

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE CIÊNCIAS FÍSICAS E MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA**

ANDRÉ FELIPE SPENGLER OLIVERA

**AVALIAÇÃO DO MODELO WRF NA PREVISIBILIDADE
DO VENTO PARA GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA NA
REGIÃO DE LAGUNA - SC**

FLORIANÓPOLIS, 13 de julho de 2017

ANDRÉ FELIPE SPENGLER OLIVERA

**AVALIAÇÃO DO MODELO WRF NA PREVISIBILIDADE
DO VENTO PARA GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA NA
REGIÃO DE LAGUNA - SC**

**Trabalho de Conclusão de
Curso submetido ao Curso de
Graduação em Meteorologia
da Universidade Federal de
Santa Catarina para a ob-
tenção do Grau de Bacharel
em Meteorologia. Orientador:
Prof. Dr. Mário Francisco
Leal de Quadro.**

FLORIANÓPOLIS, 13 de julho de 2017

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Olivera, André Felipe Spengler
AVALIAÇÃO DO MODELO WRF NA PREVISIBILIDADE DO VENTO
PARA GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA NA REGIÃO DE LAGUNA - SC /
André Felipe Spengler Olivera ; orientador, Mário
Francisco Leal de Quadro, 2017.
42 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências
Físicas e Matemáticas, Graduação em Meteorologia,
Florianópolis, 2017.

Inclui referências.

1. Meteorologia. 2. Meteorologia. 3. Modelagem
numérica. 4. WRF. 5. Energia Eólica. I. Quadro, Mário
Francisco Leal de. II. Universidade Federal de Santa
Catarina. Graduação em Meteorologia. III. Título.

**AVALIAÇÃO DO MODELO WRF NA PREVISIBILIDADE
DO VENTO PARA GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA NA
REGIÃO DE LAGUNA - SC**

por

ANDRÉ FELIPE SPENGLER OLIVERA

Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de **Bacharel em Meteorologia**, e aprovado em sua forma final pelo Curso de Graduação em Meteorologia.

Prof. Dr. Mário Francisco Leal de Quadro
Orientador

Prof. Dr. Renato Ramos da Silva
Coordenador do Curso de Meteorologia

Banca Examinadora:

PRESIDENTE:

Prof. Dr. Renato Ramos da Silva, UFSC/CFM

MEMBROS TITULARES:

Prof. Dr. Renato Ramos da Silva, UFSC/CFM

Prof. Dr. Rosandro Boligon Minuzzi, UFSC/CCA

MEMBROS SUPLENTE:

Prof. Dr. Wendell Rondinelli Gomes Farias, UFSC/CFM

FLORIANÓPOLIS, 13 de julho de 2017

Agradecimentos

Agradeço, primeiramente a Deus por me dar toda a energia, saúde e disposição necessária para a conclusão destes quatro anos de graduação, que é agora finalizada com a entrega deste trabalho.

Ao meu orientador, amigo e exemplo de profissional, Prof. Dr. Mário Francisco Leal de Quadro por toda a atenção, dedicação, comprometimento e ensinamentos transmitidos no período de realização deste trabalho e na vida.

A todo corpo docente do curso de Meteorologia da UFSC, professores Renato Ramos da Silva, Marina Hirota, Wendell Rondinelli Gomes Farias, Reinaldo Haas e Edson Roberto Marciotto pelos ensinamentos, motivação e aprendizado durante todos os anos. Em especial ao Prof. Dr. Reinaldo Haas, que me motivou ao estudo com sua paixão incondicional pela meteorologia.

A todos os meus amigos e colegas que trilharam esta longa jornada comigo e que de alguma maneira, contribuíram positivamente. Em especial, ao meu amigo e colega Piter Rafael Scheuer, que sempre esteve ao meu lado, me apoiando em minhas dificuldades e me motivando em todos os momentos, da graduação e da vida.

A toda minha família, minhas irmãs, Aline e Sabine, que sempre me apoiaram e me deram amor. Em especial a minha mãe, Marialva Spengler, que sempre esteve ao meu lado, me dando todo tipo de apoio incondicional e nunca me deixando faltar nada.

E a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

Sumário

Lista de Figuras	v
Lista de Tabelas	v
1 Introdução	xii
2 Revisão Bibliográfica	xiii
2.1 Camada Limite Atmosférica	xiii
2.2 Perfil de Vento na CLA	xiv
2.3 Área de estudo	xvi
2.3.1 Sistemas Meteorológicos Atuantes no Estado	xvii
2.3.2 Climatologia de Ventos da Região	xviii
2.4 A Energia dos Ventos	xix
3 Metodologia	xix
3.1 Dados Observacionais	xix
3.2 Modelo WRF	xx
3.3 Curva de Potência	xx
3.4 Estudo de Caso	xxi
3.5 Métodos Estatísticos	xxiv
3.5.1 Erro Médio	xxiv
3.5.2 Coeficiente de Correlação	xxv
3.5.3 Desvio Fracional	xxv
4 Resultados	xxvi
4.1 Descrição do Evento Meteorológico	xxvi
4.2 Simulação Numérica do Modelo WRF	xxix
4.2.1 Espessura, PNM e Vento em Superfície	xxix
4.2.2 Temperatura a 2m	xxxi
4.2.3 Divergência de Umidade e Barbelas de Vento em 850 hPa	xxxiii
4.2.4 Comparação com dados observados	xxxiv
4.3 Energia Eólica Produzida	xxxvii
5 Discussão Final	xxxvii
Referências	xxxviii

Lista de Figuras

1	Representação esquemática da estrutura da CLA ao longo do dia. Fonte: Revista Brasileira do Ensino de Física, ed 2010	xiv
2	Perfil do vento afetado pela rugosidade do terreno. Fonte: Caravvalho, 2003	xv
3	Mapa da velocidade média anual do vento para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Fonte: Atlas Eólico Brasileiro, 2001.	xvii
4	Curva de potência para o aerogerador E-48 de 800 KW da fabricante Wobben. Fonte: http://www.wobben.com.br/produtos/produzidos-no-brasil/e-48-800-kw/	xxi
5	Seleção dos três domínios de integração do modelo WRF. Fonte: Interface gráfica de configuração do modelo WRF - WRFPortal.	xxiii
6	Imagens realçadas do satélite GOES-13, no canal infravermelho, para os horários de 15:00 UTC (a), 18:00 UTC (b) e 23:30 UTC (c) do dia 16 de outubro de 2016.	xxvii
7	Meteorogramas de (a) pressão atmosférica, (b) temperatura e (c) velocidade do vento em Laguna entre 13:00 (UTC) do dia 16 e 03:00 (UTC) do dia 17 de outubro de 2016.	xxviii
8	Imagem de descargas elétricas no solo entre as 21:08 e 21:14 UTC do dia 16 de Outubro de 2016.	xxix
9	Análise de Espessura da Camada (m) entre 1000 e 500 hPa, PRNMM (hPa) e Vento a 10m (m/s) do modelo WRF 9km, para 00 UTC de 16/10 (a), 18 UTC de 16/10 (b) e 00 UTC do dia 17/10 de 2016.	xxxi
10	Análise de temperatura a 2m do modelo WRF 9km para os horários de 12:00 UTC (a), 18:00 UTC (b) do dia 16 e 00:00 UTC (c) do dia 17 de outubro de 2016.	xxxii
11	Gráfico Skew-T do modelo WRF 9km para as 00Z do dia 17 de Outubro de 2016.	xxxiii
12	Análise de Divergência de Umidade e Barbelas de Vento em 850 hPa do modelo WRF 9km para os horários de 12:00 UTC (a), 18:00 UTC (b) do dia 16 e 00:00 UTC (c) do dia 17 de outubro de 2016.	xxxiv
13	Comparação entre dados observados (linha azul) e dados simulados do modelo WRF (linha vermelha) entre as 12 UTC do dia 16 e 03 UTC do dia 17 de Outubro de 2016.	xxxv
14	Gráfico de dispersão entre as intensidades observadas (azul) e simuladas (vermelho).	xxxvi

Lista de Tabelas

1	Configurações e parametrizações utilizadas na simulação através do modelo WRF.	xxiii
2	Índices estatísticos - Erro Médio, Coeficiente de Correlação e Desvio Frazional - calculados através do MATLAB.	xxxvii

Lista de Abreviaturas e Siglas

ABEEólica ...	Associação Brasileira de Energia Eólica
Sabesp	Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
SC	Estado de Santa Catarina
PNT	Previsão Numérica de Tempo
CLP	Camada Limite Planetária
CLA	Camada Limite Atmosférica
CLS	Camada Limite Superficial
MA	Estado de Maranhão
ACM2	Parametrização de CLA de Pleim
MYNN2,5 ...	Parametrização de CLA de Mellor-Yamada
SODAR	Sonic Detection And Ranging
SCM	Sistemas Convectivos de Mesoescala
LABSOLAR .	Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal de Santa Catarina
WMO	World Meteorological Organization
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
NCAR	National Center of Atmospheric Research
NCEP	National Center for Environmental Prediction
NMM	Nonhydrostatic Meso-scale Model
ARW	Advanced Research WRF
GFS	Global Forecast System
GrADS	Grid Analysis and Display System
WAsP	Wind Atlas Analysis and Application Program
BIAS	Erro Médio
COR	Coefficiente de Correlação
COV	Covariância
Fb	Desvio Fracional
PRNMM	Pressão Reduzida ao Nível Médio do Mar

JBN Jato de Baixos Níveis

CAPE Convective Available Potencial Energy

Resumo

Neste trabalho foi avaliado o desempenho do modelo WRF no prognóstico de magnitude da velocidade do vento em um evento de mesoescala que ocorreu na região do Litoral de Santa Catarina entre os dias 16 e 17 de Outubro de 2016, com finalidade de aplicá-lo operacionalmente na indústria de previsão e geração de energia eólica. O modelo WRF foi rodado com condições iniciais e de contorno utilizando os dados do modelo global GFS, com resolução espacial de 0.25 graus e resolução temporal de 3 horas. Três grades aninhadas foram selecionadas para a simulação, com resolução máxima de 1km e 40 níveis verticais, e todas as grades tendo como centro o Farol de Santa Marta - Laguna (local de estudo). Mapas espaciais de espessura da camada, PRNMM, temperatura a 2m, divergência de umidade e gráfico termodinâmico Skew-T foram gerados para análise do fenômeno. O modelo se mostrou capaz de simular o evento satisfatoriamente. Foram gerados séries temporais e índices estatísticos para comparar os dados simulados com os observados. Na série temporal, o modelo consegue acompanhar as tendências de aumento/diminuição da velocidade de maneira bastante razoável. O modelo WRF foi capaz de simular o horário correto em que ocorreu e o valor da rajada máxima de vento. Os índices estatísticos escolhidos foram: erro médio (BIAS), coeficiente de correlação (COR) e desvio fracional (Fb). O BIAS e o Fb mostram que o modelo WRF, no geral, tende a superestimar os valores prognósticos quando comparados com os observados. Um destaque ocorre para a velocidade média simulada através do modelo WRF, que difere de apenas 1.71% da velocidade média observada, considerado como um resultado excelente. Foi utilizado a curva de potência do aerogerador E-48 de 800 kW da fabricante Brasileira Wobben para simular a quantidade de energia eólica média que poderia ser produzida no evento. Concluiu-se, que o modelo WRF é uma poderosa ferramenta computacional para a previsão da velocidade do vento, e consegue ser sensível no quesito de captar as diferenças na velocidade do vento com a aproximação de um fenômeno de mesoescala.

Palavras-chave: Modelagem Numérica, Sustentabilidade, Previsão, Região Sul.

Abstract

In this work was evaluated the performance of WRF on the forecast of wind speed in a mesoescala event that occurred between October 16th and 17th of 2016, with the purpose of applying it operationally in the wind energy industry. The WRF model was run using the global model GFS initial conditions and border conditions, with spatial resolution of 0.25 degree's and time resolution of 3 hours. Three nested domains were selected for the simulation, with maximum resolution of 1km and 40 vertical levels, and every domain having as its center the Santa Marta's Lighthouse - Laguna (study location). Spatial maps of layer thickness, MSLP, 2m temperature, humidity divergence and Skew-T plot were generated for event analysis. The model showed capable of simulating the event satisfactorily. Time series and statistical indices were generated to compare the simulated data with the observed ones. In the time series, the model is able to keep pace with increasing / decreasing velocities quite reasonably. Furthermore, the WRF model was capable of simulating the correct time in which it occurred and the value of the maximum wind gust. The statistical indices chosen were: mean error (BIAS), correlation coefficient (COR) and fractional deviation (Fb). The BIAS and the Fb show that the WRF model, in general, tends to overestimate the prognostic values when compared with those observed. A prominence occurs for the simulated mean speed through the WRF model, which differs from only 1.71% of the average speed observed, considered as an excellent result. Also, the power curve of the 800-kW E-48 wind turbine from Brazilian manufacturer Wobben was used to simulate the amount of medium-wind energy that could be produced at the event. It was concluded that the WRF model is a powerful computational tool for predicting the wind speed, and manages to be sensitive in order to capture the differences in wind speed with the approximation of a mesoscale phenomenon.

Key-words: Numerical Modelling, Sustainability, Weather Forecast, South Brazil.

1 Introdução

Pela crescente demanda de energia elétrica na sociedade nos últimos anos, verificou-se um aumento na produção através de fontes não renováveis, tais como petróleo e carvão. Como consequência disso, os gases do efeito estufa vem aumentando gradativamente, tomando conta do ambiente terrestre. E como medida sanatória para aliviar o problema da poluição atmosférica, o planeta encontra-se em posição de caminhar em direção as fontes limpas de energia. A geração eólico-elétrica expandiu-se de forma acelerada ao longo da última década, atingindo a escala de gigawatts. No Brasil, mesmo tendo apenas 6% da matriz energética pela energia que provem dos ventos, o país encontra-se na 15^a posição no ranking mundial de produção de energia eólica. Os primeiros campos de energia eólica no Brasil foram instalados no Ceará e em Fernando de Noronha no início dos anos de 1990. Atualmente existem mais de 380 parques eólicos no país, distribuídos entre as regiões Nordeste, Sudeste e Sul, as quais são as regiões do Brasil com os maiores potenciais eólicos (ABEEólica, 2014).

O clima também tem se mostrado como um fator importante para a redução da produção de energia elétrica através das usinas hidrelétricas. Nos últimos anos o Brasil tem passado por episódios de estiagem que diminuíram a produção de energia pelas hidrelétricas. Podemos citar, por exemplo, a estiagem de 2003 que afetou os estados do Rio de Janeiro e São Paulo, onde os reservatórios do rio Paraíba do Sul tiveram uma queda de 216MW para 64MW na geração de energia elétrica (Folha de São Paulo, 2003). Recentemente também se verificou um longo período de estiagem no sistema cantareira (Região Metropolitana de São Paulo) no verão de 2013/2014. Segundo dados da Sabesp (2014), choveu apenas 50% do esperado para o período, ocasionando em prejuízos hídricos tanto para o consumo humano quanto na utilização para geração de energia elétrica.

Em função disso, a energia provinda do vento parece ser uma alternativa bastante viável para reduzir a dependência que o país possui da energia provinda da água. Além disso, outro aspecto interessante a ser notado é que, quando comparada com uma usina térmica, uma usina eólica tem um custo de operação e de manutenção 2,5 vezes menor, além de não possuir gastos com combustível (Ricosti, 2011). Devido ao relevo, a região de Laguna no litoral Sul de Santa Catarina é uma das regiões com o maior potencial eólico do Sul do Brasil, com ventos que podem chegar até 9 m/s em 50m de altura (Atlas Eólico Brasileiro, 2001). Até o presente momento ainda não foram feitos estudos a respeito da previsibilidade do vento na região, fator que é decisivo na previsão de geração de energia eólica e na decisão de ligar/desligar os aerogeradores.

O regime de ventos de uma região é determinado pelas suas características físicas e geológicas. De acordo com medidas feitas no período de 1998 a 2002, a velocidade média do vento a 50m em Laguna é a mais alta do Estado, indicando forte potencial eólico para a região. Porém, ainda não foi feito um estudo para avaliar o prognóstico de ventos pelo modelo WRF para Laguna. Sabe-se ainda que uma pequena variação da velocidade

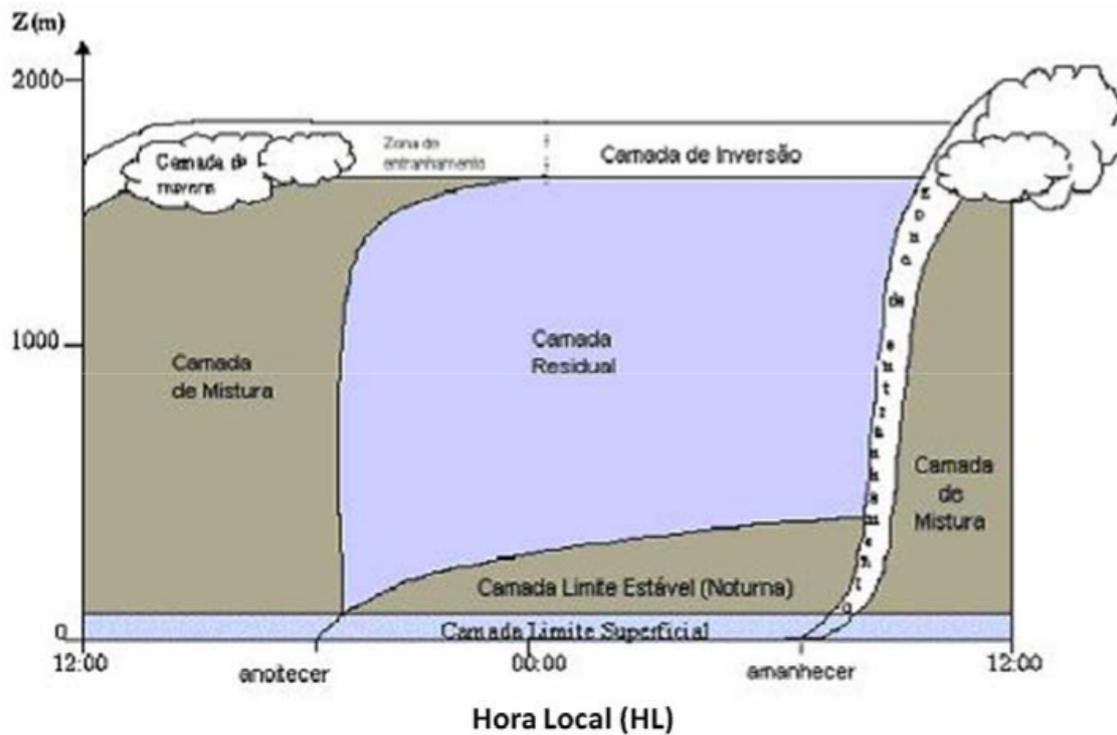
do vento causa uma grande variação na potência gerada pelo aerogerador, o que motiva a fazer um estudo mais minucioso para a previsão no regime de ventos da região. Pelo exposto, o objetivo principal desta monografia é de, através de simulações com um modelo de Previsão Numérica de Tempo (PNT), avaliar o comportamento do vento nos primeiros metros de altura (ou dentro da CLP) sobre a região de Laguna (SC). Especificamente este projeto visa: (a) analisar a previsibilidade do vento pelo modelo WRF; (b) calcular a potência gerada a partir da energia cinética do vento e (c) comparar dados gerados pelo modelo atmosférico com os dados observados.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Camada Limite Atmosférica

A camada limite atmosférica (CLA), também conhecida como camada limite planetária (CLP) é a região da baixa troposfera aonde a superfície terrestre influencia fortemente a temperatura, umidade e ventos através de movimentos turbulentos na camada. Basicamente, a CLA é a região da atmosfera aonde movimentos turbulentos são significantes (Stull, 1988). A sua altura varia de 100 a 2000m e depende de fatores como horário do dia e estação do ano. Durante dias de verão (temperatura mais alta) a CLA tende a ser mais espessa, e durante noites de inverno (temperatura mais baixa) a CLA tende a ser mais fina (Fig. 1). A região inferior da CLA (100 primeiros metros) é chamada de camada limite superficial (CLS). O estudo da CLS é de grande importância neste trabalho pois é a região aonde a velocidade do vento é influenciada pela rugosidade do terreno (Stull, 1988).

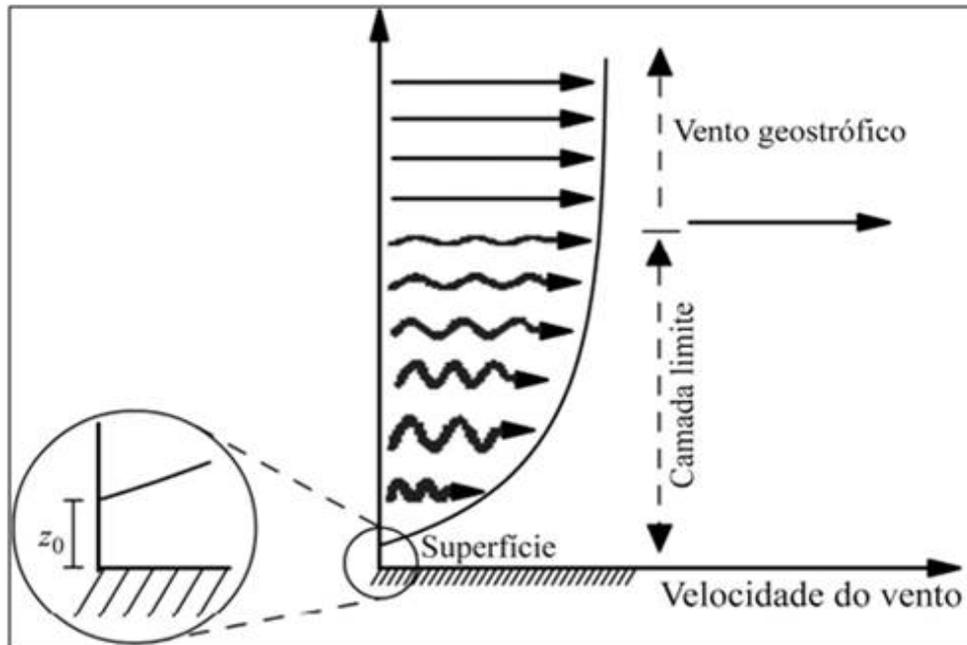
Figura 1: Representação esquemática da estrutura da CLA ao longo do dia. Fonte: Revista Brasileira do Ensino de Física, ed 2010



2.2 Perfil de Vento na CLA

A figura 2 mostra o perfil do vento ao passar por uma superfície rugosa. Esta rugosidade da superfície ocasiona na redução da velocidade do vento (Moreira, 2007), o que impacta em um gradiente da velocidade do vento ao longo da altura. Com isso, o perfil de vento dentro da camada limite superficial pode ser descrito através de uma função logarítmica.

Figura 2: Perfil do vento afetado pela rugosidade do terreno. Fonte: Caravvalho, 2003



Oke (1987) definiu uma função logarítmica chamada de Função Logarítmica do Perfil do Vento, apresentada na equação (1) e definida por uma função semi-empírica que descreve a distribuição da velocidade horizontal do vento de acordo com a altura na porção inferior da CLA:

$$u_z = \frac{u_*}{\kappa} \left[\ln\left(\frac{z-d}{z_0}\right) + \psi(z, z_0, L) \right] \quad (1)$$

Onde u_z é a velocidade do vento em uma altura z em m/s , u^* é a velocidade de atrito (m/s), κ é a constante de von kármán (0.4), d é o deslocamento do plano zero, z_0 é a rugosidade da superfície, e ψ é o termo de estabilidade, onde L é o comprimento de Obukhov.

A velocidade de atrito é comumente usada como parâmetro para determinar o quão forte é a componente de flutuabilidade em um escoamento turbulento. O deslocamento do plano zero é a altura apartir da superfície onde a velocidade do vento é nula pelo efeito de obstáculos como árvores, construções, etc. A rugosidade da superfície é a altura onde a velocidade do vento é nula pelo efeito de rugosidade, particular de cada superfície.

O termo ψ é conhecido como a função de correção de estabilidade de Monin-Obukhov, que depende do comprimento de Obukhov L , que é uma medida da altura até aonde movimentos turbulentos são significantes. Para atmosferas neutras, a função de correção de estabilidade tende a zero (Monin-Obukhov, 1954).

Hassan et al. (1990) fornece valores típicos de z_0 para diferentes tipos de terreno, podemos citar como exemplo: $z_0 = 0,001$ para areia, $z_0 = 1$ para florestas, $z_0 = 4$ para centros urbanos. Quanto mais próximo à superfície, melhor a representatividade da função (Oke, 1987).

No Brasil ainda existem poucos estudos que analisam o perfil vertical do vento. Silva et. al. (2013) mostram como o perfil vertical do vento se comporta para 4 parametrizações diferentes de CLA através do modelo WRF para a região do Centro de Lançamento de Alcântara (MA). Os resultados mostraram que as parametrizações que melhor se adequaram às características regionais e as condições sazonais foram: ACM2 (Asymmetric Convection Model 2 Scheme, Pleim et al, 2007) para a estação seca e MYNN2,5 (Mellor-Yamada Level 2.5, Nakanishi and Niino, 2006) para a estação chuvosa. Em geral, o modelo superestimou a velocidade do vento em até 2,0 m/s.

Fonseca et al (2016) mostraram a previsibilidade do perfil de vento para a região central de Alagoas utilizando o modelo WRF. Para o estudo, o modelo representa bem a velocidade do vento, com coeficiente de correlação de 0,86 e erros superestimados de apenas 10,55%.

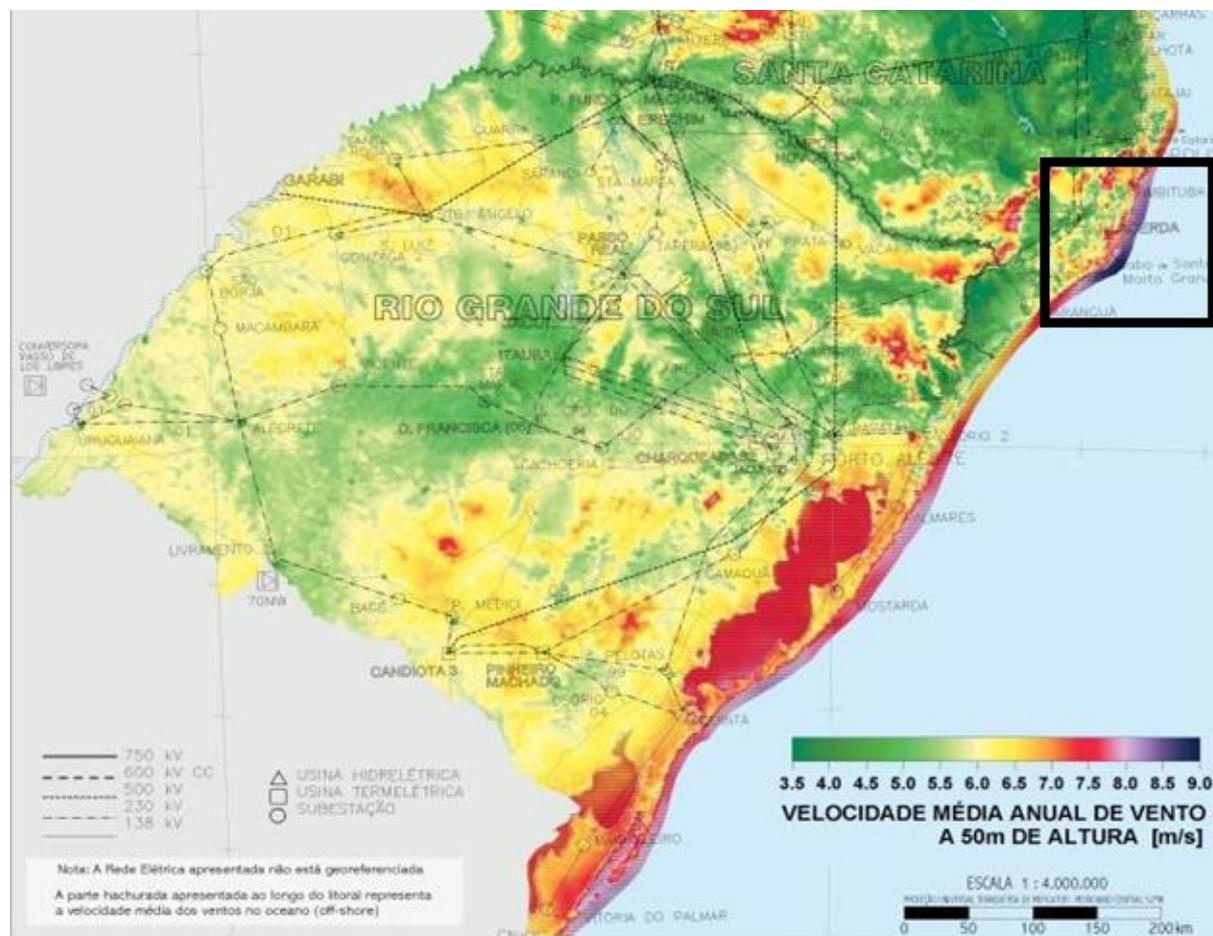
Oliveira e Fisch (2001) estudaram como o perfil do vento se comporta em áreas de pastagem e de florestas na Amazônia. O comportamento médio do vento nos dois sítios é quase semelhante, com uma diferença máxima de 2,0m/s (maior na floresta) em 2000m de altura. Em ambas as localidades, a direção predominante é de Nordeste acima de 1000m e de Sudeste abaixo de 1000m.

Silva e Lyra (2009) apresentaram um estudo comparativo do perfil de vento medido por radiossondas e por um sodar. Os resultados apresentados indicam que o grau de confiabilidade das informações de vento obtido pelo SODAR diminui para camadas acima de 500m, sendo um método interessante para cálculo do perfil do vento em níveis mais baixos da CLA, e não se mostrando muito eficiente para níveis mais altos da CLA.

2.3 Área de estudo

Laguna é uma cidade do litoral Sul do estado de Santa Catarina e conta com pouco mais de 45 mil habitantes. De acordo com o Figura 3, Laguna é uma região com um dos maiores potenciais eólicos do Sul do Brasil. No cenário atual, os parques eólicos do estado estão concentrados na região de Água Doce e Bom Jardim da Serra, no Oeste e na região Serrana, localização dos 15 maiores parques. Contudo, o Atlas Eólico mostra que a região do estado com o maior potencial eólico com ventos chegando a 9m/s em 50 metros de altura na maior parte do ano é a região de Laguna.

Figura 3: Mapa da velocidade média anual do vento para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Fonte: Atlas Eólico Brasileiro, 2001.



2.3.1 Sistemas Meteorológicos Atuantes no Estado

Pela sua posição geográfica tropical, o clima no estado de Santa Catarina é marcado pela interação entre massas de ar tropical e extratropical havendo a influência de vários sistemas meteorológicos. Durante o outono e inverno há uma maior atuação de massas de ar polar (Monteiro, 2013), que ocasiona a entrada mais freqüente de sistemas frontais e ciclones extratropicais, muitas vezes sendo bastante intensos, os quais podem originar tempestades bem localizadas, mas com menor freqüência que no verão quando predomina a atuação da massa de ar tropical.

Ainda segundo Monteiro, os sistemas que atuam no estado de Santa Catarina podem ser divididos de acordo com as estações do ano. No verão, há forte convecção pelo intenso

aquecimento radiativo, ocasionando a formação de nuvens com forte desenvolvimento vertical, do tipo cumulonimbus, que resulta em pancadas de chuva, principalmente no período da tarde. Ainda no verão também verifica-se a passagem de frentes frias que intensificam a convecção tropical. Essa interação resulta na formação das tempestades, que se caracterizam por chuvas de forte intensidade, descargas elétricas, rajadas de ventos fortes e até a precipitação de granizo. O outono é caracterizado por frequentes eventos de bloqueios atmosféricos (Fuentes, 1997), que impedem a passagem de frentes frias sobre o Estado de Santa Catarina. Este sistema meteorológico é caracterizado pela estabilidade atmosférica (inibição dos movimentos convectivos), resultando em períodos com pouca nebulosidade e sem ocorrência de chuva. No geral, o período do outono é o que apresenta os menores índices de precipitação. No entanto, apesar da característica desta estação, eventos extremos, como tempestades, podem ocorrer em qualquer época, ocasionando chuvas intensas e localizadas que acabam, às vezes, elevando significativamente o total mensal de precipitação de uma determinada localidade. As condições de tempo do período de inverno são influenciadas por sucessivas massas de ar polar provenientes do continente antártico ocasionando tempo estável com baixo nível de convecção, com predomínio de céu claro e declínio da temperatura em todas as regiões do Estado, o que favorece a formação de geada e de nevoeiro, fenômenos típicos da estação. Em Santa Catarina, a primavera, por ser um período de transição, é marcada pela instabilidade atmosférica, que é responsável por frequentes episódios de Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM), fenômenos que se formam, em sua maioria, sobre o norte da Argentina durante a madrugada e deslocam-se rapidamente para leste, atingindo o Estado de Santa Catarina entre a madrugada e início da manhã, favorecendo a ocorrência de pancadas de chuva forte com trovoadas e granizo isolado.

2.3.2 Climatologia de Ventos da Região

Dalmaz, 2007, mostra que Laguna é a região do estado de Santa Catarina com a maior média de velocidade do vento, com mensais mínimos que correspondem a 4,77 m/s e máximos a 11,58 m/s. Anualmente, os valores mínimos e máximos são de 6,85 m/s e 8,53 m/s respectivamente, com média de 7,80 e 7,91 para os anos mais significativos. Os dados foram coletados através de um anemômetro de conchas do LABSOLAR / UFSC nas coordenadas 28.30 S, 48.44 O (lat, lon). A altura de coleta dos dados foi de 48m acima do solo, e foi utilizado média de 10 minutos de dados processados a cada 2 segundos. A escolha de médias a cada 10 minutos é própria para o estudo do potencial eólico de um local, que segundo Molly (2005), através de médias de 10 minutos, consegue-se uma boa distinção entre variações de grande escala e micro-escala devido a turbulência ou rajadas. Ainda segundo Dalmoz (2007), para o regime de direção do vento, Laguna apresenta ventos predominantes de Nordeste, com 25% dos dados apontando resultados nesta direção.

2.4 A Energia dos Ventos

Segundo o manual da WMO (World Meteorological Organization), velocidade do vento é definido como a magnitude do vetor tridimensional do vento em um fluxo contínuo. E o vento por sua vez, segundo Taylor (2004), é decorrente de um movimento de massas de ar atmosféricas provenientes das variações de pressão existentes em diferentes locais do globo. De acordo com a ANEEL (2005), energia eólica é a energia cinética contida nas massas de ar em movimento. Pela conservação de energia, a energia cinética de translação contida nas massas de ar em movimento se converte em energia cinética de rotação quando o vento passa pelas pás do aerogerador eólico. O aproveitamento da potência gerada pode ser descrito pela Equação 2:

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

Onde P é a potência em $[W]$, v é a velocidade em $[m/s]$ com que o vento chega nas pás do aerogerador, ρ em $[kg/m^3]$ é a densidade do ar na altura das pás, e A em $[m]$ é a área varrida pela rotação das pás do aerogerador. Analisando a equação, vemos que o parâmetro mais significativo e o que menos temos o controle é justamente a velocidade do vento. E também, o que ocasiona o maior erro na previsão de geração de energia. Segundo Burton (2001), um erro de 10% na previsão da velocidade do vento ocasiona em um erro de 37% na previsão da geração de energia eólica. Logo, percebemos a importância dos dados prognósticos do vento para melhor gerir e prever a participação eólica no planejamento energético de um país.

3 Metodologia

3.1 Dados Observacionais

Uma estação meteorológica de superfície automática é composta de uma unidade de memória central ("data logger"), ligada a vários sensores dos parâmetros meteorológicos (pressão atmosférica, temperatura e umidade relativa do ar, precipitação, radiação solar, direção e velocidade do vento, etc), que integra os valores observados minuto a minuto e os disponibiliza automaticamente a cada hora. O banco de dados do INMET possui como base estações automáticas que fazem medições de variáveis meteorológicas (incluindo vento) espalhadas por todo o Brasil. Operando desde 2008 e com 34m de altitude, a estação automática de Laguna (SC), localizada no Farol de Santa Marta, fornece dados de

temperatura, umidade, temperatura do ponto de orvalho, pressão, velocidade e direção do vento, radiação e chuva. Apenas os de velocidade do vento foram utilizados como critério de comparação para esta monografia.

3.2 Modelo WRF

O modelo WRF (Weather Research & Forecast) é um modelo de previsão numérico de mesoescala desenvolvido pelo conjunto de vários órgãos americanos, dentre eles o NCAR (*National Center of Atmospheric Research*) e o NCEP (*National Center for Environmental Prediction*). A escolha desse modelo é justificada pois na atualidade é o que dispomos de mais moderno em modelos numéricos. Além disso, é um modelo de fácil manipulação, livre, código aberto e permite liberdade nas configurações e parametrizações físicas, dinâmicas e numéricas, sendo uma excelente ferramenta para estudo de um caso isolado, tendo em vista que se pode particularizar a simulação. Mais detalhes do modelo podem ser obtidas em Skamarock et al (2008).

O WRF ainda dispõe de dois núcleos de processamento, sendo eles o NMM (Nonhydrostatic Mesoscale Model) e o ARW (Advanced Research WRF). O núcleo escolhido para este trabalho foi o ARW, pelos seguintes motivos.

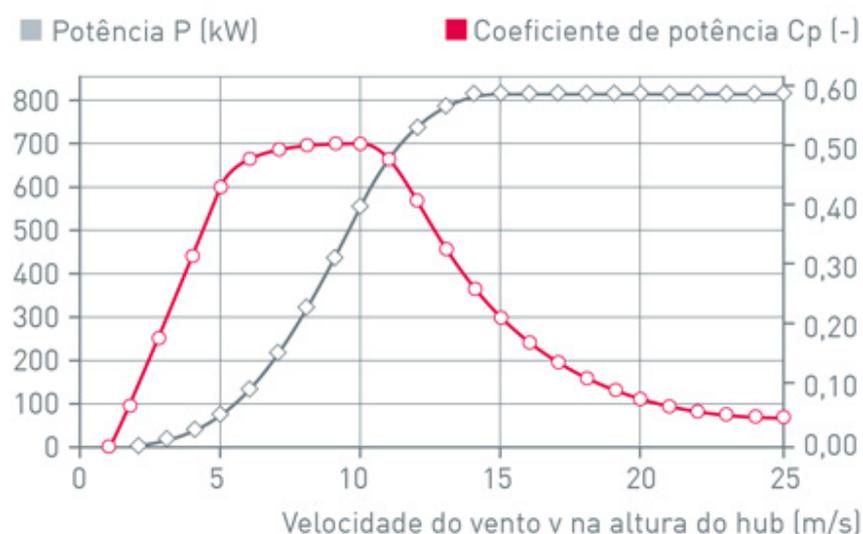
O ARW utiliza as equações governantes de Euler que utiliza uma posição fixa e observa o movimento da partícula na atmosfera. Também, realiza as simulações numéricas em quatro dimensões (x,y,z,t), a malha horizontal se repete em todos os níveis verticais a cada passo de tempo. O ARW possui um sistema de coordenadas vertical descrita pela coordenada η , que acompanha o contorno do terreno. Além disso, o ARW possui a grade horizontal de Arakawa-C e utiliza o método de integração de Runge-Kutta de segunda ou terceira ordem.

3.3 Curva de Potência

Além das peças, linha de montagem, e tecnologia, aerogeradores fabricados por empresas distintas se diferem em altura do aerogerador e diâmetro das pás. Como foi visto na seção 2.4, a energia produzida por um aerogerador é influenciada diretamente pelo diâmetro das pás, e, tendo em vista que o diâmetro das pás e a densidade do ar em uma altura fixa são constantes, podemos definir a Curva de Potência de um aerogerador. A curva de potência é um dado técnico da turbina eólica que informa o quanto de potência aquele aerogerador consegue extrair em função de cada valor da velocidade do vento. Ela

leva em consideração a fabricação da turbina eólica em si, descontando perdas pela caixa de transmissão, rendimento aerodinâmico e do gerador aerodinâmico, por exemplo. Como exemplo, a figura 2 mostra a curva de potência para o aerogerador E-48 de 800 KW da fabricante Brasileira Wobben:

Figura 4: Curva de potência para o aerogerador E-48 de 800 KW da fabricante Wobben. Fonte: <http://www.wobben.com.br/produtos/produzidos-no-brasil/e-48-800-kw/>



Nota-se que para que o aerogerador extraia um potencial, é necessário se ter uma velocidade de threshold (velocidade mínima para que o movimento se inicie), e também, o aerogerador possui uma velocidade máxima na qual pode ser operado. Quando o vento atinge esta velocidade máxima, o aerogerador é automaticamente desligado para evitar um sobrecarregamento na rede e danos nas engrenagens e partes mecânicas da turbina.

3.4 Estudo de Caso

Para que se possa fazer uma simulação numérica pelo modelo WRF, é necessário que se utilize dados de entrada afim de que o modelo consiga integrar suas equações no tempo e nos dê o resultado da simulação. Em função disso, foram utilizados os dados de entrada do modelo GFS. Com resolução espacial de 0,25 (25km) e resolução temporal de 1 hora, o GFS é um modelo acoplado composto por 4 modelos (um atmosférico, um oceânico, um de solo e um de gelo), que trabalhando juntos conseguem fornecer um prognóstico acurado da atmosfera (Yang et al, 2006). A intenção de se utilizar dados de previsão e não de análise é para cumprir os objetivos de determinar a previsibilidade do modelo em condições possivelmente operacionais para gestão de energia elétrica, cujos

resultados podem ser determinantes para a administração correta do parque eólico, sendo parte integrante da motivação do trabalho.

Entre os dias 16 e 18 de Outubro de 2016 Santa Catarina um cavado avança sobre o litoral de Santa Catarina. Chuvas e rajadas de ventos de até 100km/h atingiram a região. O caso foi escolhido por se tratar de um evento recente e com intuito de verificar a sensibilidade do modelo á eventos de mesoescala com presença de fortes rajadas de vento.

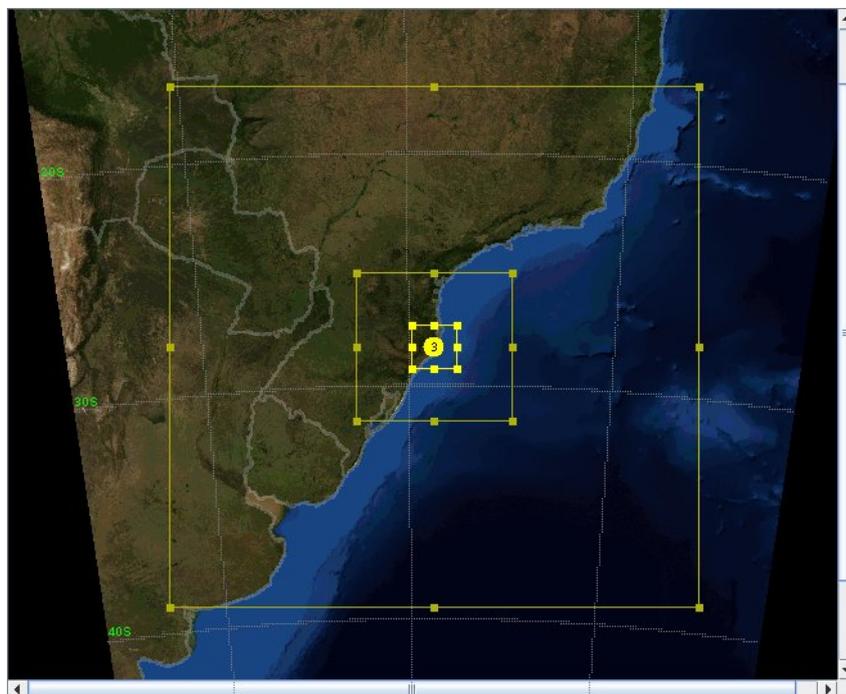
O trabalho foi dividido em 4 etapas.

Na primeira etapa do trabalho foi feita a instalação do modelo WRF. Por ser um modelo extremamente dinâmico, o WRF possui inúmeras bibliotecas de códigos e configurações que podem ser utilizados em sua instalação. O modelo WRF foi instalado em um notebook com sistema operacional Linux Ubuntu 14.1 e com as seguintes configurações de desempenho: Processador Intel Core i5-2450 de 2.50GHz e 6 GB de memória RAM. Vale ressaltar que como este trabalho possui caráter científico, não é necessário um computador potente, todavia, caso a mesma metodologia seja implementada com intuito operacional e de vigilância, é necessário um cluster de ultima geração para rapidez na geração de dados.

Após a instalação do modelo e realização de testes para ver se o mesmo funciona corretamente, foram baixados os dados de entrada do GFS utilizados para a simulação numérica. Com os dados em mãos, foi inicializado o processo de configuração da simulação numérica pelo modelo WRF. O modelo foi configurado com 3 domínios aninhados com espaçamento de grade de 9km para o domínio maior, 3km para o domínio intermediário e 1km para o menor domínio e com passos de tempo de 40s para o maior domínio, e razão de 1/3 para os domínios menores. Todos os domínios tem como centro o Farol de Santa Marta, local onde se encontra a estação automática do INMET (Figura 5). A escolha da posição e do tamanho dos três domínios foram determinados respeitando algumas premissas de acordo com Wang (2012):

1. O D1 deve ser grande o suficiente para resolver por completo os sistemas sinóticos que influenciam a região de estudo.
2. O D1 deve ser grande o suficiente para que os “pulsos” inseridos nas bordas, devido à fronteira ser atualizada pelas previsões do GFS a cada hora, sejam amortecidos até atingir as fronteiras dos D2 e D1.
3. O D3 deve estar centrado no Farol de Santa Marta e a estação deve estar dentro de seu domínio com distância superior a dez pontos de grade da fronteira, evitando efeitos de borda.
4. Sempre que possível nenhuma grade deve atravessar grandes montanhas (maiores que 1000m) em suas fronteiras.

Figura 5: Seleção dos três domínios de integração do modelo WRF. Fonte: Interface gráfica de configuração do modelo WRF - WRFPortal.



Todas as configurações utilizadas na simulação pelo modelo WRF estão na Tabela 1.

Tabela 1: Configurações e parametrizações utilizadas na simulação através do modelo WRF.

Simulações	Grade 1	Grade 2	Grade 3
Modelo/Versão	WRF V3.9		
Condições Iniciais/Contorno	GFS 0.25°		
Período de Integração	00Z - 16/10/2016 á 03Z - 17/10/2016		
Período de Spin-Up	12 horas		
Período de Integração Útil	12Z - 16/10/2016 á 03Z - 17/10/2016		
Número de Grades	3		
Pontos de grade em x	100	88	76
Pontos de grade em y	100	88	76
Espaçamento dos pontos de grade	9km	3km	1km
Número de níveis verticais	40		
Razão do time-step entre os domínios	1/3		
Param. Radiação SW	MM5 Shortwave (Dudhia)		
Param. Radiação LW	RRTM Scheme (Mlawer et al, 1997)		
Param. Convectiva	New Kain-Fritsch (2004)	Não adotado	Não adotado
Nível de Microfísica	WSM 3-class scheme (Hong, Dudhia and Chen, 2004)		
Param. de Turbulência	Difusão de 2nd ordem e 2D Smagorinsky		
Param. de Camada Limite	YSU PBL Scheme (Hong et al, 2006)		

Após a simulação numérica do modelo WRF, teremos dois tipos de dados: dados de observação e dados prognósticos gerados pelo WRF. Todos os dados foram inseridos no programa MATLAB (<https://www.mathworks.com>), o qual foi utilizado para a confecção de gráficos comparativos e cálculo de índices estatísticos entre os dados prognósticos do WRF com os dados observados. E concluindo, o software GrADS (Doty & Kinter 1995) será utilizado para gerar mapas espaciais e curvas de nível.

Utilizando os valores prognósticos da velocidade do vento, os mesmos foram utilizados para fazer uma análise comparativa com a curva de potência do aerogerador E-48 de 800 KW da fabricante Brasileira Wobben (maiores detalhes do aerogerador disponíveis em <http://www.wobben.com.br/produtos/produzidos-no-brasil/e-48-800-kw/>) para se ter uma estimativa da energia produzida. O motivo da escolha deste aerogerador em particular se dá simplesmente por ser um aerogerador fabricado em território nacional e foi o primeiro desenvolvido pela empresa. Novamente, para uma aplicação de monitoramento, o ideal seria utilizar o software WAsP (Mortensen, 1993), porém, pelo custo elevado da licença para a utilização do programa, a sua possibilidade de uso foi descartada neste estudo.

3.5 Métodos Estatísticos

Em geral, para avaliar quantitativamente a acurácia de modelos numéricos, utilizam-se métricas estatísticas para comparar dados observados e simulados. Os índices escolhidos para este trabalho foram escolhidos de acordo com Hanna (1989) e são descritos a seguir. Vale ressaltar que o cálculo dos índices estatísticos levou em consideração apenas períodos onde os dados fossem pareados, ou seja, quando não houvesse ocorrência de problemas relacionados à ausência e/ou falhas no banco de dados.

3.5.1 Erro Médio

O erro médio (BIAS) é definido como a média aritmética do valor absoluto dos desvios para N medidas, e mostra a tendência de erro ou vício dos modelos. Valores acima de 0 indicam superestimativa e valores abaixo de 0 indicam subestimativa dos modelos. O valor ideal é 0. O erro médio individualmente não possui grande relevância, tendo em vista que se houver erros compensatórios, o valor do índice será 0 e ainda assim a previsão

será de baixa qualidade. O BIAS é definido pela equação 3:

$$BIAS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i) \quad (3)$$

3.5.2 Coeficiente de Correlação

O coeficiente de correlação determina qual é a relação linear entre os valores de P e de O e é descrita pela equação 4:

$$COR = \frac{Cov}{\sigma_p \sigma_o} \quad (4)$$

Onde σ_p e σ_o representam, respectivamente os desvios padrões dos dados de previsão e de observação.

A covariância é dada por:

$$Cov(P, O) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O}) \quad (5)$$

Onde N é o numero de elementos utilizados no cálculo e \bar{P} e \bar{O} são as médias dos valores de simulados e observados, respectivamente.

O valor da correlação pode assumir valores de -1 a 1 , sendo 1 considerado um valor ótimo.

3.5.3 Desvio Fracional

No desvio fracional (Fb), os valores podem variar entre -2 e 2 , sendo 0 considerado ideal. Para valores positivos o modelo subestima o dado observado e para valores negativos o modelo superestima. Este índice, como é normalizado, informa percentualmente o

quanto os dados previstos estão subestimando ou superestimando os dados observados. É definido pela equação 6:

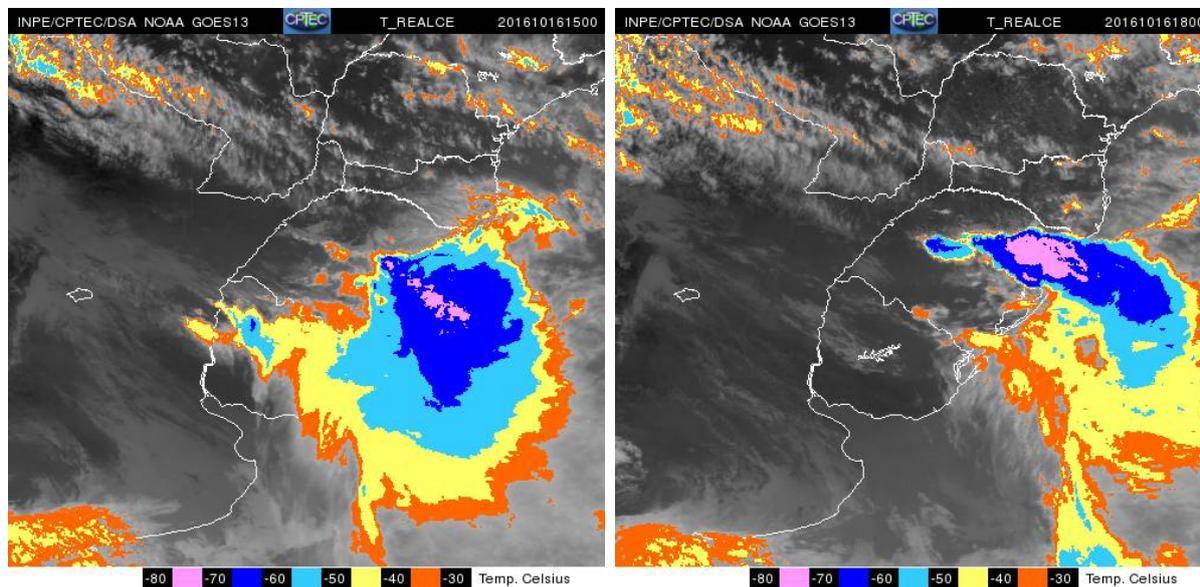
$$Fb = \frac{2(\bar{O} - \bar{P})}{(\bar{O} + \bar{P})} \quad (6)$$

4 Resultados

4.1 Descrição do Evento Meteorológico

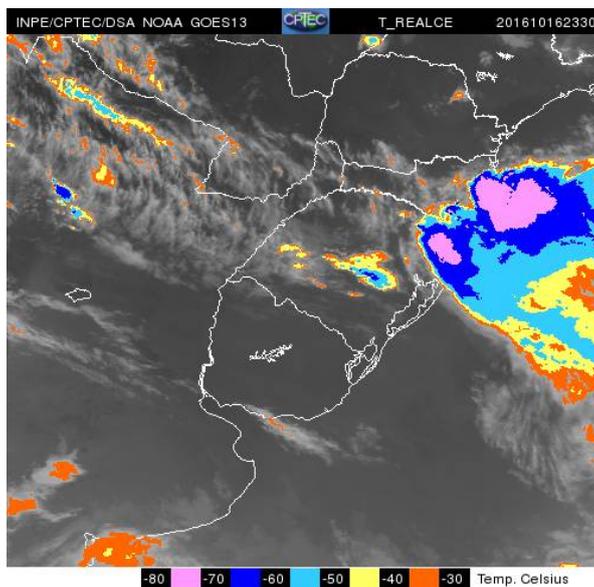
Na figura 6a, a presença de nuvens de desenvolvimento vertical, com topos com grande profundidade, chegando até a -80°C de temperatura, associadas à presença de um SCM atuando sobre a faixa leste do Rio Grande do Sul. Na figura 6b, verifica-se que o SCM desloca-se para nordeste, localizado sobre o litoral sul de SC, próximo a região de Laguna. Neste horário o sistema encontra-se mais organizado e configurado. Verifica-se que na figura 6c, o sistema convectivo evolui gradativamente em direção a faixa leste do estado de SC, onde o sistema tem grande contribuição da termodinâmica da região, provocando, rápidas mudanças na pressão e fortes rajadas de ventos, cujos dados foram registrados pela estação automática do INMET (Figura 7). Na imagem de detecção de descargas atmosféricas (Figura 8) do Starnet, verifica-se uma grande quantidade de raios exatamente sobre a região do litoral de SC associado a nuvens profundas de trovoadas. Esse formato de arco ao longo das descargas elétricas (raios) esta associado, a existência de um cavado invertido (mais detalhes na seção 4.2.1), atuando sobre o oceano atlântico na altura do litoral de Laguna, apresentando forte confluência de ventos, contribuindo na manutenção e potencialização das tempestades.

Figura 6: Imagens realçadas do satélite GOES-13, no canal infravermelho, para os horários de 15:00 UTC (a), 18:00 UTC (b) e 23:30 UTC (c) do dia 16 de outubro de 2016.



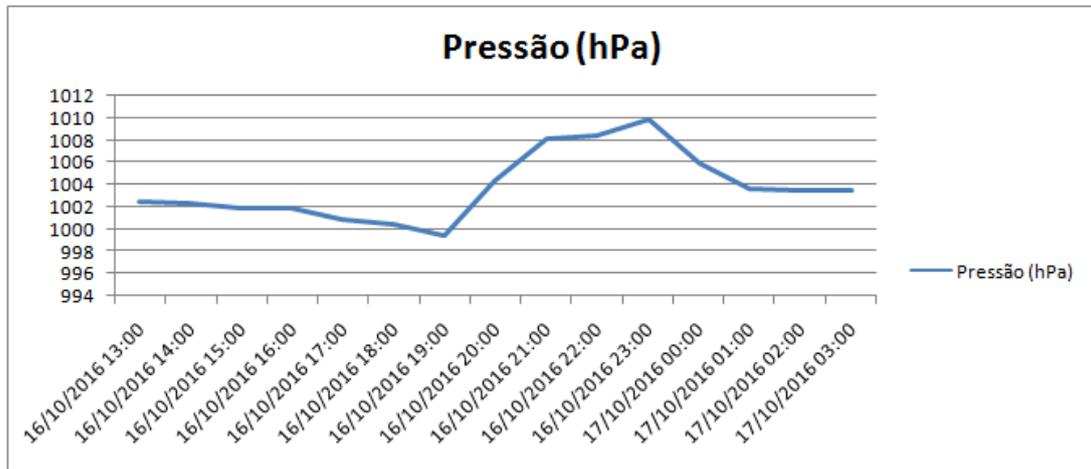
(a)

(b)

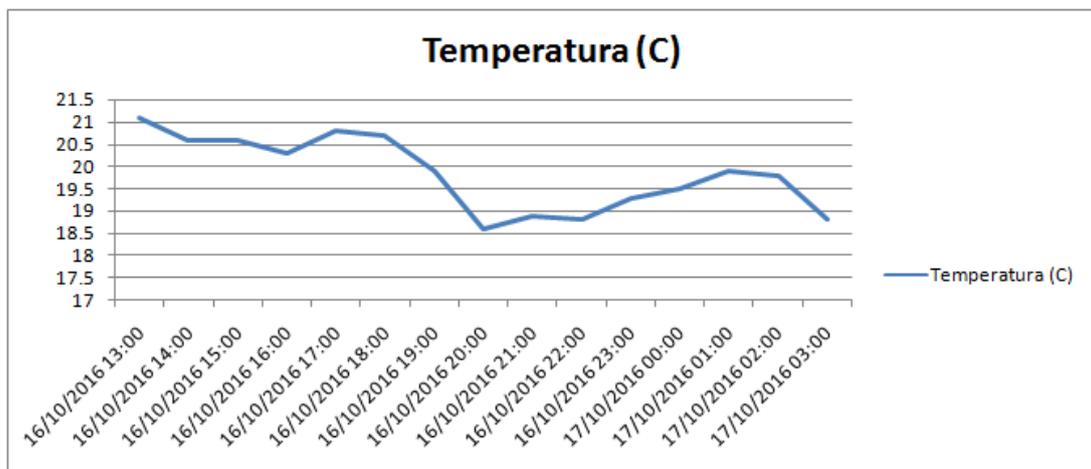


(c)

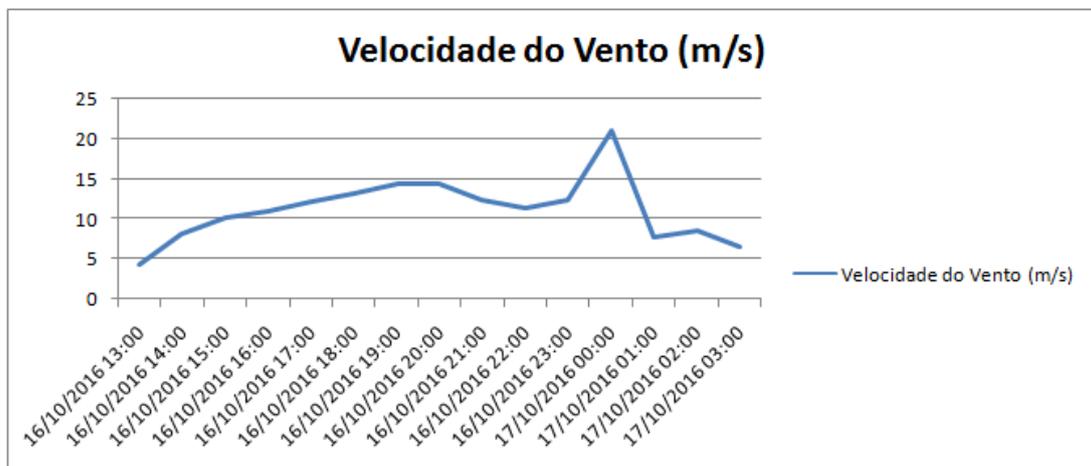
Figura 7: Meteogramas de (a) pressão atmosférica, (b) temperatura e (c) velocidade do vento em Laguna entre 13:00 (UTC) do dia 16 e 03:00 (UTC) do dia 17 de outubro de 2016.



(a)

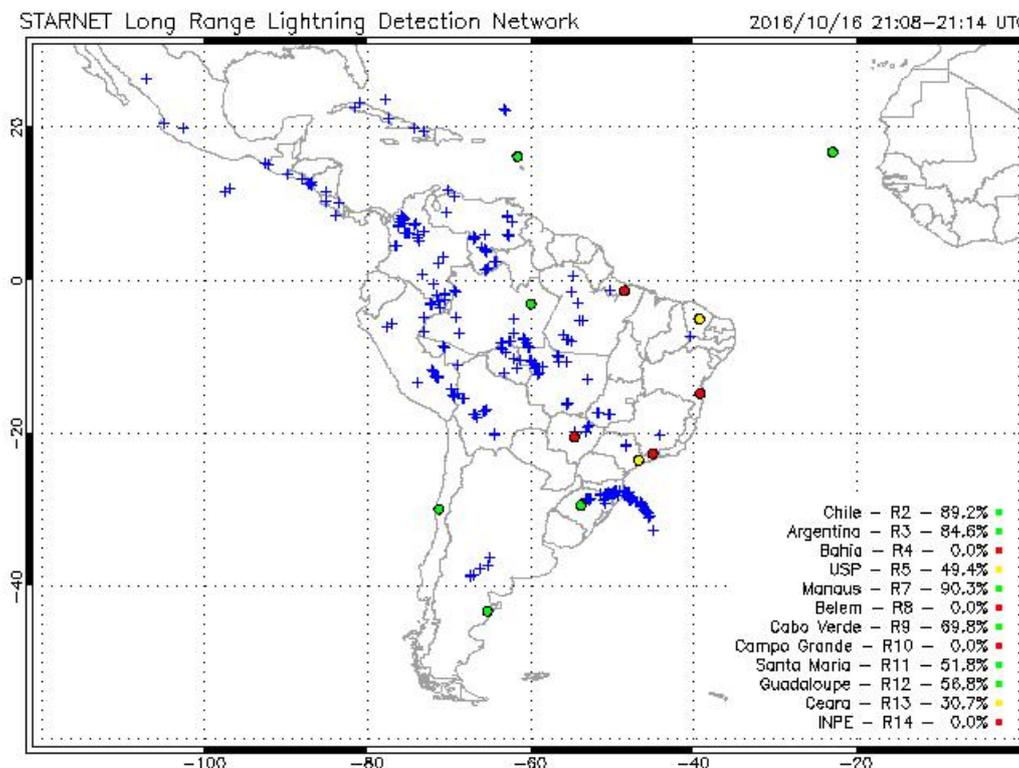


(b)



(c)

Figura 8: Imagem de descargas elétricas no solo entre as 21:08 e 21:14 UTC do dia 16 de Outubro de 2016.



4.2 Simulação Numérica do Modelo WRF

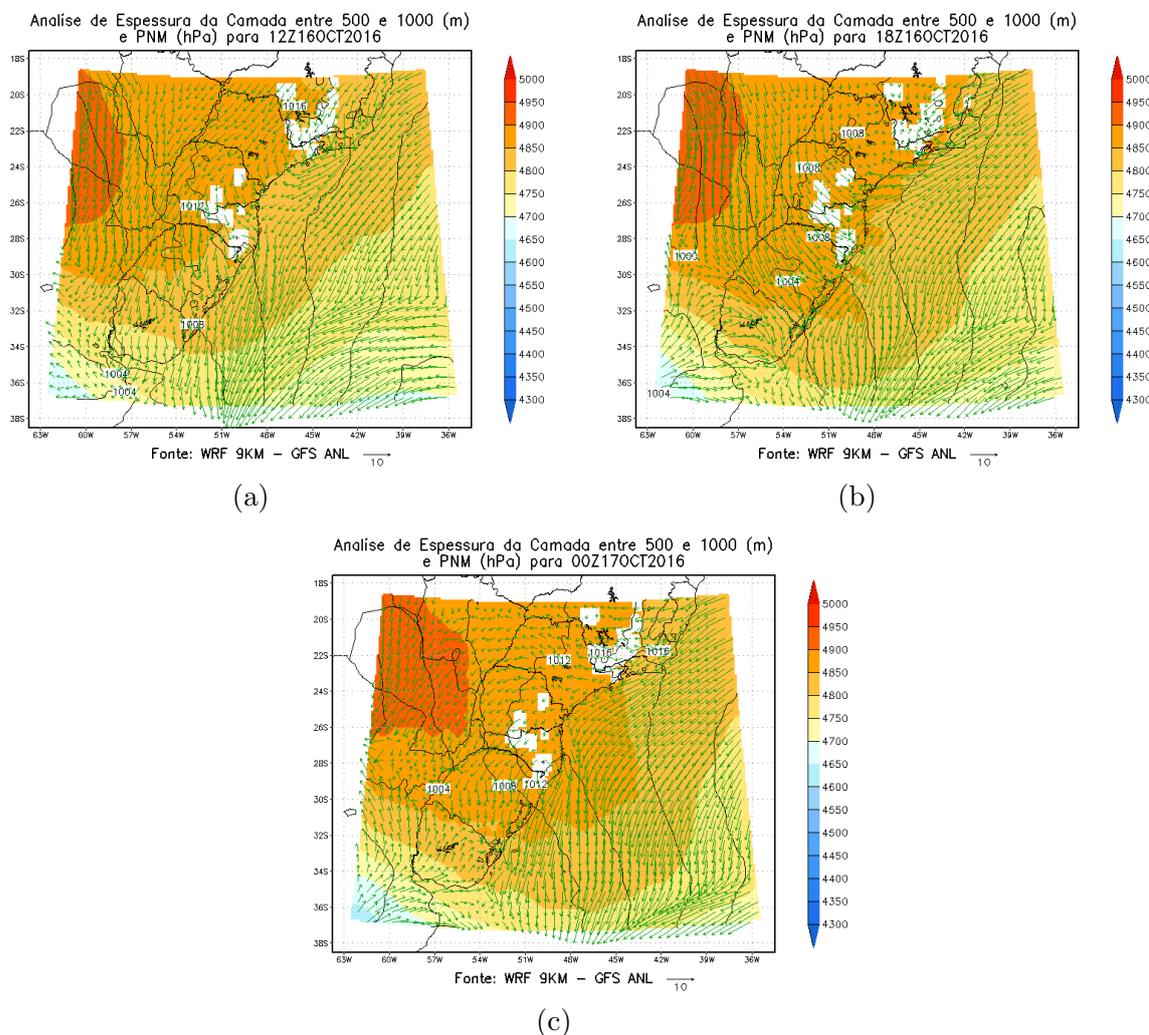
Como citado anteriormente, o modelo WRF foi rodado em um notebook de uso pessoal (configurações na seção 3.4), o que aumenta muito o tempo de integração de acordo com a complexidade da simulação, devido a baixa capacidade de processamento quando comparado com supercomputadores. O tempo necessário para concretizar a simulação foi de aproximadamente 48 horas, o espaço em disco utilizado, somando os dados do modelo GFS (condições de contorno e condições iniciais) e os arquivos gerados pelo modelo WRF foi de aproximadamente 28 GB. Abaixo segue os resultados da simulação.

4.2.1 Espessura, PNM e Vento em Superfície

Na figura 9, apresenta os campos de espessura, Pressão Reduzida ao Nível Médio do Mar (PRNMM) e vento em superfície. Na figura 9a (12Z de 16/10) verifica-se a

existência de um cavado invertido atuando sobre o oceano atlântico na altura do litoral do RS, apresentando forte confluência de ventos, contribuindo para o desenvolvimento de nuvens profundas, associadas a intensa atividade elétrica. O campo de espessura entre 1000 e 500 hPa apresenta valores entre 4750 e 4800 m ao longo do eixo do cavado. Observa-se ventos de nordeste a norte sobre a região de Laguna, com intensidade fraca a moderada. A figura 9b, mostra que o cavado continua atuando com ventos convergentes do quadrante nordeste sobre alto mar, contribuindo para a intensificação das nuvens. Verifica-se o aprofundamento de outro cavado invertido em superfície, atuando acima da região de Laguna contribuindo na manutenção e potencialização das tempestades. Ventos convergentes atuando acima da região de Laguna, sendo um dos ingredientes para potencializar as nuvens de trovoadas. Nota-se na figura 9c, que o cavado encontra-se sobre o Oceano Atlântico adjacente atuando com ventos mais persistentes. Ao longo do eixo do cavado, temos uma espessura de 4800 m. Nota-se que ao longo da região da Faixa Leste do território catarinense, o vento fica atuando do quadrante nordeste com intensidade mais fraca. Nas demais regiões de SC, predomínio de muitas nuvens com ventos de nordeste a norte, fraco a moderado. A espessura da camada encontra-se mais elevada sobre a região do Paraguai, evidenciando uma região mais instável que sofre grande influência do JBN.

Figura 9: Análise de Espessura da Camada (m) entre 1000 e 500 hPa, PRNMM (hPa) e Vento a 10m (m/s) do modelo WRF 9km, para 00 UTC de 16/10 (a), 18 UTC de 16/10 (b) e 00 UTC do dia 17/10 de 2016.



4.2.2 Temperatura a 2m

A figura 10 retrata a condição de temperatura a 2m. Na figura 10a, nota-se valores elevados na região de estudo chegando a 30°C . As regiões da Grande Florianópolis e Litoral Norte, apresentam valores menores oscilando em torno de 27°C. No oceano Atlântico a temperatura oscila entre 15 a 21°C. Na figura 10b , observa-se que a faixa leste de SC encontra-se mais aquecida que as demais regiões, em especial o município de Laguna. A temperatura acima da superfície do mar, está mais elevada acima do cavado invertido,

oscilando em torno de 15 a 24°C. Através da figura 10c (horário de intensificação do sistema), com a aproximação do período noturno, é possível observar que a temperatura diminui gradativamente ao longo de todas as regiões do território catarinense, porém, sobre a região de estudo as temperaturas ainda se encontram mais elevadas em torno dos 27°C. No Skew-T das 00Z (Figura 11) observa-se que os índices de instabilidades estão elevados, onde o CAPE atua com valor de 1137 J/Kg, indicando convecção moderada. Verifica-se que o índice LI, está com -4 °C e o índice K 36, indicando instabilidade muito forte, com possibilidade de tempestades severas e chuvas fortes. Nota-se forte cisalhamento dos ventos nos primeiros níveis da coluna troposférica (800 hPa), indicando forte instabilidade.

Figura 10: Análise de temperatura a 2m do modelo WRF 9km para os horários de 12:00 UTC (a), 18:00 UTC (b) do dia 16 e 00:00 UTC (c) do dia 17 de outubro de 2016.

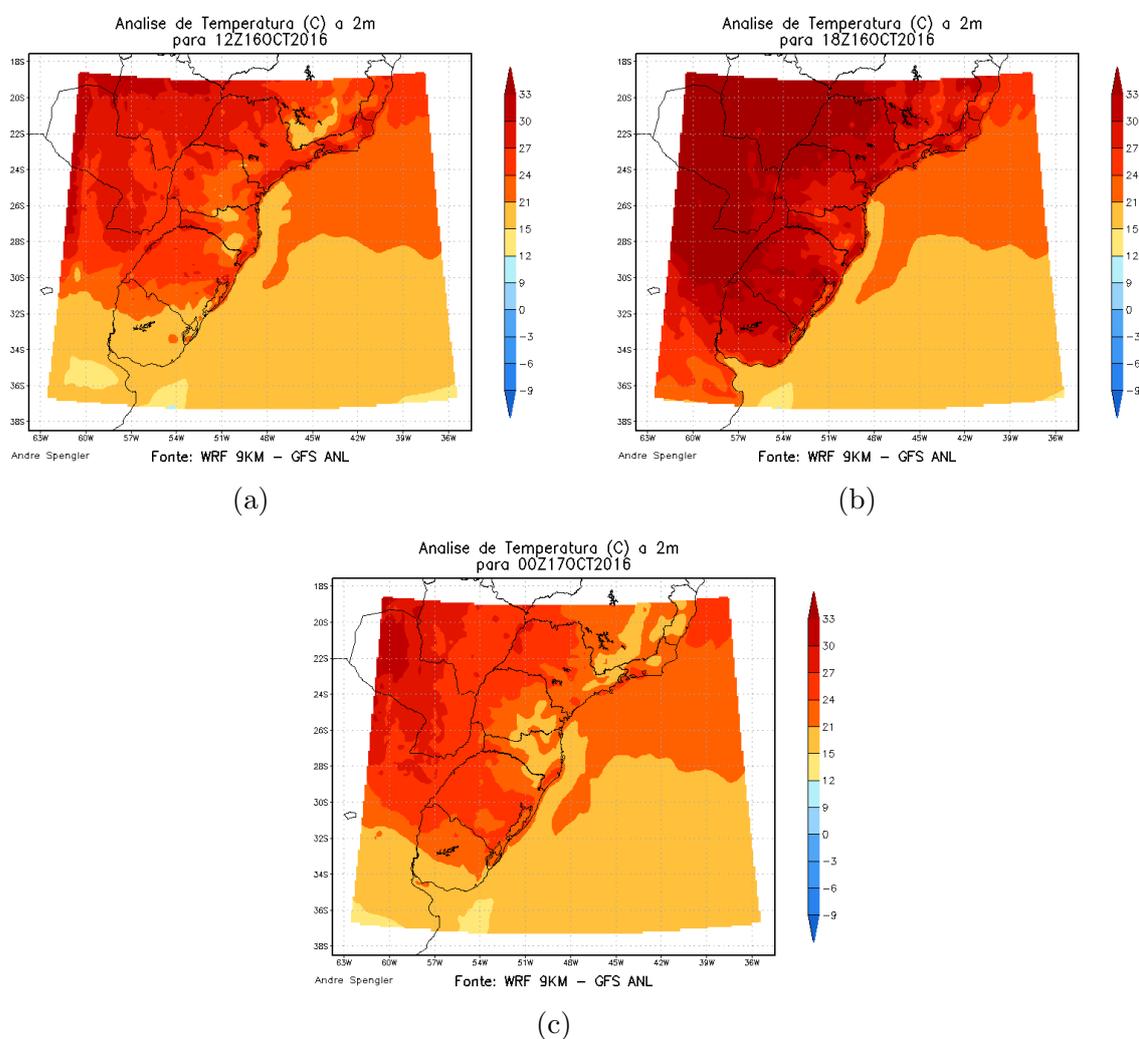
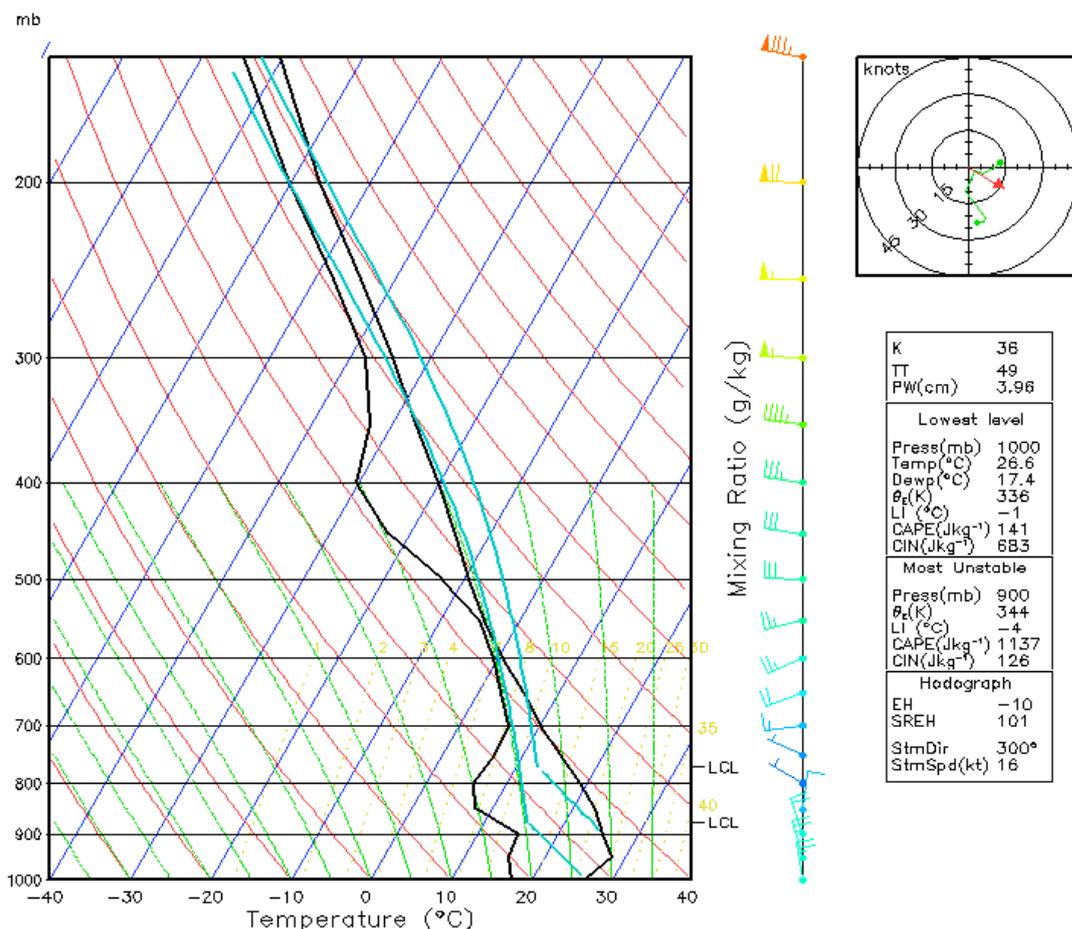


Figura 11: Gráfico Skew-T do modelo WRF 9km para as 00Z do dia 17 de Outubro de 2016.

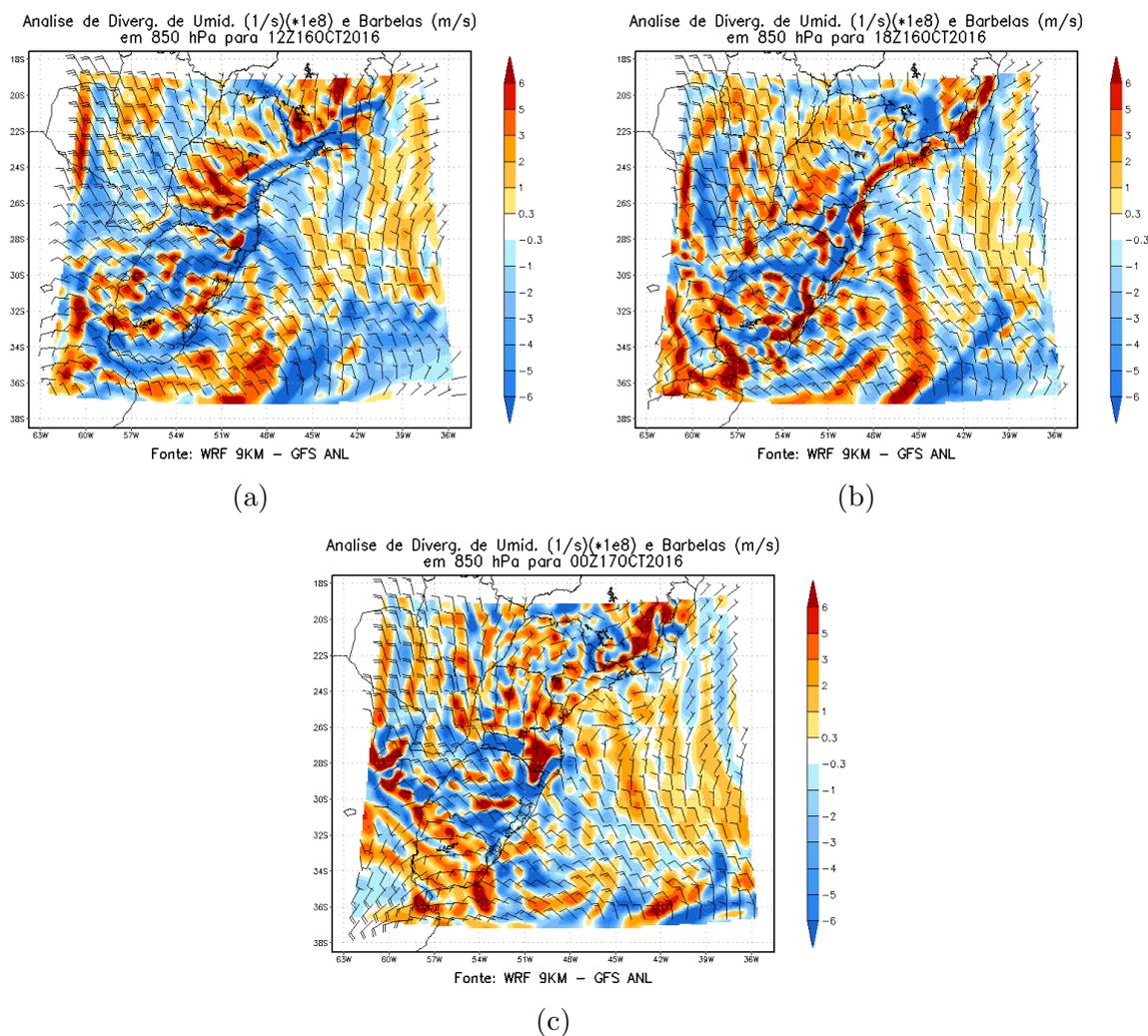


4.2.3 Divergência de Umidade e Barbelas de Vento em 850 hPa

A figura 12, mostra os campos de divergência de umidade e barbelas de vento em 850 hPa. Nota-se na figura 12a, que no dia da tempestade, a convergência de umidade esta variando entre -3 a $-4 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$, sobre a região da Grande Florianópolis e região do litoral sul do estado. Valores positivos de divergência de umidade encontram-se entre o litoral norte e divisa com o Paraná, evidenciando uma região mais seca. O fluxo de umidade em 850hPa, possui velocidade de 15 a 20 nós, evidenciando o jato de baixo níveis. Estudos mostram que parte da umidade da região Amazônica é transportada para os subtropicais pelo JBN a leste dos Andes (Vera et al., 2006a). Este fluxo de ar quente e úmido, dá suporte para o desenvolvimento de tempestades sobre a região de estudo. Na figura 10b, e 10c, a convergência de umidade esta oscilando entre -4 a $-6 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$, sobre a região de Laguna, potencializando a tempestade. Nota-se que ao longo da região do cavado em

superfície, os valores de convergência de umidade, encontra-se negativos na borda leste do sistema, tendo uma grande contribuição do JBN.

Figura 12: Análise de Divergência de Umidade e Barbelas de Vento em 850 hPa do modelo WRF 9km para os horários de 12:00 UTC (a), 18:00 UTC (b) do dia 16 e 00:00 UTC (c) do dia 17 de outubro de 2016.

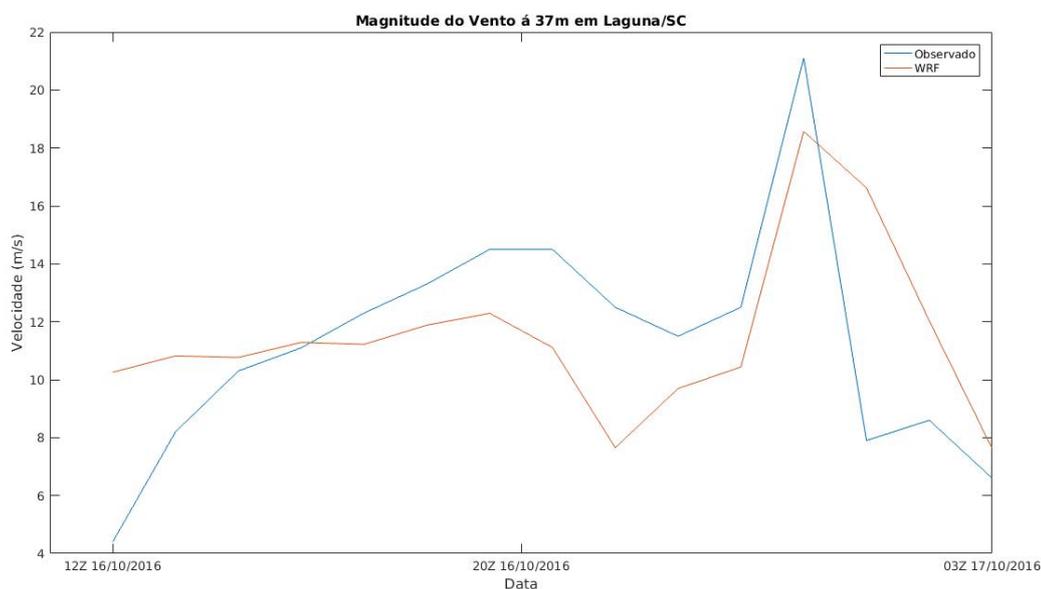


4.2.4 Comparação com dados observados

A fim de comparar os resultados da simulação com os dados observados, foi construído uma série temporal (Figura 13) da intensidade do vento, um gráfico de dispersão (Figura 14) e uma tabela (Tabela 2) com os índices estatísticos calculados.

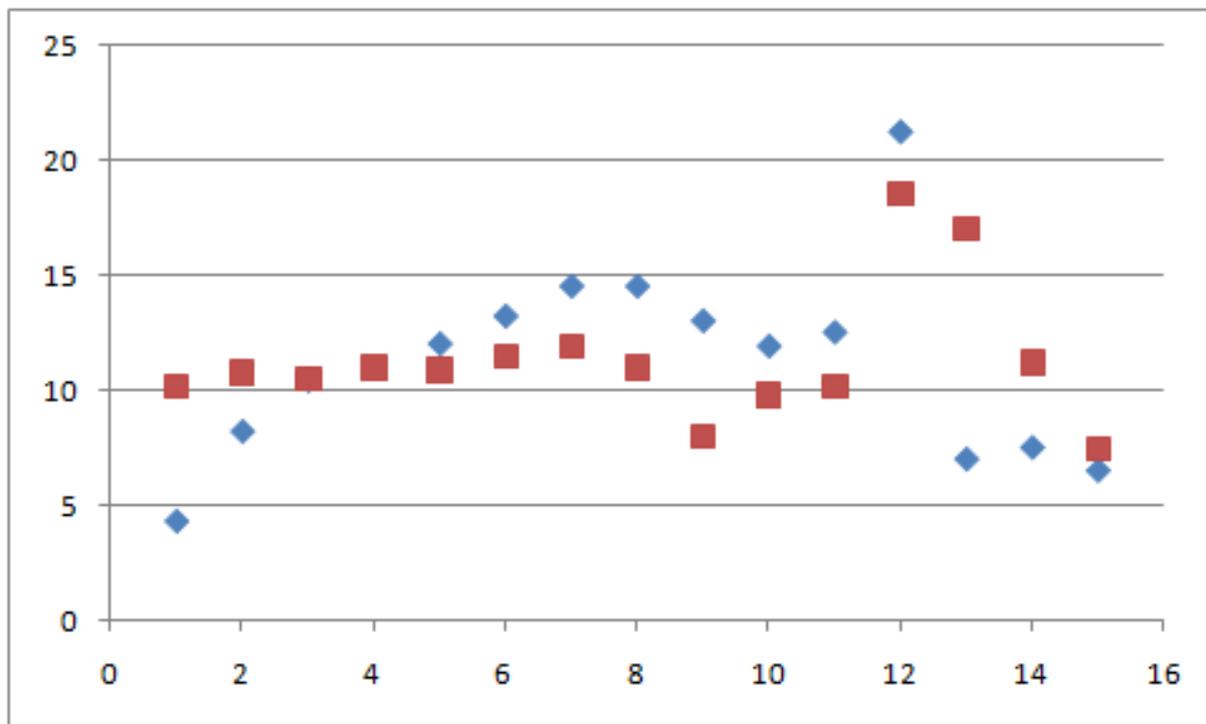
A figura 13 representa a intensidade do vento á 34m de altura para a região de Laguna entre as 12 UTC do dia 16 e 03 UTC do dia 17 de Outubro. Os valores de intensidade do vento mínimo e máxima simulados através do modelo WRF são de 7.6 m/s e 18.5 m/s, respectivamente. Nota-se que apesar de os valores simulados não estarem pontualmente coincidindo com os valores observados, eles são muito próximos um do outro e o modelo WRF consegue simular de maneira satisfatória a tendência de aumento/diminuição da velocidade do vento, acompanhando bem a observação. Conseguindo, inclusive, simular o horário correto (00Z) e o valor muito aproximado da rajada máxima de vento (21 m/s).

Figura 13: Comparação entre dados observados (linha azul) e dados simulados do modelo WRF (linha vermelha) entre as 12 UTC do dia 16 e 03 UTC do dia 17 de Outubro de 2016.



A figura 11 representa o gráfico de dispersão entre os valores de intensidade do vento observados (eixo x) e calculados (eixo y). Nota-se que para baixas intensidades (até 10 m/s) o modelo tende a superestimar os resultados e subestimar entre 10 e 21 m/s.

Figura 14: Gráfico de dispersão entre as intensidades observadas (azul) e simuladas (vermelho).



A tabela 2 apresenta os valores dos índices estatísticos calculados. O índice BIAS e o desvio fracional (Fb) apresentaram resultados satisfatórios, próximos ao valor ideal (0), como já mencionado anteriormente, valores positivos do BIAS indicam superestimativa da simulação em comparação ao dado observado, e valores negativos do Fb também indicam superestimativa, logo, ambos os índices concordam que o modelo WRF, no geral, superestima a velocidade do vento. O índice de correlação (COR) foi a medida mais distante do valor ótimo (1) neste trabalho, o que se deve ao fato de que o modelo WRF não consegue obter um valor pontualmente correto no tempo, o que faz com que se tenha diferenças pontuais grandes e abaixam o valor do COR, ainda assim, 0.44 é considerado como um valor razoável para o índice. O grande destaque foi a velocidade média simulada no período, que se diferiu de apenas 1.71% da velocidade média observada. Tal resultado é de grande relevância, pois, na previsão de geração de energia eólica, o que se leva em consideração é a velocidade média da velocidade do vento em um determinado intervalo de tempo, e não os pontuais de velocidade. Nesse aspecto, o WRF pode ser considerado um modelo com grande potencial de simulação e previsão de geração de energia eólica.

Tabela 2: Índices estatísticos - Erro Médio, Coeficiente de Correlação e Desvio Fracional - calculados através do MATLAB.

	WRF
BIAS	0.1974
COR	0.4416
Fb	-0.0173
Média dados simulados	11.4841 <i>m/s</i>
Média dados observados	11.2867 <i>m/s</i>
DIF% entre as médias	1.71%

4.3 Energia Eólica Produzida

Para fazer uma simulação de quanta energia eólica pode ser gerada através da previsão pelo modelo WRF, utilizou-se a curva de potência E-48 de 800 kW da fabricante Brasileira Wobben, já mencionada na seção 3.4. Para uma velocidade média de 11.48 m/s, é atingida uma potência de 670 kW e, em uma hora seria possível produzir aproximadamente 482,400 kWh/mês de energia limpa e renovável, sem nenhum tipo de prejuízo ao meio ambiente. Fedrigo et al (2009) mostra que o consumo médio no Sul do país é de aproximadamente 260 kWh/mês por residência, logo, um aerogerador E-48 produzindo 670 kWh de energia seria suficiente para alimentar, em média, 1800 residências.

5 Discussão Final

A simulação do evento de mesoescala que atingiu o Litoral de Santa Catarina entre os dias 16 e 17 de Outubro de 2016 através do modelo WRF foi realizada com sucesso neste trabalho. Mapas de espessura da camada, PRNMM, temperatura a 2m, divergência de umidade e gráfico termodinâmico Skew-T mostram evidências de que o modelo conseguiu reproduzir satisfatoriamente o fenômeno.

A previsão da magnitude da velocidade do vento em 37m de altura também atingiu os objetivos propostos neste trabalho, com índices estatísticos próximos ao valor ótimo e curva de série temporal congruente entre dados observados e simulados, acompanhando de maneira excelente a tendência de aumento e diminuição dos dados observados. Alguma dificuldade foi encontrada para o cálculo de valores pontuais (pontualmente no tempo e espaço). Quando se fala em valores pontuais, na atualidade nenhum modelo numérico de previsão consegue simular com 100% de acerto, ainda assim, o modelo WRF consegue

simular de forma razoável, com diferenças médias de até ± 4 m/s. Os índices estatísticos BIAS e Fb mostram que o modelo WRF, no geral, tende a superestimar os dados simulados em comparação aos dados observados. Destaca-se a velocidade média simulada no período, que se diferiu de apenas 1.71% da velocidade média observada, sendo considerado uma previsão média de excelente qualidade.

Por fim, as previsões de vento do modelo WRF mostraram-se um instrumento computacional eficaz e importante na realização de levantamentos deste tipo. Sua acurácia na determinação dos padrões médios da velocidade e direção do vento, além do seu desempenho na identificação de fenômenos locais reforça a tese de sua qualidade nos prognósticos de mesoescala.

Referências

- [1] ABEEólica, disponível em: <http://www.portalabeeolica.org.br/index.php/releases-menu/10-releases/2471-brazil-windpower-2014-abertura.html>. Acesso em: 08 de Setembro de 2016.
- [2] Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas_eolico/Atlas%20do%20Potencial%20Eolico%20Brasileiro.pdf. Acesso em: 08 de Setembro de 2016.
- [3] BURTON, T., SHARPE, D., JENKINS, N., BOSSANYI, E.; "Wind Energy Handbook", 2001.
- [4] Características do aerogerador E-48 da fabricante Wobben, disponível em: <http://www.wobben.com.br/produtos/produzidos-no-brasil/e-48-800-kw/>
- [5] CARVALHO, P., Geração Eólica . Fortaleza: Imprensa Universitária, 2003.
- [6] DALMAZ, A., Estudo do Potencial Eólico e Previsão dos Ventos para Geração de Eletricidade em Santa Catarina. Tese de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil, 2007.
- [7] DA SILVA, Adaiana Francisca Gomes; FISCH, Gilberto Fernando. AVALIAÇÃO DO MODELO WRF PARA A PREVISÃO DO PERFIL DO VENTO NO CENTRO DE LANÇAMENTO DE ALCÂNTARA. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 29, n. 2, 2013.
- [8] DE OLIVEIRA, Paulo Jorge; FISCH, Gilberto. Perfil de vento em áreas de florestas e pastagem na Amazônia. Acta amazonica, v. 31, n. 4, p. 581-595, 2001.
- [9] DOTY, Brian E.; KINTER III, JAMES L. Geophysical data analysis and visualization using the grid analysis and display system. National Aeronautics and Space Administration, Washington, DC (United States), 1995.
- [10] Folha de São Paulo, disponível em: <http://www1.folha.uol.com.br/fsp/cotidian/ff0508200301.htm>

- [11] HANNA, S.R. 1989. Confidence Limits for Quality Model Evaluations, as Estimated by Bootstrap and Jackknife Resampling Methods. *Atmospheric Environment*, 23: 1385-139.
- [12] HASSAN, U.; SYKES, D.M. Wind structure and statistics . In: FRERIS, L.L. (Ed.). *Wind energy conversion systems* . New York: Prentice Hall, 1990. p.11-32.
- [13] HONG, Song-You; NOH, Yign; DUDHIA, Jimy. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Monthly Weather Review*, v. 134, n. 9, p. 2318-2341, 2006.
- [14] LYRA, Roberto Fernando da Fonseca et al. Comparison between wind profiles collected by SODAR and RADIOSONDES during the DRYTOWET-AMC/LBA experiment. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 24, n. 3, p. 356-363, 2009.
- [15] LYRA, Roberto Fernando Fonseca et al. Prognóstico da velocidade do vento utilizando o modelo WRF na região central de Alagoas.
- [16] Manual WMO 2013, disponível em : http://www.wmo.int/pages/prog/www/DPFS/Manual/documents/485_Vol_I_en.pdf. Acesso em: 18 de Setembro de 2016.
- [17] MLAWER, E.J., S.J. TAUBMAN, P.D. BROWN, M.J. IACONO and S.A. CLOUGH: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *J. Geophys. Res.*, 102, 16,663-16,682, 1997
- [18] MOLLY, J. P. Centrais eólicas: técnicas, planejamento, financiamento, verificação. In: *CURSO DE ENERGIA EÓLICA*, 2005, Fortaleza – CE, maio 2005.
- [19] MONIN, A. S.; OBUKHOV, A. M. F. Basic laws of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere. *Contrib. Geophys. Inst. Acad. Sci. USSR*, 1954.
- [20] MONTEIRO, M. A. Caracterização climática do estado de Santa Catarina: uma abordagem dos principais sistemas atmosféricos que atuam durante o ano. 2013.
- [21] MOREIRA, G.A.A; Modelagem Numérica da Camada Limite Atmosférica com Validação Experimental. UFMG – Minas Gerais, 2007.
- [22] MORTENSEN, Niels G. et al. Wind Analysis and Application Program (WASP), User's Guide. Report Risø-I-666 (EN), v. 2, 1993.
- [23] NAKANISHI, M., and H. NIINO, 2006: An improved Mellor–Yamada level 3 model: its numerical stability and application to a regional prediction of advecting fog. *Bound. Layer Meteor.* 119, 397–407.
- [24] FEDRIGO, N. S.; GONÇALVES, G.; LUCAS, P. F. Usos Finais de Energia Elétrica no Setor Residencial Brasileiro, 2009.
- [25] OKE, T. R.; CLEUGH, H. A. Urban heat storage derived as energy balance residuals. *Boundary-Layer Meteorology*, 1987.

- [26] PLEIM, J. E., 2007: A Combined Local and Nonlocal Closure Model for the Atmospheric Boundary Layer. Part I: Model Description and Testing. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 46, 1383–1395.
- [27] Sabesp, 2014, disponível em: http://site.sabesp.com.br/site/uploads/file/crisehidrica/chess_crise_hidrica.pdf
- [28] SKAMAROCK, William C.; KLEMP, Joseph B. A time-split nonhydrostatic atmospheric model for weather research and forecasting applications. *Journal of Computational Physics*, 2008.
- [29] STULL, Roland B. An introduction to boundary layer meteorology. Springer Science & Business Media, 1988.
- [30] Tese de mestrado Juliana Chade Ricosti, disponível em: http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/86/86131/tde-09062011-110815/publico/JULIANA_CHADE.pdf. Acesso em: 12 de Outubro de 2016.
- [31] VERA, C. S.; E CO-AUTORES. The South American Low-Level Jet Experiment. *Bulletin of the American Meteorological Society* , v. 87, p. 63–77, 2006a.
- [32] WANG, 2012. Notas fornecidas por Wei Wang durante o Workshop on air quality and use of WRF-CHEM tutorial em 2012.
- [33] YANG, Fanglin et al. Evaluation of the NCEP Global Forecast System at the ARM SGP site. *Monthly weather review*, v. 134, n. 12, p. 3668-3690, 2006. APA