



UNIVERSIDADE  
E D U A R D O  
M O N D L A N E

FACULDADE DE CIÊNCIAS  
Departamento de Física

**Trabalho de Licenciatura em Meteorologia**

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DO VENTO PARA A PRODUÇÃO  
DA ENERGIA ELÉCTRICA NO DISTRITO DE XAI-XAI, ENTRE 2007-2017**

**Elton Filimone Chambal**

**Maputo/ 2018**



UNIVERSIDADE  
EDUARDO  
MONDLANE

FACULDADE DE CIÊNCIAS  
Departamento de Física

**Trabalho de Licenciatura em Meteorologia**

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DO VENTO PARA A PRODUÇÃO  
DA ENERGIA ELÉCTRICA NO DISTRITO DE XAI-XAI, ENTRE 2007-2017**

**Autor: Elton Filimone Chambal**

**Supervisor: dr. Marcelino Macome**

**Maputo/2018**

## DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho aos meus pais Filimone Chambal e Ana Paula Siteo, pela força e educação que me têm dado e aos meus familiares pelo apoio moral.*

## AGRADECIMENTOS

Foi possível a realização deste trabalho pela colaboração prestada por diversas pessoas e instituições. Com isso, manifesto aqui o meu sincero agradecimento:

A Deus, por me dar saúde, coragem, humildade, alegria e paciência indispensável para não desistir do caminho certo.

A minha família, pela sua presença no âmbito dos meus estudos e pela força que me tem dado, em particular os meus pais Filimone Chambal e Ana Paula Siteo.

A Universidade Eduardo Mondlane, em particular ao Departamento de Física, pela oportunidade que me concedeu de realizar este curso.

Ao meu orientador, doutor Marcelino Macome, pela amizade, orientação, atenção e confiança demonstrada ao longo da realização deste trabalho e ao longo da realização do curso.

Ao Instituto Nacional de Meteorologia (INAM) delegação de Xai-Xai, pela disponibilização de dados para a realização deste trabalho científico.

Aos companheiros e amigos do Departamento de Física, em particular ao Etinéldio Mapsanganhe, Hélder Chibiello e Nelson Zunguze, pelos grandes momentos juntos passados e pelas batalhas juntos realizadas.

Ao Armando Chambal e Chambalson Chambal, pela paciência e convivência.

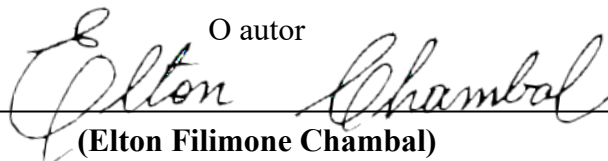
***OBRIGADO!***

**DECLARAÇÃO DE HONRA**

Eu, Elton Filimone Chambal declaro por minha honra que este trabalho nunca foi apresentado em nenhuma instituição para a obtenção de qualquer grau acadêmico. Este foi realizado com base no material bibliográfico, dados referenciados ao longo do mesmo e apresenta ideias originais da minha inteira responsabilidade que resultaram do meu empenho com objectivo da obtenção do grau de licenciatura em Meteorologia.

Maputo/Setembro de 2018

O autor



(Elton Filimone Chambal)

**ÍNDICE**

<b>Conteúdo</b>	<b>Páginas</b>
DEDICATÓRIA .....	i
AGRADECIMENTOS .....	ii
DECLARAÇÃO DE HONRA.....	iii
LISTA DE ABREVIATURAS .....	vii
LISTA DE SÍMBOLOS.....	vii
LISTA DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE TABELAS .....	ix
RESUMO.....	x
CAPÍTULO 1 .....	1
1.0 INTRODUÇÃO .....	1
1.1 Contextualização .....	1
1.2 Motivação .....	2
1.3 Justificativa.....	3
1.4 Objectivos.....	4
1.4.1 Objectivo geral.....	4
1.4.2 Objectivos específicos .....	4
1.5 Perguntas de pesquisa.....	4
CAPÍTULO 2.....	5
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	5
2.0 Vento .....	5
2.1 Factores de que depende o vento.....	5
2.2 Vento em altos níveis .....	6

2.2.1	Vento geostrófico.....	7
2.2.2	Vento gradiente.....	8
2.3	Vento nas proximidades da superfície.....	9
2.3.1	Camada Superficial.....	10
2.4	Rajadas e Turbulências.....	14
2.5	Distribuição temporal e espacial dos ventos em Moçambique .....	14
2.6	Princípios gerais de medição da velocidade e direcção do vento.....	15
2.6.1	Anemómetro de conchas.....	15
2.6.2	Anemómetro de hélice .....	16
2.6.3	Anemógrafo Universal.....	17
2.7	Historial de energia eólica.....	18
2.8	Conceitos da energia eólica.....	20
2.9	Factores que influenciam a energia proveniente do vento .....	21
2.10	Potencial extraído do vento .....	23
2.10.1	Rendimento de Betz.....	23
2.11	Distribuição estatística de Weibull.....	25
2.12	Determinação dos parâmetros de Weibull.....	26
2.12.1	Método da velocidade média e desvio padrão .....	27
2.13	Aerogeradores .....	28
2.13.1	Aerogerador de eixo horizontal .....	29
2.13.2	Aerogeradores de eixo vertical .....	30
2.14	Produção de energia eólica no distrito de Xai-Xai.....	31
CAPÍTULO 3.....		33
3.0	METODOLOGIA .....	33
3.1	Materiais.....	33

3.2	Extrapolação da velocidade do vento e determinação de velocidades frequentes .....	33
3.3	Construção da rosa dos ventos .....	34
3.4	Potencial eólico extraído do vento .....	35
CAPÍTULO 4.....		36
4.0	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	36
4.1	Determinação da direcção predominante do vento .....	36
4.1.1	Direcção predominante do vento em 2009 .....	36
4.1.2	Direcção predominante do vento em 2017 .....	38
4.1.3	Direcção predominante do vento no período entre 2007 a 2017 .....	39
4.2	Determinação de velocidades predominantes e médias anuais do vento .....	40
4.2.1	Variação sazonal da velocidade do vento .....	42
4.2.2	Determinação das velocidades médias anuais e tendência.....	43
4.3	Determinação do potencial eólico disponível e potencial eólico extraído pelo rotor.....	44
CAPÍTULO 5.....		48
5.0	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES .....	48
5.1	Conclusão .....	48
5.2	Recomendações .....	49
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		50
Anexos .....		53

**LISTA DE ABREVIATURAS**

UEM – Universidade Eduardo Mondlane  
INAM – Instituto Nacional de Meteorologia  
Fig. – Figura  
Eq. – Equação  
SE – Sudeste  
SO – Sudoeste  
NO – Noroeste  
NE – Nordeste  
N – Norte  
S – Sul  
O – Oeste  
E – Este  
m – metros  
--- – Sem informação

**LISTA DE SÍMBOLOS**

$F_{co}$ – Força de Coriolis	[N]
$F_c$ – Força Centrífuga	[N]
$\rho$ – densidade do ar	[Kg/m <sup>3</sup> ]
$\nabla P$ - gradiente de pressão	[mb/m]
$\alpha$ – coeficiente de fricção	[adimensional]
$F_a$ – Força de atrito	[N]
$D$ – diâmetro	[m]
$F_p$ – Força gradiente de pressão	[N]
$P$ – Potência	[W]
$V_g$ – vento geostrófico	
$C_p$ – coeficiente de potência	[adimensional]
$A$ – Área	[m <sup>2</sup> ]

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Páginas</b>
Figura 2. 1: Efeito deflector da força de Coriolis (Nogueira, et al., 2005).....	6
Figura 2. 2: Representação esquemática do vento geostrófico em ambos os hemisférios (Martins, et al., 2008). .....	8
Figura 2. 3: Vento gradiente no Hemisfério Sul em torno do centro de baixa pressão (B) e de alta pressão (A) (Martins, et al., 2008). .....	9
Figura 2. 4: Circulação atmosférica nas proximidades de centros de baixa pressão (B) e alta pressão (A) no Hemisfério Sul sob influência do atrito da superfície (Martins, et al., 2008). .....	10
Figura 2. 5: Perfil vertical da velocidade do vento desde a superfície até a altura do vento geostrófico. O comprimento de rugosidade $z_0$ é a altura onde a velocidade é nula (Martins, et al., 2008). .....	13
Figura 2. 6: Ilustração de um anemômetro electrónico de Conchas (Filho, 2013). .....	16
Figura 2. 7: Ilustração do Anemômetro de hélice com o sensor de velocidade a direita (hélice) e de direcção á esquerda (leme) ( <a href="https://goo.gl/images/myyoxy">https://goo.gl/images/myyoxy</a> ) .....	17
Figura 2. 8: Ilustração de um anemógrafo universal, vendo-se acima os sensores e abaixo detalhes do mecanismo de registo e da boia do sistema de pressão-sucção (Silva, 2006). .....	18
Figura 2. 9: Ilustração de rotor de um aerogerador de eixo horizontal, (Epalanga, 2013). .....	22
Figura 2. 10: Ilustração das perdas de velocidade do vento na passagem por um conjunto de pás (Filho, 2013). .....	24
Figura 2. 11: Distribuição de $C_p$ em função de $V_3/V_1$ (Brito, 2008). .....	25
Figura 2. 12: Imagem ilustrativa de um aerogerador de eixo horizontal do tipo hélice (Haseirn, 2011). .....	30
Figura 2. 13: Aerogeradores de eixo vertical tipo Darrieus (Braga, et al., 2012). .....	31
Figura 4. 1: Rosa dos ventos construída com base nas velocidades e direcções médias mensais do vento observado no ano de 2009.....	37
Figura 4. 2: Rosa dos ventos construída com base nas velocidades e direcções médias mensais do vento observado no ano de 2017.....	38
Figura 4. 3: Rosa dos ventos construída com base nas velocidades e direcções médias mensais do vento observado no período compreendido entre 2007 e 2017. ....	39

Figura 4. 4: Histograma da função densidade de probabilidade de Weibull que indica a distribuição de velocidades com maior probabilidade de ocorrência no Distrito de Xai-Xai entre 2007 a 2017, a um nível de 100 m acima da superfície da terra. ....	41
Figura 4. 5: Variação sazonal das velocidades médias mensais do vento em 2015 e 2017.....	42
Figura 4. 6: Velocidades médias anuais e a tendência ao longo do período do estudo. ....	43
Figura 4. 7: Potenciais eólicos médios anuais disponíveis. ....	46
Figura 4. 8: Potenciais eólicos médios anuais que uma turbina eólica de 80 m de diâmetro pode ser extraído do vento. ....	47

## LISTA DE TABELAS

	<b>Páginas</b>
Tabela 2. 1: Valores do coeficiente de fricção para diferentes superfícies.....	12
Tabela 4. 1: Velocidades médias anuais e desvios padrões. ....	40
Tabela 4. 2: Potencial eólico disponível e extraído do vento. ....	45

## ANEXOS

Anexo 2: Rosas dos ventos anuais do distrito de Xai-Xai

Anexo 1: Velocidades médias mensais e anuais do distrito de xai-xai no período de 2007 a 2017.

Anexo 3: Análise estatística dos dados

## RESUMO

O uso e aproveitamento da energia eléctrica em Moçambique e no distrito de Xai-Xai em particular, tende a crescer de tal forma que diversas fontes de sua geração ganhem espaço, como o exemplo a energia eólica. Com isso, diversas tecnologias e metodologias são implementadas para o melhor aproveitamento dos diversos recursos energéticos incluindo o vento, para a geração de energia. Portanto, o presente trabalho tem como objectivo avaliar o potencial do vento para a produção da energia eléctrica no distrito de Xai-Xai com vista a contribuir na identificação de sistemas alternativos, amigos de ambiente, de geração e fornecimento de energia eléctrica. Esta avaliação consiste na determinação da direcção predominante e da velocidade média do vento ao longo do ano com ajuda da rosa dos ventos e de gráficos que melhor descrevem as tendências de velocidade e do potencial eólico. Os resultados indicam que há predominância dos ventos do quadrante Sul e através da distribuição de Weibull foram determinadas intensidades do vento com maior probabilidade de ocorrência na classe velocidades, compreendida aproximadamente entre 9.0 e 15.0 m/s acima da média. O distrito apresenta uma média de velocidade do vento de cerca 8.76 m/s com desvio padrão de 1.90 m/s, assim como potencial eólico médio disponível de cerca de 2168.29 KW e potencial médio extraído do vento de 1224.85 KW a uma altura de 100 m acima da superfície da terra, assumindo um aerogerador do eixo horizontal com 80 m de diâmetro. Pelo que se pode afirmar com os resultados obtidos neste estudo, que existe potencial eólico favorável para a geração de energia eléctrica e para a distribuição quantitativa e qualitativa desta aos consumidores no distrito de Xai-Xai.

**Palavras chave:** Lei de Helman, Lei de Betz, Distribuição de Weibull, Potencial eólico

## CAPÍTULO 1

### 1.0 INTRODUÇÃO

#### 1.1 Contextualização

O uso e aproveitamento de energia eléctrica em qualquer parte do Mundo têm aumentado devido a grande demanda do desenvolvimento industrial e tecnológico em diversas áreas, levando o homem a recorrer a fontes alternativas para sustentar as suas actividades, algumas das quais demandam elevado potencial energético. Certas fontes de energia são destrutivas para o ambiente.

E Moçambique bem como o distrito de Xai-Xai particularmente, não são uma excepção ao o que acontece no mundo inteiro em relação ao consumo de energia, devido o desenvolvimento económico, industrial e tecnológico que se tem verificado nos últimos anos. É um facto o aumento de equipamentos industriais que funcionam na base da energia eléctrica e que demandam elevada potência, exemplo concreto do projecto de construção de um ponto cais em Chongoene, o que coloca grande desafio ao Homem no que concerne ao aumento na geração, transmissão e distribuição da energia eléctrica.

O uso de diversas fontes de energia para responder as suas necessidades, o Homem tem posto a sua vida em risco visto que certas fontes apresentam suas vantagens e desvantagens. Contudo, com o ganho de consciência reactivamente à problemas ambientais resultantes de uso de certas fontes de energia, ultimamente tem se recorrido à fontes renováveis por estas apresentarem baixo impacto ambiental, sobretudo por não contribuem para a geração de gases de efeito estufa.

Portanto, a energia eólica é uma das fontes alternativas de energias renováveis e é originária do deslocamento de uma massa de ar causada pela diferença de pressões na atmosfera terrestre, (Epalanga, 2013).

A localização geográfica do distrito de Xai-Xai na costa do oceano Índico é favorável para a persistência de ventos capazes de gerar potência energética suficiente para servir de fonte alternativa, à produção da energia eléctrica. Os anticiclones dos oceanos Índico e Atlântico influenciam naquilo que é o padrão dos ventos nesta região, (Estatal, 2014). Os ventos no distrito

de Xai-Xai são influenciados pela climatologia dos ventos da zona Sul do país que são predominantemente alísios de SE, (Macie, 2016).

A climatologia dos ventos do distrito de Xai-Xai no período de verão é influenciada pelas monções do oceano indico predominantes de nordeste (NE) que transportam humidade para o continente e durante o período de inverno o deslocamento dos anticiclones do oceano Índico e Atlântico em direcção ao equador, possibilita a mudança da predominância dos ventos que é influenciada pela entrada das frentes frias na parte sudeste (SE) de Moçambique e Sul de África, (Macie, 2016).

A pesquisa pretende fazer uma avaliação do potencial eólico no distrito de Xai-Xai, usando dados do vento medidos pelo Instituto Nacional da Meteorologia em Xai-Xai, para que planos de uso de energia do vento como fonte alternativa, como por exemplo, a instalação de um parque eólico possam ser desenhados de forma adequada e colaborar na distribuição qualitativa e quantitativa de energia eléctrica, visto que o distrito de Xai-Xai tem uma insuficiência da cobertura da rede eléctrica bem como a fraca qualidade desta segundo estudos realizados pelo (Estatal, 2014).

## **1.2 Motivação**

A localização geográfica do distrito de Xai-Xai levanta uma suspeita para a existência de um elevado potencial eólico, que pode servir como fonte alternativa de fornecimento de energia eléctrica. Contudo, pode não constituir facto real. Por outro lado, maior parte da infância do autor desta pesquisa foi vivida nos distritos de Bilene e de Xai-Xai, havendo passado alguns momentos de insuficiência energética, criando preocupação no sentido de contribuir para solução deste problema. Por outro lado, vai alimentar sua curiosidade sobre como é gerada a energia eléctrica através do vento.

### 1.3 Justificativa

O distrito de Xai-Xai tem registado um desenvolvimento socioeconômico significativo, passando a ter uma forma diferente no que concerne ao uso e aproveitamento da energia eléctrica. O uso de máquinas pesadas que consomem altas potências de corrente eléctrica tende a aumentar, resultado da busca de soluções de sobrevivência para o sustento do próprio homem.

O levantamento realizado pelo Plano (2010), revela que das 37,744 famílias existentes no distrito, apenas 15,148 correspondente a 40.1% beneficiam-se da energia da rede eléctrica. Portanto, um dos principais constrangimentos é a insuficiência da cobertura de rede eléctrica bem como o da fraca qualidade de energia que é fornecida à aquele número de famílias.

O distrito sofre uma constante transformação de vegetação devido a sua exploração para aquisição de lenha como fonte de energia para o suprimento das necessidades domésticas das famílias e esta prática é nociva para o ambiente, (Estatal, 2014). A pesquisa sobre o potencial eólico vai fornecer uma informação clara sobre a real situação do vento como fonte alternativa de energia eléctrica, que permitiria reforçar a resposta às necessidades dos cidadãos residentes naquele distrito, sem recorrer a fontes e práticas nocivas ao ambiente.

## 1.4 Objectivos

Nesta secção, apresentam-se os caminhos que serão tomados para se alcançar o objectivo do estudo.

### 1.4.1 Objectivo geral

Avaliar o potencial eólico para a produção da energia eléctrica com fim de contribuir no melhoramento da quantidade e qualidade de energia eléctrica que é fornecida no distrito de Xai-Xai.

### 1.4.2 Objectivos específicos

1. Identificar os ventos predominantes ( direcção, intensidade e altura), no distrito de Xai-Xai
2. Determinar a velocidade média anual do vento observado no distrito de Xai-Xai
3. Calcular o potencial eólico daquele distrito
4. Estimar a necessidade, em média anual, de energia consumida pela população do distrito de Xai-Xai.

## 1.5 Perguntas de pesquisa

- i. Quais são os ventos predominantes no distrito de Xai- Xai?
- ii. Qual é a velocidade média anual do vento, tendo como princípio as médias mensais?
- iii. Qual é o potencial eólico do distrito de Xai-Xai e qual é a sua tendência?
- iv. Qual é a quantidade média anual de energia eléctrica que pode ser produzida para responder as necessidades da população do distrito de Xai-Xai?

## CAPÍTULO 2

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.0 Vento

As diferenças latitudinais do aquecimento da atmosfera e da superfície terrestre pela radiação solar são as responsáveis pelo padrão dos movimentos do ar atmosférico conhecidos como circulação geral da atmosfera na escala planetária. A radiação solar que atinge a superfície da terra é maior na região equatorial diminuindo à medida que se desloca em direcção aos polos geográficos, criando de certa forma uma gradiente térmica entre estas regiões. (Machado, et al., 2006).

Portanto, a este movimento horizontal de parcelas de ar na atmosfera devido à diferença de pressão entre dois lugares, oriundo do aquecimento diferencial da superfície da terra pela radiação solar é denominado vento, embora possa mover-se na direcção vertical (Martins, et al., 2008).

O vento é uma grandeza vectorial pelo que é definido pela sua intensidade, direcção e sentido. A nomenclatura do vento é atribuída segundo a sua proveniência (de onde vem) e é expressa em graus, contados no sentido horário partindo do Norte geográfico, e aplicando-se a teoria da rosa dos ventos (Silva & Chaves, 2011).

Dependendo da sua intensidade, o vento pode ser empregado como fonte alternativa de energia no que concerne a conversão da energia cinética em outras formas de energias, (Martins, et al., 2008).

#### 2.1 Factores de que depende o vento

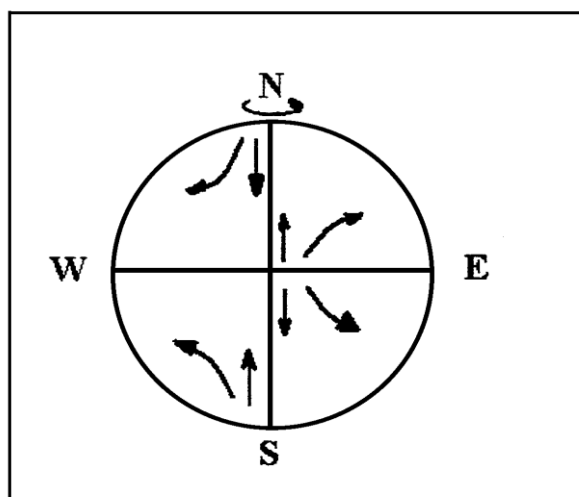
Os movimentos atmosféricos são governados por quatro forças fundamentais, nomeadamente: força gradiente de pressão, força de atrito, força centrípeta e força de Coriolis, as quais determinam a velocidade e direcção do vento. Estas forças são importantes na descrição macroscópica do movimento dos fluidos similares aos da baixa troposfera, (Filho, 2008).

Há vários factores de que depende o vento e a acção destes factores é distribuída em diversos níveis de altitude. Onde se pode destacar nomeadamente, ventos em altos níveis e ventos nas proximidades da superfície.

## 2.2 Vento em altos níveis

São altos níveis atmosféricos locais de altitude onde o efeito do atrito sobre o movimento horizontal das massas de ar entre diferentes camadas é nulo. E os ventos que predominam em altos níveis são designados ventos geostrófico e gradiente. Estes ventos são uma razão directa do equilíbrio entre as forças de Coriolis e gradiente de pressão.

A força de Coriolis é uma força aparente com a qual se determina a direcção do movimento do fluido em relação à superfície da terra a qual também se encontra em movimento. Independentemente da direcção do movimento do fluido, a deflexão da força de Coriolis sempre se faz para direita no hemisfério Norte e para esquerda no hemisfério Sul, como se ilustra na Fig.2.1. Portanto, qualquer objecto que se encontra em movimento sobre a superfície terrestre, tende a ser desviado continuamente para direita no hemisfério Norte e para esquerda no hemisfério Sul, como resultado do efeito de rotação da terra em combinação com o movimento do objecto à superfície, (Nogueira, et al., 2005).



**Figura 2. 1:** Efeito deflector da força de Coriolis (Nogueira, et al., 2005)

A força gradiente de pressão é a responsável por deslocamento dum massa de ar da região de altas para baixas pressões, pois esta, actua em uma função directa da gradiente de pressão. A separação ou o espaçamento entre as isóbaras numa carta de superfície determina a magnitude da gradiente de pressão, isto é, quanto mais próximas as isóbaras estiverem, implica a rápida variação de pressão com a distância, e neste caso, tem se uma forte gradiente de pressão e ventos muito fortes, diferente de quando estas encontram-se mais distantes umas das outras, pois isso implica a lenta variação da pressão com a distância, tendo-se neste caso, uma fraca gradiente de pressão e ventos pouco intensos, (Nogueira, et al., 2005).

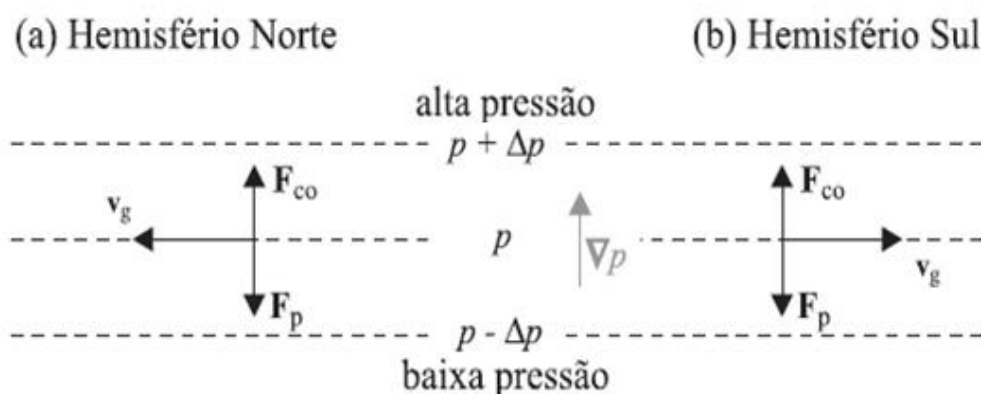
### 2.2.1 Vento geostrófico

Em uma linguagem técnica da energia eólica, o vento geostrófico é referido ao vento acima da superfície, o qual não sofre nenhum efeito de atrito pela superfície, (Martins, et al., 2008).

À medida que se afasta da superfície terrestre verticalmente, o atrito tende a diminuir até chegar a ser desprezível, já que a densidade da massa de ar diminui com a altitude, sendo que no nível em que o atrito é nulo, o vento é descrito pelo equilíbrio entre as forças de Coriolis e gradiente de pressão. A esta aproximação é denominada de aproximação geostrófica, (Martins, et al., 2008).

Uma parcela de ar inicialmente em repouso e sujeita a uma gradiente de pressão, ela começa a mover-se em direcção as baixas pressões, sendo que, à medida que a velocidade do deslocamento da parcela de ar aumenta, a força de Coriolis também aumenta, deflectindo a parcela de ar até que as duas forças atinjam o equilíbrio, fazendo assim com que a parcela de ar mova-se perpendicularmente a gradiente de pressão e paralela às isóbaras, com uma velocidade constante, (Martins, et al., 2008).

O vento resultante do equilíbrio entre as forças de Coriolis e gradiente de pressão para uma mesma distribuição de pressão possui sentidos opostos para cada hemisfério. Portanto, esse movimento não acelerado e rectilíneo da parcela de ar, possui intensidade proporcional à das gradientes de pressão e é denominado vento geostrófico ( $v_g$ ). Na Fig.2.2, está ilustrado esquematicamente o vento geostrófico oriundo do equilíbrio entre as forças de Coriolis ( $F_{co}$ ) e força gradiente de pressão ( $F_p$ ) em ambos os hemisférios.



**Figura 2. 2:** Representação esquemática do vento geostrófico em ambos os hemisférios (Martins, et al., 2008).

O nível de ventos geostróficos situa-se em média a 600 m acima da superfície, embora este oscila dos 400 e 1000 m, segundo aspectos orográficos (Nogueira, et al., 2005).

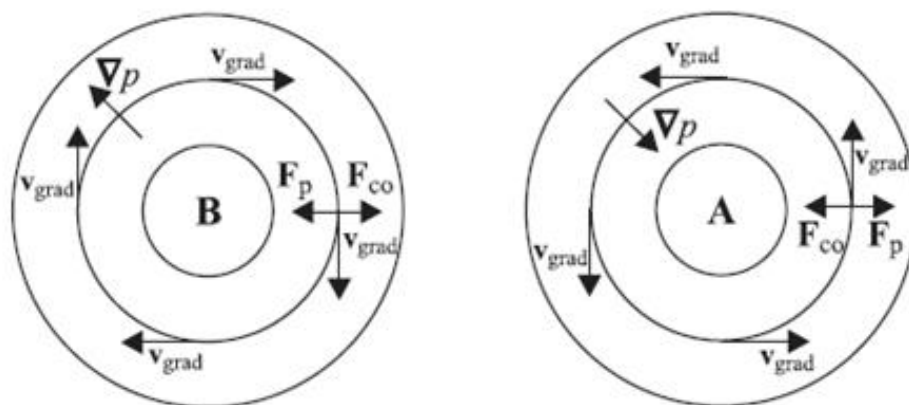
### 2.2.2 Vento gradiente

Quando observados os mapas meteorológicos de pressão, em alguns casos verificam-se isóbaras curvilíneas que por vezes formam células conectadas aproximadamente circulares de alta ou baixa pressão. Nestes locais, o vento geostrófico sofre alterações, passando a ser denominado vento gradiente, (Martins, et al., 2008).

O vento gradiente escoa paralelamente às isóbaras curvilíneas, resultante do equilíbrio entre as forças de Coriolis e gradiente de pressão, oriundo da aceleração centrípeta responsável pela curvatura das parcelas de ar em torno das células de alta e baixa pressão, (Martins, et al., 2008).

Quando um fluido desenvolve um movimento circular uniforme, a direcção da sua trajectória varia constantemente devido à existência de uma força externa dirigida para o centro da circunferência e perpendicular a essa trajectória. Portanto, a esta força responsável pelo movimento circular uniforme é denominada força centrípeta (Nogueira, et al., 2005).

A figura 2.3, é uma ilustração esquemática do comportamento do escoamento do vento gradiente onde, nas células de baixa pressão no Hemisfério Sul, o vento escoa no sentido horário e no sentido anti-horário entorno das células de alta pressão, sendo que no Hemisfério Norte, ocorre o processo inverso. (Martins, et al., 2008).



**Figura 2. 3:** Vento gradiente no Hemisfério Sul em torno do centro de baixa pressão (B) e de alta pressão (A) (Martins, et al., 2008).

### 2.3 Vento nas proximidades da superfície

Nas camadas mais baixas da atmosfera, não são mais aplicáveis às aproximações do vento geostrófico e do vento gradiente, devido às alterações no equilíbrio das forças através da rugosidade superficial (força do atrito). A topografia da superfície e a existência de obstáculos condicionam o escoamento do ar sobre a superfície terrestre, e por sua vez, geram turbulência no fluxo, (Martins, et al., 2008).

A força provocada pela fricção do ar com o solo é denominada força de atrito. Esta força ocorre nas regiões próximas à superfície e é a responsável pela ocorrência de turbilhões que influenciam para a mudança da direção e velocidade do vento. Este efeito diminui gradualmente com a altura até atingir o nível gradiente ou nível do vento geostrófico onde os efeitos de atrito são nulos, (Nogueira, et al., 2005).

A camada atmosférica que é influenciada diretamente pelas interações entre atmosfera e a superfície terrestre é designada camada limite planetária, cuja profundidade varia

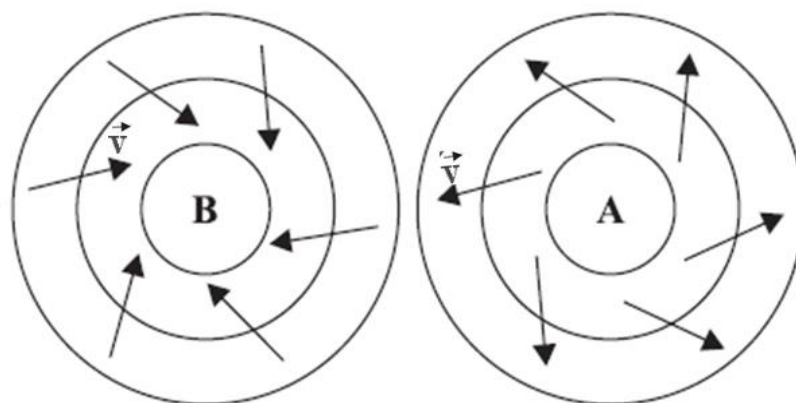
aproximadamente entre 30 m segundo as condições de grande estabilidade, podendo esta se alongar até mais de 3000 m sob condições altamente convectivas, (Filho, 2008).

Sob condições de estabilidade atmosférica, os fortes cisalhamentos verticais de vento próximo à superfície terrestre, geram uma instabilidade dinâmica que resulta uma mistura turbulenta na camada limite planetária que é forçada mecanicamente e não termicamente, (Filho, 2008). Geralmente a camada limite planetária encontra-se dividida em duas subcamadas, nomeadamente: camada superficial e camada de Ekman.

### 2.3.1 Camada Superficial

A camada superficial é directamente influenciada pela superfície terrestre, por sua vez, esta camada compreende os primeiros 50 a 100 m da atmosfera e nela ocorrem trocas de momentum, calor e humidade entre a superfície e a atmosfera. A camada superficial apresenta um perfil de velocidades ajustado de tal forma que o “stress” devido ao atrito horizontal seja aproximadamente independente da altura, (Martins, et al., 2008 & Filho, 2018).

Na camada superficial, a velocidade do vento e a intensidade da força de Coriolis são condicionadas pela rugosidade da superfície, fazendo com que o vento deixe de escoar paralelamente às isóbaras, apresentando uma componente no sentido da força gradiente de pressão. Com isso, no escoamento ciclónico, o vento converge em direcção às baixas pressões, enquanto no escoamento anti-ciclónico, o vento diverge afastando-se do centro de altas pressões, tal como se ilustra na Fig. 2.4, (Martins, et al., 2008).



**Figura 2. 4:** Circulação atmosférica nas proximidades de centros de baixa pressão (B) e alta pressão (A) no Hemisfério Sul sob influência do atrito da superfície (Martins, et al., 2008).

Segundo as condições da camada superficial, Prandtl desenvolveu a expressão logarítmica empírica representada pela Eq. (2.1), para a avaliação do perfil vertical da velocidade do vento, (Martins, et al., 2008).

$$\bar{u}(z_R) = \frac{u_*}{k} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (2.1)$$

Onde,  $z_0$  é o comprimento da rugosidade, sendo uma constante de integração escolhida tal que  $u = 0$  em  $z = z_0$  e  $k$  é constante universal (constante de Von Karmam) e é aproximadamente igual a 0.4 e  $u_*$  é a velocidade do atrito.

Devido à complexidade na determinação da velocidade do atrito, por esta variar com a rugosidade do solo, com a velocidade do vento e com forças que se desenvolvem na atmosfera, a velocidade a uma determinada altura acima do solo pode ser extrapolada a partir da lei logarítmica representada pela Eq. (2.2) segundo (Castro, 2005).

$$\bar{u}(z) = \bar{u}(z_R) \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_R}{z_0}\right)} \quad (2.2)$$

Onde  $\bar{u}(z_R)$  é a velocidade média à altura de referência  $z_R$ .

Quando aplicada a equação logarítmica, considera-se que as condições de estabilidade atmosférica sejam neutras, isto é, a temperatura da superfície do solo e a da superfície do mar é a mesma.

A Lei de Potência também conhecida como Lei de Helman amplamente utilizada no âmbito da engenharia eólica é aplicada para definir o perfil vertical de velocidade do vento ao longo da camada superficial, considerando de forma diferenciada o comprimento de rugosidade. O expoente " $\alpha$ " desta lei denominado coeficiente de fricção, relaciona os valores de referência com os parâmetros de extrapolação, (Santos, 2015).

A curva característica da lei de potência adapta-se melhor a diferentes rugosidades e diferentes tipos de estabilidade atmosférica. Superfícies com relevos mais acentuados apresentam um factor de rugosidade reduzido devido à aceleração do vento próximo ao solo. Portanto, a lei de potência caracterizada pelo coeficiente de fricção " $\alpha$ " é amplamente utilizada para estudos de potencial eólico e pode ser descrita pela equação (2.3), segundo Santos (2015).

$$\bar{v}_2 = \bar{v}_1 \left( \frac{h_2}{h_1} \right)^\alpha \quad (2.3)$$

Onde:  $\bar{v}_2$  é a velocidade média do vento que se pretende determinar de acordo com a altura desejada;  $\bar{v}_1$  é a velocidade média do vento na altura de referência;  $h_2$  é a altura para qual pretende se extrapolar o vento;  $h_1$  é a altura de referência e  $\alpha$  é o coeficiente de fricção.

A descrição do perfil de extrapolação do vento segundo as características e condições de relevo do local no qual se pretende descobrir as velocidades de ventos superiores às de referência é feita através do coeficiente de fricção. É usado também ocasionalmente para o posicionamento de um aerogerador, (Santos, 2015). Geralmente, a relação entre o valor do coeficiente do expoente de rugosidade para o tipo de superfície terrestre, encontra se representada na tabela 2.1.

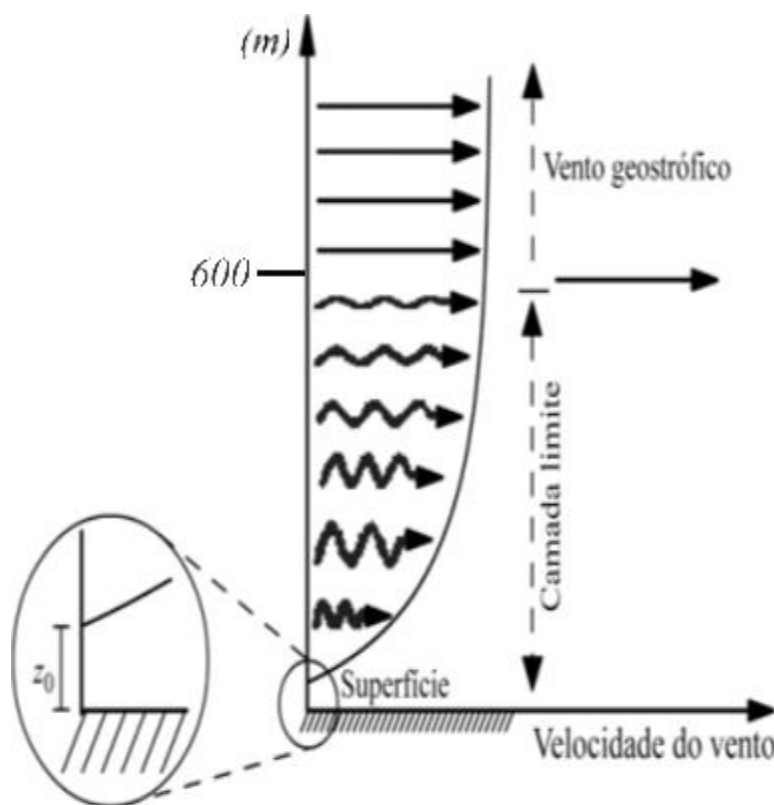
**Tabela 2. 1:** Valores do coeficiente de fricção para diferentes superfícies (Christófar, 2010).

Descrição da superfície do terreno	$\alpha$	Descrição da superfície do terreno	$\alpha$
Superfície lisa, lago ou oceano	0.1	Arbustos	0.2
Relva	0.14	Árvores, construções ocasionais.	0.22 - 0.24
Vegetação rasteira (até 0.30 m) árvores ocasionais	0.16	Árvores, áreas residenciais	0.28 - 0.40

A camada de Ekman é a camada de interligação entre a camada superficial e a atmosfera livre. Sobre oceano, esta camada apresenta uma variação de entre 500 a 1000 m de altura e sobre o continente, devido aos efeitos topográficos e no caso dos ventos muito intensos pode atingir 3000 m de altura, (Silva, 2006).

Os ventos locais são importantes na determinação dos ventos predominantes de uma determinada área. As condições climáticas contribuem tanto na variação da direcção do vento e também é influenciada pela soma dos efeitos globais e locais. Os ventos locais são dominantes do regime de ventos muitas vezes quando os ventos globais são suaves, (Nhampulo, 2010).

Na figura 2.5, está representado o perfil vertical de velocidades do vento na camada limite planetária, onde, na camada superficial verifica-se o aumento de velocidade do vento com a altura devido ao efeito da rugosidade da superfície sobre o vento adjacente e ventos geostróficos na camada acima, onde a fricção da superfície com atmosfera é nula.



**Figura 2. 5:** Perfil vertical da velocidade do vento desde a superfície até a altura do vento geostrófico. O comprimento de rugosidade  $z_0$  é a altura onde a velocidade é nula (Martins, et al., 2008).

## 2.4 Rajadas e Turbulências

A velocidade do vento à superfície é caracterizada por intensas oscilações cuja rapidez e amplitude estão ligadas ao estado de agitação do ar que ocorrem num certo período de tempo, isso constitui a turbulência. A turbulência atmosférica é oriunda de movimentos irregulares do fluxo de ar que pode resultar da convecção, orografia, movimentos de aeronaves, jato, frentes, subsidência, (Filho, 2013).

A variação brusca na velocidade e direcção do vento num determinado intervalo de tempo é denominada rajada. Geralmente o vento próximo à superfície apresenta rajadas, por isso, as observações do vento à superfície com fins climatológicos ou sinópticos devem referir-se aos valores médios correspondentes a um intervalo de tempo de dez minutos, (Filho, 2013).

## 2.5 Distribuição temporal e espacial dos ventos em Moçambique

O clima moçambicano é geralmente tropical húmido, apresentando duas estações distintas, sendo uma do inverno e outra do verão, (Macie, 2016).

A climatologia dos ventos no território moçambicano na estação do verão é influenciada pelas depressões equatoriais, com maior magnitude nas regiões Sul e Centro do país. Na região Sul verifica-se uma alternância da influência entre os anticiclones subtropicais e as depressões equatoriais, assim como as frentes frias, anticiclones móveis e depressões estacionárias provenientes das latitudes médias que invadem a região Sul e por vezes estendem-se até a região Norte de Moçambique, (Saraiva, 2005).

Durante a estação do inverno, o anticiclone subtropical do Índico penetra o continente africano exercendo influência sobre as regiões Sul e Centro de Moçambique, podendo em algumas ocasiões a sua crista se alastrar até a região Norte do território. Nesse período, os ventos predominantes da região Sul do território moçambicano são influenciados pelas frentes frias do quadrante Sul que atravessam o território e atingem com menor frequência a região Centro do território, (Saraiva, 2005).

Os ventos alísios são resultantes do gradiente de pressão existente entre as células anticiclônicas subtropicais e a região equatorial de baixas pressões e por sua vez, estes cobrem geralmente regiões compreendidas entre  $5^{\circ}$  e  $30^{\circ}$  S. Os ventos alísios são desviados à esquerda no hemisfério Sul através da força de Coriolis, tornando-se ventos predominantes do SE ao longo de todo o ano, embora sofram deslocamento zonal, (Saraiva, 2005).

No verão, o regime dos ventos em Moçambique nas regiões Sul e Centro respectivamente é geralmente caracterizado por ventos que sopram de SE e de E, e de NE na região Norte do país. De uma forma geral, durante os meses quentes são observados ventos predominantes de E e SE em todo o território moçambicano, (Saraiva, 2005).

Importa frisar o regime dos ventos no litoral da zona Sul de Moçambique para cada época, as temperaturas mais baixas ocorrem com ventos de quadrante Sul e ventos de quadrante Norte ou NE nos dias quentes, (Saraiva, 2005).

## **2.6 Princípios gerais de medição da velocidade e direcção do vento**

O vento é uma grandeza vectorial definida principalmente segundo a sua velocidade, direcção e sentido. A nomenclatura da direcção do vento é atribuída segundo a sua proveniência, mas este, a sua direcção não é constante, podendo apresentar algumas flutuações rápidas. Estas flutuações são denominadas rajadas. A direcção do vento é expressa em graus, contados no sentido horário partindo do Norte geográfico, e aplicando-se a teoria da rosa dos ventos, (Silva, et al., 2011).

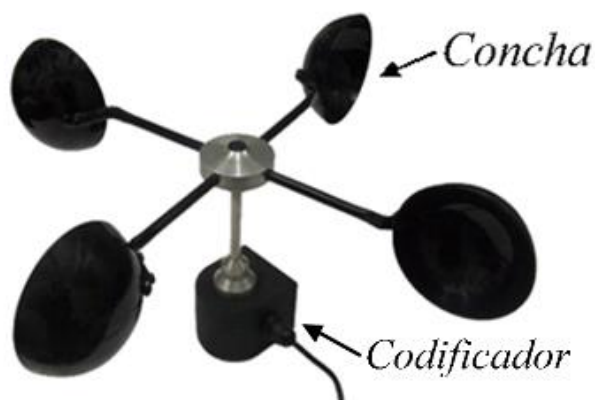
A medição da velocidade e da direcção do vento na superfície é feita com instrumentos específicos, nomeadamente: anemómetros e cata-ventos. Para que sejam feitas medições eficientes, é necessário que os instrumentos estejam instalados num lugar aberto, onde os obstáculos encontram-se a uma distância de no mínimo dez vezes a sua altura, (Castro, 2005).

### **2.6.1 Anemómetro de conchas**

É o instrumento mais utilizado no que concerne à medição da velocidade do vento. Este instrumento pode ser composto por três ou quatro conchas que giram entorno do eixo vertical e a rotação é proporcional à velocidade do vento, (Minuzzi, 2011).

As conchas estão orientadas de tal forma que independentemente da direcção do vento, este ao soprar fará com que o conjunto de conchas se mova e fazendo mover um mecanismo que aciona o dispositivo para contar o número de rotações. Esse dispositivo pode ser um codificador, ou outro, (Costa, 2013).

Este instrumento possui uma grande vantagem devido a sua robustez<sup>1</sup> e baixos custos, por isso é o mais utilizado em escala mundial. A Fig.2.6. é uma ilustração de um anemômetro electrónico constituído de quatro conchas, (Filho, 2013).



**Figura 2. 6:** Ilustração de um anemômetro electrónico de Conchas (Filho, 2013).

### 2.6.2 Anemômetro de hélice

O anemômetro de hélice pode medir velocidades elevadas tipicamente até 320 km/h. O leme instalado na horizontal do lado oposto da hélice tem como objectivo direccionar a hélice no sentido do vento, (Costa, 2013).

Este instrumento possui uma vantagem por ser capaz de medir a direcção do vento através do leme<sup>2</sup> junto com a sua velocidade através da hélice e a sua desvantagem reside na sua instabilidade em situações de turbulência em acompanhar as variações da direcção do vento. A Fig.2.7, é uma representação do anemômetro de hélice com o sensor de velocidade e de direcção, (Filho, 2013).

<sup>1</sup> Força

<sup>2</sup> Superfície plana situada a traz do anemômetro e que serve para orientar a hélice em direcção ao vento.

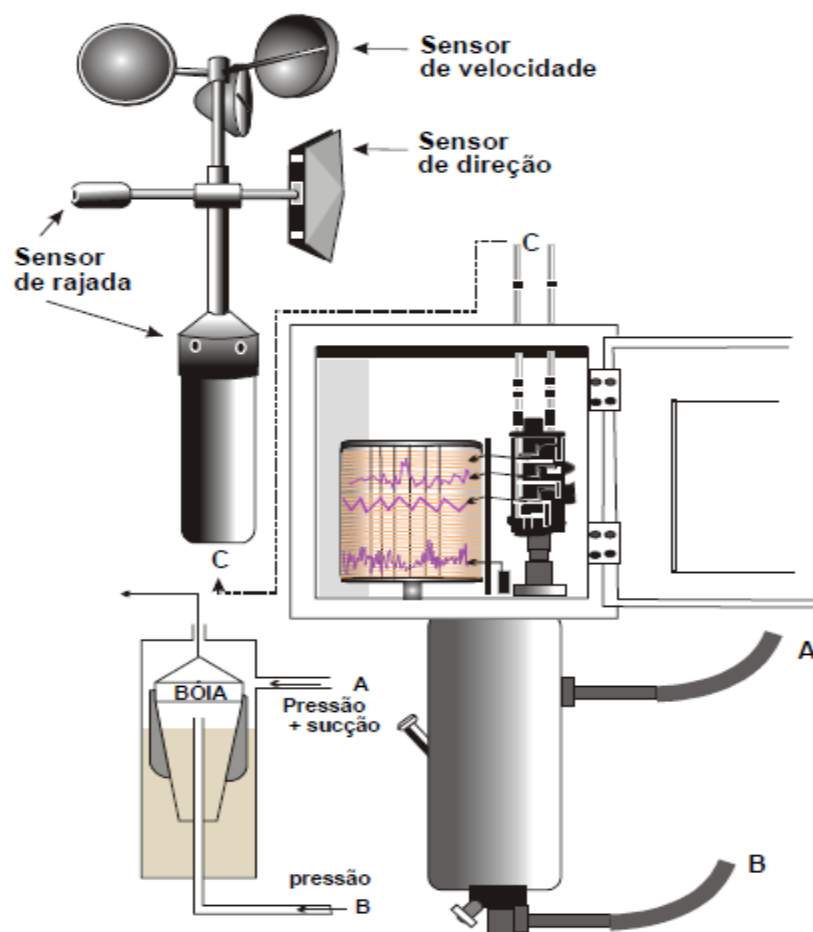


**Figura 2. 7:** Ilustração do Anemômetro de hélice com o sensor de velocidade a direita (hélice) e de direcção á esquerda (leme) ( <https://goo.gl/images/myyoxxy> )

### 2.6.3 Anemógrafo Universal

O anemógrafo universal é um instrumento mecânico responsável pelo registo da velocidade instantânea, direcção e velocidade média do vento. Na figura 2.8, é ilustrado um exemplo de um anemógrafo universal composto por três distintos sensores e quatro penas registadoras (duas para a direcção, uma para a distância percorrida e a última para a velocidade instantânea), (Silva, 2006).

Este instrumento é relativamente usado para determinação da intensidade instantânea, direcção e intensidade média do vento a uma altura de 10 m, (Silva, 2006).



**Figura 2. 8:** Ilustração de um anemógrafo universal, vendo-se acima os sensores e abaixo detalhes do mecanismo de registo e da boia do sistema de pressão-sucção (Silva, 2006).

## 2.7 Historial de energia eólica

Pelo conhecimento que se têm, os moinhos foram os primeiros equipamentos movidos pela força do vento e por sua vez, estes eram empregados para fins de moer grãos de alimentos na Pérsia desde o século VII. Registos indicam que os Egípcios utilizavam a força do vento para movimentar os barcos a vela dos escravos por volta de 2800 a.C. assim como no auxílio do bombeamento de água através de moinhos. Os gregos foram os primeiros a utilizar embarcações a vela e posteriormente pelos romanos, para atravessar o Mar Mediterrâneo, (Santos, 2015).

O período entre os séculos 200 a.C e 700 d.C foi de desenvolvimento, onde foram construídos os primeiros moinhos de vento de alturas elevadas e de eixos verticais com finalidade de exercerem a força necessária na moagem dos grãos. No Oriente Médio, algumas civilizações continuaram com essas técnicas, desenvolvendo moinhos em maiores quantidades, (Santos, 2015).

Países europeus, como o caso da França, Inglaterra e Holanda, passaram a utilizar o vento como fonte de energia mecânica a partir do século XII, pois havia motivação devido as cruzadas ocorridas na época e isso deu uma larga difusão no que concerne a utilização dos moinhos de vento por toda Europa. O moinho de vento que era usado na época era de eixo horizontal com pás de madeira que variavam de quatro a oito, mas para além de serem usados para gerarem energia mecânica para moagem de grãos, foram desenvolvidos mais sistemas eficientes para bombear água a partir da metade do século passado os quais foram modernizados nos Estados Unidos, (Santos, 2015).

Os holandeses deram diversas finalidades aos moinhos e algumas das aplicações destes, foi o do bombeamento de água e investiram nos estudos em que permitiram com que em 1582 construíssem o primeiro moinho de vento para produção de óleo vegetal com o auxílio da força do vento e para fins de produção de papel em 1586. No final do século XIX já existiam cerca de 9000 moinhos instalados e em funcionamento no país sem contar com os que se encontravam instalados em toda a Europa, (Santos, 2015).

Com o desenvolvimento tecnológico, no século XX passou-se a utilizar o petróleo como principal fonte de energia, criando o decaimento na utilização do recurso eólico para a realização das actividades. Estudiosos prosseguiram com as pesquisas na exploração do vento para outro fim considerando mais nobre, a de gerar a electricidade. Um dos pesquisadores foi o engenheiro norte-americano Palmer Putman, que desenhou uma turbina eólica de 30 m de altura e com pás de 53 m de diâmetro, o qual foi construído na cidade de Green Mountains nos Estados Unidos, (Santos, 2015).

A Rússia e a França foram uns dos países que realizaram pesquisas em prol dos sistemas de aerogeradores de médios e de grande porte conectados à rede de electricidade, diferente dos Estados Unidos que o seu investimento era focado nos aerogeradores de pequeno porte. Em

1929, a França desenvolveu e construiu o primeiro aerogerador de grande porte com 20 m de diâmetro com uma característica diferente, pois este era composto por duas pás, (Santos, 2015).

## 2.8 Conceitos da energia eólica

A energia eólica é uma fonte alternativa limpa e distribuída em todos os lugares, e o seu aproveitamento ocorre por meio de conversão da energia cinética do ar em energia mecânica através de turbinas eólicas que por sua vez são denominadas aerogeradores com fins de produção de electricidade, ou cata-ventos para outras actividades mecânicas como o bombeamento de água, (Silva, 2007).

A energia eólica constitui a parte de energias renováveis actualmente consideradas pelos cientistas como uma fonte viável de energias actuais. A sociedade enfrenta um problema no que diz respeito ao consumo de energia, por este tender a crescer e de prevalecer grande dependência dos recursos não renováveis, que tem no petróleo sua principal fonte, (Silva, 2007).

A utilização do vento como uma fonte alternativa para a geração de energia eléctrica em escalas comerciais, teve seu início em aproximadamente 30 anos atrás e com a aplicação dos conhecimentos da indústria aeronáutica, desenvolveu-se de forma rápida os equipamentos eólicos. No início da década 70, houve uma crise mundial do petróleo o que levou países europeus e dos Estados Unidos a desenvolverem equipamentos de produção de energia eléctrica como fonte alternativa e para diminuir a dependência do petróleo e carvão, (Silva, 2007).

“Para que a energia eólica seja tecnicamente aproveitável, é necessário que sua densidade seja maior ou igual a  $500 W/m^2$ , a uma altura de 500 m, o que requer uma velocidade mínima do vento de 7 a  $8 ms^{-1}$ ”, (Silva, 2007).

A Organização Mundial de Meteorologia (OMM), frisa que em apenas 13% da superfície a uma altura de 50 m, o vento possui uma velocidade média igual ou superior a 7 m/s. Essa proporção varia entre regiões e continentes, pois na Europa Ocidental, pode atingir a essas velocidades em 32% da superfície, (Silva, 2007).

A produção da energia eólica consiste na determinação do potencial eólico de uma determinada área, segundo as suas características geográficas e as suas condições climáticas. O vento é o elemento mais útil, sendo ele o responsável pelo movimento das hélices dos aerogeradores ou turbinas eólicas, (Epalanga, 2013).

Para tal, é necessário o estudo da variação espacial e temporal do vento predominante que pode interferir no que é o potencial eólico de uma determinada área e procedido de tipo de turbinas que podem ser instaladas no local.

## 2.9 Factores que influenciam a energia proveniente do vento

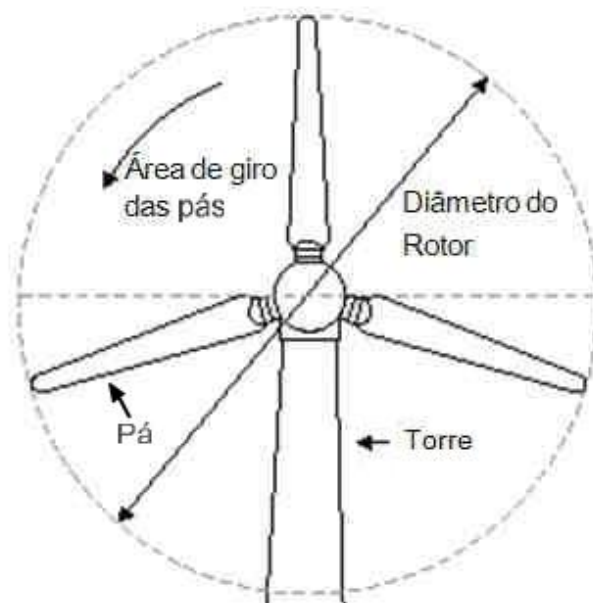
A força do vento que actua sobre as pás do rotor de um aerogerador, obriga-as a girarem de modo a produzirem energia eléctrica. Portanto, a quantidade da energia transferida ao rotor pelo vento é influenciada basicamente pelos seguintes factores:

### i. Densidade do ar

A energia cinética produzida por um corpo em movimento é directamente proporcional à sua massa, daí que, a energia cinética produzida pelo vento é condicionada pela densidade do ar, a massa por unidade do volume. É igual que afirmar que, o ar nas condições de maior densidade, exerce uma força de pressão maior sobre as pás de qualquer aerogerador. Portanto, quanto mais denso o ar estiver, maior quantidade de energia a turbina receberá. A densidade específica do ar em condições de pressão e temperaturas normais é igual a  $1.225 \text{ kg/m}^3$ , (Santos, et al., 2006).

### ii. Área de varrimento do rotor

A quantidade de energia do vento que a turbina eólica é capaz de captar é determinada pela área de varrimento do rotor. O rotor eólico é constituído por pás, cubo do aerogerador e mecanismos de controle de passo. A área do rotor aumenta com o quadrado do raio, por tanto, uma turbina duas vezes maior, recebe quatro vezes mais energia, (Santos, et al., 2006). A figura 2.9 é uma ilustração de um rotor e a área do seu varrimento.



**Figura 2. 9.** Ilustração de rotor de um aerogerador de eixo horizontal, (Epalanga, 2013).

A área varrida pelas turbinas de eixo horizontal é dada pela Eq.(2.4):

$$A = \frac{\pi}{4} D^2 \quad (2.4)$$

Onde: D é o diâmetro do rotor

### iii. Distribuição da pressão no rotor

À medida que o vento aproxima-se do rotor, a pressão do ar aumenta gradualmente, uma vez que o rotor actua como barreira ao vento, a pressão do ar volta a decair imediatamente após o vento passar pelo rotor, estabilizando gradualmente à medida que se afasta. Portanto, quanto mais afastado estiver o vento do rotor, a turbulência do vento provoca misturas entre vento mais lento com o mais rápido que circunda a área, fazendo com que haja a redução do efeito de “abrigo ao vento”, (Santos, et al., 2006).

## 2.10 Potencial extraído do vento

A energia cinética contida no vento é convertida em energia mecânica através dos giros das pás do rotor de uma turbina eólica e transformada em energia eléctrica pelo gerador. Portanto, a potência disponível ou contida no vento fluindo perpendicularmente com a velocidade  $v$  através de uma área  $A$  (que pode representar a área de intercessão das hélices de uma turbina eólica) é dada por:

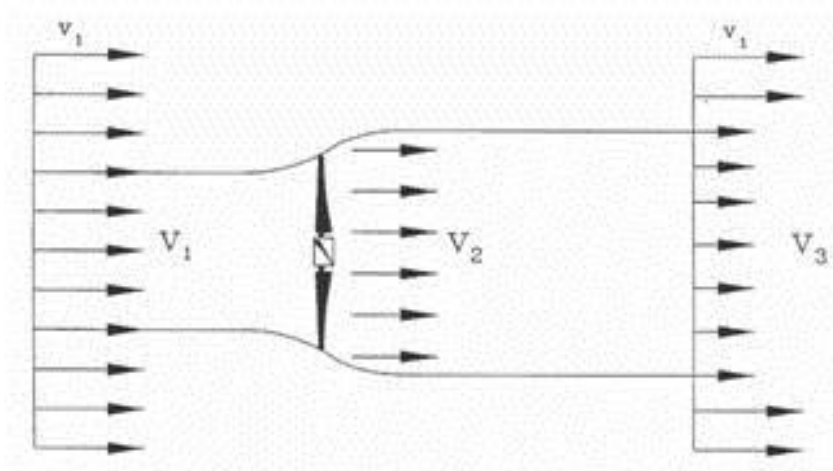
$$P_{disp} = 0.5A\rho v^3 \quad (2.5)$$

Onde:  $P$  é a potência do vento em watts [W];  $\rho$  é a densidade específica do ar em condições de pressão e temperaturas normais em  $\text{kg/m}^3$ ;  $A$  é a área da secção transversal em  $\text{m}^2$  e  $v$  é a velocidade do vento em  $\text{m/s}$ .

De toda a potência disponível numa massa de ar, apenas uma parte dela pode ser utilizada por uma turbina eólica. Levando em conta esse aspecto, introduz-se o índice denominado coeficiente de potência ( $C_p$ ) que por sua vez é definida como fracção da potência eólica disponível que é extraída pelas pás do rotor, (Brito, 2008).

### 2.10.1 Rendimento de Betz

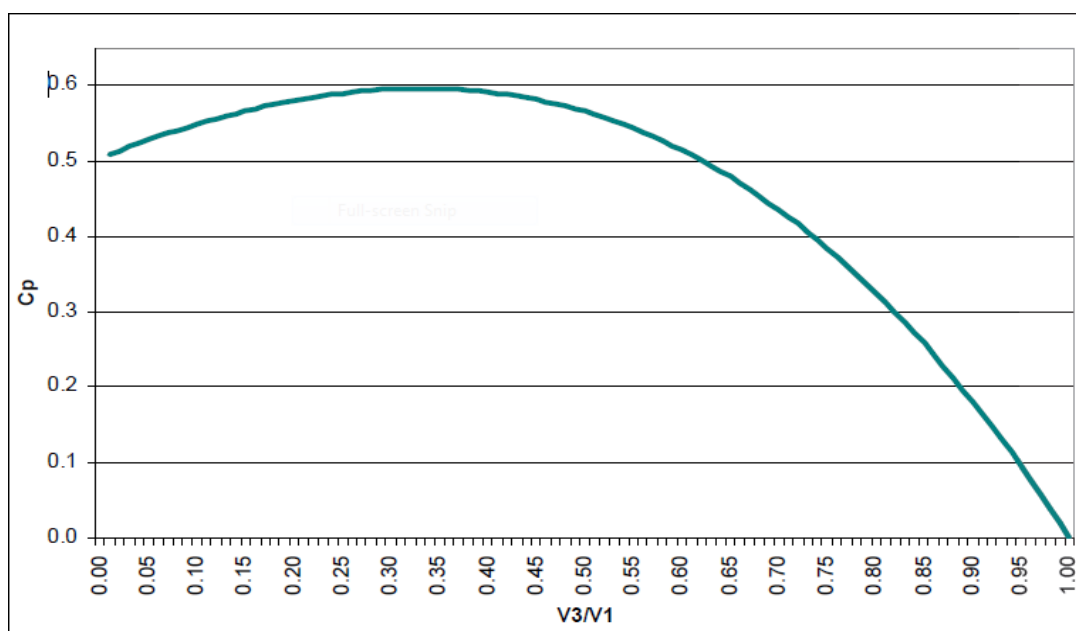
Para a determinação do valor máximo de energia que pode ser extraída do vento ( $C_p$  máximo), o físico alemão Albert Betz, fez um estudo em prol do caso no qual considerou um conjunto de pás em um tubo onde  $v_1$  representa a velocidade do vento na região anterior às pás,  $v_2$  a velocidade do vento no nível no qual se encontram as pás e  $v_3$  a velocidade do vento após deixar as pás, segundo se ilustra na Fig.2.9, (Brito, 2008).



**Figura 2. 10:** Ilustração das perdas de velocidade do vento na passagem por um conjunto de pás (Filho, 2013).

Segundo a figura 2.10, Betz assume que o deslocamento homogêneo do fluxo de ar a uma velocidade  $v_1$  é reduzida ao passar pelas pás e passa a possuir uma velocidade  $v_3$  a jusante das pás. Portanto, o potencial eólico extraído pela turbina eólica é dado pela derivada da diferença entre a energia cinética à montante e a energia cinética à jusante do conjunto das pás, (Brito, 2008)

Na figura. 2.11, ilustra-se a distribuição do coeficiente da potência ( $C_p$ ) em função da razão da velocidade da massa do ar à montante e à jusante da turbina eólica. Quando considerado o coeficiente de potência em função de  $v_3/v_1$ , verifica-se que ele atinge o seu valor máximo ( $C_p = \frac{16}{27} = 0.59$ ), onde  $v_3/v_1=1/3$ .



**Figura 2. 11:** Distribuição de Cp em função de V3/V1 (Brito, 2008).

A potência mecânica máxima extraída do vento pela turbina eólica é condicionada por diversos factores. Mas para fins de geração da corrente eléctrica é usado o modelo simplificado apresentado na Eq. (2.6), concordando com a Lei de Betz.

$$P_{max} = \frac{1}{2} A \rho v^3 0.59 \quad (2.6)$$

Onde:  $P_{max}$  é a potência máxima extraída do vento em W;  $\rho$  é a densidade específica do ar em condições de pressão e temperaturas normais em  $\text{kg/m}^3$ ;  $A$  é a área da secção transversal em  $\text{m}^2$ ,  $v$  é a velocidade do vento em m/s e 0.59 é o valor do coeficiente máximo de potência.

### 2.11 Distribuição estatística de Weibull

Em 1951, o físico sueco Ernest Hjalmar Wallodi Weibull (1887-1979) desenvolveu um método estatístico denominado distribuição de Weibull. Esta é uma distribuição probabilística comumente utilizada na representação de falhas típicas de partida, falhas aleatórias, engenharia de confiabilidade. É aplicado também nos estudos em prol das características dos ventos em um determinado local e em um intervalo de tempo, (Filho, 2013).

A distribuição de probabilidade de Weibull permite uma avaliação probabilística de ocorrência de cada valor de velocidade de vento, com isso, é possível determinar valores de velocidade de vento com maior chance de ocorrência em uma região considerando uma escala de medição, (Santos, 2015).

A função densidade de probabilidade de Weibull consiste na descrição das circunstâncias do vento, no que concerne a avaliação do potencial eólico, tendo em conta o desvio padrão dos dados colectados, introduzindo uma informação relativa às incertezas que podem ocorrer às velocidades previstas através dos dados colectados no período. A função densidade de probabilidade de Weibull é dada pela Eq.(2.7), (Filho, 2013).

$$f(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \cdot \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (2.7)$$

Onde:  $f(v)$  é a função densidade da probabilidade de Weibull;  $v$  é a velocidade do vento em m/s;  $c$  é o parâmetro de escala em m/s e  $k$  é o parâmetro de forma.

O factor  $k$  que por sua vez é denominado factor de forma de Weibull está ligado à variância da velocidade média e representa a regularidade dos ventos. Aos valores de velocidade se acham na faixa que varia entre 1,5 e 3 segundo e esta dá a ideia da regularidade dos ventos. A regularidade dos ventos em termos da sua velocidade são directamente proporcionais aos valores de  $k$ , e quanto maior for o valor de  $k$  mais estreita será a curva de distribuição, (Linhares, 2012).

O factor de escala ( $c$ ) de Weibull está ligado aos valores da velocidade média. Este quando sofre mudanças, influencia a escala no eixo das abcissas para a distribuição, (Filho, 2013).

## 2.12 Determinação dos parâmetros de Weibull

No que tange o aproveitamento do vento para a determinação do potencial eólico, a frequência dos ventos deve ser superior a 1 Hz e num período de 10 minutos as velocidades média, máxima, mínima e o desvio padrão das medidas do vento devem ser armazenadas e integradas, (Silveira, 2011).

Existem diversos métodos para a determinação dos parâmetros da distribuição de Weibull e a escolha do uso destes, depende do tipo de dados de entrada e da qualidade dos resultados

desejados, com isso, deve se ter em conta que à medida que se integra qualquer evento proveniente de uma série temporal ocorre uma perda de informação disponível, (Silveira, 2011).

É necessário que haja uma série de dados disponíveis com frequências relativas observadas, dados de velocidades médias e do desvio padrão para a determinação dos parâmetros de função de Weibull. Os diversos métodos usados para a determinação dos parâmetros estão abaixo citados, mas é apenas aprofundado o método que foi usado para a realização do presente trabalho.

- i. Método da máxima semelhança: este requer dados no formato de frequências de ocorrência para o cálculo dos parâmetros;
- ii. Método do desvio padrão e velocidade média: requer a velocidade média e o desvio padrão da velocidade média para a determinação dos parâmetros;
- iii. Método de gráfico de estimativa e método dos mínimos quadrados: estes dois métodos utilizam como dados de entrada os de distribuição acumulada das frequências de ocorrência;
- iv. Método da máxima verossimilhança: este utiliza directamente os dados de série temporal.

### 2.12.1 Método da velocidade média e desvio padrão

O método da velocidade média e desvio padrão é usado na maioria das vezes quando não se tem acesso à séries de dados temporais, pois, consiste na aproximação para uma faixa de valores de  $k$ , utilizando o desvio padrão e as velocidades médias das velocidades medidas para a determinação dos valores dos parâmetros da função de Weibull, (Silveira, 2011).

Os valores do factor de forma de Weibull considerados realistas e válidos para aplicação de energias eólicas estão na faixa compreendida entre 1,4 e 3,9, com os quais é possível estabelecer uma relação para o factor de forma por ajuste de curva, (Silveira, 2011):

$$k = \left(\frac{\sigma}{\bar{v}}\right)^{-1,086} \quad (2.8)$$

Onde:  $\sigma$  é o desvio padrão da velocidade do vento em m/s e  $\bar{v}$  é a velocidade média do vento em m/s.

O factor de escala de Weibull é dado pela Eq.(2.9), segundo (Silveira, 2011):

$$c = \frac{\bar{v}}{\Gamma(1+\frac{1}{k})} \quad (2.9)$$

Onde:  $\Gamma$  é a função Gama que por sua vez é dada por

$$\Gamma(x) = \int_0^{+\infty} e^{-t} t^{x-1} dx \quad (2.10)$$

Onde  $x = (1 + 1/k)$

Para a caracterização do potencial eólico de um determinado local é necessário determinar se os dois parâmetros da distribuição de Weibull, para esse feito, é necessário que a série temporal seja suficientemente longa para a redução dos erros na determinação da distribuição de Weibull, sendo aconselháveis séries de 5, 10 ou mais anos, (Silveira, 2011).

### 2.13 Aerogeradores

A conversão de energia cinética dos ventos em energia eléctrica é feita através das máquinas denominadas aerogeradores. Os aerogeradores são constituídos basicamente de uma turbina ou rotor de um gerador eléctrico e de mais integradores auxiliares. A construção dos aerogeradores baseou-se nos antigos moinhos de vento que tinham como objectivo converter a energia cinética dos ventos em energia mecânica, (Dalmaz, 2007).

O funcionamento dos aerogeradores em prol da produção da energia eléctrica envolve técnicas aerodinâmicas, eléctricas, avaliação meteorológica assim como a das características do local, análises civis e de diferentes sectores de engenharia. As turbinas eólicas utilizam geralmente ventos que fluem na camada atmosférica próxima à superfície terrestre, denominada camada superficial. Esta camada sofre uma influência directa das condições da superfície terrestre, (Santos, 2005).

Segundo (Santos, 2005), a geração de energia eléctrica pelos aerogeradores compreende três processos de transformação energética nomeadamente:

- i. A transformação da energia cinética das massas de ar em energia mecânica através da rotação das pás;

- ii. Posteriormente é acionado o dispositivo de engrenagem até o gerador e
- iii. Ocorre o processo final de conversão em energia eléctrica.

Todos os modelos de turbinas apresentam uma determinada velocidade nominal de operação, a qual quando é atingida, a turbina oferece a potência nominal que é interrompida totalmente quando é alcançada a velocidade máxima do giro do rotor (velocidade CUT-OUT), (Santos, 2005).

Existem basicamente dois tipos de aerogeradores, segundo as suas caracterizações quanto à configuração do eixo do rotor, podendo estes serem de eixo vertical ou do eixo horizontal, (Dalmaz, 2007).

### **2.13.1 Aerogerador de eixo horizontal**

Normalmente este aerogerador é constituído por três pás (ilustrado na figura 2.12) e podendo apresentar um sistema multipás. A variação das suas características depende geralmente da relação entre o coeficiente de potência e a velocidade específica de rotação, sendo que o rotor de eixo horizontal de três pás apresenta uma maior estabilidade e resiste às turbulências, com isso, possibilitando que estes possam ser instalados em grandes alturas, independentemente de apresentarem potências nominais superiores, (Santos, 2015).

Os aerogeradores são movidos por forças aerodinâmicas denominadas forças de sustentação e de arrasto. Geralmente essas forças exercem um empuxo aos corpos que obstruem o movimento do vento, sendo que a força de sustentação actua perpendicularmente ao escoamento e a força do arrasto actua na direcção do escoamento. Ambas as forças são proporcionais ao quadrado da velocidade relativa do vento, (Santos, 2015).



**Figura 2. 12:** Imagem ilustrativa de um aerogerador de eixo horizontal do tipo hélice (Haseirn, 2011).

### 2.13.2 Aerogeradores de eixo vertical

Este tipo de aerogerador apresenta sua maior vantagem em não necessitar de mecanismos de acompanhamento para variações da direcção do vento. Sobre os rotores do eixo vertical, actuam também forças de sustentação e de arrasto, (Brito, 2008).

A força de arrasto é a predominante actuante nesse modelo de aerogeradores. Esta força é oriunda da resistência do material ao fluxo do ar que gera um sentido da rotação no eixo em função do vector velocidade. As propriedades do ar assim como as características do objecto condicionam os efeitos do arrasto, pois, essa combinação resulta em um movimento de deslocamento no sentido da força resultante actuante do vento, (Santos, 2015).

Os aerogeradores de eixo vertical apresentam valores de velocidade de partida inferior quando comparados com os aerogeradores de eixo horizontal, estes por sua vez, possibilitam ainda o aproveitamento de ventos fracos. A Fig.2.13 é uma ilustração de um aerogerador de eixo vertical tipo Darrieus, (Santos, 2015).



**Figura 2. 13:** Aerogeradores de eixo vertical tipo Darrieus (Braga, et al., 2012).

#### **2.14 Produção de energia eólica no distrito de Xai-Xai**

Silva, et al.(2017) realizaram uma pesquisa em prol do cenário de mudanças climáticas em Moçambique, na qual modelaram os recursos eólicos para atingir os seus objectivos.

Para a efectivação do estudo, aplicaram a técnica de redução de escala usando o modelo regional RAMS6.0 (Regional Modeling Atmospheric System), tendo como campos de saída o modelo global HadGEM2-ES (Hadly Centre Global Environmental Model version 2 – Earth System) com objectivo de estimar o potencial eólico das regiões Moçambicanas considerando-se este como cenário de mudanças climáticas pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC). Usaram dados de reanálise obtidos do CFRS (Climate Forecast System Reanalysis) e MERRA (Modern- ERA Retrospective Analysis for Research and Applications) durante o período de 1985-2005, e os resultados foram satisfatórios usando se o modelo RAMS6.0. Portanto, em prol da previsão das mudanças climáticas, estes simularam campos de ventos a 10, 50 e 100 m altura sob condições de cenário de emissão RCP8.5 (Representative Concentration Pathways-8.5) do IPCC, para o período de 2019-2099 e determinaram uma possibilidade no aumento da densidade de energia eólica nas regiões de Moçambique particularmente durante o período de inverno nas regiões central e Sul do país respectivamente.

Nhapulo (2010) realizou na Província de Gaza e no distrito de Xai-Xai em particular, uma experiência com fins de produção de energia eléctrica através do recurso eólico.

A experiência realizada, consistiu na construção de um aerogerador de eixo vertical nele acopladas as conchas para a geração de energia eléctrica. Instalou –se o gerador a uma altura de 7.36 m com objectivo de poder minimizar as interferências que os obstáculos, a topografia e as construções possam exercer sobre o aproveitamento do sistema. Este usou o método quantitativo ou experimental com o qual chegou a concluir que o potencial eólico existente no distrito de Xai-Xai segundo a sua metodologia, é funcional para o carregamento de baterias de pequenas e médias voltagens.

## CAPÍTULO 3

### 3.0 METODOLOGIA

Nesta secção são apresentados os métodos e materiais que foram empregues na realização do presente trabalho.

#### 3.1 Materiais

O trabalho foi realizado com base nos dados meteorológicos de vento (velocidades e direcções médias mensais), adquiridos no Instituto Nacional de Meteorologia (INAM)- delegação de Xai-Xai no período entre 2007 e 2017, excepto o ano de 2008 devido a avaria dos instrumentos. São dados medidos através de um anemómetro e cata-vento instalados a uma altura de 10 m em relação à superfície da terra.

Foi empregue o Excel, para a organização dos dados e efectivação dos cálculos das médias aritméticas da velocidade, do desvio padrão, do potencial eólico assim como para a distribuição de frequência das velocidades do vento, por este ser de fácil uso e por permitir uma melhor organização dos dados. E para a construção de rosas dos ventos da direcção predominante, foi empregue o software WRPLOT view 7.0 (Wind Rose Plot).

#### 3.2 Extrapolação da velocidade do vento e determinação de velocidades frequentes

Para a extrapolação da velocidade do vento e determinação de velocidades frequentes a uma altura de 100 m onde se pretende instalar os aerogeradores, foram empregues os métodos de Helman e de distribuição de Weibull:

A lei de Helman também conhecida como lei de Potência representada pela Eq.(2.3), foi empregue na extrapolação da velocidade do vento dos 10 m de altura onde se encontra instalado o anemómetro para uma altura de 100 m acima da superfície da terra.

A lei de Helman foi estabelecida para definir o perfil vertical de velocidade de vento ao longo da camada limite atmosférica tendo em conta os diferentes comprimentos de rugosidade descritos pelo coeficiente de fricção ( $\alpha$ ).

Esta lei é empregue nos estudos do potencial eólico por esta descrever melhor o perfil vertical de extrapolação de velocidade do vento segundo as características e condições do relevo de um determinado local, e por se adaptar a diferentes tipos de estabilidade atmosférica.

Quanto a extrapolação da velocidade do vento para o nível de 100 m de altura acima da superfície da terra, foi usado neste trabalho o coeficiente de fricção ( $\alpha$ ) de 0.34 visto que a região (o distrito de Xai-Xai) tem árvores e áreas residenciais.

A função densidade da distribuição de Weibull representada pela Eq. (2.7) é um método usado para a determinação das velocidades com maior probabilidade de ocorrência em uma determinada área, e esta função foi usada na corrente pesquisa para a determinação das velocidades do vento com maior probabilidade de ocorrência. Esses resultados são representados em forma de gráficos para a melhor interpretação.

Portanto, a escolha da lei de Helman para a realização do presente trabalho reside na sua eficiência na descrição do perfil vertical dos ventos em diferentes níveis da atmosfera, que o método de Prandtl e a lei Logarítmica. Quanto à escolha da distribuição do Weibull, reside na melhor descrição das circunstâncias do vento na avaliação do potencial eólico, tendo em conta o desvio padrão dos dados coletados, introduzindo uma informação relativa às incertezas que podem ocorrer às velocidades previstas através dos dados colectados.

### 3.3 Construção da rosa dos ventos

Para a determinação da direcção predominante do vento, foi construída a rosa dos ventos através do software WRPLOT view 7.0 sendo este o método que apresenta melhor a distribuição de frequência de velocidade e direcção do vento num mesmo diagrama.

A rosa dos ventos construída através do software WRPLOT view 7.0 é distribuída em 8 rumos, segundo a orientação dos pontos cardiais (Norte, Este, Sul e Oeste) e colaterais (Nordeste, Noroeste, Sudeste e Sudoeste). Escolheu-se o software WRPLOT view 7.0 para a construção das rosas dos ventos, devido o seu fácil uso e por não exigir custos para a sua operação.

O WRPLOT view 7.0. considera ventos calmos, os ventos que apresentam uma intensidade localizada na classe dos ventos que varia de 0 m/s a 1.5 m/s, ventos fracos na classe de 1.6 a 5.6 m/s, ventos moderados na classe de 5.7 a 11.1 m/s e ventos fortes na classe de 11.2 a 19.4 m/s.

### 3.4 Potencial eólico extraído do vento

É importante ter se o conhecimento do potencial eólico existente em uma determinada região para o planeamento do uso deste para diversos fins, tendo em conta que nem todo potencial eólico disponível no vento é extraído pelas turbinas.

Para a determinação do potencial eólico disponível no local do estudo foi empregue a Eq. (2.5), considerando o diâmetro do rotor igual a 80 m e a densidade específica do ar em condições de pressão e temperaturas normais igual a  $1.225 \text{ kg/m}^3$ . Para o caso da determinação do potencial eólico máximo que pode ser extraído do vento através do aerogerador, foi aplicada a Eq. (2.6), a qual contém o coeficiente de potencia ( $C_p = 0.59$ ) estabelecido pelo Betz.

## CAPÍTULO 4

### 4.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados da pesquisa através de gráficos e tabelas. São apresentadas algumas comparações de resultados da presente pesquisa com os de outras pesquisas realizadas relacionadas com a produção de energia eólica na zona Sul do país e no distrito de Xai-Xai em particular.

#### 4.1 Determinação da direcção predominante do vento

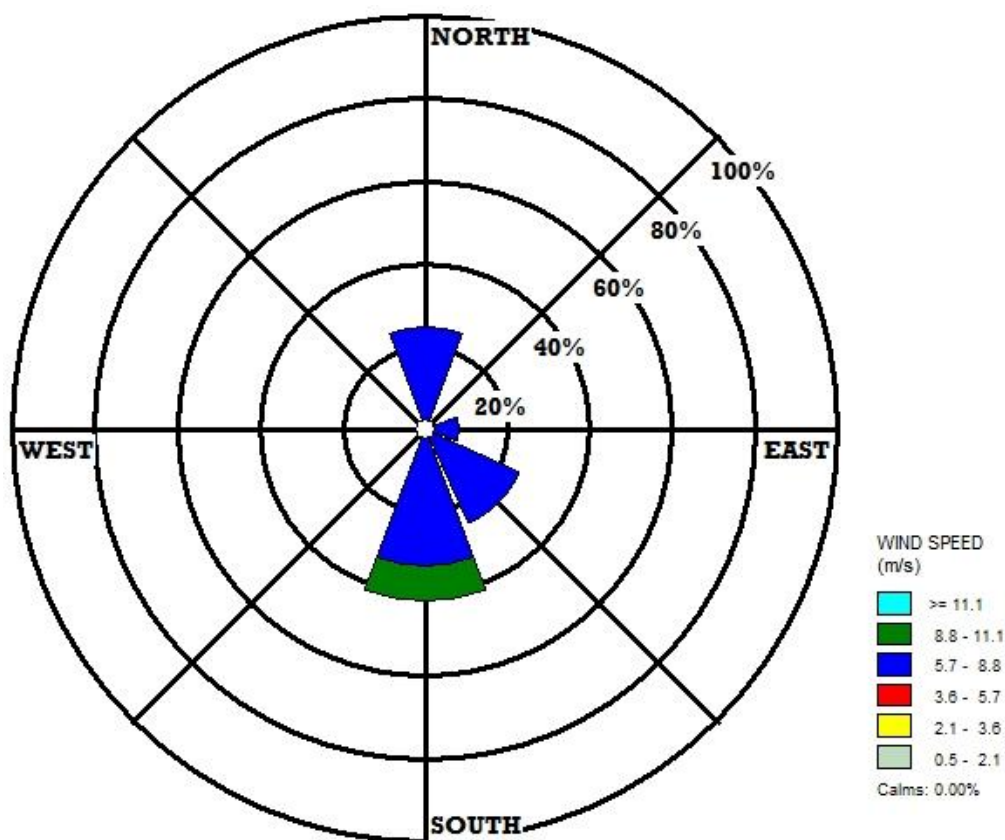
Para a determinação da direcção predominante do vento, foram construídas as rosas dos ventos para os anos de 2009 e 2017 e posteriormente de todo o período do estudo citado anteriormente.

A escolha dos anos 2009 e 2017 consistiu na determinação da variabilidade da direcção predominante do vento no decorrer do tempo, visto que o distrito de Xai-Xai tem sofrido uma constante transformação de vegetação, o que pode influenciar na alteração das condições microclimáticas da região e consequentemente a direcção e a velocidade dos ventos predominantes.

##### 4.1.1 Direcção predominante do vento em 2009

A figura 4.1, é a rosa dos ventos construída com base nas velocidades e direcções médias mensais do vento, observado no distrito de Xai-Xai, no ano de 2009.

Os valores de frequência de ocorrência da velocidade e direcção dos ventos são representados em percentagem nas rosas dos ventos. São também representadas as classes da velocidade do vento em m/s pelos rectângulos colorados segundo a intensidade do vento. E por fim, o período de registo de ventos calmos em percentagem é representado logo abaixo do diagrama das classes da velocidade.

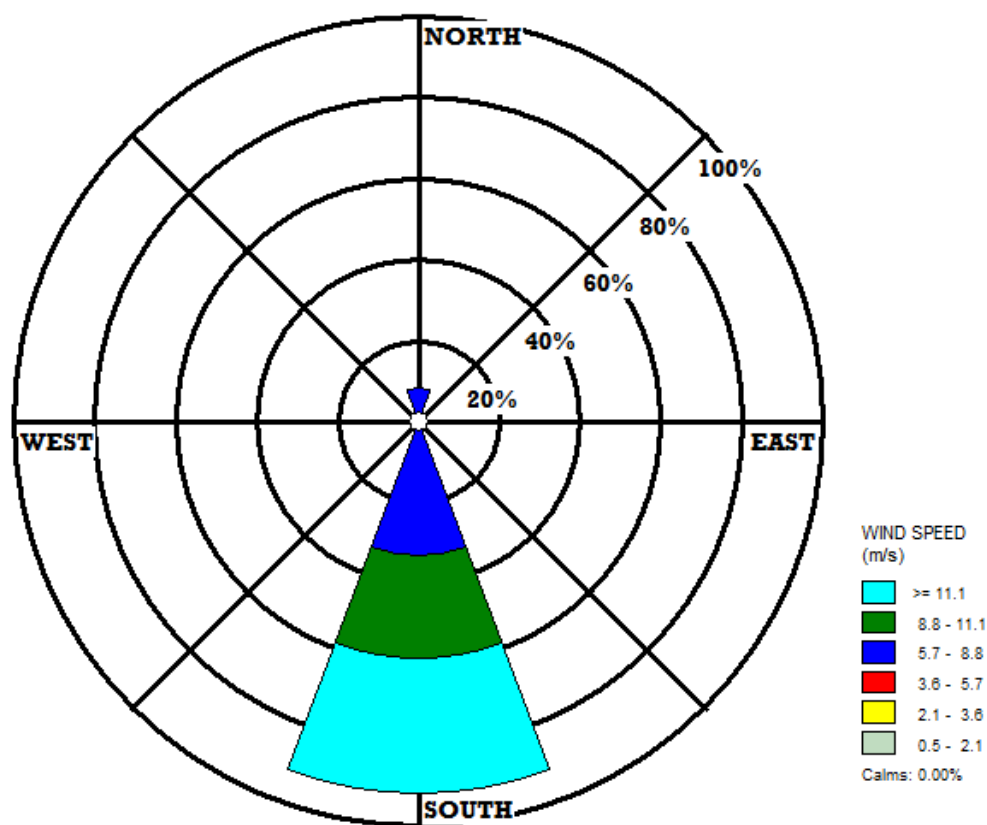


**Figura 4. 1:** Rosa dos ventos construída com base nas velocidades e direcções médias mensais do vento observado no ano de 2009.

Segundo a figura 4.1, constata-se que em 2009 os ventos predominantes observados a uma altura de 10 m acima da superfície terrestre no distrito de Xai-Xai, foram ventos do quadrante Sul, com velocidades frequentes da classe dos ventos que compreende entre 5.7 a 11.1 m/s correspondente a uma altura de 100 m acima da superfície da terra. Na rosa dos ventos são observados também ventos de quadrante Norte, Este e Sudeste com uma intensidade localizada na classe dos ventos de 5.7 a 8.8 m/s a 100 m da superfície. Nesse estágio de velocidades, o período de ventos calmos registado foi de 0.00%.

#### 4.1.2 Direcção predominante do vento em 2017

Na figura 4.2, é representada a rosa dos ventos construída com base nas velocidades e direcções médias mensais do vento observado no ano de 2017. Verificam-se neste período ventos do quadrante Norte a uma altura de 10 m, com velocidades frequentes da classe dos ventos compreendida de 5.7 a 8.8 m/s a 100 m da superfície. São observados ventos predominantes do quadrante Sul com velocidades frequentes da classe dos ventos que compreende entre 5.7 a mais de 11.1 m/s a uma altura de 100 m acima da superfície da terra. Nesse estágio de velocidades, o período de ventos calmos registado foi de 0.00%.

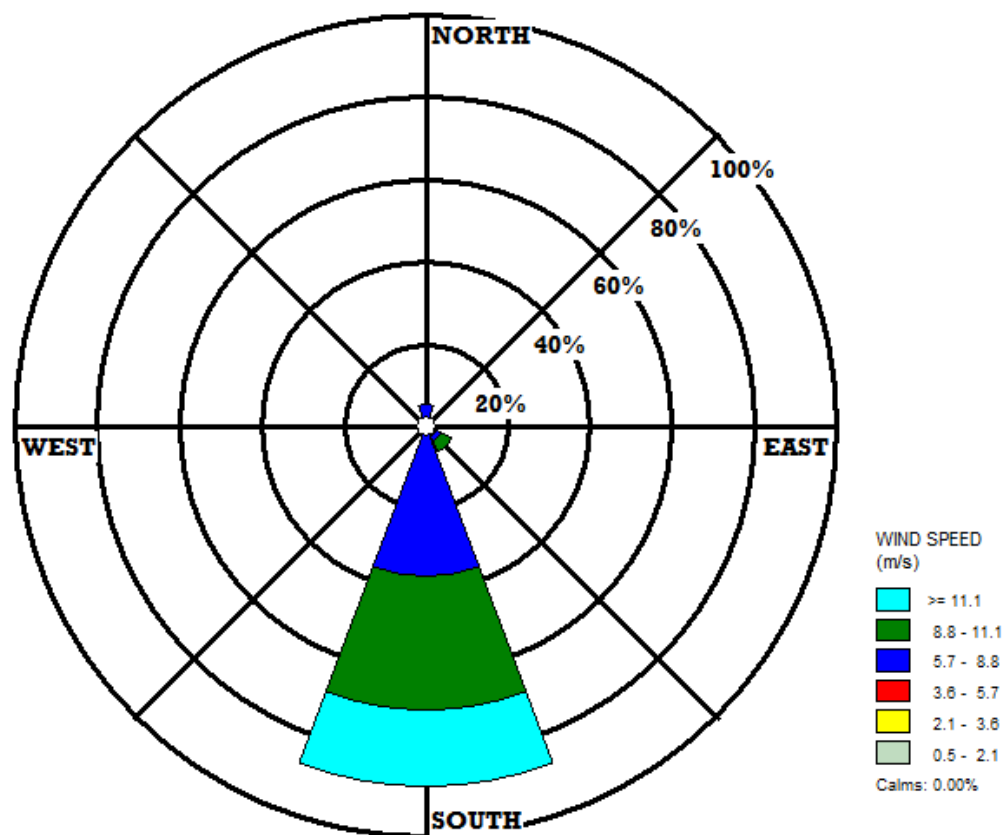


**Figura 4. 2:** Rosa dos ventos construída com base nas velocidades e direcções médias mensais do vento observado no ano de 2017.

### 4.1.3 Direcção predominante do vento no período entre 2007 a 2017

A figura 4.3, é uma ilustração da rosa dos ventos construída com base nas velocidades e direcções médias mensais do vento observado no distrito de Xai-Xai, no período entre 2007 a 2017.

Na rosa dos ventos representada na Fig.4.3, observam-se ventos do quadrante Norte de classe de velocidade dos 5.7 a 8.8 m/s, ventos do Sudeste de classe de velocidades que vaia de 5.7 a 11.1 m/s e ventos do quadrante Sul que ocorrem com maior frequência, com intensidades da classe dos ventos compreendida de 5.7 m/s a mais de 11.1 m/s . Contudo, constata-se que no distrito de Xai-Xai predominam ventos do quadrante Sul a uma altura de 10 m acima da superfície, com a classe de velocidades dos ventos que variam de 5.7 m/s a mais de 11.1 m/s a uma altura de 100 m acima da superfície da terra. Para esse estágio de velocidades, o período de ventos calmos registado foi de 0.00%.



**Figura 4. 3:** Rosa dos ventos construída com base nas velocidades e direcções médias mensais do vento observado no período compreendido entre 2007 e 2017.

Estes resultados convergem com os do estudo realizado pelo (Mota, 1964) citado por (Saraiva, 2005) que indicam uma predominância de ventos do quadrante Sul no litoral da zona Sul de Moçambique no inverno, NE e Norte no verão.

Portanto, a predominância dos ventos do quadrante Sul sobre o distrito de Xai-Xai, pode estar associada às condições microclimáticas, topográficas locais e a rugosidade da superfície (árvores e áreas residenciais), visto que segundo Plano (2010) o distrito é caracterizado por zonas acidentadas que podem colaborar para a variação da velocidade e direcção do vento.

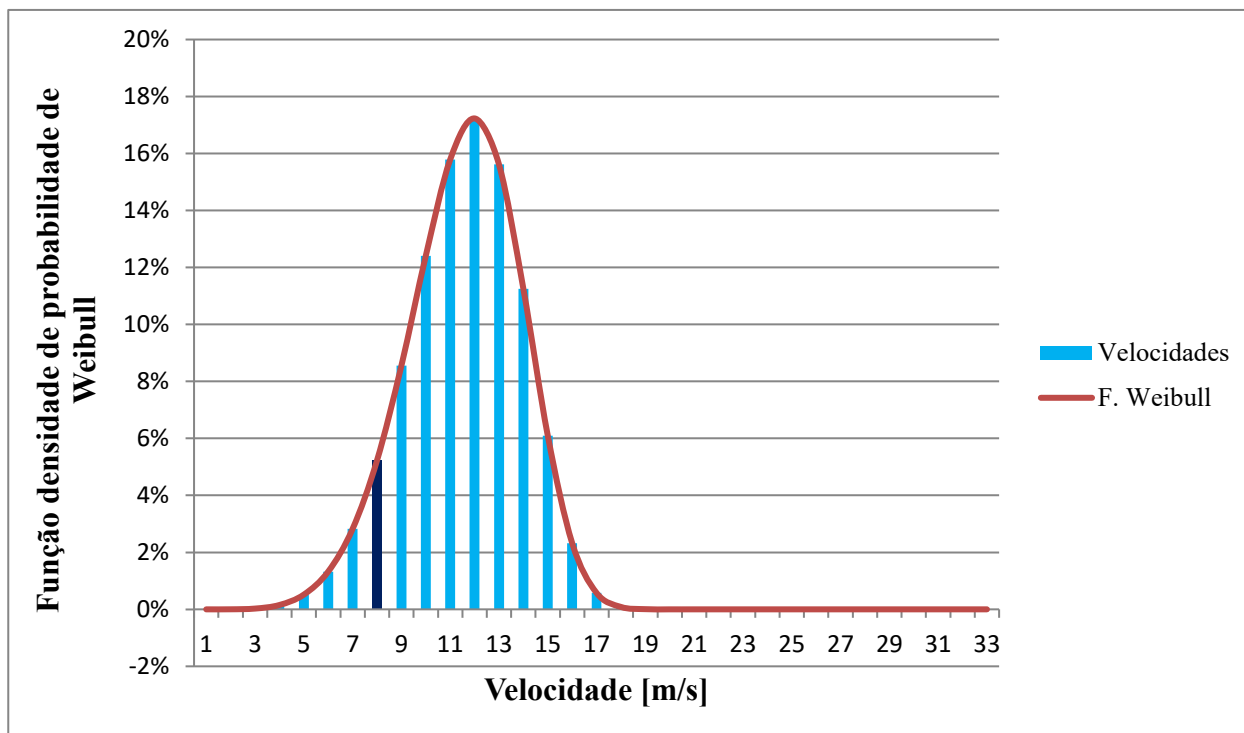
#### 4.2 Determinação de velocidades predominantes e médias anuais do vento

Na tabela 4.1, são apresentadas as velocidades médias anuais extrapoladas para uma altura de 100 m acima da superfície da terra, calculadas através da Eq.(2.3), com o coeficiente de fricção de 0.34 e os correspondentes desvios padrões.

**Tabela 4. 1:** Velocidades médias anuais e desvios padrões.

<b>Ano</b>	<b>Vel. média anual (m/s)</b>	<b>Desvio padrão  <math>\sigma</math> (m/s)</b>
<b>2007</b>	7.96	0.81
<b>2008</b>	---	---
<b>2009</b>	6.79	1.08
<b>2010</b>	7.21	1.14
<b>2011</b>	8.44	1.11
<b>2012</b>	9.24	1.64
<b>2013</b>	8.84	1.20
<b>2014</b>	9.45	1.14
<b>2015</b>	10.07	2.60
<b>2016</b>	9.63	1.24
<b>2017</b>	10.05	2.63
<b>Média periódica</b>	<b>8.76</b>	<b>1.90</b>

Na figura. 4.4, é representado o histograma da função densidade de probabilidade de Weibull, construído com base a série de velocidades do vento com o valor médio de 8.76 m/s e desvio padrão de 1.90 m/s. Com estes dados, os parâmetros da função de Weibull determinados foram  $k = 5.26$  e  $c = 11.45$  m/s aplicando se as Eqs. (2.8) e (2.9) respectivamente.



**Figura 4. 4:** Histograma da função densidade de probabilidade de Weibull que indica a distribuição de velocidades com maior probabilidade de ocorrência no distrito de Xai-Xai entre 2007 a 2017, a um nível de 100 m acima da superfície da terra.

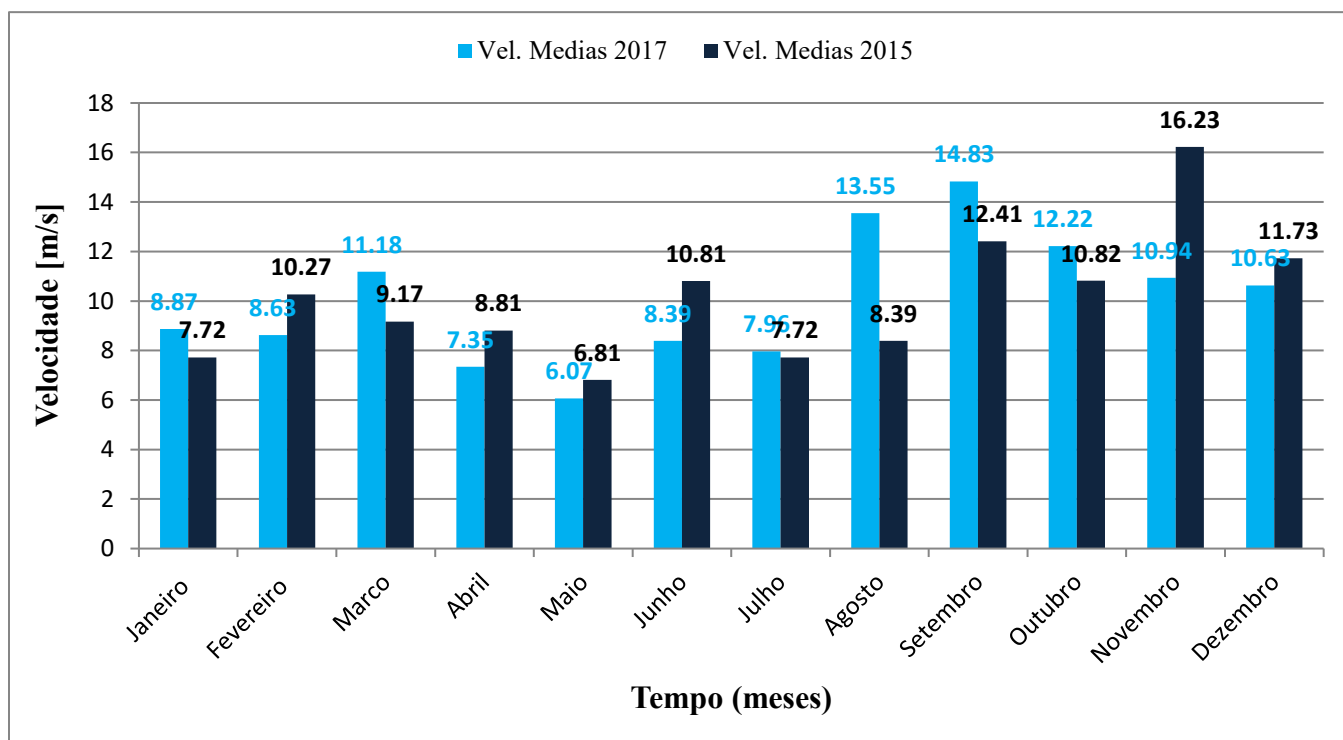
Portanto, através do histograma da função densidade de probabilidade de Weibull representada na Fig. 4.4, pode se constatar que a maior densidade de velocidades do vento com maior probabilidade de ocorrência a 100 m de altura acima da superfície da terra encontra-se na classe dos ventos de aproximadamente entre 5.0 a 17.0 m/s e na classe dos ventos de aproximadamente entre 9.0 a 15.0 m/s quando comparada com a velocidade média periódica.

#### 4.2.1 Variação sazonal da velocidade do vento

Na figura 4.5, são apresentadas as variações das velocidades médias mensais do vento ao longo dos anos 2015 e 2017.

Com base nas velocidades médias mensais do vento, determinou-se a média anual da velocidade de 10.07 m/s e desvio padrão de 2.60 m/s para o ano de 2015 e uma velocidade média anual de 10.05 m/s e o desvio padrão de 2.62 m/s para o ano de 2017.

A avaliação da densidade das velocidades médias mensais do vento foi feita comparando com a velocidade média de cada ano em duas estações do ano, isto é, a estação do inverno (compreende os meses entre Março a Agosto) e a estação do verão (compreende os meses entre Setembro a Fevereiro).



**Figura 4. 5:** Variação sazonal das velocidades médias mensais do vento em 2015 e 2017.

Na figura 4.5, é ilustrada a variação sazonal das velocidades médias mensais do vento, onde é observada para ambos os anos, uma maior densidade de velocidades dos ventos maiores que as médias anuais no período do verão e uma maior densidade de velocidades menores que as médias anuais no período de inverno.

Os resultados da variação das velocidades médias sazonais convergem com o estudo realizado pelo Cunha (1972) citado por Saraiva (2005), em relação ao regime dos ventos no Hemisfério Sul, onde registou ventos mais intensos no verão, devido ao maior aquecimento da superfície pela radiação nas latitudes médias em relação aos polos.

A grande diferença observada nas velocidades médias mensais do mês de Novembro para ambos os anos, pode estar ligada à diferença de amplitudes térmicas diárias do mesmo mês para ambos os anos, podendo se ter registado elevados valores de temperatura em Novembro de 2015, o que pode ter proporcionado a ocorrência de ventos intensos que em Novembro de 2017.

#### 4.2.2 Determinação das velocidades médias anuais e tendência

São ilustradas na figura 4.6, velocidades médias anuais extrapoladas a 100 m através da Lei Helman ou de Potência. O período entre 2007 a 2017 apresenta uma velocidade média do vento de 8.76 m/s com um desvio padrão correspondente a 1.90 m/s.

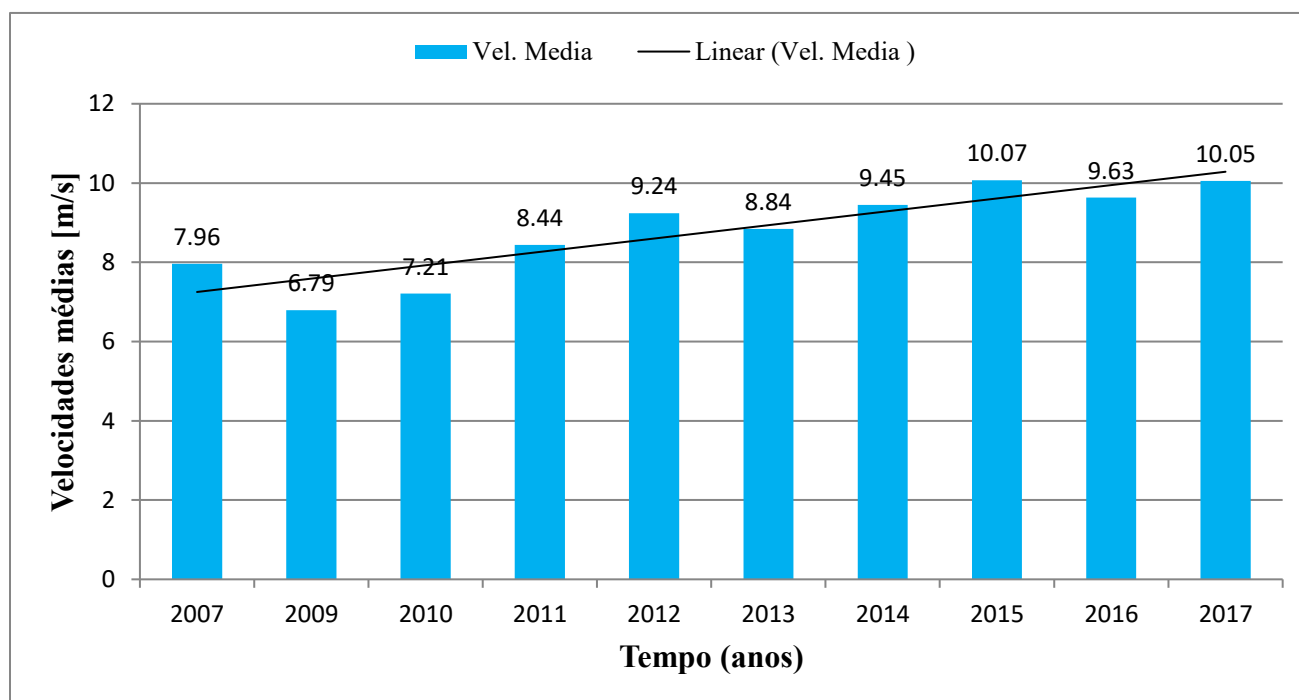


Figura 4. 6: Velocidades médias anuais e a tendência ao longo do período do estudo.

No histograma representado pela Fig.4.6, verifica-se a tendência de aumento de velocidades médias anuais durante o período do estudo, apesar das variações observadas. Este aumento pode estar ligado à transformação das condições geofísicas que o distrito sofre, segundo Estatal (2014) e também às mudanças climáticas segundo Silva, et al. (2017).

Portanto, o aumento das médias anuais de velocidades, proporciona o aumento do potencial eólico disponível no distrito, tendo em conta que o potencial eólico depende da terça potência da velocidade. Isso torna o distrito, um campo para a exploração do recurso eólico para a geração da energia eléctrica.

É observada uma maior densidade de velocidades médias anuais acima da velocidade média periódica, a partir de ano de 2012, o que revela uma possibilidade da tendência do aumento da velocidade dos ventos sobre o distrito de Xai-Xai.

Contudo, esta possibilidade da tendência do aumento de velocidades dos ventos, pode estar ligada ao cenário de mudanças climáticas estabelecido através dos resultados obtidos pelo Silva, et al. (2017) na modelagem de recursos eólicos sobre Moçambique considerando como cenário de mudanças climáticas, no qual apontam uma tendência do aumento da velocidade e do potencial eólico sobre Moçambique até 2099.

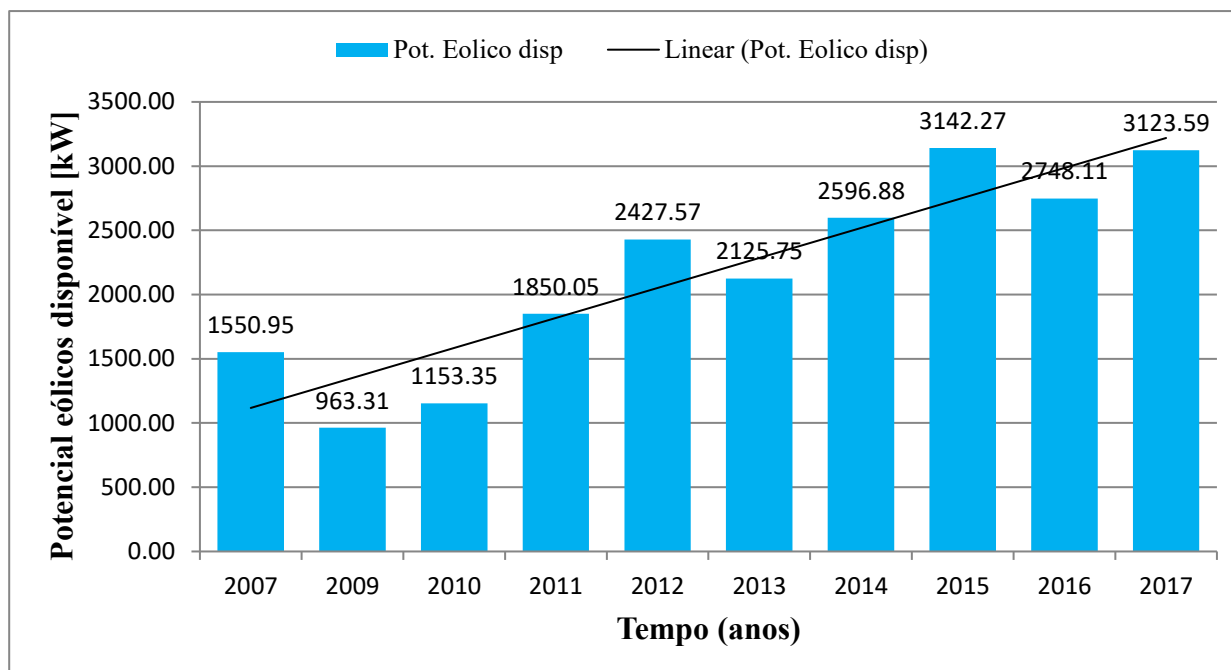
### **4.3 Determinação do potencial eólico disponível e potencial eólico extraído pelo rotor**

Na tabela 4.2. encontram se valores do potencial eólico disponível e extraído pelo rotor, determinados com base nas velocidades médias anuais do vento observado no distrito de Xai-Xai entre 2007 a 2017 a uma altura de 100 m acima da superfície da terra. Os potenciais eólicos foram determinados considerando se a densidade específica do ar em condições de pressão e temperaturas normais ( $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$ ) e uma área de varrimento do rotor correspondente ao valor de  $5024 \text{ m}^2$ .

**Tabela 4. 2:** Potencial eólico disponível e extraído do vento.

<b>Ano</b>	<b>Potencia disponivel [kW]</b>	<b>Potencia extraida pelo rotor [kW]</b>
<b>2007</b>	1552.01	915.69
<b>2008</b>	---	---
<b>2009</b>	963.31	568.35
<b>2010</b>	1153.35	680.48
<b>2011</b>	1850.05	1091.53
<b>2012</b>	2427.57	1432.27
<b>2013</b>	2125.75	1254.19
<b>2014</b>	2596.88	1532.16
<b>2015</b>	3142.27	1853.94
<b>2016</b>	2748.11	1621.39
<b>2017</b>	3123.59	1842.92
<b>Méd. Periódica</b>	<b>2168.29</b>	<b>1224.85</b>
<b>Des. Padrão</b>	<b>777.72</b>	<b>458.85</b>

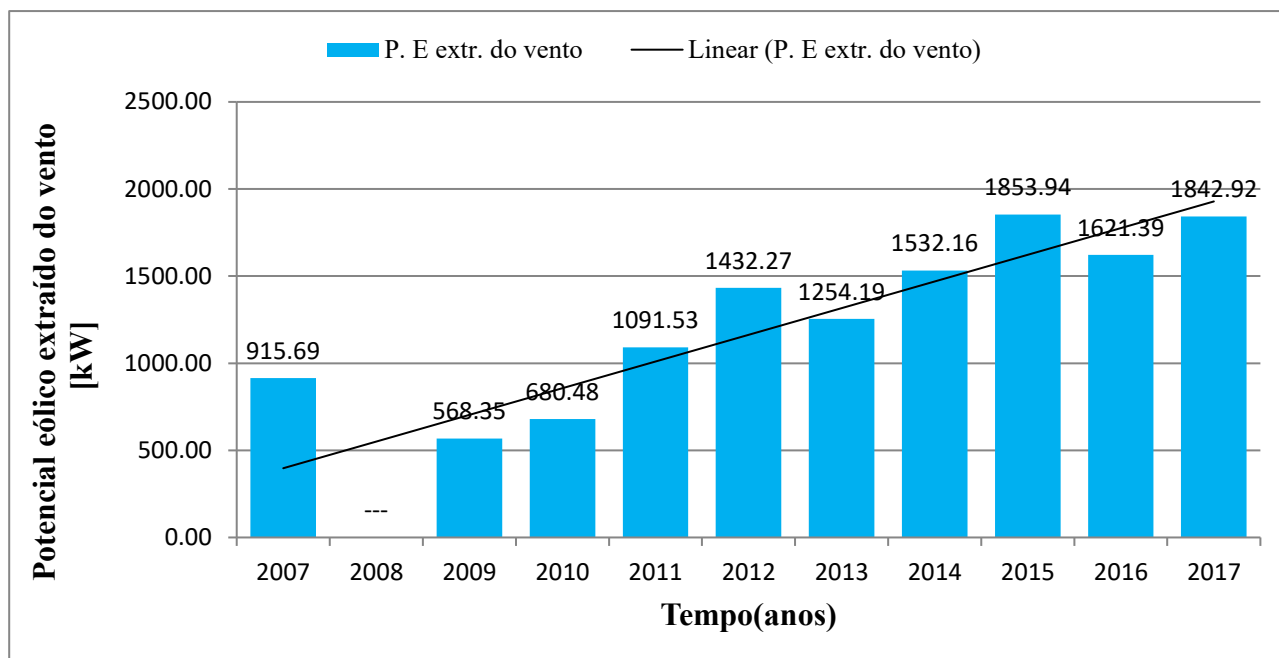
Na figura. 4.7, está representado o potencial eólico disponível em função do tempo (anos), correspondentes ao nível de 100 m de altura acima da superfície da terra. Verifica-se a tendência do aumento do potencial eólico disponível ao longo do período do estudo, este aumento é uma razão directa do aumento da velocidade do vento sobre o distrito de Xai-Xai.



**Figura 4. 7:** Potenciais eólicos médios anuais disponíveis.

A tendência do aumento do potencial eólico disponível a uma altura de 100 m acima da superfície da Terra, ilustrada na Fig. 4.7, pode estar ligada não só com o cenário de mudanças climáticas estabelecido através dos resultados obtidos pelo Silva, et al. (2017), mas também à constante transformação de vegetação devido a sua exploração para aquisição de lenha como fonte de energia para o suprimento das necessidades domésticas das famílias (Estatal, 2014).

A variação do potencial eólico extraído do vento em função do tempo (anos) está representada na Fig.4.8. A determinação da potência máxima que uma turbina eólica de 80 m de diâmetro pode extrair do vento a uma altura de 100 m acima da superfície da terra, foi feita considerando se o princípio de Betz introduzindo-se o coeficiente de potência ( $C_p = 0.59$ ).



**Figura 4. 8:** Potenciais eólicos médios anuais que uma turbina eólica de 80 m de diâmetro pode ser extraído do vento.

De acordo com o histograma de potenciais eólicos médios anuais que uma turbina eólica pode extrair do vento, representado na Fig.4.8, constata-se uma tendência de aumento do potencial eólico no decorrer do tempo. Este resultado coincide com o aumento das velocidades médias anuais ao longo do período do estudo.

Na figura 4.8, é observada uma maior densidade de potenciais eólicos médios anuais maiores que o médio periódico (1224.85 kW) a partir do ano de 2012. Entretanto, estes resultados convergem com os resultados do estudo realizado pelo Silva, et al. (2017), sobre a possibilidade do aumento do potencial eólico sobre Moçambique até 2099.

Pelo que, é possível com a demanda de energia naquele lugar o potencial eólico responder qualitativa e quantitativamente as necessidades da população residente no distrito de Xai-Xai e nas regiões circunvizinhas com a instalação de um parque eólico para a produção de energia eléctrica. Portanto, isso pode colaborar para desenvolvimento económico e social do distrito, visto que a fraca corrente eléctrica distribuída pelo distrito compromete as actividades dos residentes do distrito segundo Estatal (2014).

## CAPÍTULO 5

### 5.0 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

#### 5.1 Conclusão

Os ventos predominantes no distrito de Xai-Xai, segundo os dados fornecidos pelo INAM, no período entre 2007 a 2017, são ventos do quadrante Sul (que sopram de Sul para Norte), isto é, nesta direcção houve maior registo de frequência de ocorrência durante o período em referência.

Ao longo do período do estudo para a altura de 100 m, verificou-se uma velocidade média de 8.76 m/s. Nos últimos seis anos (2012-2017) foi registada maior densidade de velocidades médias anuais acima da média correspondente a 8.76 m/s, diferente para os outros anos. Os resultados revelam uma tendência do aumento das velocidades médias anuais ao decorrer do tempo. Este aumento pode estar ligado às condições climatológicas e fisiológicas do local.

O potencial eólico que pode ser extraído pelas turbinas de 80 m de diâmetro, apresenta uma tendência de aumento ao longo do tempo, tendo como média de 1224.85 kW com a excepção do ano 2008 devido à falta de dados. Este potencial, apresenta o mesmo comportamento que a das velocidades médias anuais em termos da sua tendência.

Observando as médias anuais do potencial eólico que pode ser extraído do vento, verifica-se que é possível responder com esses resultados a demanda de necessidades de residentes do distrito de Xai-Xai e das regiões circunvizinhas quando instalado um parque eólico, visto que foram determinadas elevadas quantidades do potencial do vento ao longo do período em referência.

Portanto, de uma forma generalizada o distrito de Xai-Xai apresenta um potencial eólico capaz de responder as necessidades dos residentes do distrito, tendo uma avaliação positiva em termos do seu uso como uma fonte alternativa para a geração de electricidade.

## Recomendações

Quanto à questão da determinação de fontes alternativas para geração de energia eléctrica em Moçambique e no distrito de Xai-Xai em particular, no que tange o uso do recurso eólico (vento) e para o melhoramento dos trabalhos posteriores, recomenda-se:

- Que a fixação dos aerogeradores seja a uma altura de 100 m acima da superfície, por ser a esta altura que os ventos têm uma intensidade satisfatória para a produção ou geração de energia eléctrica;
- Que os aerogeradores sejam com rotor de 80 m do diâmetro, pois é a este mínimo de diâmetro que se pode obter a quantidade da energia gerada capaz de responder à demanda energética do local ao nível de altura supracitado;
- Ainda que a orientação dos aerogeradores deve estar face à direcção do vento predominante, para que possam captar maior quantidade de energia fornecida pelo vento.

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

1. **Braga, André A, et al. 2012.** Evolução da Tecnologia AALP. *Just another WordPress.com site*. [Online] Julho de 2012. [Citado em: 7 de Abril de 2018.] <http://www.scoraigwind.com/>.
2. **Brito, Sérgio de Salvo. 2008.** *ENERGIA EÓLICA: PRINCÍPIOS E TECNOLOGIAS*. Brasil : CEPEL, 2008.
3. **Castro, Rui M. G. 2005.** *NTRODUCAO À ENERGIA EÓLICA*. Lisboa : s.n., 2005.
4. **Christófaro, Bruno Ramos. 2010.** *ESTUDO DO POTENCIAL EÓLICO EM OFFSHORE PARA A GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO LITORAL DO PARANÁ*. Pontal do Paraná : UFP, 2010.
5. **Costa, Mauricio Dalla. 2013.** *CENTRAL METEOROLÓGICA MICROCONTROLADA DE BAIXO CUSTO*. Pato Branco : UTFP, 2013.
6. **Cunha, R. 1972.** *Meteorologia Geral Agricola*. 1972.
7. **Dalmaz, Alessandro. 2007.** *ESTUDO DO POTENCIAL EÓLICO E PREVISÃO DE VENTOS PARA GERAÇÃO DE ELETRICIDADE EM SANTA CATARINA*. Engenharia e Ciências Mecânicas, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis : UFSC, 2007. p. 170, Dissertação.
8. **Epalanga, Ateniél Siliveli. 2013.** *Energia Eólica-Variabilidade técnica do Projecto Eólico na região de Urubici*. Brasil : Florianópolis, 2013. Dissertação.
9. **Epalanga, Otenielâ Siliveli. 2013.** *ENERGIA EÓLICA – VIABILIDADE TÉCNICA DE PROJETO EÓLICO NA REGIÃO DE URUBICI*. Florianópolis : s.n., 2013.
10. **Estatal, Ministerio da Administracao. 2014.** *Perfil Do Distrito do Xai-Xai Provincia de Gaza*. Maputo : s.n., 2014.
11. **Filho, Manoel F G. 2008.** *Cadernos de Dinâmica*. 1 edição. Campira Grande-Paraíba : CTRN, 2008. Vol. II.
12. **Filho, Paulo Marcos Carneiro. 2013.** *ANÁLISE DE MODELOS NUMÉRICOS PARA CÁLCULO DOS PARÂMETROS DA DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL: ESTUDO DE CASO PARA O CAMPUS DO PICI DA UFC*. DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA, UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ. FORTALEZA : UFC, 2013. p. 70, Monografia.

13. **Haseirn. 2011.** Kandrich 3 Enercon E-70. *Eigenes Werk*. [Online] 12 de Setembro de 2011. [Citado em: 7 de Abril de 2018.] [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a6/Kandrich3\\_enercon\\_e-70.JPG](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a6/Kandrich3_enercon_e-70.JPG).
14. **Linhares, Angélica Luana. 2012.** *Estudo do potencial energético eólico para geração de energia elétrica descentralizada na Região Administrativa de Araçatuba no Oeste Paulista*. Centro Universitário Católico Salesiano Auxilium – Araçatuba SP. Araçatuba-São Paulo : CUCSA, 2012. p. 105, Monografia.
15. **Machado, Maria Cordélia S e Brito, Tânia. 2006.** *COLEÇÃO EXPLORANDO O ENSINO ANTÁRTICA*. Brasília : Antártica, 2006. Vol. IX.
16. **Macie, Odete Amélia de Amilcar. 2016.** *Características da estação chuvosa em Moçambique: Probabilidade de ocorrência de períodos secos e padrões atmosféricos associados*. São Paulo : s.n., 2016.
17. **Martins, F R, Guarnieri, R A e Pereira, E B. 2008.** O aproveitamento da energia eólica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*. 2008, Vol. XXX, pp. 1-13.
18. **Minuzzi, Andrews Walczak. 2011.** *ESTUDOS DE METODOLOGIAS DE AVALIAÇÃO DO VENTO PARA APLICAÇÃO NO CAMPUS ALEGRETE*. Engenharia, Universidade Federal do Pampa. ALEGRETE : UFP, 2011. p. 95, Monografia.
19. **Mota, L. 1964.** *Análise de condições climáticas de Moçambique*. 1964. Vol. XXXIII.
20. **Nhampulo, Sérgio Leonardo. 2010.** *Vento Como Fonte Alternativa de Energia do Futuro Para a Província de Gaza*. Xai-Xai : s.n., 2010.
21. **Nogueira, José Hélio A e Fernandes, Roseanne M. 2005.** *Meteorologia Geral*. Escola De Especialistas de Aeronáutica. São Paulo : EEAR, 2005. p. 127, Módulo.
22. **Nogueira, José Hélio Abreu. 2005.** *Meteorologia Geral*. Brasil : EEAR, 2005.
23. **Plano. 2010.** *Plano Estratégico de Desenvolvimento Distrito de Xai-Xai*. Maputo : s.n., 2010.
24. **Santos, Alison A, et al. 2006.** *PROJETO DE GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA*. São Paulo : s.n., 2006.
25. **Santos, Priscila Mayara Duarte. 2005.** *PROCEDIMENTO PARA PROSPECÇÃO DE POTENCIAL EÓLICO COM AUXÍLIO DE SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA*. Ciências e Engenharia de Energia, Unifersidade Federal de Itajubá. Itajubá : UFI, 2005. p. 118, Dissertação.

26. **Saraiva, Pascoal dos Santos. 2005.** *Distribuição Estatística do Potencial Eólico na Ilha de Inhaca*. Maputo : UEM, 2005.
27. **Silva, Emerson M, Banga, Nelson M e Alves, José Mário B. 2017.** Modelagem dos Recursos Eólicos sobre Moçambique Considerando um Cenário de Mudanças Climáticas. 8 de Fevereiro de 2017, Vol. XXXII, pp. 157-170.
28. **Silva, Fernando M e Chaves, Marcelo dos Santos, Lima, Zuleide Maria C. 2011.** *Geografia física II*. 2a edicao. s.l. : UFRN, 2011.
29. **Silva, Jualine Kayse Albuquerque. 2007.** *CARACTERIZAÇÃO DO VENTO E ESTIMATIVA DO POTENCIAL EÓLICO PARA A REGIÃO DE TABULEIROS COSTEIROS (PILAR, ALAGOAS)*. MACEIÓ-ALAGOAS : UFA, 2007.
30. **Silva, Mário Adelmo Varejão. 2006.** *Meteorologia e Climatologia*. Brasil : Recife, Pernambuco, 2006.
31. **Silveira, Stevan Ruschel. 2011.** *Geração descentralizada de energia através de fonte alternativa*. Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre : UFRGS, 2011. p. 54, Monografia.

# ANEXOS

**Anexo 1:** Velocidades médias mensais e anuais do distrito de Xai-Xai no período de 2007 a 2017.

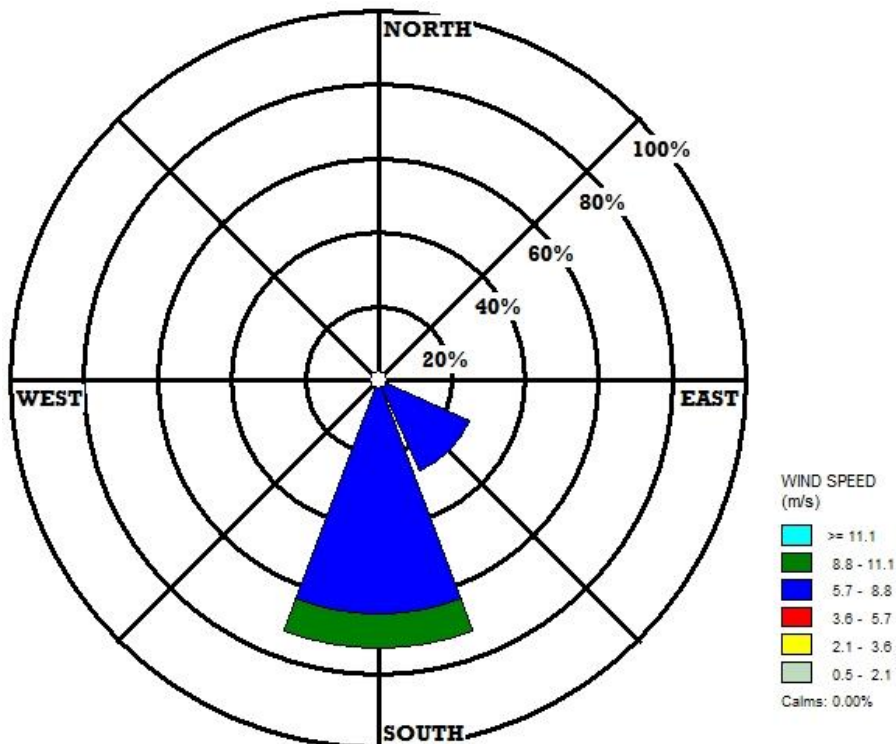
**Tabela 1:** Velocidades médias mensais a 10 m da superfície em m/s

Mês/Ano	Janeiro	Fevereiro	Marco	Abril	Maió	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
2007	3.81	3.67	3.89	3.11	2.97	---	3.78	4.14	3.92	3.86	3.64	3.22
2008	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
2009	2.67	3.06	3.06	2.75	2.67	4.31	2.81	3.06	3.64	2.86	2.81	3.56
2010	3.00	3.06	2.97	2.67	2.86	---	3.14	3.81	3.78	4.19	3.89	2.86
2011	2.89	3.08	3.89	4.14	4.72	3.56	4.11	3.72	4.03	3.75	4.28	4.11
2012	4.86	3.56	3.92	3.75	2.86	3.94	5.06	3.56	5.17	5.19	4.50	4.33
2013	4.39	4.17	3.89	3.81	3.94	2.92	3.97	4.39	5.28	4.17	3.83	3.72
2014	3.78	3.81	---	---	---	---	---	3.83	4.72	5.00	4.78	4.33
2015	3.53	4.69	4.19	4.03	3.11	4.94	3.53	3.83	5.67	4.94	7.42	5.36
2016	4.89	4.67	3.89	5.11	3.56	4.47	4.14	3.89	4.42	5.44	3.86	4.50
2017	4.06	3.94	5.11	3.36	2.78	3.83	3.64	6.19	6.78	5.58	5.00	4.86

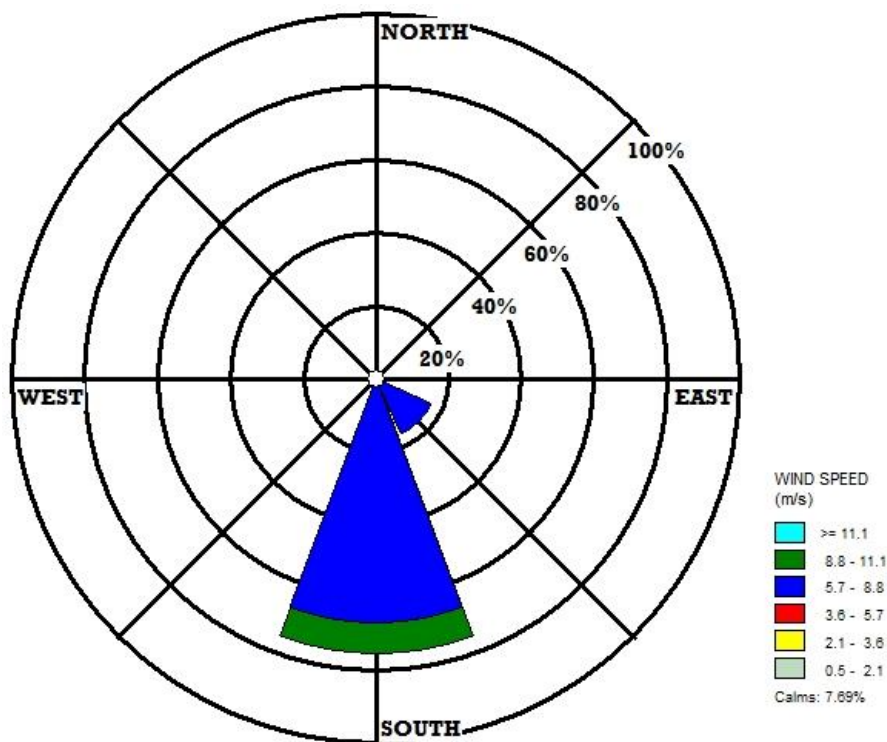
**Tabela 2:** Velocidades médias mensais a 100 m da superfície em m/s extrapoladas através da Lei de Potência

Mês/Ano	Janeiro	Fevereiro	Marco	Abril	Maió	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
2007	8.33	8.02	8.51	6.81	6.51	---	8.27	9.06	8.57	8.45	7.96	7.05
2008	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
2009	5.83	6.69	6.69	6.02	5.83	9.42	6.14	6.69	7.96	6.26	6.14	7.78
2010	6.56	6.69	6.51	5.83	6.26	---	6.87	8.33	8.27	9.18	8.51	6.26
2011	6.32	6.75	8.51	9.05	10.33	7.78	8.99	8.14	8.81	8.21	9.36	8.99
2012	10.64	7.78	8.57	8.21	6.26	8.63	11.06	7.78	11.31	11.36	9.85	9.48
2013	9.61	9.12	8.51	8.33	8.63	6.38	8.69	9.6	11.55	9.11	8.39	8.14
2014	8.27	8.33	---	---	---	---	---	8.39	10.33	10.94	10.45	9.48
2015	7.72	10.27	9.17	8.81	6.81	10.81	7.72	8.39	12.41	10.82	16.23	11.73
2016	10.69	10.21	8.51	11.18	7.78	9.79	9.05	8.51	9.66	11.91	8.41	9.85
2017	8.87	8.63	11.18	7.35	6.07	8.39	7.96	13.55	14.83	12.22	10.94	10.63

**Anexo 2:** Rosas dos ventos anuais construídos com base nas velocidades e direcções do vento para o distrito de xai-xai.



**Figura 1:** Rosa dos ventos do ano 2007



**Figura 2:** Rosa dos ventos do ano 2010

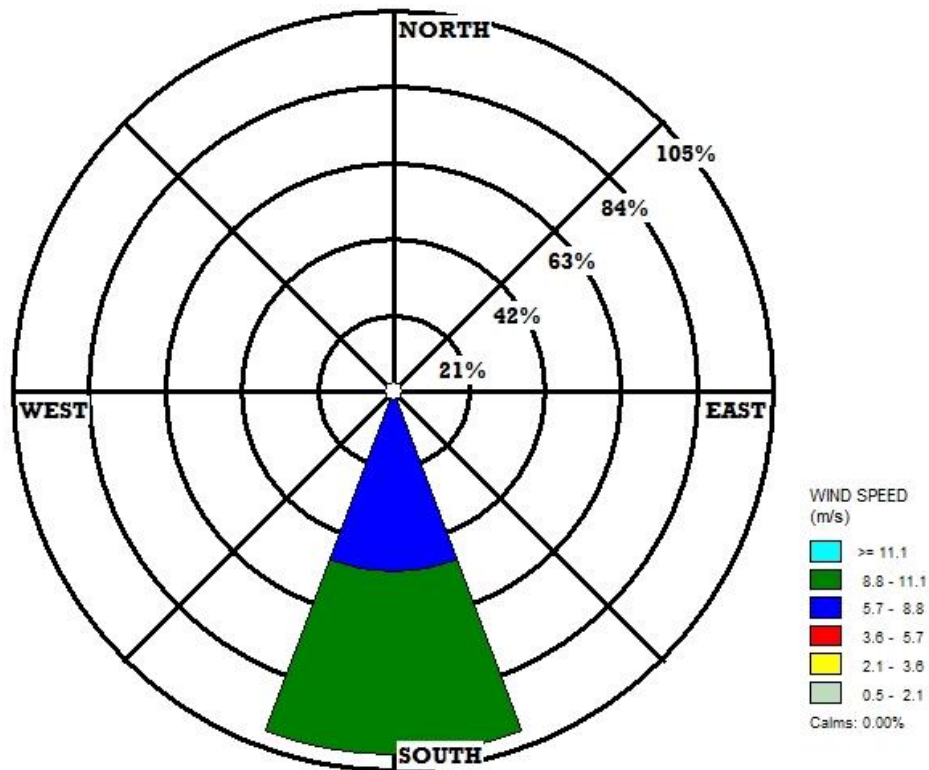


Figura 3: Rosa dos ventos de 2011

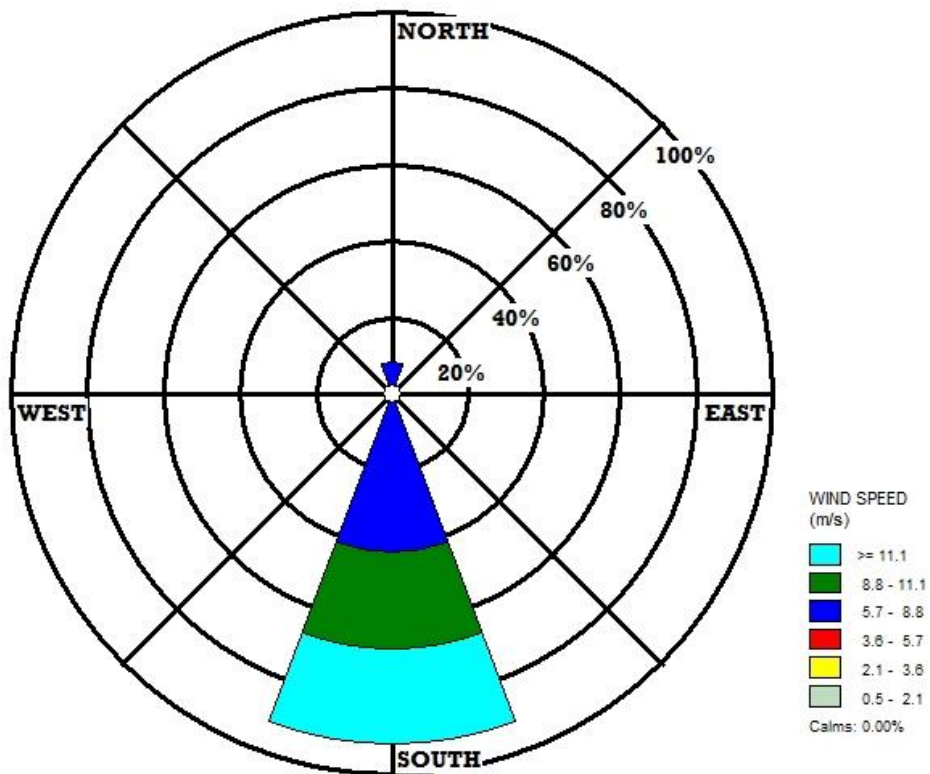


Figura 4: Rosa dos ventos do ano de 2012

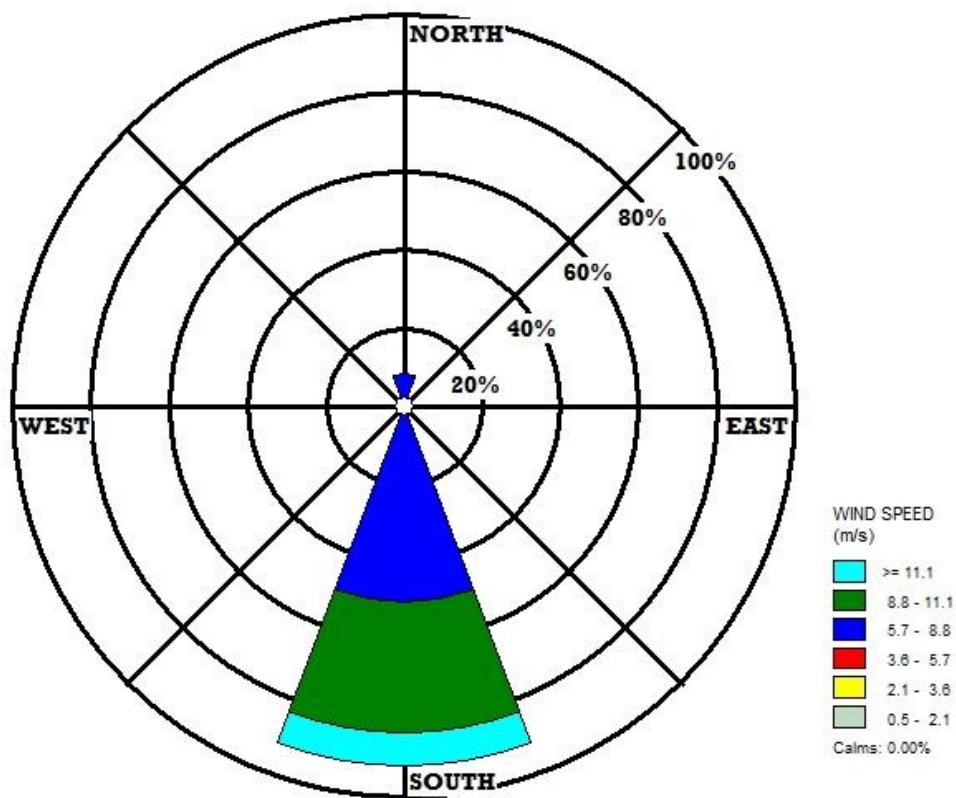


Figura 5: Rosa dos ventos do ano de 2013

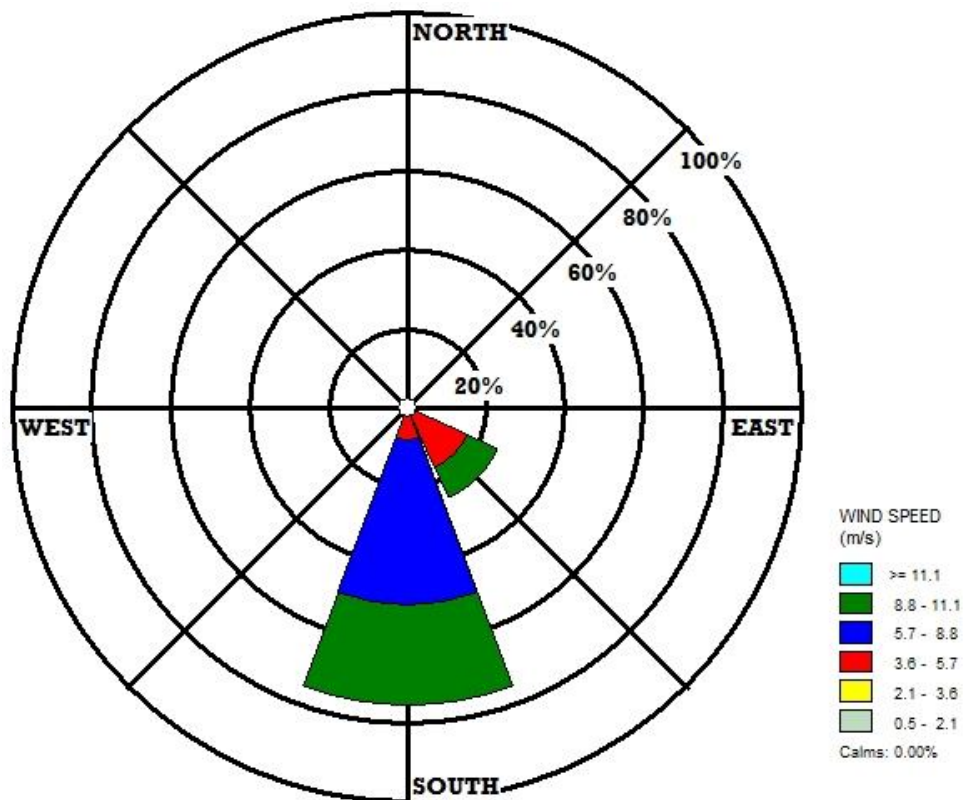


Figura 6: Rosa dos ventos do ano de 2014

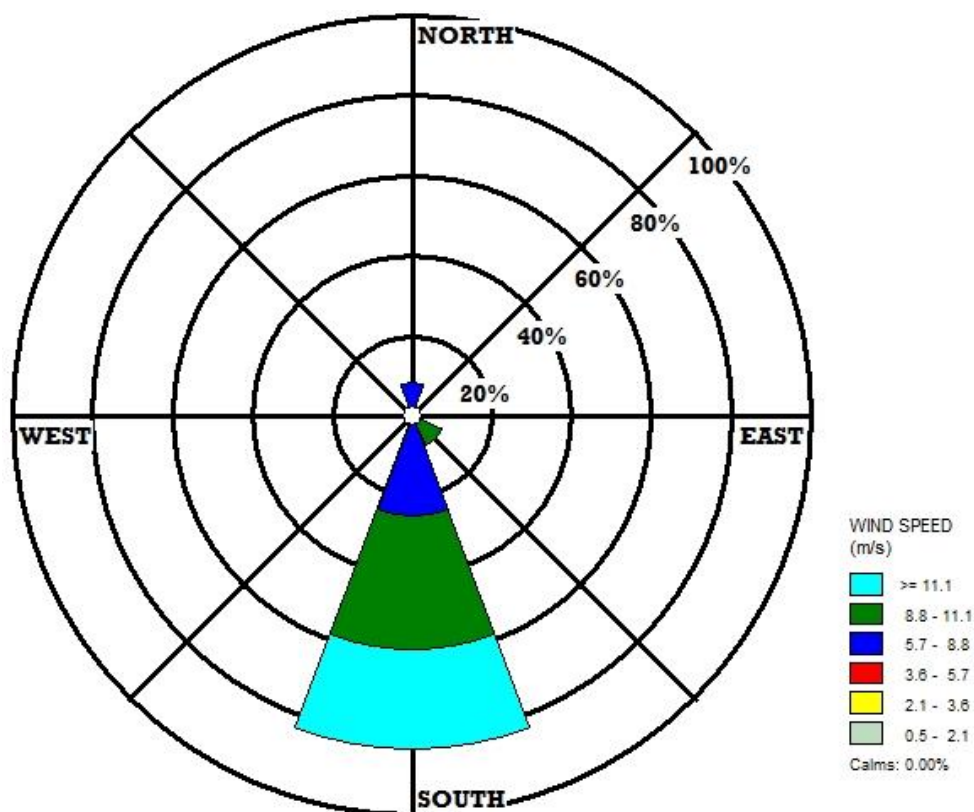


Figura 7: Rosa dos ventos do ano de 2015

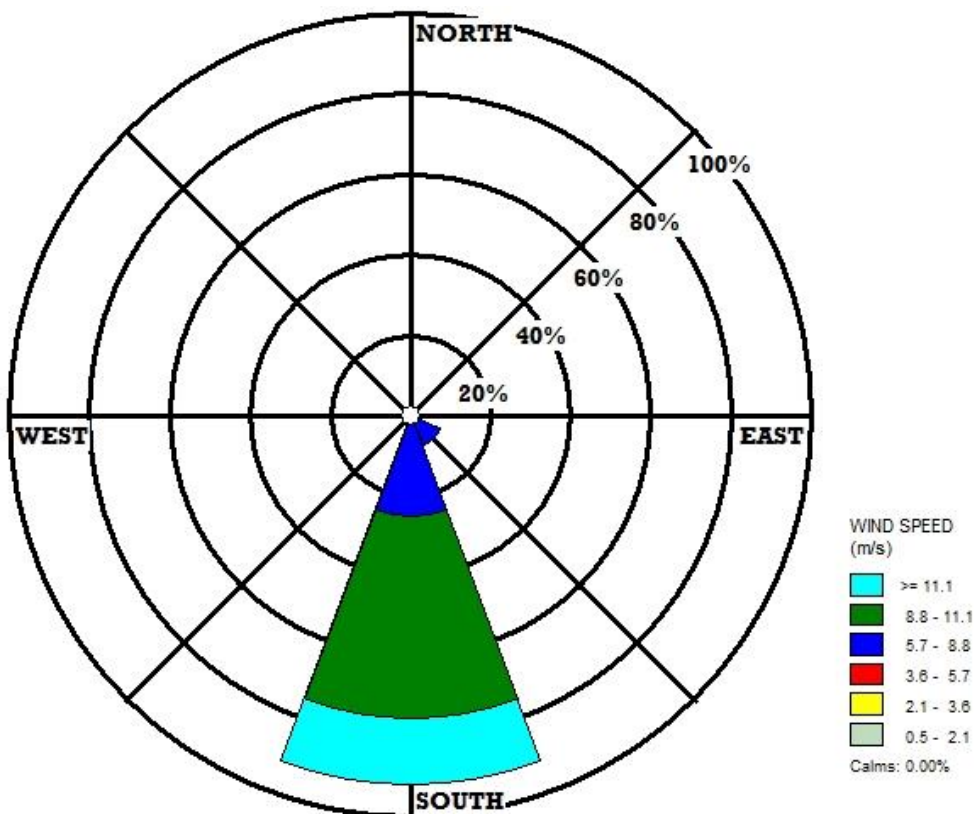


Figura 8: Rosa dos ventos do ano de 2016

**Anexo 3:** Análise estatística dos dados**Tabela 1:** Velocidades médias anuais, potenciais disponíveis e extraídas médias anuais a 100 m.

Ano	Velocidades [m/s]	Pot disponível [KW]	Pot. extraído [KW]
2007	7.96	1550.95	915.06
2008	-----	-----	-----
2009	6.79	962.24	567.72
2010	7.21	1151.61	679.45
2011	8.44	1847.86	1090.24
2012	9.24	2430.85	1434.20
2013	8.84	2124.55	1253.48
2014	9.46	2601.59	1534.94
2015	10.07	3146.18	1856.24
2016	9.63	2747.40	1620.97
2017	10.05	3125.14	1843.83
Máx	10.07	3146.18	1856.24
Mín	6.79	962.24	567.72
Média	8.76	2168.84	1279.61
Des. padrão	1.90	777.30	458.61

**Tabela 2:** Velocidade média, desvio padrão, factor de escala e factor de forma médios de 2007 a 2017 a 100 m para a determinação da função de Weibull.

Velocidade média periodica	Desvio padrao ( $\sigma$ )	Factor k	Factor c
8.76 m/s	1.90 m/s	5.26	11.45 m/s