



**UNIVERSIDADE DA INTEGRAÇÃO INTERNACIONAL DA LUSOFONIA AFRO-  
BRASILEIRA**

**INSTITUTO DE ENGENHARIAS E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL**

**LUÍS CARLOS PINHEIRO MARQUES**

**CARACTERIZAÇÃO DO PERFIL DE VENTO E DETERMINAÇÃO DO  
POTENCIAL EÓLICO PARA A REGIÃO DE SÃO TOMÉ E PRÍNCIPE**

**ACARAPE**

**2018**

**LUÍS CARLOS PINHEIRO MARQUES**

**CARACTERIZAÇÃO DO PERFIL DE VENTO E DETERMINAÇÃO DO  
POTENCIAL EÓLICO PARA A REGIÃO DE SÃO TOMÉ E PRÍNCIPE**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia de Energias do Instituto de Engenharia e Desenvolvimento Sustentável da Universidade da Integração da Lusofonia Afro-Brasileira, como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Energias.

**Orientador:** Prof. Dr. Cleiton da Silva Silveira.

**ACARAPE**

**2018**

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira  
Sistema de Bibliotecas da UNILAB  
Catalogação de Publicação na Fonte.

---

Marques, Luis Carlos Pinheiro.

M315c

Caracterização do perfil de vento e determinação do potencial eólico para a região de São Tomé e Príncipe / Luis Carlos Pinheiro Marques. - Redenção, 2018.

63f: il.

Monografia - Curso de Engenharia De Energias, Instituto De Engenharias E Desenvolvimento Sustentável, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Redenção, 2018.

Orientador: Prof. Dr. Cleiton da Silva Silveira.

1. Energia eólica. 2. São Tomé e Príncipe. 3. Distribuição de Weibull. 4. Potencial eólico. 5. CFSR-NCEP. I. Título

CE/UF/BSCL

CDD 333.79

---

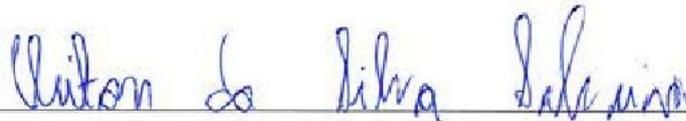
LUÍS CARLOS PINHEIRO MARQUES

**CARACTERIZAÇÃO DO PERFIL DE VENTO E DETERMINAÇÃO DO  
POTENCIAL EÓLICO PARA A REGIÃO DE SÃO TOMÉ E PRÍNCIPE..**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia de Energias do Instituto de Engenharia e Desenvolvimento Sustentável da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, como requisito para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energias.

Aprovado em 29/05/2018.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Cleiton Da Silva Silveira (Orientador)

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)



Prof. Dr. Hermínio Miguel de Oliveira Filho

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)



Eng. Antônio Duarte Marcos Junior

Universidade Federal do Ceará (UFC)

A minha Família, em especial a minha mãe e aos meus irmãos, e a meu pai que me inspira e que se orgulharia dessa conquista.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Senhor meu Deus, todo poderoso por tudo. A minha mãe Hortência Pinheiro, por me ter dado tudo que pôde. A meus filhos Jorge Gabriel e Nazariela Maria Hortência, que são o meu refúgio nas horas de angústia e de incertezas. Aos meus irmãos por todo o carinho, conselho e suporte dado.

Ao meu orientador Cleiton da Silva Silveira, e a meu coorientador Antonio Duarte Marcos Junior pelo apoio, motivação e excelentíssima orientação e suporte, sem o qual não seria possível efetuar esse trabalho.

A todos os meus professores, que fizeram despertar em mim o interesse por suas matérias e ensinamentos. A meu professor Alexandre Cunha Costa, que contribuiu para o meu desenvolvimento como jovem pesquisador.

Aos meus amigos e colegas de turma que compartilharam comigo momentos de aprendizados ao longo desses anos de formação.

A minha companheira e namorada Carla Sofia, por sempre ter me apoiado em todos os sentidos ao longo do curso, me aconselhando e ajudando nos momentos mais difíceis.

Ao Brasil, país que me acolheu sempre de forma espetacular e que permite o ensino superior aos países em desenvolvimento e com poucos recursos como é o caso de São Tomé e Príncipe.

“Agir, eis a inteligência verdadeira. Serei o que quiser. Mas tenho que querer o que for. O êxito está em ter êxito, e não em ter condições de êxito.”

(Fernando Pessoa)

## RESUMO

O objetivo deste estudo é apresentar o comportamento do perfil do vento e suas principais características para a região de São Tomé e Príncipe, além de apresentar o potencial eólico da região. A metodologia consiste em utilizar os dados do Sistema de Reanálise de previsão Climática, (CFSR) do inglês *Climate Forecast System Reanalysis*, produzido pelo Centro nacional para previsão ambiental (NCEP) do inglês *National Centers for Environmental Prediction*, que são estimativas a partir de dados de satélites e observados, para construir o mapa eólico e a rosa do vento, e determinar o potencial eólico e a variabilidade anual do vento. Os resultados mostram, através do mapa do vento, que a região norte do país apresenta uma média de velocidade superior, com pouco desvio no valor médio. Ao longo de todo o ano, a direção média predominante é no sentido sul-norte. Conclui-se que é possível utilizar os dados de previsões climáticas como o CFSR para gerar trabalhos que possam, em falta de dados observados, mostrar o comportamento e as características de uma região remota e/ou com ausências de estações meteorológicas, identificando assim regiões promissoras para o aproveitamento eólico. As velocidades do vento apresentam pouca variação ao longo dos meses do ano permanecendo sempre perto da sua média de 5,23 m/s, esta velocidade permite que seja possível um aproveitamento eólico para a geração de energia elétrica diminuindo a dependência dos combustíveis fósseis. A aposta em energia eólica pode ser uma alternativa mais sustentável para o desenvolvimento econômico das ilhas.

**Palavras-chave:** CFSR-NCEP. São Tomé e Príncipe. Distribuição de Weibull. Potencial Eólico.

## ABSTRACT

The objective of this study is to present the behavior of the wind profile and its main characteristics for the region of São Tomé and Príncipe, besides presenting the wind potential of the region. The methodology consists of using the data from the (CFSR) of the English *Climate Forecast Reanalysis System* National Forecast produced by the (NCEP) *for Environmental Prediction, National Center for Environmental Prediction*, which are estimates based on data of satellites and observed, to construct the wind map and wind rose, and to determine the wind potential and the annual variability of the wind. The results show, through the wind map, that the northern region of the country presents a higher average speed, with little deviation in the mean value. Throughout the year, the predominant average direction is in the south-north direction. It is concluded that it is possible to use climate forecast data such as the CFSR to generate jobs that may, in the absence of observed data, show the behavior and characteristics of a remote region and / or absence of meteorological stations, thus identifying promising regions for wind farms. The wind speeds show little variation throughout the months of the year, always remaining close to its average of 5.23m / s, this speed allows a wind power to be used for the generation of electric energy, reducing dependence on fossil fuels. The bet on wind power may be a more sustainable alternative to the economic development of the islands.

**Keywords:** CFSR-NCEP. Sao Tome and Principe. Weibull distribution. Wind Potential.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 — Custo De Investimento Por kW Instalado Em Algumas Fontes De Energia Renovável.....	17
Figura 2 — Histórico Da Evolução De Produção De Energia Elétrica Para São Tomé E Príncipe Para O Período De 1980 A 2016 .....	25
Figura 3 — Produção De Energia Vs Consumo De Energia (2005 - 2012).....	26
Figura 4 — Gráfico Da Matriz Energética Para São Tomé E Príncipe.....	27
Figura 5 — Primeiro Cata-Vento Desenvolvido Para A Geração Da Eletricidade.....	32
Figura 6 — A Evolução Do Tamanho E Da Potência Extraída Dos Aerogeradores. ....	34
Figura 7 — Relação Entre A Velocidade Do Vento E A Densidade De Potência.....	36
Figura 8 — Atlas Europeu dos Ventos.....	37
Figura 9 — Acumulado Anual Instalado no Mundo (2001 - 2016).....	39
Figura 10 — Capacidade Instalada por Ano (2001 - 2016). ....	40
Figura 11 — Maiores Investidores Em Energia Eólica Do Ano 2016. ....	41
Figura 12 — Os 10 Países com Mais Potência Eólica Instalada até dezembro de 2016.....	42
Figura 13 — Crescimento da Potência no Período de 2008 a 2016 nos Diferentes Continentes. ....	43
Figura 14 — Mapa com a distribuição da população pelos referidos distritos. ....	46
Figura 15 — Distribuição da Altitude na Ilha de São Tomé. ....	47
Figura 16 — Distribuição da Precipitação para a Ilha de São Tomé. ....	48
Figura 17 — Variação do gráfico da densidade de weibull com diferentes fatores de forma (k) e parâmetro de escala (C). ....	55
Figura 18 — Velocidade do Vento a 100 m e a 10 m. ....	56
Figura 19 — Histograma De Frequência Para Velocidade Do Vento Estimada Para A Altura De 100 Metros. ....	57
Figura 20 — Velocidade Do Vento Estimada Para A Altura De 100 Metros.....	58
Figura 21 — Distribuição de weibull ajustada aos dados de vento para a altura de 100 metros. ....	59
Figura 22 — Rosa dos ventos com as frequências de classes de velocidades médias mais frequentes nos diferentes meses. ....	60
Figura 23 — Mapa de vento para a região de São Tomé e Príncipe, com velocidades estimadas a altura de 100 metros.....	61

Figura 24 — Densidade de Potência para os 12 meses na região de São Tomé e Príncipe para uma velocidade estimada de 100 metros. .... 62

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 — Percentagem Da Participação Das Duas Fontes De Produção De Eletricidade Em São Tomé E Príncipe Para Os Anos De 1980 A 2016. ....	24
Tabela 2 — Maiores Produtores de Energia Eólica por Continente. Continua. ....	44
Tabela 3 — Tabela resumindo os principais parâmetros hidro climáticos para as ilhas de São Tomé e Príncipe. ....	49
Tabela 4 — Diferentes variações de valores de coeficiente de Hellmann para diferentes tipos de terreno. ....	52

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CFSR	<i>Climate Forecast System Reanalysis</i>
CGD	Caixa Geral de Depósitos
DGRNE	Direção Geral dos Recursos Naturais e Energia
EMAE	Empresa de Água e Eletricidade
IEA	<i>International Energy Agency</i>
INE	Instituto Nacional de Estatística
IPCC	<i>Intergovernmental Panel On Climate Change</i>
NCEP	<i>National Centers For Environmental Prediction</i>
OCDE	Cooperação e Desenvolvimento Económico
RDSTP	República Democrática de São Tomé e Príncipe
STP	São Tomé e Príncipe

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	15
1.1 Problematização .....	16
2 OBJETIVOS .....	19
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
3.1 Matriz Energética Mundial.....	20
3.2 Matriz Energética Africana .....	21
3.3 Matriz Energética Santomense e Caracterização do Seu Sistema Elétrico .....	22
3.4 Desafio do Desenvolvimento Sustentável.....	28
3.5 O Aproveitamento Eólico.....	30
3.6 A Potência Do Vento.....	34
3.7 O Aproveitamento Eólico no Mundo .....	39
3.7 Caracterização de São Tomé e Príncipe .....	45
4 METODOLOGIA .....	50
4.1 Área de Estudos.....	50
4.2 Dados Utilizados .....	50
4.3 Histograma .....	51
4.4 Rosa dos Ventos .....	53
4.5 Distribuição de Weibull .....	53
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	55
6 CONCLUSÃO .....	63

## 1 INTRODUÇÃO

Desde os primórdios da humanidade até aos dias de hoje, a energia tem sido uma preocupação para a espécie humana. Após a invenção dos motores e a revolução industrial tornou-se evidente a importância das formas de energia, destacando-se a energia elétrica, que é a forma de energia que tem consumido muitos recursos. Para se obter a energia na forma de eletricidade, a maioria dos países recorre a matérias-primas de origem fóssil como os derivados do petróleo, gás natural e carvão. Pode-se, portanto, afirmar que o atual sistema energético mundial é dependente de combustíveis fósseis (GOLDEMBERG, 2010). Esta energia é fundamental para a realização das mais variadas atividades humanas como por exemplo transporte, iluminação, aquecimento, comunicação e produção de alimentos. Para realizar essas atividades, o mundo utiliza 33,34% de petróleo; 27,29% de carvão; 20,42% de gás natural; 9,73% de biomassa; e apenas 3,2% de fontes renováveis como as geotérmicas, eólicas, solar marés e usinas hidrelétricas. A percentagem do aproveitamento da energia eólica no cenário mundial é de aproximadamente 0,16%, enquanto que a percentagem do aproveitamento solar é de 0,11% (GOLDEMBERG, 2010).

Verifica-se então que no contexto atual a obtenção de energia não é feita de forma sustentável, uma vez que apresenta alguns inconvenientes como poluição do ambiente, exaustão das reservas de combustíveis fósseis e a dependência dos insumos, considerando que esses recursos fósseis se encontram apenas em alguns países. Para solucionar estes problemas em torno da questão energética, tem se verificado no mundo uma proliferação de fontes de energia renovável.

Entre as fontes alternativas de energia, a eólica é apontada como uma solução viável, quer pelo significativo aumento da eficiência que se tem verificado nos processos de conversão, quer pela sua flexibilidade de aplicação e utilização. Assim sendo, para que o aproveitamento dessa fonte de energia seja viável, deve-se fazer um estudo de quantificação do potencial eólico que uma determinada região pode oferecer, de modo a possibilitar o planejamento integrado das fontes de energia e sua posterior inserção na matriz energética (ROVERE; WESTIN; WILLS, 2013).

Para a região de São Tomé e Príncipe, existe uma falta de dados climatológicos e atmosféricos, característico de países subdesenvolvidos. Por esta razão existem poucos estudos do real potencial deste recurso na região onde se localiza o país, consequentemente, estas

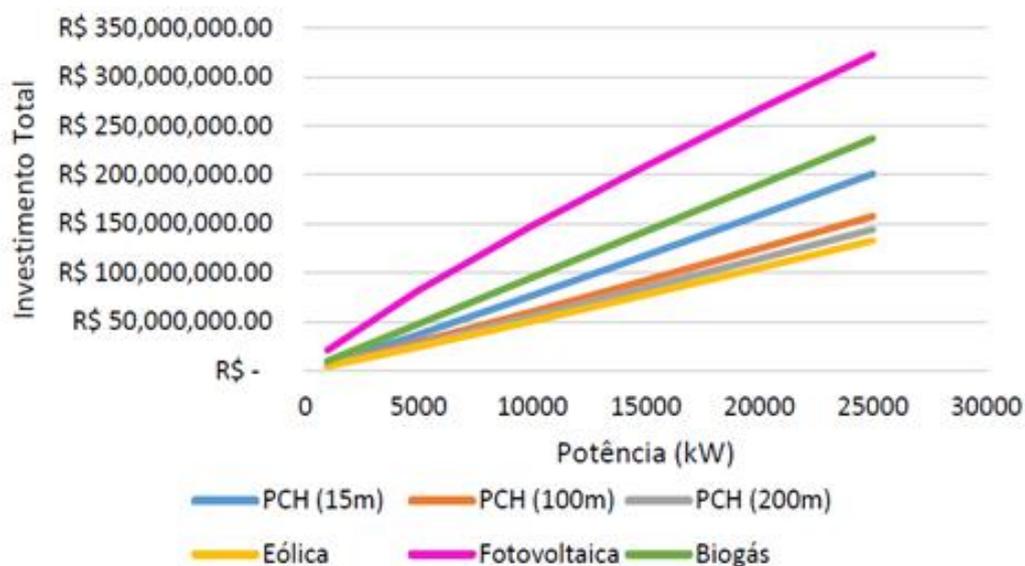
mesmas fontes não incorporam a matriz energética santomense, matriz esta que é altamente dependente dos combustíveis fósseis, neste caso o diesel. A participação de fontes renováveis na matriz energética santomense, resume-se ao facto de o país dispor de algumas pequenas centrais hidrelétricas que contribuem com 1% no balanço energético nacional e com aproximadamente 8% para a produção de eletricidade (EMAE, 2016).

Neste contexto, este trabalho tem como objetivo principal a verificação da viabilidade técnico-econômica da inserção de energia eólica no arquipélago. Tem-se ainda como objetivos específicos estimar o potencial eólico do país, além de apresentar as características e as principais grandezas associadas ao regime de ventos para a região de São Tomé e Príncipe.

### **1.1 Problematização**

Devido à crescente preocupação ambiental a exigência por fontes de energia alternativas e renováveis, que além de eficientes detenham um caráter limpo e sustentável, é cada vez maior. As formas de geração de energia elétrica têm se tornado cada vez mais competitivas e em alguns países, o preço do kWh pago por geração de energia eólica atingiu uma marca de 0,04 Euros (ANEEL, 2005). Enquanto que o preço por kW, pago para a instalação requer investimentos na ordem dos 1000-1400 Euros (CASTRO, 2005). A figura abaixo, mostra o resultado de um estudo realizado por (RANGEL; BORGES; SANTOS, 2016) com o intuito de comparar o custo de capital para a instalação de potência nas diferentes fontes renováveis. Pode-se observar que a energia eólica apresenta custos menores. Estes dados tornam a energia eólica muito atraente em comparação com outras fontes de energias renováveis.

Figura 1 — Custo De Investimento Por kW Instalado Em Algumas Fontes De Energia Renovável



Fonte: RANGEL; BORGES; SANTOS (2016).

Embora o custo inicial não seja necessariamente a única variável a determinar o preço da tarifa, as fontes com os custos de investimento mais altos, implicam na sua maioria, em tarifas mais altas. Pois, considerando a viabilidade econômica do projeto, geralmente custo inicial mais alto implica em uma venda mais cara da energia produzida (RANGEL; BORGES; SANTOS, 2016). A demanda por fontes de energia menos poluidoras e que ao mesmo tempo sejam economicamente competitivas com as fontes convencionais é crescente.

A viabilidade econômica de um projeto de energia eólica depende de parâmetros de características relacionados com o perfil dos ventos à parâmetros relacionados com as características operacionais e técnicas do empreendimento. Estas duas últimas podem ser facilmente compensadas, quer pelo investimento na qualificação da mão de obra quer no investimento em equipamentos mais sofisticados e eficientes. Quanto aos parâmetros relacionados com o perfil de ventos, estes devem ser estudados ao longo do tempo na região de interesse. Estes estudos são de importância capital, uma vez que o vento se mostra muitas vezes intermitente, pois depende da estação do ano e de condições atmosféricas, assim sendo, ele está associado à incerteza.

Para a realização do estudo das características da região em relação ao seu potencial eólico, geralmente instala-se uma torre anemométrica na região que se pretende construir o

parque eólico e através dos anemômetros registra-se a velocidade e a direção do vento de 15 em 15 min durante um intervalo de no mínimo 2 anos (FADIGAS, 2011). Como a instalação de torres anemométricas para extrair dados a ser utilizados na elaboração do projeto do parque eólico por si só já ser uma etapa dispendiosa, procede-se então a estudos teóricos ou mapas eólicos que sugerem lugares com um bom potencial para a instalação do parque. Estes estudos mais simplistas devem ser levados em consideração para a escolha do local onde a torre anemométrica pode extrair dados com valores desejáveis e compatíveis, para que o aproveitamento eólico seja economicamente viável.

Estes estudos são muito importantes, pois por ter um comportamento intermitente, uma vez que depende da estação do ano e de condições atmosféricas, o vento está associado à incerteza e variações na sua direção, intensidade e velocidade o que pode resultar em prejuízos para o investidor. Atualmente, graças aos avanços na área da computação, a simulação de dados de velocidade de vento nos permite ter uma boa perspectiva do comportamento do perfil de vento e de sua variabilidade sazonal e temporal. Para países em subdesenvolvimento e com poucos recursos para a realização de estudos através da instalação de torres anemométricas, as simulações computacionais são solução mais viável para a realização de estudos que permitam caracterizar o perfil de vento no seu domínio territorial e desta forma apresentar junto aos organismos internacionais propostas para financiamento de projetos. Não se pretende com o presente trabalho insinuar que as simulações computacionais substituam os dados provenientes de torres anemométricas, mas que em falta destes, as mesmas sirvam para nos orientar em relação ao perfil ou a tendência do comportamento do vento naquela região. Neste âmbito, este trabalho torna-se fundamental, uma vez que existem poucos trabalhos relacionados com o potencial eólico para São Tomé e Príncipe e não existem dados ou registros de velocidade do vento disponíveis no país.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 Objetivos Gerais

Este trabalho tem como objetivo apresentar o comportamento do perfil do vento e suas principais características para a região de São Tomé e Príncipe, além de apresentar o potencial eólico sobre na região, utilizando dados da estimativa do *Climate Forecast System Reanalysis* (CFSR).

### 2.2 Objetivos Específicos

- Apresentar a densidade de potência, e a região sobre a qual incide ventos com índices mais altos.
- Apresentar a direção predominante, a velocidade média, o desvio padrão e os intervalos de vento mais preponderantes na região.
- Apresentar as vantagens e desvantagens da utilização das fontes renováveis, nomeadamente a eólica para a produção de energia elétrica em São Tomé e Príncipe em relação as fontes convencionais.
- Mostrar a importância da pesquisa dos recursos energéticos, para que sirvam de base para a implementação de projetos energéticos futuros.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Matriz Energética Mundial

Em 2015, os dados do relatório da Agência Internacional de Energia (*International Energy Agency - IEA*), publicados em 2017 mostram que naquele ano, o mundo demandou uma quantidade de energia equivalente a 13.790 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (TEP). Este valor é 0,6% maior que o ano de 2014. Para atingir essa energia, houve um aumento na participação de derivados de petróleo em 2,3%, seguidos por um aumento de 1,9% de energias renováveis seguidos pelo incremento também da participação de gás natural e de energia nuclear em 1,4% para cada. Verificou-se no mesmo relatório que houve uma diminuição de 2,3% da contribuição do carvão mineral para a produção de energia. Estes dados são todos de 2015 em comparação com o ano anterior de 2014.

Os combustíveis fósseis tiveram diminuição de 0,2% (participando em 81,7% em 2015) para estes valores em comparação ao ano anterior (participação em 81,9% em 2014) para o fornecimento de energia (IEA, 2017). O estudo apresenta que, embora a participação dos combustíveis fósseis tivessem diminuindo seu contributo para a produção de energia em 0,2 pontos percentuais, o gás natural e o petróleo apresentaram um aumento de sua produção para suprir a demanda que também aumentou em relação ao ano anterior, porém a diminuição do contributo referente ao carvão mineral (-2,6%) em relação ao ano anterior. Este valor de declínio é o primeiro verificado desde 1999 (IEA, 2017). O declínio da participação do carvão na geração de energia foi superado pelo incremento da participação do gás natural e do petróleo de modo que esses três combustíveis fósseis apresentaram um aumento 0,3%, em 2015, na participação em relação ao ano de 2014 (IEA, 2017).

As fontes renováveis de energia como os biocombustíveis apresentaram um crescimento na sua participação em 0,1 ponto percentual, crescendo dos 9,5% em 2014 para os 9,6% em 2015. Quando comparado com valores de 2014 a taxa de crescimento da energia renovável diminuiu, pois cresceu menos de 2014 para 2015 (taxa de crescimento de 1,2%) do que em 2013 para 2014 (taxa de crescimento 1,5%). Verificou-se em 2015, a primeira vez desde 1989, um decréscimo da participação de energia hidroelétrica em 0,5%. Portanto, este recurso continuou contribuindo com 2,4% da energia total consumida em 2015. Houve também um crescimento de outras fontes renováveis de energia como a eólica que cresceu 16,8% na sua participação, a solar térmica e solar fotovoltaica que cresceram 6,8% e 29,7% respectivamente,

e a energia geotérmica que cresceu em 4,1%. Embora essas fontes de energia tenham aumentado consideravelmente suas participações em relação ao ano de 2014, essas fontes juntas continuam contribuindo com menos de 2% para o suprimento da demanda mundial (IEA, 2017).

A energia nuclear apresentou um aumento do percentual do seu contributo para o suprimento da demanda geral de energia mundial em cerca de 1,4% contribuindo agora com produção de 4,9% do suprimento mundial de energia (IEA, 2017).

De modo geral, as regiões onde mais se consomem energia, são as regiões onde se localizam os países mais desenvolvidos. O relatório do IEA mostra que os países da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) consomem cerca de 30% dessa energia, os países da Ásia não pertencentes a OCDE consomem 29%, os países do Médio Oriente consomem aproximadamente 14% da energia total, enquanto que os restantes dos países europeu não pertencentes a OCDE consomem 13%, e os países africanos consomem cerca de 8% da energia, os países das Américas não pertencentes a OCDE consomem 6% (IEA, 2017).

### **3.2 Matriz Energética Africana**

A África, o segundo continente mais populoso do mundo ficando atrás apenas da Ásia, (BRITO et al, 2005), consome apenas 8% da energia mundial. Este é sem dúvida um importante indicador da economia em desenvolvimento da maioria dos países da região. Europa e América do Norte por exemplo o 5º e o 6º continentes mais populosos do mundo, são o 2º e o 1º que mais consomem energia (IEA, 2017).

A produção energética africana está distribuída com 36% pertencentes a produção por petróleo, seguida pelo fornecimento proveniente da biomassa. O gás natural contribui com 15% enquanto que o carvão representa 14%. O relatório da IEA mostra que o continente africano é energeticamente autossuficiente e exporta gás natural, carvão e petróleo (o continente exportou em 2015 80% da sua produção de petróleo), porém, muitos países são dependentes de importação de combustíveis fósseis.

O continente apresenta uma heterogeneidade em termos de produção por região. A África Ocidental é o maior produtor de petróleo bruto, sendo a Nigéria o maior produtor africano de petróleo bruto da região com 27% (IEA,2017)

O norte de África não só produz o petróleo bruto, mas também e principalmente gás natural. A Argélia e o Egito produziram juntos 62% do gás natural do continente e 27% do petróleo bruto do continente (IEA, 2017).

A África Austral contribui com mais de 95% da produção de carvão mineral da região, aonde a África do Sul sozinha produziu 95% de todo o carvão (a África do Sul foi o quinto maior exportador de carvão do mundo). A região também contribui significativamente para a produção de petróleo bruto, aonde a região conta com a produção de 23% da produção de petróleo da África apenas assegurada com o contributo de Angola, (Segundo maior produtor de petróleo bruto da África) (IEA, 2017).

Por último tem-se que a África Central e Oriental, é muito dependente de biomassa. No entanto, o uso de biomassa no setor energético ao longo de todas as regiões da África atinge 48%, que é uma realidade bem diferente da de outros continentes que em média utilizam 10% da biomassa nas suas matrizes (IEA, 2017). O relatório dá a entender que o alto consumo de biomassa está ligado ao fato de existir pouca eletrificação, quando afirma que a percentagem de uso da biomassa caiu entre 1971 e 2015 devido ao aumento da eletrificação (IEA, 2017).

A produção de energia elétrica no continente é assegurada maioritariamente pelos combustíveis fósseis. Para a produção de energia verificou-se uma mudança dos insumos energéticos. Em 1971 a matriz energética era distribuída com o carvão contribuindo com 62% enquanto que a energia hídrica contribuía com 26 % da produção de energia, em 2015 as contribuições do gás natural foi de 37% e foi o combustível que mais contribuiu para a produção de energia elétrica no continente, enquanto que o carvão ficou na segunda posição com 33%, a energia hídrica tem perdido protagonismo na geração da energia, contribuindo em 2015 com aproximadamente 13,9% da energia (IEA, 2017).

### **3.3 Matriz Energética Santomense e Caracterização do Seu Sistema Elétrico**

O estado atual do setor energético santomense é crítico e precário. Januzzi, Neto e Silva (2012) apresentam como principais problemas a alta perda técnicas nos setores de transmissão e comerciais nas redes de distribuição, a forte dependência de combustíveis fósseis, a existência de demanda reprimida, interrupções diárias em várias cidades e sistema de remuneração e cobrança deficiente.

A empresa nacional de água e eletricidade (EMAE) desenvolve a sua atividade em todo o espaço nacional, abrangendo seis distritos em São Tomé mais a Região Autónoma do

Príncipe. Presta o serviço público de abastecimento de água e fornecimento de energia elétrica a um pouco mais de 55.609 clientes e conta com 391 colaboradores, além de 4 estagiários e 49 prestadores de serviço (EMAE, 2016).

As áreas de atuação apresentam características muito diferenciadas de concentração demográfica e desenvolvimento industrial, variando a densidade populacional, nos vários distritos, entre mais de 7.000 e menos de 65.000 habitantes, podendo a captação de energia elétrica atingir, em ano médio, cerca de 106 GWh (EMAE, 2016).

Em 31 de dezembro de 2016, a potência total instalada no setor elétrico nacional era de 30 MW (EMAE, 2016) e compreendia uma central hidroelétrica e cinco centrais termelétricas interligadas, para além da central da Região do Príncipe e sistemas descentralizados de Porto Alegre e Malanza, Ribeira Peixe, Santa Luzia e Santa Catarina (EMAE, 2016)

O sistema produtor da EMAE compreendia a central hidroelétrica de Contador (1,9 MW), e as centrais termoelétricas de S. Tomé, (11,9 MW) Santo Amaro 1 (8,5 MW), Santo Amaro 2 (6,1 MW), Bobô Forro 2 e Príncipe (3,6 MW), Centrais descentralizadas (0,560 MW), perfazendo uma potência de 26,3 MW e os restantes 4,0 MW correspondendo à central privada de Bobô-Forro 1 (EMAE, 2016).

A produção própria da EMAE em 2016 foi de 101 GWh. A produção de eletricidade de origem termoelétrica totalizou 95,3 GWh e contribuiu com 90%, enquanto o sistema hidroelétrico em serviço correspondeu uma produtividade de 5,8 GWh. As compras de energia elétrica foram de 4,7 GWh, de origem termoelétrica na sua totalidade (EMAE, 2016).

A Tabela 1 mostra a variação da participação das diferentes fontes de eletricidade para São Tomé e Príncipe para o período de 1980 a 2016. Neste período observa-se que a produção de eletricidade por fonte hídrica era de 80%, porém essa percentagem veio a diminuir ao longo de todo esse período, chegando a 5% em 2016. O país dirige-se, em questões energéticas, em sentido contrário como de outros países, nomeadamente China, EUA, Alemanha, Índia e Brasil, que têm vindo a aumentar a participação de energias renováveis em suas matrizes energéticas.

Ao mesmo tempo, estas fontes de energia presentes na matriz energética utilizadas para a produção de eletricidade tornam o país vulnerável quer face as oscilações dos preços do petróleo e ou a disponibilidade dos referidos insumos, quer como as adversidades climáticas

em geral e em relação ao regime de chuvas em específico. A diversificação de fontes de energia na matriz nacional como um todo, é uma solução geral para os problemas acima citados, (PACHECO, 2006) e uma tendência das grandes potências mundiais que têm vindo a integrar gradativamente a participação de diversas fontes de energia renováveis nas suas matrizes (IEA, 2017).

Souto (2016) afirma que o país é dotado de mais recursos renováveis, porém não tem investido nos mesmos, apresenta também o fato de que a eficiência das pequenas centrais hidrelétricas possuem uma vida útil superior a 50 anos e que sua tecnologia está ultrapassada além de ter vindo a perder eficiência por falta de manutenção adequada e novos investimentos.

Tabela 1 — Percentagem Da Participação Das Duas Fontes De Produção De Eletricidade Em São Tomé E Príncipe Para Os Anos De 1980 A 2016.

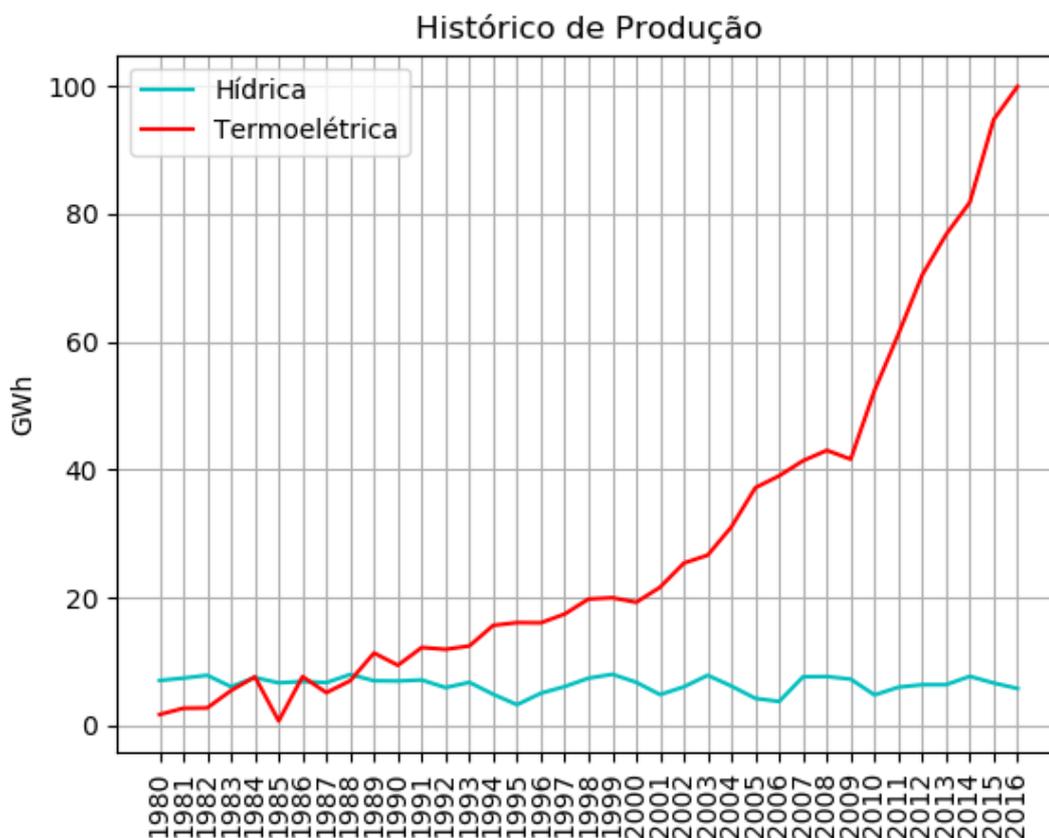
<b>Ano</b>	<b>Hídrica</b>	<b>Termelétrica</b>	<b>Ano</b>	<b>Hídrica</b>	<b>Termelétrica</b>
1980	80%	20%	1999	29%	71%
1981	73%	27%	2000	26%	74%
1982	74%	26%	2001	18%	82%
1983	53%	47%	2002	19%	81%
1984	50%	50%	2003	23%	77%
1985	90%	10%	2004	17%	83%
1986	47%	53%	2005	10%	90%
1987	57%	43%	2006	9%	91%
1988	53%	47%	2007	16%	84%
1989	38%	62%	2008	15%	85%
1990	42%	58%	2009	15%	85%
1991	37%	63%	2010	8%	92%
1992	33%	67%	2011	9%	91%
1993	35%	65%	2012	8%	92%
1994	24%	76%	2013	8%	92%
1995	17%	83%	2014	9%	91%
1996	24%	76%	2015	7%	93%
1997	26%	74%	2016	5%	95%
1998	27%	73%	2017	S/D	S/D

Fonte: Adaptado de EMAE (2016)

Com a quantidade de energia produzida por ano, para o período de 1980 a 2016, elaborou-se um gráfico com o intuito de mostrar quanto produziu as fontes hídricas e termelétricas de São Tomé e Príncipe. Na Figura 2, pode-se observar uma perda de protagonismo da fonte hidroelétrica em detrimento das centrais termelétricas. Durante esse

período, observa-se também que no último ano, a produção de energia elétrica pelas centrais termelétricas chegou a quase 10 vezes mais que as das pequenas centrais hidroelétricas.

Figura 2 — Histórico Da Evolução De Produção De Energia Elétrica Para São Tomé E Príncipe Para O Período De 1980 A 2016



Fonte: Adaptado de EMAE (2016)

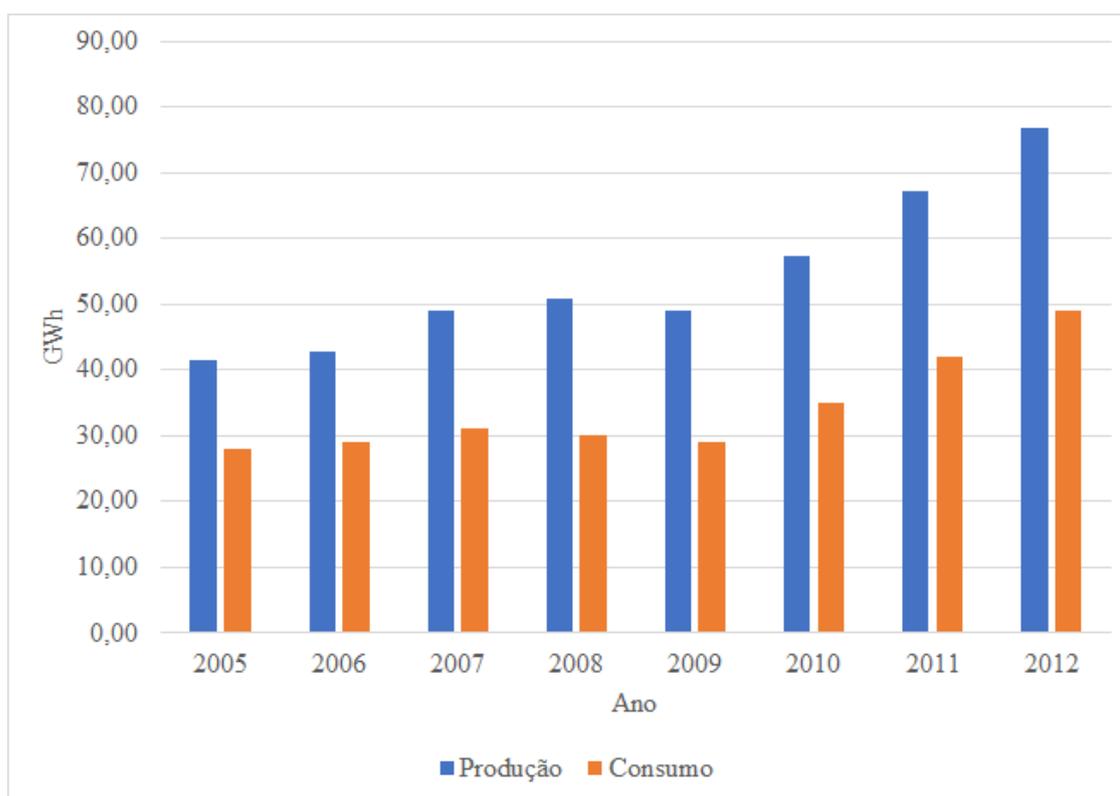
Em 2016, a energia entrada nas redes de transporte e distribuição atingiu 101,8 GWh, os quais incluíram 4,7 GWh de energia comprada ao Produtor Independente RENERGIA, Lda. O volume total de eletricidade faturada foi de 63,5 GWh, pelo que se conclui que existiu um volume de perdas de eletricidade correspondente a cerca de 37,6% (EMAE, 2016).

A Direção Geral dos Recursos Naturais e Energia (DGRNE, 2015) apresenta a discrepância entre a produção e o consumo de eletricidade, apontando como principais causas a ineficiências de centrais de produção, redes de transporte e distribuição deficientes, existência de perdas comerciais e fraudes ao sistema. Jannuzzi, Jantim Neto e Silva (2012) apresentam também como parte do problema no setor energético o sub dimensionamento do sistema o que

o impossibilita de atender a todas as cargas, fazendo com que haja uma demanda reprimida, falta de eficiência (JANNUZZI; NETO; SILVA, 2012) e um sistema tarifário precário (JANNUZZI; NETO; SILVA, 2012) são outros problemas encontrados no setor energético santomense.

A Figura 3 apresenta valores de energia produzida maior que a consumida, porém este facto não é sentido na sociedade. A realidade é de um serviço de fornecimento muito precário que além de não atender a todas as cargas registradas, apresenta cortes constantes no fornecimento ao longo de todo o ano. Algumas das possíveis causas dessa realidade está descrita no parágrafo anterior.

Figura 3 — Produção De Energia Vs Consumo De Energia (2005 - 2012).



Fonte: Adaptado de DGRNE (2015)

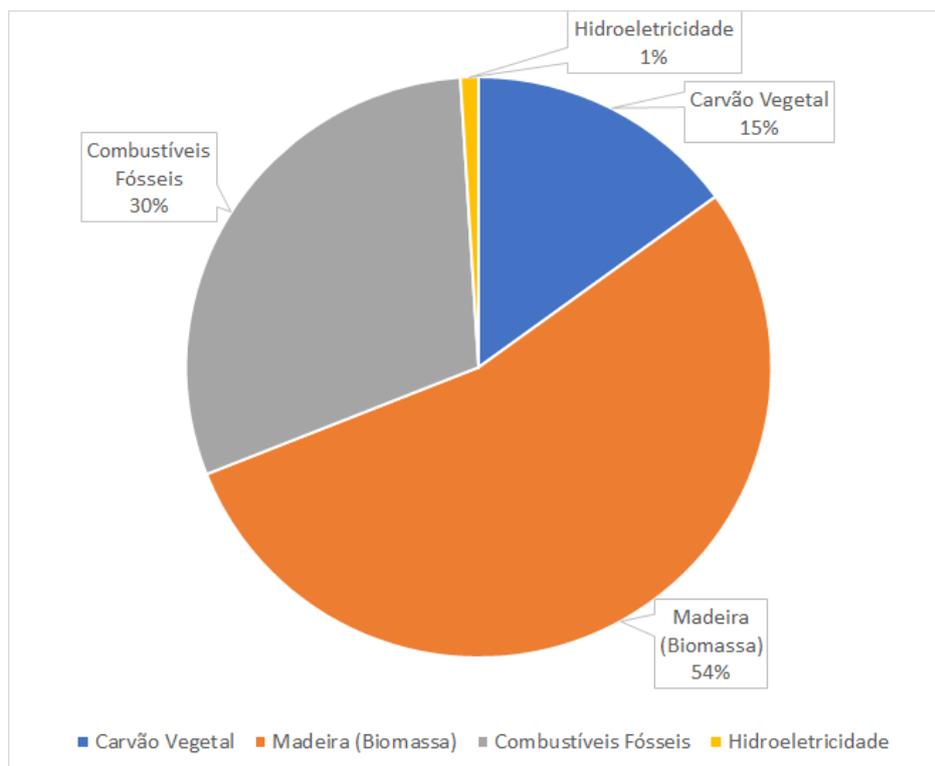
O sistema de rede de Média Tensão (MT) a 30 KV tem uma extensão confirmada de cerca de 165 Km lineares e é composto por linhas aéreas apoiadas por mais de 1.200 postes e de cabos subterrâneos com uma extensão estimada superior a 50 Km em S. Tomé. Na Região Autónoma do Príncipe o sistema de rede de Média Tensão a 6 KV tem uma extensão de 25 Km lineares, apoiadas por mais de 305 postes (EMAE, 2016).

O sistema da rede de Baixa Tensão (BT) tem uma extensão estimada de mais de 300 Km, apoiadas em cerca de 3.500 postes em S. Tomé. Na Região Autónoma do Príncipe, o sistema de Baixa Tensão tem uma extensão estimada de cerca de 25 Km (EMAE, 2016).

O sistema de transformação engloba 2 subestações com uma potência de 11 MVA, 3 postos de seccionamento e 182 postos de transformação, com uma potência de transformação instalada de 49 MVA. Os parques nas Centrais estão equipados com 23 Transformadores de 51 MVA de potência de transformação (EMAE, 2016).

A matriz energética santomense apresenta, como já foi citado, características comuns a outros países subdesenvolvidos, matriz fortemente dependente de combustíveis fósseis e de biomassa. O relatório da direção geral dos recursos naturais e energia, mostram quais são os principais provedores de energia para o país, como se pode ver na Figura 4. A lenha (biomassa) é muito utilizada para a culinária, para o aquecimento e utilização nas panificadoras, os 22% correspondentes ao gasóleo (diesel) é utilizado na queima para a produção de eletricidade nas termelétricas. A gasolina é muito utilizada para a frota veicular. A direção geral dos recursos naturais e energia (DGRNE, 2015) aponta que o setor de produção de eletricidade contribui com 71% dos gases de efeito de estufa lançados para a atmosfera por todo o país.

Figura 4 — Gráfico Da Matriz Energética Para São Tomé E Príncipe.



Fonte: Adaptado de DGRNE (2015)

### 3.4 Desafio do Desenvolvimento Sustentável

Com uma percentagem esmagadora de combustíveis fósseis sustentando a matriz energética mundial, existe uma preocupação quanto a possibilidade de haver exaustão das reservas, a insegurança e imprevisibilidade de verem asseguradas o abastecimento de recursos energéticos e os efeitos nocivos que a utilização e operação desses recursos causam ao ambiente (GOLDEMBERG, 2010). Os combustíveis fósseis não são renováveis na medida em que a taxa em que se consomem esses recursos é superior a taxa que a natureza os repõe (OLIVEIRA, et al., 2009). Neste sentido, os autores identificam um período de duração do petróleo em algumas décadas. Quanto a questão ambiental, os combustíveis fósseis são os maiores responsáveis pela emissão de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), um intensificador do efeito estufa que tem causado um aumento da temperatura global do planeta. Feldman e Macedo (2001) afirmam que a concentração de dióxido de carbono na atmosfera está diretamente relacionada com a temperatura do planeta que por sua vez está relacionada com o aquecimento global. O mesmo autor em seu relatório mostra que a quantidade de dióxido de carbono tem vindo a aumentar

desde a revolução industrial. Desde 1750 com o consumo e queima de combustíveis fósseis como o petróleo e o carvão que os gases causadores de efeito estufa tem vindo a aumentar (FELDMANN; MACEDO, 2001). O primeiro relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, derivado do Inglês *Intergovernmental Panel on Climate Change*), descartou a natureza como o único responsável pela intensificação do efeito estufa, mas apontou atividades antropogênicas como o principal responsável pelas mesmas (MARENGO, 2007). Os cientistas associaram o aquecimento global com o aumento das emissões de gases efeito estufas provenientes principalmente da utilização e manipulação de combustíveis fósseis para a geração de energia. A tendência atual é de que nos próximos 25 anos, o consumo de petróleo aumentar em 40% (aumentar em relação aos índices registados no ano de 2005) e as emissões de gases de efeito estufa aumentarem em 55% (quando comparados com índices verificados no ano de 2004) (INTERACADEMY COUNCIL, 2007).

Existe uma necessidade de fornecer energia a um grande número de pessoas, espera-se que o consumo de energia dobre até 2030 (INTERACADEMY COUNCIL, 2007) neste sentido o grande desafio do século XXI, segundo o estudo apresentado neste relatório é de mudar o comportamento de consumo de energia atual para um de caráter de energia sustentável (INTERACADEMY COUNCIL, 2007) levando a um desenvolvimento sustentável. O conceito de desenvolvimento sustentável, foi apresentado pela primeira vez na conferência Rio-92 como uma estratégia que abrange não só a dimensão econômica como também uma dimensão social e ambiental, conciliando o progresso e o desenvolvimento econômico com uma adequada preservação ambiental (OLIVEIRA et al., 2009). Este conceito foi justamente criado após a descoberta da relação entre a produção de energia, emissão de gases de efeito de estufa e o aquecimento global e suas consequências no estudo do primeiro relatório do IPCC1990 (FELDMANN; MACEDO, 2001). Um futuro de energia sustentável é então apresentado como um conceito que assegure a necessidade de garantir oferta de energia que atenda às necessidades das gerações futuras; Que seja compatível com a preservação do ambiente e dos ecossistemas naturais; Que estenda serviços básicos de energia aos 2 bilhões de habitantes que não têm acesso a energia de qualidade atualmente; Que reduza os riscos à segurança e potenciais conflitos geopolíticos advindos da competição por recursos energéticos e de assegurem que os mesmo não impliquem em mudanças climáticas catastróficas (INTERACADEMY COUNCIL, 2007).

Neste cenário, é necessário que se mude o modo como a energia é fornecida e o modo como ela é usada (INTERACADEMY COUNCIL, 2007). É necessário que se melhore a eficiência e aumente as participações de fontes de recursos e energias com menores teores de

carbono e de fontes renováveis incluindo também os biocombustíveis de ponta diversificando assim a matriz energética (INTERACADEMY COUNCIL, 2007). O potencial de energias renováveis inexplorado do planeta é enorme e está diversificado em grande parte de regiões abrangendo países desenvolvidos e em desenvolvimento, de modo que, explorar esse potencial oferece condições de desenvolvimento econômico e social, além de poder amenizar as tensões geopolíticas recorrentes da competição por energias fósseis (INTERACADEMY COUNCIL, 2007). Aumentar a participação de fontes alternativas na geração de energia é uma forma de se atingir um futuro de energia sustentável em uma busca por um desenvolvimento sustentável.

Embora o relatório do conselho interacadêmico reconheça que tem havido desenvolvimentos e comprometimentos políticos que levou a uma considerável redução de custos e forte crescimento em muitas indústrias de energia renovável, elas ainda assim carecem de melhorias e identifica ainda assim dificuldades tecnológicas e mercadológicas para que elas desempenhem um papel de maior preponderância no cenário atual. A necessidade de desenvolvimento em tecnologias de armazenagem e conversão, e a melhoria na capacidade de transmissão de eletricidade de longa distância poderia fazer muito para expandir a base de recursos e reduzir os custos associados ao desenvolvimento de energia renovável. Contudo tem se verificado um aumento substancial da capacidade instalada de energia proveniente de fontes renováveis fortemente impulsionada por políticas de incentivos em grande parte dos países (INTERACADEMY COUNCIL, 2007).

Uma das fontes que mais tem vindo a aumentar a sua participação na matriz energética mundial é a eólica, objeto de estudo neste trabalho, que é identificada como uma das melhores opções para melhorar o sistema elétrico, diversificar a matriz energética, diminuir a emissão de gases de efeito de estufa e gerar emprego

### **3.5 O Aproveitamento Eólico**

O local e a data onde se produziu o primeiro instrumento para a utilização do recurso eólico é algo controverso. Os moinhos de vento possuem origem incerta, porém o primeiro registo histórico da utilização dos recursos eólicos para o bombeamento de água e a moagem dos grãos através desse engenho pertença à Pérsia, por volta de 200 a.C. Essas estruturas eram de baixa eficiência e possuíam um eixo vertical (LOPEZ, 2012). Sabe-se também que os chineses utilizavam o mesmo princípio para a drenagem de campos de produção

de arroz, embora não seja possível afirmar com certeza a data do início da sua utilização (FADIGAS, 2011).

Os cataventos primitivos permitiram a substituição da força motriz animal e humana nas diversas tarefas que as exigiam como a moagem dos grãos e o bombeamento de água. Esses engenhos, persistiram durante muitos séculos, foi somente no século 12 que surgiram na Europa os primeiros moinhos de eixo horizontal (LOPEZ, 2012). Com o objetivo de drenar água na Holanda, esses moinhos tiveram um papel muito ativo no desenvolvimento da economia na região, sendo comumente conhecidos como moinho do tipo “holandês”. É justamente na Holanda que a sua aplicabilidade se diversificou, passando a ser utilizado também para a produção de óleos vegetais, fabricação de papel e no processamento da madeira (LOPEZ, 2012). Por toda a Europa houve uma massificação do uso dos moinhos de vento, havendo na Alemanha 20.000 engenhos (HAU, 2005 *apud* FADIGAS, 2011), Inglaterra 10.000 engenhos, Holanda 9.000 engenhos, Bélgica 3.000 engenhos, França 650 engenhos (LOPEZ, 2012). Vivia-se o auge do aproveitamento eólico pelos moinhos de vento. A Europa apresentava um total de 200.000 unidades (HAU, 2005 *apud* FADIGAS, 2011).

Lopez (2012) nos mostra que o advento da revolução industrial e a mudança da força motriz para o vapor, posteriormente a eletricidade e os combustíveis fósseis, travou a progressão da utilização de moinhos de vento no século 19, até que surgem nos Estados Unidos da América (EUA), os cataventos de múltiplas pás para o bombeamento de água em regiões rurais e em todas as fazendas isoladas. Esses cataventos desenvolvidos com o mesmo princípio dos moinhos estiveram na base do desenvolvimento posterior dos modernos aerogeradores (LOPEZ, 2012). O primeiro cata-vento desenvolvido para a geração de energia elétrica (ver Figura 2) foi desenvolvido por Charles Bruch (LOPEZ, 2012) e produzia 12 kW em corrente contínua para carregamento de baterias e era voltado para a eletrificação do campo. O cata-vento de Bruch possuía um rotor de 17 metros (m) de diâmetros, 144 pás de madeira e uma cauda para direcionar o vento (STUKER, 2014).

Figura 5 — Primeiro Cata-Vento Desenvolvido Para A Geração Da Eletricidade



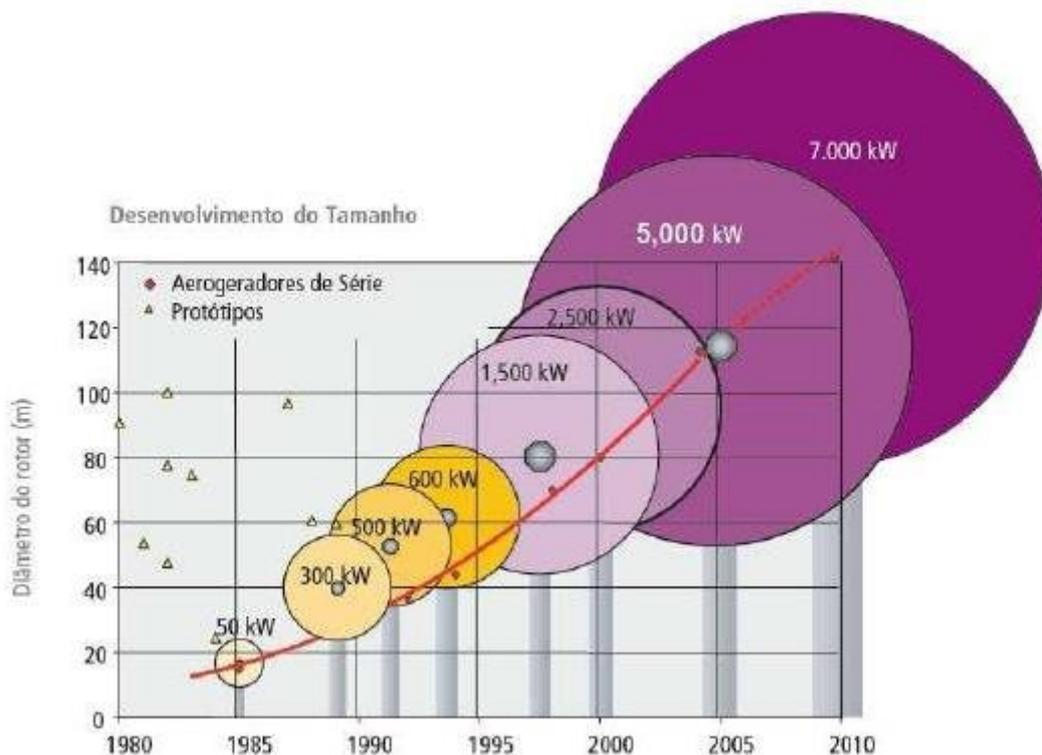
Fonte: Marcolin (2007)

Posteriormente a invenção do Charles Brush, Paul la Court, na Dinamarca desenvolveu um novo modelo de aerogerador que conseguia maiores velocidades e era mais eficiente para a produção de eletricidade que o cata-vento do Brush (STUKER, 2014). A proliferação desta tecnologia foi limitada pelo baixo custo da eletricidade gerada por combustíveis fósseis, relegando essa tecnologia apenas a pesquisas acadêmicas. Um protótipo de aerogerador da União Soviética posto a funcionar por dois anos no Mar Cáspio e que gerou um total de 200.000 kWh de energia elétrica, despertou o interesse de potências como a Alemanha, os Estados Unidos, Reino Unido, França e Dinamarca em desenvolver aerogeradores de grande porte pois mostrou-se possível a sua utilização em larga escala, apesar de ainda ser para fins experimentais (LOPEZ,2012). A utilização de energia eólica era ainda vista apenas como forma de suprir demandas de localidades isoladas (RIO, 2008 *apud* STUKER, 2014). A inserção de energia proveniente de aerogeradores de grande porte no sistema elétrico é recente e tem vindo a melhorar nas últimas décadas, apesar de a tecnologia já estar disponível a alguns anos, Stuker (2014) afirma que em 1987 já existiam aerogeradores de 2,5 MW de potência com diâmetros das pás de 97,5 metros, esses mesmos aerogeradores já

eram eficientes e competitivos. O autor afirma também que em 1950 já haviam pás fabricadas com material composto e controle de passo. Apesar dessas tecnologias, o que realmente impulsionou a utilização e o desenvolvimento de aerogeradores foram as sucessivas crises e oscilação dos preços do petróleo. Outros fatores que impulsionaram a utilização de aerogeradores e no seu rápido desenvolvimento, foram os investimentos feitos pela indústria do setor no desenvolvimento tecnológico e de estímulos dos mecanismos institucionais de incentivo (RIO, 2008 *apud* STUKER, 2014). As sucessivas melhorias advindas do desenvolvimento tecnológico cada vez têm reduzido o custo geral de produção de energia eólica, ou seja, reduzindo o preço do quilowatt-hora (RIO, 2008). A Figura 5 abaixo mostra como tem vindo a evoluir o diâmetro do rotor e a altura do cubo do aerogerador, aumentando dessa forma a potência extraída dos mesmos, a imagem mostra a evolução dos aerogeradores desde o modelo produzido pela União Soviética, que foi o primeiro grande aerogerador aproveitável para a produção de energia em larga escala, até a atualidade.

Observando-se com atenção a Figura 6, vê-se que com o passar dos anos e com o desenvolvimento de novas técnicas e materiais, está sendo possível aumentar a potência extraída por cada aerogerador, e hoje é possível um único aerogerador com um diâmetro de 140 metros extrair potência na ordem dos 7MW (Isto deve-se ao facto de que a potência extraída do aerogerador (também) aumentar com o acréscimo da área de varredora das pás, que por sua vez aumenta com o diâmetro do rotor.

Figura 6 — A Evolução Do Tamanho E Da Potência Extraída Dos Aeroeradores.



Fonte: Pinto, Fernando e Enio (2017).

### 3.6 A Potência Do Vento

A conversão da energia do vento em eletricidade se deve ao fato de o aerogerador poder captar a energia cinética presente em partículas de ar e convertê-la em potência mecânica e depois em eletricidade. A energia cinética do vento ( $E$ ) é calculada através da Equação 1 onde  $m$  é a massa de uma partícula de ar em kg e  $v$  a velocidade do ar em m/s.

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad \text{Eq. 1}$$

A potência do vento ( $P$ ) é a energia do vento por unidade de tempo, logo como pode-se observar na Equação 2, a potência é a energia cinética ( $E$ ) sobre o intervalo de tempo ( $\Delta t$ ). Potência é expressa em Watts.

$$P = \frac{E}{\Delta t} \quad \text{Eq. 2}$$

Resolvendo a Equação 2, pode-se simplificá-la da seguinte maneira:

$$P = \frac{1}{2}\dot{m}v^2 \quad \text{Eq.3}$$

Aonde  $\dot{m}$  é o fluxo de massa ou seja (massa por unidade de tempo) essas equações são apresentadas e demonstradas por Fadigas (2011). A potencia pode ser expressa em razão da massa específica do ar ( $\rho$ ) e da área de varredura das pás ( $A$ ) e para isso basta substituir o termo  $\dot{m}$  pela expressão  $\rho Av$  (ou seja  $\dot{m} = \rho Av$ ), obtendo-se assim a Equação 3. A equação 3, serve para mostrar o potencial da região, essa seria a “máxima” potência que se poderia extrair do local, porém ela não é totalmente aproveitada para gerar potência mecânica. Fadigas (2011) demonstra através da lei de Betz que é somente possível aproveitar  $\frac{16}{27}$  da potência contida na energia cinética dos ventos para a geração de potência mecânica.

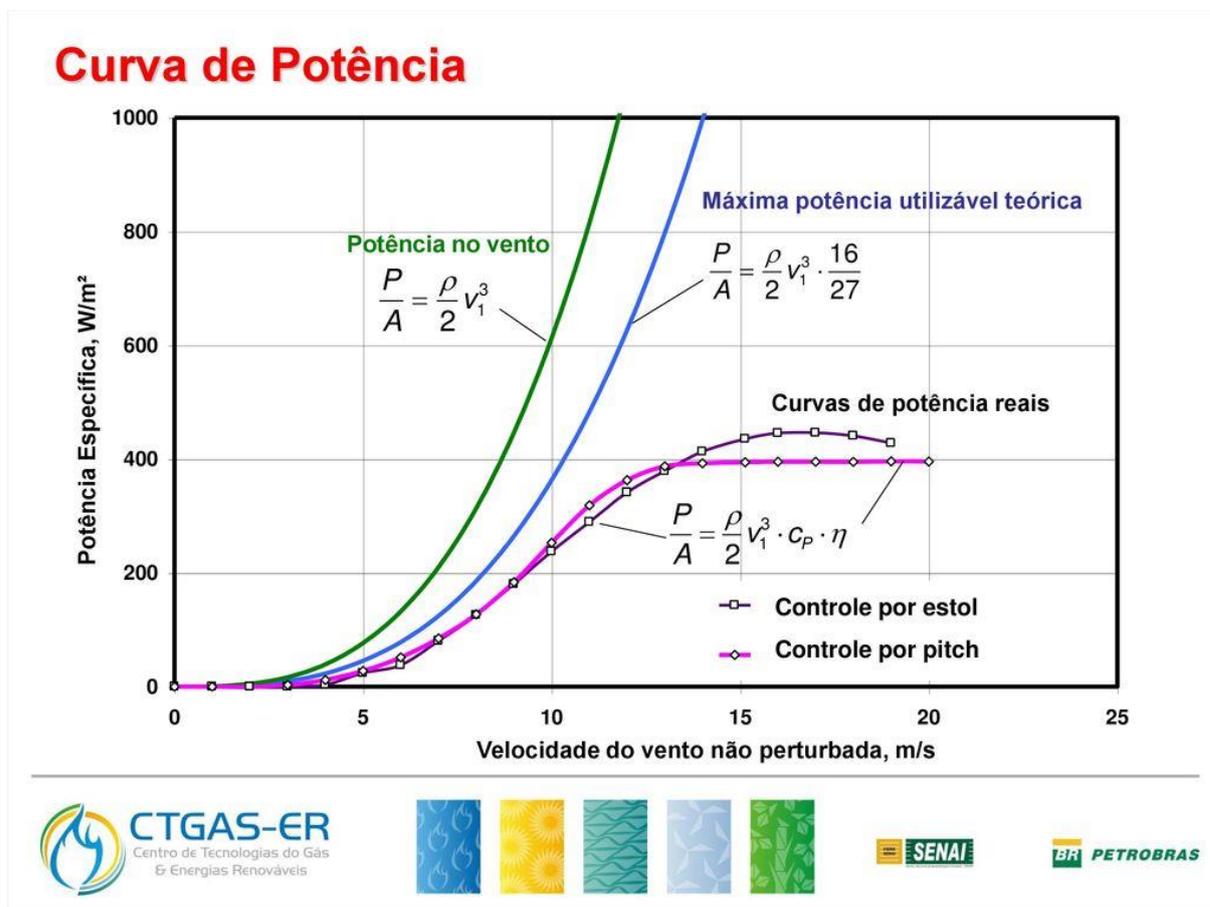
$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 \text{ Eq. 3}$$

A Equação 3 é a fórmula utilizada para o cálculo da potência contida no vento em uma dada região, porém como pode-se observar na equação anterior, o termo  $\rho$  sugere a possibilidade de para uma mesma velocidade do vento, o valor da potência variar de acordo com a massa específica do ar para um mesmo modelo de aerogerador. Por esta razão a Equação 3 é apresentada na sua outra variação que aqui representa-se pela Equação 4 (FADIGAS, 2011).

$$\frac{P}{A} = \frac{1}{2} \rho v^3 \text{ Eq.4}$$

A Equação 4 é conhecida como a densidade de potência e representa a potência por unidade de área ( $\frac{P}{A}$ ) e é expressa em ( $W/m^2$ ), ela é a energia contida na massa de ar que chega na parte frontal da turbina e varia com a velocidade do vento e a massa específica do ar (FADIGAS, 2011). A Figura 7 mostra basicamente como variam as densidades de potencias do vento teóricas (Potência no Vento) e as máximas potencias utilizável (Máxima Potência Utilizável Teórica), em relação a velocidade do vento. Ela apresenta a importância de maiores velocidades para a geração de maiores potências. Outra avaliação que pode ser feita através da Figura 6 é que do possível que pode ser aproveitado ( $\frac{16}{27}$ ) da energia cinética do vento, atualmente se aproveita bem menos, o que sugere a necessidade de melhorar a eficiência das turbinas para a geração de energia mecânica. A imagem mostra também aonde se encontram a eficiência das turbinas através da curva de potência reais.

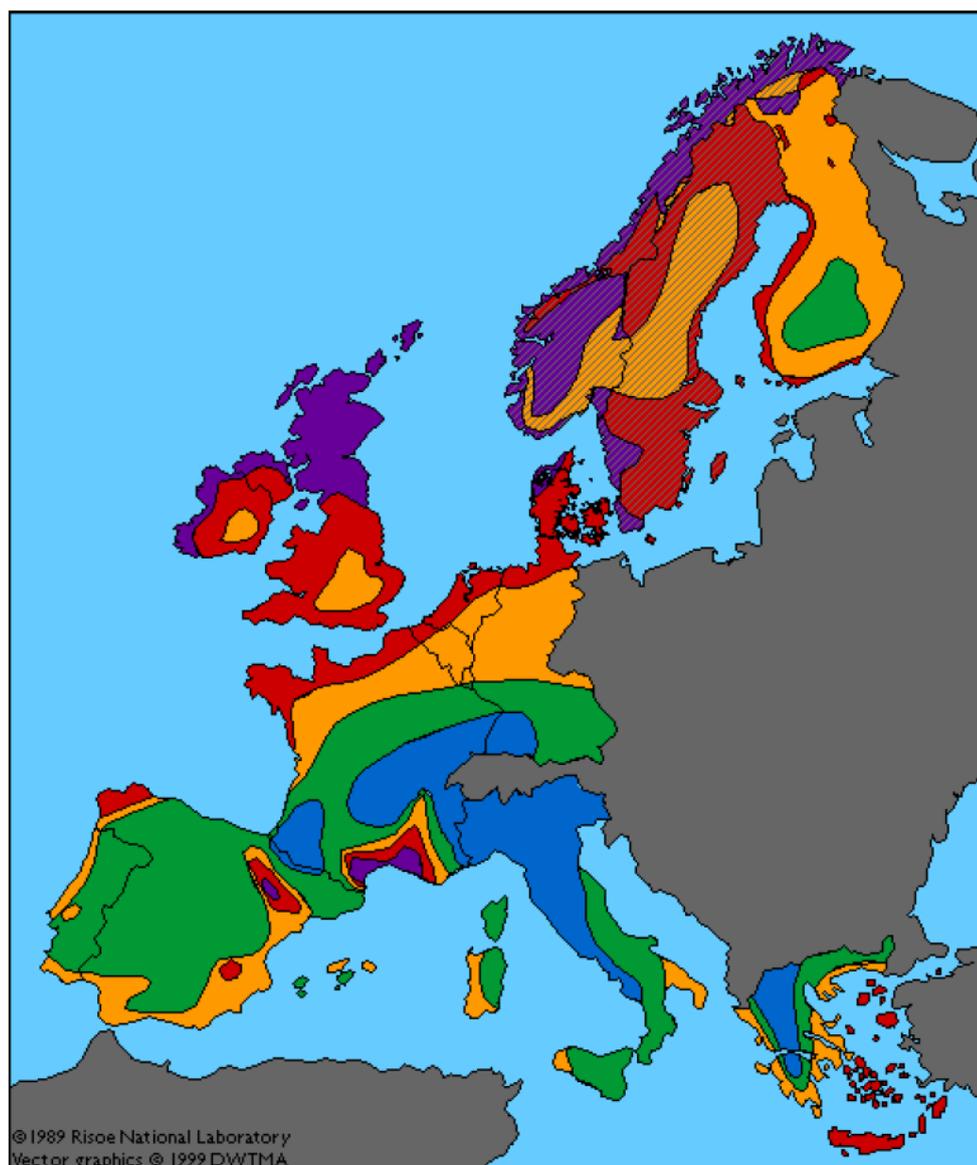
Figura 7 — Relação Entre A Velocidade Do Vento E A Densidade De Potência.



Fonte: Faro (2017)

A Figura 8 mostra como é o potencial eólico para alguns países Europeus, esse potencial é descrito na forma de densidade de potência, aonde maiores valores de densidade de potência estão associados a maiores valores de velocidade do vento. Esta figura dá informações do recurso eólico em países que foram pioneiros no desenvolvimento desta tecnologia, além de trazer o potencial de países que constam na lista dos maiores produtores de energia eólica. Observa-se que a Alemanha, Espanha, França, Reino Unido e Itália são na sequência os maiores produtores de energia eólica da Europa (GLOBAL WIND REPORT, 2016), e que embora o Reino Unido tenha maiores índices de densidade de potência e velocidades de vento, é apenas o quarto maior produtor de energia eólica no continente, a Figura 8, servirá posteriormente como forma de comparar o potencial eólico Europeu e de São Tomé e Príncipe.

Figura 8 — Atlas Europeu dos Ventos.



### Wind Resources at 50 (45) m Above Ground Level

Colour	Sheltered terrain		Open plain		At a sea coast		Open sea		Hills and ridges	
	m/s	W/m <sup>2</sup>	m/s	W/m <sup>2</sup>	m/s	W/m <sup>2</sup>	m/s	W/m <sup>2</sup>	m/s	W/m <sup>2</sup>
Purple	>6.0	>250	>7.5	>500	>8.5	>700	>9.0	>800	>11.5	>1800
Red	5.0-6.0	150-250	6.5-7.5	300-500	7.0-8.5	400-700	8.0-9.0	600-800	10.0-11.5	1200-1800
Orange	4.5-5.0	100-150	5.5-6.5	200-300	6.0-7.0	250-400	7.0-8.0	400-600	8.5-10.0	700-1200
Yellow	3.5-4.5	50-100	4.5-5.5	100-200	5.0-6.0	150-250	5.5-7.0	200-400	7.0-8.5	400-700
Blue	<3.5	<50	<4.5	<100	<5.0	<150	<5.5	<200	<7.0	<400
Light Purple			>7.5							
Light Red			5.5-7.5							
Light Orange			<5.5							

Fonte: Atlas Europeu de ventos (1989) apud Castro (2005).

Para o aproveitamento dos recursos eólicos para a produção de eletricidade é necessário levar em consideração parâmetros que podem condicionar a viabilidade econômica e as características técnicas e operacionais do empreendimento. Esses parâmetros são: a velocidade do vento, a rugosidade do terreno a altura e a direção do vento (ROVERE; WESTIN; WILLS, 2013).

A velocidade do vento como apresentou-se assume, portanto, uma posição de destaque no estudo do potencial eólico e neste sentido merece atenção especial uma vez que apresenta variações em sua velocidade, intensidade e direção em períodos que podem ser de curta, média ou longa duração. Por esta razão é extremamente importante o conhecimento do comportamento do mesmo na região de interesse, afim de se caracterizar o seu comportamento (ROVERE; WESTIN; WILLS, 2013).

A rugosidade do terreno é outro parâmetro importante para se ter em conta no processo de instalação do parque eólico, pois quanto mais acentuada for a rugosidade do terreno menor será a velocidade do vento. Desta forma é imprescindível que a rugosidade do terreno seja a mais baixa possível na região onde se pretende instalar o parque eólico de forma a diminuir sua influência sobre a velocidade do vento (ROVERE; WESTIN; WILLS, 2013). Quanto maior for a altura a que se encontrarem o cubo do aerogerador menor será a influência do terreno na turbina, e ela é uma grandeza que se modifica com as mudanças naturais na paisagem (FADIGAS, 2011)

A altura da turbina também tem um papel fundamental no aproveitamento do potencial eólico existente na região, observando-se com atenção a Figura 5 pode-se ver que a altura dos aerogeradores têm aumentado ao longo dos anos, isso deve se ao fato de que em alturas superiores encontram-se maiores índices de velocidades, que por sua vez aumenta a potência extraída. A relação entre a velocidade e a potência está descrita pelas equações 3.

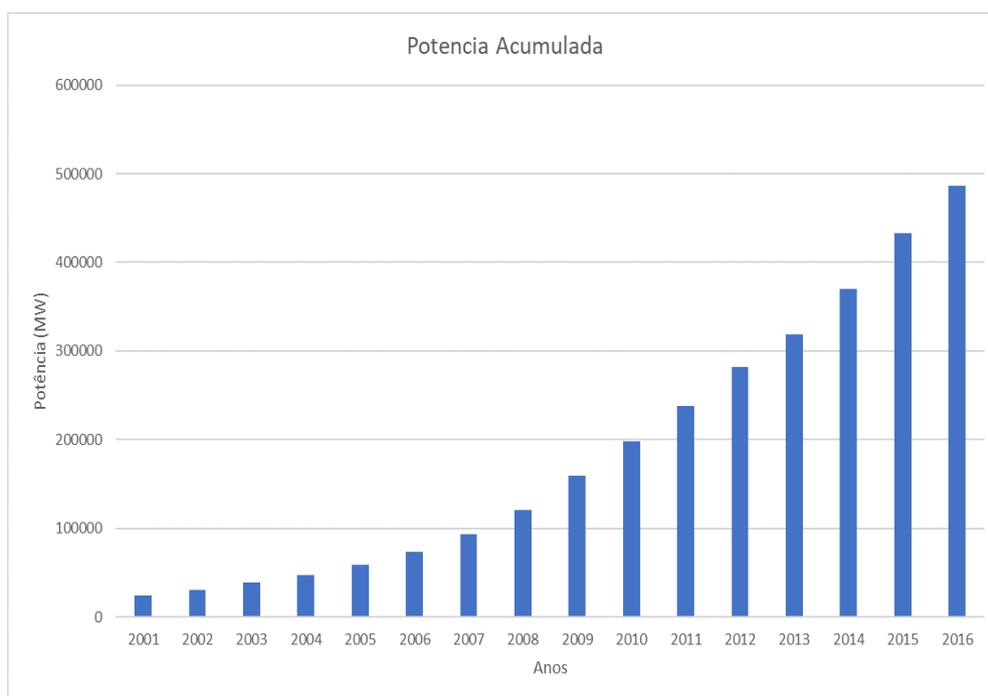
A direção do vento é outro parâmetro muito importante para o estudo do comportamento do vento, este parâmetro é levado em consideração em projetos de parques eólicos e a definição de layout das máquinas (ROVERE; WESTIN; WILLS, 2013) o autor afirma que por sofrer variações na sua direção ao longo de um determinado período, é importante a determinação deste comportamento como forma de avaliar a possível conformidade de uma determinada turbina ao comportamento variável das direções predominantes do vento. A rosa dos ventos é, portanto, uma boa ferramenta para a avaliação da distribuição da velocidade do vento e a frequência da variação de sua direção.

### 3.7 O Aproveitamento Eólico no Mundo

Verificou-se ao longo dos anos um desenvolvimento no setor de energia eólica graças as melhorias técnicas, as políticas de incentivo as fontes de energia renovável, o aumento da eficiência e as pressões ambientais causadas pela utilização de combustíveis fósseis. Tem se verificado aumentos na instalação de parques eólicos ao redor do mundo. Em 2016 verificou-se um aumento em mais de 12% da potência instalada mundial em relação ao ano anterior (2015) (GLOBAL WIND REPORT, 2016). Quando comparado com o ano de 1990 a energia solar cresceu em média 24% ano, durante este período de 1990 a 2016 (IEA, 2017), A energia eólica foi a segunda que mais cresceu em capacidade instalada perdendo para a energia solar fotovoltaica (45%) (IEA, 2017).

A Figura 9 mostra que o acumulado da potência instalada tem vindo a aumentar ao longo dos anos. Em 2001 a capacidade acumulada era de 23.900 MW e em 2016 esse valor está em 486.790 MW.

Figura 9 — Acumulado Anual Instalado no Mundo (2001 - 2016).



Fonte: Adaptado de Global Wind Report (2016).

Quanto a instalação de potência eólica anual que se pode observar na Figura 10, a tendência é a mesma, verificando-se em todos os anos acréscimos de potência relativos a energia eólica. O ano em que mais se instalou turbinas eólicas foi o ano de 2015. Existe uma

pequena oscilação em torno dos valores instalados nos diferentes anos, porém a tendência tem sido de crescimento e de sempre agregar potência ao longo dos anos e este aumento era de se espera uma vez que no gráfico da Figura 9 nos apresenta um crescimento da potência acumulada ao longo dos anos.

Na Figura 10 nota-se que o maior valor instalado correspondente ao ano de 2015 foi de 63.633 MW. Os anos de 2013 e 2016 registrou-se uma diminuição da potência instalada, comportamento contrário ao dos outros anos que sempre apresentaram um crescimento na potência instalada.

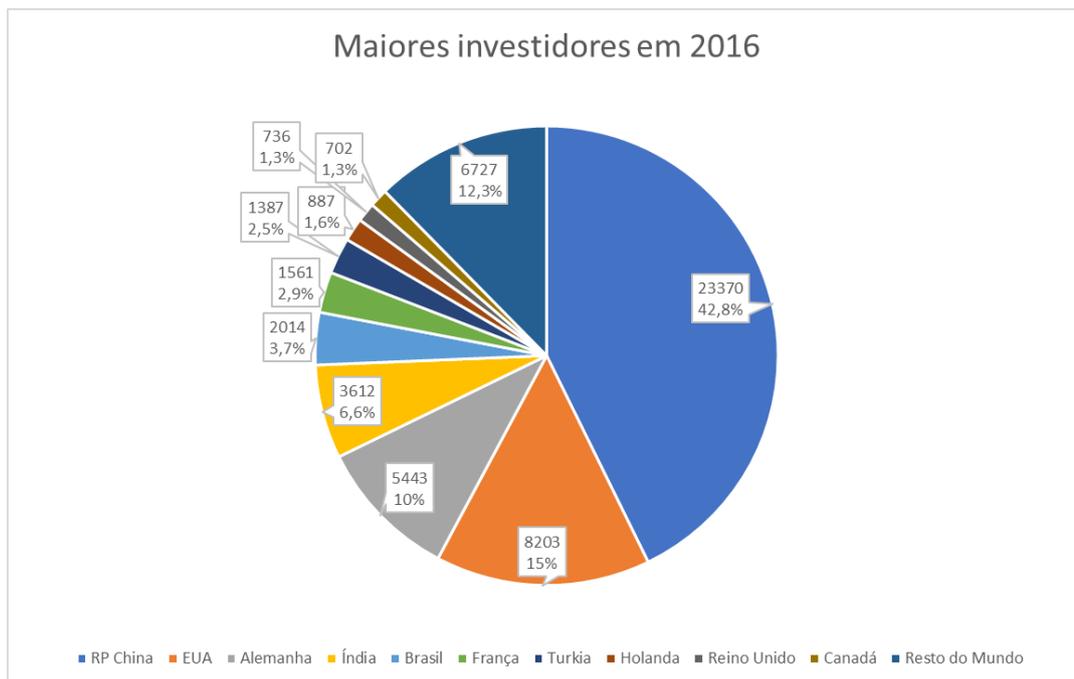
Figura 10 — Capacidade Instalada por Ano (2001 - 2016).



Fonte: Adaptado de Global Wind Report (2016).

A Figura 11 mostra que países industrializados lideram o investimento em energias renováveis. Os países que mais investiram em instalar parques eólicos acrescentar potência eólica no último ano foram a China que investiu em contratar 23.370 MW, seguido pelos Estados Unidos da América que instalou 8.203 MW e a Alemanha que instalou em 2016, valores na ordem dos 5.443 MW. Os outros sete maiores investidores no ano de 2016 podem ser observados na Figura 11.

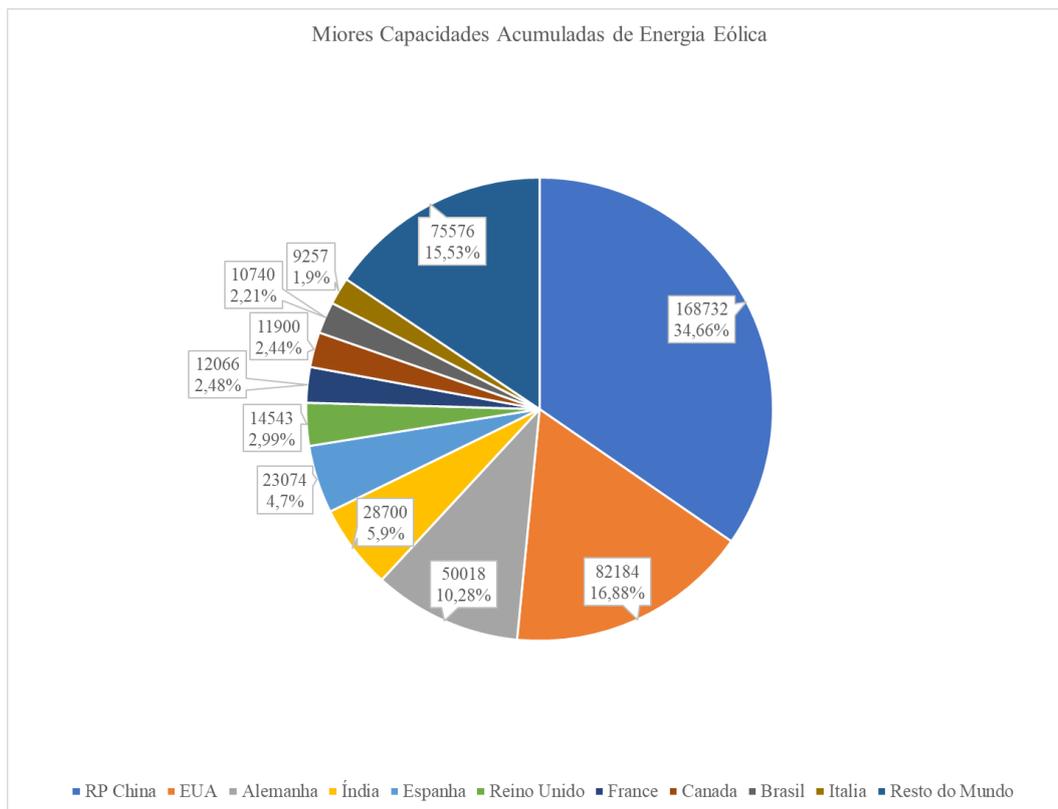
Figura 11 — Maiores Investidores Em Energia Eólica Do Ano 2016.



Fonte: Adaptado de Global Wind Report (2016).

Quanto à capacidade instalada total, pode-se observar que alguns países que mais investiram em energia eólica no ano de 2016 formam também lista de países que mais acumularam esse tipo de energia. Os países que ao longo dos anos investiram mais em energia eólica são apresentados na Figura 12. Consta-se que os líderes se mantêm inalterados quer em termos de maiores investidores no último ano, como os que mais investiram em geração de energia eólica. Os países que mais investem em energia são países com um grande poder econômico, e ditos industrializados.

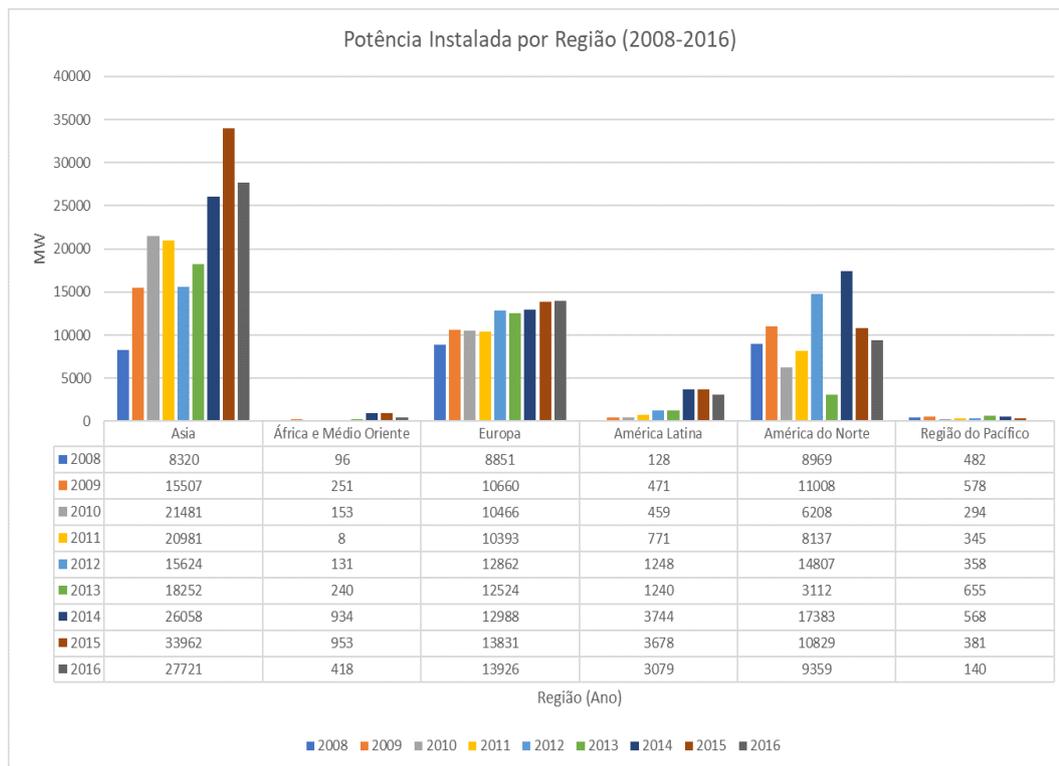
Figura 12 — Os 12 Países com Mais Potência Eólica Instalada até dezembro de 2016.



Fonte: Adaptado de Global Wind Report (2016).

A Figura 13 mostra como variou o setor eólico nos diferentes continentes para o período de 2008 à 2016. Através dessa figura podemos perceber aonde tem havido maior investimento nesse segmento. A Ásia é o continente onde se tem verificado os maiores investimentos dos últimos anos, seguido pela Europa e América do Norte, isto deve-se ao fato dos grandes investidores localizarem-se nessas regiões, a China, a Índia e a Coreia do Sul os 3 maiores produtores da Ásia; Alemanha, Espanha e Reino Unido os três maiores produtores da Europa; Estados Unidos da América, Canadá e México, os maiores produtores da América do Norte.

Figura 13 — Crescimento da Potência no Período de 2008 a 2016 nos Diferentes Continentes.



Fonte: Adaptado de Global Wind Report (2016).

Por fim, como forma de melhor detalhar os maiores contribuidores para produção de energia eólica por região, apresenta-se a seguir a Tabela 2 que mostra os principais contribuidores por região. Nessa tabela pode-se observar melhor que as regiões onde o investimento em energia eólica não tem tanto protagonismo, são a África e o Pacífico. Quando se observa a África, percebe-se que os países que possuem uma componente eólica na sua matriz energética, são minoritariamente países mais ricos que os outros da mesma região. Para nossa região de estudo que é o caso de São Tomé e Príncipe, não existe dados ou registros, isto porque como observa-se na matriz energética santomense, a energia eólica não participa na matriz energética nacional.

Tabela 2 — Maiores Produtores de Energia Eólica por Continente. Continua.

		Capacidade em 2015 (MW)	Instalado em 2016 (MW)	Total no final de 2016 (MW)
África e Médio Oriente	África do Sul	1053	428	1471
	Egito	810		810
	Marrocos	787		787
	Etiópia	324		324
	Tunísia	245		245
	Jordânia	119		119
	Outros	150		150
	<b>Total</b>	<b>3488</b>	<b>428</b>	<b>3906</b>
Ásia	RP China	145362	23370	168732
	Índia	25088	3612	28700
	Correia do Sul	835	201	1031
	Taiwan	647	35	682
	Paquistão	308	282	591
	Tailândia	223		223
	Filipinas	216		216
	Outros	253	25	276
<b>Total</b>	<b>172932</b>	<b>27525</b>	<b>200451</b>	
Europa	Alemanha	44941	5443	50018
	Espanha	23025	49	23074
	Reino Unido	13809	736	14543
	França	10505	1561	12066
	Itália	8975	282	9257
	Suécia	6029	493	6520
	Turquia	4694	1387	6081
	Polónia	5100	682	5782
	Portugal	5050	268	5316
	Dinamarca	5064	220	5228
	Holanda	3443	887	4328
	Romênia	2976	52	3028
	Irlanda	2446	384	2830
	Áustria	2404	228	2632
	Bélgica	2218	177	2386
Outros	7220	1077	8241	
<b>Total</b>	<b>147899</b>	<b>13926</b>	<b>161330</b>	
América Latina e Caribe	Brasil	8726	2014	10740
	Chile	911	513	1424
	Uruguai	845	365	1210
	Argentina	279		279
	Costa Rica	278	20	298

Tabela 3 — Maiores Produtores de Energia Eólica por Continente. Conclusão.

		<b>Capacidade em 2015 (MW)</b>	<b>Instalado em 2016 (MW)</b>	<b>Total no final de 2016 (MW)</b>
	Panamá	270		270
	Peru	148	93	241
	Honduras	176		176
	República Dominicana	86	50	135
	Caribe	164		164
	outros	335	24	359
<b>Total</b>		<b>12218</b>	<b>3079</b>	<b>15296</b>
América do Norte	EUA	73991	8203	82184
	Canada	11219	702	1190
	México	3073	454	3527
<b>Total</b>		<b>88283</b>	<b>9359</b>	<b>86901</b>
Região do Pacífico	Austrália	4187	140	4327
	Nova Zelândia	623		623
	Ilhas do Pacífico	13		13
<b>Total</b>		<b>4823</b>	<b>140</b>	<b>4963</b>

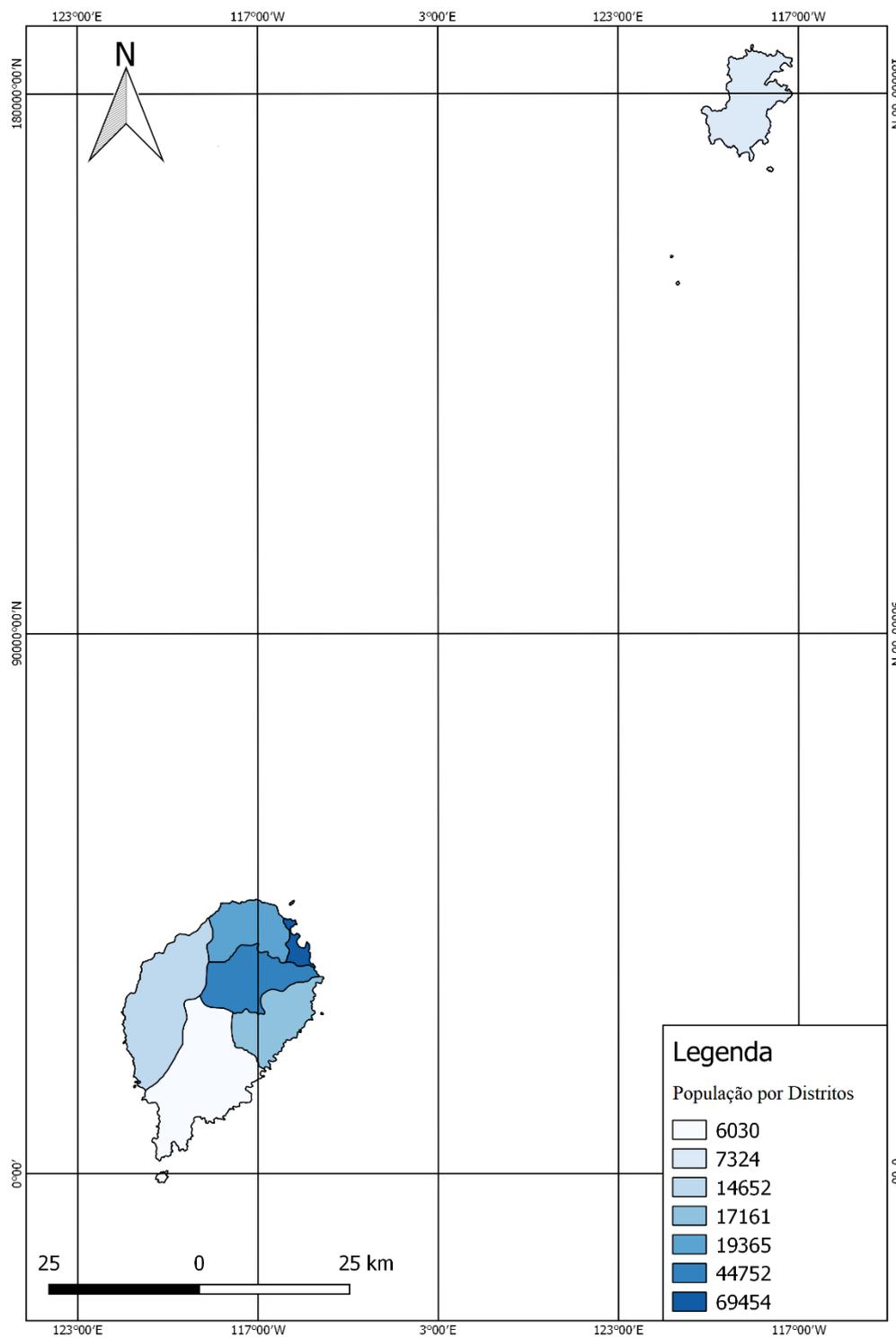
Fonte: Adaptado de Global Wind Report (2016).

### 3.7 Caracterização de São Tomé e Príncipe

A República Democrática de São Tomé e Príncipe (RDSTP), que comumente é conhecido como São Tomé e Príncipe (STP), é uma país situado no golfo da Guiné que tem uma população estimada segundo o quarto recenseamento da população e habitação do ano de 2012 em 187.356 habitantes (INE, 2014). A Figura 14, mostra como estão distribuídos os habitantes do país nas ilhas, e como pode-se observar, a região norte do país apresenta uma densidade demográfica muito grande, o distrito da capital (Água-Grande) possui 69.454 habitantes (INE, 2014), seguido pelo distrito de Mé-Zochi com 44.752 habitantes (INE, 2014), com um pouco menos que a metade dos habitantes de Mé-Zochi aparecem os distritos de Lobata com 19.365 habitantes e Cantagalo com 17.161 habitantes, Lembá possui 14.652 (INE, 2014)

Caué possui 6.030 habitantes (INE, 2014). A ilha do Príncipe possui uma população recenseada de 7.324 habitantes (INE, 2014).

Figura 14 — Mapa com a distribuição da população pelos referidos distritos.

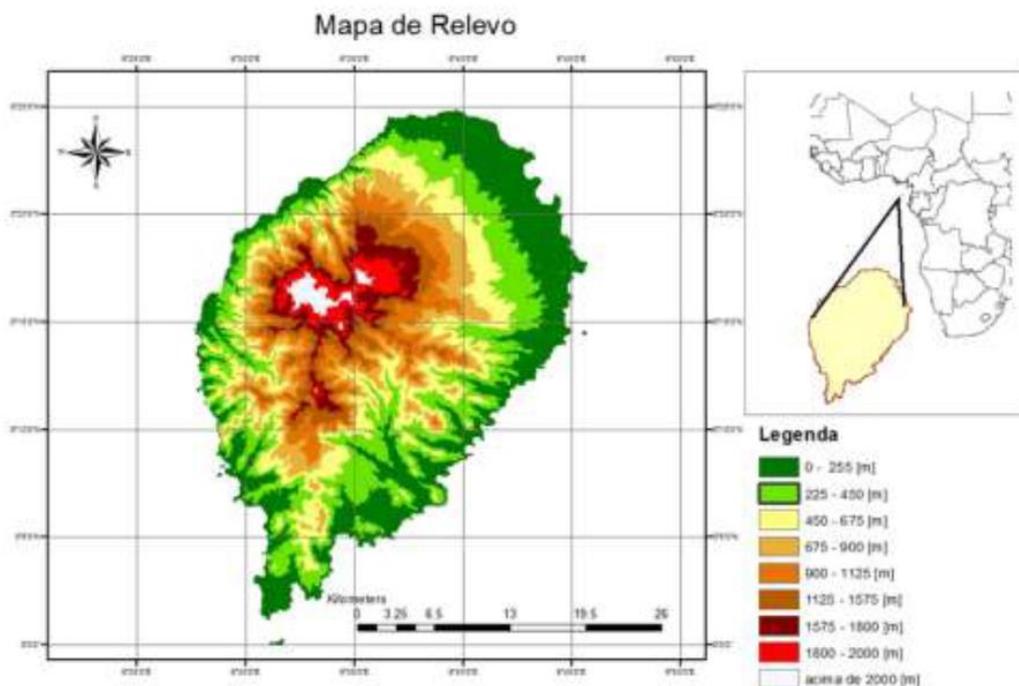


Fonte: Autor.

O país é um arquipélago formado por duas ilhas habitadas e outras ilhas de dimensões menores. A ilha de São Tomé cuja a capital também leva o nome São Tomé e a ilha

do Príncipe, a ilha do Príncipe é uma região autônoma e a sua capital chama se Santo Antônio. A ilha de São Tomé tem uma área de 859Km<sup>2</sup> enquanto a ilha do Príncipe apresenta uma área de aproximadamente 142 km<sup>2</sup> (CGD, 2014). Segundo o relatório de oportunidades e potencial de desenvolvimento realizado pela CDG (2014) a ilha do Príncipe dista da ilha de São Tomé e Príncipe por cerca de 200 km e o país se encontra a 250 km de Guiné-Equatorial e de Camarões, a cerca de 300 km de Gabão e a 400 km da Nigéria. As ilhas são de origem vulcânicas e apresentam um relevo acidentado com alguns picos e montanhas, em São Tomé, podemos encontrar altitudes de 2024 m no pico de São Tomé, que é o ponto mais alto do país. Outros locais de elevada altitude são o Ana Chaves com 1636 m; o Pinheiro com 1613 m; o Calvário com 1600 m e a Lagoa Amélia com 1488 m. Na ilha do Príncipe pode-se encontrar elevações de 948 m no Pico de Príncipe; 935 m em Mencorne e 839 m em Carriote. A Figura 15 mostra como é a distribuição de altitude para a ilha de São Tomé, pode-se ver que as regiões mais altas estão na parte central da ilha e que como já foi descrito a ilha é bastante heterogênea em termos de relevo.

Figura 15 — Distribuição da Altitude na Ilha de São Tomé.

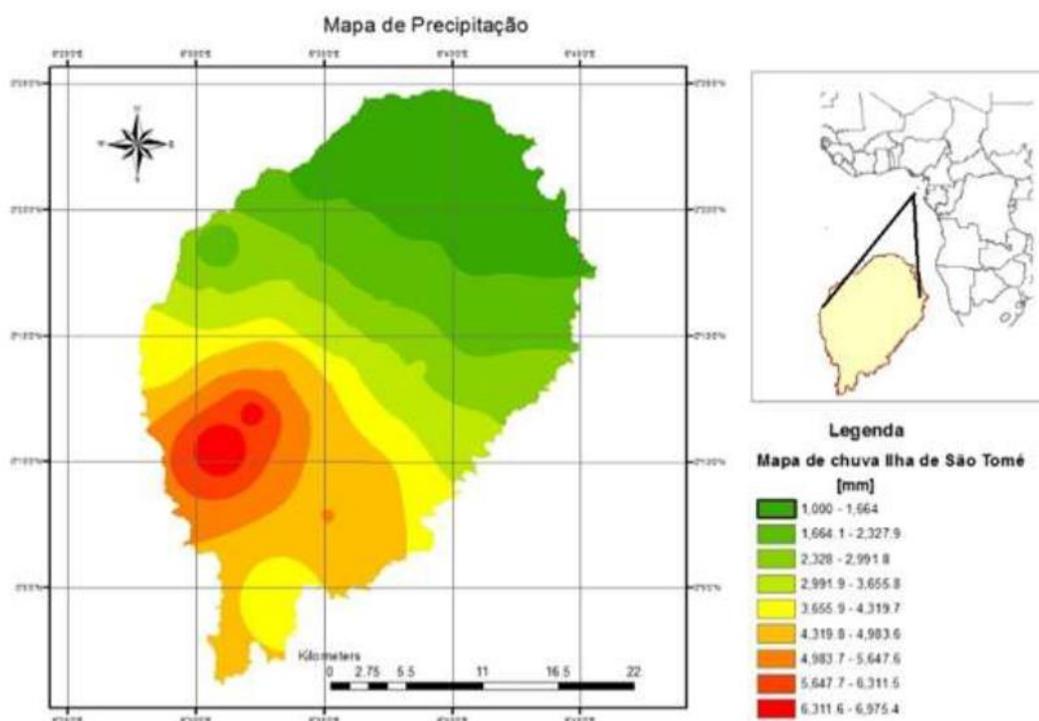


Fonte: Santana *et al.*, (2017).

As ilhas apresentam um clima tropical úmido e apenas duas estações do ano. A estação que apresenta maiores índices de precipitação e de sensação térmica mais alta abrange

os meses de setembro à maio e é conhecida como estação Época de Chuvas. A outra estação, chamada de Gravana há redução da frequência e intensidade das precipitações e este período compreende os meses de junho à agosto. A sensação térmica neste período de Gravana é de temperaturas mais baixas. Observa-se através da Figura 16 que as precipitações apresentam índices maiores na região sul entre 6311 mm à perto de 6974 mm, em contraste com os cerca de 1000-1600 mm da região norte.

Figura 16 — Distribuição da Precipitação para a Ilha de São Tomé.



Fonte: Santana et al., (2017).

O arquipélago apresenta temperaturas que variam de 21°C a 31°C, com uma temperatura média a rondar os de 26°C (CGD, 2014). A umidade relativa assim como a temperatura, varia muito com a altitude do país, sendo que no país pode-se encontrar umidades relativas do ar média em torno dos 85,50%, com mínimas de 76% e máximas podendo atingir aos 96% (CGD, 2014). Segundo o mesmo relatório da DGRNE, do ministério dos recursos naturais e do meio ambiente as ilhas de São Tomé e Príncipe, apresentam índices de evaporação que varia dos 33,7 à 99 mm/mês. A tabela 3, apresenta de forma resumida, algumas características hidro meteorológicas para a ilha de São Tomé e a ilha do Príncipe. Pode-se observar a média, os valores máximos e mínimos médios, de temperatura, precipitação, velocidade do vento, evapotranspiração, umidade relativa.

Tabela 3 — Tabela resumindo os principais parâmetros hidro climáticos para as ilhas de São Tomé e Príncipe.

<b>Variáveis climáticas</b>		<b>São Tomé</b>	<b>Príncipe</b>
Precipitação Anual		2716 mm/ano	2293 mm/ano
Temperatura	Média	22,3 °C	25,2 °C
	Min - Max	13,6 - 31 °C	20,1 - 30,3 °C
Direção do vento		O vento sul é a direção do vento predominante	
Velocidade do vento	Média	3,47 m/s	
	Min - Max	2,5 - 6,3m/s	
Umidade Relativa	Média	85,50%	82,50%
	Min - Max	76% - 95%	80% - 86%
Média evaporação Mensal		33,7 - 99,1mm/mês	33,9 - 66,0 mm/mês

Fonte: Adaptado de DGRNE (2009).

## 4 METODOLOGIA

### 4.1 Área de Estudos

Este estudo foi realizado para a região geográfica pertencente ao domínio territorial da República Democrática de São Tomé e Príncipe (RDSTP). A região é limitada pelas latitudes de 1° 44' Norte e 0° 1' Sul e entre as longitudes de 7° 28' Este e 6° 28' Este (CGD, 2014), esta região agrupa todas as ilhas e ilhotas incluindo o mar territorial pertencente a RDSTP.

### 4.2 Dados Utilizados

Para o estudo foram utilizados dados de vento do CFSR produzido pelo NCEP, e é um sistema de dados globais que apresenta uma alta resolução e se propõe em estimar parâmetros atmosféricos e não só, através de um modelo constante e com um sistema de aquisição de dados multianual contínuo (SAHA *et al.*, 2010). A resolução da atmosfera para o CFSR global é de aproximadamente 38 km com 64 níveis e possui um campo de previsão de 6 horas com uma resolução de 0.5° graus (STUKER, 2014; SAHA, 2010). A série temporal estudada compreende os meses de janeiro de 1979 a dezembro de 2010. Esses dados, provenientes da segunda geração de reanálise, apresentam segundo o Haas *et al.* (2013), a melhor cobertura de informações meteorológicas do planeta além de, segundo o Stuker (2014) apresentarem erros em relação aos dados observados menores que outros modelos e reanálises anteriores. Os dados estimados nessa reanálise, é calculado através da intercepção, utilizando-se para isso modelos numéricos de previsão do tempo, de informações de várias bases de dados proveniente de diferentes partes do mundo assim como de diferentes instrumentos como por exemplo a utilização de dados de estações meteorológicas, satélites, boias oceânicas, estações sinóticas, radiossondas e embarcações (MARTINS; GUARNIERI; PEREIRA, 2007 *apud* STUKER, 2014).

O vento atmosférico presente do CFSR é estimado para uma altura de 10 m sendo apresentado decomposto em suas componentes zonal (U) e componentes meridional (V).

Os dados de velocidade do vento utilizados foram calculados através de suas componentes U e V, disponibilizados no banco de dados do CFSR como “U *component of the Wind*” e “V *component of de the Wind*” e apresentam suas unidades em metros por segundo

(m/s). As componentes U e V do vento estimadas na reanálise do CFSR são para uma altura de 10 metros acima da superfície do mar. Para o cálculo da velocidade procedeu-se calculando o vetor resultante destas duas componentes do vento. A velocidade do vento foi calculada com o auxílio da Equação 5, como proposto por Santana (2014).

$$ws = \sqrt{u^2 + v^2} \quad \text{Eq. 5}$$

Para o cálculo da direção do vento (Dir) utilizado para gerar as imagens do mapa de vetores, e as rosas do vento, recorreu-se ao ângulo formado por estes dois vetores U e V, para tal recorreu-se a utilização da função trigonométrica arco tangente, como pode-se observar na equação 6 proposta por Stuker (2014).

$$\text{Dir} = \tan^{-1}\left(\frac{-V}{-U}\right) \quad \text{Eq. 6}$$

### 4.3 Histograma

Após o cálculo da velocidade do vento, procedeu-se fazendo-se análise dos dados calculados, essa análise foi feita através de um histograma de frequência, o histograma de frequência tem como objetivo apresentar as ocorrências dos diferentes intervalos de velocidade. As classes de velocidade do vento encontram-se divididas em intervalos de 1 m/s e os intervalos de velocidade começam com velocidades de 2m/s e vão até 11m/s. Para cada classe de velocidades é calculada a frequência, dividindo o número de ocorrências de cada classe pelo número total de ocorrências.

Como a maioria dos aerogeradores para a produção de eletricidade apresentam o seu cubo a alturas superiores a 10m, procedeu-se a utilização da lei logarítmica para extrapolar a velocidade a outras alturas, neste caso a 100m. A lei logarítmica é uma combinação de métodos teóricos e empíricos que pretendem estimar a variação da velocidade do vento com a altitude, através de estudos da dinâmica de fluidos em fluxos de vento da camada limite. Esta lei é usada para estimar a velocidade de vento vertical em uma região particular. A sua Equação é mostrada a seguir pela Equação 7, como apresentado por Fadigas (2011).

$$v(h) = vref \frac{\ln\left(\frac{h}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{href}{z_0}\right)} \quad \text{Eq. 7}$$

Pela Equação 7, tem-se que  $v_{ref}$  é a velocidade de referência (neste caso a velocidade do vento a 10 m), o  $h$  é a altura que se pretende calcular a velocidade do vento (neste caso a 100 m),  $h_{ref}$  é a altura de referência (10 m) e  $z_0$  é o comprimento de rugosidade.

O comprimento de rugosidade  $z_0$  é o parâmetro que representa a influência da natureza do terreno no perfil vertical da velocidade do vento, esse parâmetro é influenciado também por outros fatores como estrutura da vegetação e por sua distribuição espacial; hora do dia, temperatura, parâmetros térmicos e mecânicos além de ser influenciado também pela estação do ano (FADIGAS, 2011). A tabela 4 mostra alguns valores utilizados para alguns terrenos conhecidos. O  $z_0$  utilizado para este estudo foi 0,0002m e que corresponde a mar aberto e calmo, por ser o que melhor se enquadra na região de estudo. Deve-se, porém, advertir ao leitor que o parâmetro relacionado a natureza do comprimento de rugosidade ( $z_0$ ) sofra alterações em detrimento da variação da direção e de acordo com as estações do ano (CASTRO, 2005), e deve ser tomado em consideração na análise das características do terreno, porém esta última consideração foi posta de lado na elaboração deste trabalho, por falta de estudos desta natureza na região em análise.

Tabela 4 — Diferentes variações de valores de comprimento de Rugosidade para diferentes tipos de terreno.

Tipo de terreno	$z_0$ (m) Min.	$z_0$ (m) Max.
Lama / gelo	0,00001	0,00003
Mar calmo	0,0002	0,0003
Areia	0,0002	0,001
Neve	0,001	0,006
Campo de cereais	0,001	0,01
Relva baixa / estepes	0,01	0,04
Descampados	0,02	0,03
Relva alta	0,04	0,1
Terreno com árvores	0,1	0,3
Floresta	0,1	1
Povoação dos subúrbios	1	2
Centro da cidade	1	4

Fonte: Adaptado de Fadigas (2011)

Para o tratamento estatístico realizado utilizou-se bibliotecas e pacotes Python como Numpy e Pandas. A elaboração de gráficos assim como os histogramas foram feitos com o auxílio da biblioteca matplotlib, e basemap essas bibliotecas mostraram-se uma importante

ferramenta e de fácil domínio para o tratamento destes dados, possibilitando fazer todos os gráficos e imagens do presente trabalho.

#### 4.4 Rosa dos Ventos

Foi feita uma análise idêntica a feita para as velocidades, porém agora com as direções. Uma vez calculadas as direções, representou-se as direções médias das referidas classes de velocidade, onde é apresentado na secção de resultados e discussão e apresenta as direções e as frequências das classes de velocidades encontradas na região em estudo, essas informações foram organizadas em uma rosa dos ventos.

A rosa dos ventos foi elaborada com o intuito de mostrar a direção das principais classes de velocidades verificadas em cada mês e suas frequências. Ela apresenta a média de suas frequências ao longo de todo o período 1979 a 2010.

#### 4.5 Distribuição de Weibull

A função distribuição de Weibull calculada pela Equação 8, tem sido utilizada como forma de representar simplificada algumas informações imprescindíveis sobre o comportamento do vento. Ela permite, segundo Silva *et al.* (1999), associar uma distribuição de probabilidade à curva de frequência de velocidades com propriedades que podem ser deduzidas facilmente através de simples artifícios matemáticos. Por outras palavras, os autores afirmam que a distribuição de Weibull é uma forma compacta de apresentar os dados do vento.

$$f(V) = \frac{k}{C} \quad \{k > 0 \ C > 1\} \text{ Eq.8}$$

A função distribuição de Weibull como se pode observar na Equação 8 é uma distribuição bi paramétrica e exige um conhecimento da velocidade média e do desvio padrão (SILVA *et al.*, 1999), que são utilizados para o cálculo dos seus parâmetros. O fator de forma  $K$  (Equação 9) e o fator de escala  $C$  (Equação 10).

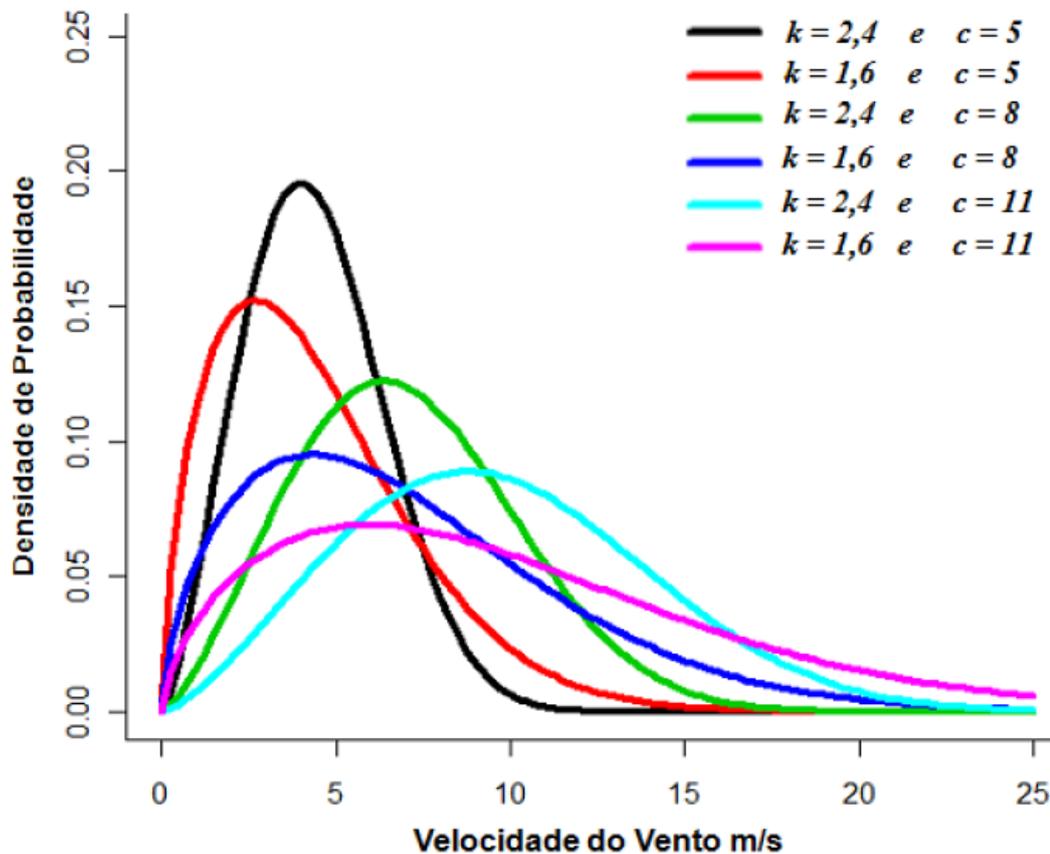
$$k = \left(\frac{\sigma}{vm}\right)^{-1,086} \text{ Eq. 9} \quad C = \frac{vm}{\tau(1+\frac{1}{k})} \text{ Eq. 10}$$

O fator de forma  $K$  e o fator de escala  $C$ , utilizados para o cálculo da distribuição de weibull Equação 8 são muito importantes no processo de avaliação das condições do local

(CHRISTÓSFARO, 2010). O parâmetro de forma informa a regularidade e ou a variação do vento (CHRISTÓSFARO, 2010). Enquanto que o valor de forma a define a escala da distribuição e indicam a desigualdade nas distribuições dos dados do vento (CHRISTÓSFARO, 2010). A Figura 17 mostra como é a forma da distribuição de Weibull para várias combinações diferentes de K e C e pode-se observar que quanto maior o K e menor C menores variações de vento são observadas, maior será a regularidade dos ventos em termos de velocidade e mais estreita será a curva de distribuição (CHRISTÓSFARO, 2010). Já o caso contrário, ou seja, menores K e maiores C indicam uma maior faixa de velocidades de vento. Valores muito distantes de para os parâmetros de escala C indicam maiores desigualdades nas distribuições dos dados da velocidade do vento (PETRY E MATTUELLA, 2007 apud CHRISTÓSFARO, 2010).

Segundo Bautista (2002) e Mirshawka (1979) *apud* Christófaros (2010) a função de weibull apresenta melhor precisão na descrição das circunstâncias do vento em relação a outros métodos, e é muito utilizada para avaliação de potencial eólico. O fato da função de distribuição de weibull utilizar o desvio padrão, ela apresenta também a incerteza nos dados utilizados (PETRY; MATTUELLA, 2007 *apud* CHRISTÓSFARO, 2010).

Figura 17 — Variação do gráfico da densidade de weibull com diferentes fatores de forma ( $k$ ) e parâmetro de escala ( $C$ ).

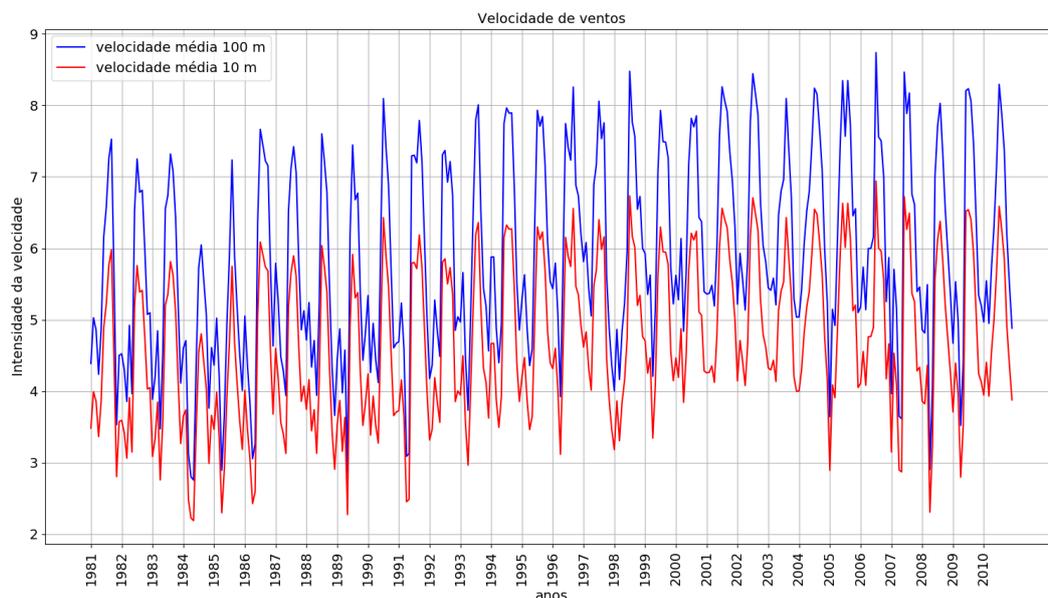


Fonte: Vargas (2015).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 18 mostra os dados da velocidade do vento para a altura de 10m a vermelho e a velocidade extrapolada de 100 m a azul. Com esses dados de velocidade de 100 m organizou-se em um histograma de frequência. A Figura 19 mostra o diagrama de frequência da distribuição da velocidade para a região de São Tomé e Príncipe para o período de 1981 a 2010. A Figura 18, mostra que a velocidade a 100 m é maior que a de 10 m como era de se esperar, não existe outra diferença além dos valores de velocidade serem maiores pois a velocidade a 100 m foi calculada a partir da velocidade de 10m, utilizando a equação 7.

Figura 18 — Velocidade do Vento a 100 m e a 10 m.

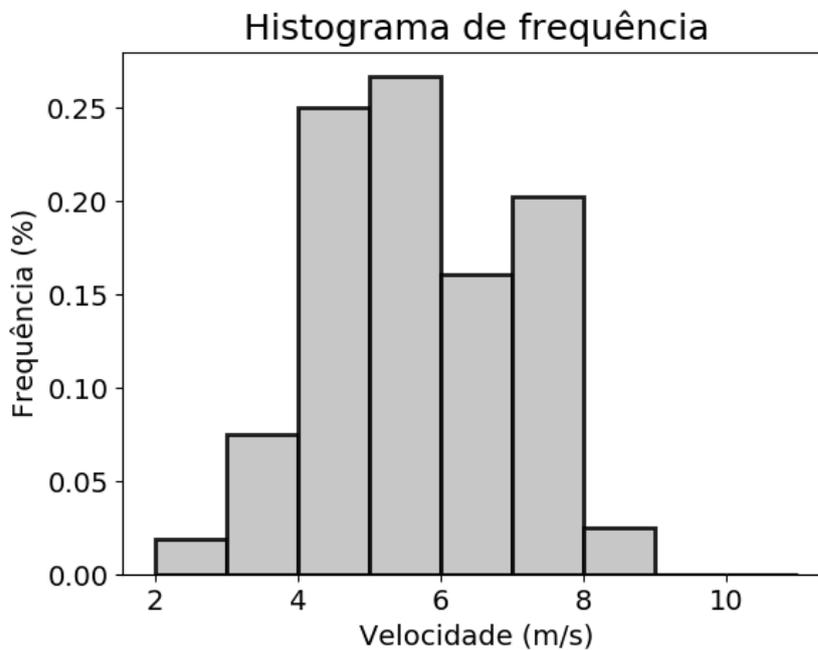


Fonte: Autor.

Na Figura 19 os valores de velocidade que mais ocorreram neste período para a referida região de estudo, estão compreendidos nos intervalos de 5 m/s a 6 m/s com uma frequência pouco acima dos 25 %. Seguido pelas velocidades encontradas no intervalo de 4 m/s a 5 m/s com uma ocorrência a rondar os 25 % das velocidades estimadas. Os intervalos de 6 m/s a 7 m/s apresentaram uma frequência de estimação de 15% enquanto que as velocidades compreendidas entre 7 m/s e 8 m/s apresentaram uma frequência de 20%.

O vento para este período está muito concentrado nas velocidades compreendidas nos intervalos de 4 m/s a 8 m/s. É importante salientar que velocidades acima de 3,5 m/s são as velocidades de interesse pois a maioria das turbinas de médio porte para sistemas isolados, têm suas velocidades de *cut in* na faixa de 2,5-4m/s (PANTOJA, 2013). Os autores firmam que estas faixas de velocidades são admissíveis para a produção de energia em sistemas de médio porte enquanto que as faixas de 6,5 m/s a 7,5 m/s possibilitam um aproveitamento em larga escala com máquinas de grande porte. Estes valores de faixas de velocidade para o aproveitamento para esses fins já estão considerados as questões técnicas e econômicas.

Figura 19 — Histograma De Frequência Para Velocidade Do Vento Estimada Para A Altura De 100 Metros.

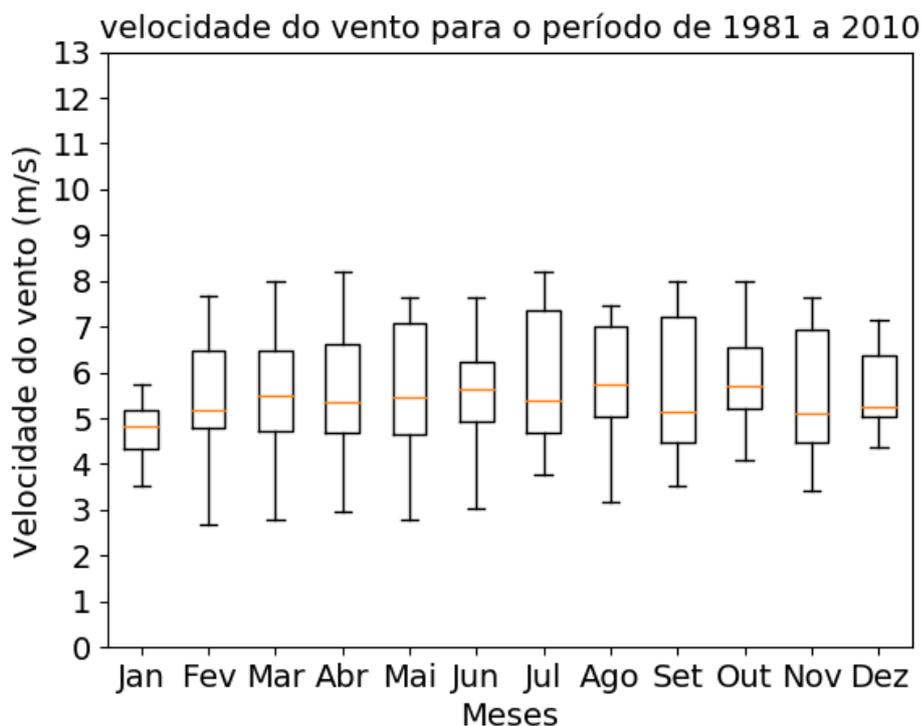


Fonte: Autor.

Os dados de vento foram também organizados em um gráfico do tipo diagrama de caixa “*box-plot*” para melhor mostrar o comportamento do vento ao longo dos meses, e a sua variação dentro do ano, como mostrado na Figura 20.

Pode-se observar na Figura 20 que o mês de janeiro é aquele que apresenta uma mediana menor de velocidade, porém é o mês que apresenta menos dispersão e amplitude nos valores de velocidade apresentados. As velocidades ao longo do ano não sofrem uma grande variação, e os meses apresentam nas suas medianas, valores próximos da região dos 5,5 m/s a 6 m/s. A pouca variação ao longo dos meses, e as velocidades longe do limite velocidade de 25m/s (ventos extremos) que podem danificar o aerogerador, são resultados desejáveis na medida em que os mesmos não sofrerão muito estresse mecânico que possam causar fadigas mecânicas ocasionadas por ventos extremos.

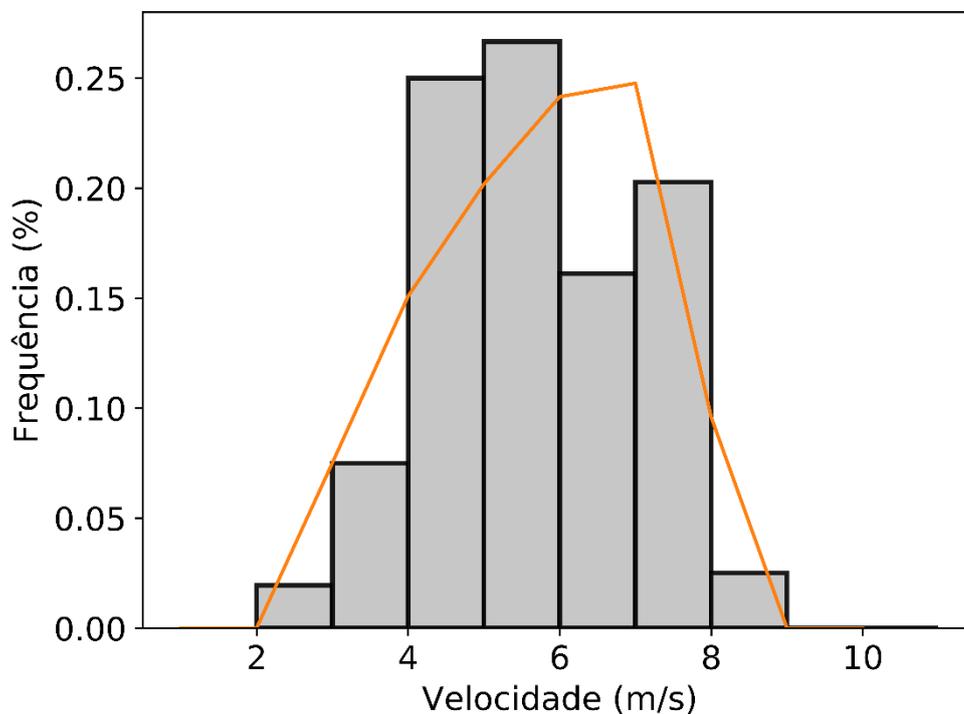
Figura 20 — Velocidade Do Vento Estimada Para A Altura De 100 m.



Fonte: Autor.

A Figura 21, apresenta o gráfico da função densidade de probabilidade de weibull aplicada a série de dados. Para essa função os seus parâmetros de forma e de escala foram calculados e apresentam valores de  $K=4,36$  e  $C=1,32$  e foram calculados através das equações 9 e 10. Com estes valores, pode-se observar que o  $K$  assume um valor muito alto, o que nos sugere que estes dados assumem um comportamento muito regular e próximos do seu valor médio, pois apresentam um pequeno desvio padrão. Este resultado era de se esperar pois a Figura 19. Já nos apresenta o mesmo comportamento. A função de distribuição de weibull não se adequou da melhor forma aos dados que se tem quando compara-se o gráfico da função densidade de probabilidade de weibull com o histograma de frequência, porém, esses dados de  $K$  e  $C$  são os que melhor fornecem condições para que a distribuição de weibull, se ajuste melhor a distribuição de frequência.

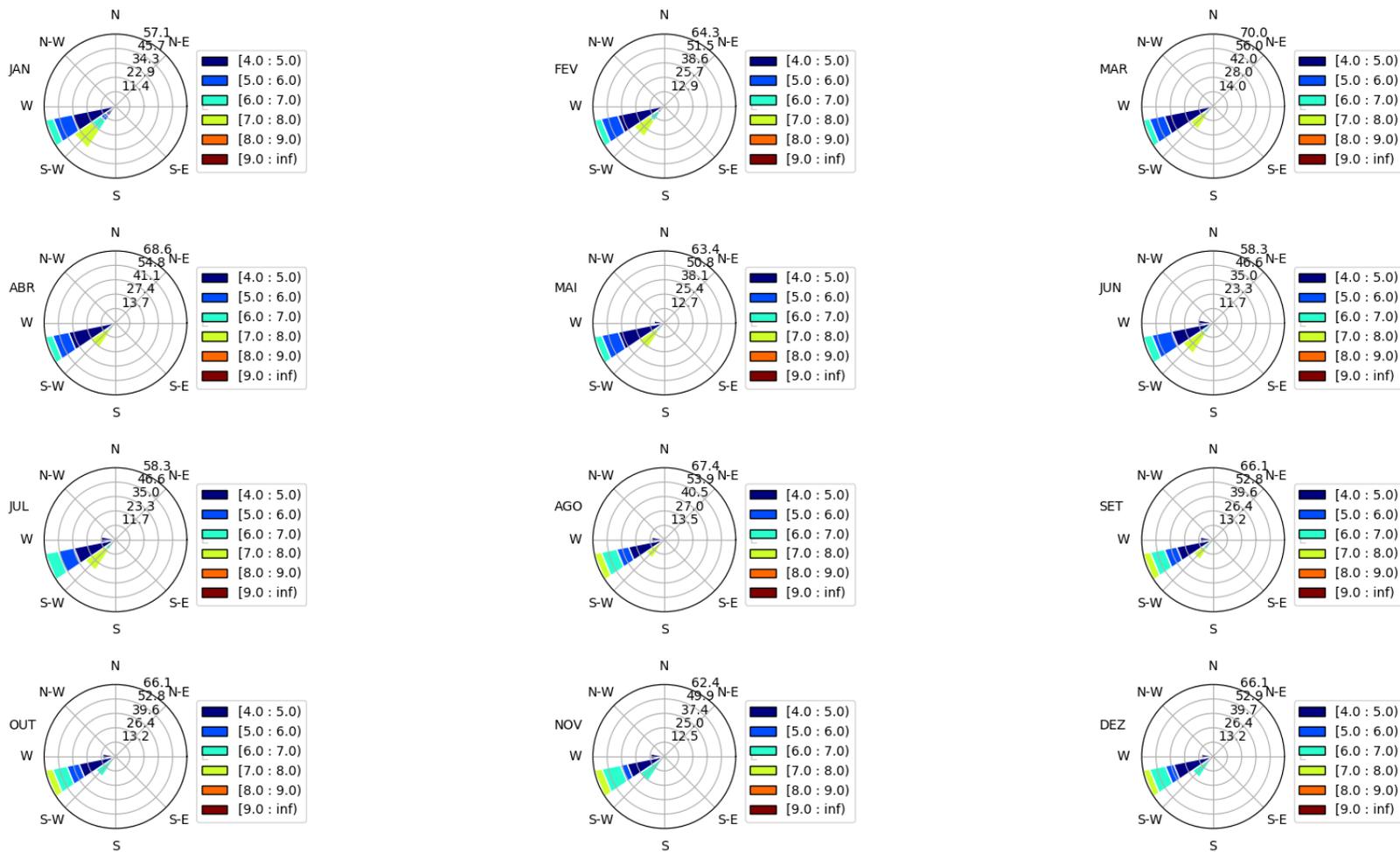
Figura 21 — Distribuição de weibull ajustada aos dados de vento para a altura de 100 metros.



Fonte: Autor.

Observa-se na Figura 22 que a direção dos ventos é predominantemente no sentido sudoeste para nordeste, em todos os meses para a maioria das classes de velocidades. Existem algumas pequenas variações na direção do vento, porém esta variação de direção não ultrapassa os  $45^{\circ}$ , esta pouca variação da direção do vento é um importante fator a considerar no projeto pois grandes variações de direção de vento podem causar fadigas em alguns componentes do aerogerador (FADIGAS, 2011).

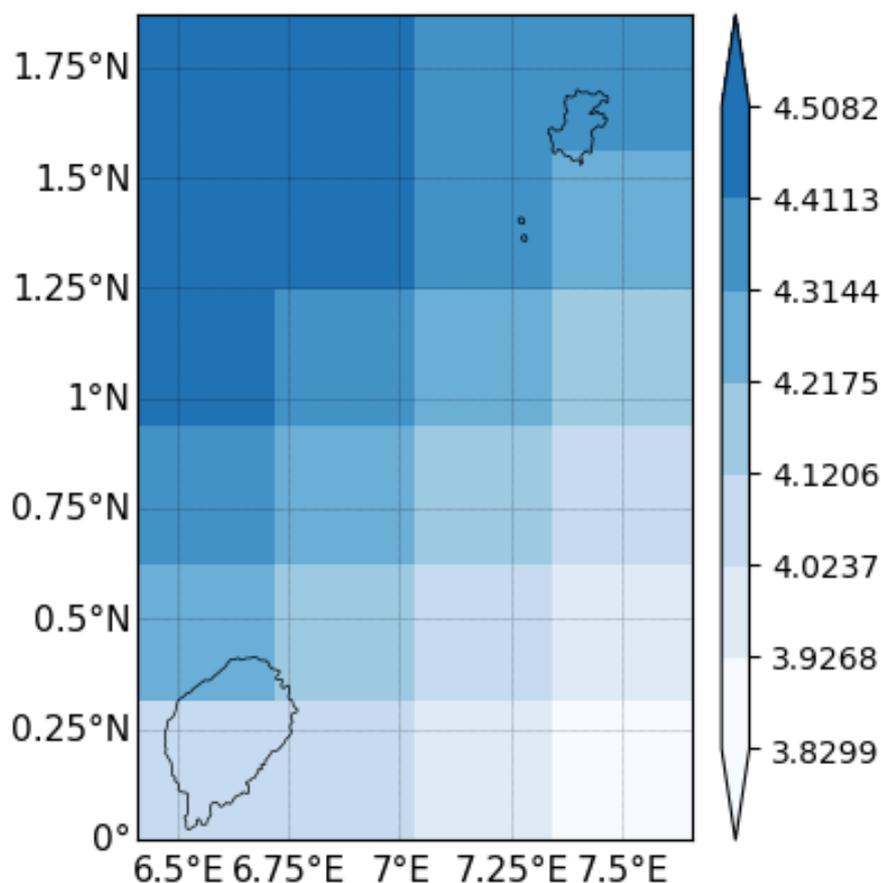
Figura 22 — Rosa dos ventos com as frequências de classes de velocidades médias mais frequentes nos diferentes meses.



Fonte: Autor

Observa-se na Figura 23 a distribuição das classes de velocidades para a região de São Tomé e Príncipe. Esse mapa compreende os limites geográficos das ilhas compreendidos entre 0°S a 1,875°N e entre as longitudes de 6,375°O a 7,625°E. Esta região estudada, apresentam índices de velocidade de vento maior para a região norte, do que na região sul. Analisando o Figura 23 pode-se ver que existe uma maior potencialidade da na ilha do Príncipe em relação a ilha de São Tomé, devido a incidência de ventos mais fortes naquela região.

Figura 23 — Mapa de vento para a região de São Tomé e Príncipe, com velocidades estimadas a altura de 100 metros.

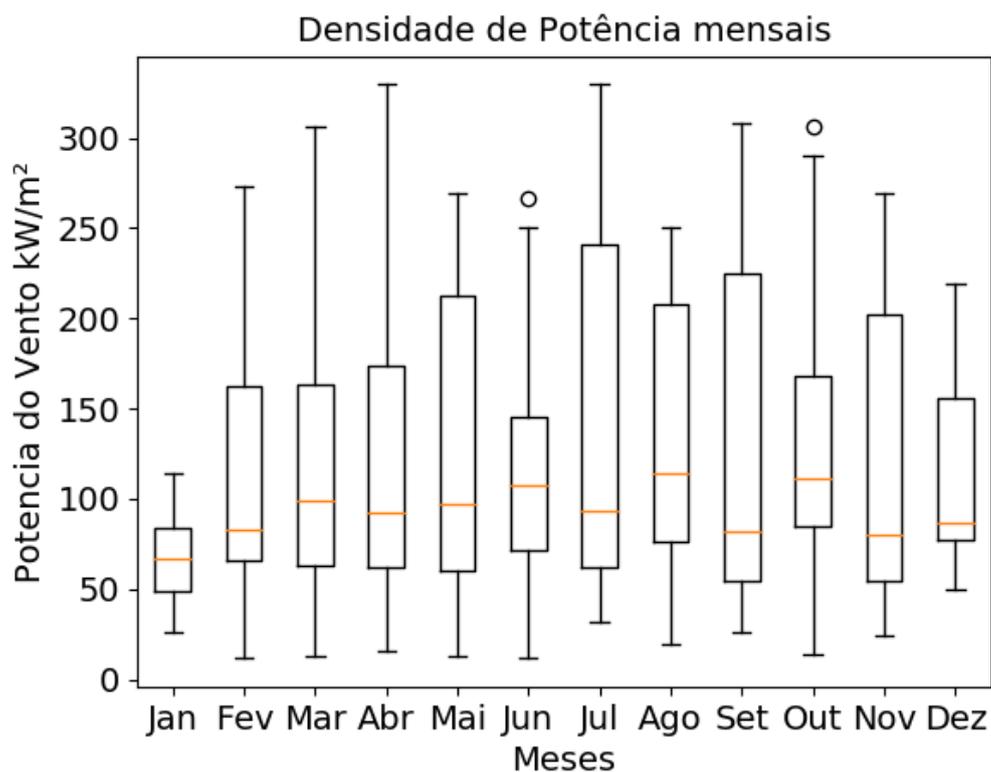


Fonte: Autor.

Observa-se na Figura 24 que os meses que apresentam maior potencialidade de aproveitamento para a geração de energia eólica, são os meses que apresentam índices de velocidades de vento maior, quando compara-se a Figura 19 e a Figura 23. O mês de janeiro é o mês que apresenta um potencial eólico menor, porém como pode-se ver, esta potência disponível na região, segue o mesmo comportamento do vento. O potencial disponível na região não sofre uma variação exagerada ao longo dos meses o que sugere que é possível extrair da

região ao longo dos meses, a potências próximas das potências disponíveis. A densidade de potência mínima, observada no mês de janeiro, está próximo de valores de  $75\text{kw/m}^2$  enquanto as densidades de potência máximas estão próximas de valores a  $100\text{kw/m}^2$  e podem ser observadas nos meses de março, junho e agosto.

Figura 24 — Densidade de Potência para os 12 meses na região de São Tomé e Príncipe para uma velocidade estimada de 100 metros.



Fonte: Autor

## 6 CONCLUSÃO

Utilizou-se os dados de vento do CFSR estimados pelo NCEP e que serviram de base as análises aqui apresentadas, e deste modo foi possível apresentar a característica do comportamento do vento na região e suas variações velocidade. O país apresenta graves problemas no seu setor elétrico e embora possua características físicas e hidro climáticas que possibilitem o aproveitamento de diversas fontes renováveis de energia para a produção de eletricidade, o país apenas produz eletricidade através da queima de combustíveis fósseis nas suas centrais termelétricas que contribui com 95% da eletricidade e a hidrelétricas que contribui com valores perto de 5% na produção de eletricidade.

Através dos dados observados no histograma, pode-se observar que a velocidade mais frequente se apresenta no intervalo de 5 m/s a 6 m/s com 25% das frequências ocorridas, seguidas dos intervalos de 4 m/s a 5 m/s e o intervalo de 7 m/s a 8 m/s ambos os intervalos com uma frequência de ocorrência de 20%. Concluindo, portanto, através dos dados apresentados que para a região de São Tomé e Príncipe o vento apresenta pouca variação nos seus valores de velocidade, apresentando uma velocidade média de 5,23 m/s, e desvio padrão de 1,37 m/s.

Os resultados obtidos através da análise da distribuição de Weibull são que este apresenta pequenas variações ao longo do tempo. Pode ser visto através dos seus índices de fator de forma e fator de escala que apresentaram valores de  $K= 4,36$  e  $C=1,32$ , estes dados são de esperar pois foram verificados através de seu baixo valor de desvio padrão. Embora a curva de distribuição de weibull não se ajuste completamente aos dados de vento, este é considerado por Stuker (2014) e por Silva *et al.* (1999) a que melhor se ajusta a dados de velocidades de vento e a que mais é utilizada em trabalhos relacionados com potencial eólico. Uma das possíveis causas pelo qual a distribuição de weibull não se ajustou a série de dados pode ser o fato de a distribuição de weibull se adaptar melhor a série de dados de velocidades mais altas.

Quanto a direção de vento os resultados obtidos mostram que a direção predominante dos ventos é advinda no sentido sul-norte, e que a mesma sofre pouca variação ao longo do período de estudo. A pouca variação observada nas rosas do vento pode ser consequência da utilização de uma grade muito grande, e para um período muito longo (superior a 30 anos).

A ilha apresenta um potencial eólico aceitável, uma vez que não apresenta valores muito diferentes à de países europeus como França, Espanha, Itália, Portugal. Porém os dados

mostram que é necessário a utilização aerogeradores, com uma velocidade de arranque baixa, para a geração de energia elétrica e deste modo aproveitar este recurso que se apresenta de forma bastante presente ao longo dos meses do ano, com pequenas variações nos valores de suas velocidades.

A baixa variabilidade do vento, ao longo do ano em São Tomé e Príncipe, contribui para que o aproveitamento ocorra de forma quase uniforme e a produção esteja sempre próximo dos valores máximo aproveitável na região. O país apresenta um desvio padrão de 1,37 m/s. Considerando-se apenas a frequência e intensidade dos ventos o parque eólico na região não apresentará, portanto, grandes chances de ficar ocioso uma vez que o vento na região se dá de forma constante.

As pequenas variações de direção e os valores de vento muito abaixo da velocidade de 25m/s, que causam o desligamento da turbina da rede elétrica e que pode causar danos a mesma, possibilita menores esforços aos componentes físicos da turbina e seus componentes o que constitui uma vantagem natural de um possível parque eólico na região, pois prolonga a vida útil dos mesmos.

A utilização dos dados do CFSR mostrou-se de grande ajuda para a caracterização do vento da região uma vez que não está estes dados climatológicos para a região de São Tomé e Príncipe não se encontram disponibilizados pelos organismos competentes.

Com as políticas corretas de incentivo ao investimento, a criação de mecanismos que tornem o aproveitamento eólico mais atrativo e novos estudos desta vez com dados observados deve ser levados em conta para que realmente se torne factível a construção de um parque eólico.

Para trabalhos futuros, pretende-se comparar os dados obtidos neste estudo com dados realmente observados no posto do aeroporto internacional de São Tomé e do aeroporto do Príncipe com o intuito de validar os dados e calcular eu grau de precisão do CFSR identificando o quão confiáveis são os dados para a região. Pretende-se também futuramente separar o estudo por ilhas, nomeadamente as ilhas São Tomé e a ilha do Príncipe de forma a reduzir as áreas que contêm o mar territorial.

## REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. 2. ed. Brasília, 2005.
- CAIXA GERAL DE DEPÓSITOS - CGD. **São Tomé e Príncipe: oportunidades e potencial de desenvolvimento**. Lisboa, 2014.
- CASTRO, R. M.G. **Energias Renováveis e Produção Descentralizada: Introdução à Energia Eólica**. 2.1. ed. Lisboa, 2005.
- CHRISTÓFARO, B. R. **Estudo do potencial eólico em offshore para a geração de energia elétrica no litoral do Paraná**. Trabalho de Conclusão de Curso (Oceanografia) - Universidade Federal do Paraná: Paraná, 2010.
- DIREÇÃO GERAL DOS RECURSOS NATURAIS E ENERGIA – DGRNE. **Energias Renováveis em São Tomé e Príncipe**. 2015.
- DIREÇÃO GERAL DOS RECURSOS NATURAIS E ENERGIA – DGRNE. **The Overall Water Resource Development Plan of the Democratic Republic of São Tomé and Príncipe**. 2009.
- EMPRESA DE ÁGUA E ELETRICIDADE – EMAE. **Relatório e contas**. São Tomé, 2016.
- FADIGAS, E. **Energia eólica**. São Paulo: Manole. 2001.
- FAUSTO, B. et al. **As tendências da população mundial: rumo ao crescimento zero**. 2005.
- FELDMANN, Fabio; MACEDO, Laura Valente de. **Mudanças climáticas: da ação local ao impacto global**, 2001.
- GLOBAL WIND REPORT. **GLOBAL STATUS OF WIND POWER IN 2016**. 2016.
- GOLDEMBERG, J. **Energia e desenvolvimentos sustentável**. v. 4. São Paulo: Blucher, 2004.
- HAAS, R. et al. Influencia de Fenomenos Climaticos no Desempenho de dois Parques Eolicos. In: **Anais do VII CITENEL-Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica**. 2013.
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTATÍSTICA – INE. Estado e estrutura da População: IV recenseamento geral da população e habitação – 2012. São Tomé e Príncipe, 2014.
- INTERACADEMY COUNCIL. **Um futuro com energia sustentável: iluminando o caminho**. Tradução: Borba, Maria Cristina Vidal; Gaspar, Neide Ferreira. Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências, 2007.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA. **Renewables information: Overview**. Paris, 2017.

JANNUZZI, G. de M; JANTIM NETO, H; SILVA, R. R. da. Planejamento integrado de recursos para São Tomé e Príncipe: investigação de oportunidades para maior inserção de fontes renováveis e eficiência energética. **Revista Brasileira de Energia**, v. 18, n. 2, 2012.

LOPEZ, R. A. **Energia eólica**. São Paulo: Artliber, 2012.

MARCOLIN, N. Energia de cataventos. **Pesquisa FAPESP**. 2007.

MARENGO, J. A. **Caracterização do clima no Século XX e Cenários Climáticos no Brasil e na América do Sul para o Século XXI derivados dos Modelos Globais de Clima do IPCC**. Min. do Meio Ambiente, SBF/DCBio, São Paulo, 2007.

OLIVEIRA, A. et al. **Energias Renováveis e Desenvolvimento Sustentável: Novas tendências na produção de energia a partir de fontes renováveis**. Relatório para a disciplina de Projecto FEUP - Universidade do Porto, 2009.

PACHECO, F. Energias Renováveis: breves conceitos. **Conjuntura e Planejamento**, v. 149, p. 4-11, 2006.

PANTOJA, C. da S. **Teoria das Opções Reais: Uma Abordagem em Energia Eólica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro: Rio de Janeiro, 2013.

RANGEL, M; BORGES, P; SANTOS, I; Análise comparativa de custos e tarifas de energias renováveis no Brasil. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, 2016.

PINTO, L. I. C; MARTINS, F. R. PEREIRA, E. B. O mercado brasileiro da energia eólica, impactos sociais e ambientais. **Revista Ambiente & Água**, v. 12, n. 6, 2017.

ROVERE, E; WESTIN, F; WILLS, W. Energia Eólica. In: SANTOS, M. A. dos. (Org). **Fontes de energia nova e renovável**. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

SAHA, S. et al. The NCEP climate forecast system reanalysis. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 91, n. 8, 2010.

SANTANA, L. V. R. et al. **Análise do comportamento da velocidade do vento na região Nordeste do Brasil utilizando dados da ERA-40**. Dissertação (Mestrado em Biometria e Estatística Aplicada) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Pernambuco, 2014.

SILVA, P. C. de. et al. **Otimização dos parâmetros da distribuição de weibull**. 1999.

SOUTO, M. **Quadro de Gestão Ambiental e Social (QGAS)**. 2016.

STUKER, E. **Utilização de dados de reanálise na estimativa do potencial eólico bruto no estado do Rio Grande do Sul**. 2014.

TECNOLOGIA em aerogeradores – Mecânica. Produção: Daniel Faro, 2017. Disponível em: <<http://slideplayer.com.br/slide/12144040/>> Acesso em: 11/06/2017.

**VARGAS, S. Previsão da distribuição da densidade de probabilidade da Geração de Energia Eólica usando técnicas não paramétricas. Rio de Janeiro: PUC. 2015.**