



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA

**ESTUDO DOS PARÂMETROS AERODINÂMICOS PARA MELHORIA DA
PREVISÃO DO VENTO NO ESTADO DE ALAGOAS**

SILVANIA MARIA SANTOS DA SILVA

MACEIÓ - AL

AGOSTO - 2018

SILVANIA MARIA SANTOS DA SILVA

**ESTUDO DOS PARÂMETROS AERODINÂMICOS PARA MELHORIA DA
PREVISÃO DO VENTO NO ESTADO DE ALAGOAS**

Dissertação submetida ao colegiado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia no Instituto de Ciências Atmosféricas da Universidade Federal de Alagoas - UFAL, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Meteorologia.

Orientador (a): Prof. Dr. Roberto Fernando da Fonseca Lyra

MACEIÓ - AL

AGOSTO - 2018

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central

Bibliotecária Responsável: Helena Cristina Pimentel do Vale – CRB4-661

- S586e Silva, Silvana Maria Santos da.
Estudo dos parâmetros aerodinâmicos para melhoria da previsão do vento no estado de Alagoas / Silvana Maria Santos da Silva. – 2018.
66 f. : il. color., tabs.
- Orientador: Roberto Fernando da Fonseca Lyra.
Dissertação (mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Alagoas.
Instituto de Ciências Atmosféricas. Maceió, 2018.
- Bibliografia: f. 62-66.
1. Ventos – Parâmetros aerodinâmicos. 2. Energia eólica – Alagoas. 3. Lei da potência (α). I. Título.

CDU: 551.509(813.5)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA

CERTIFICADO DE APRESENTAÇÃO

N.º de ordem: MET-UFAL-MS-157.

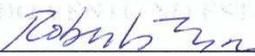
**“ESTUDO DOS PARÂMETROS AERODINÂMICOS PARA MELHORIA
DA PREVISÃO DO VENTO NO ESTADO DE ALAGOAS.”**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS

Silvania Maria Santos da Silva

Dissertação submetida ao colegiado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Alagoas - UFAL, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Meteorologia.

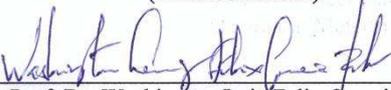
Aprovado pela Banca Examinadora composta por:



Prof. Dr. Roberto Fernando da Fonseca Lyra
(Orientador)



Prof. Dr. Rosiberto Salustiano da Silva Junior
(Membro Interno)



Prof. Dr. Washington Luiz Felix Correia Filho
(Membro Externo)

Agosto /2018

DEDICATÓRIA

À minha família e amigos verdadeiros, DEDICO.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, criador de todas as coisas.

Aos meus pais Fernando Silva e Sonia Santos, pela educação e incentivo dados a mim, contribuindo para o meu crescimento e formação. Às minhas irmãs, Silvia e Flávia, pelo apoio desde sempre. A uma pessoa muito especial, Pedro Victor, que me faz muito feliz e me apoia muito desde sempre.

Ao meu Orientador e Prof. Dr. Roberto Lyra, um grande profissional na área de Micrometeorologia, por ter acreditado em mim, dando-me uma oportunidade de crescer no curso com suas aulas e depois na iniciação científica, onde tive oportunidade de aprender e evoluir até a Pós-Graduação. Aos membros da banca, pessoas que tive o prazer de ter a avaliação na minha defesa do TCC, agora mais uma vez, agradeço desde de já aos senhores Drs. Rosiberto Salustiano e Washington Correia pelo convite aceito.

Aos amigos que fiz durante o curso e no Laboratório de Micrometeorologia, Nareida Delgado, Sâmara Santos, Thais Paes. As minhas grandes companheiras de curso e colegas meteorologistas, Sara Mota, Danielle Izídio, Carol Cavalcante e Thaíse Gomes, além dos colegas de turma do mestrado, que se tornaram meus grandes amigos, Edmara Ramos, Ítalo Januário, Osmar Toledo e Geiza Thamires, pessoas que tive o prazer de conhecer, conviver e vou levar para resto da vida.

Ao amigo que a vida me deu, Edvaldo Brito, nunca esqueci que foi por uma prestação de favor dele que eu por ventura ingressei na universidade.

A todos vocês, muito obrigada pelo suporte e por fazer parte da minha história.

RESUMO

O Objetivo deste trabalho foi desenvolver uma metodologia para melhorar a estimativa da velocidade do vento a partir de dados de torres anemométricas, via implementação de uma ferramenta para determinação dos parâmetros aerodinâmicos (d , Z_0) e do expoente da equação mais usada na engenharia eólica: lei da potência (α). Foram utilizados dados de velocidade do vento medidos em 5 torres anemométricas localizadas nas 3 mesorregiões do Estado de Alagoas. Os resultados mostraram que a velocidade e a direção do vento possuem um padrão anual e que a velocidade no interior é maior do que no litoral. Os ventos são mais fortes na estação seca e mais fracos na estação chuvosa, com direção predominante de SE. Foi implementado um algoritmo para filtrar os dados de vento e melhorar a sua estimativa com a altura em parque eólicos. Este algoritmo acabou se mostrando uma ferramenta importante para o estudo do escoamento uma vez que o filtro revela os casos de comportamento atípico do vento. No geral, foram constatados 53,77% de casos atípicos. O método desenvolvido para estimar d e Z_0 a partir de dados anemométricos, não apresentou resultados coerentes. Já o modelo para melhorar a determinação do expoente α apresentou bons resultados. O erro foi reduzido de 1,13% para 0,01% e verificou-se ainda, que ele varia de um local para outro e sazonalmente.

Palavras-chave: Vento, Energia Eólica, Parâmetros Aerodinâmicos, Lei da Potência.

ABSTRACT

The objective of this work was to develop a methodology to estimate the wind speed using anemometric data and to implement a numeric model to determine the aerodynamic parameters (d , Z_0) and the exponent (α) of the most used equation in wind power engineering: power law. Wind data from 5 anemometric towers were used. The tower was located in 3 mesoregions of the Alagoas State (Brazil): “*Litoral- coast*” (Roteiro and Maragogi), “*agreste -middle*” (Craíbas and Girau do Ponciano) and “*Sertão -West*” (Água Branca). The results showed that wind velocity and direction have an annual pattern and that the velocity in the *agreste* and *sertão* is higher than in the *litoral*. The winds are stronger in the dry season and weaker in the rainy season, with predominant direction of SE. The algorithm developed to filter the wind data and improve best estimation of the wind velocity at wind farms reveals the cases of atypical wind behavior was 53,8%. The method developed to estimate d and Z_0 from anemometric data did not present consistent results. The model used to determine the exponent α presented good results. The error was reduced from 1.13% to 0.01%. It has also been found that it varies from place to place and seasonally.

Keywords: Wind, Wind Power, Aerodynamic Parameters, power law.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Perfil vertical da velocidade do vento. O comprimento da rugosidade (Z_0) é a altura onde a velocidade é nula.....	24
Figura 2 – Localização das TAs Do Convênio da Eletrobrás e a Torre de Craíbas, destacando as três mesorregiões do estado de Alago.....	31
Figura 3 – Torres ADT-AL (Água Branca, Girau do Ponciano, Maragogi e Roteiro).....	33
Figura 4 – Torre Anemométrica do Projeto PVPN em Craíbas e Conjunto de medição próxima a torre.....	34
Figura 5 – Esquema de Perfil logarítmico ideal de acordo com os critérios exigidos na metodologia.....	35
Figura 6 – Representação gráfica do perfil logarítmico do vento sobre: a) superfície sem vegetação ou com vegetação de pequeno porte; b) superfície com vegetação de médio ou grande porte.....	38
Figura 7 – Organograma do algoritmo de cálculo de $d+Z_0$	40
Figura 8 – Organograma do método iterativo para determinação do valor de α	41
Figura 9 – Distribuição de frequência da velocidade do vento em Agua Branca, Girau do Ponciano, Maragogi e Roteiro para todo o conjunto de dados (abr/08, jun/08, out/08 e jan/09).....	43
Figura 10 – Distribuições da velocidade do vento em cada sítio experimental para os quatro meses relativos a cada estação do ano: abril/08 (outono), junho/08 (inverno), outono (primavera) e janeiro/09 (verão)	44
Figura 11 – Distribuição da frequência da direção do vento para os quatro sítios experimentais: Água Branca (sertão), Girau do Ponciano (agreste) e o litoral de Maragogi e Roteiro.....	47
Figura 12 – Distribuições da direção do vento em cada sítio experimental para os quatro meses relativos a cada estação do ano: Abril/08 (outono), junho/08 (inverno), outono (primavera) e janeiro/09 (verão).....	48
Figura 13 – Altura onde o vento é zero ($d+Z_0$) em AB,GP, MG e RT nos meses de Abril/08 (outono), junho/08 (inverno), outono (primavera) e janeiro/09 (verão).....	51
Figura 14 – Perfil médio do vento em Craibas no período de 05/12/2014 a 13/01/2015.....	53
Figura 15 – Determinação de “d” via método iterativo.....	54
Figura 16 – Escoamento do vento em uma colina (esquema).....	57

Figura 17 – Valores médios do expoente nos meses de abril/08, junho/08, outubro/08 e janeiro/09. Em AB, GP, MG e RT.....59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Localização das quatro torres do projeto ADT-AL cujos dados foram utilizados neste trabalho.....32

Tabela 2 – Sensores e anemômetros usados no sistema da TA.....34

Tabela 3 – Classes de maior frequência em cada local e em cada estação do ano para AB, GP, MG e RT.....46

Tabela 4 – Valores de $d+Z_0$ para cada local de estudo e cada estação do ano em Água Branca (AB), Girau do Ponciano (GP), Maragogi (MG) e Roteiro (RT).....52

Tabela 5 – Valores de $d+Z_0$ para todas as camadas em Craíbas, no período de 5 a 100 m.....55

Tabela 6 – Total de casos de eliminações em cada critério nos quatro locais expressos em percentual.....56

Tabela 7 – Total de casos de eliminações, por período, em cada critério nos quatro locais expressos em percentual.....58

Tabela 8 – Erro absoluto da velocidade do vento em cada mes e cada local utilizando o modelo original (MO) e o modelo desenvolvido (MD) nos meses de abril/08, junho/08, outubro/08 e janeiro/09. Em AB, GP, MG e RT.....60

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANNEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

AB – Água Branca

ADT-AL – Atlas Eólico e Disseminação da Tecnologia Eólica no Estado de Alagoas

CHESF – Companhia Hidro Elétrica do São Francisco

CLA – Camada Limite Atmosférica

CLA₂ – Centro de Lançamento de Alcântara

CLC – Camada Limite Convectiva

CLE – Camada Limite Estável

CLP – Camada Limite Planetária

CLS – Camada Limite Superficial

d – Deslocamento do Plano Zero

ELETRORAS – Centrais Elétricas Brasileiras S/A

GP – Girau do Ponciano

GWEC – Global Wind Energy Council

LIA – Local de Instalação do Aerogerador

L_i – Limite Inferior

L_s – Limite Superior

MD – Modelo Desenvolvido

MG – Maragogi

MO – Modelo Original

OBS – Observado (dados)

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico

PVPN – Previsão de Ventos para Parques Eólicos do Nordeste Brasileiro

RT – Roteiro

WAsP – Wind Atlas, Analysis and Application Program

WRF – Weather Research and Forecasting

Z₀ – Comprimento de Rugosidade Superficial

u* – Velocidade de Fricção

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	
2.1 VENTO, VARIABILIDADE E CIRCULAÇÃO GERAL ATMOSFÉRICA.....	16
2.2 CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA (CLA).....	17
2.3 ENERGIA RENOVÁVEL.....	18
2.3.1 Energia Eólica	18
2.3.2 Aspectos Mundial e Nacional.....	19
2.3.3 Nordeste Brasileiro.....	19
2.3.4 Alagoas.....	20
2.4 ESTIMATIVA E EXTRAPOLAÇÃO DO VENTO.....	20
2.5 PARÂMETROS AERODINÂMICOS.....	23
2.5.1 Comprimento de Rugosidade Aerodinâmica (Z_0).....	23
2.5.2 Velocidade de Fricção (u^*).....	26
2.6 LEI DA POTÊNCIA E SISTEMA DE CONVERSÃO.....	27
3 MATERIAIS E MÉTODOS	
3.1 DADOS E REGIÃO DE ESTUDO.....	30
3.2 FILTRAGEM DOS DADOS.....	35
3.3 CÁLCULO DO COMPRIMENTO DE RUGOSIDADE (Z_0).....	35
3.4 CÁLCULO DA VELOCIDADE DE FRICÇÃO (u^*)	37
3.5 CÁLCULO DA SOMA DA ALTURA DO PLANO DO DESLOCAMENTO ZERO COM O COMPRIMENTO DE RUGOSIDADE ($d+Z_0$).....	38
3.6 MÉTODO ITERATIVO PARA OBTENÇÃO DO COEFICIENTE ALFA DA LEI DA POTÊNCIA (α).....	40
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	
4.1 ESTATÍSTICA DO VENTO.....	42
4.1.1 Velocidade.....	42
4.1.2 Direção	46

4.2 PARÂMETROS AERODINÂMICOS.....	50
4.2.1 Verificação do cálculo de “ $d+Z_0$ ”.....	52
4.3 COMPORTAMENTO ATÍPICO DO VENTO.....	55
4.4 ESTIMATIVA DO EXPOENTE DA LEI DA POTÊNCIA (α).....	58
5 CONCLUSÃO.....	61
REFERÊNCIAS.....	62

1. INTRODUÇÃO

O vento é uma das variáveis meteorológicas mais importantes, responsável pelo transporte horizontal de calor latente (calor de transformação) e calor sensível (variação de temperatura). Sua confluência, em níveis mais baixos, gera transporte vertical do ar para níveis mais elevados da atmosfera e chuva sobre uma região. Além disso, também é responsável pela difusão e transporte de poluentes na atmosfera (SILVA, 2016). Vale salientar a sua importância no setor de transporte, engenharia civil, agricultura, etc.

O conhecimento do vento e dos parâmetros aerodinâmicos são de suma importância para o setor de energia eólica. Assim, com a crescente demanda energética mundial ocasionada pela melhoria nos padrões de vida, preocupações eminentes com as políticas de planejamento energéticos são necessárias, sendo este um dos tópicos de maior importância na atualidade (MARTINS et al., 2008).

No Brasil, a geração de energia elétrica é feita basicamente a partir de centrais hidroelétricas (CARNEIRO, 2014). A geração eólica vem crescendo a cada ano e atualmente, em capacidade Global instalada acumulada apenas em 2017, o Brasil já ocupava a oitava posição com 12,7 GW (GWEC, 2018). O Nordeste é a região brasileira que apresenta maior parte dos parques eólicos em atividade atualmente, a capacidade instalada de usinas eólicas por subsistemas atualmente chegam a 9,6 MW (ONS, 2018).

O estado de Alagoas, já apresentava bom potencial para as atividades eólicas com os estudos que elaboraram o Atlas Eólico de Alagoas, para áreas com ventos equivalentes ou superiores a $7,0 \text{ m.s}^{-1}$. Na altura de 100 metros o potencial chega a 649 MW. Além de vários estudos envolvendo extrapolação do vento e potencial eólico feito em suas mesorregiões (ELETROBRÁS, 2008).

A caracterização do potencial eólico de uma região requer o conhecimento da estrutura do vento, e os fatores a afetam são de suma importância. Além disso, é necessário também o conhecimento das grandezas físicas que são utilizadas para se caracterizar os recursos eólicos. O potencial eólico da região está diretamente ligado à localização geográfica, relevo, rugosidade do solo e microclima, podem afetar no regime e escoamento dos ventos naquela região, interferindo no potencial e produção (MARTINS et al., 2008).

Uma vez detectado o potencial de uma área, a elaboração do projeto do(s) parque(s) eólico(s) necessita, entre outras coisas, da estimativa da velocidade do vento em cada um dos

locais onde serão instalados os aerogeradores (LIA). Neste contexto, se faz cada vez mais necessário o desenvolvimento de uma metodologia para a previsão de energia eólica de curto prazo adequada ao território brasileiro.

Para fazer esta estimativa é necessário um amplo conhecimento das características da superfície, principalmente dos parâmetros aerodinâmicos principalmente do comprimento de rugosidade (Z_0). Os parâmetros aerodinâmicos são de grande importância para o aproveitamento eólico. O fato é que os referidos parâmetros são indispensáveis quando se pretende, por exemplo, estimar a velocidade do vento em determinada altura a partir de um valor e uma altura conhecida. Por exemplo, de posse de dados medidos a 50 m estimar o vento a 100 m. Mais importante ainda seria, além de obter estes parâmetros, poder acompanhar a sua variação sazonal principalmente em locais onde são cultivadas plantas de porte alto como milho, cana-de-açúcar, etc.

Quando é necessário fazer a extrapolação vertical da velocidade do vento é comum utilizar a lei da potência, que pode variar com altura, período do dia, estações do ano, terreno entre outros (CAMELO *et al.*, 2010). Neste modelo, as características da superfície são representadas pelo expoente da equação (α).

O objetivo deste trabalho é tentar desenvolver uma metodologia para melhorar a estimativa da velocidade do vento a partir de dados de torres anemométricas através do aperfeiçoamento da determinação dos parâmetros aerodinâmicos (d , Z_0) e do expoente da Lei da Potência (α).

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 VENTO, VARIABILIDADE E CIRCULAÇÃO GERAL ATMOSFÉRICA

A origem dos ventos está diretamente ligada ao aquecimento das massas de ar próximas a superfície. O sol, fonte única de radiação solar, aquece de forma desigual a diferentes tipos de superfície, devido as mesma serem constituídas de materiais diferentes com capacidade de absorver e refletir radiação de formas distintas. O ar próximo a essas superfícies apresentam diferentes temperaturas, ocasionado os movimentos advectivos e convectivos do ar. Numa região de temperatura mais elevada, a pressão atmosférica será menor, pois a massa ar que se encontra naquela região, irá tornar-se mais leve e, por conseguinte eleva-se para níveis mais elevados da atmosfera (movimento convectivo) (SILVA, 2016).

Após a ascensão do ar, logo em seguida as massas de ar que não ascenderam devido a sua densidade (mais vapor d'água) ocupam o espaço que foi deixado pelo ar menos denso, a esse movimento, dá-se o nome de vento. O movimento advectivo do ar dá-se sempre de uma zona de alta pressão para uma de baixa pressão atmosférica. A magnitude do vento se dá quando, as isotacas (linhas de mesma intensidade do vento) maior será a variação gradativa de pressão, tornando o vento mais intenso. Os gradientes de pressão se desenvolvem tanto em escala global quanto local (BERNARDO e MOLION, 2000).

A variabilidade do vento ocorre através dos fenômenos de escalas temporal e espacial. Na escala de temporal diária estão relacionados os sistemas de circulação em escala local. Os Ventos locais estão envolvidos com as brisas (marítima e terrestre), aos ventos anabáticos, que transportam ar devido o aquecimento por insolação da montanha ou encosta e ventos catabáticos, que transportam o ar uma elevação descendo a encosta devido à ação da gravidade. Os Ventos globais vão desde o Equador até os polos e estão agregados às células de Hadley, Ferrel e Polar, que são constituídas devido a dinâmica da movimentação das massas de ar a nível global (SANTOS et al., 2004).

Os Ventos globais vão desde o Equador até os polos e estão agregados às células de Hadley, Ferrel e Polar, que são constituídas devido à dinâmica da movimentação das massas de ar a nível global. A Circulação Geral depende do transporte de massas de ar pela advecção do vento. São movimentos atmosféricos que ocorrem com finalidade de manter o balanço de energia da Terra, através da distribuição de calor (SILVA, 2003).

Ainda segundo Silva (2003), o sol é a maior fonte de calor para esses movimentos atmosféricos. O calor é absorvido pela atmosfera em baixas latitudes (30° N e 30° S) enquanto que em outros lugares a absorção é menor. O calor de regiões com temperaturas elevadas como o Equador é levado para regiões em que há uma maior necessidade, como os polos, havendo assim maior distribuição de temperatura.

Ocorre em escala espacial e temporal, da menor (microescala) com fluxo de momentum, calor e superfície, como também em escala maior (sinótica) com os sistemas sinóticos com quilômetros de extensão (RAMOS (2012) apud AYOADE (1998)).

2.2 CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA (CLA)

A CLA é a parte da troposfera que esta diretamente ligada à superfície terrestre (com altura de 1 km), onde ocorre uma significativa troca de momentum, calor/energia e massa e responde as forçantes superficiais numa escala temporal de uma hora ou menos (STULL, 1988).

A CLA ou CLP (Camada Limite Planetária) desempenha um importante papel umidade, calor e fluxo de ar para a atmosfera livre (MEHTA et al., 2017). Os processos de interesse incluem poluição turbulenta do ar, meteorologia agrícola, hidrologia, mistura na ABL, particularmente o papel da meteorologia aeronáutica, meteorologia de mesoescala, fotoquímica, previsão do tempo e clima, entre outros (GARRAT, 1994).

Caracteriza-se por três camadas estruturais: Camada Limite Superficial (CLS) onde há maior influência do cisalhamento do vento, Camada de Mistura e Camada de Transição ou Zona de Entranhamento (KAIMAL et al., 1976).

A CLA apresenta grande variação, compondo ciclos diurnos e noturnos. No ciclo diurno devido ao aquecimento, o ar próximo a superfície torna-se mais quente em relação a atmosfera, fazendo com que o ar ascenda com facilidade e transporte com mais facilidade o calor sensível de baixos para altos níveis da atmosfera, produzindo turbulência térmica, caracterizada por Camada Limite convectiva (CLC) (MARONEZE, 2014) .

De acordo com Fedorovich et al., (2004), a CLC é um tipo particular de camada forçada pelo fluxo vertical intenso do ar devido ao aquecimento da superfície terrestre, no seu topo (pelo resfriamento radiativo de nuvens) ou em ambos.

Nos primeiros minutos após o pôr do sol, quando a temperatura cai, a turbulência também cai e o que resta é apenas uma camada de ar, chamada Camada Residual (GUERRA,

2008). No ciclo noturno, devido ao resfriamento radiativo da superfície, o ar próximo a superfície torna-se mais frio, o ar em altos níveis atmosféricos, torna-se mais quente. A turbulência nessas condições torna-se menos evidente devido ao fluxo de calor negativo, se mantendo apenas por forçantes mecânicas, formando o que se caracteriza por uma Camada Limite Estável (MAGNAGO, 2002).

2.3 ENERGIA RENOVÁVEL

A energia tornou-se importante para existência e desenvolvimento do ser humano, um dos recursos mais essenciais que se pode dispor. Em termos econômicos, a eletricidade permitiu o crescimento da produção industrial, a criação de novas tecnologias e de novos empregos (SILVA, 2016).

Energia renovável é aquela que possui a capacidade de regeneração (renovação), ou seja, não se esgota. São recursos que são fornecidos e reabastecidos pela natureza através do sol, vento, chuva, marés entre outros. Como exemplos de energia renovável, podemos citar: energia solar, energia hidráulica (dos rios), biomassa (matéria orgânica), geotérmica (calor interno da Terra) e mareomotriz (das ondas de mares e oceanos) e por fim a energia eólica (dos ventos) (SILVA, 2016).

As energias renováveis ressurgiram a partir da crise do Petróleo da década de 70. De um lado, o conflito de garantir a variedade e segurança na distribuição de energia e, por outro lado, a preocupação de proteger o meio ambiente, onde a degradação é evidente pelo uso de combustíveis fósseis, estímulo para o interesse pelas fontes renováveis (CASTRO, 2004).

2.3.1 Energia Eólica

Existem várias alternativas para produção de energia através de fontes renováveis e de pequeno impacto ambiental. Neste contexto, a energia eólica, que está ligada diretamente aos ventos, vem tornando-se de suma importância, sobretudo pela crescente demanda energia no planeta e o aproveitamento por fontes de energias renováveis, tem sido adotada como parte da solução do problema de suprimento energético e apresentou um crescimento muito grande (LYRA et al., 2014).

Eólica é a energia cinética presente nas massas de ar em movimento (vento) e seu aproveitamento ocorre por meio da conversão da energia cinética de translação em energia

cinética de rotação, com o uso de turbinas eólicas (aerogeradores) para a geração de energia elétrica (ANEEL, 2002).

2.3.2 Aspectos Mundial e Nacional

Segundo o GWEC (Global Wind Energy Council) (2018), atualmente a energia eólica é a mais competitiva tecnologia em desenvolvimento no mercado, competindo até mesmo com os tipos de energia tradicionais. O gerenciamento de redes de armazenamento cada vez mais refinadas e acessíveis, fazem do setor de energia, uma tecnologia inteiramente livres de combustíveis fósseis. Foram acrescentado mais de 52 GW de energia eólica em 2017, no total de 539 GW global.

Ainda, segundo o GWEC, o mercado norte-americano deverá permanecer forte até 2020, o Brasil continuará a dominar os mercados da América Latina, junto com um novo concorrente, a Argentina. Na África e na Ásia, o mercado continuará crescendo, mas continuará tendo com líder global a China. Nas projeções de mercado para o período de 2014-2018, o Brasil apresentará um crescimento ainda maior, liderando a performance da América Latina, e passará a integrar, em termos mundiais, um dos dez maiores países produtores de energia eólica.

2.3.3 Nordeste Brasileiro

A energia elétrica que é consumida no Nordeste Brasileiro, por muito tempo vem sendo através de hidroelétricas. A Companhia Hidroelétrica do São Francisco (CHESF) tem grande papel como empresa geradora de energia no Nordeste, e é a principal proprietária das grandes hidrelétricas da região. Mas últimos anos, com reservatórios de água em níveis críticos, o Nordeste brasileiro está vivendo de vento. Outras alternativas para produção de energia vêm ganhando espaço e notoriedade na matriz energética da região, além da hídrica, a eólica passou a fazer parte do subsistema da região (BEZERRA E SANTOS, 2017).

Ainda segundo Bezerra e Santos (2017), o gráfico de Evolução da participação das fontes hidráulica, térmica e eólica na matriz de geração elétrica do Subsistema Nordeste, a energia eólica apresenta uma média anual de 36,5 %, ainda maior que a térmica (34,1%) e hídrica com apenas 29,5%. Embora as hidrelétricas sejam mais acessíveis no Nordeste, essa

fonte de energia pode se esgotar a qualquer momento, o que faz com que outras fontes, como a energia eólica principalmente, seja incrementada aos poucos no cenário elétrico da região.

Os estados que geram energia eólica no Nordeste são: Rio Grande do Norte (RN), Bahia (BA), Ceará (CE), Piauí (PI), Pernambuco (PE) e Maranhão (MA). No último boletim, lançado em abril de 2018, RN liderava com 3,5 MW de potência instalada, em segundo vinha Bahia com 2,4 MW, e Ceará em terceiro com 1,6 MW (ONS, 2018).

2.3.4 Alagoas

De acordo com o Atlas Eólico do Estado de Alagoas (ELETROBRÁS, 2008), o estado apresenta potencial eólico propício (336 MW a 75m de altura, para áreas com ventos equivalentes ou superiores a $7,0 \text{ m.s}^{-1}$) e poderá ser aproveitado nos limites de inclusão do sistema elétrico regional.

A construção de um parque eólico em uma determinada área requer estudos que possam comprovar o potencial eólico para que haja certa segurança no investimento, uma vez que a geração de energia irá depender quase que exclusivamente do vento. Para a avaliação da área que se planeja fazer um parque eólico, é preciso que muitos estudos sejam feitos no local, tanto estudos de caráter climatológico do regime dos ventos quanto de potencial eólico, como por exemplo, mapeamento (JERVELL, 2008).

2.4 ESTIMATIVA E EXTRAPOLAÇÃO DO VENTO

A inserção segura e econômica dos recursos eólicos ao sistema elétrico está ligada a previsões confiáveis da disponibilidade dos recursos eólicos (CEPEL, 2015). Na concepção de tais previsões, pode-se mencionar uma grande diversidade de técnicas, entre os quais se destacam o método de estimativa e extrapolação do vento. Neste tópico foram apresentados os autores e seus respectivos trabalhos com a utilização de estimativa do vento e estatística.

Em seu estudo para avaliação do Modelo WRF na previsão do vento para a Região Central de Alagoas (Craíbas), Silva et al., (2018) desempenhou bons resultados com as ferramentas estatística para extrapolação do vento observado, para fins de aproveitamento eólico em conjunto com dados simulados pelo WRF. Usando dados de velocidade e direção do vento da Torre Anemométrica da área de estudo no nível de 50m. A metodologia estatística usada mostrou bons resultados dessa avaliação do modelo e estimou bem as médias

mensais e diárias da velocidade do vento. Os desvios foram maiores nos meses secos (0,66 m.s-1) do que nos meses chuvosos. Ao longo de todo o ano a diferença média (WRF – OBS) foi de apenas 0,23 m.s-1 (6,14 m.s-1 versus 5,91 m.s-1), provando que este modelo é uma ótima ferramenta para previsão do vento para fins de aproveitamento eólico, quando utilizado junto a modelos estatístico de boa precisão.

Cruz (2017) estudou os padrões diários do vento e suas particularidades com ênfase no aproveitamento eólico na região central de Alagoas (Craíbas) de abril de 2014 a março de 2015. Foram utilizados dados de velocidade e direção do vento dos três níveis de uma Torre anemométrica da área de estudo (50,70,100m) para analisar o escoamento do vento e influencia das rajadas em regiões vizinhas. Foi utilizado também análise com o WASP e a análise estabilidade foi feita através do número de Richardson (Ri) e Classificação de Pasquill-Girford-Turner. Também foram calculados os parâmetros de Weibull. Os resultados mostraram velocidade média mensal a 100m foi de 6,73 m.s-1. A velocidade média anual foi de 5,87 m.s-1 a 50m e 6,25 m.s-1 a 70m. Atmosfera foi predominantemente instável (49%), com 31% de estabilidade e 20% neutra. Quanto aos Parâmetros de Weibull, que resultou em velocidade média de 6,72 m.s-1, o parâmetro “k” de 3,45 e “A” equivalente a 7,5 m.s-1, comprovando assim que Craíbas é uma área propícia ao aproveitamento e atividade eólica.

Moura et al., (2013) utiliza simulação de vento feita por modelo, para a cidade alagoana de Palmeira do Índios, onde foram comparadas saídas do modelo WRF com esquemas de parametrizações (PA e PB) para comparar com os dados observados do INMET. Mostrou que com o esquema PA o WRF conseguiu simular a direção do vento, mas em PB a velocidade teve valores parecidos com o observado. Por fim, a parametrização PA mostrou-se melhor para simular a direção do vento, e PB mostrou-se melhor em simular a velocidade e direção predominante do vento.

Ihadua et al., (2013), utilizou em seu estudo a fim de avaliar os padrões estatísticos do vento também nas três regiões do estado de Alagoas de maior destaque de potencial eólico, Água Branca (Sertão), Girau do Ponciano (Agreste) e Roteiro (Litoral). A análise foi baseada na distribuição de Weibull e rosas do vento calculado no WASP com dados observados e previstos pelo modelo WRF. Os resultados mostraram pouca variabilidade do vento e direções predominantes (de Sudeste e Leste-Nordeste) em Girau do Ponciano e Roteiro. Em água Branca a direção predominante foi apenas de Sudeste. Verificou ainda que os parâmetros de Weibull podem ser utilizados para a validação do modelo WRF, em regiões com ausência de dados. Por fim, constatou que o modelo WRF apresentou bom desempenho

na determinação dos padrões do vento, indicando potencial eólico favorável para o interior de Alagoas.

Tendo em vista a importância da descoberta do potencial eólico em Alagoas, Ramos et al., (2011) com o objetivo de validar a velocidade do vento do modelo atmosférico WRF (Weather Research and Forecasting Model) V3.2, obtida pelo perfil logaritmo do vento usando a velocidade de fricção simulada do próprio modelo, constatou que o WRF conseguiu representar de forma satisfatória os padrões e intensidades dos ventos em ambas estações chuvosa e seca, reforçando a larga aplicação deste modelo para estudos da área eólica.

Com intuito de identificar áreas com potencial mais propício para a atividade eólica, Costa e Lyra (2012), fizeram um estudo onde comparavam os dados de velocidade e direção do vento, medidos e registrados por Torres anemométricas presente em três regiões: litoral, agreste e sertão. Os resultados mostraram que o Agreste e o sertão são as áreas mais propícias para o aproveitamento eólico, pois apresentaram ventos com pouca variabilidade na direção seguido do litoral. Comprovando também que as maiores velocidades se encontram no interior do estado (sertão e agreste) por serem regiões elevadas.

A partir desse ponto, Ramos (2012) faz um estudo relacionado ao mapeamento eólico no estado, onde foram utilizadas ferramentas computacionais e dados observados. O estudo foi feito para seis sítios experimentais, onde estão distribuídas as seis torres anemométricas relativas aos dados usados em seu trabalho, em três mesorregiões: Agreste (Girau do Ponciano e Palmeira dos Índios), Sertão (Água Branca) e Litoral (Feliz Deserto, Roteiro e Maragogi). Os resultados deste estudo mostraram que uma das ferramentas computacionais (WRF) apresentou um bom potencial eólico anual (7 m.s-1 a 9 m.s-1 de magnitude). Já os resultados do segundo modelo usado, WASP (Wind Atlas Analysis and Application Program), apresentou uma boa semelhança aos mapas do Atlas Eólico do Estado de Alagoas. Seus estudos concluem que esses modelos apresentaram bons resultados, com a adição de alguns ajustes, mas a relevância de seu uso para estudos de potencial eólico na região é válida.

2.5 PARÂMETROS AERODINÂMICOS

2.5.1 Comprimento de Rugosidade Aerodinâmica (Z_0)

O movimento do ar como as turbulências em seu fluxo, são fortemente influenciadas pela rugosidade da superfície. Esta propriedade física nada mais é do que o efeito da característica da superfície terrestre, como o relevo e a presença de obstáculos físicos que levam redução da velocidade dos ventos (MARTINS et al., 2008).

Além dos efeitos sob o escoamento do ar, a rugosidade da superfície, também gera impactos no comportamento do turbulento que advém das interações superfície-atmosfera. Ainda segundo Martins (2008), outro aspecto a ser considerado com relação ao comportamento do vento, está relacionado ao cisalhamento do vento.

No processo de definição dos processos de transporte turbulento, é importante ter um conhecimento sobre esses parâmetros de rugosidade de superfície (LYRA, 2007).

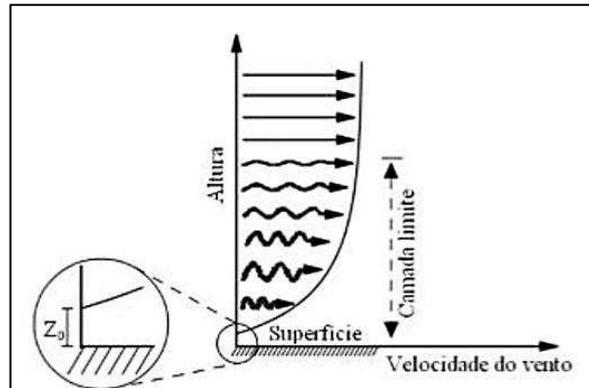
Blumberg e Greeley (1993), afirmam a importância do estudo o comprimento de rugosidade aerodinâmica na eólica e nos processos da camada limite. O comprimento de rugosidade aerodinâmica (Z_0), consiste na altura em que o vento, próximo à superfície, assume valor zero, sendo dependente do relevo e obstáculos da superfície.

Segundo Stull (1988) tem relação com a medida da turbulência, que por sua vez é estabelecida através da interação superfície-atmosfera e a sua aptidão em absorver momentum. É proporcional, mas geralmente inferior à altura dos elementos de rugosidade, e não deve variar com a velocidade ou direção do vento.

Geralmente, o termo Z_0 é proveniente dos perfis de velocidade do vento dentro da camada limite superficial (CLS). O comprimento de rugosidade aparece explicitamente na equação da lei logarítmica do vento (Equação 3) (SAATEHI and RODRIGUEZ, 1990).

A camada limite superficial consiste em uma subcamada da camada limite planetária (região situada entre a superfície terrestre e uma altitude de aproximadamente), sendo que está não excede 150 m de altitude, medido a partir da superfície terrestre e onde atua forte gradiente vertical de vento, umidade e temperatura (STULL, 1988 apud LIRA, 2009). Ademais, na camada limite superficial, o módulo da velocidade do vento é caracterizado por perfil vertical aproximadamente logarítmico (figura 1), onde Z_0 é a altura em que o vento começa a soprar de acordo com a característica da superfície, no entanto quanto mais elevado for o terreno, maior será o Z_0 .

Figura 1 – Perfil vertical da velocidade do vento. O comprimento da rugosidade (Z_0) é a altura onde a velocidade é nula.



Fonte: Lira, (2009).

A equação 1, descreve a lei logarítmica para o perfil do vento que se encontra sobre uma vegetação em condições de atmosfera neutra (BRUIN and MOORE 1984, *apud* MONIN and YAGLOM, 1971).

$$u(z) = \frac{u^*}{k} \ln \frac{z-d}{z_0} \quad (1)$$

Onde a velocidade horizontal do vento em altura z é dada por $u(z)$, u^* é a velocidade de fricção, k é constante de Von Karman, d é o deslocamento do plano zero e Z_0 , o comprimento de rugosidade (BRUIN and MOORE, 1984).

Apesar de ter grande pertinência para estudos climáticos e análise de interações atmosféricas da terra-superfície, os dados e instrumentos para obtenção da rugosidade aerodinâmica, ainda são limitados (SAATCHI and RODRIGUEZ, 1999).

Relativo a esta questão, é importante ressaltar trabalho de Lyra e Pereira (2007), onde foi feito um estudo das dificuldades de estimativa dos parâmetros de rugosidade aerodinâmica (Z_0) pelo método convencional (estatístico) sobre vegetação esparsa em região semi-árida. Neste estudo foi estimado, o (Z_0) e o deslocamento do plano zero (d), que é somente usando situações envolvendo vegetação, por alguns métodos com medidas Micrometeorológicas e da cultura física de arbustos esparsos em região semiárida. Sendo a velocidade do vento medida em quatro alturas acima da superfície. Os resultados mostraram certa restrição em obter esses parâmetros sobre esse tipo de vegetação em atmosfera neutra, através desse método convencional.

Ainda envolvendo cobertura vegetal, Toledo Filho et al., (2003) implementou em seu estudo, o Z_0 , numa área de 12,5 ha de cultivo contínuo de cana-de-açúcar, sob condições de

lavouira comercial, na Fazenda de Vila Nova, município de Pilar, Alagoas. O objetivo do trabalho consistiu no ajuste dos parâmetros aerodinâmicos da cultura, Z_0 e o deslocamento do plano zero (d), que foram determinados a partir de perfis do vento em condições de atmosfera neutra (Perfil Logaritmo do Vento) relacionados com a altura do dossel. Os resultados encontrados evidenciam que os parâmetros aerodinâmicos da altura da cana-de-açúcar podem ser estimados em função da altura do dossel vegetativo parametrizado neste trabalho, onde foram obtidos os valores $d+Z_0= 1,60$ m, um resultado satisfatório, tendo em vista que em uma altura mínima a influência da superfície e seus obstáculos sobre o vento também será mínima.

Em lugares de difícil acesso a informações meteorológicas, a inclusão de ferramentas de estudos é muito importante, como por exemplo, o Sensoriamento Remoto (SR). Pereira et al. (2013), fez aplicação de SR as estimativas do comprimento de rugosidade superficial, para 10 cidades do Estado de São Paulo, usando dois métodos: Morfométrico e Micrometeorológico. Foram comparadas estimativas de rugosidade feitas por imagens de alta resolução nos 10 locais onde as torres anemométricas estavam instaladas (Morfométrico), com as obtidas através de método anemométrico (micrometeorológico). Os resultados indicam que SR se mostrou útil para estimar o comprimento de rugosidade, para diferentes coberturas de superfície. Embora a comparação entre os métodos não tenha mostrado similaridade entre os mesmos, o uso do SR ajudou a entender a variabilidade do vento observada em diferentes estações usadas nesse trabalho.

Sozzi et al., (1998), em seu estudo um dos objetivos era estimativa de um método para cálculo do comprimento de rugosidade (Z_0). Seus dados foram medidos através de um anemômetro ultrassônico e utilizando apenas um nível de medição (10 m). É feito nada mais que um procedimento iterativo onde os valores são inseridos como palpites de acordo com a literatura. O método usado não requer outros níveis de velocidade do vento, podendo utilizar dados medidos de um único anemômetro sônico na camada superficial sob qualquer condição de estabilidade, simplificando as campanhas de medição e reduzindo custos. O método fornecido obteve resultados positivos, confirmando assim a sua utilidade operativa.

Para Barthelmie et al., (1993), a escolha da técnica de como calcular o comprimento de rugosidade (Z_0) limitou-se apenas na disponibilidade dos dados de entrada. Em seu estudo foi utilizados vários comprimentos de rugosidade produzidos através de métodos variados calculados para o mesmo local a fim de avaliar seu impacto na previsão no Perfil Logarítmico do Vento. Os dados foram coletados em 4 alturas durante três anos para Sítio experimental no Norte de Norfolk. Os métodos usados para calcular os valores de comprimento de rugosidade

(Z_0) que foram avaliados em seu trabalho foram: a) método do Perfil; b) método do terreno; c) método de Rajada; d) método do desvio. Chegou à conclusão que os Métodos do perfil e do terreno são o que fornecem resultados semelhantes e os métodos de rajada e desvio padrão por sua vez, fornecem valores muito mais baixos. Destacando que o do Perfil apresentou boa estimativa se usada numa serie de dados de um mês.

2.5.2 Velocidade de Fricção (u^*)

Dentro da CLA, encontra - se a CLS, onde há maior influencia dos obstáculos relativos à superfície, com isso há maior cisalhamento vertical do vento e a fricção com a superfície influencia no escoamento do vento. A medida da intensidade do cisalhamento vertical do vento é dada pela velocidade de fricção. A velocidade de Fricção do vento aparece, portanto como um aspecto significativo na caracterização do potencial eólico de uma região, tendo em conta que se trata de um parâmetro que varia com a rugosidade do terreno (MARTINS et al., 2008).

Para representar de forma empírica e teórica a variação da velocidade vento na vertical em uma camada limite turbulenta uma expressão logarítmica foi desenvolvida por Prandtl, conforme mostra a equação que se segue (LIRA, 2009):

$$\mathbf{u}(z) = \frac{u^*}{k} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad (2)$$

Segundo a equação 2, a variação da velocidade com a altura vertical z (u_z), é dada em função da velocidade de fricção (u^*), da constante de Von Karmán (k), e do comprimento de rugosidade (Z_0).

Diante a importância da determinação deste parâmetro, encontram-se na literatura muitos estudos que abordam diversas formas para sua obtenção, tanto pela estimativa por meio de medidas reais, com estudos através de modelos. Dentre eles podemos citar Roballo e Fisch (2008), que usaram dados coletados através de sensores de direção e velocidade do vento, instalados em uma Torre Anemométrica (com seis níveis de medidas: 6, 10, 16,3, 28,5, 43 e 70 m), no período de 1995-1999, situada a 200 m da costa litorânea, posicionada próximo à rampa de lançamento de foguetes. Sendo que além desses dados, os autores utilizaram um conjunto de dados referentes ao período de 2004-2005 para análises de validação. Foram utilizados para os cálculos a velocidade de fricção (u^*) e o comprimento de

rugosidade (Z_0). Os resultados mostraram os valores de u^* e Z_0 para os meses secos e chuvosos, mostrando a sazonalidade destes parâmetros.

Outro estudo que merece destaque é o realizado por Ramos et al. (2012), que usaram o método de extrapolação vertical do Perfil Logarítmico do vento para a menor altura das medições da intensidade do vento, 30 m. O estudo foi realizado para o Estado de Alagoas, mas especificamente em Girau do Ponciano, Região Agreste do estado. A aplicação deste método foi feita de modo a considerar que a atmosfera possui um regime de estabilidade neutra. Para este estudo, foram também utilizados a velocidade de fricção (u^*) e o parâmetro de rugosidade (Z_0). Onde o valor de (u^*) foi determinado através do modelo WRF (Weather Research and Forecasting), este método se mostrou eficaz na validação com dados anemométricos seja em período chuvoso ou seco, mostrou sazonalidade. O valor de (Z_0) foi atribuído para cada localidade investigada no trabalho citado.

Com objetivo de avaliar as estimativas da velocidade de fricção (u^*) feitas pelo modelo WRF, Silva et al. (2018), utilizou médias horárias de dados anemométricos do projeto PVPN, para confrontar com dados simulados pelo modelo WRF. Os valores foram calculados para os períodos seco e chuvoso da região, relativos ao ano de 2015. Com o método usado no trabalho para o cálculo, utilizando a equação principal de u^* , o modelo apenas superestimou 30%. Tanto nos valores de u^* observado, quanto nos valores de u^* simulados os máximos ocorrem a noite, indicando particularidade do regime de ventos na região de Craíbas.

2.6 LEI DE POTÊNCIA E SISTEMA DE CONVERSÃO

Para estudar a velocidade do vento, são usados dados que são medidos através de um anemômetro instalado em uma torre com determinada altura. Para o aproveitamento eólico faz-se necessário uma avaliação das velocidades em pelos menos três diferentes alturas. No Brasil, a legislação vigente exige o seguinte: 1) Parques eólicos interessados na comercialização de energia, terão de apresentar medições anemométricas de no mínimo 3 anos; 2) Estudos de micrositing, que traz diversas informações sobre o empreendimento, onde possibilita o posicionamento correto das turbinas para bom funcionamento do aerogerador.

Quando a medida do vento é feita em uma altura diferente da que vai ser instalada o rotor da turbina eólica, é preciso que seja feita uma conversão na velocidade do vento que foi medida, para que seja corrigida para a altura do rotor da turbina. Para isto, são utilizados dois

métodos de conversão: Lei da Potência (EUA) e Lei logarítmica (Europa) (DALMAZ, 2007). No entanto, essas leis não apresentam tanta precisão, uma vez que escoamentos turbulentos e definição de superfície são de caráter complexo (JERVELL et al., 2008).

A lei da Potência é definida pela equação (3), onde U_{z1} e U_{z2} , são as velocidades médias correspondente ao nível 1 (Z_1) e nível (Z_2), respectivamente. O coeficiente α representa a rugosidade dos diversos tipos de superfície. De acordo com Jervell et al., (2008), para o aproveitamento eólico, α é geralmente determinado através da velocidade do vento que é medido em duas alturas do solo, sendo aplicada a lei da potência nesses dados de vento, é o modelo mais simples e de fácil utilização.

$$\frac{U_{z1}}{U_{z2}} = \left(\frac{Z_2}{Z_1}\right)^\alpha \quad (3)$$

Já a Lei Logarítmica é definida pela equação (4), onde representa a variação de velocidade média com a altura z em torno de 100 m acima de uma superfície rugosa (LINARD, 2010).

$$v(z) = \frac{u^*}{k} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (4)$$

Em que u^* é a velocidade de atrito ($m.s^{-1}$), k é a constante de Von Karman, igual a 0,4 e Z_0 é o comprimento de rugosidade (m).

Kikumoto et al., (2017) fez um estudo observacional da aproximação da lei de potência de perfis de vento dentro de uma camada limite urbana, usando um sistema de lidar Doppler e um anemômetro ultrassônico, que foram usados para medir os perfis de vento e estatísticas de turbulência na camada limite urbana de Tóquio, Japão, no período de sete meses. A lei da Potência (LP) foi usada nesse estudo em modelagem para aproximar os perfis de vento medidos e foi discutida a precisão aproximada para várias condições de vento, especialmente em termos de velocidade do vento e tempo de média. Esta pesquisa discute os limites da aplicação do LP para perfis de vento em condições de baixa velocidade. A precisão da LP diminui para perfis com baixas velocidades e intervalos de tempo médios curtos, uma vez que, para velocidades de vento baixas, a diferença na direção do vento com a altura é significativa, tornando difícil determinar a direção predominante do vento e levantou a hipótese de que a LP poderia ter sido usada em perfis de vento com altas velocidades ($> 6 m.s^{-1}$).

Camelo et. al, (2010) utilizou métodos de Extrapolação da velocidade do vento para áreas litorâneas do nordeste Brasileiro, mas especificamente em Paracuru e Camocim, litoral

oeste do Ceará. Foram utilizados métodos de extrapolação que levassem dados de vento ao menor erro quadrático médio e o expoente da lei da Potência. Em seus resultados, o período em que a velocidade média do vento mostra os valores mais altos é a estação seca (para ambos os locais). Mostrando que essa estimativa tem importância significativa na geração de eletricidade.

Já no estudo de Roballo e Fisch (2006), foi feita uma análise das variações dos parâmetros meteorológicos que caracterizam o perfil logaritmo do vento na região do Centro de Lançamento de Alcântara (CLA). Utilizando dados da Torre Anemométrica localizada no CLA e a 50 metros da costa litorânea, seis níveis (com alturas de 6,0, 10,0, 16,3, 28,5, 43,0 e 70,0 metros). A análise do coeficiente alfa da Lei de Potência mostra pouca variação vertical e temporal situando, praticamente, no intervalo de 0,2-0,25 (adimensional). O conjunto de dados independentes foram validados com os valores de alfa, mostrou que o ajuste logarítmico é melhor nos níveis mais baixos e próximos do nível 2 (10,0 m), diminuindo a capacidade de representar as observações com a altura, uma vez que no nível 6 (70,0 m) apresentou valores próximos a 0,9.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 DADOS E REGIÃO DE ESTUDO

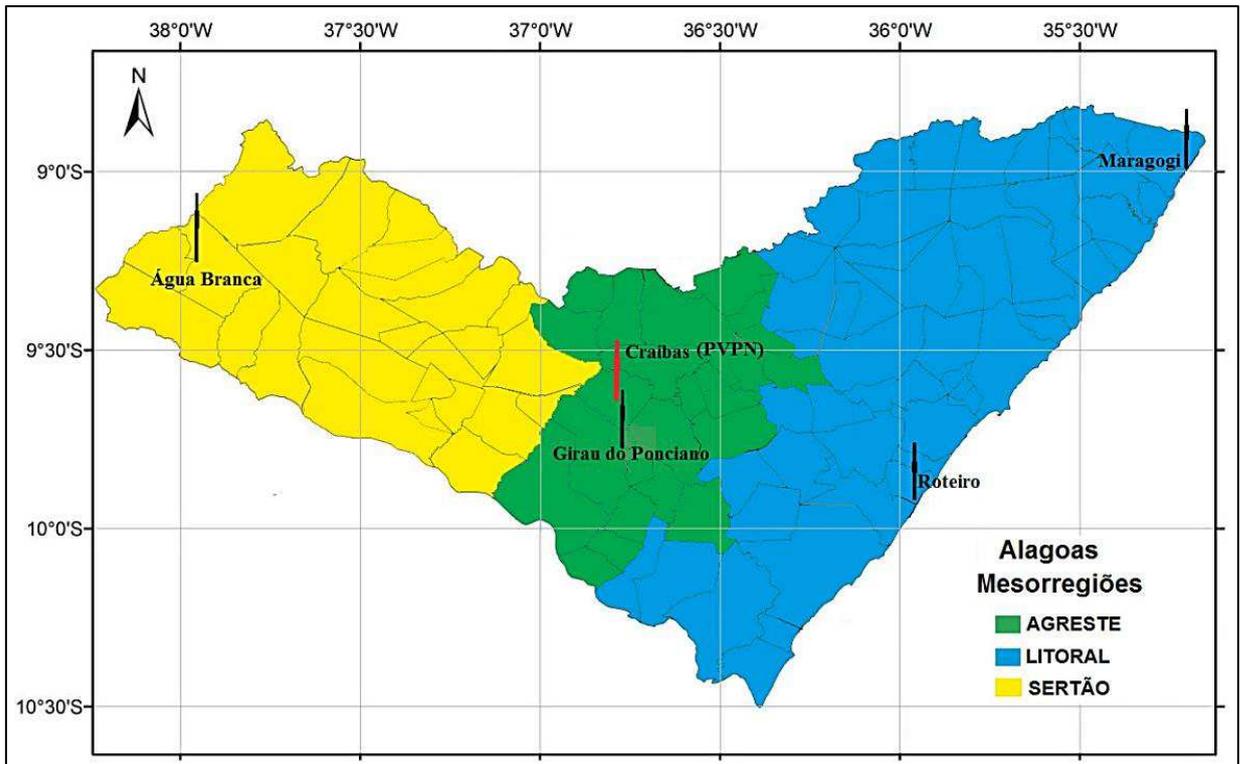
Os dados utilizados neste trabalho foram obtidos em duas campanhas experimentais em torres anemométricas de 50 e 100m de altura:

- Projeto Atlas Eólico e Disseminação da Tecnologia Eólica no Estado de Alagoas (ADT-AL), com medições em seis locais Água Branca (Sertão), Girau do Ponciano e Palmeira dos Índios (Agreste), Feliz Deserto, Maragogi e Roteiro (Litoral), entre 2007 e 2008;
- Projeto Previsão de Ventos para Parques Eólicos do Nordeste Brasileiro (PVPN) com medições em Craíbas entre dezembro de 2014 a 13 de janeiro de 2015.

A Figura 2 mostra onde está localizada fisicamente cada uma das cinco torres anemométricas no Estado de Alagoas. Duas na região Agreste Girau do Ponciano e Craíbas. No sertão, está a torre de Água Branca. E por fim as torres situadas no Litoral, nos municípios de Maragogi, e Roteiro.

No presente estudo foram utilizados dados do projeto ADT-AL, apenas para as localidades de Água Branca, Girau do Ponciano, Maragogi e Roteiro, por serem as únicas séries de dados que apresentavam 100% de disponibilidade. O período de estudo visa às estações do ano: Abril/08 (outono), Junho/08 (inverno), Outubro/08 (primavera) e Janeiro/09 (verão).

Figura 2 – Localização das Torres Anemométricas (TA) do Projeto ADT-AL (em preto) e do Projeto PVPN (em vermelho), destacando as três mesorregiões do estado de Alagoas.



Fonte: Autor, (2018).

Na Tabela 1 são apresentadas as coordenadas geográficas das 4 torres do projeto ADT-AL. Todas elas continham 50m de altura (Figura 3), com dois níveis de medição: 30m (velocidade) e 50m (velocidade e direção) . Uma descrição detalhada da instrumentação e aquisição de dados foi feita por (COSTA, 2009).

Tabela 1 – Localização das quatro TAs do projeto ADT-AL cujos dados foram utilizados neste trabalho.

Município	Coordenadas Geográficas
Água Branca	09°14'59,10"S; 37°56'33,29" O;
Girau do Ponciano	09°45'58,50"S; 36°47'06,43" O;
Maragogi	08°59'08,16"S; 35°12'02,16" O;
Roteiro	09°56'29,62"S; 35°58'32,66" O;

Fonte: Autor (2018), *apud* Ramos (2012).

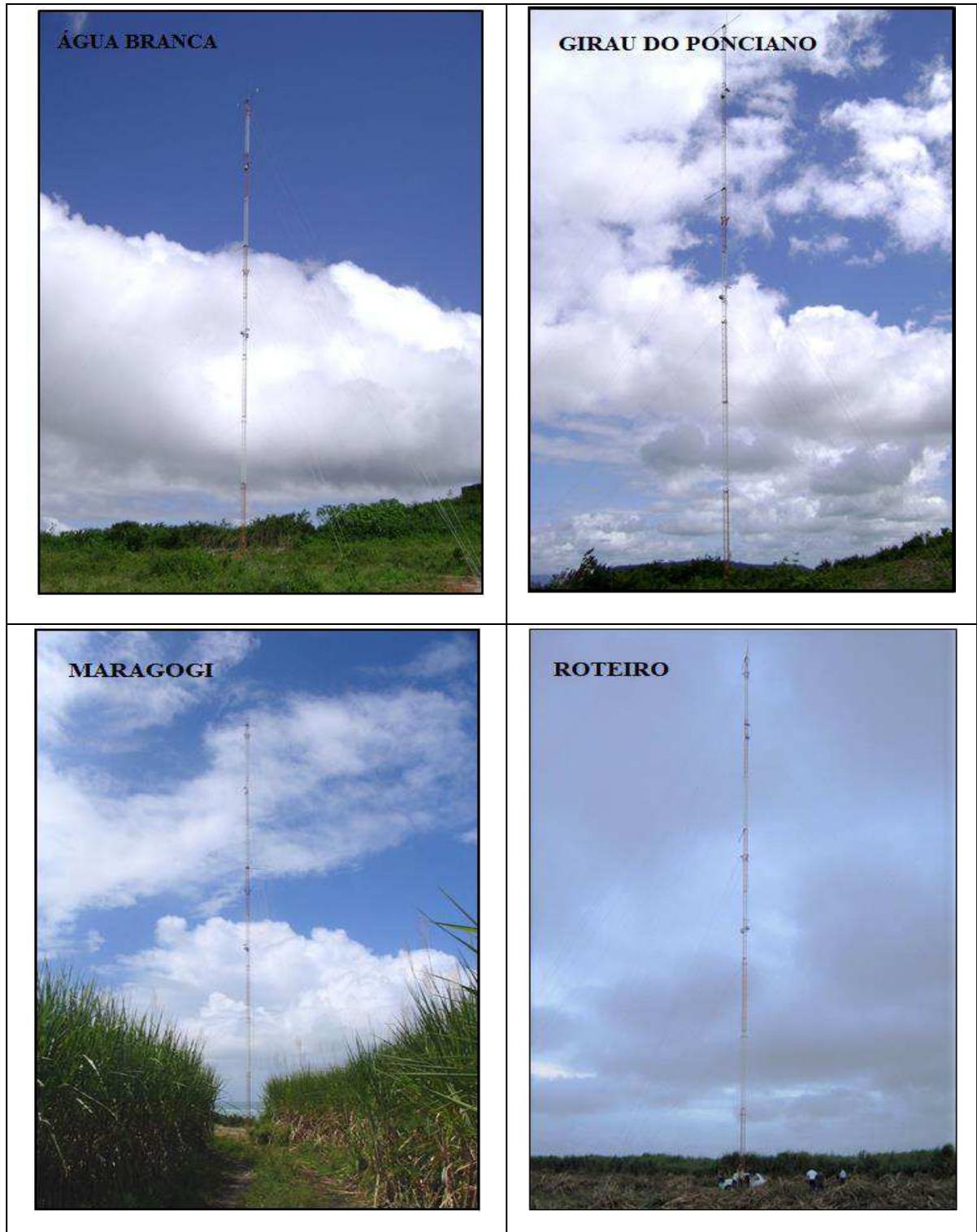
Os dados do Projeto PVPN foram utilizados, com objetivo de comprovar se o cálculo de comprimento de rugosidade (Z_0) pode ser feito em torres de altura superior (100m). A TA de 100m foi instalada no Município de Craíbas (09° 40' 03.4" S 36° 50' 40.2" W), que fica no agreste alagoano.

A região foi escolhida de forma alternativa, mas os estudos anteriores (SILVA et al., 2018; CRUZ, 2017; COSTA, 2009; RAMOS, 2012) apresentaram grandes resultados com essa região, além das características do terreno serem bem favoráveis às medições (topografia plana e com vegetação rasteira).

A TA tem oito níveis de medição (5,10,14,19,30,50,70 e 100 m) como mostra a Figura 4, e conta com um conjunto de medição (estação) próxima a torre, para medidas de alta frequência do vento, temperatura, umidade, fluxos turbulentos (calor sensível, latente e quantidade de movimento) e concentração de CO₂ e vapor d'água LYRA (2014).

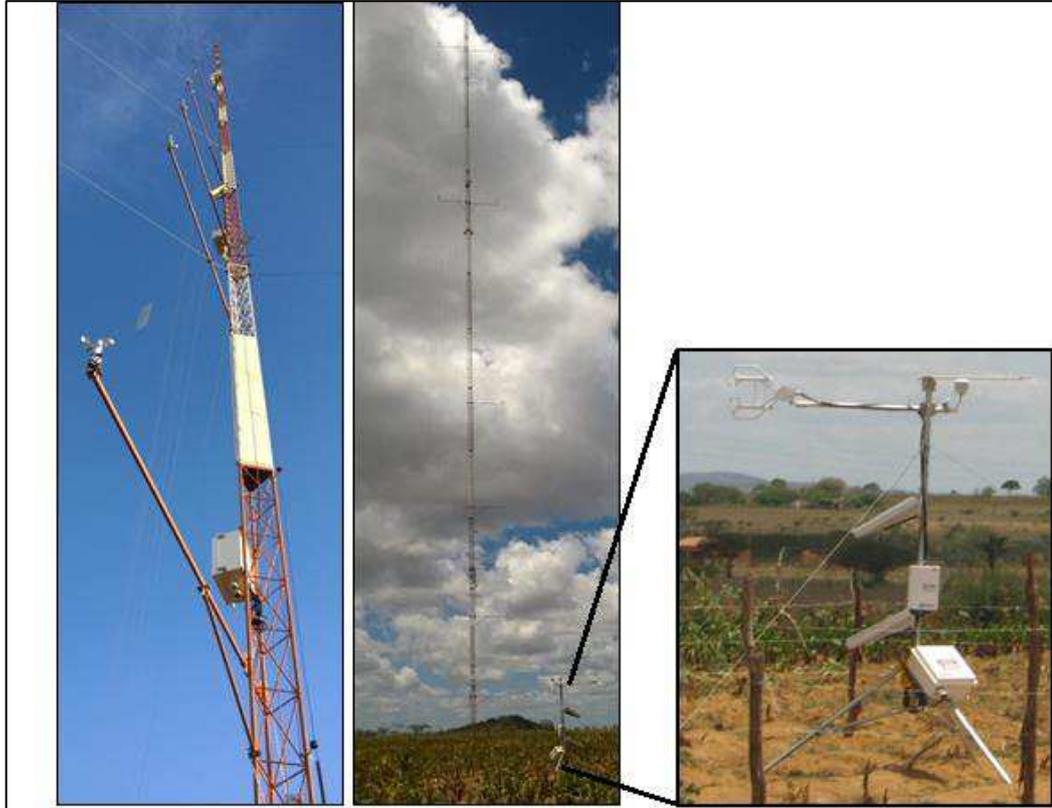
As medições da velocidade do vento utilizadas no presente trabalho foram feitas a cada 15 segundos e armazenadas em médias de 10 minutos em um datalogger CR1000 (Campbell Scientific Inc.- USA).

Figura 3 – Torres ADT-AL (Água Branca, Girau do Ponciano, Maragogi e Roteiro).



Fonte: Autor, (2018).

Figura 4 – Torre Anemométrica do Projeto PVPN em Craíbas e Conjunto de medição próxima a torre.



Fonte: Autor, (2018).

Na Tabela 2, encontram-se as especificações técnicas da instrumentação utilizada na torre anemométrica.

Tabela 2 – Sensores e anemômetros usados no sistema da TA.

Instrumentos	Fabricante	Modelo	País de Origem	Níveis (m)
Anemômetro	Campbell Scientific Inc.	A100LK-L150 A100LK-L210 A100LK-L300	UK	100, 70 e 50
Sensor de Direção do vento (Windwane)	Met One - Inc. Wind Direction	024A	USA	100, 70 e 50
Anemômetro/ Sensor de Direção do vento (Wind Sensor Set)	Met One - Inc.	034B	USA	30, 19,14,10 e 5

Fonte: Autor, (2018).

3.2 FILTRAGEM DOS DADOS

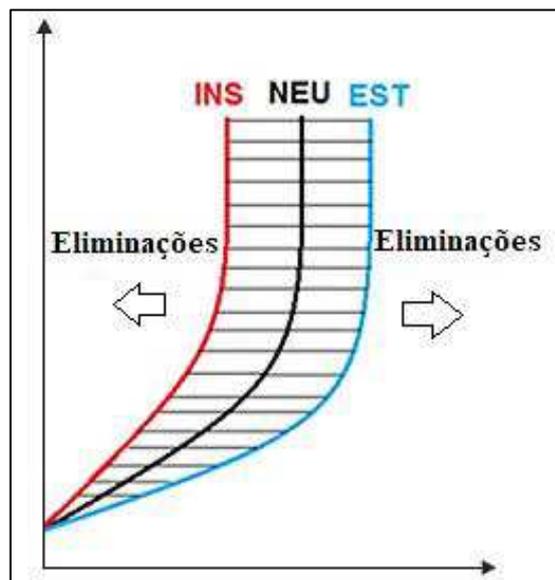
Para calcular os parâmetros aerodinâmicos foi usada como base a equação do perfil logarítmico do vento a qual parte do princípio que a velocidade aumenta com a altura. Perturbações no escoamento modificam o perfil do vento fazendo com que, em certas ocasiões, a o perfil do logarítmico não se verifique. Por conta disso, foram estabelecidos critérios para filtrar os dados antes dos cálculos eliminando as situações atípicas:

- I - Velocidade do nível inferior (U_1) igual ou superior a do nível superior (U_2);
- II - Atmosfera muito estável ($u^* \geq 0,56$);
- III - Atmosfera muito instável ($u^* \leq 0,24$).

Os valores limite para u^* foram estabelecidos tomando como base um percentual de 40% do valor padrão de u^* (0,4) que corresponde a 0,16.

No caso do critério I na realidade não existe perfil logarítmico, pois o vento ou permanece constante ou diminui com a altura. Nos casos dos critérios II e III é estabelecida uma faixa onde os valores acima ou abaixo dela são eliminados (Figura 5).

Figura 5 – Esquema de Perfil logarítmico ideal de acordo com os critérios exigidos na metodologia.



Fonte: Autor, (2018).

3.3 CÁLCULO DO COMPRIMENTO DE RUGOSIDADE (Z_0)

O cálculo foi feito através de uma equação desenvolvida a partir da equação do perfil logarítmico do vento (Equação 5).

$$u(z) = \frac{u^*}{k} \ln\left(\frac{z}{Z_0}\right) \quad (5)$$

$U(z)$ – Velocidade do vento na altura z ($m.s^{-1}$);

u^* – Velocidade de fricção ($m.s^{-1}$);

z_0 – Comprimento de rugosidade aerodinâmica (m);

k – Constante de *Von Karman* (igual 0,4 e adimensional);

z – Altura (m).

Partindo da equação 5 podemos obter as equações para cálculo da velocidade em qualquer altura. Por exemplo, para as alturas “ z_1 ” e “ z_2 ” as equações correspondentes serão:

$$u_1 = \frac{u^*}{k} \ln\left(\frac{z_1}{Z_0}\right) \quad (6)$$

$$u_2 = \frac{u^*}{k} \ln\left(\frac{z_2}{Z_0}\right) \quad (7)$$

Z_1 - altura correspondente aos níveis de medição 1 (m);

Z_2 - altura correspondente aos níveis de medição 2 (m);

u_1 - Velocidades do vento no nível 1 ($m.s^{-1}$);

u_2 - Velocidades do vento no nível 2 ($m.s^{-1}$);

Se dividirmos a equação 6 pela equação 7 teremos:

$$\frac{u(2)}{u(1)} = \frac{\frac{u^*}{k} \ln\left(\frac{Z_2}{Z_0}\right)}{\frac{u^*}{k} \ln\left(\frac{Z_1}{Z_0}\right)} \quad (8)$$

O termo u^*/k é eliminado na divisão, então:

$$\frac{u(2)}{u(1)} = \frac{\ln\left(\frac{Z_2}{Z_0}\right)}{\ln\left(\frac{Z_1}{Z_0}\right)} \quad (9)$$

Tendo em vista a propriedade do logaritmo (logaritmo do quociente), então:

$$\frac{u_2}{u_1} = \ln\left(\frac{z_2}{z_0}\right) - \ln\left(\frac{z_1}{z_0}\right) \quad (10)$$

Logo,

$$\exp\left(\frac{u_2}{u_1}\right) = \left(\frac{z_2}{z_0}\right) - \left(\frac{z_1}{z_0}\right) \quad (11)$$

$$\exp\left(\frac{u_2}{u_1}\right) = \frac{z_2 - z_1}{z_0} \quad (12)$$

Isolando z_0 na equação anterior teremos:

$$z_0 = \frac{z_2 - z_1}{\exp\left(\frac{u_2}{u_1}\right)} \quad (13)$$

3.4 CÁLCULO DA VELOCIDADE DE FRICÇÃO (u^*)

Se ao invés de dividir, subtrairmos as velocidades (u_2 e u_1), podemos obter o valor de u^* a partir da diferença entre elas nas duas alturas (Δu):

$$\Delta u = u_2 - u_1 \quad (14)$$

Substituindo u_1 e u_2 (equações 6 e 7). Teremos:

$$\Delta u = \frac{u^*}{k} \ln\left(\frac{z_2}{z_0}\right) - \frac{u^*}{k} \ln\left(\frac{z_1}{z_0}\right) \quad (15)$$

Baseado na propriedade do logaritmo (do cociente), podemos escrever:

$$\Delta u = \frac{u^*}{k} \ln\left(\frac{\frac{z_2}{z_0}}{\frac{z_1}{z_0}}\right) \quad (16)$$

Ou ainda,

$$\Delta u = \frac{u^*}{k} \ln\left(\frac{z_2}{z_1}\right) \quad (17)$$

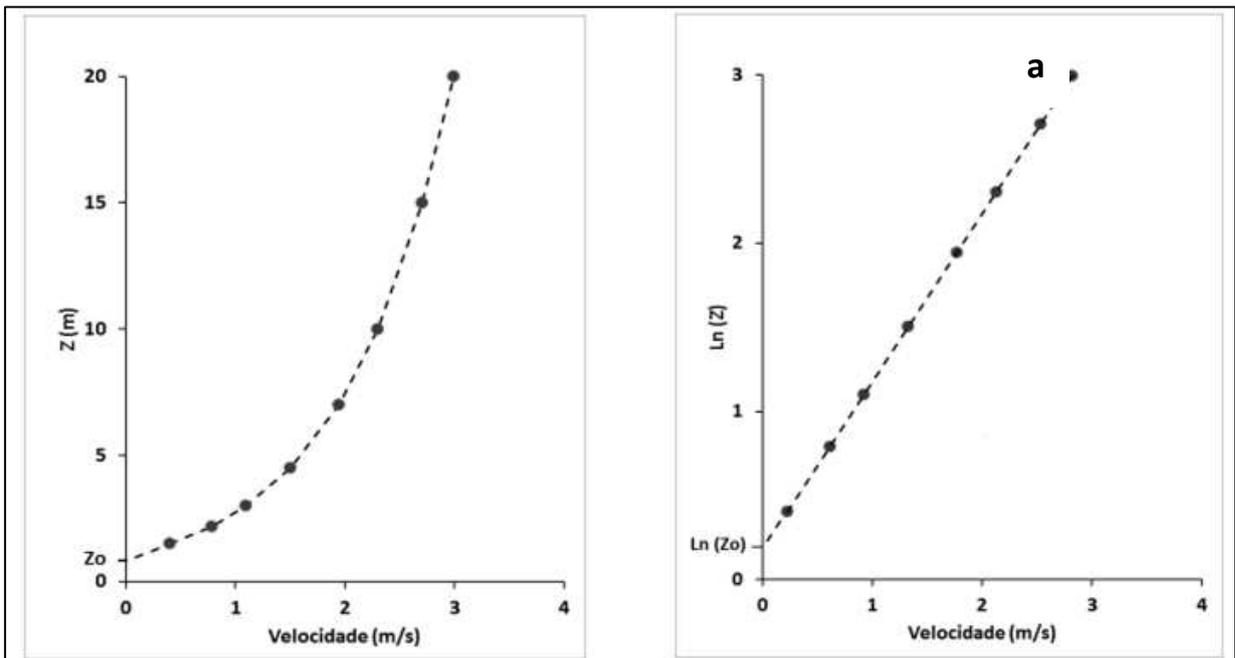
Finalmente,

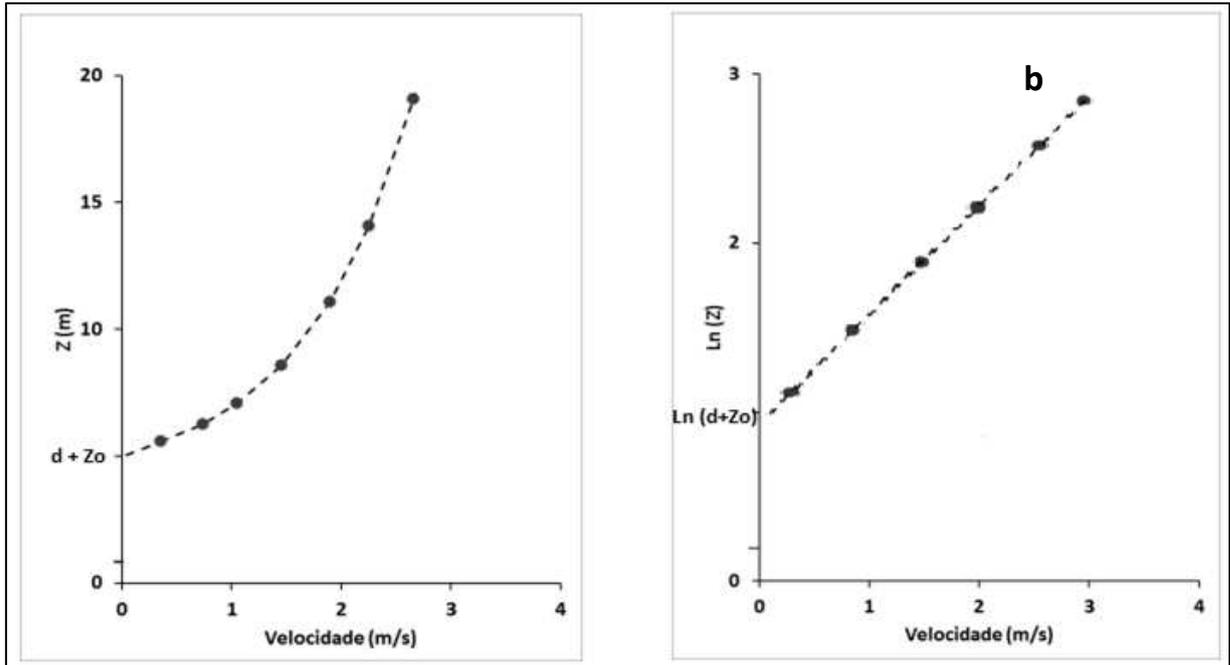
$$u^* = \frac{k \Delta u}{\ln\left(\frac{z_2}{z_1}\right)} \quad (18)$$

3.5 CÁLCULO DA SOMA DA ALTURA DO DESLOCAMENTO DO PLANO ZERO COM O COMPRIMENTO DE RUGOSIDADE ($d+Z_0$)

Em locais de vegetação de pequeno porte o perfil do vento permite obter o comprimento de rugosidade (Z_0). Ele representa a altura a partir da qual a velocidade começa a aumentar com a altura. Plotando a velocidade versus o logaritmo natural da altura teremos uma reta cujo intercepto será Z_0 (Figura 6a). Em locais com vegetação de médio e grande porte o intercepto representa a soma de Z_0 com a altura do deslocamento do plano zero (d), ou seja, é igual a $\text{Ln}(d+Z_0)$ (Figura 6b).

Figura 6 – Representação gráfica do perfil logarítmico do vento sobre: a) superfície sem vegetação ou com vegetação de pequeno porte; b) superfície com vegetação de médio ou grande porte.





Fonte: Autor, (2018).

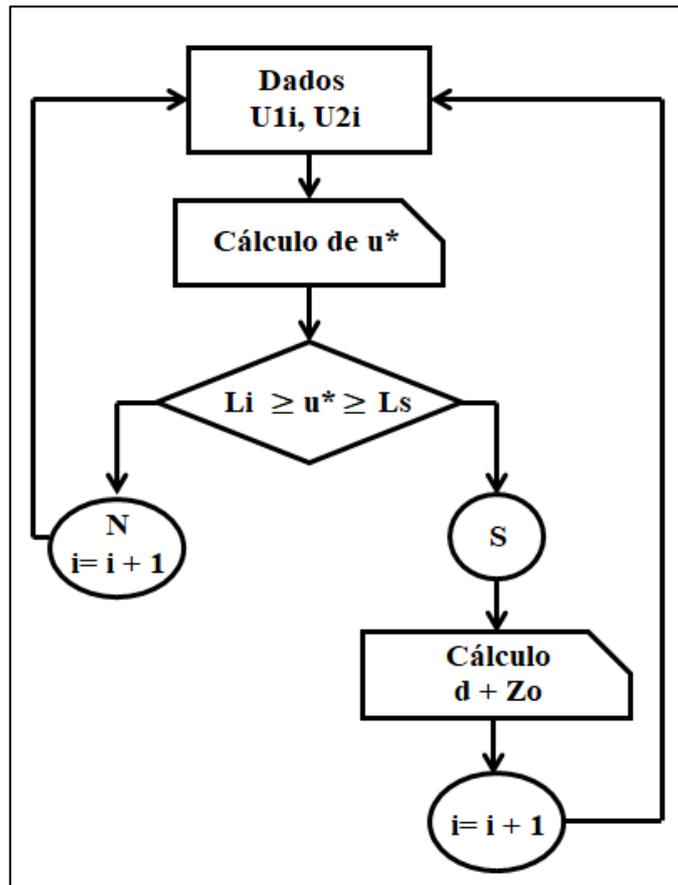
Desta forma, a equação 13 sofre uma pequena alteração ficando da forma a seguir.

$$d + Z_o = \frac{Z_2 - Z_1}{\exp\left(\frac{u_2}{u_1}\right)} \quad (19)$$

Como mostra a figura 6, após o desenvolvimento da equação para calcular Z_0 em uma camada onde se conhece a velocidade na base (u_1) e no topo (u_2), foi elaborado um algoritmo onde os valores de velocidade dos ventos nos níveis de Z_1 e Z_2 (U_{1i} e U_{2i}), foram inseridos, respeitando um limite que foi pré-estabelecido. O limite teve como objetivo eliminar os casos muito estáveis e muito instáveis. O valor estabelecido foi 40% do valor de referência para atmosfera neutra ($u^*=0,4$), ou seja, $L_i=0,231$ e $L_s=0,569$).

Conforme mostra a Figura 7, quando o valor de u^* atende a condição é feito o cálculo de $D+Z_0$. Caso contrário, o valor de i é incrementado ($i=i+1$) e um novo par de valores (U_{1i} , U_{2i}) é buscado no banco de dados.

Figura 7 – Organograma do algoritmo de cálculo de $d+Z_0$.



Fonte: Autor, (2018).

Vale salientar que quando existe vegetação o cálculo de “d” é somado ao cálculo de Z_0 .

3.6 MÉTODO ITERATIVO PARA OBTENÇÃO DO COEFICIENTE ALFA DA LEI DA POTÊNCIA

A lei da Potência é muito usada na área de engenharia eólica para estimar o a velocidade do vento a partir de uma série de dados existente. A partir do valor em uma altura visando obter o melhor expoente para a lei da potência (equação 20) foi desenvolvido um método iterativo. O princípio adotado foi: o melhor valor de alfa é aquele que corresponde a menor diferença entre o observado e o estimado.

$$\frac{U_2}{U_1} = \left(\frac{Z_2}{Z_1}\right)^\alpha \quad (20)$$

Z_1 – Altura do nível 1 (m);

Z_2 – Altura do nível 2 (m);

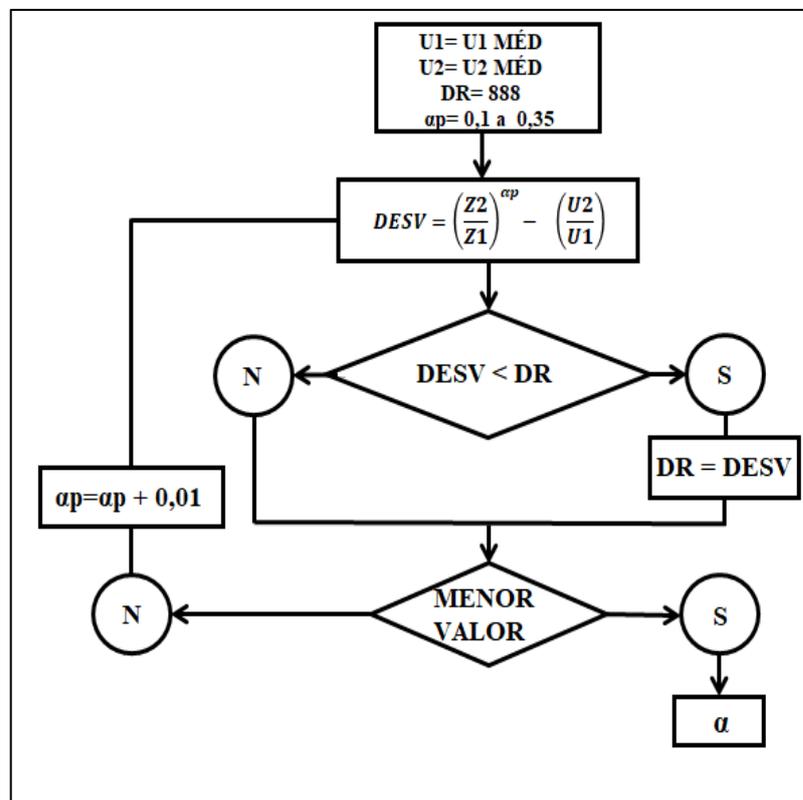
U_1 - velocidade do vento no nível 1 ($m.s^{-1}$);

U_2 - velocidade do vento no nível 2 ($m.s^{-1}$);

α – expoente (adimensional).

Uma vez dispo do da velocidade do vento em duas alturas é possível obter o valor α fazendo variar o valor do expoente da (equação 20), até encontrar o melhor ajuste. Ou seja, qual o valor de α que permite chegar mais próximo da igualdade conforme mostra a Figura 8. Para tal foram utilizados os valores médios da velocidade após a filtragem dos dados (\bar{U}_1 e \bar{U}_2) e fornecidos um valor inicial para o desvio (DR) e de α (α_p). Em seguida o valor de α_p é incrementado de 0,1 até chegar a 0,35. O valor de α será aquele que corresponder ao menor desvio.

Figura 8 – Organograma do método iterativo para determinação do valor de α .



Fonte: Autor, (2018).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Estatística do vento

Com finalidade de dar suporte as posteriores análises dos dados será apresentado a seguir o resultado da estatística da velocidade e da direção do vento nos quatro sítios experimentais e nas quatro estações do ano.

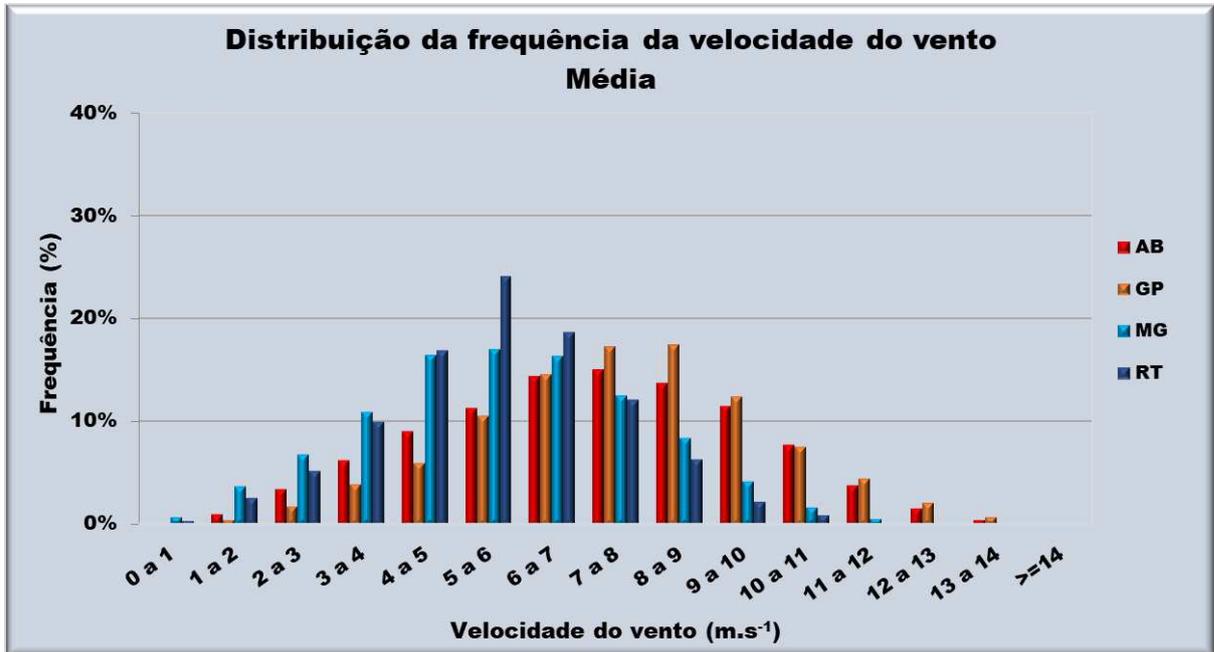
4.1.1 Velocidade

Com o intento de investigar a variação espacial do vento serão apresentadas a seguir as distribuições de frequência da velocidade em 15 classes, nos quatro locais (Figura 9). Verifica-se que existem dois padrões, um no litoral e um no interior. No litoral as maiores frequências são nas classes de $5-6 \text{ m.s}^{-1}$ e $6-7 \text{ m.s}^{-1}$. Já no interior os ventos são mais frequentes nas classes $7-8 \text{ m.s}^{-1}$ e $8-9 \text{ m.s}^{-1}$.

Os picos de frequência em cada local foram: 15,04% na classe $7-8 \text{ m.s}^{-1}$ em Água Branca; 17,51% na classe $8-9 \text{ m.s}^{-1}$ em Girau do Ponciano, 17,07% na classe $5-6 \text{ m.s}^{-1}$ para Maragogi e Roteiro com 24,12% na classe $5-6 \text{ m.s}^{-1}$. A velocidade do vento é claramente maior no interior e menor no litoral.

Vale salientar que apesar de semelhantes os padrões não são iguais e cada local apresenta uma característica própria.

Figura 9 – Distribuição de frequência da velocidade do vento em Agua Branca, Girau do Ponciano, Maragogi e Roteiro para todo o conjunto de dados (abr/08, jun/08, out/08 e jan/09).

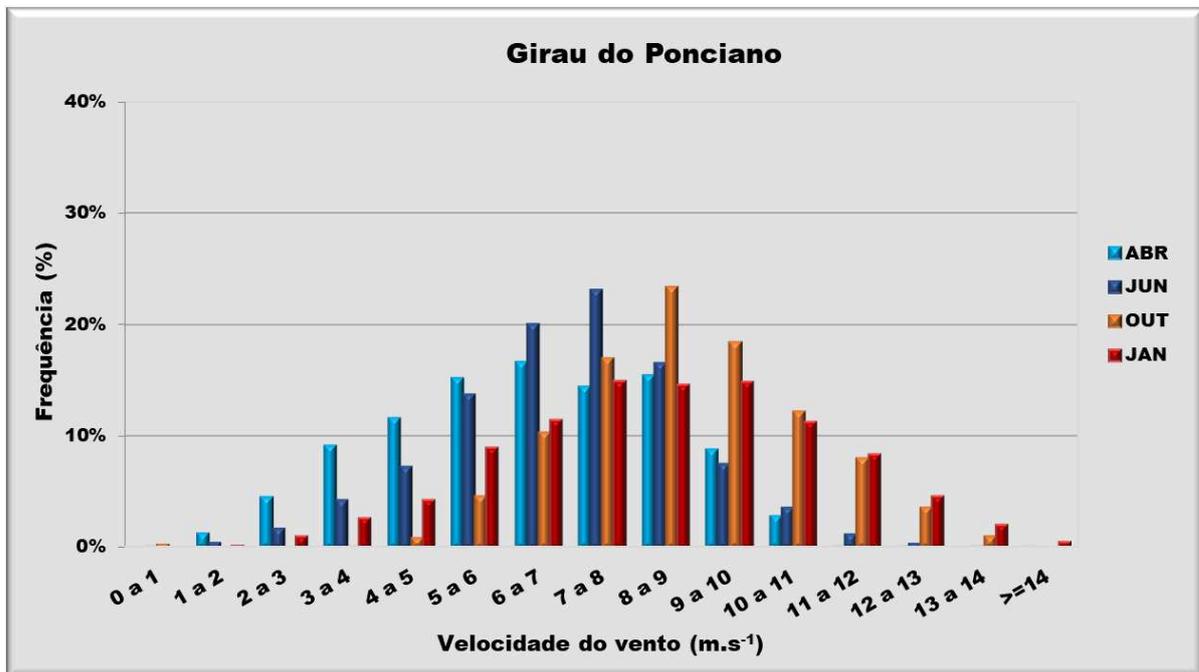
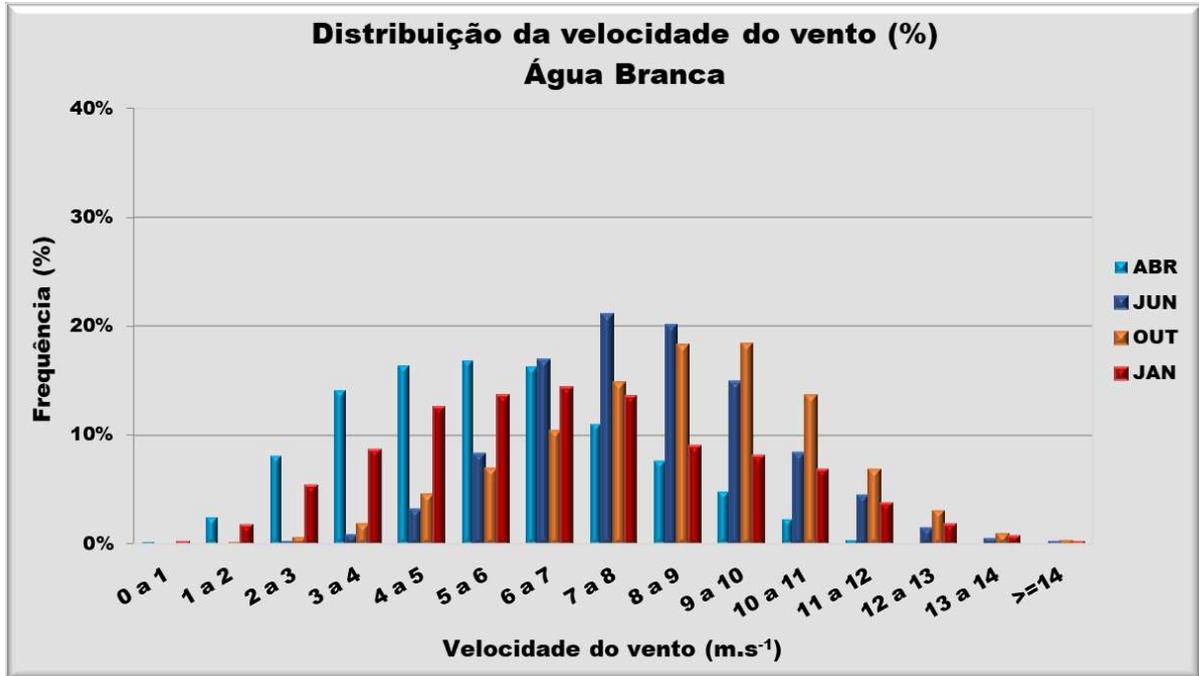


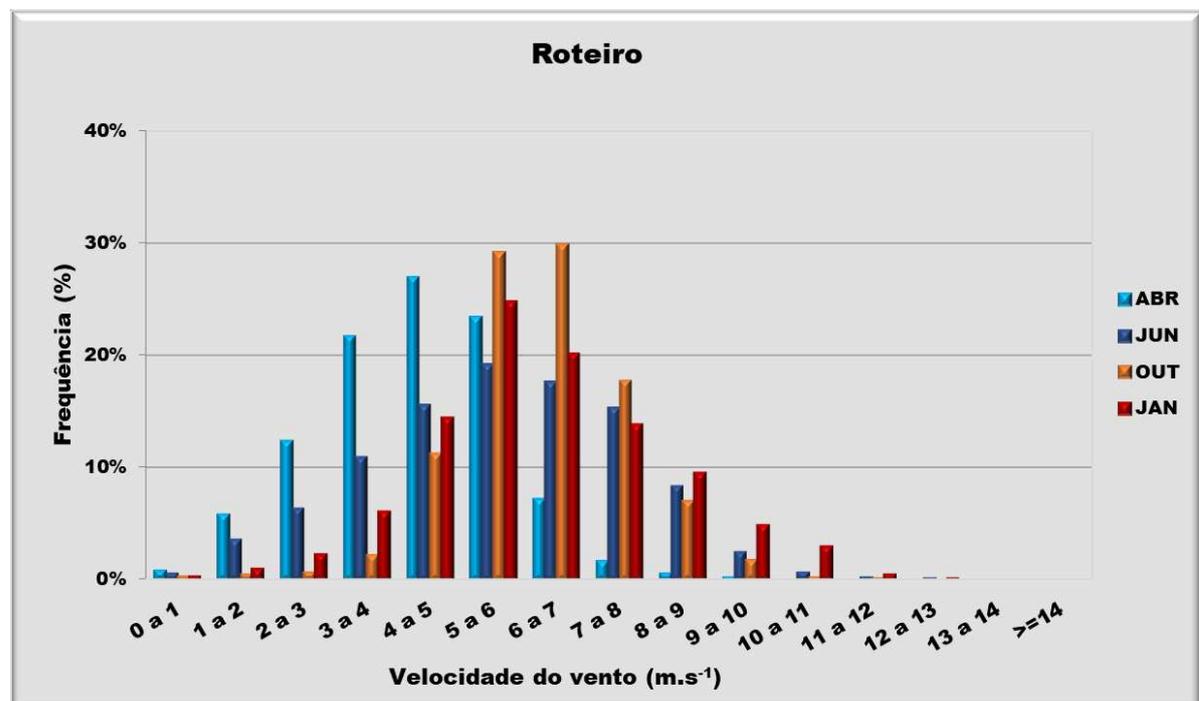
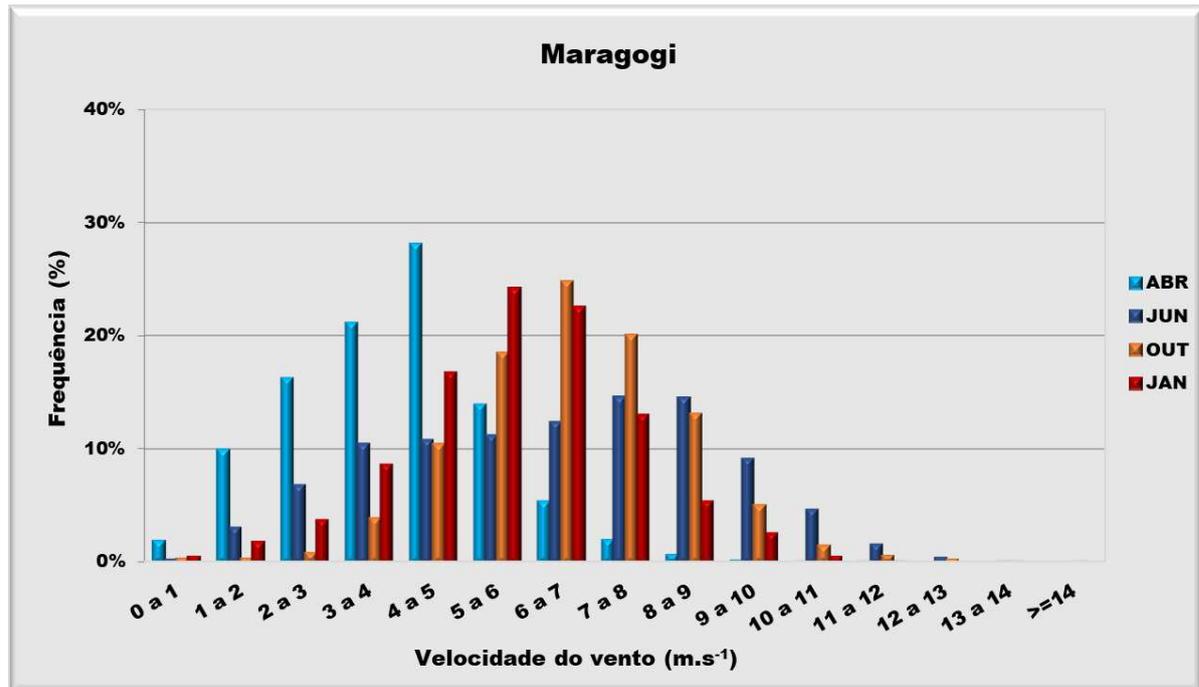
Fonte: Autor, (2018).

Para verificar a existência ou não de variação temporal serão comparadas a seguir, em cada local, as distribuições em quatro meses cada um deles relativo a cada estação do ano (Figura 10). Os resultados mostraram que existe variação temporal/sazonal observado nos quatro locais. Apesar de haver certa semelhança entre os padrões das estações em alguns locais, existe sempre uma diferença.

De uma maneira geral os ventos são mais fortes na estação seca (primavera/verão) e mais fracos na estação chuvosa (outono/inverno).

Figura 10 – Distribuições da velocidade do vento em cada sítio experimental para os quatro meses relativos a cada estação do ano: abril/08 (outono), junho/08 (inverno), outono (primavera) e janeiro/09 (verão).





Fonte: Autor, (2018).

Para melhor interpretar a figura 9 foi feita uma tabela onde são indicadas as classes de maior frequência em cada local e em cada estação do ano (Tabela 3). Nela fica evidente a diferença entre as duas regiões (litoral e interior). No litoral (MG e RT), com exceção do inverno, as classes são as mesmas: 4-5 m.s⁻¹ no outono, 5-6 m.s⁻¹ no verão e 6-7 m.s⁻¹ na

primavera. Na verdade, o que ocorreu em MG no inverno (maior frequência na classe 7-8 m.s⁻¹) foi excepcional.

De acordo com Costa e Lyra (2012), as estações do Litoral sofrem com os efeitos dos ventos alísios e brisas terrestre, o que causa maior variabilidade do vento. Durante o inverno no litoral de Alagoas, o vento sopra a maior parte do tempo na direção SE, ou seja, a influência dos ventos alísios são maiores que as brisas neste período, isso explica os ventos mais intensos no inverno nessa região.

No interior, só houve coincidência no inverso onde, em ambos os locais, no inverno, a classe de máxima frequência foi 7-8 m.s⁻¹. Outro ponto em comum foi o fato de ser na primavera a classe de maior velocidade. Mesmo assim em AB foi 9-10 m.s⁻¹ e em GP 8-9 m.s⁻¹. No outono e no verão o máximo em GP foi sempre na classe imediatamente superior à de AB.

Tabela 3 – Classes de maior frequência em cada local e em cada estação do ano para AB, GP, MG e RT.

LOCAL	CLASSE DE MAIOR FREQUENCIA (m.s ⁻¹)						LEGENDA
	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	
AB							 Primavera
GP							 Verão
MG							 Outono
RT							 Inverno

Fonte: Autor, (2018).

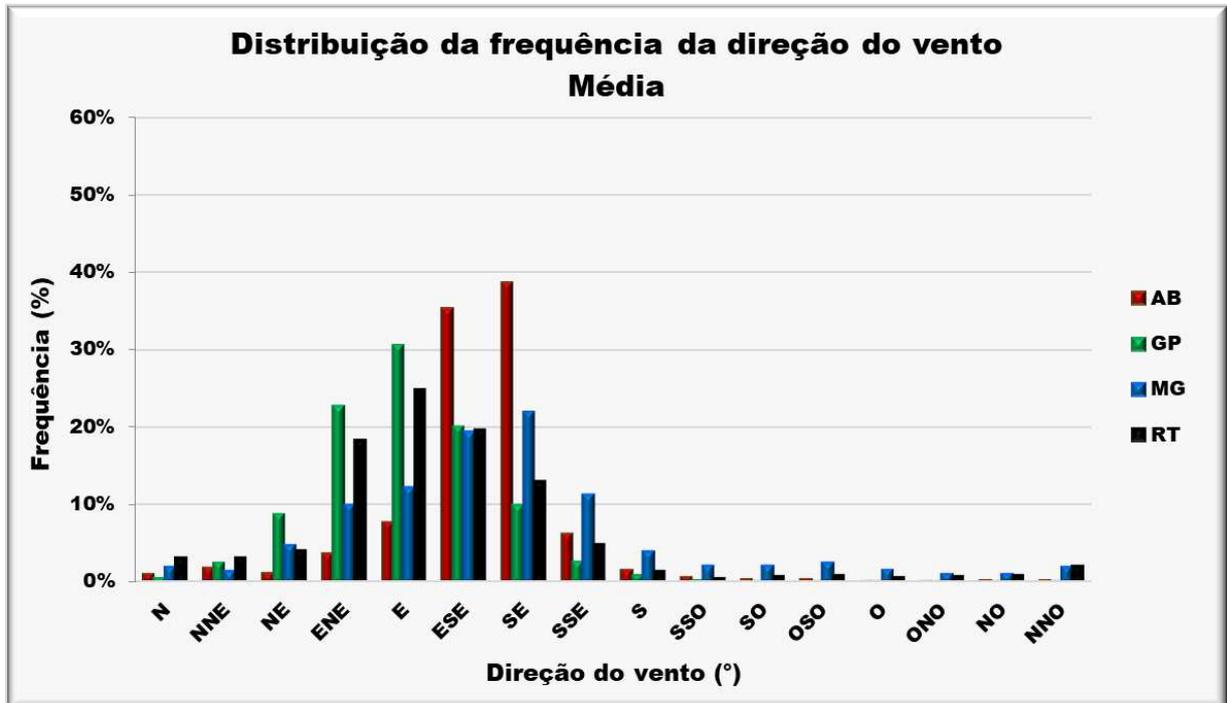
4.1.2 Direção

A variação espacial da direção do vento foi averiguada através da distribuição de frequência para todo o conjunto de dados, nos quatro locais (Figura 11). Como no caso da velocidade, verifica-se que os padrões são diferentes sendo que não só por grande região (litoral e interior) mas para cada um dos quatro locais.

De uma maneira geral, o vento predominante no Estado de Alagoas é de SE por está localizado na região de influencia dos alísios. A predominância é mais marcante no interior,

principalmente em AB. Os resultados de Costa e Lyra (2012) são semelhantes, onde a maior predominância dos ventos de SE, foi para AB (79,2%).

Figura 11 – Distribuição da frequência da direção do vento para os quatro sítios experimentais: Água Branca (sertão), Girau do Ponciano (agreste) e o litoral de Maragogi e Roteiro.



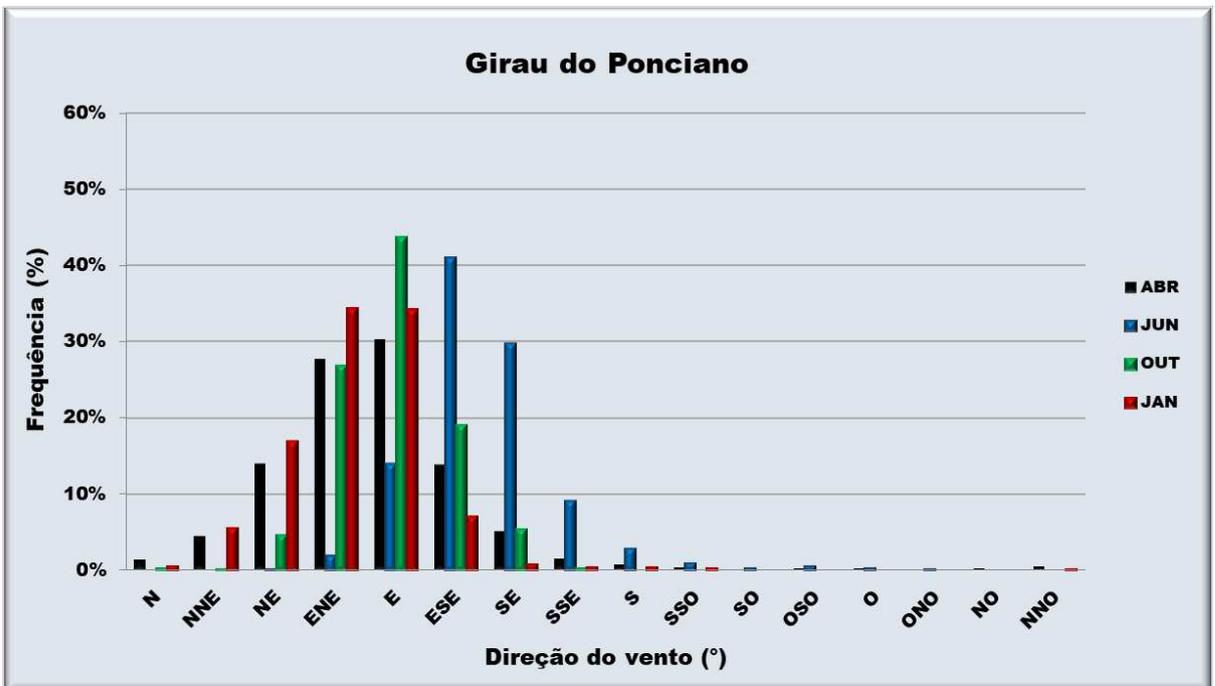
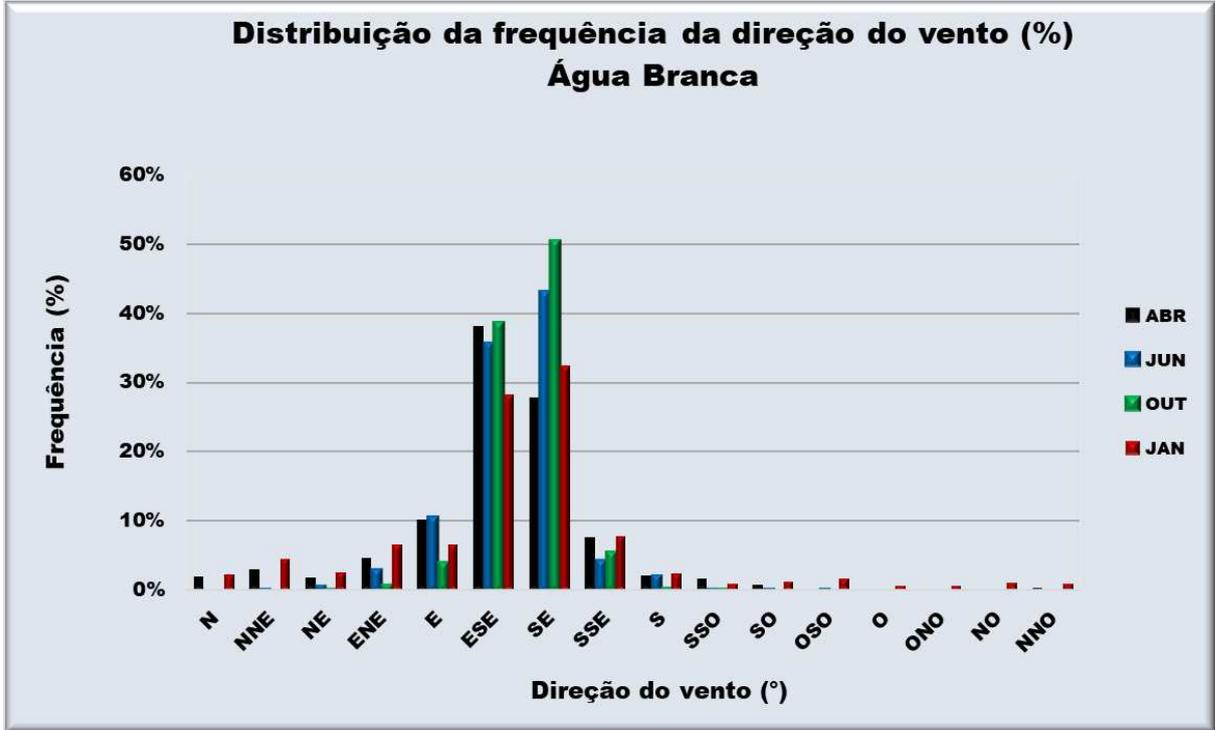
Fonte: Autor, (2018).

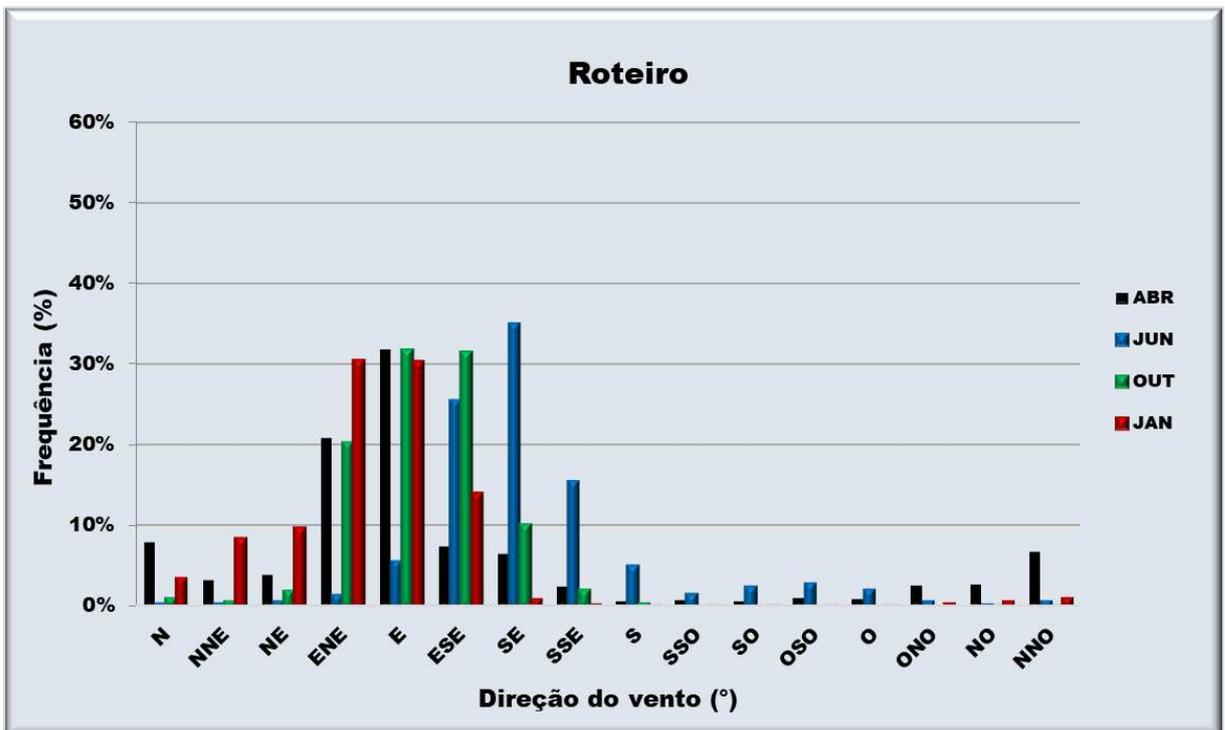
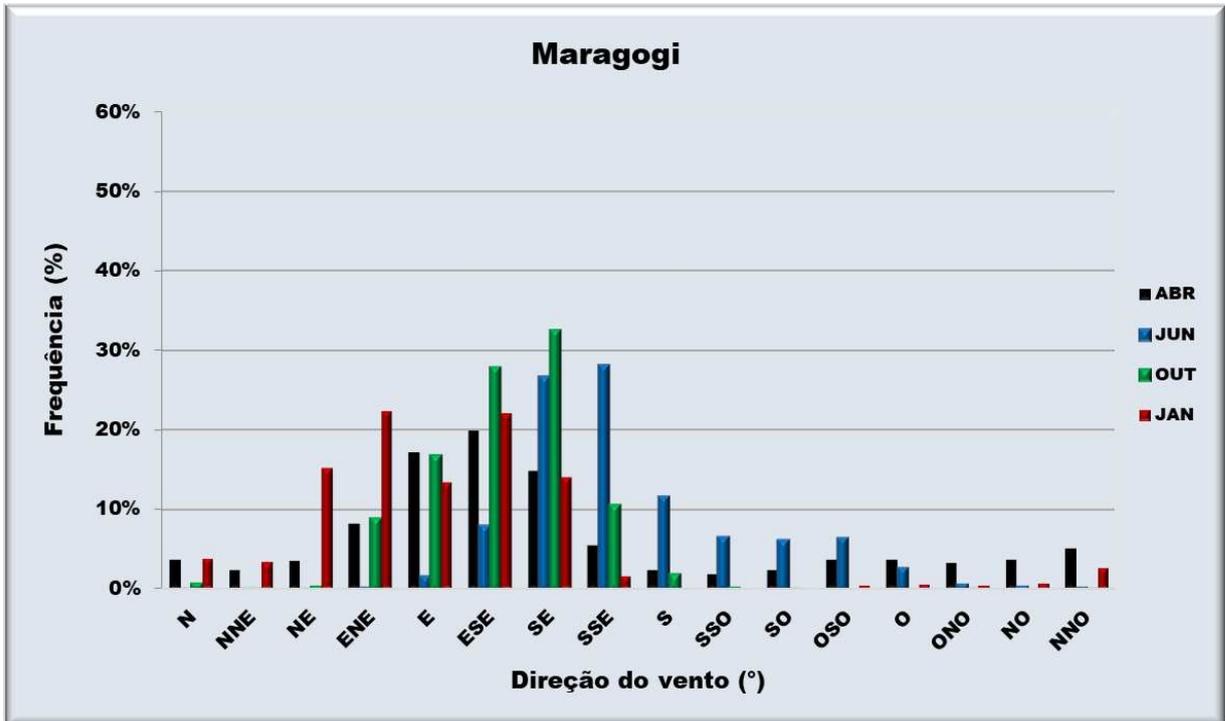
Para facilitar a comparação em termos de predominância serão confrontados a seguir a soma das duas classes com maior frequência em cada local.

Água Branca apresentou predominância na direção do vento em duas direções, SE (38,62%) e ESE (35,23%). A soma da frequência nestas duas classes é igual a 73,85%. Em Girau do Ponciano, a soma das duas classes principais foi de 53,42%, sendo a primeira E (30,62%) e a segunda ENE (22,80%). Em Maragogi a soma das duas classes principais não representa a maioria (41,41%). As duas classes em questão foram SE (21,94%) e ESE (19,47%). Para o segundo local no litoral (Roteiro) a predominância foi praticamente a mesma de Maragogi, onde soma das duas classes principais foi de 44,54%, sendo 24,88% de SE e 19,66% de E.

Comparando, em cada local, as distribuições em cada um dos 4 meses (Figura 12) verificamos que há variação sazonal sendo menos pronunciada em Água Branca.

Figura 12 – Distribuições da direção do vento em cada sítio experimental para os quatro meses relativos a cada estação do ano: Abril/08 (outono), junho/08 (inverno), outono (primavera) e janeiro/09 (verão).





Fonte: Autor, (2018).

Em Água Branca, os resultados mostram que, com exceção de abril/08, os demais meses tiveram suas direções predominantemente de SE: 43,31% em Junho/08, 50,67% em outubro/08 e 32,48% em janeiro/09. Já em abril/08 a direção predominante foi de ESE (38,15%).

Em Girau do Ponciano dois meses tiveram ventos predominantes de E: Abril/08 (30,14%) e outubro/08 (43,77%). Em junho/08 os ventos foram de ESE (40,93%) e em janeiro/09 de ENE com 34,24%.

Em Maragogi, a direção variou de estação para estação. Em Abril/08 a predominância foi ESE (19,79%), em junho/08 de SSE (28,01%), em outubro/08 de SE (32,41%) e em janeiro/09 de ESE (21,95%).

Em Roteiro, os meses de abril/08, outubro/08 e janeiro/09 tiveram como direção predominante E (31,62%, 31,72% e 30,24% respectivamente). No mês de junho/08 a predominância foi de SE (34,93%).

4.2 PARÂMETROS AERODINÂMICOS

Neste item serão apresentados e discutidos os resultados referentes aos parâmetros aerodinâmicos a partir dos dados das quatro torres anemométricas (AB, GP, MG e RT). O propósito foi de desenvolver uma ferramenta capaz de calcular estes parâmetros utilizando apenas os dados obtidos em duas alturas.

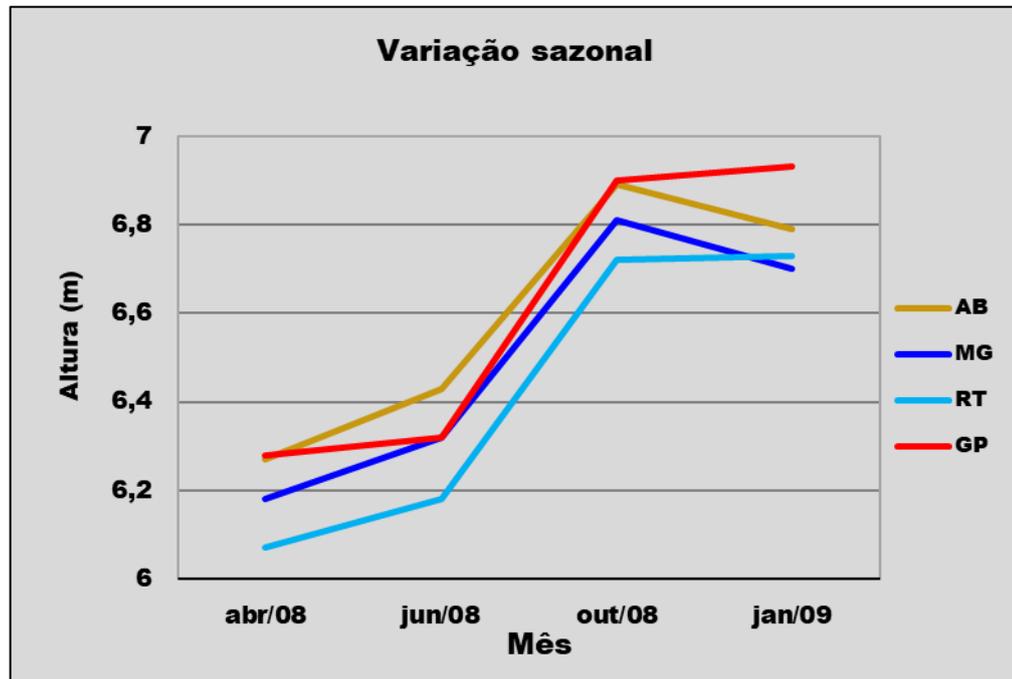
Tendo em vista que as medidas foram realizadas a 30 m e 50 m e que em todos havia vegetação de porte médio-alto: canavial em MG e RT, caatinga em GP e AB. Portando o valor encontrado representava $d+Z_0$ (ver item 3.5).

Os resultados obtidos são mostrados na Figura 13. Nela constatamos que há uma variação sazonal com aumento na estação chuvosa e diminuição na estação seca. Existe uma diferença significativa entre os padrões entre outubro e junho onde verifica-se um aumento em RT e GP e uma diminuição em AB e MG. Em média, há uma variação de 0,66 m no ano.

Quando comparados os valores de cada local no mesmo mês verificamos que a diferença é muito pequena. Este resultado é muito importante porque indica que o método adotado aparentemente não é adequado.

Em seus estudos Lyra e Pereira (2007), também destacaram as dificuldades em estimativas dos parâmetros aerodinâmicos em locais com vegetação esparsa, o método utilizado (método de ajuste estatístico) apresentou valores inconsistentes de d e Z_0 . No presente trabalho, as vegetações dos sítios experimentais são de portes variados como dito anteriormente, porém o método utilizado também apresentou valores inconsistentes e altos.

Figura 13 – Altura onde o vento é zero ($d+Z_0$) em AB, GP, MG e RT nos meses de abril/08 (outono), junho/08 (inverno), outono (primavera) e janeiro/09 (verão).



Fonte: Autor, (2018).

Na Tabela 4 são apresentados os valores médios para cada mês, a média geral e o desvio padrão, para os quatro meses que usamos como representantes de cada estação do ano. Nela verificamos que, apesar da diferença entre o tipo de vegetação, os valores são muito próximos. Em termos de média geral, Girau do Ponciano apresentou o maior valor em relação aos demais (6,61 m), Roteiro apresentou o menor valor (6,42 m). Os desvios padrões também são próximos variando entre 0,29 (AB) e 0,36 (GP).

Quando comparados os valores de cada local no mesmo mês verificamos que a diferença é muito pequena (da ordem de 0,2m).

A não constatação de variação espacial implica em dizer que, apesar de utilizar uma formulação fisicamente adequada, o método não produz o resultado esperado: determinar os parâmetros aerodinâmicos a partir de dados de torres anemométricas para fins eólicos com 2 níveis de medição. Certamente, isto ocorre porque nestas torres os níveis de medição ficam muito distantes da superfície (30m ou mais). Nesta altura, a escoamento já está praticamente livre da influencia da rugosidade superficial.

Uma prova do não funcionamento do método é o valor de d obtido por Toledo et al., (2003), utilizando o método do perfil para um cultivo contínuo de cana-de-açúcar, no

município de Pilar, Alagoas, onde seu método obteve resultados satisfatórios de $d=1,30$ m e $Z_0=0,30$ m ($d+Z_0= 1,60$ m).

Tabela 4 – Valores de $d+Z_0$ para cada local de estudo e cada estação do ano em Água Branca (AB), Girau do Ponciano (GP), Maragogi (MG) e Roteiro (RT).

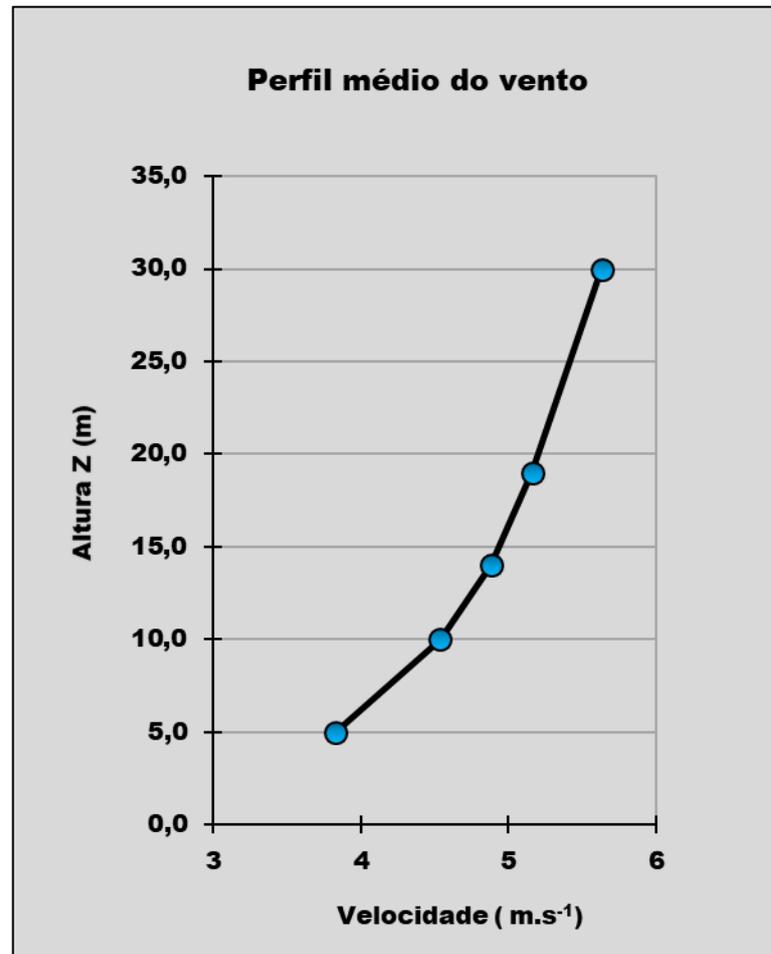
LOCAL	d + Z ₀				Média	Desvio
	abr/08	jun/08	out/08	jan/09		
AB	6,27	6,43	6,89	6,79	6,59	0,29
MG	6,18	6,32	6,81	6,70	6,50	0,30
RT	6,07	6,18	6,72	6,73	6,42	0,35
GP	6,28	6,32	6,90	6,93	6,61	0,36

Fonte: Autor, (2018).

4.2.1 Verificação do cálculo de “ $d+Z_0$ ”

Para comprovar a hipótese levantada (primeiro nível de medição muito alto) utilizamos a torre do projeto PVPN que contava com 8 níveis de medição do vento (5, 10, 14, 19 e 30, 50, 70 e 100 metros). Os níveis mais altos foram descartados e foram usados os 5 inferiores: 5, 10, 14, 19 e 30 metros). O perfil médio obtido após a filtragem dos dados é mostrado na Figura 14.

Figura 14 – Perfil médio do vento em Craibas no período de 05/12/2014 a 13/01/2015.

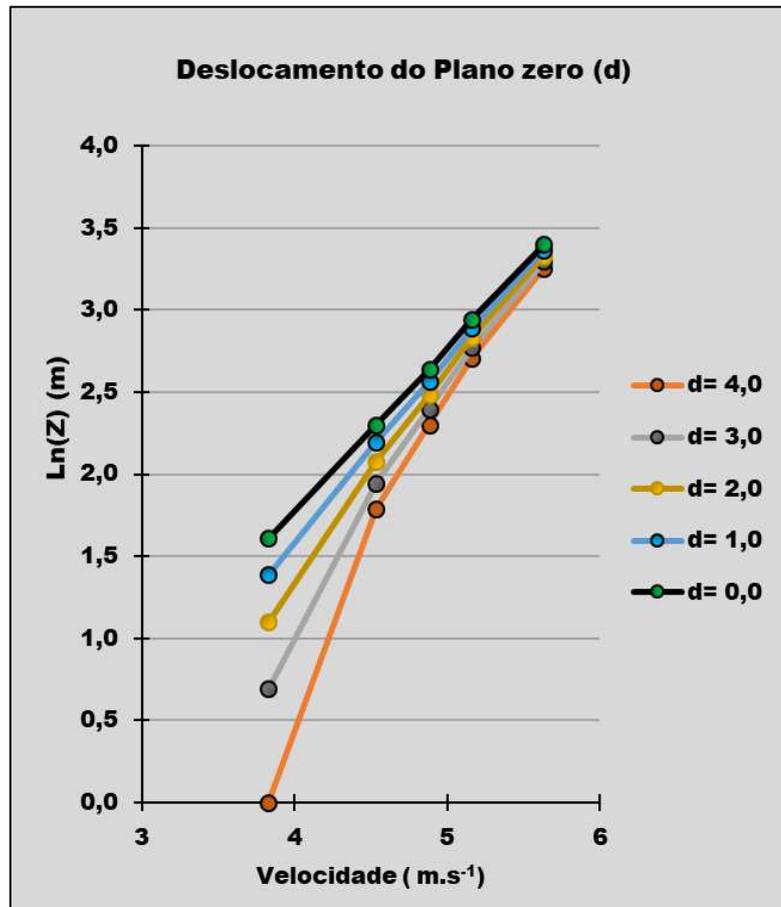


Fonte: Autor, (2018).

Inicialmente foi feito o cálculo de “d” utilizando o método iterativo (ver item 3.5). Este método consiste em fazer uma regressão linear (XY) onde são plotados a velocidade no eixo “X” e o logaritmo de (Z-d) no eixo “Y”. São feitas múltiplas interações até encontrar o melhor ajuste. As interações foram feitas fazendo variar “d” a cada centímetro. O valor encontrado para “d” foi 0,0 m o que já era esperado porque, no período, a região estava sofrendo seca e a não havia vegetação envolta da torre.

A Figura 15 ilustra o ajuste a partir de 5 valores de “d” mostrando que a reta é obtida quando “d” é igual a zero.

Figura 15 – Determinação de “d” via método iterativo.



Fonte: Autor, (2018).

O valor de Z_0 encontrado foi de 0,11m. tendo em vista que “d” foi zero, então $d+Z_0=0,11m$.

Em seguida foi calculado $d+Z_0$ utilizando a metodologia empregada nos outros quatro locais, na mesma camada (30 a 50m). Para este cálculo, foi utilizado apenas um mês com todos os dados da segunda fase tendo em vista que um mês seria suficiente para comprovar se há ou não eficiência no método.

O resultado encontrado foi 6,61 o qual é muito próximo daqueles encontrados nos outros quatro locais. Isto comprova a validade da hipótese levantada.

Para ilustrar ainda melhor, foram calculados “ $d+Z_0$ ” para todas as camadas, para os 8 níveis de medição em Craíbas (Tabela 5). Os valores encontrados foram bem superiores ao correto (0,11m). É interessante notar que a razão $(d+Z_0)/d$ permanece praticamente constante.

Tabela 5 – Valores de $d+Z_0$ para todas as camadas em Craíbas, no período, altura de 5 a 100 m.

Z1(m)	Z2(m)	d+Z ₀ (m)	dZ (m)	(d+Z ₀)/dZ
5	10	1,53	5	0,3
10	14	1,36	4	0,34
14	19	1,71	5	0,34
19	30	3,68	11	0,33
30	50	6,61	20	0,33
50	70	7,01	20	0,35
70	100	10,52	30	0,35

Fonte: Autor, (2018).

4.3 COMPORTAMENTO ATÍPICO DO VENTO

A importância das eliminações é para melhor compreensão e ajuste dos dados ao perfil Logarítmico do vento, é de grande ajuda na filtragem de dados indesejados, para uma maior precisão e facilidade em qualquer método estatístico que seja utilizado em estudos, além da detecção de alguns fenômenos que influenciaram na perturbação do vento naquele momento de registro, ajudando também na predição do regime dos ventos na região (SILVA, 2009).

Além de detectar se a região de estudo está apta às atividades eólicas, para um melhor desempenho da turbina.

Neste item a estatística das eliminações de dados serão usados para tentar compreender melhor o escoamento no local.

Para calcular os parâmetros aerodinâmicos foram estabelecidos critérios para filtrar os dados antes dos cálculos eliminando as situações atípicas conforme descrito na metodologia:

- I) Perfil fora do padrão logarítmico ($U_1 > U_2$);
- II) Atmosfera muito estável;
- III) Atmosfera muito instável.

Existem quatro situações que podem provocar o estabelecido no critério I: a) turbulência; b) mudança de direção; c) transição CLC-CLN e vice-versa; d) fenômenos locais. No caso dos critérios II e III o fator determinante é a estabilidade atmosférica.

Na Tabela 6 estão agrupados os casos de eliminações em cada local por cada um dos três critérios expressos em percentual. No qual foram dados a cada 10 minutos em quatro meses, ou seja, 17568 pares de dados (U1 e U2) em cada local (total de 70272). No geral foram eliminados 53,77% dos casos: 8,44% pelo critério I, 18,32% pelo critério II e 27,01% pelo critério III. O local com mais eliminações foi GP (66,69%) e com menos AB (44,29%). É importante ressaltar que em GP, além de mais eliminações no geral, também teve o maior número em cada um dos três critérios.

Nas eliminações pelo critério I, AB se destaca pelo número baixo (2,01%) e GP pelo número elevado (13,27%). Na verdade, o esperado era encontrar uma semelhança entre AB e GP em função da localização e da topografia. Por outro lado, o segundo maior número (10,54%) ocorreu em MG. A explicação para isso é a localização das torres anemométricas. Em MG a torre ficou na borda da falésia e em GP no vértice da colina. Em ambos os casos a probabilidade de ocorrer um perfil logarítmico do vento é mais remota.

Tabela 6 – Total de casos de eliminações em cada critério nos quatro locais expressos em percentual.

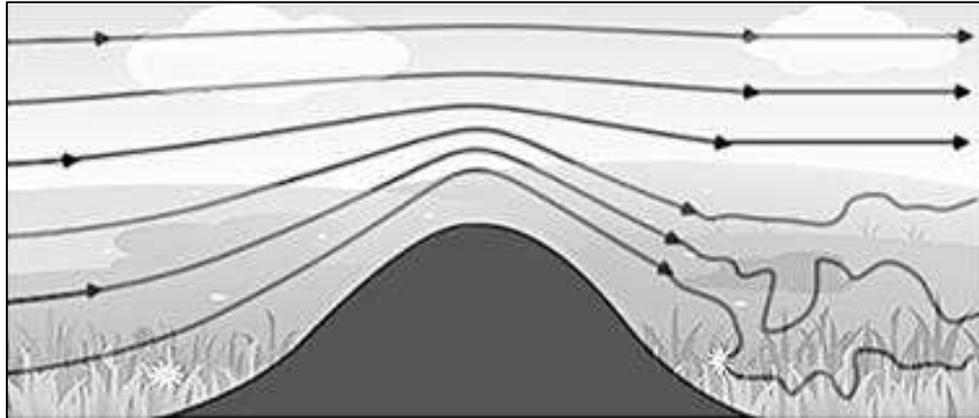
LOCAL	CRITÉRIO			TOTAL
	I	II	III	
AB	2,01%	19,95%	22,33%	44,29%
GP	13,27%	24,73%	28,69%	66,69%
MG	10,54%	13,85%	29,80%	54,20%
RT	7,96%	14,74%	27,21%	49,91%

Fonte: Autor, (2018).

Segundo Silva (2011), o escoamento do vento terrenos mais complexos, dificulta a medida do vento, que muitas vezes apresenta um perfil inverso, com superestimativas (o nível inferior apresenta velocidade do vento maior que o nível inferior).

A Figura 16 representa o que acontece quando há presença de locais inclinados, como no topo de um cume, onde há um aumento da velocidade do vento, devido ao topo do cume atuar com um concentrador de linhas, além do mais quanto mais alto menos influencia da rugosidade de superfície, o que contribui ainda mais (CUSTÓDIO, 2009).

Figura 16 – Escoamento do vento em uma colina (esquema ideal).



Fonte: Autor (2018) apud Ramos, (2012).

Pelo critério II verifica-se uma semelhança entre os locais litorâneos (MG com 13,85% e RT com 14,74%) e os semi-áridos (AB com 19,95% e GP com 24,73%).

No critério III, se destaca AB com o menor número de eliminações (22,33%) enquanto que os demais ficam na casa dos 28%.

Visando compreender melhor a relação entre as eliminações e os fenômenos físicos envolvidos serão analisadas as eliminações por período (dia e noite), mostrados na Tabela 7.

A primeira coisa que fica evidente é a supremacia da instabilidade durante o dia (critério III) e da estabilidade durante a noite (critério II) com destaque para GP. Na verdade era o esperado uma vez que a CLA é instável durante dia e estável à noite.

Um fato curioso é a pequena diferença entre dia e noite em termos de casos muito estáveis em MG (5,29% versus 8,26%) que se destacou também pelo máximo de casos de instabilidade a noite (7,84%).

Quando comparamos as eliminações pelo critério I ($U_2 < U_1$) uma coisa fica evidente: em AB e GP o fenômeno ocorre quase que exclusivamente à noite e muito pouco em AB. O grande número de casos em GP está associado a topografia e a maior instabilidade durante o dia (24,77%).

Tabela 7 – Total de casos de eliminações, por período, em cada critério nos quatro locais expressos em percentual.

LOCAL	CRITÉRIO					
	I		II		III	
	dia	noite	dia	noite	dia	noite
AB	1,90%	0,11%	4,97%	14,98%	19,21%	3,12%
GP	13,00%	0,27%	4,63%	20,09%	24,77%	3,93%
MG	6,59%	3,96%	5,59%	8,26%	21,97%	7,84%
RT	5,64%	2,32%	4,14%	10,60%	23,54%	3,67%

Fonte: Autor, (2018).

4.4 ESTIMATIVA DO EXPOENTE DA LEI DA POTÊNCIA (α)

Foi desenvolvido um modelo para calcular o expoente da equação 20 (lei da Potência). Utilizando os mesmos critérios para o cálculo dos parâmetros aerodinâmicos (item 3.3) foram obtidas as velocidades médias nos dois níveis (30 e 50m). Em seguida um algoritmo interativo foi implementado para encontrar o melhor valor de α . Ou seja, o valor o qual permite estimar a velocidade no nível superior com o menor erro possível.

Os resultados obtidos são mostrados na Figura 17. Ela mostra que α varia de um local para outro e também ao longo do ano.

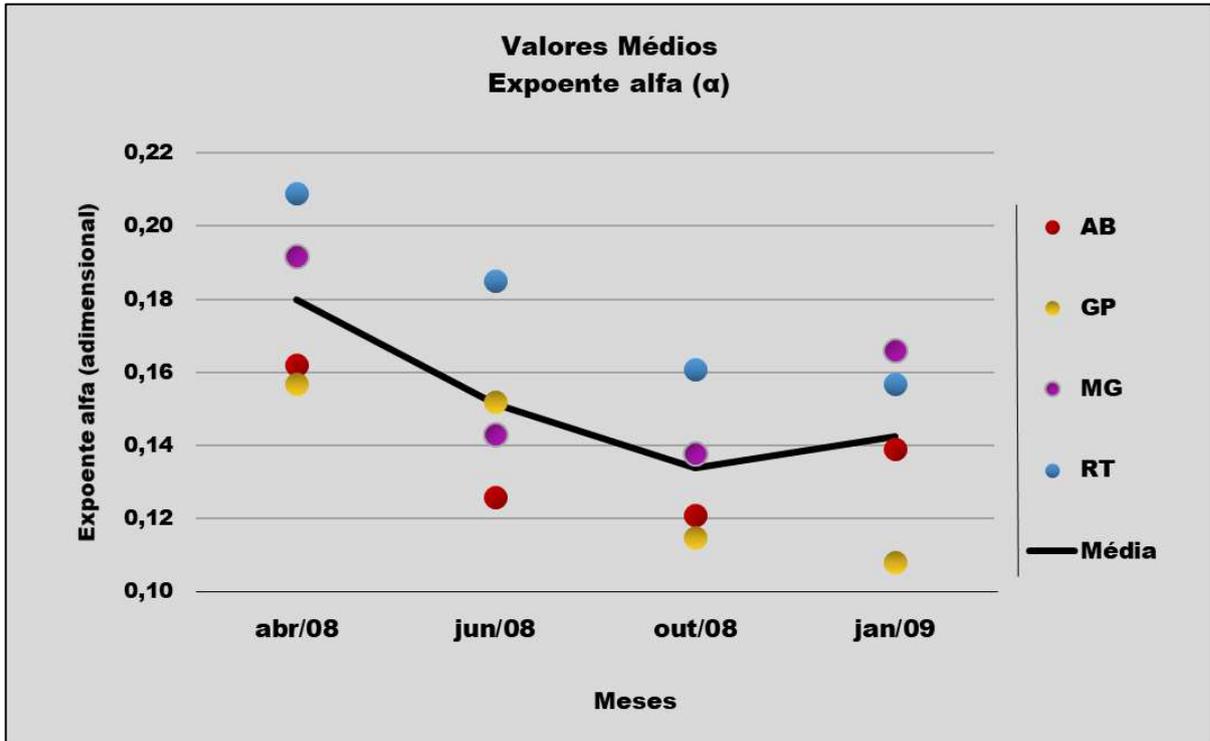
Ao longo do ano verifica-se que a tendência de α é crescer durante a estação seca a partir de outubro e diminuir na estação chuvosa. Apenas em GP o pico de mínima não ocorreu em outubro e sim em janeiro.

Um resultado bastante similar ao de Camelo et al., (2010) que foi feito com o método de extrapolação da velocidade do vento utilizando lei da potência para as regiões litoraneas do ceará (Paracuru e Camocim), que mostraram acréscimos nos valores de α durante a estação seca para as dois locais.

Em termos de variação espacial fica evidente a diferença entre o litoral e interior. No interior α é da ordem de 0,13 (0,137 em AB e 0,133 em GP). No litoral os valores médios

foram de 0,160 em MG e de 0,178 em RT. Tendo em vista que o valor padrão de α é igual a 0,15, verificamos que no litoral α é menor e que no interior ele é maior.

Figura 17 – Valores médios do expoente nos meses de abril/08, junho/08, outubro/08 e janeiro/09. Em AB, GP, MG e RT.



Fonte: Autor, (2018).

Na Tabela 8 são apresentados os erros percentuais usando o modelo original (MO) e modelo desenvolvido neste trabalho (MD). Ela nos mostra que o MD representa uma melhoria significativa, com erro absoluto variando entre 0,0% e 0,2%. Já nas estimativas com o MO o erro variou entre 0,11% e 2,98% com média de 1,13%. Vale salientar que a potencia do aerogerador é proporcional ao cubo da velocidade e da área do rotor (equação 21).

Assim se tivermos, por exemplo, um aerogerador com rotor de raio igual a 70m (faixa de 3MW) e velocidade do vento de 15 m.s^{-1} , a diferença de 1,13% fara esta velocidade passar a ser de $15,17 \text{ m.s}^{-1}$. Neste caso a potencia passará de 31.172.453,11W para 32.241.185,48W o que representa uma diferença de 1.068.732,37W. Tendo em vista que os parques eólicos tem vida util de cerca de 30 anos o erro na estimativa da energia gerada passa a ser enorme.

$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (21)$$

Tabela 8 – Erro absoluto da velocidade do vento em cada mes e cada local utilizando o modelo original (MO) e o modelo desenvolvido (MD) nos meses de abril/08, junho/08, outubro/08 e janeiro/09. Em AB, GP, MG e RT.

MÊS	LOCAL							
	Água Branca		Girau do Ponciano		Maragogi		Roteiro	
	MO	MD	MO	MD	MO	MD	MO	MD
abr/08	0,63%	0,01%	0,35%	0,01%	2,13%	0,01%	2,98%	0,01%
jun/08	1,24%	0,00%	0,11%	0,01%	0,37%	0,02%	1,79%	0,01%
out/08	1,50%	0,01%	1,81%	0,01%	0,62%	0,00%	0,56%	0,00%
jan/09	0,59%	0,02%	2,18%	0,01%	0,83%	0,01%	0,37%	0,01%

Fonte: Autor, (2018).

Este resultado mostra que o uso do algoritmo desenvolvido para a lei da potencia, é uma importante ferramenta para melhorar a estimar o vento a partir de dados anemométricos, independente do conhecimento dos parâmetros aerodinâmicos. Ele necessita unicamente da medida em do vento em pelo menos 2 níveis.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho foi realizado com o objetivo de desenvolver uma metodologia para melhorar a estimativa da velocidade do vento a partir de dados de torres anemométricas, via implementação de uma ferramenta para determinação dos parâmetros aerodinâmicos (d , Z_0) e do expoente da equação mais usado na Engenharia eólica: lei da potência (α).

Foi feita uma análise do comportamento do vento nos 5 locais estudados e constatou-se que a velocidade do vento no interior é maior do que no litoral e que os ventos são mais fortes na estação seca e mais fracos na estação chuvosa. A direção predominante é de SE e também tem um ciclo anual. Em todo o Estado o escoamento é ditado pelos ventos Alísios.

Foi implementado um algoritmo para filtrar os dados de vento e melhorar a sua estimativa com a altura em parque eólicos. Este algoritmo acabou se mostrando uma ferramenta importante para o estudo do escoamento uma vez que o filtro revela os casos de comportamento atípico do vento. No geral, foram constatados 53,77% de casos atípicos. O local com mais casos GP (66,69%) e com menos AB (44,29%). No geral, a maior parte destes casos atípicos ocorreu durante o dia.

O modelo desenvolvido para estimar d e Z_0 a partir de dados anemométricos, não deu resultados coerentes. A comprovação foi feita com os dados de Craibas onde foi possível calcular os parâmetros em questão através do método clássico (método iterativo).

Foi também desenvolvido um modelo para melhorar a estimativa do vento com a altura através da determinação do expoente da lei da potência (α). Os resultados obtidos foram muito bons, pois o erro foi reduzido de 1,13% para 0,01%. Além disso, ficou evidente que α varia de acordo com o local e que, em cada local, ele varia com o tempo seguindo um ciclo anual com crescimento na estação seca e diminuição na estação chuvosa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMARANTE, O. A. C.; DA SILVA, F. J. L. **Atlas do potencial eólico brasileiro**. Camargo Schubert Engenharia Eólica, Centro de Pesquisas de Energia Elétrica/CEPEL. Brasília, 2001.
- ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). **Atlas de energia elétrica do Brasil**. Brasília, 2002.
- ARAÚJO, M. A. **A moderna construção sustentável**. IDHEA-Instituto para o Desenvolvimento da Habitação Ecológica, 2008.
- BARTHELMIE, R. J.; PALUTIKOF, J. P.; DAVIES, T. D. **Estimation of sector roughness lengths and the effect on prediction of the vertical wind speed profile**. *Boundary-Layer Meteorology*, v. 66, n. 1-2, p. 19-47, 1993.
- BERNARDO, S. O.; MOLION, L. C. B. **Variabilidade do vento para a cidade de Maceió-AL**. XI Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2000.
- BEZERRA, F. D.; SANTOS, L. S. **Potencialidades da Energia Eólica no Nordeste**. Informe Técnico do ETENE (Escritório Técnico de Estudos Econômicos do Nordeste), Ano II, Nº 5, 2017.
- BLUMBERG, D. G.; GREELEY, R. **Field studies of aerodynamic roughness length**. *Journal of Arid Environments*, Vol. 25, n. 1, p. 39-48, 1993.
- BRITO, J. O. **Carvão vegetal no Brasil: gestões econômicas e ambientais**. *Estudos avançados*, v. 4, n. 9, p. 221-227, 1990.
- BRUIN, H. A. R. D.; MOORE, C. J. **Zero-plane displacement and roughness length for tall vegetation, derived from a simple mass conservation hypothesis**. *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 31, n. 1, p. 39-49, 1984.
- CAMELO, H. N.; MARIA, P. H. S.; CARVALHO, P. C. M.; PEREIRA, T. B. **Métodos de Extrapolação de Velocidade do Vento para Regiões Litorâneas do Nordeste Brasileiro**. XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2010.
- CARNEIRO, T. C. **Caracterização de potencial eólico para fins de geração eólioeletrica: estudo de caso para Maracanaú (CE), Parnaíba (PI) e Petrolina (PE)**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará (UFC), 2014, 223 p.
- CASTRO, R. M. G. **Introdução à energia eólica**. Portugal: Universidade Técnica de Lisboa (2004).
- COSTA, G. B.; LYRA, R. F. F. **Análise dos padrões de vento no Estado de Alagoas**. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 27, n. 1, p. 31-38, 2012.

CRUZ, N. S. D. **Comportamento do vento e aproveitamnto eólica na região central de Alagoas (Craíbas)**. Dissertação de Mestrado em Meteorologia, Universidade Federal de Alagoas (UFAL): Instituto de Ciências Atmosféricas (ICAT), 2017. 75 p.

CUSTÓDIO, R. S. **Energia eólica para produção de energia elétrica**. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2009. 280 p. ISBN 978-85-87083-09-8.

ELETROBRÁS. **Atlas Eólico do Estado de Alagoas**. 2008. Disponível em: <http://Atlas%20Eólico%20de%20Alagoas_internet.pdf>. Acesso em: 13/09/2017.

FEDOROVICH, E.; CONZEMIUS, R.; MIRONOV, D. **Convective entrainment into a shear-free, linearly stratified atmosphere: Bulk models reevaluated through large eddy simulations**. Journal of the Atmospheric Sciences, Vol. 61, p. 281–295, 2004.

GARRATT, J. R. **The atmospheric boundary layer**. Earth-Science Reviews, Vol. 37, n. 1-2, p. 89-134, 1994.

GUERRA, T. **Estudo sobre a turbulência na camada limite planetária**. Monografia de Bacharel em Física. Universidade Federal de Santa Maria (UFSM-RS), 76 p., 2008.

GWEC - GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL (CONSELHO GLOBAL DE ENERGIA EÓLICA). **Status Global da Energia Eólica**. Disponível em: <http://gwec.net/global-figures/wind-energy-global-status/>. Acesso em: 16/06/2018.

IHADUA, I. M. T. J.; LYRA, R. F. F.; SILVA JÚNIOR, R. S.; RAMOS, D. N. S. **Estudo dos padrões de velocidade e direção do vento no nordeste brasileiro**. (JNIC) 65ª Reunião Anual SBPC (Congresso), 2013.

JERVELL, J. T. **Estudo da influência das características do vento no desempenho de aerogeradores**. 2008.

KAIMAL, J. C.; WYNGAARD, J. C.; HAUGEN, D. A.; COTÉ, O. R.; IZUMI, Y. **Turbulence structure in the convective boundary layer**. Journal of the Atmospheric Sciences, Vol. 33, p. 2152–2169, 1976.

KIKUMOTO, H.; OOKA, R.; SUGAWARA, H.; LIM, J. **Observational study of power-law approximation of wind profiles within an urban boundary layer for various wind conditions**. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.: 164, p.: 13 a 21, 2017.

LIRA, M. A. T. **Estimativa dos recursos eólicos no litoral cearense usando a teoria da regressão linear**. Dissertação Mestrado, Universidade Estadual do Ceara, Centro de Ciências e Tecnologia de Fortaleza, 2009.

LYRA, R. F. F.; SILVA, R. S. J.; MOURA, M. A. L.; AMORIM, M. C. A. L. **Prognóstico da velocidade do vento utilizando o Modelo WRF na Região Central de Alagoas**. Revista Ciência e Natura, Vol. 36 N. 2, 2014.

LYRA, G. B.; PEREIRA, A. R. **Dificuldades de estimativa dos parâmetros de rugosidade aerodinâmica pelo perfil logarítmico do vento sobre vegetação esparsa em região semi-árida.** Revista Brasileira de Geofísica, Vol. 25, n. 2, p. 187-197, 2007.

MAGNAGO, R.; MAGNAGO, P.; ZIMMERMANN, H.; GIEHL, J.; ACEVEDO, O.; MORAES, O. **Evolução Temporal de Ri_B nos Períodos em que antecedem a morte da Turbulência.** XII Congresso Brasileiro de Meteorologia, Foz de Iguaçu-PR, 2002.

MARONEZE, R. **Modelo para turbulência na camada limite atmosférica noturna utilizando equações prognósticas para a energia cinética turbulenta e fluxo de energia na forma de calor sensível.** Monografia de Bacharel em Física. Universidade Federal de Santa Maria (UFSM-RS), 44 p., 2014.

MARTINS, F. R.; GUARNIERI, R. A.; PEREIRA, E. B. **O aproveitamento da energia eólica.** Revista Brasileira de Ensino de Física, Vol. 30, n. 1, p. 1304, 2008.

MEHTA, S. K.; OJHA, D.; ANAND, D.; RAO, D. N.; ANNAMALAI, V.; SALEEM, A. **Thermodynamic structure of the convective boundary layer (CBL) over the Indian monsoon region during CAIPEEX campaigns.** In Annales Geophysicae. Copernicus GmbH, Vol. 35, No. 6, p. 1361, 2017.

MOURA, J. D. O.; LYRA, R. F. F.; RAMOS, D. N. S.; IHADUA, I. M. T. J. **Comparação entre dados de vento observados utilizando o modelo WASP.** VIII Workshop Brasileiro de Micrometeorologia, 2013.

(ONS) - OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Boletim Mensal de Geração de Energia Eólica no Nordeste.** 2018. Disponível em: http://ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/Boletim_abr_2018.pdf#search=Energia%20eolica.

PEREIRA, R. R.; LOPES, V. S.; VILELA, R. B.; ASSIREU, A. T. **Sensoriamento remoto aplicado a estimativas de comprimento de rugosidade superficial.** Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Foz do Iguaçu-PR, Brasil, Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE), 2013.

RAMOS, D. N. S.; LYRA, R. F. F.; SILVA JÚNIOR, R. S.; SILVA, A. R. **Validação da velocidade do vento do modelo WRF com uso da velocidade de fricção u^* simulada.** Ciência e Natura Ed. Suplementar, VII Workshop Brasileiro de Micrometeorologia Vol.:33 p.: 247-250, 2011.

RAMOS, D. N. S. **Mapeamento eólico do estado de alagoas utilizando ferramentas computacionais e dados observados.** Dissertação de Mestrado em Meteorologia, Universidade Federal de Alagoas (UFAL): Instituto de Ciências Atmosféricas (ICAT), 2012. 130 p.

ROBALLO, S. T.; FISCH, G. **Estudo das características do perfil vertical do vento no Centro de Lançamento de Alcântara (CLA)**. Anais do XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia. Florianópolis, Brazil, 2006.

ROBALLO, S. T.; FISCH, G. **Escoamento atmosférico no Centro de Lançamento de Alcântara (CLA): parte I - aspectos observacionais**. Revista Brasileira de Meteorologia, Vol. 23, n. 4, p. 510-519, 2008.

SAATCHI, S.; RODRIGUEZ, E. **Relating Vegetation Aerodynamic Roughness Length to Interferometric SAR Measurements**. Conference: Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1999.

SANTOS, A. S. ; GOMES, H. B. ; AMORIM, R. F. C. ; AMORIM, R. C. F. ; PONTES, E. G. S. ; MEDEIROS, F. C. . **Estudo da climatologia dos ventos através dos dados de reanálises: período 1970 2002, e sua relação com a precipitação para o estado de Alagoas nos anos 1992/94**. In: XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2004, Fortaleza CE. Meteorologia e o Desenvolvimento Sustentável, 2004.

SIMAS, M.; PACCA, S. **Energia eólica, geração de empregos e desenvolvimento sustentável**. Estudos avançados, v. 27, n. 77, p. 99-116, 2013.

SILVA, G. R. **Características de Vento da Região Nordeste**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Recife: Universidade Federal de Pernambuco, 2003.

SILVA, A. R. **Caracterização do vento e potencial eólico no Estado de Alagoas**. Dissertação de Mestrado em Meteorologia, Maceió: Universidade Federal de Alagoas (UFAL), 2011. 95 p.

SILVA, S. M. S. **Avaliação do desempenho do Modelo WRF para Prognóstico do vento na Região Central de Alagoas - Craíbas**. 45 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Meteorologia) – Universidade Federal de Alagoas (UFAL), Maceió, 2016.

SILVA, S. M. S; LYRA, R. F. F.; SILVA JÚNIOR, R. S.; CRUZ, N. S. D.; SANTOS SILVA, S. **Avaliação do desempenho do Modelo WRF para Prognóstico do vento na Região Central de Alagoas - Craíbas**. Ciência e Natura, Vol. 40, p. 187-192, 2018, Edição Especial: X Workshop Brasileiro de Micrometeorologia , Campus de Santa Maria – RS (UFSM), 2018.

SILVA, S. M. S; LYRA, R. F. F.; SILVA JÚNIOR, R. S.; CRUZ, N. S. D.; SANTOS SILVA, S. **Avaliação da estimativa da velocidade de fricção pelo modelo WRF na região central de Alagoas (Craíbas)**. Anais do X Workshop Brasileiro de Micrometeorologia, Santa Maria-RS (UFSM), 2018.

SOZZI, R.; FAVARON, M.; GEORGIADIS, T. **Method for estimation of surface roughness and similarity function of wind speed vertical profile.** Journal of Applied Meteorology, Vol. 37, n. 5, p. 461-469, 1998.

STULL, R. B. **An introduction to boundary layer meteorology.** Dordrecht: Kluwer Academic Pub, 1988. 680 p.

TOLEDO FILHO, M. R.; BERLATO, M. A.; LYRA, R. F. F. **Parâmetros aerodinâmicos associados a cultivo de cana-de-açúcar no estado de alagoas.** Revista Brasileira de Meteorologia, Vol. 18, n. 2, p. 207-212, 2003.