



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

CAMYLLA MARIA NARCISO DE MELO CHAVES

**UTILIZAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO WRF PARA FINS DE GERAÇÃO
EOLIOELÉTRICA: ESTUDO DE CASO PARA MARACANAÚ, CEARÁ.**

Fortaleza

Janeiro, 2013

CAMYLLA MARIA NARCISO DE MELO CHAVES

UTILIZAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO WRF PARA FINS DE GERAÇÃO
EOLIOELÉTRICA: ESTUDO DE CASO PARA MARACANAÚ, CEARÁ.

Dissertação de Mestrado apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre.

Orientador:

Prof. Dr. Paulo Cesar Marques de Carvalho

Fortaleza

2013

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca de Pós-Graduação em Engenharia - BPGE

C438u Chaves, Camylla Maria Narciso de Melo.
Utilização do modelo numérico WRF para fins de geração eólicoelétrica: estudo de caso para Maracanaú, Ceará / Camylla Maria Narciso de Melo Chaves. – 2013.
57 f. : il., enc. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Elétrica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2013.
Área de Concentração: Fontes Renováveis de Energia.
Orientação: Prof. Dr. Paulo Cesar Marques de Carvalho.

1. Engenharia elétrica. 2. Energia eólica. I. Título.

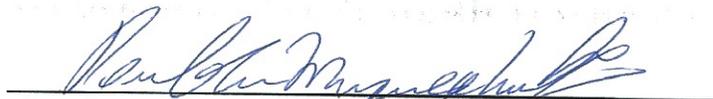
Camylla Maria Narciso de Melo Chaves

**UTILIZAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO WRF PARA FINS DE
GERAÇÃO EOLIOELÉTRICA: estudo de caso para Maracanaú-Ce**

Esta Dissertação foi julgada adequada para a obtenção de título de Mestre em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Eletrônica de Potência e Automação, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará.


Camylla Maria Narciso de Melo Chaves

Orientador:


Prof. Paulo Cesar Marques de Carvalho, Dr.

Banca Examinadora:


Prof.^a. Ruth Pastora Saraiva Leão, PhD.


Prof. João Bosco Verçosa Leal Júnior, Dr.

Fortaleza, 31 de janeiro de 2013

Aos meus pais e irmãos, pela dedicação à minha formação escolar;

Ao meu esposo Chaves pelo companheirismo,

eu dedico este trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por toda a força e coragem que me levou a finalizar mais esta etapa na minha vida.

Agradeço imensamente a minha família (Mãe, Pai, Chaves, Dan, Maió e Franks) que na reta final deste trabalho foram os grandes incentivadores deste projeto.

Ao meu esposo, Daniel Chaves, que sem o seu apoio nada disso teria se concretizado.

Ao CNPq pelo financiamento para a instalação da torre de medição utilizada na presente pesquisa através do projeto “Previsão de potencial eólico visando operação integrada ótima de unidades geradoras de eletricidade: estudo de caso para o nordeste do Brasil” que foi fundamental para a realização desse trabalho.

Ao meu orientador, Professor Dr. Paulo Cesar Marques de Carvalho por toda a sua contribuição científica, apoio intelectual e o constante incentivo ao meu crescimento. E a sua imensa paciência.

Ao meu co-orientador, Professor Dr. João Bosco Verçosa Leal Junior, pela sua total contribuição científica e apoio intelectual que foram de total importância para este trabalho.

Ao laboratório LIMMA, do Mestrado em Ciências Aplicadas da UECE, que cedeu poder computacional para realizar as simulações deste projeto.

A todos os meus amigos (em especial Patrícia, Pipito, Danielle) que sempre me incentivaram a finalizar este trabalho, me mostrando que esse projeto poderia se tornar realidade, fazendo com que eu não desistisse.

A todos os que contribuíram direta ou indiretamente para a realização desse trabalho e que eu tenha, por algum motivo, esquecido de citar.

RESUMO

O presente trabalho analisa o modelo de mesoescala WRF (Weather Research and Forecast) para verificar a sua confiabilidade na utilização como ferramenta de investigação de áreas com potencial para geração eólicoelétrica. A região escolhida para estudo foi uma fazenda localizada no município de Maracanaú, no estado do Ceará. Na fazenda foi instalada uma torre anemométrica de 80 metros de altura com 3 anemômetros, 1 biruta, 1 sensor de temperatura e um piranômetro, todos os sensores conectados a um *datalogger*. Os dados coletados nesta torre foram utilizados para comparação com os dados obtidos através das simulações no WRF. Nas simulações o modelo foi avaliado para duas situações climatológicas distintas na região, o período chuvoso e o seco. Os períodos escolhidos para realizar as simulações são: março/2012 (representando o período chuvoso) e novembro/2011 (representando o período seco). Foram realizados cinco testes de sensibilidade, nos quais foram permutadas as parametrizações da Camada Limite Planetária (CLP), Camada de Superfície (CS) e o Modelo de Solo Superfície (MSS). Os resultados das simulações foram avaliados segundo o método de correlação de *Pearson*, método este que possui parâmetros de valores de -1 a 1 onde apresenta um indicativo de correlações que vão de péssimas (-1) a ótimas (1). A simulação com o melhor desempenho no período seco e chuvoso apresentaram valores de correlações de 0,76 e 0,58, consideradas forte e moderada, para os parâmetros de *Pearson*, respectivamente. O modelo conseguiu representar de forma satisfatória o regime de vento local para a estação seca do ano, sendo necessárias mais pesquisas na área para analisar como o modelo se comporta na representação do período chuvoso. Assim este modelo apresenta resultados satisfatórios para ser utilizado como ferramenta para avaliação de regiões com potencial em geração eólicoelétrica, sendo necessárias mais pesquisas para ajustá-lo melhor.

Palavras-Chave: Energia Eólica, Modelagem atmosférica, WRF.

ABSTRACT

This paper analyzes the mesoscale model WRF (Weather Research And Forecast) to verify its reliability in use as a research tool in areas with potential for eolioelectric generation. The area chosen for study was a farm located in Maracanaú in the state of Ceará. On the farm was installed an anemometer tower of 80 meters high with three anemometers, 1 windsock, 1 temperature sensor and a pyranometer, all sensors connected to a datalogger. The data collected in this tower were used for comparison with the data obtained through simulations in WRF. In the simulations the model was evaluated for two different climatic conditions in the region, the rainy and the dry seasons. The periods chosen to perform the simulations are: March/2012 (representing the rainy season) and November/2011 (representing the dry season). Was performed five sensitivity tests, which were exchanged in the parameterizations of the Planetary Boundary Layer (PBL), Surface Layer (CS) and Ground Surface Model (GSM). The simulation results were evaluated according to the Pearson's correlation method, that one has parameter values from -1 to 1 which presents an index of correlations ranging from bad (-1) to great (1). The simulation with the best performance in the dry and rainy periods presented values for correlations of 0.76 and 0.58, respectively, considered good and fair to the Pearson's parameters. The model was able to satisfactorily represent the local wind behavior for the dry season of the year, and more research is needed in the area to analyze how the model behaves in the representation of the rainy season. Thus, this model provides satisfactory results to be used as a tool for evaluate areas with potential for eolioelectric generation, more research is needed to fit better.

Keywords: Wind energy, Atmospheric Modeling, WRF

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Proporção das fontes de energia utilizada no Brasil no ano de 2010	02
Figura 2- Proporção das fontes de energia utilizada no Brasil no ano de 2011.....	03
Figura 3- Proporção das fontes de energia utilizada no Brasil em 2012.....	03
Figura 4- Evolução da geração eólica no cenário brasileiro de 2005 a 2011.....	04
Figura 5- Potencial eólico trimestral.....	05
Figura 6- Direções das componentes do vento.....	09
Figura 7- Perfil vertical da velocidade do vento desde a superfície até a altura do vento geostrófico.....	10
Figura 8- Divisão da Troposfera.....	12
Figura 9- Modelo conceitual da circulação global atmosférica.....	13
Figura 10- Esquemas de brisa marítima.....	14
Figura 11- Esquemas de brisa terrestre.....	14
Figura 12- Desempenho do modelo para a região de Camocim.....	15
Figura 13- Resultado obtido no principal bloco de simulações.....	16
Figura 14- Paisagem da fazenda Raposa.....	18
Figura 15- Condições do terreno em volta da torre.....	19
Figura 16- Vista 360° do terreno ao redor da torre instalada.....	20
Figura 17- Visão (baixo-cima) da torre instalada.....	22
Figura 18- Desenho técnico da torre metálica.....	23
Figura 19- Esquema de conexão do painel solar com o <i>ipack</i>	24
Figura 20- <i>Data logger</i> instalado na torre em estudo.....	25
Figura 21- Tipo de anemômetro instalado na torre de Maracanaú.....	27
Figura 22- Anemômetro instalado na torre de Maracanaú.....	27
Figura 23- Sensor de direção instalado na torre de Maracanaú.....	28
Figura 24- Tipo de sensor de temperatura instalado na torre de Maracanaú.....	31
Figura 25- Tipo de piranômetro instalado na torre de Maracanaú.....	32

Figura 26- Estrutura da grade de Arakawa-C.....	34
Figura 27- Ilustração de um exemplo de aninhamento I.....	35
Figura 28- Ilustração de um exemplo de aninhamento II.....	35
Figura 29- Localização das grades no Ceará em destaque região metropolitana.....	38
Figura 30- Comparação dos resultados das médias diárias das cinco simulações realizadas com os dados observados – velocidade do vento - março/2012.....	43
Figura 31- Comparação dos resultados das médias diárias das cinco simulações realizadas com os dados observados – velocidade do vento - novembro/2011.....	44
Figura 32- Comparação dos resultados das médias diárias da simulação com o melhor resultado (<i>simul_3</i>) com os dados observados – velocidade do vento - março/2012.....	45
Figura 33- Comparação dos resultados das médias diárias da simulação com o melhor resultado (<i>simul_3</i>) com os dados observados – velocidade do vento - novembro/2011.....	46
Figura 34-Rosa dos ventos - dados observados - março/2012.....	47
Figura 35- Rosa dos ventos - dados simulados - março/2012.....	48
Figura 36- Rosa dos ventos - dados observados - novembro/2011.....	49
Figura 37- Rosa dos ventos - dados simulados - novembro/2011.....	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Cenário da matriz energética brasileira no ano de 2007 e a prospecção para 2050..	04
Tabela 2- Escala de tempo e espaço dos movimentos atmosféricos.....	11
Tabela 3- Características de construção da torre.	23
Tabela 4- Tipos de sensores e as alturas de instalação.	24
Tabela 5- Parâmetros lógicos dos sensores instalados.	25
Tabela 6- Especificações técnicas do <i>datalogger</i>	26
Tabela 7- Parâmetros construtivos do anemômetro instalado na torre de Maracanaú.....	26
Tabela 8- Parâmetros de calibração dos anemômetros instalados na torre de Maracanaú.....	28
Tabela 9- Parâmetros construtivos da biruta instalada na torre.....	29
Tabela 10- Parâmetros de função da transferência do sensor de direção.....	29
Tabela 11- Parâmetros construtivos do sensor de temperatura instalado na torre.....	30
Tabela 12- Parâmetros da função linear de transferência sensor de temperatura.....	30
Tabela 13- Parâmetros construtivos do piranômetro instalado na torre.....	31
Tabela 14- Principais tipos de esquemas físicos do modelo WRF.....	36
Tabela 15- Tipos de parametrizações de alguns esquemas físicos no modelo WRF.....	36
Tabela 16- Configuração das grades utilizadas nas simulações.....	37
Tabela 17- Configuração <i>simul_1</i>	39
Tabela 18- Configuração da <i>simul_2</i>	39
Tabela 19- Configuração da <i>simul_3</i>	39
Tabela 20- Configuração da <i>simul_4</i>	40
Tabela 21- Configuração da <i>simul_5</i>	40
Tabela 22- Valores dos critérios da correlação de Pearson.....	40
Tabela 23- Valores de correlações para o mês de novembro/2011.....	42
Tabela 24- Valores de correlações para o mês de março/2012.....	42

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Energia eólica no Brasil.....	1
1.2. Prospeção do potencial eólico.....	5
1.3. Objetivos	7
1.3.1 Objetivo Geral	7
1.3.2 Objetivos Específicos	7
1.4. Metodologia Geral	8
1.5. Estrutura do Trabalho	8
2. VISÃO GERAL SOBRE VENTO, ATMOSFERA E MODELOS DA ATMOSFERA	9
2.1 Ventos locais e circulação atmosférica	9
2.1.1. <i>Vento e suas escalas de movimento.....</i>	<i>9</i>
2.1.2. <i>Camada limite atmosférica</i>	<i>11</i>
2.1.3. <i>Circulação geral da atmosférica.....</i>	<i>12</i>
2.1.4. <i>Circulações locais.....</i>	<i>14</i>
2.2. Utilização de modelagem numérica para previsão de vento no setor eólico	15
3. MATERIAL E MÉTODOS DA TORRE ANEMOMÉTRICA E SIMULAÇÕES ..	18
3.1. Região em Estudo.....	18
3.2. Torre Anemométrica	20
3.3. Sensores Utilizados	23
3.3.1 <i>Data logger.....</i>	<i>24</i>
3.3.2 <i>Anemômetro.....</i>	<i>26</i>
3.3.3 <i>Biruta.....</i>	<i>28</i>
3.3.4 <i>Sensor de temperatura.....</i>	<i>29</i>
3.3.5 <i>Piranômetro.....</i>	<i>31</i>
3.4. Dados Coletados	32
3.5. Modelo Atmosférico Regional – Weather Research and Forecast (WRF).....	32
3.6. Período de Estudo	37
3.7. Estrutura das Grades	37
3.8. Configuração das simulações	38

3.9. Programa Windographer	41
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	41
5. CONCLUSÕES	51
5.1. Sugestões de Projetos Futuros	52
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53
ANEXO I.....	56
ANEXO II	57

1. INTRODUÇÃO

Durante todo o século XX, a oferta de energia, obtida principalmente a partir dos combustíveis fósseis como petróleo e carvão mineral, deu suporte ao crescimento e às transformações da economia mundial. Nos primeiros anos do século XXI o cenário das fontes de energia foi colocado à prova por uma nova realidade, a necessidade do desenvolvimento sustentável.

Para se tornar realidade às perspectivas de crescimento econômicas que o Brasil almeja, o país necessitará de mais investimento na produção de energia elétrica. Este investimento ocorre desde meados do século XIX, quando a energia elétrica possuiu papel fundamental na engrenagem da sociedade industrial moderna.

O aquecimento global e os desafios das mudanças climáticas são fatores que apontam que o Brasil necessita de uma matriz energética mais diversificada, pois com essas mudanças as fontes de energia estão diminuindo a sua abundância. (1) O uso de fontes de energia não renovável traça uma trajetória negativa, não só pela característica efêmera, mas por ser uma ameaça ao meio ambiente. (2)

Dentro do contexto da diversificação da matriz energética, a energia eólica está cada vez mais forte no setor das fontes renováveis, possuindo cada vez mais lugar na matriz energética do Brasil. Vários são os benefícios da utilização da energia eólica, dentre os mais destacados está o custo “zero” de seu combustível, mais o principal benefício está na disponibilidade do seu combustível em todas as partes do mundo e o reduzido impacto ambiental. Estes e outros fatores são razões pelas quais a energia eólica tem consolidado seu espaço entre as demais fontes de energia.

Para que a energia eólica esteja cada vez mais inserida na matriz energética brasileira é necessário levar em consideração algumas das dificuldades que a cercam, e tentar minimizá-las para que as barreiras para sua implantação sejam diminuídas.

1.1. Energia eólica no Brasil

Devido ao momento de crescimento econômico que o Brasil vivencia, o consumo de energia elétrica está aumentando proporcionalmente à evolução deste crescimento. Tal fato

nos leva a questionar sobre a segurança no suprimento de energia e os custos ambientais para atender a esse aumento no consumo. A questão ambiental é preocupante, pois se houver uma estiagem, os setores de produção de biomassa e gerações hidroelétricas são afetadas, que são algumas das principais fontes de energia.

O suprimento de energia está associado ao possível esgotamento das reservas de petróleo e a elevação dos preços dos combustíveis fósseis. Para minimizar os impactos causados por essas problemáticas, uma das soluções está na complementação da matriz energética com fontes de energia renováveis, uma vez que o meio ambiente estaria sendo poupado de suas reservas.

Em 2011, as fontes renováveis de energia ampliaram para 88,8% a participação na matriz energética brasileira, ao passo que em 2010 esse percentual era de 86,3%. Esse aumento se deve às condições hidrológicas favoráveis e ao aumento da geração eólicoelétrica.

No ano de 2007, a utilização de fontes renováveis na matriz energética brasileira foi bem inferior ao utilizado nos anos de 2010 e 2011. Em 2011 nota-se uma crescente participação de novas fontes, como a eólica e solar, e cada vez mais essas fontes renováveis estão sendo utilizadas. De acordo com a matriz energética brasileira atual, apenas 1,42 % da capacidade instalada no Brasil é proveniente da fonte eólica. Os gráficos das figuras 1, 2 e 3 mostram as proporções das fontes de energia utilizadas no Brasil nos anos de 2010, 2011 e 2012. (1)

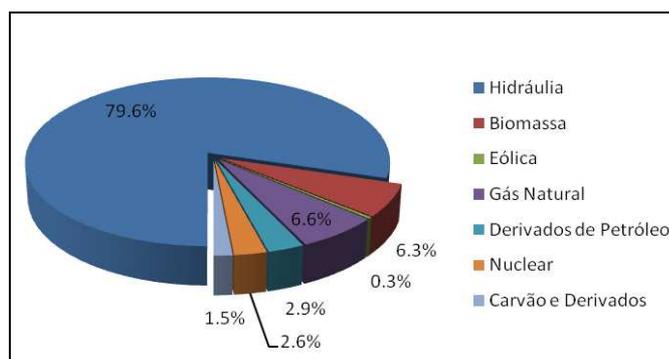


Figura 1: Proporção das fontes de energia utilizada no Brasil no ano de 2010. (1)

¹Vento Geostrófico é definido como vento uniforme e estacionário tangencial às isóbaras. Ele é proporcional ao gradiente de pressão. No Hemisfério Sul a força de Coriolis atua para a esquerda do vetor vento geostrófico e a força do gradiente de pressão para a direita. Quando as duas forças estão em perfeito balanço ocorre o vento geostrófico. (37)

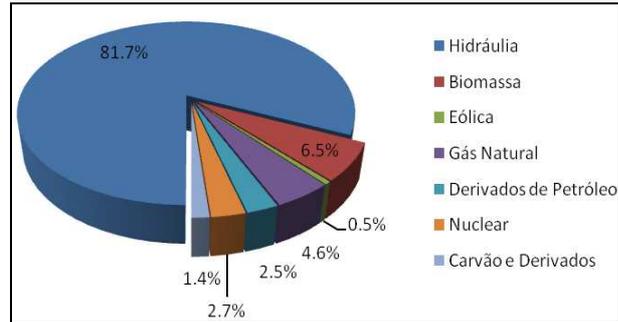


Figura 2: Proporção das fontes de energia utilizada no Brasil no ano de 2011. (1)

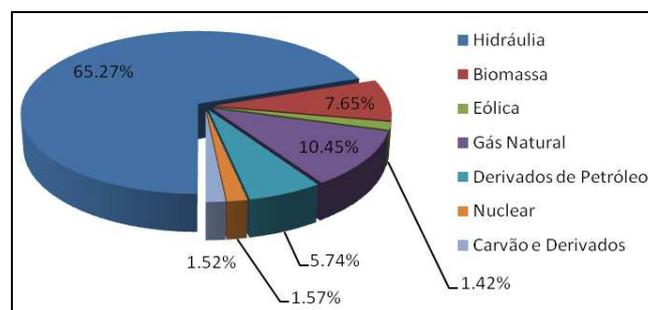


Figura 3: Proporção das fontes de energia utilizada no Brasil em 2012. (3)

Há uma previsão que em 2050 a matriz energética nacional poderá se tornar 93% composta de fontes renováveis, ao passo que em 2011 esta marca estava em 88%. Esse crescimento leva em consideração o consumo de energia elétrica sendo triplicado (1).

Dentre as diversas fontes renováveis de energia, a eólica tem adquirido destaque e mostrado que pode ter papel importantíssimo na matriz energética, pois possui requisitos necessários para a sua implantação, como o custo de produção, a sustentabilidade ambiental e a segurança no fornecimento de energia.

A figura 4 mostra a evolução da geração eolielétrica brasileira ao longo dos anos, que cresce de poucos GWh em 2005 para uma geração de aproximadamente 2500 GWh em 2011.

¹Vento Geostrófico é definido como vento uniforme e estacionário tangencial às isóbaras. Ele é proporcional ao gradiente de pressão. No Hemisfério Sul a força de Coriolis atua para a esquerda do vetor vento geostrófico e a força do gradiente de pressão para a direita. Quando as duas forças estão em perfeito balanço ocorre o vento geostrófico. (37)

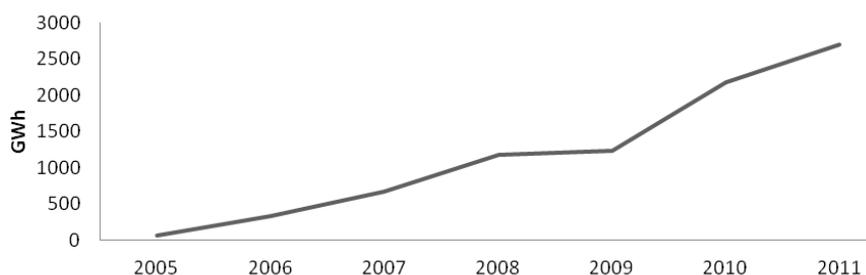


Figura 4: Evolução da geração eólica no cenário brasileiro de 2005 a 2011.

A tabela 1 esboça um cenário otimista para a matriz elétrica brasileira em 2050 e faz uma comparação com o cenário que se tinha em 2007. A evolução da participação das fontes renováveis é significativa. O destaque para a energia eólica que crescerá de 0,13% em 2007 para 20,38% em 2050. (1)

Tabela 1: Cenário da matriz energética brasileira no ano de 2007 e a prospecção para 2050. (1)

Energia	Cenário em 2007	Cenário da evolução para 2050
Hidrelétrica	84%	45,65%
Eólica	0,13%	20,38%
Biomassa	3,91%	16,60%
Carvão	1,67%	Não há projeção
Gás Natural	4,40%	Não há projeção
Óleo Combustível	1,68%	Não há projeção
Diesel	1,42%	Não há projeção
Nuclear	2,79%	Não há projeção
Solar (CSP)	-	4,01%
Solar (PV)	-	5,25%
Energia Oceânica	-	0,77%

O Brasil ocupa o sexto lugar na lista de países que mais investem em energias sustentáveis. De acordo com os dados do Boletim de Economia e Política Internacional do IPEA (Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada), em 2008, 45,9% da energia elétrica consumida no país veio de fontes renováveis, enquanto a média em outros países era de apenas 12,9%. (4)

¹Vento Geostrófico é definido como vento uniforme e estacionário tangencial às isóbaras. Ele é proporcional ao gradiente de pressão. No Hemisfério Sul a força de Coriolis atua para a esquerda do vetor vento geostrófico e a força do gradiente de pressão para a direita. Quando as duas forças estão em perfeito balanço ocorre o vento geostrófico. (37)

Com um potencial eólico estimado de 143 GW, o Brasil tem uma posição privilegiada no cenário mundial da energia eólica. Tal abundância se verifica principalmente nas regiões Nordeste, Sudeste e Sul, com predominância das regiões costeiras, como mostra em destaque os mapas do potencial eólico trimestral no Brasil na figura 5.

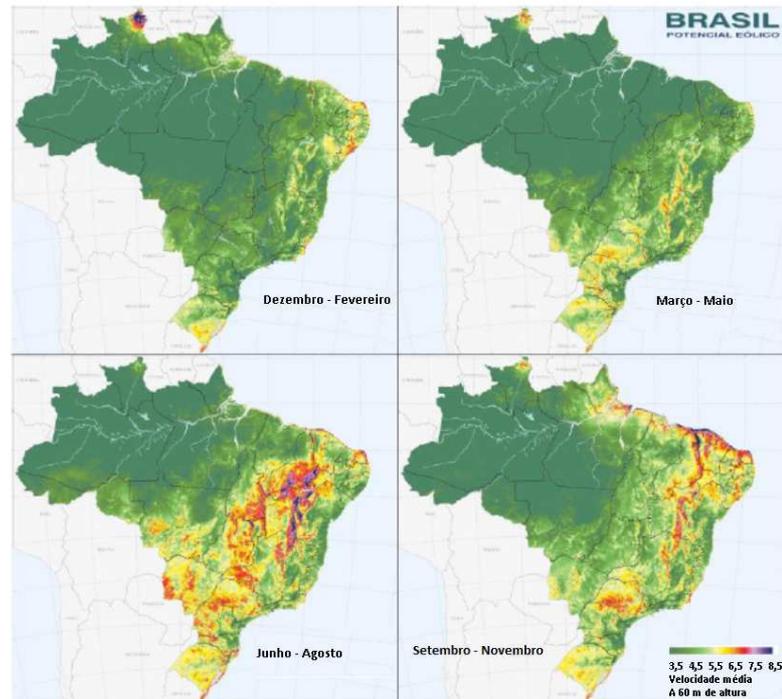


Figura 5: Potencial eólico trimestral. (5)

1.2. Prospecção do potencial eólico

Um dos grandes questionamentos em um projeto eólico é o custo necessário para investigação de áreas com potencial para geração eolielétrica. Para que uma determinada área seja escolhida para o desenvolvimento de um projeto é necessário um profundo conhecimento do regime e padrão de vento presente nesta área. A caracterização inicial de possíveis áreas para investimento de um projeto eólico é um desafio árduo, devido à falta de dados e informação de qualidade no que se refere ao regime de ventos.

Uma das formas de se caracterizar uma área é realizar campanhas de medição no local do projeto, o que leva o investidor a instalar torres anemométricas na área do projeto. As

¹Vento Geostrófico é definido como vento uniforme e estacionário tangencial às isóbaras. Ele é proporcional ao gradiente de pressão. No Hemisfério Sul a força de Coriolis atua para a esquerda do vetor vento geostrófico e a força do gradiente de pressão para a direita. Quando as duas forças estão em perfeito balanço ocorre o vento geostrófico. (37)

campanhas de medição podem representar um investimento inicial oneroso, já que é necessário instalar, dependendo da área do projeto, mais de uma torre anemométrica. Um dos fatores que contribui para as campanhas de medições serem onerosas é o inevitável custo com as devidas manutenções e possíveis substituições de sensores, o que eventualmente ocorre devido à fragilidade dos equipamentos.

As torres possuem, em sua maioria, três níveis de medição, sendo em cada um destes níveis instalado um anemômetro e dois cataventos. A maioria das torres anemométricas possuem também sensores de medição de temperatura, umidade relativa e pressão atmosférica. (6)

Estas campanhas de medição têm normalmente uma duração mínima recomendada de dois anos, podendo ser estendidas por mais tempo, o que beneficia a caracterização do local, tornando conseqüentemente mais confiável as estimativas de produção. (6)

Depois de finalizadas as campanhas de medição, os dados obtidos serão tratados adequadamente, sendo utilizados posteriormente modelos de microescala: WASPTM, produzido nos Laboratórios Risø, na Dinamarca; VentosTM, desenvolvido pelo Centro de Estudos de Energia Eólica e Escoamentos Atmosféricos, CEESA, da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto para o estudo das estimativas de produção. (6)

Além de toda a parte do custo envolvido nas campanhas de medição, existe sempre o risco associado de que o local escolhido seja um local não apropriado para investimentos eólicos, o que levará ao abandono do projeto e tornará impossível a recuperação do investimento.

Devido aos altos custos que as campanhas de medição trazem, e a não garantia de sucesso na área escolhida, os pesquisadores veem buscando alternativas para caracterização das áreas de interesse. Os modelos de mesoescala estão sendo avaliados como uma ferramenta eficaz para verificação de possíveis áreas com potencial eólico. (7)

Os modelos de mesoescala estão destinados para a previsão meteorológica de escalas regionais (centenas ou dezenas de quilômetros de resolução), mas também são capazes de produzir resultados para altas resoluções (inferiores a 5 km), normalmente necessárias nos casos de estudo do regime local de ventos no contexto da geração eolielétrica.

¹Vento Geostrófico é definido como vento uniforme e estacionário tangencial às isóbaras. Ele é proporcional ao gradiente de pressão. No Hemisfério Sul a força de Coriolis atua para a esquerda do vetor vento geostrófico e a força do gradiente de pressão para a direita. Quando as duas forças estão em perfeito balanço ocorre o vento geostrófico. (37)

As simulações de modelos de mesoescala devem ser encaradas não como um produto final, mas como uma importante base de partida para o passo inicial de um projeto eólico. A vantagem de utilizar modelos de mesoescala na avaliação de possíveis áreas de interesse torna-se então clara: poder avaliar áreas sem ter os custos elevados de instalação de torres anemométricas. Os benefícios em possuir uma ferramenta de pré-análise que permita determinar possíveis áreas com potencial para geração eólica é determinante para se decidir a hora de investir em campanhas de medição.

Modelos numéricos de mesoescala podem, então, serem utilizados para simular o campo horizontal do vento numa área extensa e, assim, observar quais são as zonas com maior recurso eólico (os chamados “*hot spots*”), permitindo o início das campanhas de medição com um satisfatório grau de conhecimento do regime de vento da área do projeto. (8)

Estes tipos de modelos de mesoescala devem ser encarados como um acréscimo valioso de informação na elaboração de um projeto de um parque eólico, e como uma ferramenta de pré-avaliação do projeto. É, no entanto, de se esperar que no futuro próximo a investigação e inovação científica tornem estes modelos cada vez mais confiáveis e capazes, podendo um dia, quem sabe, substituir as campanhas de medição.

1.3. Objetivos

A seguir são apresentados os objetivos gerais e específicos da presente dissertação.

1.3.1 Objetivo Geral

Analisar o modelo de mesoescala WRF (*Weather Research and Forecast*) e verificar a sua adequação na utilização como ferramenta de investigação de áreas com potencial para geração eolielétrica, propondo assim uma ferramenta para minimizar os custos na concepção de um projeto eólico.

1.3.2 Objetivos Específicos

- a) Validar o modelo WRF (*Weather Research and Forecast*), alterando parametrizações de três esquemas físicos.
- b) Verificar a melhor configuração do modelo para o período seco e chuvoso, para a variável velocidade do vento, através do método de correlação *Pearson*.

¹Vento Geostrófico é definido como vento uniforme e estacionário tangencial às isóbaras. Ele é proporcional ao gradiente de pressão. No Hemisfério Sul a força de Coriolis atua para a esquerda do vetor vento geostrófico e a força do gradiente de pressão para a direita. Quando as duas forças estão em perfeito balanço ocorre o vento geostrófico. (37)

c) Utilizar o programa Windographer para analisar as variáveis velocidade e direção do vento, verificando os seus comportamentos em relação aos dados observados da torre anemométrica.

1.4. Metodologia Geral

O presente estudo contempla a confiabilidade da utilização do modelo numérico WRF como ferramenta para investigação de áreas com potencial para geração eólicoelétrica. Foram realizados ajustes de parametrizações do modelo para definir a melhor configuração para os dois períodos analisados nesta dissertação, seco e chuvoso. Períodos estes que influenciam diretamente as condições de vento que temos na região em estudo.

Para definir qual a melhor configuração do modelo que se adequa a região estudada é utilizado o método de correlação de *Pearson*, que compara os dados simulados no modelo aos dados coletados na torre anemométrica. Este método atribui valores de -1 a 1, que classifica as correlações entre péssimas a ótimas, respectivamente. Depois é realizada a análise dos dados através do software Windographer, analisando os dados de velocidade e direção do vento para verificar a destreza do modelo em simular o comportamento das condições do vento com os dados observados da região. Por fim, verificar se o modelo pode ser usado como ferramenta para prever áreas com potencial eólicoelétrico.

1.5. Estrutura do Trabalho

O presente trabalho é estruturado em cinco capítulos. O primeiro capítulo apresenta a contextualização, as motivações e os objetivos do trabalho.

O segundo capítulo apresenta a revisão da literatura sobre os temas relacionados à pesquisa sugerida.

O terceiro capítulo aborda os materiais e métodos utilizados neste estudo, relatando condições da torre anemométrica utilizada, região escolhida para estudo, sensores utilizados, dados de vento, modelo numérico utilizado, período em estudo e simulações realizadas.

O quarto capítulo aborda os resultados do estudo.

O quinto capítulo apresenta as conclusões.

¹Vento Geostrófico é definido como vento uniforme e estacionário tangencial às isóbaras. Ele é proporcional ao gradiente de pressão. No Hemisfério Sul a força de Coriolis atua para a esquerda do vetor vento geostrófico e a força do gradiente de pressão para a direita. Quando as duas forças estão em perfeito balanço ocorre o vento geostrófico. (37)

2. VISÃO GERAL SOBRE VENTO, ATMOSFERA E MODELOS DA ATMOSFERA

2.1 Ventos locais e circulação atmosférica

2.1.1. Vento e suas escalas de movimento

O vento possui diversas definições na literatura, sendo que na maioria das abordagens, o aquecimento desigual da superfície é vinculado à sua origem. Uma definição que se encontra na literatura é que o vento é entendido pelo movimento de parcelas de ar nas atmosferas planetárias, sendo a ação da força de gradiente de pressão o agente principal que cria o vento. (9) A energia contida no vento é na realidade uma forma secundária de energia solar. (10) A terra e o oceano absorvem a radiação solar e aquecem ao seu redor. Em torno de 1 a 2% da potência solar incidente é convertida em vento.

O ar em movimento possui componentes na horizontal e na vertical. O vento horizontal é composto do vento zonal (u), positivo no sentido de oeste para leste, e o vento meridional (v) que é positivo no sentido sul para norte. O vento na vertical é representado pela letra w e é considerado positivo em movimentos ascendentes. A figura 6 apresenta as direções das componentes.

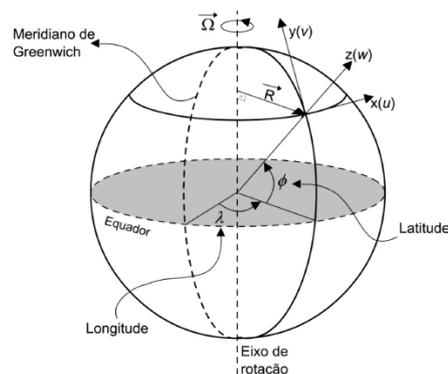


Figura 6: Direções das componentes do vento. (9)

Os ventos são bastante variáveis, muitos locais estão expostos a frequentes ventos fortes, enquanto outras quase não apresentam ventos. A velocidade do vento é nula a alturas

1 Vento Geostrófico é definido como vento uniforme e estacionário tangencial às isóbaras. Ele é proporcional ao gradiente de pressão. No Hemisfério Sul a força de Coriolis atua para a esquerda do vetor vento geostrófico e a força do gradiente de pressão para a direita. Quando as duas forças estão em perfeito balanço ocorre o vento geostrófico. (37)

próximas à superfície e aproximadamente geostrófica¹ na atmosfera livre. Na camada superficial e limite observa-se um perfil vertical aproximadamente logarítmico do módulo da velocidade do vento, como mostra a figura 7.

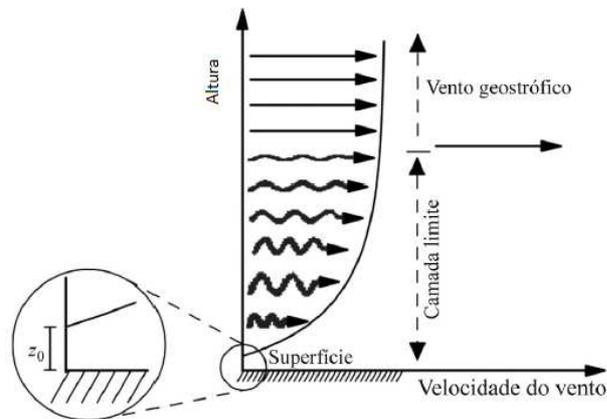


Figura 7: Perfil vertical da velocidade do vento desde a superfície até a altura do vento geostrófico. (9)

A equação 1 esboça a expressão logarítmica que fornece a variação da velocidade do vento na vertical de acordo com a posição na camada limite turbulenta

$$v(Z) = \frac{v^*}{\kappa} \ln \frac{Z}{Z_0} \quad \text{Eq. 1}$$

onde Z é a altura vertical, Z_0 é o comprimento de rugosidade, v^* velocidade de fricção e κ a constante de Von Karmán. O comprimento da rugosidade corresponde à altura em que o vento, próximo à superfície, assume o valor de zero e depende do relevo e obstáculos da superfície. (9) Uma das forças principais que influenciam o movimento do ar é a força de Coriolis, que representa a aceleração aparente provocada pela rotação da Terra.

¹Vento Geostrófico é definido como vento uniforme e estacionário tangencial às isóbaras. Ele é proporcional ao gradiente de pressão. No Hemisfério Sul a força de Coriolis atua para a esquerda do vetor vento geostrófico e a força do gradiente de pressão para a direita. Quando as duas forças estão em perfeito balanço ocorre o vento geostrófico. (37)

Essa força só entra em ação após o vento iniciar o movimento, sendo responsável por modificar o movimento e não por participar da produção do vento. (11)

Dentre as atuações principais da força de Coriolis está a responsabilidade por modificar a direção do vento, sendo a sua ação sempre perpendicular ao movimento. O movimento desta força promove a curvatura de trajetórias para a direita no hemisfério norte e para a esquerda no hemisfério sul.

As escalas de movimento do ar são faixas de deslocamento atmosféricos devidos aos movimentos aleatórios de moléculas individuais na circulação, envolvendo a atmosfera inteira. As escalas de movimentos de ar estão descritas na tabela 2.

Tabela 2: Escala de tempo e espaço dos movimentos atmosféricos. (11)

Escala	Comprimento do Fenômeno	Tempo de duração	Exemplo
Microescala	Menos de 1 km	Segundos a minutos	Turbulência, rajadas
Mesoescala	1 a 100 km	Minutos a dias	Tornados, brisas
Escala Sinóptica	100 a 5.000 km	Dias a semanas	Ciclones, furacões
Escala Planetária	1000 a 40.000 km	Semanas a anos	Alísios

2.1.2. Camada limite atmosférica

A atmosfera da Terra é dividida em camadas, sendo a troposfera a camada de destaque deste estudo. A troposfera, região próxima à superfície, pode ser dividida em duas partes: Camada Limite Atmosférica (CLA) ou Camada Limite Planetária (CLP), com características turbulentas, e a Atmosfera Livre (AL), que é dominada por processos associados a sistemas de larga escala. (12) A figura 8 esboça como ocorre esta divisão.

A camada limite planetária (CLP) é a região da troposfera que é diretamente influenciada pela presença da superfície da Terra e responde a forçantes superficiais, tais como forças de atrito, evaporação, emissão de poluentes entre outros, em uma escala de segundos a hora, e sua altura varia de alguns metros, 2 a 3 km. (12)

Além da topografia e rugosidade do terreno, outros fatores influenciam a estrutura da CLP. Diversos processos estão ligados à origem desta camada, onde se destaca o aquecimento devido à energia solar, a absorção dessa energia pelo solo e ventos locais. Na CLP ocorrem os principais fenômenos que afetam a vida, o estudo da CLP está diretamente ligado a várias áreas do conhecimento, dentre elas a energia eólica.

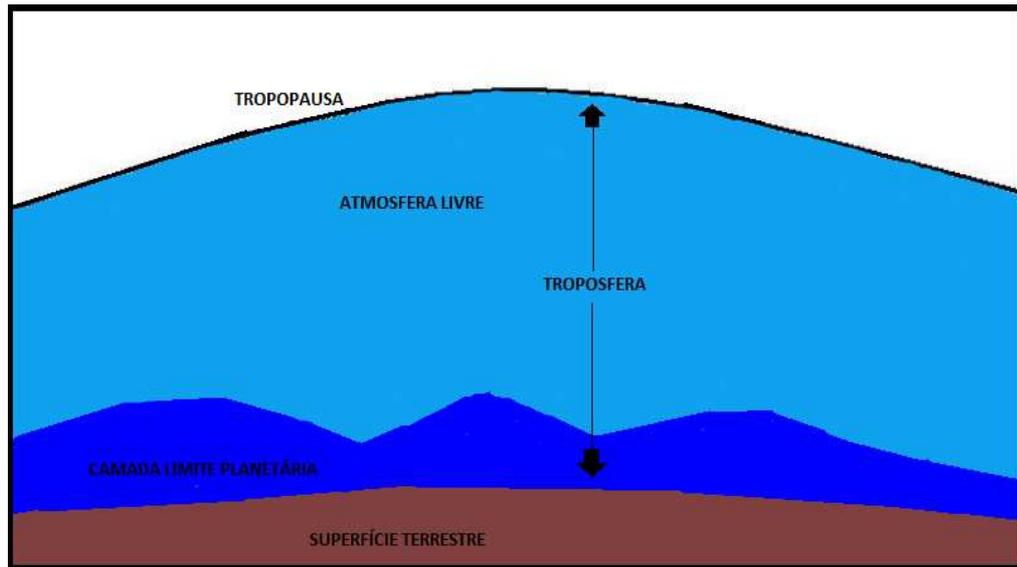


Figura 8: Divisão da Troposfera. Adaptada (12)

2.1.3. Circulação geral da atmosférica

Circulação Geral Atmosférica (CGA) são movimentos atmosféricos que mantêm o equilíbrio da energia da Terra. Movimentos atmosféricos são o resultado da conversão da energia potencial da atmosfera em energia cinética devido ao trabalho de forças relativas à pressão. A energia total da atmosfera é dividida em energia potencial e energia cinética, em que esta última corresponde a uma pequena fração da energia potencial.

A figura 9 apresenta um modelo conceitual, chamado de modelo de três células, de circulação atmosférica planetária. Neste modelo, a circulação em cada hemisfério são representados por três células meridionais de circulação, onde cada qual apresenta a sua direção predominante à superfície.

Ao aquecer-se próximo a superfície, o ar das vizinhanças do equador torna-se mais leve, ascende, resfria-se, e sua umidade condensa e precipita em forma de chuva. Chegando ao topo da troposfera terrestre, o ar, agora frio e seco, desloca-se na direção de ambos os pólos, forçado pelas parcelas de ar que continuamente ascendem a partir da superfície. Nas latitudes entre 20° e 35° Norte e Sul, o ar descende até a superfície e parte do ar descendente dirige-se para o Equador em baixos níveis, fechando, assim, células que, são chamadas células de Hadley. (9)

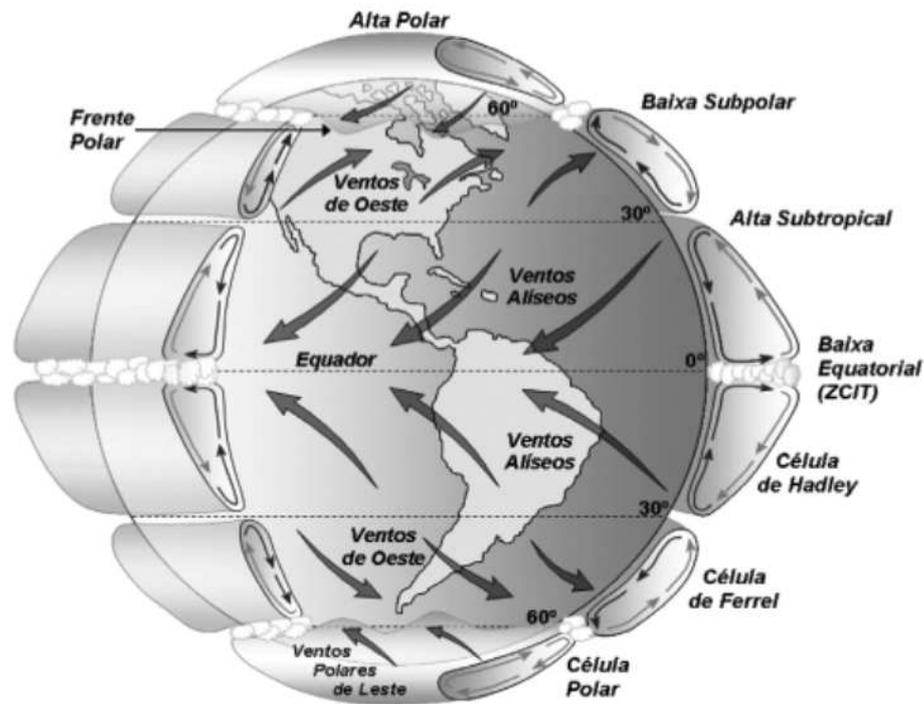


Figura 9: Modelo conceitual da circulação global atmosférica. (9)

Os ventos alísios ocorrem predominantemente em baixos níveis, na região tropical. Nas células de Hadley as correntes de ar dirigidas para o equador na superfície, são defletidas pela força de Coriolis. A característica direcional deste tipo de vento é possuir uma componente de leste para oeste e uma componente dos trópicos para o Equador. (9)

No Nordeste brasileiro existe uma forte influência dos ventos alísios, que são constituídos por movimentos de massas de ar em direção a menores pressões da faixa equatorial, sendo defletidos no sentido oposto à rotação pela ação da força de Coriolis (13). No caso específico do Ceará, os ventos alísios são provenientes de uma extensa área oceânica, livre de obstáculos, o que lhes confere notável intensidade, constância e baixa turbulência.

Os ramos inferiores das células de *Hadley* justificam, portanto, a existência dos ventos alísios de nordeste no Hemisfério Norte e dos alísios de sudeste no Hemisfério Sul. A faixa de encontro dos alísios de nordeste (procedentes do hemisfério norte) com os de sudeste (procedentes do hemisfério sul) é conhecida como Zona de Convergência Intertropical ou ZCIT.

A ZCIT é uma região de pressões relativamente baixas, localizada entre 10°N e 5°S, caracterizada por uma acentuada instabilidade atmosférica que favorece o desenvolvimento de intensas correntes ascendentes, com formação de grandes nuvens convectivas, geradoras de precipitação abundante. (9)

2.1.4. Circulações locais

Na escala local tem-se como exemplo as brisas marítima e terrestre, ilustradas nas figuras 10 e 11. Durante o dia as massas do continente são aquecidas mais rapidamente do que o oceano, devido ao calor específico da água ser menor do que o da terra, assim o ar por ser menos denso, ascende e cria uma faixa de baixa pressão no solo que atrai o ar mais denso do mar, assim formando um ciclo de fluxo de ar que é denominado de brisa marítima. À noite ocorre o inverso, o oceano se resfria mais lentamente fazendo com que o sentido do fluxo de ar se inverta, ocorrendo assim a brisa terrestre.

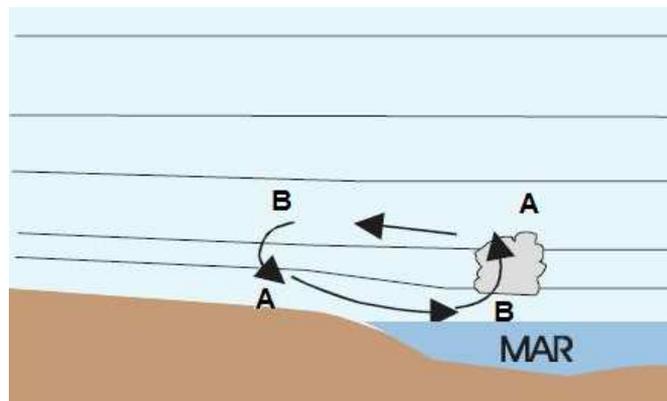


Figura 10: Esquemas de brisa marítima. Fonte: próprio

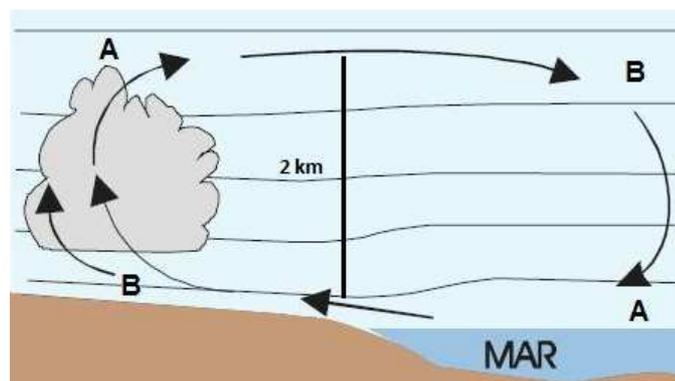


Figura 11: Esquemas de brisa terrestre. Fonte: próprio autor

2.2. Utilização de modelagem numérica para previsão de vento no setor eólico

Muitas são as pesquisas envolvidas na utilização de modelos atmosféricos de previsão de vento para auxílio na elaboração de projetos eólicos. Entre os modelos atmosféricos mais utilizados estão o WRF, fonte de estudo desta dissertação, RAMS e ETA.

Um estudo realizado no Ceará, com foco no litoral, utilizou o modelo numérico RAMS com uma alta resolução, cerca de 1 km. Foram analisadas duas regiões: o litoral Norte do Estado e em torno do litoral. Para análise foram comparados os resultados do modelo com os dados observados das torres anemométricas localizadas em Paracuru e Camocim e dados de Plataformas de Coletas de Dados – PCDs da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos – FUNCEME. (14)

A figura 12 representa a capacidade do modelo RAMS em prever os dados observados, e como a utilização da correção linear e polinomial é positiva para o ajuste dos resultados. O modelo mostrou-se eficaz para o propósito do estudo, verificando que o modelo em alta resolução pode ser utilizado para previsão de geração de energia eólica em curto prazo e para identificar áreas com potencial eólico. (14)

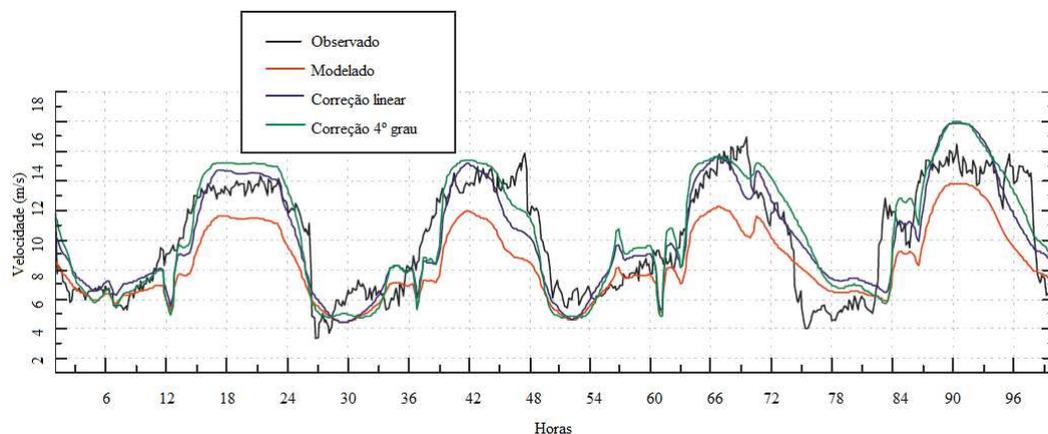


Figura 12: Desempenho do modelo para a região de Camocim. Adaptada (14)

O modelo **ETA** foi utilizado em um estudo para realizar o mapeamento eólico do Nordeste do Brasil utilizando uma resolução de 10 km e as simulações foram realizadas para altura de 50 metros. Os resultados abordaram categoricamente áreas propícias para geração eolielétrica, como a Chapada Diamantina na Bahia, Rio Grande do Norte, Pernambuco e regiões na divisa do Ceará com Piauí. As regiões indicadas no estudo, com velocidade de

vento mais intensas, correspondem às áreas citadas no Atlas do Potencial Eólico Brasileiro. (15)

Em estudo realizado em Portugal, propôs avaliar e testar a qualidade das simulações para intensidade e direção do vento, próximo da superfície, utilizando o modelo numérico WRF na versão 3.0.1. O modelo foi avaliado com testes de sensibilidade para diversas condições diferentes de configuração do modelo. Foram testadas diversas situações (simulação B.1, B.2 e B.3) de parametrizações para verificar o comportamento do vento em uma região de Portugal. (6)

O modelo WRF se mostra capaz de reproduzir os pontos com altas velocidades, mostrando ser uma ferramenta extremamente importante no estudo e planejamento de parques eólicos. A figura 13 mostra o desempenho do modelo para um dos principais blocos de simulações. (6)

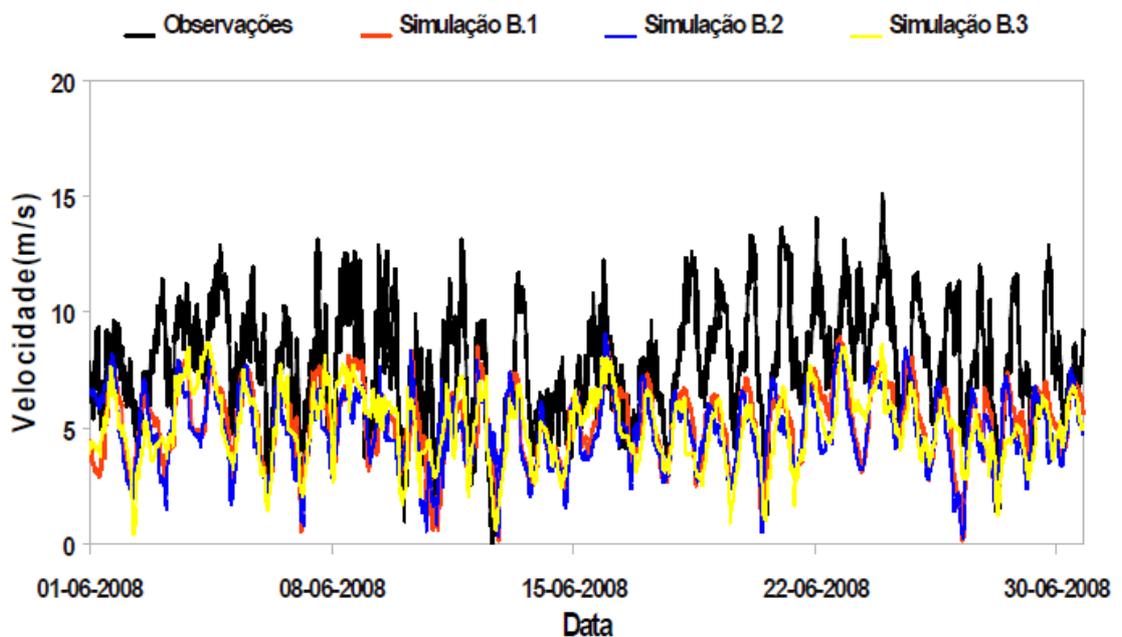


Figura 13: Resultado obtido no principal bloco de simulações. Adaptada (6)

O modelo WRF foi utilizado para se obter o levantamento do potencial eólico do estado de Minas Gerais e da sua vizinhança. Nesse estudo foram utilizados dados de algumas estações meteorológicas espalhadas pelo estado de Minas Gerais. O objetivo do trabalho foi verificar se o levantamento do potencial produzido pelo modelo WRF estava de acordo com o potencial eólico da região já existente, e também verificar áreas propícias para instalação de parques eólicos. Os resultados das simulações mostraram que os resultados do modelo, referente à velocidade do vento, apontaram valores geralmente superiores aos das torres

comparadas, mas que de uma forma geral, o comportamento do vento foi bem representado. (7)

A comparação entre as áreas apontadas com bom potencial eólico pelas simulações e as observadas no mapa eólico de Minas Gerais mostrou uma similaridade nas áreas escolhidas, entretanto quantitativamente algumas divergências foram encontradas. Ao final concluiu-se que o modelo apresentou ser uma boa ferramenta para a simulação numérica de potencial eólico regional. (7).

Um trabalho realizado em regiões da Europa buscou avaliar a qualidade do modelo numérico WRF para prever dados de vento, com o foco no aproveitamento do recurso eólico. Portugal, Polônia, Romênia e Cabo Verde foram as áreas selecionadas para as simulações. As simulações obtiveram 6 ou 12 meses de dados, que foram comparados aos dados de 14 estações meteorológicas em Portugal, 6 na Polônia, 14 na Romênia e 4 na Ilha de Cabo Verde. (16)

O método de avaliação se baseou em erro médio quadrático (RMSE), erro sistemático (BIAS), desvio padrão (STDE), coeficiente de correlação, semelhança entre as rosas dos ventos, rosas dos ventos de produção de energia e histograma da intensidade do vento. Os resultados de uma forma genérica indicam que o modelo WRF, por algumas vezes, não consegue prever bem as velocidades máximas, mas consegue de forma satisfatória uma boa correlação com os dados das estações. (16)

Em Alagoas foi realizado um estudo para produzir o mapeamento do potencial eólico do estado utilizando o modelo numérico **WRF** (para os estudos de mesoescala), WAsP (para o cálculo espacial da velocidade do vento em microescala) e o ArcGIS (para tratamento dos dados). Foram utilizadas três estações anemométricas que foram distribuídas em mesorregiões no estado: sertão, agreste e litoral. (17)

O período em estudo compreende agosto/2007 a julho/2008. O modelo apresentou os seguintes pontos positivos: mais destreza em áreas que ficavam mais longe do litoral, o padrão médio da velocidade do vento foi bem representado tanto nas estações seca como chuvosa, representou efeitos meteorológicos da região satisfatoriamente. (27)

Alguns pontos negativos são levantados. Os principais foram: o modelo não representou bem os máximos e mínimos da velocidade do vento, e isto foi verificado em outros estudos utilizando o WRF; a qualidade dos resultados é inferior no período chuvoso.

(17). As conclusões deste estudo realizado em Alagoas muito se assemelham aos resultados obtidos nesta dissertação.

3. MATERIAL E MÉTODOS DA TORRE ANEMOMÉTRICA E SIMULAÇÕES

3.1. Região em Estudo

A localidade em estudo situa-se aproximadamente a 18 km do litoral de Fortaleza/CE, no município de Maracanaú. A Universidade Federal da Ceará - UFC possui uma propriedade chamada de Fazenda Raposa, no município de Maracanaú. Esta Fazenda é considerada a maior reserva de carnaubeira do mundo. A figura 14 retrata uma imagem bem característica da fazenda.



Figura 14: Paisagem da fazenda Raposa. Fonte: próprio autor

O projeto “Previsão de potencial eólico visando operação integrada ótima de unidades geradoras de eletricidade: estudo de caso para o nordeste do Brasil” que tem como objetivo o

estudo de previsão de potencial eólico, contempla entre outras atividades a instalação de três torres anemométricas pelo Nordeste, para que através da coleta de informações sobre o vento possa obter dados suficientes para utilizá-los no estudo da previsão de vento para geração eolielétrica. Uma das três torres vinculada ao projeto foi instalada na Fazenda Raposa, área de estudo desta pesquisa.

O terreno onde a torre foi instalada é considerado adequado e garante a obtenção de registros de vento representativos para uma satisfatória caracterização dos recursos eólicos do local. Tal afirmação é assegurada pela posição de instalação da torre, que levou em conta aspectos da orografia, de rugosidade do solo e influências de obstáculos. Os dados provenientes destas medições realizadas foram utilizados no estudo aqui realizado. A figura 15 ilustra a posição em que a torre foi instalada e aborda uma visão mais abrangente das condições do terreno próximo à torre.

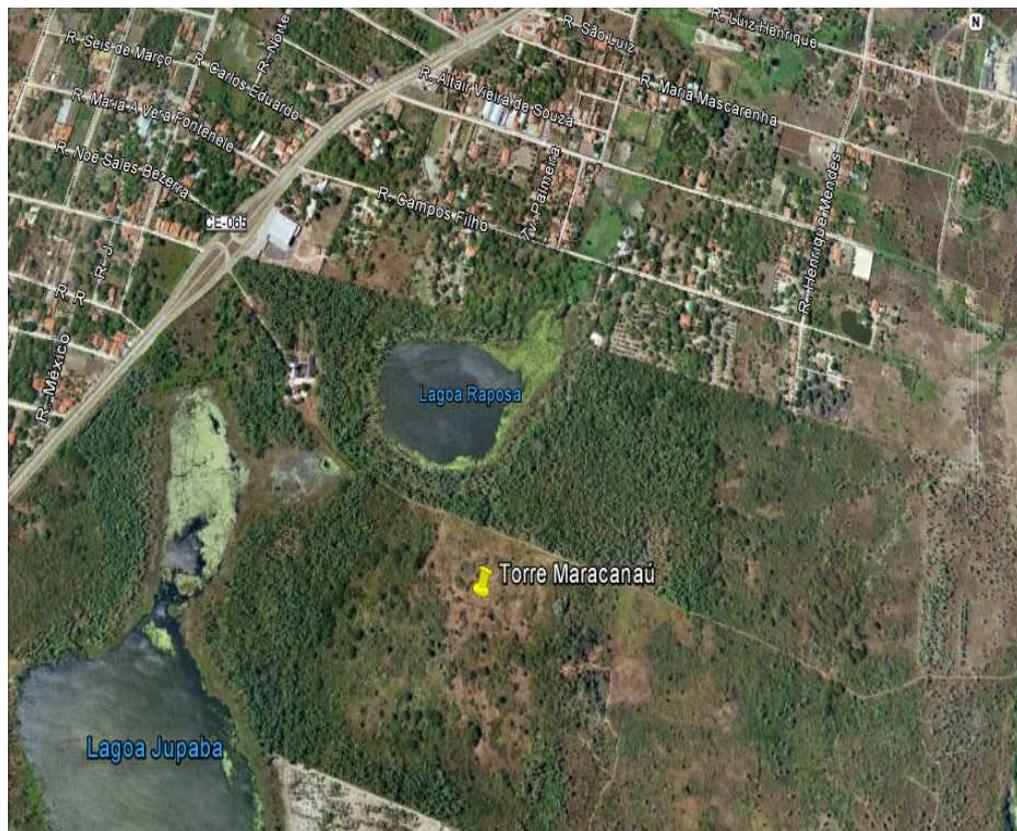


Figura 15: Condições do terreno em volta da torre.

A figura 16 caracteriza as condições do terreno onde foi instalada a torre anemométrica, em setores de 30°, que retrata as características de relevo, rugosidade e obstáculos em torno da torre anemométrica.

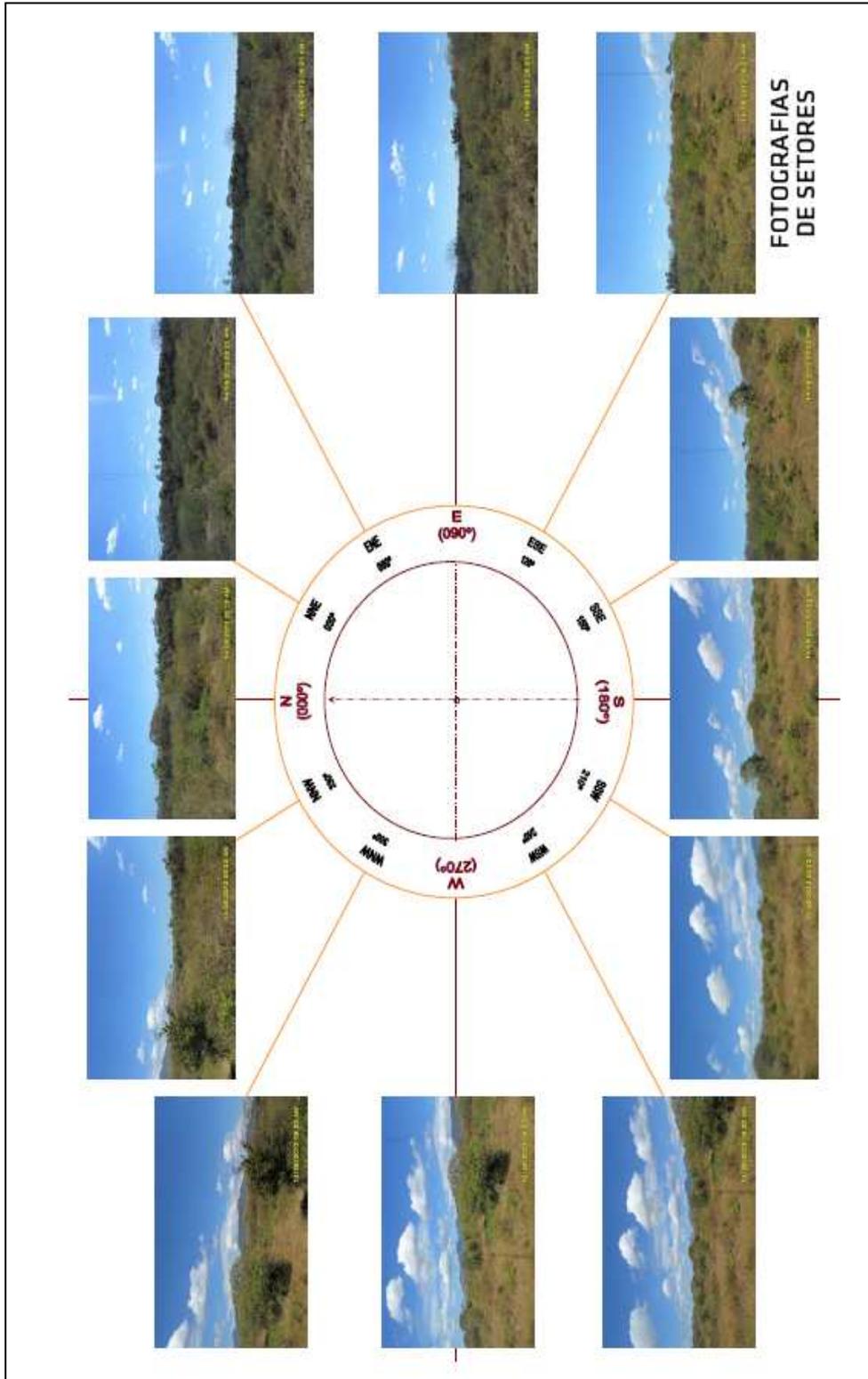


Figura 16: Vista 360° do terreno ao redor da torre instalada. Fonte: próprio autor

O ponto de localização da torre está nas seguintes coordenadas geográficas: $3^{\circ} 50' 54.99''$ S e $38^{\circ} 38' 5.83''$ W e em UTM 540.530 9.574.598, e situa-se no terreno com uma

elevação de aproximadamente 54 m. O início do funcionamento dos sensores foi no dia 07/10/2011 e registrou para esta data uma declinação magnética (DM) no local de 21°.

Geralmente, as torres são estruturas metálicas que dão suporte aos equipamentos que compõem o sistema de aquisição de dados de vento, como ilustrada na figura 17. As torres metálicas utilizadas em campanhas de medição de vento devem ter seus elementos estruturais dimensionados para atender os níveis de carregamentos mecânicos induzidos pelas condições de vento no local, e ainda mitigar a influência da estrutura no fluxo de vento no seu entorno.

As especificações dos equipamentos, bem como os procedimentos adotados na instalação da torre anemométrica, seguem algumas das mais avançadas metodologias utilizadas no mundo e visam à conformidade com as recomendações (18), (19). Além disso, a adoção de práticas de montagem recomendadas pelas publicações (20), (21) e (22) assegura a minimização de algumas das principais incertezas associadas à campanha de medição dos dados de vento.

As dimensões reduzidas e aspectos construtivos otimizados da torre metálica e dos suportes dos sensores permitem uma diminuta perturbação no fluxo de ar incidente nos sensores de medição do vento, associados a estes componentes.

Vale salientar que o desenvolvimento dos projetos da torre metálica e do suporte dos sensores contou com a expertise técnica da BRASELCO, empresa especializada no ramo de consultoria em energias renováveis e instalação de torres anemométricas.

A influência da torre metálica no fluxo de vento está relacionada à solidez da estrutura e do respectivo coeficiente de arrasto, orientação do vento incidente e a da posição do plano de rotação dos anemômetros. A tabela 3 apresenta as principais características da torre anemométrica utilizada, especificando os principais componentes referentes à sua construção, e a figura 18 apresenta o desenho técnico.



Figura 17: Visão (baixo-cima) da torre instalada. Fonte: próprio autor

Tabela 3: Características de construção da torre.

Características técnicas	Especificação técnica
Material de Construção	Aço Carbono
Tratamento Superficial	Galvanização
Altura Total da Estrutura	80 metros
Tipo de Sustentação	Estais três pontos
Alturas de Sustentação	12 m, 24 m, 36 m, 48 m, 60 m e 78 m.
Seção Transversal	Triangular – 250 mm
Quantidade de Módulos	(13 x 6 m) (1 x 2 m)
Treliças por Módulos	15 x 400 mm
Diâmetros dos Tubos	1 ¼"
Diâmetros das Treliças	¼"
Balizamento Diurno	Pintura
Balizamento Noturno	Strobo – Mini PV

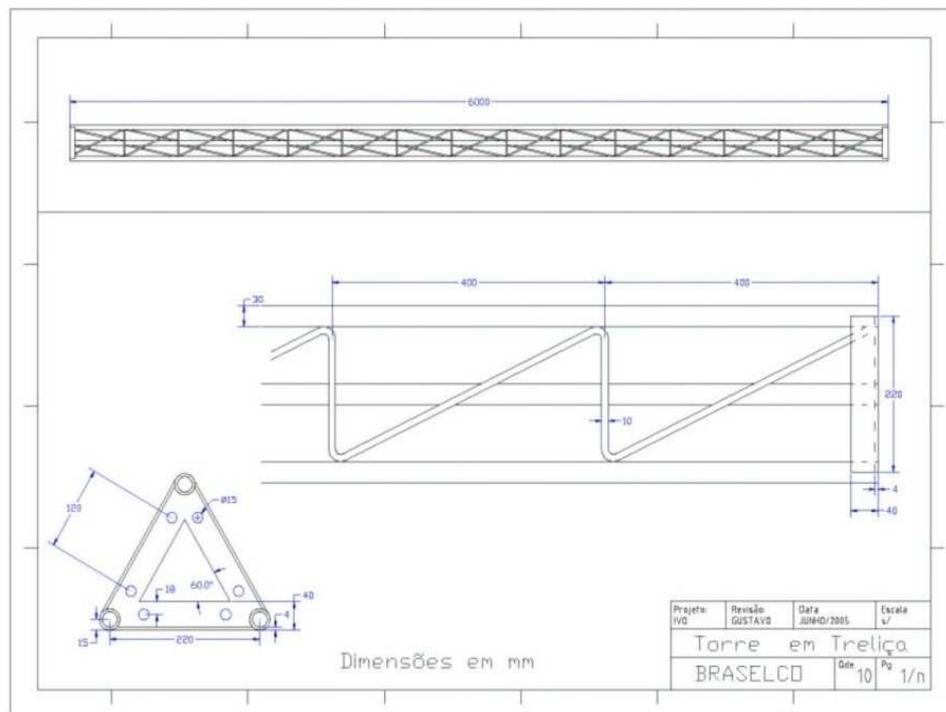


Figura 18: Desenho técnico da torre metálica.

3.3. Sensores Utilizados

Na torre foram instalados seis equipamentos essenciais para a caracterização do potencial eólico de uma região: 3 anemômetros, 1 biruta, 1 sensor de temperatura e 1 piranômetro. Os sensores instalados e as alturas específicas de instalação estão citados na tabela 4.

Tabela 4: Tipos de sensores e as alturas de instalação.

Sensores instalados	Altura de instalação
Anemômetro I	78 m
Anemômetro I	50 m
Anemômetro I	20 m
Biruta	78 m
Sensor de temperatura	13 m
Piranômetro	13 m

3.3.1 Data logger

Os dados de vento são registrados a partir de um *data logger*, especialmente desenvolvido para medições eólicas, modelo NRG Symphonie PLUS, fabricado pela NRG Systems Inc., EUA. O *data logger* utilizado na campanha de medição possui uma taxa de amostragem de 0,5 Hz (sinais instantâneos a cada 2 segundos) e foi programado para realizar registros num intervalo de integração de 10 minutos. Neste aparelho foi conectado um *ipack* fabricado pela NRG que realiza a transmissão dos dados diariamente via GPRS. O *data logger* é alimentado por bateria, e o *ipack* é alimentado por um painel solar conectado em seu sistema, que mantém o equipamento carregado, como mostra a figura 19.



Figura 19: Esquema de conexão do painel solar com o *ipack*. Fonte: próprio autor

Os parâmetros lógicos registrados pelo *data logger* para cada intervalo de integração são apresentados na tabela 5 e a figura 20 mostra o *data logger* que foi instalado na torre em estudo.

Tabela 5: Parâmetros lógicos dos sensores instalados.

Sensores	Parâmetros lógicos
Velocidade do vento 78 m	Média aritmética, desvio padrão, máximo e mínimo.
Velocidade do vento 50 m	Média aritmética, desvio padrão, máximo e mínimo.
Velocidade do vento 20 m	Média aritmética, desvio padrão, máximo e mínimo.
Direção do vento 78 m	Média vetorial, desvio padrão.
Temperatura 13 m	Média aritmética, desvio padrão, máximo e mínimo.
Radiação solar 13 m	Média aritmética, desvio padrão, máximo e mínimo.

Figura 20: *Data logger* instalado na torre em estudo. Fonte: próprio autor

Estes parâmetros, registrados diretamente pelo *datalogger*, são armazenados em cartões de memória do tipo MMC (*Multi Media Card*), com capacidade de 32 M, o que garante uma autonomia de mais de 1 ano de dados gravados.

Embora o *datalogger* permita a aplicação direta dos parâmetros de calibração, montagem e correção no sinal dos sensores instalados, estes são aplicados às séries temporais de dados de vento durante a etapa de leitura e pré-processamento das memórias de massa. Sendo assim, configurados para aplicar os parâmetros padrões de cada tipo de sensor. As principais especificações do *datalogger* utilizado, bem como a sua programação lógica seguem recomendações internacionais de (18) e (19) e são apresentados na tabela 6.

Tabela 6: Especificações técnicas do *datalogger*

Características Técnicas	Especificações Técnicas
Material que envolve	Caixa em policarbonato
Dimensões / peso	222x187x77 mm / 1,3 kg
Alimentação	2 pilhas D de 1,5V e /ou externa 12 V
Canais de cotagem	3 Anemômetros Maximun # 40C e 6 Sensores com módulo de condicionamento
Canais analógicos	2 Vanes #200P, 1 Auxiliar e 3 Sensores com módulo de condicionamento.
Autonomia	664 dias –1card 32 MB
Taxa de amostragem	0,5 Hz
Intervalo de integração	10 minutos

3.3.2 Anemômetro

Os sensores de medição da velocidade de vento utilizados no sistema de aquisição foram fabricados pela NRG Systems Inc. Todos os anemômetros instalados pertencem à linha Maximum #40.

Na linha de anemômetros Maximum #40, três copos cônicos são arranjados em um rotor horizontal. O rotor é centrado por um eixo vertical que governa um sistema de geração de sinal baseado em um elemento magnético (ímã). A cada rotação do eixo, o ímã de 4 pólos induz dois ciclos de onda senoidal em uma bobina estacionária de indução, produzindo um sinal de saída de frequência linearmente proporcional à velocidade do vento. Os copos, o corpo do rotor e a base do anemômetro são fabricados em Lexan (plástico de policarbonato preto). O eixo vertical de berílio-cobre é montado sobre um mancal autolubrificante de Teflon. A figura 20 mostra o tipo de equipamento instalado e a figura 21 mostra o equipamento instalado na torre. Os parâmetros construtivos deste anemômetro seguem as recomendações da (18) e da (19), e são apresentados na tabela 7.

Tabela 7: Parâmetros construtivos do anemômetro instalado na torre de Maracanã

Características Técnicas	Especificações Técnicas
Sentido de rotação	Anti-horário
Diâmetro do copo	50,5 mm
Diâmetro do rotor	190 mm
Peso do rotor	65 g
Altura total do sensor	75 mm
Peso total do sensor	140 g

O *datalogger* foi programado para não aplicar parâmetros de calibração individuais diretamente ao sinal de saída de cada respectivo anemômetro, sendo utilizada a função linear de transferência padrão para anemômetros Maximum #40C, definida em: (23)

$$\text{Velocidade resultante do vento [m/s]} = 0,765 \times \text{sinal [Hz]} + 0,35 \text{ m/s} \quad \text{Eq.2}$$



Figura 21: Tipo de anemômetro instalado na torre de Maracanaú. Fonte: próprio autor



Figura 22: Anemômetro instalado na torre de Maracanaú. Fonte: próprio autor

Os anemômetros utilizados para a medição do vento foram individualmente calibrados pela OTECH Engineering Inc., utilizando procedimentos de calibração em túnel de vento. Os

anemômetros calibrados individualmente, de denominação Maximum #40C, têm construção idêntica aos não calibrados (Maximum #40), entretanto, sofrem experimentação para a obtenção de uma função de transferência individual (calibração individual). Os parâmetros da calibração dos anemômetros são apresentados na tabela 8.

Tabela 8: Parâmetros de calibração dos anemômetros instalados na torre de Maracanaú.

Dados calibração	78 m	50 m	20 m
Núm. de série/copo	1795000176904	1795000164644	1795000164635
Instituto responsável	OTECH	OTECH	OTECH
Data	07/10/2011	07/10/2011	07/10/2011
Slope (m/s/Hz)	0,754	0,761	0,759
Offset (m/s)	0,40	0,37	0,41

3.3.3 Biruta

Os instrumentos de medição da direção do vento utilizados no sistema de aquisição foram fabricados pela NRG Systems Inc. e pertencem à linha de precisão #200P. Na linha de sensores de direção #200P, a cauda posterior direciona um conjunto móvel para os ventos incidentes, como mostra a figura 22.



Figura 23: Sensor de direção instalado na torre de Maracanaú. Fonte: próprio autor

O conjunto móvel do sensor é centrado por um eixo vertical diretamente conectado a um sistema de geração de sinal, baseado em um potenciômetro condutivo de resistência total de 10 k Ω e com zona morta de $\pm 4^\circ$. O potenciômetro é estacionário e se posiciona no copo do sensor. Um sinal analógico de tensão, diretamente proporcional à direção do vento, é produzido quando uma excitação constante em CC é aplicada ao potenciômetro.

O corpo do conjunto móvel e a base do anemômetro são fabricados em Lexan (plástico de policarbonato preto). A ponta de balanceamento do conjunto móvel é feita de aço inoxidável. O eixo vertical é montado sobre um rolamento de esferas. Os parâmetros construtivos do sensor de direção de vento modelo NRG #200P são apresentados na tabela 9.

Tabela 9: Parâmetros construtivos da biruta instalada na torre.

Características Técnicas	Especificações Técnicas
Comprimento do conjunto móvel	210 mm
Altura total	120 mm
Peso total	140 g
Tipo de sinal de saídas	DC analógico
Precisão do sensor	+ / - 2°
Zona morta do sensor	+ / - 4°
Compensação da zona morta	Resistor de 100 Ω

O *datalogger* foi programado para não aplicar os parâmetros de montagem diretamente no sinal de saída do sensor de direção. É utilizada a função linear de transferência padrão para sensores de direção da linha #200P:

$$\text{Direção registrada [graus]} = 0,351 \times \text{sinal [tensão CC]} + 0^\circ \quad \text{Eq. 3}$$

Os parâmetros de montagem para este tipo de equipamento são: a diferença entre o norte magnético e o norte de referência do sensor, que é representado por um *offset* na função de transferência linear, e a declinação magnética da região, sendo esta arredondada em 21° W.

Os parâmetros da função de transferência dos sensores de direção apresentados na tabela 10 foram aplicados posteriormente nas séries temporais de direção.

Tabela 10: Parâmetros de função da transferência do sensor de direção.

Sensor	Slope	Offset	Declinação Magnética
Biruta	0,351°/tensão CC	186°	21 °

3.3.4 Sensor de temperatura

Os sensores de temperatura utilizados no sistema de aquisição foram fabricados pela NRG *Systems Inc.* e pertencem à linha de precisão #110S e possuem os parâmetros construtivos apresentados na tabela 11.

Tabela 11: Parâmetros construtivos do sensor de temperatura instalado na torre.

Características Técnicas	Especificações Técnicas
Dimensões do sensor	30,5 x 12,7 mm
Dim. do sensor c/ escudo de radiação	127 x 127 mm
Peso total	470 g
Precisão	$\pm 1,11$ °C
Limites de operação	- 40°C a 52,5°C

O *data logger* foi programado para aplicar a função linear de transferência diretamente no sinal de saída do sensor de temperatura. Sendo utilizada a função linear padrão para sensores de temperatura da linha #110S. Os parâmetros da função linear de transferência são apresentados na tabela 12.

Tabela 12: Parâmetros da função linear de transferência sensor de temperatura

Sensor	Slope	Offset
Temperatura	0,136 °C/V _{cc}	-86,383°C

A constituição do sensor de temperatura é bastante simples, formado apenas de uma sonda de alumínio e estrutura de termoplástico. O sensor é excitado por uma tensão de 4 a 35 V e gera um sinal de tensão de saída de 0 a 2,5 V, proporcional à temperatura ambiente.

A estrutura de termoplástico protege a sonda de alumínio da incidência solar (raios UV) de modo a garantir uma coerência nas medições de temperatura, como mostra a figura 23.



Figura 24: Tipo de sensor de temperatura instalado na torre de Maracanaú. Fonte: próprio autor

3.3.5 Piranômetro

O sensor de radiação solar utilizado foi fabricado pela *NRG Systems Inc.* e pertence à linha de LI-200SZ. Os parâmetros construtivos estão apresentados na tabela 13. A figura 24 apresenta uma imagem do tipo de sensor instalado na torre em estudo.

Tabela 13: Parâmetros construtivos do piranômetro instalado na torre.

Características Técnicas	Especificações Técnicas
Dimensões do sensor	23,8 mm de diâmetro; 25,4 mm de comprimento.
Peso total	28 g
Unidade de Medição	W/m ²



Figura 25: Tipo de piranômetro instalado na torre de Maracanaú. Fonte: próprio autor

3.4. Dados Coletados

Os dados de vento observados foram obtidos a partir de um sistema computadorizado de aquisição de dados de vento instalado sobre uma torre treliçada, triangular e estaiada com 80 metros de altura. Os dados coletados são médias de registros de 10 em 10 minutos.

A leitura dos dados foi realizada no software Windographer, bem como a verificação da qualidade dos dados, se certificando da coerência dos mesmos. A confiabilidade dos dados está garantida no fato dos sensores de velocidade terem passado pelo processo de calibração garantido pelo instituto OTECH, e possuem uma garantia de dois anos de funcionamento. (relatórios de calibração estão no anexo II).

Os dados utilizados para a avaliação do desempenho do modelo foram coletados a 78 metros, sendo esta altura a mais próxima dos resultados do modelo, que foram simulados para a altura de 76,4 metros.

3.5. Modelo Atmosférico Regional – *Weather Research and Forecast (WRF)*

Os modelos numéricos de mesoescala são programas computacionais que conseguem simular escoamentos, incluindo os processos físicos envolvidos nos fenômenos atmosféricos. Esses modelos estão sendo utilizados pelos pesquisadores para obter um conhecimento da evolução dos processos físicos e para auxiliar na previsão do tempo.

O WRF é um modelo atmosférico regional não hidrostático, orientado para a pesquisa dos fenômenos atmosféricos de microescala, mesoescala, e para a previsão numérica do tempo. O

modelo é apto tanto para situações atmosféricas idealizadas como para situações reais, em escalas horizontais que podem ir desde alguns metros até milhares de quilômetros (24).

O modelo de previsão do tempo WRF foi utilizado operacionalmente pela primeira vez em abril de 2005 sobre a América do Norte e posteriormente para domínios na Europa e Atlântico Norte (16). Ao longo dos últimos anos foram lançadas novas versões do modelo. A comunidade científica mantém um constante investimento no aperfeiçoamento do modelo, de forma a reproduzir cada vez melhor os fenômenos atmosféricos.

O modelo WRF utilizado neste trabalho é de código livre e gratuito, criado, desenvolvido e mantido por grandes institutos de pesquisa como: *National Center for Atmospheric Research (NCAR)*, *National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)*, *National Centers for Environmental Prediction (NCEP)*, *Forecast Systems Laboratory (FSL)*, *Air Force Weather Agency (AFWA)*, *Naval Research Laboratory*, *University of Oklahoma*, *Federal Aviation Administration (FAA)* (7).

O modelo WRF foi desenvolvido a partir de melhorias realizadas no modelo MM5, o qual foi reestruturado para ser mais flexível. O modelo nesta versão é composto por alguns esquemas que são definidos abaixo.

O WPS tem a função de definir a localização e resolução do domínio a usar na simulação, interpolar e gerar mapas de dados estáticos, como a topografia e tipos de solo, e ainda interpolar as condições de fronteira para todos os pontos da malha, segundo a resolução escolhida. Estes processos são realizados recorrendo a três executáveis incluídos no WPS: *geogrid.exe*, *ungrib.exe* e *metgrid.exe* (6).

O *geogrid.exe* define os domínios do modelo e interpola os dados para a grade do domínio; o *ungrib.exe* extrai dos arquivos feitos pelo *geogrid.exe* os dados meteorológicos e o *metgrid.exe* interpola horizontalmente os dados a partir dos dados meteorológicos. (7)

Os dados meteorológicos a partir dos quais se irão construir as condições iniciais e de fronteira lateral usados pelos programas *ungrib.exe*, *metgrid.exe* e *real.exe* possuem uma grande variedade no que toca à sua resolução e disponibilidade temporal. O WPS é essencialmente responsável pela preparação dos dados de entrada para o programa *real.exe*. (6)

Após os dados serem processados pelo WPS, entra em execução o ARW. Os ficheiros de saída do WPS e WRF podem ser visualizados usando os programas gráficos: *NCAR Graphics NCL*, *GrADS* ou *VAPOR*. (8) A figura 25 esboça um esquema explicativo do funcionamento do WRF.

O WRF possui principalmente dois esquemas de funcionamento, o de eixo vertical e horizontal. Neste último eixo, o modelo se baseia pela grade do tipo Arakawa-C, no que se trata na discretização espacial de variáveis. (25) Na estrutura de grade Arakawa-C os escalares de termodinâmica e umidade são calculados no mesmo ponto e as componentes vetoriais do vento, u , v e w , são definidas nos pontos médios das dimensões da grade. (26) A figura 25 ilustra o comportamento das variáveis neste tipo de grade, onde w está representado por θ .

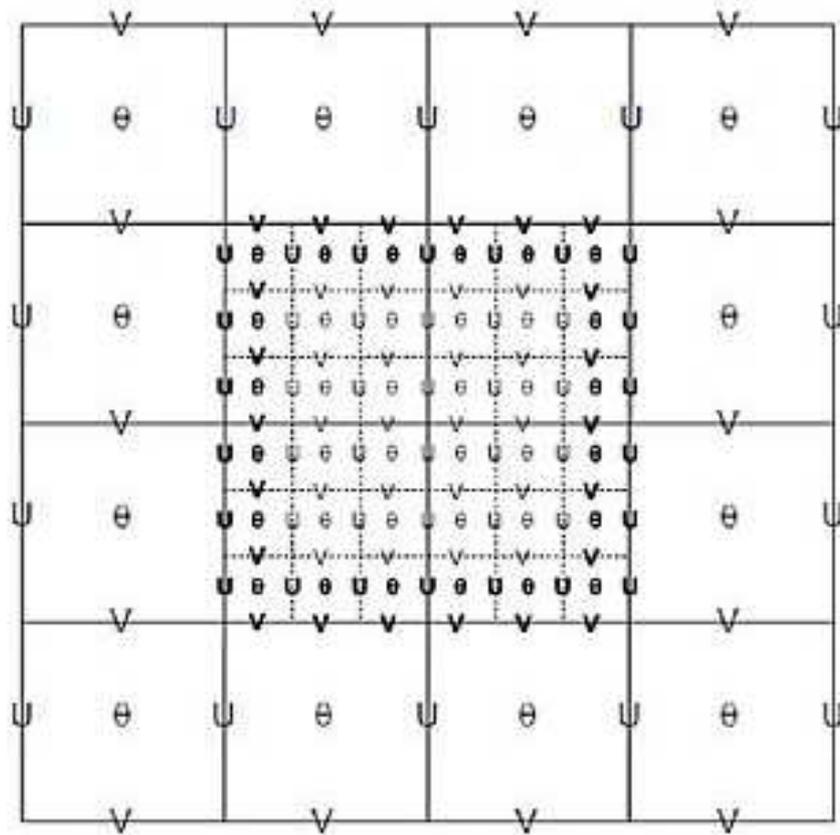


Figura 26: Estrutura da grade de Arakawa-C. (17)

O WRF possui uma ferramenta de aninhamento de grades que é muito utilizada quando se necessita analisar uma região mais detalhadamente. Quando se utiliza esta opção é possível obter dados de uma área com maior resolução espacial. (25) O WRF possui duas formas de configurar o aninhamento de grades, as figuras 26 e 27 esboçam o comportamento das grades nas duas opções.

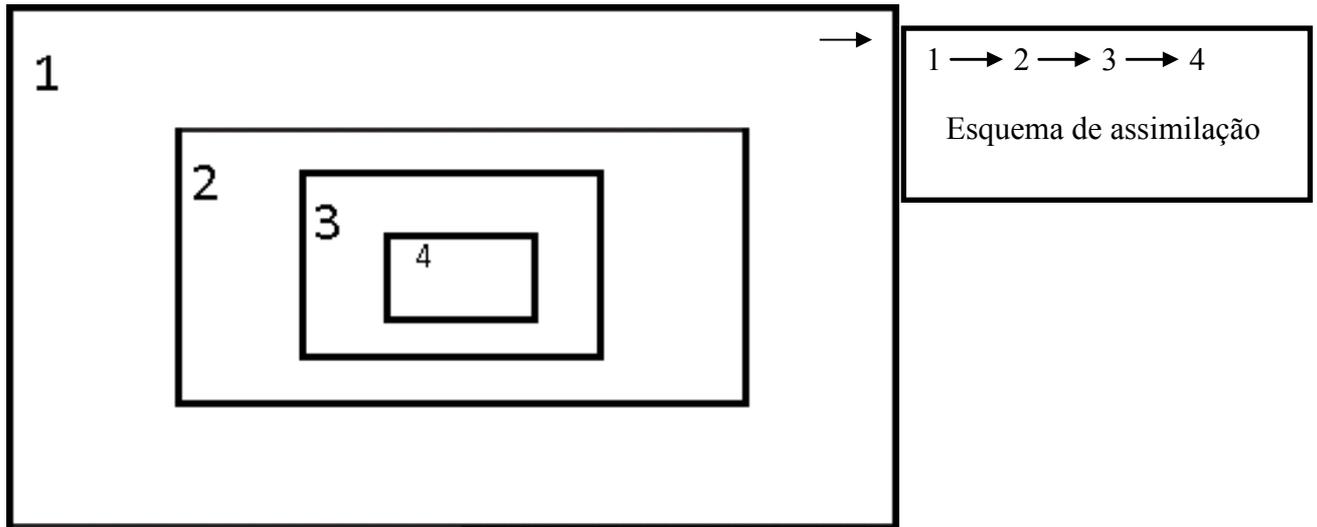


Figura 27: Ilustração de um exemplo de aninhamento I. Fonte: próprio autor

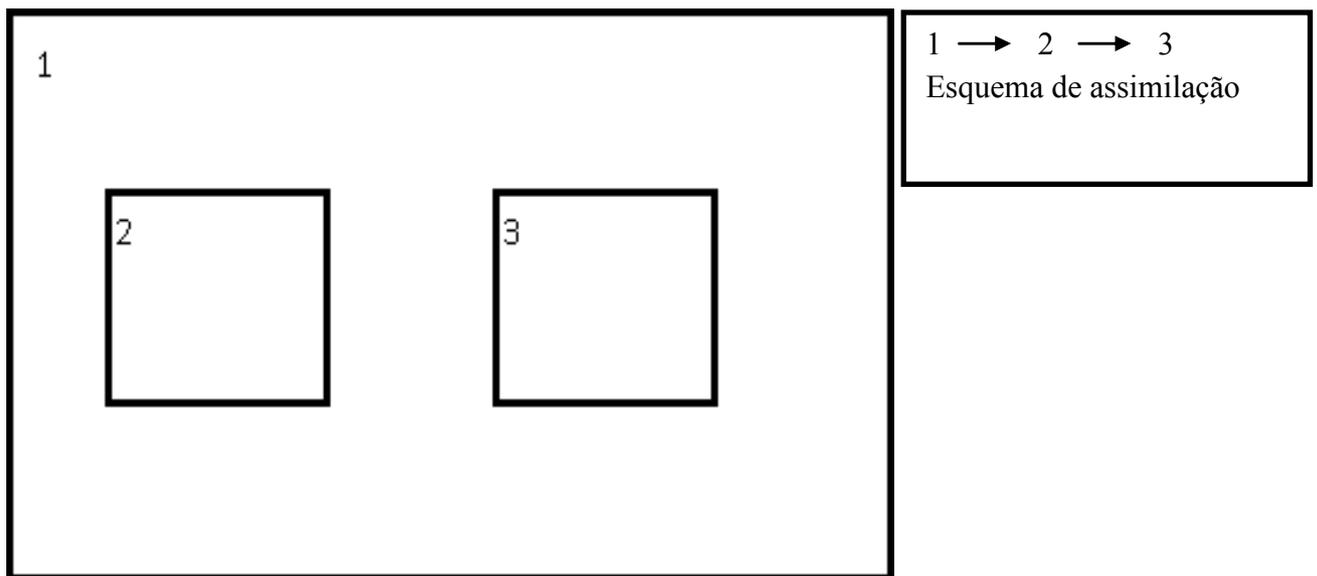


Figura 28: Ilustração de um exemplo de aninhamento II. Fonte: próprio autor

Em ambos os casos apresentados, as condições de contorno (CC) da grade menor (FG,) são interpoladas a partir da previsão fornecida pela grade maior (CG). (25)

Uma das vantagens em se utilizar grades aninhadas é poder ter dados de uma área com uma alta resolução espacial, sem que toda a grade tenha que ser rodada com um Δx menor. As condições de contorno em ambos os casos de aninhamento são alimentados a partir dos dados fornecidos pela grade maior. Os dados calculados nas grades podem fluir em dois sentidos, unidirecional ou bidirecional. (25)

No sentido unidirecional os dados da grade maior são utilizados como condições de contorno na grade menor. No sentido bidirecional ocorre o mesmo processo acrescido do detalhe que os pontos da grade maior que estão dentro da grade menor alteram os seus valores para os da grade menor. (25)

Para representar os processos físicos de transferência de calor, momento e unidade entre a superfície e atmosfera, os modelos utilizam vários tipos de parametrizações ou esquemas físicos.

Os esquemas físicos são separados conforme a função que desempenham. O modelo WRF apresenta principalmente sete tipos de esquemas que estão definidos na tabela 14.

Tabela 14: Principais tipos de esquemas físicos do modelo WRF. (17)

Esquemas Físicos	Características
Radiação atmosférica:	Representa as trocas de fluxos entre o solo e atmosfera
Cumulus:	Resolve os efeitos de sub-grade das nuvens tanto convectivas como estratiformes
Microfísica (MF):	Responsável pelos processos que ocorrem na formação de nuvens e precipitação.
Camada de superfície (CS):	É responsável por cálculos de variáveis que vão possibilitar o cálculo do calor sensível e fluxos de umidade pelos esquemas de superfície de solo e das tensões à superfície pelos esquemas da camada limite planetário
Modelo de Solo-Superfície (MSS):	Indica as características das várias camadas da superfície terrestre, resolvendo desde processos simples aos complexos.
Camada limite planetária (CLP):	Trata principalmente os parâmetros turbulentos de TKE (<i>Turbulence Kinetic Energy</i> – Energia Cinética Turbulenta), mas não apenas na camada limite, mas ao longo de toda a coluna vertical do modelo.

Na versão 3.2 do WRF cada esquema físico possui algumas opções de escolha de parametrizações. A tabela 15 lista alguns das principais parametrizações contidas nela.

Tabela 15: Tipos de parametrizações de alguns esquemas físicos no modelo WRF.

Esquemas Físicos	Opções de parametrizações
Camada de Superfície	MM5; Eta; Pleim-Xiu.
Camada Limite Planetária	YSU; MYJ; MRF, ACM2.
Modelo de solo-superfície	NOAH, RUC, Pleim-Xiu;
Microfísica	Kessler; Purdue-Lin; Thompson; Eta GCP; WSM3; WSM5; WSM6;
Radiação de Comprimento de Onda Longa(RLO)	Dudhia; Goddard; Eta GFDL; CAM.
Radiação de Comprimento de Onda Curta (RCO)	RRTM; Eta GFDL; CAM.
Cumulus	Kain-Fritsh; Betts-Miller-Jancic; Grell-Deveny Ensemble; Grell-3 Ensemble.

3.6. Período de Estudo

Nas simulações realizadas, avaliou-se o modelo para dois cenários distintos, um chuvoso e outro seco. A quadra chuvosa predominante no Ceará compreende os meses de fevereiro a maio, sendo o restante do ano o período sem precipitação.

A simulação que iniciou no dia 31/10/2011 às 2100 UTC e terminou no dia 30/11/2011 às 2100 UTC representam o período do ano sem precipitação; o período chuvoso tem início no dia 29/02/2012 às 2100 UTC e término no dia 31/03/2012 às 2100 UTC.

Em todas as simulações, utilizou-se a escala de tempo UTC (Coordenada de Tempo Universal) devido esta ser amplamente utilizada na comunidade científica e adotada pelo modelo utilizado. A representação dos resultados está com base no horário convencional, ou seja, o horário da simulação é diminuído três horas, ou seja, o horário local equivale a UTC -3 horas.

3.7. Estrutura das Grades

Na tentativa de melhor resolução e melhor representatividade sobre a região, utilizou-se três grades aninhadas e centradas no mesmo ponto, no local de instalação da torre (coordenadas geográficas 3° 50' 54,99" S e 38° 38' 5,83" W).

O domínio do modelo na horizontal tem grades com resoluções de 90, 18 e 3,6 km com 30x30, 36x36 e 61x61 pontos, respectivamente, semelhante ao utilizado por (6). Na vertical foram utilizados 45 níveis, sendo os mais próximos à superfície: 10 m, 33 m, 55 m, 76,4 m e 98 m de altura. O topo do modelo estava correspondendo em média 16 km de altura. A tabela 16 especifica as configurações das grades.

Tabela 16: Configuração das grades utilizadas nas simulações

Parâmetros	Grade 1	Grade 2	Grade 3
Espaçamento (x)	90 km	18 km	3,6 km
Espaçamento (y)	90 km	18 km	3,6 km
Pontos de grade (x)	30	36	61
Pontos de grade (y)	30	36	61
Níveis Verticais	45	45	45

O esquema de aninhamento utilizado foi o bidirecional, que permite uma troca de informações entre as várias grades. Este método já foi satisfatoriamente comprovado (6). Esta forma de representação apresenta um adicional para as grades de menor resolução, pois estas se beneficiam dos cálculos realizados nas grades de maior resolução.

Na figura 28 observa-se como as grades ficam ajustadas geograficamente no estado com a região metropolitana, e destacando a sua centralidade no município de Maracanaú.

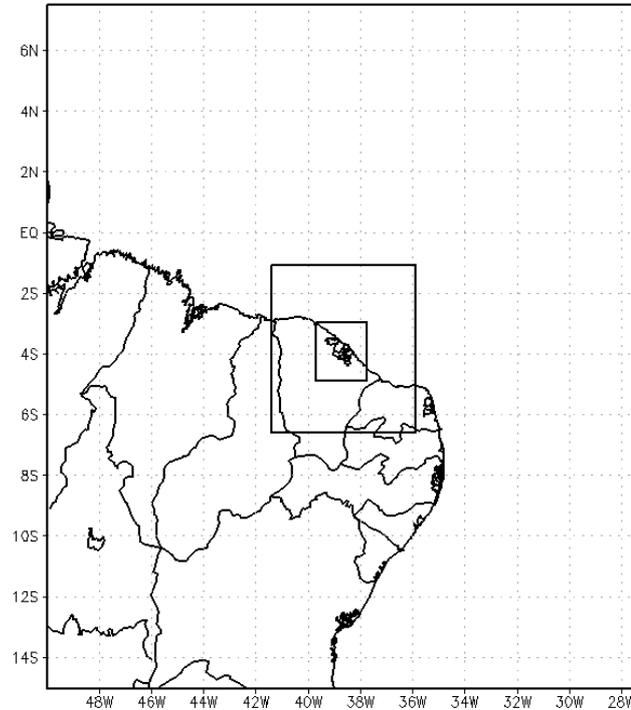


Figura 29: Localização das grades no Ceará em destaque região metropolitana. Fonte: próprio autor

3.8. Configuração das simulações

As configurações dos testes partiram de uma simulação controle, a partir do qual se configurou mais cinco opções de testes. Para os testes, permutaram-se parametrizações na Camada de Superfície (CS), Camada Limite Planetária (CLP) e modelo de superfície de solo-superfície (MSS).

As parametrizações de microfísica (WSM 6 – class graupel), radiação de comprimento de onda longa (RRTM), radiação de comprimento de onda curta (Dudhia) e Cumulus (Kain – Fritsh) não foram colocadas em teste, assim permaneceram as mesmas nas cinco opções de testes.

Os esquemas físicos, abordados na tabela 17, foram utilizados na literatura de referência (8), com o esquema *RRTM* para a radiação de onda longa, *Dudhia* para a radiação de onda curta, *WSM6* para a microfísica, *Kain-Fritsch* para a convecção, sem modelo de solo-superfície urbana e sem parametrização de Cumulus.

Para a CLP foram avaliados os seguintes esquemas: *Yonsei University* (YSU); *Asymmetric Convective Model v2* (ACM2); *Mellor-Yamada-Janjić* (MYJ); *Quasi-Normal*

Scale Elimination (QNSE); e *Mellor-Yamada Nakanishi and Niino Level 2.5* (MYNN2). Os dois primeiros são esquemas de fechamento de primeira ordem e os restantes são de ordem superior, baseados na Energia Cinética Turbulenta (ECT). (27)

Para a CS foram avaliados cinco esquemas: *MM5 Monin-Obukhov* (MM5); *ETA Monin- Obukhov* (ETA); *Pleim-Xiu* (PX); *Quasi-Normal Scale Elimination* (QNSE); e *Mellor-Yamada Nakanishi and Niino* (MYNN).

Para o MS foram avaliados somente dois esquemas: *Unified Noah* (Noah); e *Pleim-Xiu* (PX). A escolha do esquema da CLP determina diretamente as outras. Nas tabelas 17, 18, 19, 20 e 21 estão dispostas as configurações das simulações realizadas.

Tabela 17: Configuração *simul_1*

Esquemas físicos	Parametrização Utilizada
Camada de Superfície – CSS	Monin – Obukhon (MM5)
Camada Limite Planetária – CLP	YSU
Modelo de Superfície de Solo – MSS	Noah
Microfísica – MF	WSM 6 – class graupel
Radiação de Comprimento de Onda Longa– RLO	RRTM
Radiação de Comprimento de Onda Curta – RCO	Dudhia
Cumulus – PC	Kain – Fritsh

Tabela 18: Configuração da *simul_2*.

Esquemas físicos	Parametrização Utilizada
Camada de Superfície – CSS	Monin – Obukhon (ETA)
Camada Limite Planetária – CLP	MYJ
Modelo de Superfície de Solo – MSS	Noah
Microfísica – MF	WSM 6 – class graupel
Radiação de Longo Comprimento de Onda – RLO	RRTM
Radiação de Curto Comprimento de Onda – RCO	Dudhia
Cumulus – PC	Kain – Fritsh

Tabela 19: Configuração da *simul_3*.

Esquemas físicos	Parametrização Utilizada
Camada de Superfície – CSS	Pleim – Xiu
Camada Limite Planetária – CLP	ACM2
Modelo de Superfície de Solo – MSS	Pleim - Xiu
Microfísica – MF	WSM 6 – class graupel
Radiação de Longo Comprimento de Onda – RLO	RRTM
Radiação de Curto Comprimento de Onda – RCO	Dudhia
Cumulus – PC	Kain – Fritsh

Tabela 20: Configuração da *simul_4*.

Esquemas físicos	Parametrização Utilizada
Camada de Superfície – CSS	QNSE
Camada Limite Planetária – CLP	QNSE-EDMF
Modelo de Superfície de Solo – MSS	Noah
Microfísica – MF	WSM 6 – class graupel
Radiação de Longo Comprimento de Onda – RLO	RRTM
Radiação de Curto Comprimento de Onda – RCO	Dudhia
Cumulus – PC	Kain – Fritsh

Tabela 21: Configuração da *simul_5*.

Esquemas físicos	Parametrização Utilizada
Camada de Superfície – CSS	MYNN
Camada Limite Planetária – CLP	MYNN2
Modelo de Superfície de Solo – MSS	Noah
Microfísica – MF	WSM 6 – class graupel
Radiação de Longo Comprimento de Onda – RLO	RRTM
Radiação de Curto Comprimento de Onda – RCO	Dudhia
Cumulus – PC	Kain – Fritsh

Para avaliar os resultados das simulações, foi escolhido o método de correlação de *Pearson*, r , o qual mede o grau de correspondências entre as fases do modelo. É definido como: (28)

$$r = \frac{\sum (\Phi_i - \bar{\Phi}) (\Psi_i - \bar{\Psi})}{\sqrt{\left[\sum (\Phi_i - \bar{\Phi})^2 \right] \left[\sum (\Psi_i - \bar{\Psi})^2 \right]}}. \quad \text{Eq. 04}$$

onde r é o índice de correlação de *Pearson*, Φ_i dado simulado, $\bar{\Phi}$ é a média da série de dados simulados, Ψ_i dado observado, $\bar{\Psi}$ é a média da série de dados observados. O índice de correlação r assume valores entre -1 e 1, indicando perfeita anticorrelação e perfeita correlação entre as series, respectivamente. Um valor zero representa a ausência de correlação. Os valores de r podem ser classificados seguindo a tabela 22.

Tabela 22: Valores dos critérios da correlação de *Pearson*. (29)

Correlação	Correlação
>0,90	Muito forte
0,89 a 0,70	Forte

0,69 a 0,40	Moderada
0,39 a 0,20	Fraca
<0,19	Muito fraca

3.9. Programa Windographer

O Windographer foi desenvolvido pela *Mistaya Engeneering (ME)*, que desenvolve programas e presta serviços de consultoria para auxiliar projetos de energia renovável. Projetos nesse âmbito geralmente envolvem o processamento de uma grande quantidade de dados. No intuito de facilitar a realização dessa tarefa a ME se especializou no desenvolvimento de programas que minimizam o custo computacional, executam cálculos estatísticos úteis, apresentam grande variedade de gráficos e tabelas atraentes.

O Windographer foi projetado especialmente para a análise de dados gerados por equipamentos de medição de vento. Com esse programa é possível ler rapidamente dados de velocidade e direção do vento, classificá-los e exibi-los de modo prático, podendo avaliar a qualidade dos dados e o potencial eólico.

Além disso, o programa fornece ferramentas para cálculo de propriedades estatísticas e identifica potenciais problemas nos dados, causados por um possível mau funcionamento do equipamento, permitindo diagnosticar e corrigir falhas no conjunto de dados.

O programa Windographer é encontrado no endereço eletrônico <http://www.mistaya.ca/windographer/>, possui uma versão disponível para “download”, com licença para uso de 14 dias, com a finalidade de se obter informações sobre o funcionamento do mesmo. O programa foi utilizado para fazer as análises das variáveis de velocidade e direção do vento dos dados medidos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As figuras 29 e 30 apresentam a comparação entre as médias diárias das cinco simulações realizadas e as médias diárias dos dados observados, podendo assim haver uma avaliação do desempenho das simulações. As figuras 31 e 32 apresentam a comparação entre as médias diárias da simulação com o melhor desempenho (*simul_3*) e as médias diárias dos dados observados.

Analisando os gráficos nota-se que todas as simulações conseguem reproduzir as principais características da velocidade e direção do regime local de vento. Todas as simulações numéricas acompanharam o comportamento dos dados observados, o que atesta

desde logo a capacidade do modelo em simular estas variáveis, porém é necessário mais ajustes para que a superestimação dos dados seja evitada.

As tabelas 23 e 24 apresentam os valores de correlações encontradas para as cinco simulações realizadas, nos dois meses em estudo. Nota-se que a *simul_3* apresenta uma relação mais positiva com os dados observados para ambos os meses. No mês de novembro/2011 foi obtido correlação de 0,76 e em março/2012 de 0,58.

Tabela 23: Valores de correlações para o mês de novembro/2011.

Simulação	Valores de correlação
Simulação 1	0,69
Simulação 2	0,72
Simulação 3	0,76
Simulação 4	0,73
Simulação 5	0,58

Tabela 24: Valores de correlações para o mês de março/2012.

Simulação	Valores de correlação
Simulação 1	0,56
Simulação 2	0,53
Simulação 3	0,58
Simulação 4	0,56
Simulação 5	0,53

As rosas dos ventos, figuras 37, 38, 39 e 40, abordam a direção predominante do vento para os resultados da *simul_3*. Analisando as rosas dos ventos, nota-se que no mês de novembro o modelo consegue representar com mais clareza a direção predominante do vento na região; isso está associado ao fato de que nesse período os ventos se comportam de uma forma mais constante, devido às altas velocidades.

No mês de março percebe-se certa inconsistência no comportamento, isso pode ser causado devido o mês ser característicos de chuvas. No mês de março os ventos diminuem sua intensidade devido ao enfraquecimento dos alísios, o que torna as forçantes locais mais influentes, as quais produzem bastante turbulência, tornando este mês inconstante.

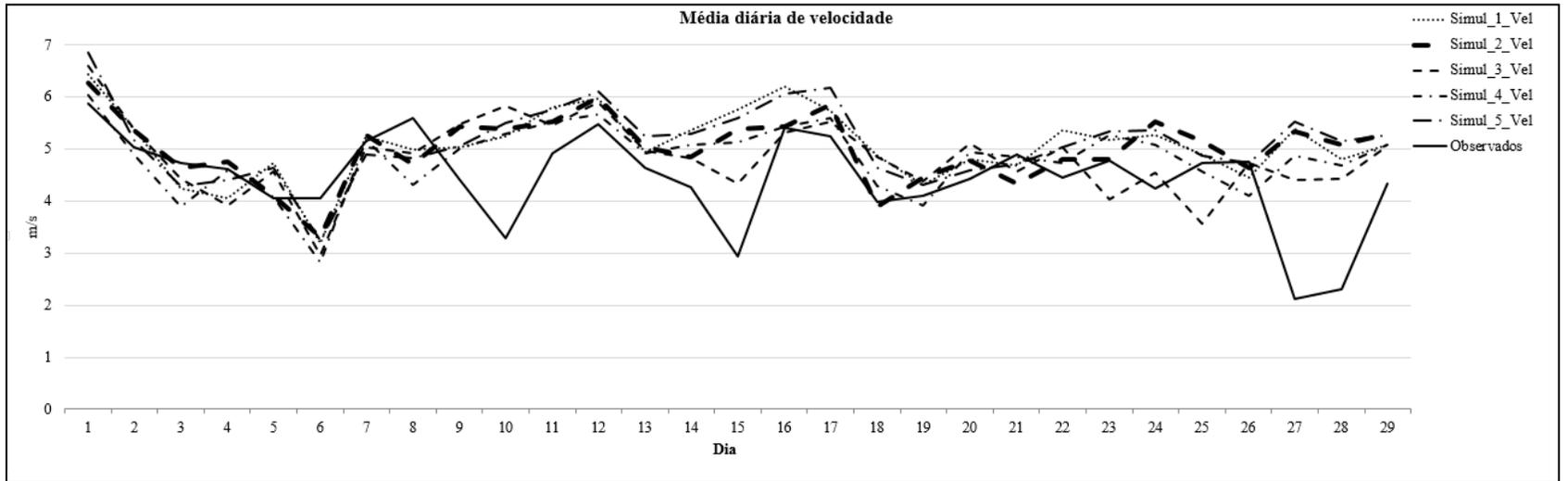


Figura 30: Comparação dos resultados das médias diárias das cinco simulações realizadas com os dados observados – velocidade do vento - março/2012.

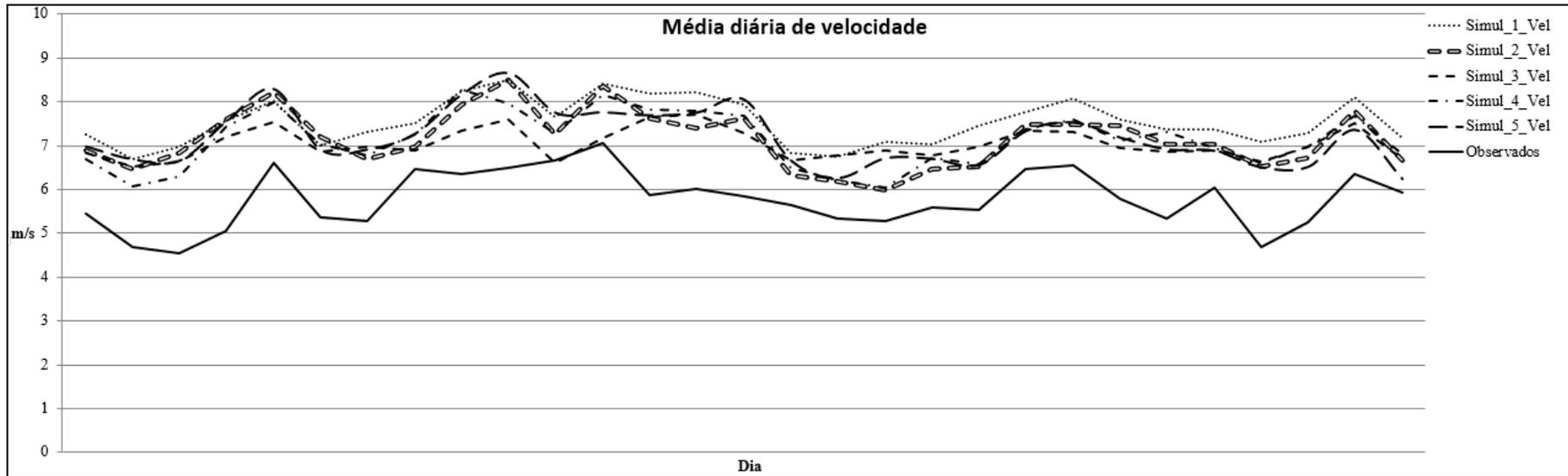


Figura 31: Comparação dos resultados das médias diárias das cinco simulações realizadas com os dados observados – velocidade do vento - novembro/2011.

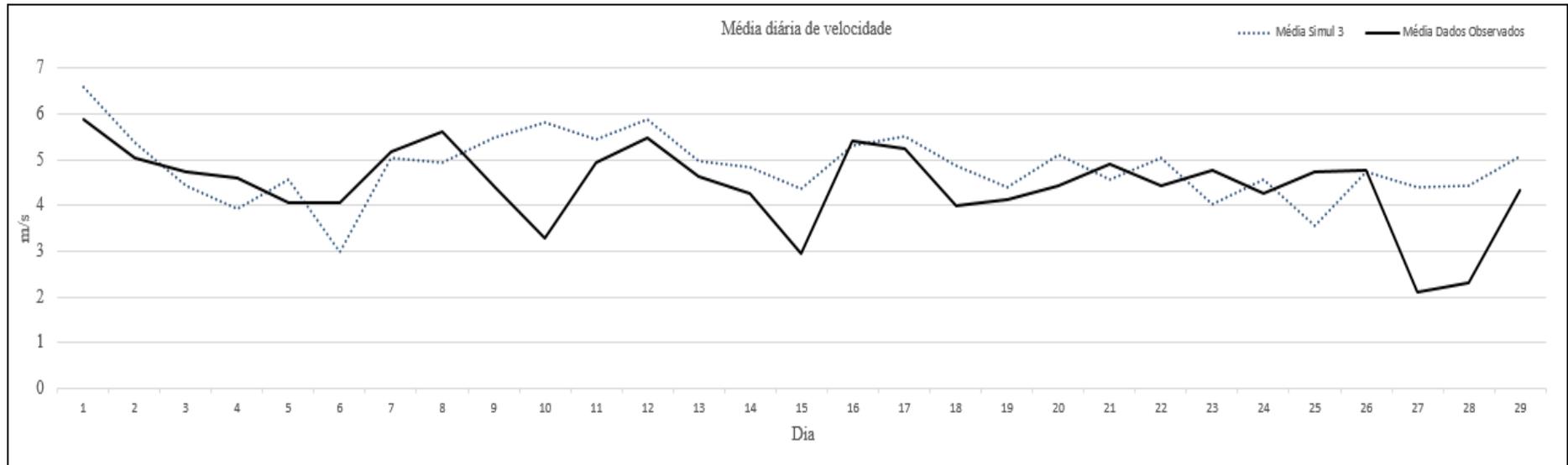


Figura 32: Comparação dos resultados das médias diárias da simulação com o melhor resultado (*simul_3*) com os dados observados – velocidade do vento - março/2012.

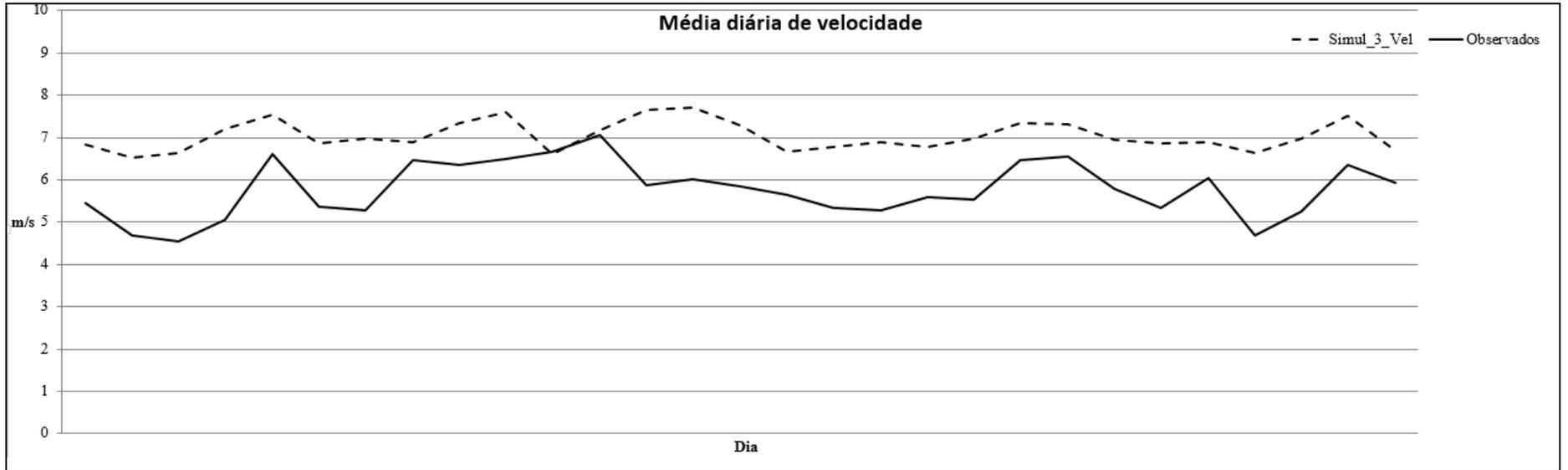


Figura 33: Comparação dos resultados das médias diárias da simulação com o melhor resultado (*simul_3*) com os dados observados – velocidade do vento - novembro/2011.

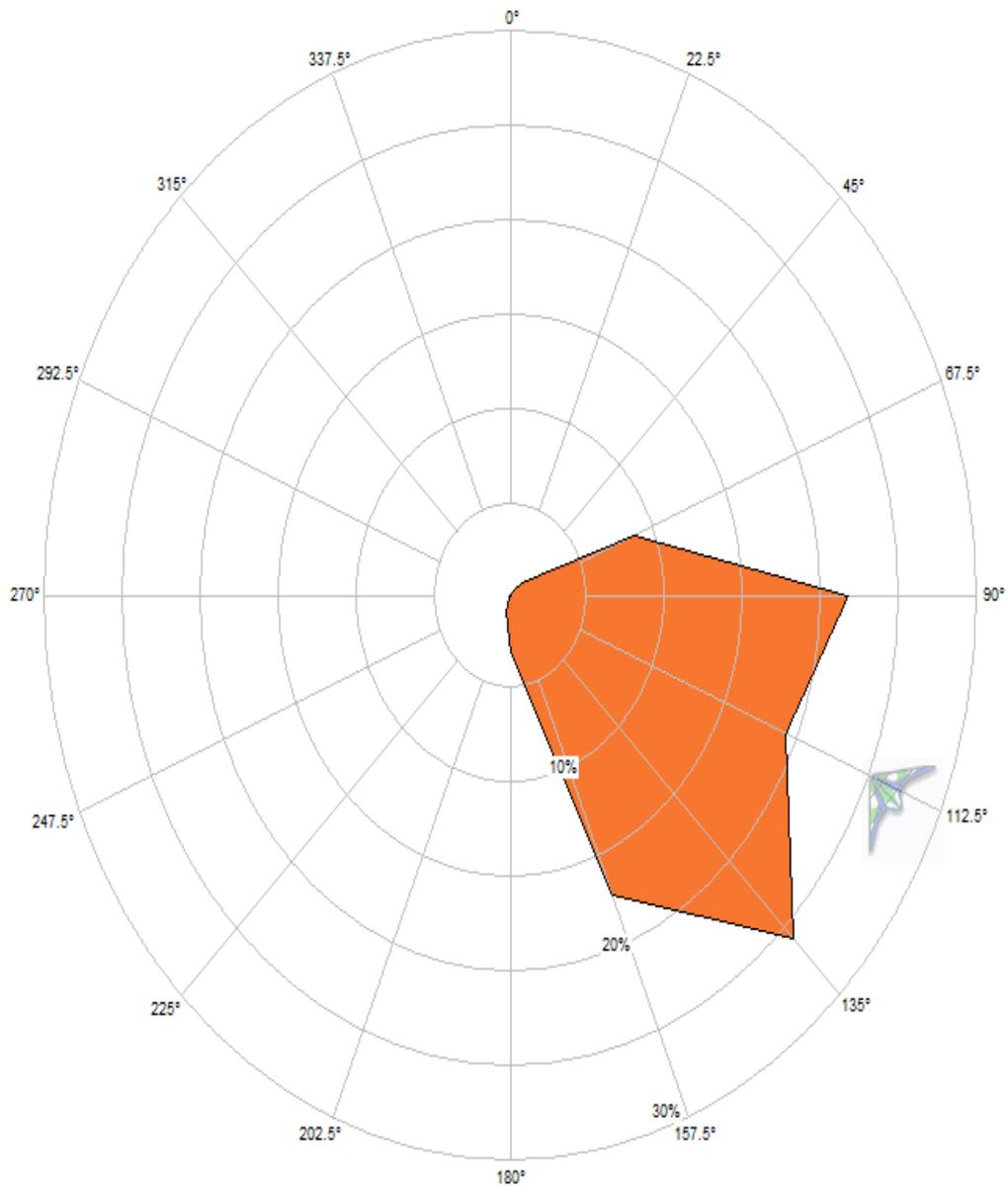
Rosa dos ventos dados observados- Março/2012

Figura 34: Rosa dos ventos - dados observados - março/2012.

Rosa dos ventos dados simulados - Março/2012

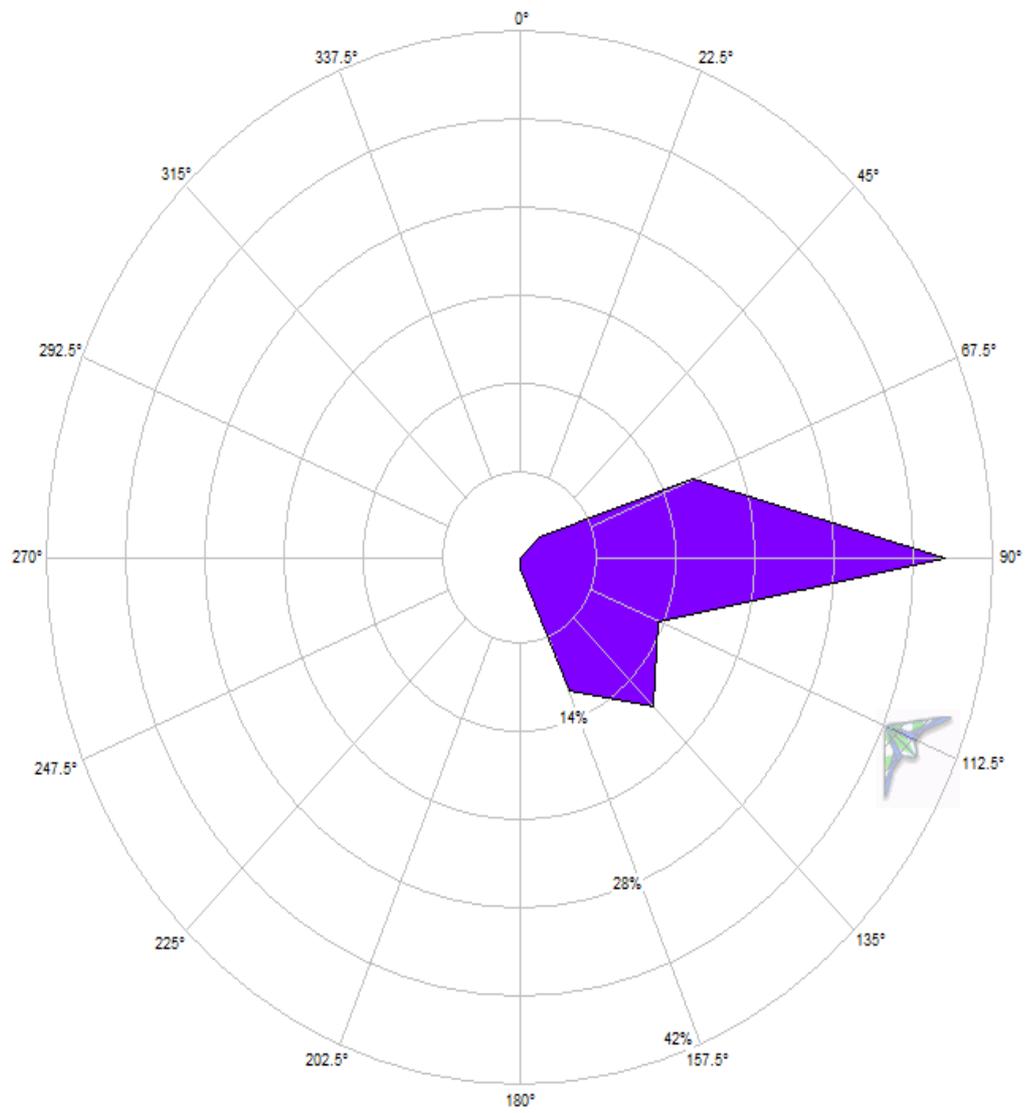


Figura 35: Rosa dos ventos - dados simulados - março/2012.

Rosa dos ventos dados observados - Novembro/2011

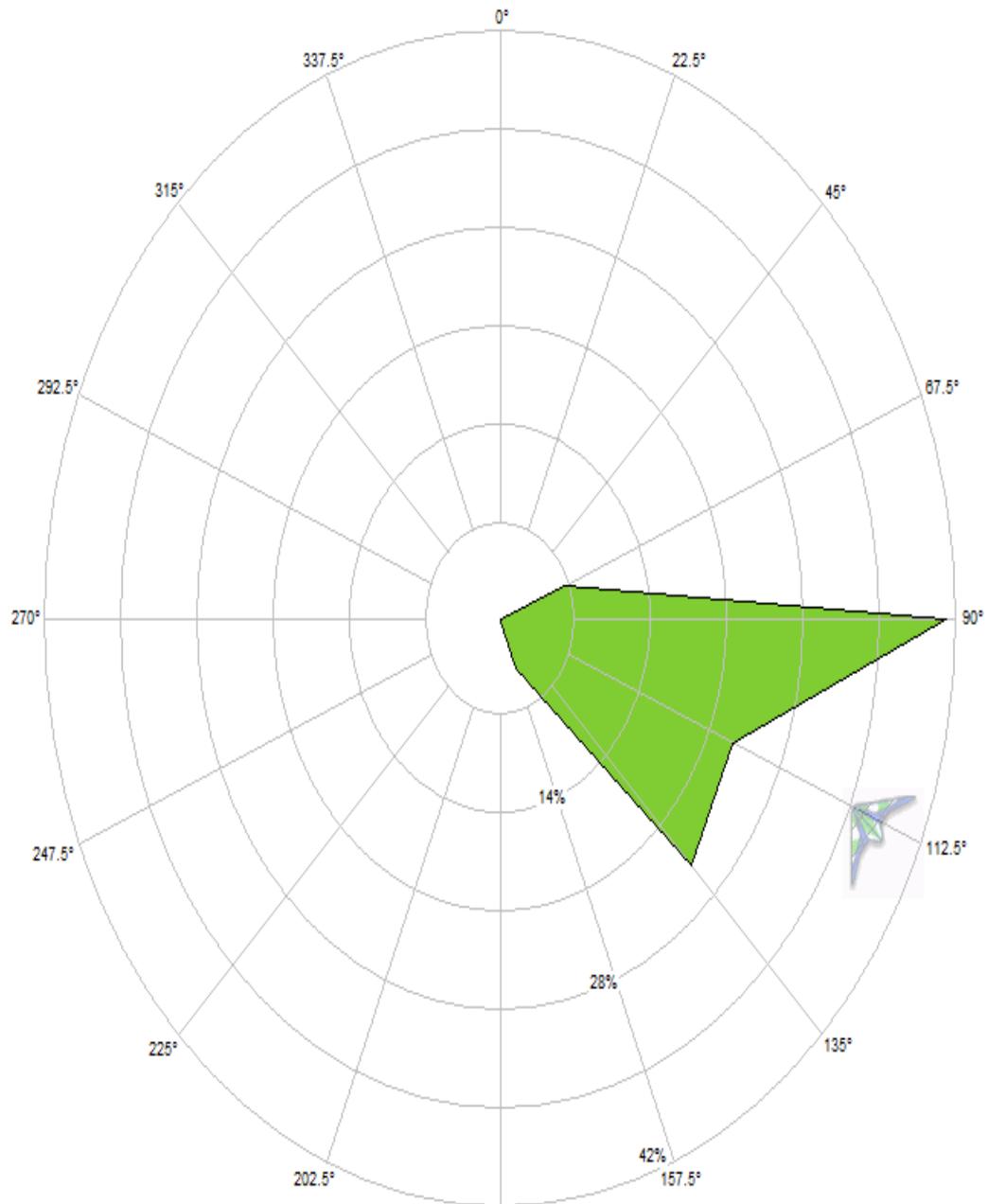


Figura 36: Rosa dos ventos - dados observados - novembro/2011.

Rosa dos ventos dados simulados - Novembro/2011

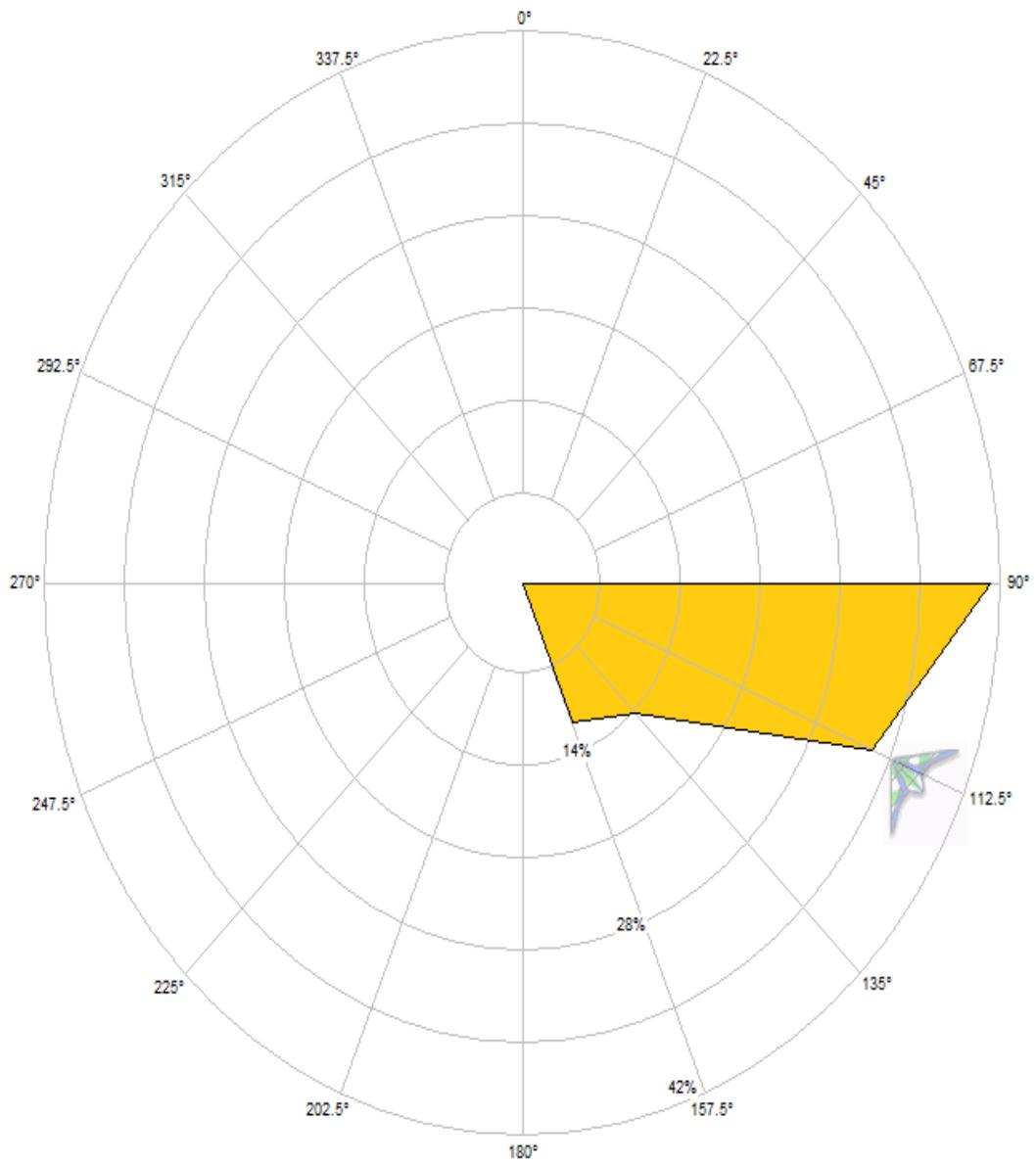


Figura 37: Rosa dos ventos - dados simulados - novembro/2011.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram apresentados resultados de simulações a fim de verificar a eficácia do modelo numérico WRF (*Weather Research and Forecast*) em representar as condições do regime de vento de uma determinada área, e assim poder ser utilizado como uma ferramenta de investigação de áreas com potencial eólicoelétrico.

Outro quesito avaliado no modelo foi a capacidade de representar com clareza as duas estações predominantes na região em estudo, seca e chuvosa, em relação à variável velocidade e direção do vento.

Observou-se que as cinco simulações realizadas representaram o comportamento do regime de vento da região de forma eficiente, verificando assim que o modelo pode ser utilizado como ferramenta para verificação de comportamento do vento em uma determinada região. Para que o modelo represente a realidade da região com mais eficiência é necessário mais estudos e testes nas permutações das parametrizações, podendo chegar a correlações maiores que 0,90, que é considerada muito forte.

A simulação que obteve a melhor representação do vento foi a configuração *simul_3*, que apresentou valores de correlação de 0,76 para o mês de novembro/2011 e 0,58 para o mês de março/2012, consideradas forte e moderada para os parâmetros de *Pearson*, respectivamente.

No quesito direção do vento, o modelo no mês de novembro teve um desempenho satisfatório, conseguindo representar a direção predominante do vento local de acordo com os dados simulados. O setor predominante está no intervalo de 90° a 112,5°, evidenciando uma direção predominantemente leste (E). Já no mês de março o modelo não representou esta variável tão bem quanto no mês de novembro. A direção predominante do vento para os dados observados está no setor 135° a 157,5°, ao passo que o simulado apresenta uma direção leste (E).

Uma explicação geral para a não representatividade do modelo no mês de março está ligada ao fato do mês ser caracterizado um mês chuvoso o modelo não conseguiu representar com muita clareza o fenômeno meteorológico característico do período. A intensidade dos ventos diminui nessa época do ano em consequência do enfraquecimento dos alísios, o que torna as forçantes locais mais influentes, as quais produzem bastante turbulência, sendo um fator influente na inconstância deste mês.

Neste trabalho o modelo apresentou uma correlação forte e moderada. Para obter resultados mais conclusivos é necessário realizar mais testes de permutações das parametrizações, novos estudos de avaliação de desempenho do modelo, analisar uma maior quantidade de dados. O modelo mostrou ser uma ferramenta muito promissora para investigação de áreas com potencial para geração eólicoelétrica, sendo necessária mais algumas análises e testes para se tornar uma ferramenta extremamente eficaz para o propósito deste trabalho.

5.1. Sugestões de Projetos Futuros

A seguir são citados alguns tópicos como sugestão de continuidade deste trabalho:

- Realizar mais testes de sensibilidade a fim de encontrar uma configuração que seja mais positiva para as duas estações do ano em análise.
- Realizar um tempo mais longo de simulação
- Estudar outros métodos de avaliação para o desempenho do modelo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ¹ REVOLUÇÃO ENERGÉTICA. A caminho do desenvolvimento limpo. 2^a. ed.
- ² BRITO, F.T. Sistema de aquisição de dados e controle de plantas descentralizadas de energias renováveis. 149p. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Ceará.
- ³ AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. Disponível em: <www.aneel.gov.br>. Acesso em: 30 novembro. 2012
- ⁴ IPEA. Sustentabilidade Ambiental no Brasil: biodiversidade, economia e bem estar humano. COMUNICADO n. 77, FEVEREIRO 2011. Brasília, 2011. 36p.
- ⁵ CRESESB. Atlas do Potencial Eólico Brasileiro. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/atlas_eolico/index.php>. Acesso em: 30 jun. 2011.
- ⁶ CARVALHO, D. J. S. Otimização do modelo numérico de previsão do tempo WR no contexto de previsão e produção de energia eólica. 50 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia e Oceanografia Física) – Universidade de Aveiro, Aveiro, 2009.
- ⁷ MENDES, C.R.S. Proposta de uma Metodologia Livre para Avaliação de Potencial Eólico de Minas Gerais. 118p. Dissertação de Mestrado. Departamento de Ciências Térmicas e dos Fluidos. Universidade Federal De São João Del Rei. 2011.
- ⁸ SEMPREVIVA, A. M. et al. WindEng – Research Activity in an European Training Network. Wind Engineering, v.28, n°3, 325-337p. 2004.
- ⁹ MARTINS, F.R.; GUARNIERI R.A.; PEREIRA E.B. O Aproveitamento Da Energia Eólica. Revista Brasileira de Ensino de Física, v.30, n.1, 1304. 2008
- ¹⁰ BOYLE, G. Renewable Energy. 2. ed. Oxford, 2004. 452 p.
- ¹¹ CUSTÓDIO, R.D.S. Energia Eólica Para Produção de Energia Elétrica. RIO DE JANEIRO. 2007. 280p
- ¹² STULL, R.B., An introduction to Boundary Layer Meteorology (Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1988).
- ¹³ CARVALHO, Paulo Cesar Marques. Geração Eólica. Fortaleza: Imprensa Universitária - UFC, 2003. 146 p.

- ¹⁴ SANTIAGO DE MARIA. P.H.; COSTA. A.A.; SOMBRA.S.S.; Simulação de ventos em alta resolução no litoral do Ceará. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 14, 2006, Florianópolis. Florianópolis. Anais IV Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2006.
- ¹⁵ CHOU, S. C. et al. Mapeamento eólico para o Nordeste. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 14, 2006, Florianópolis. Santa Catarina. Anais XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2006.
- ¹⁶ SOARES, C. A. C. Validação de Estimativas do Recurso Eólico Obtidas com o Modelo Numérico WRF 50 f. Dissertação (Departamento de Física) – Universidade de Aveiro, Aveiro, 2010.
- ¹⁷ RAMOS, D. N. S. Mapeamento eólico do estado de Alagoas utilizando ferramentas computacionais e dados observados. 127 f. Dissertação (Instituto de Ciências Atmosféricas) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2012.
- ¹⁸ IEA, Recommended Practices for Wind Turbine Testing – Part 11: Wind Speed Measurement and Use of Cup Anemometry, International Standard, Paris - France, 1999.
- ¹⁹ IEC, Wind Turbines Generation Part 12-1: Power Performance Measurement of Electricity Producing Wind Turbines, International Standard, Geneva - Switzerland, 2006. Annexes.
- ²⁰ NREL, Wind Resource Assessment Handbook – Fundamentals for Conduction a Successful Monitoring Program, New York – EUA, 1997.
- ²¹ AWEA, Standard procedures for Meteorological Measurement at a Potential Wind Turbine Site, AWEA Standard 8.2, Washington D.C. – EUA, 1986.
- ²² ENC, European Wind Turbine Standards II Part 1 sub C: Extreme Wind Climate Events. Non-nuclear Energy - JOULE III Project. Netherlands, 1999. 59 p.
- ²³ NREL, “The NRG Maximum Type 40 Anemometer Calibration Project”. Final Report. Fox Island WA – USA, 1998.
- ²⁴ FERREIRA, A. P. G. F. Sensibilidade às parametrizações físicas do WRF nas previsões à superfície em Portugal Continental. 119 f. (Departamento de Física) – Universidade de Aveiro, Aveiro, 2007.

- ²⁵ OLIVEIRA, A. C. Implementação do modelo atmosférico wrf acoplado com o modelo hidrológico topmodel para a bacia de união da vitória. 70 f. (Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.
- ²⁶ VASCONCELOS, F. C. Estudo numérico de jatos de baixos níveis no estado do ceará. 129 f. (Mestrado em Ciências Físicas Aplicadas) – Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza, 2010.
- ²⁷ SHIN, H. H.; HONG, S.-Y. Intercomparison of planetary boundary-layer parametrizations in the WRF model for a single day from CASES-99. *Boundary-Layer Meteorology*, v. 2, n. 139, p.261-281, 2011
- ²⁸ JOLLIFFE, I. T.; STEPHENSON, D. B. *Forecast Verification: a practitioners guide in atmospheric sciences*. Wiley: [s.n.], 2003.
- ²⁹ DEVORE, J. L. *Probabilidade e Estatística para Engenharia e Ciências*. São Paulo: Thomson Pioneira, 2006. 706 p.

ANEXO I

PUBLICAÇÕES GERADAS

A.1 Publicações Geradas

Artigo apresentado em Congresso Internacional (Autor Principal)

MELO, C.M.N.; CARVALHO, P. C. M.; LEAL JUNIOR. J. B. L.. **EVALUATION OF PLANETARY BOUNDARY LAYER PARAMETERIZATIONS IN THE WRF MODEL FOR WIND ENERGY APPLICATIONS AT CEARÁ STATE, BRAZIL.** 11th International Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power into Power Systems. Lisboa. Novembro, 2012

Artigo apresentado em Congresso Nacional (Autor Principal)

MELO, C.M.N.; CARVALHO, P. C. M.; LEAL JUNIOR. J. B. L.. **INTERCOMPARAÇÃO DE PARAMETRIZAÇÕES DA CAMADA LIMITE PLANETÁRIA DO MODELO WRF PARA APLICAÇÕES DE ENERGIA EÓLICA.** Congresso Brasileiro de Meteorologia. Gramado. Outubro, 2012

ANEXO II**RELATÓRIOS DE CALIBRAÇÃO DOS SENSORES DE VELOCIDADE**

Customer Information

NRG Systems, Inc.
 110 Riggs Road
 Hinesburg, VT 05461
 USA

Instrument Under Test (IUT)

Model No: NRG #40 Sine
 Serial No: 179500164635
 Output: Sine Wave
 IUT Power: 0 VDC
 Heater Power: 0 VDC
 Mount Diameter: 12.7 mm
 Test Procedure: OTECH-CP-001

Wind Tunnel Test Facility

Otech Tunnel ID: WT2B
 Type: Eiffel (open circuit, suction)
 Test Section Size: 0.61 m x 0.61 m x 1.22 m
 Manufacturer: Engineering Laboratory Design, Inc.

Data Acquisition

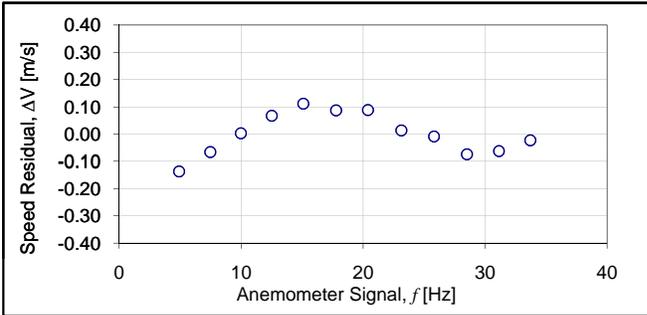
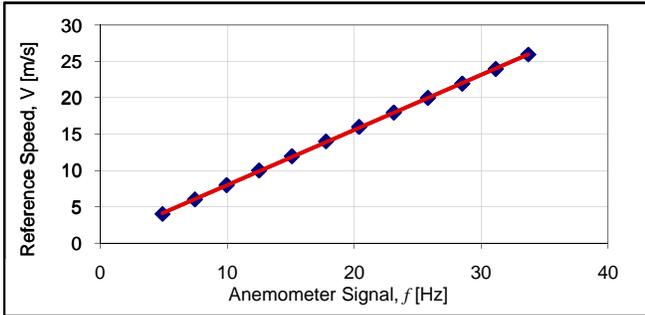
Hardware: National Instruments CDAQ-9172 USB 2.0 chassis
 with NI 9205 32-chan 16-bit AI module
 Software: National Instruments LabVIEW 2010
 Signal Reduction Method for IUT: FFT Analysis

Measuring Equipment

Reference Speed: Four United Sensor Type PA Pitot-static tubes sensed by an MKS Barotron Type 220D Differential Pressure Transducer (NIST traceable)
 Amb. Pressure: Setra Model 270 Barometer (NIST traceable)
 Amb. Temperature: OMEGA HX94 SS Probe (NIST traceable)
 Relative Humidity: OMEGA HX94 SS Probe (NIST traceable)

Test Conditions

Reference Speed Position Correction = 1
 Reference Speed Blockage Correction = 1
 Mean Ambient Pressure = 102,230 Pa
 Mean Ambient Temperature = 25.3 deg C
 Mean Relative Humidity = 28.3% RH
 Mean Density = 1.1895 kg/cubic meter

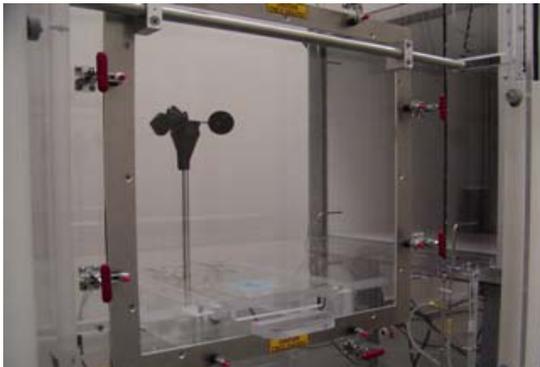


Transfer Function Test Results:

$V \text{ [m/s]} = 0.759 f \text{ [Hz]} + 0.41$

Regression Parameters

$r = 0.99994$ std. err. estimate = 0.0809 m/s
 slope = 0.759 m/s per Hz std. err. slope = 0.00257 m/s per Hz
 offset = 0.41 m/s std. err. offset = 0.05456 m/s



Note: Generic photo of test set-up

Approved by: Adam Havner,
 Lab Manager

Reference Speed [m/s]	Anemometer Output [Hz]	Residual [m/s]	Ref. Speed Uncertainty
3.991	4.904	-0.137	0.490%
7.967	9.958	0.003	0.472%
11.963	15.080	0.111	0.463%
15.966	20.385	0.088	0.475%
19.978	25.798	-0.008	0.482%
23.965	31.122	-0.062	0.475%
25.957	33.695	-0.023	0.475%
21.963	28.501	-0.074	0.476%
17.963	23.114	0.013	0.474%
13.986	17.778	0.087	0.475%
9.964	12.505	0.067	0.469%
6.002	7.460	-0.065	0.478%

This document reports that the above IUT was tested at Otech Engineering, Inc., a wind tunnel laboratory accredited in accordance with the recognised International Standard ISO/IEC 17025:2005 (Certificate number CL-126). This accreditation demonstrates technical competence for a defined scope and the operation of a laboratory quality management system (refer joint ISO-ILAC-IAF Communiqué dated January 2009). Uncertainties estimated at 95 % confidence level. This report shall not be reproduced except in full, without written approval from Otech Engineering, Inc.



Customer Information

NRG Systems, Inc.
 110 Riggs Road
 Hinesburg, VT 05461
 USA

Instrument Under Test (IUT)

Model No: NRG #40 Sine
 Serial No: 179500164644
 Output: Sine Wave
 IUT Power: 0 VDC
 Heater Power: 0 VDC
 Mount Diameter: 12.7 mm
 Test Procedure: OTECH-CP-001

Wind Tunnel Test Facility

Otech Tunnel ID: WT2B
 Type: Eiffel (open circuit, suction)
 Test Section Size: 0.61 m x 0.61 m x 1.22 m
 Manufacturer: Engineering Laboratory Design, Inc.

Data Acquisition

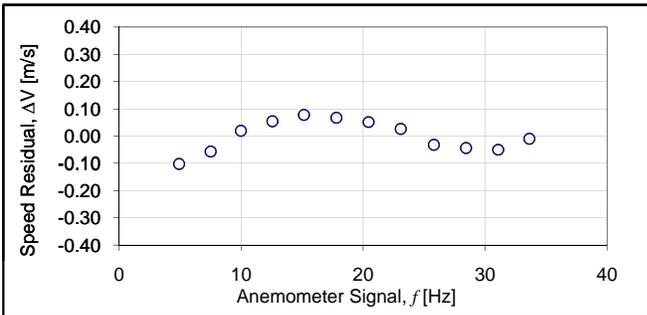
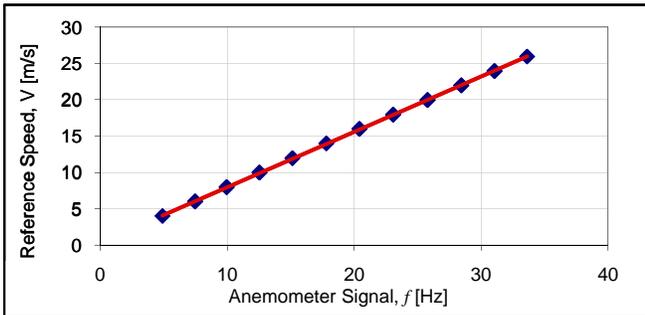
Hardware: National Instruments CDAQ-9172 USB 2.0 chassis
 with NI 9205 32-chan 16-bit AI module
 Software: National Instruments LabVIEW 2010
 Signal Reduction Method for IUT: FFT Analysis

Measuring Equipment

Reference Speed: Four United Sensor Type PA Pitot-static tubes sensed by an MKS Barotron Type 220D Differential Pressure Transducer (NIST traceable)
 Amb. Pressure: Setra Model 270 Barometer (NIST traceable)
 Amb. Temperature: OMEGA HX94 SS Probe (NIST traceable)
 Relative Humidity: OMEGA HX94 SS Probe (NIST traceable)

Test Conditions

Reference Speed Position Correction = 1
 Reference Speed Blockage Correction = 1
 Mean Ambient Pressure = 102,081 Pa
 Mean Ambient Temperature = 24.6 deg C
 Mean Relative Humidity = 30.8% RH
 Mean Density = 1.1903 kg/cubic meter

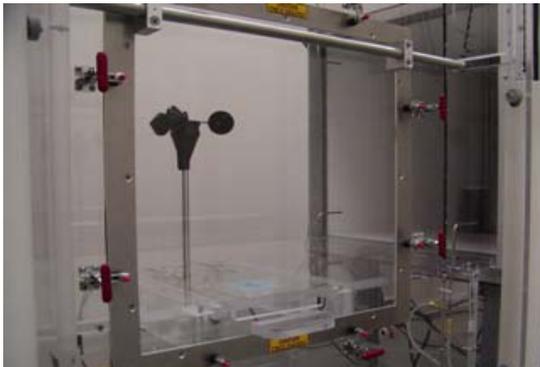


Transfer Function Test Results:

$V \text{ [m/s]} = 0.761 f \text{ [Hz]} + 0.37$

Regression Parameters

$r = 0.99997$ std. err. estimate = 0.0604 m/s
 slope = 0.761 m/s per Hz std. err. slope = 0.00193 m/s per Hz
 offset = 0.37 m/s std. err. offset = 0.04084 m/s



Note: Generic photo of test set-up

Approved by: Adam Havner,
 Lab Manager

Reference Speed [m/s]	Anemometer Output [Hz]	Residual [m/s]	Ref. Speed Uncertainty
3.991	4.895	-0.102	0.482%
7.967	9.958	0.019	0.471%
11.963	15.127	0.078	0.479%
15.964	20.417	0.051	0.467%
19.961	25.775	-0.032	0.466%
23.956	31.046	-0.050	0.477%
25.952	33.613	-0.010	0.472%
21.967	28.425	-0.044	0.475%
17.956	23.066	0.026	0.479%
13.987	17.801	0.067	0.476%
9.965	12.535	0.054	0.466%
6.000	7.474	-0.057	0.474%

This document reports that the above IUT was tested at Otech Engineering, Inc., a wind tunnel laboratory accredited in accordance with the recognised International Standard ISO/IEC 17025:2005 (Certificate number CL-126). This accreditation demonstrates technical competence for a defined scope and the operation of a laboratory quality management system (refer joint ISO-ILAC-IAF Communiqué dated January 2009). Uncertainties estimated at 95 % confidence level. This report shall not be reproduced except in full, without written approval from Otech Engineering, Inc.



Customer Information

NRG Systems, Inc.
 110 Riggs Road
 Hinesburg, VT 05461
 USA

Instrument Under Test (IUT)

Model No: NRG #40 Sine
 Serial No: 179500176904
 Output: Sine Wave
 IUT Power: 0 VDC
 Heater Power: 0 VDC
 Mount Diameter: 12.7 mm
 Test Procedure: OTECH-CP-001

Wind Tunnel Test Facility

Otech Tunnel ID: WT2B
 Type: Eiffel (open circuit, suction)
 Test Section Size: 0.61 m x 0.61 m x 1.22 m
 Manufacturer: Engineering Laboratory Design, Inc.

Data Acquisition

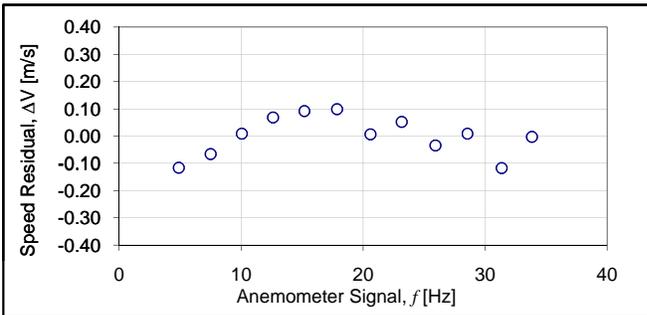
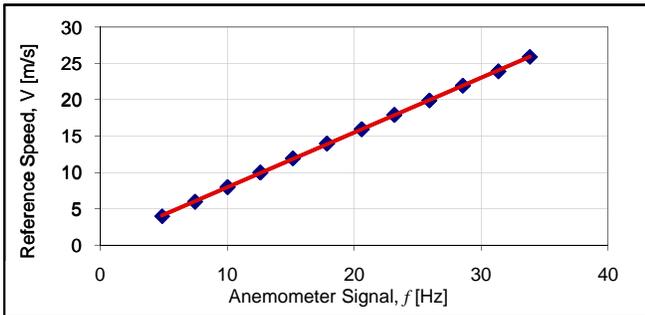
Hardware: National Instruments CDAQ-9172 USB 2.0 chassis
 with NI 9205 32-chan 16-bit AI module
 Software: National Instruments LabVIEW 2010
 Signal Reduction Method for IUT: FFT Analysis

Measuring Equipment

Reference Speed: Four United Sensor Type PA Pitot-static tubes sensed by an MKS Barotron Type 220D Differential Pressure Transducer (NIST traceable)
 Amb. Pressure: Setra Model 270 Barometer (NIST traceable)
 Amb. Temperature: OMEGA HX94 SS Probe (NIST traceable)
 Relative Humidity: OMEGA HX94 SS Probe (NIST traceable)

Test Conditions

Reference Speed Position Correction = 1
 Reference Speed Blockage Correction = 1
 Mean Ambient Pressure = 101,117 Pa
 Mean Ambient Temperature = 24.3 deg C
 Mean Relative Humidity = 47.9% RH
 Mean Density = 1.1783 kg/cubic meter

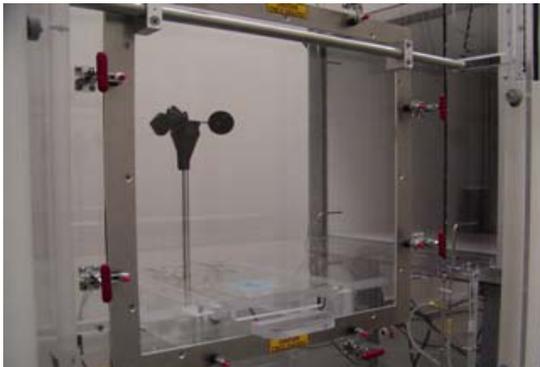


Transfer Function Test Results:

$V \text{ [m/s]} = 0.754 f \text{ [Hz]} + 0.40$

Regression Parameters

$r = 0.99995$ std. err. estimate = 0.0762 m/s
 slope = 0.754 m/s per Hz std. err. slope = 0.00241 m/s per Hz
 offset = 0.40 m/s std. err. offset = 0.05143 m/s



Note: Generic photo of test set-up

Approved by: Adam Havner,
 Lab Manager

Reference Speed [m/s]	Anemometer Output [Hz]	Residual [m/s]	Ref. Speed Uncertainty
3.955	4.865	-0.115	0.498%
7.973	10.028	0.009	0.482%
11.932	15.167	0.092	0.483%
15.932	20.584	0.007	0.474%
19.906	25.907	-0.034	0.474%
23.924	31.343	-0.117	0.478%
25.910	33.825	-0.003	0.476%
21.933	28.537	0.009	0.493%
17.911	23.148	0.052	0.479%
13.962	17.850	0.099	0.471%
9.971	12.598	0.068	0.476%
5.967	7.466	-0.066	0.491%

This document reports that the above IUT was tested at Otech Engineering, Inc., a wind tunnel laboratory accredited in accordance with the recognised International Standard ISO/IEC 17025:2005 (Certificate number CL-126). This accreditation demonstrates technical competence for a defined scope and the operation of a laboratory quality management system (refer joint ISO-ILAC-IAF Communiqué dated January 2009). Uncertainties estimated at 95 % confidence level. This report shall not be reproduced except in full, without written approval from Otech Engineering, Inc.

