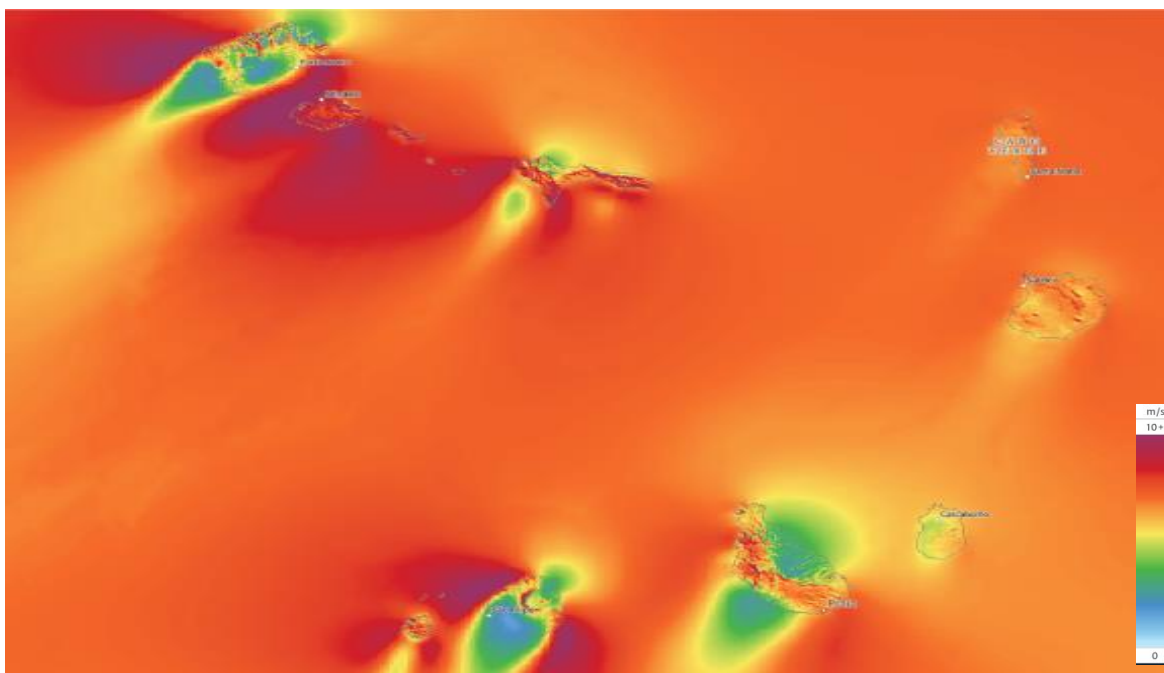


Figura 26 Potencial Eólico Offshore de Cabo Verde

Fonte: Autor, 2024

O autor deste trabalho propôs, que para esses cinco parques offshore reduzisse a produção térmica em pelo menos 30% a 35%, o que levaria a um aumento significativo de energias

renováveis no país, e conseqüentemente uma redução significativa da queima dos derivados de petróleo utilizados nas termelétricas.

A tabela 1 abaixo mostra os detalhes de como ficaria distribuída esses parques e o número de aerogeradores que constituiria cada ilha.

Tabela 1 Distribuição dos aerogeradores offshore a serem instalados por ilha.

Ilhas	Potência Térmica Instalada (kW)	Potência Eólica Instalada (kW)	Eólica Onshore Instalada (%)	Aerogeradores Offshore a Instalar	Potência Offshore a Instalar (kW)
Santo Antão	6 600	500	7.57	4	2 000
São Vicente	24 443	5 950	24.3	3	1 500
São Nicolau	4 420	0	0	3	1 500
Santiago	76 255	7 650	10	30	15 000
Fogo	8320	0	0	5	2 500

Fonte: Autor, 2024

De acordo com os cálculos elaborados para que a produção eólica chegasse a pelo menos 30% da potência instalada térmica em cada ilha, foi então constatado que precisaria de 5 parques com um total de 45 aerogeradores offshore a ser instalados no país, divididos como apresentado acima na tabela 1.

5.2. Desenvolvimento do Projeto

Neste tópico se atentará apenas a cálculos gerais sobre o desenvolvimento de um projeto eólico offshore e custos envolvidos em cada fase.

Um modelo de equações simplificadas para avaliação financeira e de custos são propostos para projetos de fazendas eólicas offshore. (DÍAZ E SOARES, 2023)

O primeiro seria o que o autor designa de Desenvolvimento de um Projeto Offshore (PD, sigla em inglês) que geralmente começa cerca de cinco anos antes da instalação, com estudos relacionados a levantamentos geofísicos, monitoramento de vento, licenças, avaliação de impacto ambiental e gerenciamento de projetos. (DÍAZ E SOARES, 2023)

Na equação 12 abaixo, calcula-se então um valor monetário que representa um custo total do desenvolvimento de um parque eólico em relação à capacidade do mesmo (WFC em kW). (DÍAZ e SOARES, 2023)

$$\mathbf{PD} = 180,9 \times \mathbf{WFC} = 180,9 \times 22500 = \mathbf{4\ 070\ 250\ €} \quad (12)$$

A sigla PD se refere ao Desenvolvimento de um Projeto Offshore e custaria cerca de 4 070 250 €.

A equação 13 apresenta-se os cálculos para estimativa do valor da turbina e da torre que são um dos principais componentes que dirigem os custos desse tipo de tecnologia, com WFC em kW.

$$\mathbf{T\&T} = 1081 \times \mathbf{WFC}^{0.991} = 1081 \times 22500^{0.991} = \mathbf{22\ 224\ 836\ €} \quad (13)$$

A sigla T&T corresponde a Turbina e Torre e o custo seria de 22 224 836 €.

Também deve-se considerar as estruturas flutuantes. Aspectos técnicos como a localização e condições de capacidade instalada da turbina influenciam substancialmente o custo das plataformas flutuantes.

O autor ainda afirma que as plataformas construídas em concreto fazem com que a subestrutura sofra uma redução de custo, tornando-se 5 a 20 vezes menos dispendioso. Para esta análise precisar-se-ia de mais detalhes e de dados de componentes secundários de aço e peças de transição que influenciam na complexidade da fabricação. (DÍAZ E SOARES, 2023)

Segundo a mesma fonte, o que influencia nesse aspeto ainda é o sistema de ancoragem, que vai depender do número de âncoras, número e comprimento de linhas e a profundidade da água.

As equações a seguir devem ser consideradas em estruturas flutuantes, para estes cálculos foram utilizados o WFC (capacidade do parque eólico) em MW. Os valores encontrados foram somados e foram apresentados abaixo:

$$\text{TLP steel} = 93450 \times \text{WFC} \quad (14)$$

$$\text{SPAR steel} = 374000 \times \text{WFC} \quad (15)$$

$$\text{Semisub steel} = 750000 \times \text{WFC} \quad (16)$$

$$\text{TLP concrete} = 66775 \times \text{WFC} \quad (17)$$

$$\text{SPAR concrete} = 247285 \times \text{WFC} \quad (18)$$

$$\text{Semisub concrete} = 496429 \times \text{WFC} \quad (19)$$

Sendo o WFC usado acima 22,5 MW os resultados obtidos para a estrutura de Aço (steel) é de **27,4 M€**, e para estrutura concreto o valor seria de **18,3 M€**. Portanto a estrutura de concreto é realmente menos dispendiosa como o autor referiu mais acima, com uma redução de quase 10 M€.

O TLP (Tension Leg Systems), ou Sistemas de Pernas Tensionadas que são comumente utilizados para ancorar plataformas, a estrutura é posicionada com tendões verticais e ancoradas com estacas cravadas para contrabalançar altas cargas de tensão. Enquanto que o SPAR, Sistemas de Ancoragem Espalhados, utilizam linhas em catenária, semi-tensionadas ou tensionadas. Essas linhas são ancoradas com âncoras de arrasto ou estacas de sucção, que são compostas por corrente, fio de espiral, poliéster ou outros componentes de corda sintética.

Para o cálculo de Conexão à Rede (Grid Connection, GC), que é altamente variável, e o custo da capacidade da rede, da distância e do caminho seguido pelo cabo.

Na equação a seguir percebe-se que o custo da conexão à rede depende da capacidade do parque eólico.

$$\text{GC} = 259375 \times \text{WFC}[\text{MW}] = 259375 \times 22,5 = \mathbf{5\ 835\ 937,5\ €} \quad (20)$$

Para essa análise, teria que se considerar para ter mais precisão, mais especificações técnicas levantadas do local como o custo inter-array, cabo entre as turbinas que está na faixa segundo autor de 299 k€/km, e a profundidade da água. Dependendo do design da rede pode-se atingir a perda de energia na faixa de 30-45%. (DÍAZ E SOARES, 2023)

Para a Operação e Manutenção (O&M) são utilizadas as estratégias de manutenção preventiva baseada em calendário, manutenção preventiva baseada em condição e corretiva planejada e manutenção corretiva não planejada. Para a operação, são considerados o pessoal associado e a embarcação. A equação generalizada regente utilizada para esta parte é a equação 21. (DÍAZ E SOARES, 2023)

$$\text{O\&M} = 50129,6 \times \text{WFC}[\text{MW}] = 50129,6 \times 22,5 = \mathbf{1\ 127\ 916\ €} \quad (21)$$

A última parte de custos a considerar ainda segundo o mesmo autor é o Descomissionamento, que seria a fase onde as turbinas eólicas flutuantes são descomissionadas após sua vida útil operacional (25 a 30 anos). O local da instalação offshore é limpo e algumas atividades de monitoramento são realizadas. Abaixo a equação generalizada:

$$\text{Decomissionamento} = 137500 \times \text{WFC}[\text{MW}] = 137500 \times 22,5 = \mathbf{3\ 093\ 750\ €} \quad (22)$$

5.3. Análise Económica da Venda e Distribuição de energia em Cabo Verde

Um país onde as perdas de eletricidade globais (técnicas e não técnicas) a nível nacional atingiram 114,5 GWh em 2022, representando cerca de 24,4% da produção tem-se que se ter atenção a investimentos volumosos como seria a instalação de um parque eólico offshore. (RELATÓRIO ELECTRA 2022)

A Agência de Regulação Multisectorial da Economia (ARME), é a instituição que regulariza desde preços de compra e venda de energia, e a venda de combustíveis tanto para transporte como para produção de energia no país.

Os preços de energia praticados em Cabo Verde publicados pela ARME em 2023, apresenta as tarifas de eletricidade para consumo, que são divididos por escalões:

- Baixa Tensão Doméstica, com taxas para um consumo com menor ou igual a 60 kWh/mês por 34,12 escudos caboverdianos (ECV) por kWh que equivale a 31 centimos (0,31€) por kWh.
- Baixa Tensão Doméstica, com taxas para um consumo superiores a 60 kWh/mês por 41,53 ECV/kWh que equivale 38 centimos (0,38€) por kWh.
- Baixa Tensão Especial, a 37,37 ECV/kWh equivalente a 34 centimos (0,34€) por kWh.
- Média Tensão, a 32,70 ECV/kWh equivalente a 30 centimos (0,30€) por kWh.
- Iluminação pública, a 34,12 ECV/kWh equivalente a 31 centimos (0,31€) por kWh.
- Consumo Interno de Produção de Água, a 30,6 ECV/kWh equivalente a 28 centimos (0,28€) por kWh.

Os valores acima são praticados em todas as ilhas excepto na ilha da Boa Vista, onde a exploração do setor energético e a produção de água é feita pela empresa privada, Água e Energia de Boa Vista (AEB), onde os valores praticados são ainda maiores (10 a 15%) em todos os escalões descritos acima. (ARME, 2023)

A ARME estabeleceu para o caso de produtores de eletricidade no regime geral e de microgeração, com origem em fontes energias renováveis, o valor máximo de 8,04 ECV (0,073€) por cada kWh injetado na rede pública, e para a venda de excedentes de produção para o regime de microgeração o mesmo valor. O que implicaria dizer que para cada 1 MWh injetado na rede equivaleria a 73€. Lembrando que no país a tarifa cobrada por kilowatt-hora é única, ou seja, independe do horário do dia ou estação do ano. (ARME, 2023)

5.4. Tempo de Retorno de Investimento

Para a simplificação dos cálculos foi utilizado a produção da empresa Cabeólica apresentada acima, já que a potência instalada é quase o mesmo do proposto por este trabalho.

Foi considerado então, a energia produzida no ano de 2022 que é de 72.294,00 MWh. O investimento total que é dado pela soma dos custos calculados nas equações acima que é de 51.558.939,5 € (51,6 M€). O preço por cada 1 MWh injetado na rede praticado pelo país, também visto anteriormente, seria de 73€ segundo a ARME.

Dito isso, apresenta-se os cálculos baixo do tempo de retorno do investimento (Payback time):

$$\text{Payback time} = \frac{\text{Total Investimento}}{\text{Cashflow}_{\text{per period}}} = \frac{51\,558\,939,5}{72\,294 * 73} = 9,76 \text{ anos} \quad (23)$$

Com isso tem-se então uma estimativa simplificada do investimento dos parques eólicos offshore, que segundo os cálculos acima o tempo de retorno do investimento total seria de aproximadamente 10 anos.

5.5. Programas de Eficiência Energética desenvolvido em Cabo Verde

A eficiência energética abarca programas desde a diminuição de custos operacionais e redução do consumo de energia, até a sustentabilidade ambiental.

Segundo os relatórios da Electra SA, a empresa ainda passa por constrangimentos por não conseguir faturar uma boa parte da energia elétrica distribuída na rede. As perdas não técnicas no país (sendo elas roubo, furto e fraude) ainda é um problema constante no país e não parece ter uma solução a curto prazo. Medidas como a substituição de contadores analógicos por digitais (alguns bidirecionais para controle de microprodução renovável injetada na rede) e contadores pré-pagos são algumas das soluções que a empresa encontrou para a luta contra esse constrangimento com que se encontra suscetível.

A fiscalização da rede elétrica, desmantelamento de ligações clandestinas de roubo e fraude de energia é um investimento que a empresa tem feito ao longo dos últimos anos e tem demonstrado alguns resultados satisfatórios, mas claramente não é o suficiente.

Por ser um país onde a população tem pouco poder de compra, o consumo doméstico chega a ser elevado devido ao consumo energético de eletrodomésticos que não tem as melhores classificações em etiquetagem energética. Isso influencia não só no custo de eletricidade a pagar à distribuidora de energia, mas também estimula a produção termelétrica, ou seja, quanto maior o consumo maior a produção.

Na Iluminação Pública a substituição de lâmpadas incandescentes ou de vapor de sódio por LEDs, foram também alguns programas desenvolvidos em algumas ilhas. Essa mudança tem um impacto visual nas ruas, mas se torna necessário devido ao consumo evitado.

O governo local tem procurado medidas de promoção de energias renováveis no país, com medidas de abono fiscal à importação dos mesmos. Entidades que pretendem adquirir principalmente equipamentos para aproveitamento solar, tanto para o setor empresarial como para o consumo doméstico o podem fazer sem grandes custos alfandegários.

5.5.1. Sugestões de melhoria do Sistema Elétrico de Cabo Verde

Para a realidade de Cabo Verde, onde o seu território é bastante fragmentado e dividido pela água do mar em profundezas e distâncias consideráveis, não se pode produzir grandes quantidades de energia elétrica em apenas um só lugar, então pode-se considerar duas sugestões:

A primeira sugestão seria a implementação de mais parques eólicos, parques solares, e um robusto sistema de armazenamento de energia para horas de baixa na produção renovável. Esse sistema por depender da sazonalidade e do consumo energético ficaria sujeito a uma melhor integração da rede elétrica pública, e manteria ainda uma menor capacidade instalada das termelétricas para garantir o suprimento da demanda em horas de diminuição da produção renovável. Nesse ponto ter-se-ia que se considerar um investimento substancial em parques eólicos (já demonstrado acima neste trabalho), em

sistemas de armazenamento, e no fortalecimento e automatização de redes elétricas (Smart-Grids).

A outra sugestão seria na melhoria da eficiência energética na produção das termelétricas a diesel no país. A literatura propõe avanços na tecnologia das termelétricas com o aproveitamento de turbinas aeroderivativas que estão sendo adaptadas para produção de eletricidade devido sua alta eficiência e menor consumo de combustível. São sistemas compactos, fácil de instalação e manutenção menos dispendiosa. Para o caso de Cabo Verde teria que se considerar as logísticas do combustível usado nesse ciclo de produção (normalmente gás) e a viabilidade técnica e financeira por se tratar de uma tecnologia nova e não existente ainda no país.

5.6. Contribuições ambientais com a implementação de parques eólicos na matriz elétrica de Cabo Verde

Nenhuma fonte de energia utilizada até hoje se encontra isenta de algum impacto ambiental. Uns apresentam claramente mais impactos, outros menos, outros como o caso da energia nuclear quando a fissão ou fusão nuclear apresenta vazamentos nos reatores ou não é controlada pode causar desastres catastróficos, mas todas as fontes de energia apresentam algum tipo de impacto ambiental, seja na exploração, produção ou no descarte depois da vida útil do mesmo.

As principais fontes emissoras de CO₂ e aponta o aumento da produção de eletricidade a quase 50% durante a era industrial no início do ano 2000. Os autores ainda afirmam que a estimativa global das emissões de CO₂ dos combustíveis fósseis aumentou para cerca de 25.000 toneladas em 2002, e que os combustíveis fósseis ainda permanecerão como a principal fonte de energia que aumentará em mais 90%, isto mostra que é evidente o aumento da procura global por energia e espera-se que aumente mais 67% até 2030. (YORO & DARAMOLA, 2020)

A mesma fonte explora a possibilidade da geração de eletricidade em usinas ainda tenha a queima de combustíveis fósseis como principal forma de obtenção de energia, o que leva a concluir que a produção de eletricidade e a indústria continuarão a emitir grandes

quantidades de CO₂ para a atmosfera se outras formas de produção de energia mais limpas não forem exploradas.

Um artigo publicado pela Associação Lusófona de Energias Renováveis (ALER) afirma que a eletricidade gerada pelos quatro parques eólicos onshore em funcionamento no país evitou cerca a emissão de 47.261 toneladas de CO₂ no ano de 2022, 47.414 toneladas de CO₂ no ano de 2021 e para o ano de 2020 foi de 44.400 toneladas, o que está longe do desempenho de um dos ápices da empresa que foi de 53.600 toneladas de CO₂ evitadas no ano de 2019. (ALER, 2022)

Neste trabalho sugeriu-se que se reduzisse trinta a trinta e cinco por cento da produção térmica em cinco ilhas, o que equivaleria a uma redução de 22.500 kW de potência térmica instalada. A potência eólica no país praticamente se dobraria, o que, mediante alguns cálculos baseado na afirmação acima feita pela ALER, permite-se assumir que se evitaria quase 100.000 toneladas de CO₂.

CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES

É inquestionável a importância do papel das energias renováveis em todo o mundo, e isso se torna uma realidade não só para países desenvolvidos, mas também para países em desenvolvimento com o preço dessas tecnologias mais acessível a cada ano, e a sua contribuição ambiental.

Neste trabalho, avaliou-se, o potencial eólico e solar das ilhas de Cabo Verde, com o intuito da promoção do mesmo, e também para que se repensasse a forma de produção de energia elétrica no país, que é principalmente proveniente da queima de combustíveis.

Para este trabalho a diminuição da potência elétrica instalada em mais ou menos trinta a trinta e cinco por cento proposto através da instalação de cinco parques eólicos offshore, nas cinco ilhas de maior consumo de eletricidade, considera-se uma proposta ousada devido a limitações em termos de tecnologia e principalmente financeiros que o país enfrenta.

A distância entre as ilhas são consideráveis e o consumo de energia em cada ilha é bastante diversificado, então, não seria possível instalar dos quarenta e cinco aerogeradores sugeridos em apenas um parque de modo a baratear o custo de instalação, cabeamento, subestações e o custeio da movimentação dos equipamentos e mão-de-obra, o que tornaria o projeto ainda mais dispendioso.

Para avaliação financeira propostos para projetos de fazendas eólicas offshore foram consideradas todas as fases, desde antes da fase da execução, onde são feitos levantamentos como velocidade de vento na região e condições geofísicas, até o descomissionamento onde é feito o monitoramento e remoção dos aerogeradores do parque depois dos 25-30 de ciclo de vida útil. Através dessas equações chegou-se a uma estimativa no valor de 51.558.939,5 € (51,6 M€). Lembrando que as equações simplificadas levam em consideração apenas a capacidade eólica do parque a instalar em kilowatt-hora, e que os valores principalmente do cabeamento, instalação (estruturas flutuantes) e manutenção podem variar em maior escala.

Em vários países o parque offshore é montado em alguma parte na costa, e a energia produzida é distribuída através de grandes extensões linhas de transmissão, elevando e

depois rebaixado a tensão em subestações perto dos centros de consumo. Esse modelo não seria o recomendado para Cabo Verde devido a fragmentação do país e a distância considerável offshore de algumas ilhas para as outras.

De acordo com as análises de velocidade e densidade média do vento a 50 metros de altura, elaboradas para o território onshore, elaboradas pelo software de simulação utilizado, foram encontradas ao norte a velocidade média entre 8.8 m/s, sendo a ilha de São Vicente com maior potencial chegando a quase 14 m/s, sendo o norte do país com melhor potencial eólico. O menor potencial fica a sul do país, chegando a velocidades médias em torno de 2 m/s. O software considera uma densidade média de vento de 704 W/m² em todo o território onshore para as áreas mais ventosas, o que é considerado como uma média alta.

Ainda para o território onshore as análises de velocidade e densidade média do vento a 100 metros de altura, a velocidade média sobre apenas mais ou menos 1 m/s chegando a quase 10 m/s e a densidade de potência a quase 900 W/m², o que seria considerado como uma média muito alta, e propício para um ótimo aproveitamento eólico.

Para o território offshore, fez-se uma análise mais detalhada por ser um dos objetivos principais deste trabalho. Para 50 metros de altura encontrou-se nas ilhas mais ao norte uma média de velocidade de 9 a 10 m/s, sendo as ilhas de São Vicente, Santo Antão e São Nicolau, onde os mapas de vento apresentados são considerados excelentes para a exploração offshore. Um ótimo ponto a considerar para a instalação de um parque offshore seria entre as ilhas de Santo Antão e São Vicente, primeiro pela proximidade entre essas duas ilhas, pelo excelente potencial eólico apresentado na simulação e por último pelo perfil de carga dessas duas ilhas.

Nas ilhas ao Sul ainda no território offshore se destacam a ilha do Fogo e a ilha da Brava. Para a ilha do fogo teria que se estudar o custo-benefício, principalmente para o cabeamento devido a distância dos grandes postos de consumo. Para a ilha da Brava, sendo uma ilha bastante pequena, com uma população reduzida e sem grandes pontos de consumo, não seria viável economicamente.

As principais ilhas que seriam Santiago, a capital do país, e as ilhas turísticas Sal e Boavista, apresentam velocidades de vento no território offshore entre a faixa dos 6 a 8 m/s, o que se considera baixo para aproveitamento em parques offshore.

O potencial eólico para o território offshore desta vez a 100 metros de altura, não muda muito do cenário descrito acima. As simulações consideram que para esta altura, um aumento de praticamente 1 m/s em todo o território offshore nacional, o que não justificaria a instalação desse tipo de aerogerador no país, primeiro, devido ao que é observado na curva de potência de um aerogerador de 80 a 100 metros de torre, sendo que a velocidade do vento seja predominantemente menor do que a velocidade nominal para este tipo de aerogerador. Num segundo ponto teria que se considerar grandes mudanças na rede elétrica nacional, um maior investimento em subestações e/ou postos de transformação e sistemas de armazenamento para excedentes de produção o que acarretaria um crescimento no valor do investimento, tornando esse projeto ainda mais dispendioso.

O tempo de retorno é outro pré-requisito importante quando se pretende investir, principalmente quando se trata de valores e de responsabilidades desta envergadura. Usando equações e simplificações, de acordo com os valores encontrados através deste trabalho, encontrou-se através dos cálculos apresentados, que o retorno desse investimento teria aproximadamente 10 anos.

Incentivos fiscais, aduaneiros e ambientais também são aplicados a esse tipo de investimento, onde poderia diminuir um pouco mais os anos para o retorno desse investimento.

Considerando um ciclo de vida dos parques em torno de 25 a 30 anos, esse investimento seria lucrativo, pois seriam mais quase 20 anos de produção sem grandes custos de operação, ou seja, altos retornos a longo prazo.

Outro impacto que esse investimento seria na diminuição dos combustíveis consumidos no processo de produção térmica para obtenção de eletricidade no país. Segundo o relatório de 2022 da Electra SA, foram consumidos 89,5 milhões de litros de combustível divididos entre Gasóleo, Fuel Oil 380 e Fuel Oil 180. O parque eólico em questão também

evitaria a queima de cerca de 26,85 milhões de litros de combustível e evitar-se-ia cerca de 40.000 toneladas de CO₂.

Se tratando da energia solar fotovoltaica, apesar de não ter uma potência instalada expressiva, representando apenas quase 2 por cento da matriz, o país apresenta um excelente potencial solar em todo o território nacional. A radiação global anual média encontrada na simulação através do PVGIS varia entre 1800 a 2400 kWh/m²/ano. Dentre todas as ilhas se destacam a ilha São Vicente, Sal e Boa Vista, onde a irradiação aumenta de Janeiro a Maio, diminuem de Julho a Setembro, depois tem um acréscimo e mantém até Dezembro fechando o ciclo. A temperatura média encontrada é praticamente a mesma para cada ilha e se encontra na faixa dos 20 a 28 graus celsius. Por último, o ângulo de inclinação dos painéis solares que podem ser adotados no país varia de 14 a 17 graus.

Nas redes de distribuição, há necessidade de manutenção preventiva e corretiva com maior frequência devido a problemas de degradação com o passar do tempo e por estarem sujeitas a ações do meio ambiente. Mudanças dos cabos de cobre ou alumínio, devido à ampliação de carga e crescimento de consumidores ao longo do tempo também seria algo a considerar no país, principalmente se se pretende aumentar o percentual renovável na matriz elétrica.

Ainda na distribuição, pode-se considerar otimizar o sistema de cobrança e aumentar/atualizar o preço do kWh injetado na rede por pequenos produtores, isso aumentaria a competitividade e tornaria mais atrativo a produção independente de pequenos produtores de energia renovável.

Apontou-se também neste trabalho algumas medidas de eficiência energética já em curso no país, como a luta contra o roubo, fraude e furto de energia, e fiscalização de redes de baixa tensão, onde constitui como estratégia para diminuir os custos na produção e ter maior controle do consumo dos clientes. A iluminação eficiente também é cada vez mais presente em campanhas principalmente na iluminação pública com a substituição de lâmpadas incandescentes por LEDs. O uso de eletrodomésticos mais eficientes é algo que ainda se encontra um pouco atrás no país devido ao pouco poder económico da população em geral, e deve-se incentivar através de incentivos ou até mesmo em campanhas de

sensibilização. O incentivo ao uso de energias renováveis para produção de eletricidade foi algo tratado neste trabalho e foi bastante recomendado.

Propõe-se ainda neste sentido para o setor empresarial, auditorias energéticas, identificando áreas para melhorias e otimização do uso de energia, e fomentar a procura de maquinarias mais eficientes.

Para a melhora do sistema elétrico e diminuição da dependência termelétrica se propôs parques eólicos e solares devido ao ótimo potencial apresentado nas modelagens. Devido ao alto investimento em parques eólicos offshore, pelo país não dominar a tecnologia, por ter um potencial onshore parecido com o offshore, pelo país ser bastante fragmentado e com distâncias consideráveis separadas pela água do mar em grandes profundidades, e pela demanda energética não se encontrar concentrada em um só ponto de consumo, se considera então vários parques onshore divididos conforme demanda das principais ilhas.

Pela distribuição que o território do país apresenta, pelas limitações económicas e por ser totalmente dependente das termelétricas, apresentou-se outras sugestões neste trabalho. Uma delas é estudar a viabilidade da utilização de termelétricas a gás através do uso de turbinas aeroderivativas, por sua alta eficiência, flexibilidade operacional e capacidade rápida de resposta.

Algumas limitações encontradas durante a realização deste trabalho foi encontrar softwares de confiança e que são disponíveis para pesquisadores, pois sabe-se que softwares de engenharia ainda são bastante caros, e os gratuitos tem alguma discrepância da realidade e pode afetar nos resultados e interpretações das simulações realizadas.

Portanto, conclui-se esse trabalho com satisfação e sentimento de dever cumprido, onde se trabalhou e conseguiu-se almejar muito mais do que os objetivos propostos. É notável o nível de aprendizado e evolução adquirido durante esse processo por se tratar de um tema de bastante praticidade, e espera-se que a sua contribuição ao mundo acadêmico seja de alguma mais-valia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aldabó, Ricardo . 2002. *Energia Eólica*. São Paulo, Brasil: Artliber Editora.

ALER. s.d. "ALER - Associação Lusófona de Energias Renováveis - Comunicação Notícias - Quatro parques eólicos cabo-verdianos permitiram uma poupança de 47 mil toneladas de emissões de CO2". Aler-renovaveis.org. Acedido a 25 de junho de 2024. <https://www.aler-renovaveis.org/pt/comunicacao/noticias/quatro-parques-eolicos-cabo-verdianos-permitiram-uma-poupanca-de-47-mil-toneladas-emissoes-de-co2/>.

"Balanço energético em Cabo Verde". s.d. Dados Mundiais. Acedido a 25 de junho de 2024. <https://www.dadosmundiais.com/africa/cabo-verde/orcamento-energia.php>

Batistela, N. J., H. Voltolini, P. Kuo-Peng, R. Carlson, e F. Rüncos. 2014. "GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA – TECNOLOGIAS ATUAIS E FUTURAS", janeiro. https://www.researchgate.net/profile/Renato-Carlson/publication/239567205_GERACAO_DE_ENERGIA_EOLICA_-_TECNOLOGIAS_ATUAIS_E_FUTURAS/links/0c96052cb1882b239b000000/GERACAO-DE-ENERGIA-EOLICA-TECNOLOGIAS-ATUAIS-E-FUTURAS.pdf.

CABEÓLICA. 2022. "Relatório e Contas - Cabeólica", pág, 19–21. <https://cabeolica.com/wp-content/uploads/2023/PDF/Relat%C3%B3rio%202022.pdf>.

"Deliberação nº08/CA /2021- Tarifa para energia renovável, referente a 2021 – SGIE | Legislação e Documentação". 2021. Kb-wordpress.gov.cv. 31 de abril de 2021. Acedido a 14 de junho de 2024. <https://kb-wordpress.gov.cv/kb/deliberacao-no08-ca-2021-valores-anuais-para-energia-de-origem-renovavel/>.

Díaz, H., e C. Guedes Soares. 2023. "Cost and financial evaluation model for the design of floating offshore wind farms". *Ocean Engineering* 287, novembro: 5 a 11. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.115841>.

ELECTRA SA. 2023. "SA | Relatório e Contas 2022". Electra.cv. 2023. Acedido a 5 de junho de 2024. <https://www.electra.cv/frontend/web/index.php?r=site%2Frelatorio&type=2&inst=1>.

ENEEL. s.d. "O grande crescimento das tecnologias renováveis, crucial para a transição energética". www.enelgreenpower.com. Acedido a 5 de fevereiro de 2024. <https://www.enelgreenpower.com/pt/learning-hub/transicao-energetica/fontes-renovaveis>.

Fadigas, Eliane . 2004. *Energia Eólica: Fundamentos e Viabilidade Técnica e Economica* . Vol. 2. Acedido a 12 de junho de 2024. https://www.adinelsa.com.pe/files/publicaciones/energia_eolica_-_parte_2.pdf.

Fontanet, Flavia Aguiar. 2012. " AVALIAÇÃO DE UMA OPÇÃO DE ESPERA DE UM PARQUE EÓLICO PELO MÉTODO DE OPÇÕES REAIS". *PUC Rio*, março. <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/colecao.php?strSecao=resultado&nrSeq=22813@1>.

Global Wind Atlas. 2024. "Global Wind Atlas". globalwindatlas.info. 2024. <https://globalwindatlas.info/en>.

Governo de Cabo Verde. 2019. "Código de Rede Elétrica de Cabo Verde". *Boletim Oficial da República de Cabo Verde* 75, julho: 5. https://drive.google.com/file/d/1FTz9lwdgSaiXcnhXI98iKTPgJNY52Tg-/view?fbclid=IwZXh0bgNhZW0CMTAAR1YkhwcJDfUmPqCscII0Ed7yJFc2CVFevnYb-x3_T4iVXptcINExgjgkuA_aem_AU-PZnkcHKUIbjj5cmOUE3Xjiqx1lnHZt_cpcRMRgbGQMcoP6iA1RR04o8zaSQgTAj0LUTO1H--cyU90v16xi2Hw.

Energias Renováveis Cabo Verde. Acedido a 15 de abril de 2024. <https://www.energiasrenovaveis.cv>.

GWEC. 2023. "Global Wind Report". 2023. Acedido a 5 de março de 2024. https://gwec.net/wp-content/uploads/2023/04/GWEC-2023_interactive.pdf.

Kovač, Ankica, Matej Paranos, e Doria Marciuš. 2021. "Hidrogénio na Transição Energética: Uma revisão". *International Journal of Hydrogen Energy* 46, maio. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.11.256>.

"La eólica en el mundo". s.d. Asociación Empresarial Eólica. Acedido a 5 de março de 2024. <https://aeeolica.org/sobre-la-eolica/la-eolica-en-el-mundo/>.

LM Wind Power. s.d. "Classes de Vento". Acedido a 14 de junho de 2024. <https://www.lmwindpower.com/en/stories-and-press/stories/learn-about-wind/what-is-a-wind-class>.

López, Miguel . 2012. *Ingeniería de la Energía Eólica*. 1 ed. Barcelona: Marcombo. https://books.google.pt/books?hl=pt-PT&lr=&id=GW_jEgJJSdcC&oi=fnd&pg=PA4&dq=la+origen+y+formacion+del+viento+&ots=QcxVh4rtoD&sig=DuelvreaajInQjf7MWWZy6RgCpCA&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false.

Madeira, Manuel, e Ricardo Pinto. 2014. "Os solos da República de Cabo Verde considerações gerais sobre o seu conhecimento", janeiro. https://www.researchgate.net/publication/265499557_Os_solos_da_Republica_de_Cabo_Verde_consideracoes_gerais_sobre_o_seu_conhecimento.

Ministério de Energia , e ECREEE. 2014. "Direção Geral de Energia Relatório de Base para CABO VERDE 1ºDRAFT nos Países Membros da CEDEAO". Acedido a 18 de maio de 2024. https://www.aler-renovaveis.org/contents/lerpublication/dgecv_2014_oct_relatorio_base_cabo_verde.pdf.

Ministérios das Finanças. 2019. "Código de Rede Elétrica de Cabo Verde ". *Boletim Oficial da República de Cabo Verde* , n. I Série nº 75 (julho). <https://kb-wordpress.gov.cv/kb/decreto-lei-no-31-2019/>.

Pinto, Milton . 2014. *Fundamentos de Energia Eólica* . Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda.

"Tarifa de Eletricidade - ARME". 2023. ARME. 2023. Acedido a 14 de junho de 2024. https://www.arme.cv/index.php?option=com_jdownloads&task=download.send&id=1475&catid=460&m=0.

The Wind Power. s.d. "Vestas V52/850 - Manufacturers and turbines ". www.thewindpower.net. Acedido a 14 de junho de 2024. https://www.thewindpower.net/turbine_en_27_vestas_v52-850.php.

"Vestas V100/1800 - Manufacturers and turbines". www.thewindpower.net. Acedido a 14 de junho de 2024. https://www.thewindpower.net/turbine_en_552_vestas_v100-1800.php.

UNICEF. 2022. "República de Cabo Verde: Resumo do País". Acedido a 18 de outubro de 2024. https://www.sanitationandwaterforall.org/sites/default/files/2022-07/2022%20Country%20Overview_Cabo%20Verde.pdf.

"Vestas V39 - 500,00 kW - Wind turbine Datasheet". s.d. en.wind-turbine-models.com. Acedido a 14 de junho de 2024. <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/383-vestas-v39>.

Yoro, Kelvin O., e Michael O. Daramola. 2020. "CO2 emission sources, greenhouse gases, and the global warming effect". *Advances in Carbon Capture* 1: 3–28. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-819657-1.00001-3>