MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m18/2015/02.25.13.26-TDI

IMPACTOS DAS VARIAÇÕES E MUDANÇAS CLIMÁTICAS SOBRE OS VENTOS EXTREMOS E SEUS EFEITOS NO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO

Marcelo Pizzuti Pes

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Ciência do Sistema Terrestre, orientada pelos Drs. José Antonio Marengo Orsini, e Enio Bueno Pereira, aprovada em 18 de maio de 2015.

URL do documento original:
<http://urlib.net/8JMKD3MGP8W/3J375M5>

INPE
São José dos Campos
2015

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Gabinete do Diretor (GB)
Serviço de Informação e Documentação (SID)
Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970
São José dos Campos - SP - Brasil
Tel.:(012) 3208-6923/6921
Fax: (012) 3208-6919
E-mail: pubtc@sid.inpe.br

COMISSÃO DO CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (DE/DIR-544):
Presidente:
Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)
Membros:
Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)
Dr. Amauri Silva Montes - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espaciais (ETE)
Dr. André de Castro Milone - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)
Dr. Joaquim José Barroso de Castro - Centro de Tecnologias Espaciais (CTE)
Dr. Manoel Alonso Gan - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)
Drª Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação
Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)
BIBLIOTECA DIGITAL:
Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)
Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SID)
REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:
Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SID)
Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)
EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:
Marcelo de Castro Pazos - Serviço de Informação e Documentação (SID)
André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SID)

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m18/2015/02.25.13.26-TDI

IMPACTOS DAS VARIAÇÕES E MUDANÇAS CLIMÁTICAS SOBRE OS VENTOS EXTREMOS E SEUS EFEITOS NO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO

Marcelo Pizzuti Pes

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Ciência do Sistema Terrestre, orientada pelos Drs. José Antonio Marengo Orsini, e Enio Bueno Pereira, aprovada em 18 de maio de 2015.

URL do documento original:
<http://urlib.net/8JMKD3MGP8W/3J375M5>

INPE
São José dos Campos
2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Pes, Marcelo Pizzuti.

P436i Impactos das variações e mudanças climáticas sobre os ventos extremos e seus efeitos no setor elétrico brasileiro / Marcelo Pizzuti Pes. – São José dos Campos : INPE, 2015.

xxviii + 174 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m18/2015/02.25.13.26-TDI)

Tese (Doutorado em Ciência do Sistema Terrestre) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2015.

Orientadores : Drs. José Antonio Marengo Orsini, e Enio Bueno Pereira.

1. Ventos extremos. 2. Energia eólica. 3. Distribuição de frequência. 4. Análise de tendência. 5. Análise de cluster. I.Título.

CDU 551.583:621.3(81)

Esta obra foi licenciada sob uma Licença Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License.

Aprovado pela Banca Examinadora em cumprimento a requisito exigido para a obtenção do Título de **Doutor(a)** em **Ciência do Sistema Terrestre.**

Dr. Clóvis Angeli Sansigolo
Presidente /INPE /São José dos Campos - SP

Dr. José Antonio Marengo Orsini
Orientador(a) /CEMADEN/ Cachoeira Paulista- SP

Dr. Enio Bueno Pereira
Orientador(a) /INPE/ São José dos Campos- SP

Dra. Chou Sin Chan
Membro da Banca /INPE/ Cachoeira Paulista- SP

Dr. Fernando Ramos Martins
Convidado(a) /UNIFESP/Santos-SP

Dra. María Cleofé Valverde Brambila
Convidado(a) /UFABC/Santo André- SP

Este trabalho foi aprovado por:
( ) maioria simples.
(X) unanimidade.

Título: "Impacto das Variações e Mudanças sobre os Ventos Extremos e seus Efeitos no Setor Elétrico Brasileiro"

Aluno (a): Marcelo Pizzuti Pes

São José dos Campos, 18 de Maio de 2015.

“Que homem é o homem que não tenta tornar o mundo melhor?”

Kingdom of Heaven

“Learn from yesterday, live for today, hope for tomorrow. The important thing is not to stop questioning.”

Albert Einstein

A meus pais, Darca e José Pes.

AGRADECIMENTOS

Enfim, o Doutorado chega ao fim e escrevo essas palavras com um aperto no peito e um nó na garganta. Difícil descrever minha gratidão a todas as pessoas que de alguma forma participaram desse processo, difícil também citar todos os nomes aqui nesse espaço limitado.

Agradeço inicialmente aos meus pais, Darca e José, que me incentivaram e me apoiaram a seguir meus sonhos, por terem sido meu exemplo de caráter e honestidade, e que entenderam a privação da minha presença devido à distância. Agradeço ao meu irmão Maiquel, pelo carinho e por todo apoio incondicional. Aos meus avós, que devido à distância não estive com eles em seus últimos momentos, mas que me ensinaram muito sobre a vida.

Meus agradecimentos ao Centro de Ciência do Sistema Terrestre – CCST e ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE pela oportunidade de realizar esse programa de Doutorado. Agradeço a todos os meus colegas do CCST pelo companheirismo durante essa caminhada, e a coordenação e equipe da Pós-graduação de Ciência do Sistema Terrestre – PGCST. Meu agradecimento especial aos meus colegas do LABREN/CCST, André, Eduardo, Francisco, Jefferson, Lucía, Maria Franscisca, Rafael, Rodrigo, Silvia e Venize, pelo apoio e companheirismo ao longo desses anos. Agradeço também ao Dr. Fernando Ramos Martins, pela coorientação, e pela compra e disponibilização da licença do software Matlab.

A Dra. Chou Sin Chan e ao grupo de Cenários Climáticos Futuros/CCST pela disponibilização do código e das rodadas do modelo *Eta-HadCM3*. Em especial ao meu colega André Arruda Lyra, por todo o suporte em relação ao modelo.

Ao Dr. Clóvis Sansigolo, por ter sanado muitas das minhas dúvidas referentes aos métodos estatísticos empregados em meu trabalho.

Gostaria de agradecer ao Departamento de Controle do Espaço Aéreo – DECEA, pelo suporte e camaradagem ao longo da cooperação no âmbito do Termo de Compromisso de Cooperação Técnico-Científico, processo NUP 01340000281/2009-59. Meu agradecimento também ao ICEA e a equipe de Estudos Climatológicos com quem eu tive interface ao longo desses anos. Em especial ao meu amigo Ten. Cel. Carlos Alberto Gisler.

Ao programa CAPES/DAAD/GIZ/NOPA pela bolsa de Doutorado Sanduíche no exterior, processo n° 4406/13-3.

Ao Dr. Detlev Heinemann e toda a equipe do grupo *Energy Meteorology* da *Carl von Ossietzky University* e do *ForWind*, pela acolhida e pelos conhecimentos compartilhados durante o Doutorado sanduíche. Meu especial agradecimento a Dra. Rejane Moraes Duzat e Michael Schimidt.

Agradeço a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, e ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia para Mudanças Climáticas – INCT, pelos três anos de bolsa de Doutorado.

Meus agradecimentos aos meus orientadores, Dr. Enio Bueno Pereira e Dr. José A. Marengo, pela orientação, suporte, paciência e pelo voto de confiança em mim depositado.

Meu especial agradecimento à minha esposa Ro Wang Ting, pela compreensão, pelo carinho, apoio e por estar sempre ao meu lado, incondicionalmente.

Por fim, agradeço a todos meus amigos e familiares que participaram de alguma forma dessa caminhada.

RESUMO

O presente trabalho investiga os aspectos relativos à ocorrência de ventos extremos mínimos e máximos a 10m, sua distribuição de probabilidade, período de retorno e tendência climática. Para isso são utilizadas séries temporais de velocidade do vento observado a 10m provenientes de 42 estações pertencentes ao DECEA, e simulações do modelo regional Eta climático rodado com as condições de contorno do modelo climático inglês *HadCM3* compreendendo o período de 1960-1990 e projeções futuras entre 2010 e 2100 para o cenário de emissões A1B. Inicialmente, todos os dados passam por um processo de qualificação com o propósito de reduzir as incertezas dos resultados. Em seguida, é realizada a análise de agrupamento utilizando o método hierárquico de Ward a fim de identificar as regiões homogêneas (*RHs*) da área de estudo. Para determinar e quantificar as tendências climáticas nas séries de vento observado é aplicado o teste de Mann-Kendall. A análise de tendência das séries de médias mínimas anuais da velocidade do vento indicam 50% de tendência não significativa, 28,5% tendência negativa e 21,4% de tendência positiva. Já as tendências das médias máximas anuais apresentam 35,7% de tendência não significativa, 19% de tendência negativa e 45,2% de tendência positiva. Na etapa seguinte, são aplicados três métodos de distribuição de frequência às séries observadas: Gumbel, Weibull e GEV. A escolha do melhor ajuste das distribuições é feito pelo teste de Kolmogorov-Smirnov e pelo menor Erro Padrão. Com base nesses dois testes, o melhor ajuste é determinado pelo modelo de Gumbel. Em relação ao período de retorno da velocidade máxima do vento a 10m, a região homogênea *RH5* apresenta os maiores valores de velocidade do vento para *T*= 2 anos, podendo ocorrer velocidades iguais ou acima de 19,68 $m \cdot s^{-1}$ e a velocidade de 25 $m \cdot s^{-1}$ pode ser superada uma vez a cada 20 anos. A *RH6* representa o segundo maior valor de velocidade do vento em *T*=2, podendo ocorrer velocidades iguais ou acima de 18,56 $m \cdot s^{-1}$. Para realizar o estudo de tendência climática das séries provenientes das projeções do modelo climático, é realizado o refinamento estatístico das saídas do modelo *Eta-HadCM3* com o emprego de Redes Neurais Artificiais (*RNAs*), as quais são treinadas tendo como preditores as variáveis de saída do modelo e como alvo as séries de vento observado a 10m. Obtém-se com isso uma melhora significativa nas séries de velocidade mínima e máxima da velocidade do vento, sendo que a média da correlação de Pearson passou de 0,16 para 0,76 e de 0,29 para 0,78, respectivamente. O ganho (*skill*) médio em relação ao erro sistemático foi de 99,6% para os mínimos e 99,3% para os máximos de vento, enquanto que o ganho médio do *RMSE* foi de 85% e 67%, respectivamente. Com base nas análises de tendência climática das séries velocidade mínima e máxima do vento observado a 10m e do vento modelado pela *RNA (projeções futuras 2010-2100)*, os resultados indicam aumento na velocidade mínima do vento ao longo da costa brasileira, principalmente na costa do Nordeste, e no interior do continente próximo à costa. Já os máximos de velocidade do vento indicam aumento no interior das regiões Norte, Centro-Oeste e Sudeste.

IMPACTS OF VARIABILITY AND CLIMATE CHANGES ON THE EXTREME WINDS AND ITS EFFECTS IN BRAZILIAN ELECTRICITY SECTOR

ABSTRACT

This study focuses on the aspects of the occurrence of extreme minimum and maximum winds at 10m, its probability distribution, return period and climate trends. The analyses are made use of wind speed time series observed at 10m from 42 stations belonging to DECEA - Brazilian Airspace Control Department as well as time series from the mesoscale regional circulation model (*RCM*) *Eta HadCM3* for the period from 1960 to 1990 and future projections between 2010 and 2100. In order to reduce the uncertainty in results, we carried out a quality control process in the data series. Then, a cluster analysis was performed using the hierarchical method of Ward to identify homogeneous regions (*RHs*) of the study area. A total of six *RHs* were identified, among which the *RH5* and *RH6* have the highest maximum wind speed at 10m. To determine climatic trends in the wind series, we applied the Mann-Kendall test. The trend analysis for the minimum wind speed annual average indicated 50% of non-significant trends, 28,5% of negative trend and 21,4% of positive trend. The analysis of maximum wind speed annual average indicated 35,7% of non-significant trend, 19% of negative trend and 45,2% of positive trend. We applied three frequency distribution methods on the observed series: Gumbel, Weibull and *GEV*. To find the best fit of distributions models, we applied the Kolmogorov-Smirnov test and determined the standard error. Based on these two tests, the best fit was found by using the Gumbel model. For the maximum wind speed at 10m, the RH5 indicate the highest wind speed return period of 2 years for winds exceeding 19,68 $m \cdot s^{-1}$and 20 years for winds exceeding 25 $m \cdot s^{-1}$. The RH6 showed the second highest wind speed, in excess of 18,56 $m \cdot s^{-1}$, for the 2-year return period. Thus, the RH5 and RH6 are the regions with higher risks for the structural integrity of wind turbines. To perform the trend analysis of the series from the predictions of the climate model, we performed a statistical refinement for the outputs of the RCM model using Artificial Neural Networks (*ANN*), training using the RCM model output as predictors and observed data at 10m as target. The ANN result in a significant improvement in minimum and maximum speed wind speed series, and the mean Pearson correlation increased from 0,16 to 0,76 and from 0,29 to 0,78, respectively. The gain (skill) of the average systematic error was 99,6% to 99,3% for the minimum and maximum wind speed, while the average RMSE gain was 85% and 67%, respectively. The results of trend analysis from RNA data series indicate an increase in the minimum wind speed along the Brazilian coast, mainly in the northeastern coast, and within the continent near the coast. By another hand, the maximum wind speed indicates increased within the North, Midwest and Southeast of Brazil.

LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 1.1.(a) – Velocidade de rajada do vento obtidas da PCD do INMET localizada no município de Dom Pedrito a aproximadamente 80 km de distância. As imagens de radar foram obtidas do Radar de Santiago (RS) pertencente ao DECEA; (b) imagem do sistema meteorológico registrado pelo radar de Santiago-RS do Departamento de Controle do Espaço Aéreo – DECEA, no mesmo dia e horário, sistema esse que atingiu a região sudoeste do estado do Rio Grande do Sul onde está localizado o parque eólico de Cerro Chato. As imagens de radar em horário UTC mostram o sistema responsável pelos fortes ventos e os registros correspondem às 20h12min horas e 21h01min local. **4**

Figura 1.2 – Turbinas eólicas do Parque Eólico de Cerro Chato, no município de Santana do Livramento (RS), destruídas após o vento atingir a velocidade de aproximadamente 29 m/s ocorridas entre as 19 e 21 horas do dia 20 de dezembro de 2014. Fotos: Marcelo Pinto, Jornal A Plateia. Disponível em: <http://fotospublicas.com/temporal-causa-estragos-no-parque-eolico-de-santana-livramento-no-rio-grande-sul/>. Acesso em: 15/01/2015. ..... **5**

Figura 2.1 – Mapa representativo do potencial eólico brasileiro e a capacidade de geração (com base em ocupação de 2 MW/km^2) em cada uma das cinco macrorregiões brasileiras. ..... **8**_Toc424736302

Figura 2.2 – Crescimento da geração de energia elétrica de origem eólica e capacidade instalada no Brasil. O aumento significativo passa a ocorrer a partir de 2005, em que entrou em vigor o PROINFA. ..... **10**_Toc424736304

Figura 2.3 – Relação entre a potência e velocidade do vento. **12**

Figura 2.4. – Representação de uma RNA-MLP. **17**

Figura 2.5 – Modelo de um neurônio. **18**

Figura 2.6 – Sinais de saída de diferentes funções de ativação: a) função degrau; b) função linear; c) função sigmoidal logística; d) função sigmoidal tangente hiperbólica. **18**

Figura 4.2 – Distribuição geográfica das estações de coleta de dados do DECEA. **25**

Figura 4.3 – Caminhos de concentração representativos de CO_2 na atmosfera até o ano 2100. A partir de 2000 são apresentados os caminhos de concentração representativos de CO_2 para os cenários de emissões do IPCC *AR4* em partículas por milhão (*ppm*). **28**

Fonte: Adaptado de *IPCC AR4*. **28**

Figura 4.4 – Esquema representativo do algoritmo empregado para qualificação dos dados de direção e velocidade do vento. **32**

Figura 4.5 – Função de distribuição cumulativa de valor empírico e teórico e a maior distância entre as curvas CDF determinada pelo teste *KS*. **43**

Figura 5.1 – Representação do resultado da qualificação das séries temporais de velocidade do vento *OBS10m* de 42 estações meteorológicas. As barras azuis correspondem ao total de dados submetidos ao código de qualificação e as barras vermelhas correspondem aos dados sinalizados como suspeitos. **51**

Figura 5.2 – Dendrograma resultante do método de Análise de Agrupamento. As barras verticais representam o nível de similaridade de cada estação dentro de um determinado grupo, onde cada grupo é representado por uma cor. A linha pontilhada em preto indica o cuttoff determinado pelo método hierárquico de Ward. **53**

Figura 5.3 – Ciclo anual das estações 6, 22, 27, 35 e 38 e o valor de correlação entre a estação 6 e as demais estações circunvizinhas. **54**

Figura 5.4 – Ciclo anual e o valor de correlação entre a estação 29 e as estações 12, 33, 37. **55**

Figura 5.5 – Distribuição espacial das regiões homogêneas quanto ao regime de ventos máximos e mínimos a 10 metros e a altitude de cada estação em relação ao nível do mar. **58**

Figura 5.6 – Representação dos principais sistemas atmosféricos atuantes na baixa troposfera na América do Sul. Em relação à baixa troposfera tem-se: ANE ventos alísios de nordeste, ASE ventos alísios de sudeste, ASAS anticiclone subtropical do Atlântico Sul, ASPS anticiclone subtropical do Pacífico Sul, B baixa pressão, BC baixa do Chaco – região de baixas térmicas, BNE região de baixas térmicas no noroeste argentino, CCM complexo convectivo de mesoescala, FF frente fria, FQ frente quente, JBN jato de baixos níveis a leste dos Andes, LI linha de instabilidade tropical, LIP linha de instabilidade pré-frontal, NV nuvem vírgula, RC regiões ciclogenéticas, ZCAS zona de convergência do Atlântico Sul e ZCIT zona de convergência intertropical. **59**

Figura 5.7 – Ciclo anual da velocidade média mínima e máxima do vento em cada *RH*.(Continua).....**60**

Figura 5.7 – Conclusão. **61**

Figura 5.8 – Distribuição espacial do resultado da análise de tendência de Mann-Kendall para as médias mínimas na velocidade do vento entre 1947 e 2014.....**64**

Figura 5.9 – Distribuição espacial do resultado da análise de tendência de Mann-Kendall para as médias máximas na velocidade do vento entre 1947 e 2014.....**65**

Figura 5.10 – Distribuição de Gumbel ajustada para a velocidade máxima mensal do vento *OBS10m*. (Continua).....**66**

Figura 5.10 – Conclusão. **67**

Figura 5.11 – Distribuição de Weibull ajustada para a velocidade máxima mensal do vento *OBS10m*. (Continua).....**68**

Figura 5.11 – Conclusão. **69**

Figura 5.12 – Distribuição de GEV ajustada para a velocidade máxima mensal do vento *OBS10m*. (Continua).....**69**

Figura 5.12 – Continuação **70**

Figura 5.12 – Conclusão. **71**

Figura 5.14. Desempenho da RNA para a estação SBAR – 1. .....**79**

Figura 5.15. Desempenho da RNA para a estação SBBV – 6. .....**80**

Figura 5.16. R e *RMSE* das séries da velocidade média mensal do vento *OBS10m* versus Eta10m climático e vento *OBS10m* versus *RNA10m*. (Continua).....**82**

Figura 5.17. Viés entre as séries médias mensais mínimas e máximas observadas, e as séries do modelo (azul) e das RNAs (vermelho). (Continua).....**85**

Figura 5.17 – Conclusão. **86**

Figura 5.18 – Séries das médias mensais da velocidade do vento *OBS10m*, *Eta10m* e *RNA10m* da estação SBBV – 6 para o período de 1960 a 1990; (a) velocidades mínimas; (b) velocidades máximas. **87**

Figura 5.19 – Séries das médias mensais da velocidade do vento *OBS10m*, *Eta10m* e *RNA10m* da estação SBCR – 8 para o período de 1960 a 1990; (a) velocidades mínimas; (b) velocidades máximas. **88**

Figura 5.20 – Séries das médias mensais da velocidade do vento *OBS10m*, *Eta10m* e *RNA10m* da estação SBKG – 18 para o período de 1960 a 1990; (a) velocidades mínimas; (b) velocidades máximas. **89**

Figura 5.21 – Séries das médias mensais da velocidade do vento *OBS10m*, *Eta10m* e *RNA10m* da estação SBUL – 40 para o período de 1960 a 1990; (a) velocidades mínimas; (b) velocidades máximas. **90**

Figura 5.22 – Séries das médias mensais da velocidade do vento *OBS10m*, *Eta10m* e *RNA10m* da estação SBUG – 39 para o período de 1960 a 1990; (a) velocidades mínimas; (b) velocidades máximas. **91**

Figura 5.23 – Séries das médias mensais da velocidade do vento *OBS10m*, *Eta10m* e *RNA10m* da estação SBLO – 20 para o período de 1960 a 1990; (a) velocidades mínimas; (b) velocidades máximas. **92**

Figura 5.24 – Análise de tendência climática nas séries de velocidade mínima e máxima do vento *RNA10m* para o período de (a) 2010-2040; (b) 2040-2070 e (c) 2070-2100. (Continua).....**94**

Figura 5.25 – Relação entre *u(t)* e a variação da latitude. Os valores negativos e positivos de *u(t)* são representados pelas figuras da esquerda e da direita respectivamente. (Continua).....**96**

Figura 5.26 – Relação entre *u(t)* e a variação da latitude das séries temporais de vento *OBS10m* mínimo. Os valores negativos e positivos de *u(t)* são representados pelas figuras da esquerda e da direita respectivamente. **97**

Figura 5.27 – Relação entre *u(t)* e a variação da latitude das séries temporais de vento *OBS10m* máximo. Os valores negativos e positivos de *u(t)* são representados pelas figuras da esquerda e da direita respectivamente. **98**

Figura 5.28 – Locais com tendências iguais entre as observações e as séries obtidas pelas RNAs. (Continua) **99**

Figura 5.29 – Locais com tendências iguais entre as séries obtidas pelas *RNAs* para os três períodos entre 2010 e 2100.....**101**

LISTA DE TABELAS

Pág.

Tabela 5.1 – Sigla da estação, indicador da estação, localização (lat, lon), altitude em relação ao nível do mar e período de aquisição dos dados.....**51**

Tabela 5.2 – Porcentagem de dados sinalizados como suspeitos no teste de qualificação.....**52**

Tabela 5.3 – Estações que compõem as *RHs*. **56**

Tabela 5.4 – Máximos de velocidade do vento ocorridos nas *RHs* ao longo de todo o período das observações e os anos de ocorrência. **61**

Tabela 5.5 – Resultados do teste de Mann-Kendall.....**63**

Tabela 5.6 – Valores dos parâmetros de distribuição Gumbel, Weibull e GEV das séries temporais de velocidade mínima e máxima do vento *OBS10m*, onde k é o parâmetro de forma, β é o parâmetro de escala, α é o parâmetro de posição.....**71**

Tabela 5.7 – Valor crítico do teste KS e SE dos ajustes da distribuição da velocidade máxima mensal do vento para as distribuições de Gumbel (gbl), Weibull (wbl) e GEV (gev).....**73**

Tabela 5.8 – Valor crítico do teste KS e SE dos ajustes da distribuição da velocidade máxima anual do vento.....**76**

Tabela 5.9 – Período de retorno da velocidade máxima anual do vento.....**77**

Tabela 5.10 – Valores do erro sistemático das séries máximas e mínimas mensais de velocidade do vento OBS10m, Eta10m e RNA10m.....**92**

Tabela 5.11 – Máximos de velocidade do vento ocorridos ao longo de todo o período das observações e os anos de ocorrência. **102**

Tabela 5.12 – Máximos de velocidade do vento extrapolados para 50 e 100m de altitude a partir da Lei de Potência. **103**

Tabela 5.13 – Máximos de velocidade do vento ocorridos ao longo de todo o período das observações e os anos de ocorrência. **104**

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

GEES's	Gases do Efeito Estufa.
WWEA	*World Wind Energy Association.*
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica.
BEN	Balanço Energético Nacional.
ABEEólica	Associação Brasileira de Energia Eólica.
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica.
PROEÓLICA	Programa Emergencial de Energia Eólica.
PRODEENE	Programa Prioritário de Desenvolvimento da Energia Eólica do Nordeste.
SIN	Sistema Integrado Nacional.
PNE	Plano Nacional de Energia.
EPE	Empresa de Pesquisas Energética.
DECEA	Departamento de Controle do Espaço Aéreo.
UTC	*Coordinated Universal Time.*
COPPE	Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós Graduação e Pesquisa de Engenharia.
HadCM3	*Hadley Centre Global Coupled Model, version 3*.
A1, A1B, A2, A1T, B1, A1FI	Cenários de Emissões SRES do Relatório Especial do *IPCC*.
IPCC	*Intergovernmental Panel on Climate Change*.
C*EPE*L	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica.
Eta	Modelo regional *Eta.*
CLA	Camada Limite Atmosférica.
AR4	Quarto Relatório de Avaliação do *IPCC*.

AR4	Quinto Relatório de Avaliação do *IPCC*.
RNA, *RNAs*	Rede Neural Artificial.
HN	Hemisfério Norte.
HS	Hemisfério Sul.
MME	Ministério de Minas e Energia.
GCM, *GCMs*	*General Circulation Model*. Modelo de Circulação Geral da Atmosfera.
SREX	*Special Report on Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*.
GEV	*Generalized Extreme Value.*
MLP	Perceptron de Múltiplas Camadas.
SONDA	Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais para o Setor Energético.
CCST	Centro de Ciências do Sistema Terrestre.
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
METAR	*Meteorological Aerodrome Report.*
FAB	Força Aérea Brasileira.
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos.
TSM	Temperatura da Superfície do Mar.
lat	Latitude.
lon	Longitude.
IEA	*International Energy Agency.*
CDIAC	*Carbon Dioxide Information Analysis Center.*
RH, *RHs*	Região Homogênea.
KS	*Kolmogorov-Smirnov.*
SE	Erro Padrão.

OBS10m	Vento Observado a 10 metros.
Eta10m	Vento modelado pelo modelo Eta a 10 metros.
RNA10m	Vento modelado pela *RNA*.
R	Coeficiente de Correlação.
RMSE	Raiz do Erro Quadrático Médio.
ME	Erro sistemático Médio.
WMO	*World Meteorological Organization.*
EPA	Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos.
GDFL	*Geophysical Fluid Dynamics Laboratory.*
ICEA	Instituto de Controle do Espaço Aéreo.
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change.
MCTI	Ministério da Ciência e Tecnologia e Inovação.
SERES	*Special Report on Emissions Scenarios.* Relatório Especial sobre os Cenários de Emissões do *IPCC.*

SUMÁRIO

		Pág.
1	**INTRODUÇÃO**	**1**
1.1.	Justificativas e Objetivo	**5**
1.2.	Estrutura da Tese	**6**
2	**REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**	**7**
2.1.	Energia Eólica no Brasil: Potencial e Aproveitamento	**7**
2.2.	Importância dos Ventos Extremos na Geração Eólica	**10**
2.3.	As Mudanças Climáticas Globais e Seus Impactos nos Recursos Eólicos	**12**
3	**REDES NEURAIS ARTIFICIAIS**	**15**
3.1.	Descrição da RNA	**16**
3.1.1.	Perceptron de Múltiplas Camadas (MLP)	**16**
3.1.2.	Neurônio Artificial	**17**
3.1.3.	Aprendizado da *RNA*	**19**
4	**METODOLOGIA**	**21**
4.1.	Área de Estudo	**22**
4.2.	Dados Observacionais	**24**
4.3.	Dados do Modelo Regional *Eta-HadCM3*	**26**
4.4.	Cenário A1B	**28**
4.5.	Controle de Qualidade dos Dados	**29**
4.6.	Determinação das Regiões Homogêneas da Área de Estudo	**32**
4.6.1.	Análise de Agrupamento	**33**
4.6.2.	Métodos Hierárquicos	**34**
4.7.	Análise de Tendência	**36**

4.7.1. Teste de Mann-Kendall **37**

4.8. Distribuição de Probabilidade de Frequência das Séries de Vento Máximo **38**

4.8.1. Distribuição de Gumbel **39**

4.8.2. Distribuição GEV **40**

4.8.3. Distribuição de Weibull **41**

4.9. Período de Retorno – *T* **42**

4.10. Método de Ajuste das Distribuições de Frequência **43**

4.11. Treinamento das Redes Neurais Artificiais (RNAs) **44**

5 RESULTADOS **49**

5.1. Resultados da Qualificação dos Dados Observados **49**

5.2. Resultados da Análise de Regiões Homogêneas **52**

5.3. Resultados do Teste de tendência de Mann-Kendall **62**

5.4. Distribuição de Frequência e Período de Retorno do Vento Observado **65**

5.4.1. Resultados da distribuição Gumbel **66**

5.4.2. Resultados da Distribuição de Weibull **67**

5.4.3. Resultados das distribuição GEV **69**

5.5. Resultados do período de retorno – *T* **77**

5.6. Resultados do treinamento das RNAs: Observações *vs Eta-HadCM3* **78**

5.6.1. Resultados das *RNAs* para séries de vento horárias – 1960 a 1990 ..... **79**

5.6.2. Resultados das RNAs para séries da velocidade mensal do vento – 1960 a 1990 ..... **81**

5.7. Resultados do Teste de Tendência de Mann-Kendall para o Período de 2010 a 2099 ..... **93**

5.8. Resultados Pertinentes a Região Nordeste e Sul do Brasil. **101**

5.9. Considerações finais 105

6 CONCLUSÕES 107

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 111

APÊNDICE A 119

APÊNDICE B 135

APÊNDICE C 141

APÊNDICE D 149

ANEXO - A 173

1 INTRODUÇÃO

Desde o início da Idade Moderna, aproximadamente 1400 *d.C.,* a civilização já utilizava a energia mecânica do vento para girar moinhos destinados a fins de processamento de grãos e abastecimento de água (GOLDENBERG, 2008), e desde então o uso da energia eólica vem crescendo no cenário mundial.

O crescimento e o desenvolvimento da civilização estão associados ao surgimento do comércio, da indústria e das grandes economias globais. Além disso, o estágio de desenvolvimento de uma nação está fortemente relacionado com a sua demanda por energia (GOLDEMBERG; VILLANUEVA, 2003). Dessa forma, existe uma demanda crescente e continua por energia, e consequentemente, um crescimento exponencial de emissões de gases de efeito estufa (*GEEs*), resultante do uso de combustíveis fósseis como principal fonte energética mundial, o que foi intensificado a partir da Revolução Industrial (PEREIRA, 2007; GOLDENBERG, 2008).

Dentro do cenário atual, a energia eólica é uma das alternativas de fonte de energia limpa, renovável e não emissora de *GEEs* em sua operação, principalmente para países que estão com suas matrizes energéticas primárias no limite de sua capacidade de geração e que possuem potencial eólico com condições favoráveis para exploração energética seus territórios.

De acordo com o relatório da *World Wind Energy Association - WWEA*, a capacidade instalada global de energia eólica é de aproximadamente 336 GW, sendo que deste total, 17,6 GW referem-se à capacidade instalada na primeira metade do ano de 2014 (WWEA, 2014). Assim, estima-se que no ano 2020 o mundo terá 12% da energia elétrica de origem eólica com 1.200 GW de capacidade instalada (ANEEL, 2012).

O Brasil, por sua vez, considerando os locais com disponibilidade de velocidade média do vento igual ou acima de 7 m/s ao nível de 50 metros, possui um potencial de 143,4 GW (SILVA et al., 2005; AMARANTE et al., 2001). Da mesma forma que nos demais países desenvolvidos na área eólica,

o Brasil vem aumentando a exploração do potencial eólico em seu território, de forma que a geração elétrica desta fonte cresceu de 93 GWh em 2005 para 6.579 GWh em 2013 (BEN, 2014). De 2009 a 2014, nos 11 leilões dos quais a fonte eólica participou, foram contratados mais de 12 GW em novos projetos.

Somados a isso, iniciativas como o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA) e programas regionais como o Programa Emergencial de Energia Eólica (PROEÓLICA) e o Programa Prioritário de Desenvolvimento da Energia Eólica do Nordeste (PRODEENE) no Nordeste, estimularam o desenvolvimento do parque eólico nacional e acabaram por serem os precursores dos atuais leilões de energia eólica realizados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), dando início ao crescimento do uso em grande escala da energia eólica dentro do cenário energético brasileiro. Essas ações contribuíram para o processo de expansão e diversificação da matriz energética nacional, buscando garantir maior segurança energética.

Esses programas foram fundamentais para o Brasil ser considerado o terceiro maior mercado mundial para novas turbinas eólicas, precedido de China e Alemanha, com uma recente capacidade instalada de 1,3 GW, a qual representa 7% do total de turbinas eólicas vendidas no mundo em 2014 (WWEA, 2014).

As centrais eólicas, embora com perfis de ofertas intermitentes, também apresentam papel importante na segurança operacional do Sistema Integrado Nacional (SIN), na medida em que funcionam como “reservatórios virtuais”, complementando a geração hidráulica nos períodos secos de cada ano (PNE, 2012) e, portanto contribuindo positivamente para a diversificação da matriz energética. No entanto, da mesma forma como na energia hidráulica (em que variações climáticas comprometem a geração de energia elétrica em virtude dos níveis dos reservatórios) o aumento na exploração da energia eólica torna o setor energético nacional suscetível a outro fator climático, neste caso, às variações no regime dos ventos.

O potencial energético do vento é proporcional ao cubo de sua velocidade. Desta forma, as alterações de pequenas magnitudes em sua velocidade levam a grande variabilidade da geração de uma planta eólica (GASCH; TWELE, 2002). Estas variações podem ocorrer em diferentes escalas de tempo, ocasionadas por fenômenos meteorológicos ou climáticos.

Dessa forma, vários estudos têm sido desenvolvidos para a identificação dos regimes de ventos, focados na sua variabilidade e em sua caracterização, que também permitirão uma gestão de curto prazo, focada na segurança energética nacional. No Brasil, estes estudos são focados principalmente nas regiões Sul, Sudeste e Nordeste, áreas de prospecção eólica que possuem o maior número de parques eólicos em operação e em fase de construção.

Quanto a sua magnitude, é importante mencionar que ventos extremos de grande magnitude impactam na produção eólica reduzindo o fator de capacidade de parques eólicos, podendo causar desgaste prematuro e danos estruturais aos aerogeradores. Já ventos extremos baixos impactam sobre a distribuição em linhas de transmissão, uma vez que a dissipação de calor gerado pelo efeito Joule fica reduzida e, portanto, implicam em um menor despacho de carga. Esse efeito é conhecido como ampacidade dos cabos das linhas de transmissão. Ampacidade é um termo que se refere à carga máxima de corrente que um cabo pode conduzir. Assim sendo, também é fundamental identificar as características dos ventos extremos, tais como distribuição de frequência, valores máximos de vento, período de retorno, entre outras características, fornecendo aos tomadores de decisão mais subsídio para o planejamento estratégico referente à geração e distribuição de energia elétrica.

As atuais exigências estabelecidas pela ANEEL para aquisição de dados meteorológicos pelas empresas participantes dos leilões de energia eólica são de séries de dados de no mínimo 24 meses, sempre iniciados a partir de dados válidos e integralizados a cada 10 minutos (EPE, 2009). O fato é que situações de ventos extremos podem não ser detectadas dentro desse intervalo de tempo, gerando assim um risco potencial para a geração e integridade das turbinas eólicas. Um caso recente de vento extremo atingiu o parque eólico de

Cerro Chato, em Santana do Livramento, no Rio Grande do Sul, no dia 20 de dezembro de 2014 em que ventos com velocidade em torno de 29 $m \cdot s^{-1}$ou 106 $km \cdot h^{-1}$ (Figura 1.a) associados a um sistema meteorológico (Figura 1.b) ocorreram na região.

(a)

(b)

Figura 1.1.(a) – Velocidade de rajada do vento obtidas da PCD do INMET localizada no município de Dom Pedrito a aproximadamente 80 km de distância. As imagens de radar foram obtidas do Radar de Santiago (RS) pertencente ao DECEA; (b) imagem do sistema meteorológico registrado pelo radar de Santiago-RS do Departamento de Controle do Espaço Aéreo – DECEA, no mesmo dia e horário, sistema esse que atingiu a região sudoeste do estado do Rio Grande do Sul onde está localizado o parque eólico de Cerro Chato. As imagens de radar em horário UTC mostram o sistema responsável pelos fortes ventos e os registros correspondem às 20h12min horas e 21h01min local.

A ocorrência desse caso de vento extremo causou a perda total de oito aerogeradores com torres de 86 metros de altura (Figura 2)

Figura 1.2 – Turbinas eólicas do Parque Eólico de Cerro Chato, no município de Santana do Livramento (RS), destruídas após o vento atingir a velocidade de aproximadamente 29 m/s ocorridas entre as 19 e 21 horas do dia 20 de dezembro de 2014. Fotos: Marcelo Pinto, Jornal A Plateia. Disponível em: <http://fotospublicas.com/temporal-causa-estragos-no-parque-eolico-de-santana-livramento-no-rio-grande-sul/>. Acesso em: 15/01/2015.

Plantas de geração fotovoltaica também são afetadas pelo regime de ventos, uma vez que este atua como agente resfriador dos painéis solares, além de agir na remoção ou deposição de material particulado. Ainda existem outras áreas de aplicações que dependem das informações sobre o regime de ventos, tais como engenharia civil, agricultura, aeroportos, defesa civil entre outras (DUKES; PALUTIKOF, 1995; GONÇALVES, 2007; SCHAEFFER et al., 2012).

1.1. Justificativas e Objetivo

Alguns trabalhos científicos publicados recentemente sugerem que devido às Mudanças Climáticas Globais, o regime dos ventos de algumas regiões pode sofrer variações. Os parques eólicos existentes no Brasil estarão operando por um período mínimo de 20 anos, dentro do intervalo de projeções 2010 a 2040 dos modelos climáticos regionais. Desta forma, as hipóteses motivadoras para esta pesquisa de Doutorado são: quais as regiões do Brasil que possuem a maior incidência de ventos extremos máximos e qual o período de retorno

desses eventos? Estão ocorrendo ou ocorrerão mudanças na magnitude do vento máximo e mínimo em detrimento das Mudanças Climáticas Globais?

Assim, o objetivo desta Tese é identificar as características dos ventos extremos em cada região do Brasil a partir de dados observados a 10m e para o período atual e projeções futuras do cenário A1B do IPCC, gerando conhecimento que auxilie na segurança energética no que diz respeito à geração elétrica dos parques eólicos brasileiros.

1.2. Estrutura da Tese

O Capítulo 2 apresenta uma breve introdução sobre o atual cenário da energia eólica no Brasil e no mundo, seus aspectos políticos e econômicos, os conceitos sobre o vento dentro da CLA, métodos de identificação de regiões homogêneas, os conceitos de distribuição de probabilidade de eventos extremos e conceitos de redes neurais artificiais (RNA*s*). O Capítulo 3 descreve os dados e métodos usados nesse estudo. Os resultados são apresentados e discutidos no Capítulo 5. No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões, sugestões e análises julgadas pertinentes após a realização deste estudo. Na sequência são descritas as referências bibliográficas e os apêndices.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentados o potencial eólico e seu aproveitamento e participação na matriz de energia elétrica brasileira, a importância dos ventos extremos na geração eólica, os efeitos das Mudanças Climáticas Globais no regime de ventos e trabalhos científicos publicados pertinentes ao tema deste estudo.

2.1. Energia Eólica no Brasil: Potencial e Aproveitamento

A geração de energia elétrica a partir da energia do vento é uma tecnologia difundida no mundo inteiro e consiste em transformar a energia do vento em eletricidade por meio de equipamentos denominados aerogeradores. Ainda, a geração de eletricidade em grande escala, para alimentar de forma suplementar o sistema elétrico com o uso de turbinas eólicas de grande porte, é tecnologia que existe a diversas décadas. Desde a fase experimental, ressalta-se que os primeiros aproveitamentos eólio-elétricos realizados durante as décadas de 1940 e 1950 nos Estados Unidos e Dinamarca (AMARANTE et al., 2001).

Seguindo essa tendência, a energia eólica vem ganhando espaço dentro da política de expansão energética brasileira nos últimos quatro anos. O Brasil possui o potencial de vento adequado para exploração eólica e o governo brasileiro tem apoiado o desenvolvimento do setor com o programa *PROINFA*. Além da capacidade de geração de eletricidade, a energia eólica tem participação fundamental na questão da segurança energética brasileira.

O estudo publicado por AMARANTE et al., (2001) intitulado “Atlas do Potencial Eólico Brasileiro” mostra que o Brasil possui disponibilidade de ventos médios igual ou acima de 7 $m.s^{-1}$ ao nível de 50 metros, totalizando o potencial de 143,4 GW, capaz de gerar 272 TWh/ano de eletricidade em uma área de aproximadamente 0,8% de todo o território brasileiro. A maior parte desse potencial eólico está localizada nas regiões Sudeste, Sul e Nordeste devido

aos ventos alísios (SILVA et al., 2005) (Figura 2.1), regiões onde se encontram grandes consumidores de energia elétrica como a grande São Paulo, Fortaleza, Salvador, grande Porto Alegre, etc.

Figura 2.1 – Mapa representativo do potencial eólico brasileiro e a capacidade de geração (com base em ocupação de 2 MW/km^2) em cada uma das cinco macrorregiões brasileiras.
Fonte: Adaptado de Atlas Eólico Brasileiro (2001).

Segundo o relatório do Ministério de Minas e Energia (MME) intitulado “Matriz Energética Nacional 2030” (MME, 2007), estima-se que o consumo de energia elétrica em 2030 possa se situar entre 950 e 1.250 $TW \cdot h \cdot ano^{-1}$, consumo este que atualmente é de aproximadamente de 516 $TW \cdot h \cdot ano^{-1}$(BEN, 2014) . Dessa forma, são consideradas, respectivamente, a implantação de novas usinas, a expansão e construção de novas interligações entre subsistemas e reforço das interligações já existentes, e a expansão da rede de média e baixa tensão. O gasto estimado para alcançar as metas de expansão até 2030 é de

US$ 160 bilhões (MATRIZ ENERGÉTICA NACIONAL, 2030, 2007). Ainda, referente às energias renováveis ou uso de “fontes limpas”, o plano brasileiro de expansão energética conta com o *PROINFA* - Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica, que consiste em apoiar três fontes diferentes de energias renováveis.

O PROINFA foi instituído através da Lei n° 10.438 em 2004 com o objetivo de aumentar a participação da energia elétrica produzida por empreendimentos concebidos com base em fontes eólica, biomassa e Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH) no Sistema Elétrico Interligado Nacional (SIN). O intuito do programa é promover a diversificação da matriz energética brasileira, buscando alternativas para aumentar a segurança no abastecimento de energia elétrica e reduzir as emissões de GEE*s* (Gases do Efeito Estufa) além de permitir a valorização das características e potencialidades regionais e locais (http://www.mme.gov.br/programas/proinfa/).

A energia eólica foi a fonte mais impulsionada pelo PROINFA, sendo que entre o ano de 2005 e 2013, o Brasil passou de 27 MW de energia eólica instalada, para 2.207 MW instalados (BEN, 2014). Além disso, com a implementação do PROINFA, o Brasil conseguiu desenvolver uma indústria nacional de aerogeradores com capacidade de produção de aproximadamente 750MW por ano e com índice de 70% de nacionalização (EPE, 2009).

Até 1996, a energia elétrica produzida por parques eólicos não aparecia nos dados de geração de eletricidade por fonte do Ministério de Minas e Energia, ora por não existirem ora por serem inexpressíveis diante do cenário energético brasileiro. No entanto, devido ao PROINFA a produção de eletricidade a partir da fonte eólica alcançou 2.248 GWh em 2010 o que representa um aumento em relação do ano anterior (64%), quando a geração foi de 1446 GWh (BEN, 2011).

A Figura 2.2 mostra o aumento do potencial eólico instalado acompanhado do aumento na geração de energia elétrica a partir das usinas eólicas brasileiras.

Esse crescimento iniciou-se no final de 2004 meados de 2005, aproximadamente um ano após o PROINFA ser criado.

Figura 2.2 – Crescimento da geração de energia elétrica de origem eólica e capacidade instalada no Brasil. O aumento significativo passa a ocorrer a partir de 2005, em que entrou em vigor o PROINFA.
Fonte: Adaptado de BEN (2013) e PLANO DECENAL DE EXPANSÃO DE ENERGIA 2019 (2010).

As projeções de crescimento da geração eólica atingirão capacidade instalada de aproximadamente 6.000 MW em 2019 (MME, 2010).

Um fator de grande importância relacionado à inserção da geração eólica no Brasil é a complementaridade com a geração hidrelétrica, que remonta ao conceito de segurança energética discutido amplamente após a crise energética de 2001. O maior potencial eólico brasileiro ocorre na região nordeste e tem a melhor ocorrência de ventos no período de menor potencial hídrico do ano naquela região (ANEEL, 2004).

2.2. Importância dos Ventos Extremos na Geração Eólica

Eventos raros ou extremos têm grande relevância na climatologia e suas estimativas probabilísticas são imprescindíveis para o planejamento e desenvolvimento das atividades sujeitas aos seus efeitos adversos,

especialmente estruturas de engenharia civil e agricultura (KATZ et al., 2002; SANSIGOLO, 2008).

Em termos meteorológicos ou climatológicos, grandes desvios de um estado climático moderado ocorrem em escalas que podem variar desde dias até milênios. Mais importantes para as atividades humanas, entretanto, talvez sejam os eventos extremos em curto prazo (relacionados à meteorologia) e em médio prazo (relacionados ao clima), devido a seu potencial de impactos significativos. Os eventos climáticos e meteorológicos extremos também são um aspecto integrante da variabilidade climática, e sua frequência e intensidade podem variar em função das mudanças climáticas globais (MARENGO, 2009).

De acordo com o *IPCC SREX* (2012), um evento extremo é um evento raro em um determinado lugar e época do ano. Por definição, as características do que são chamados climáticos extremos podem variar de lugar para lugar em um sentido absoluto. Quando um padrão de clima extremo persiste por algum tempo, como uma temporada, pode ser classificado como um evento climático extremo, especialmente se ele produz uma média ou total, que é em si extremo (seca, por exemplo, ou chuvas fortes ao longo de um período).

Ainda, segundo Sarewitz et al. (2000), podemos definir evento extremo como sendo uma ocorrência rara de uma determinada variável meteorológica ou climatológica, em relação a sua média.

Ventos com velocidades inferiores a 3,5 $m \cdot s^{-1}$ e superior a 25 $m \cdot s^{-1}$ estão fora da região de aproveitamento da curva nominal de potência dos aerogeradores atuais (Figura 2.3). Valores da magnitude do vento fora dessa faixa de velocidade não podem ser aproveitados pelas turbinas eólicas, tendo em vista no primeiro caso, quando a velocidade do vento é inferior a 3,5 $m \cdot s^{-1}$, a geração de eletricidade é interrompida devido à limitação da atual tecnologia que não consegue converter ventos abaixo dessa velocidade. Quando ocorrem ventos com velocidades acima de 25 $m \cdot s^{-1}$ a geração de

eletricidade cessa e as turbinas acionam os freios aerodinâmicos e mecânicos para prevenir dados estruturais ao sistema.

Figura 2.3 – Relação entre a potência e velocidade do vento.

2.3. As Mudanças Climáticas Globais e Seus Impactos nos Recursos Eólicos

O efeito das Mudanças Climáticas Globais no regime de ventos é objeto de diversos estudos científicos em todo o mundo.

O estudo publicado por Breslow e Sailor (2002) aponta uma diminuição de 1 a 4,5% na velocidade do vento associada às Mudanças Climáticas Globais para um período de 100 anos na região continental dos Estados Unidos da América. O trabalho utilizou dois *GCMs*, sendo um o *Canadian Climate Center model* e o outro o *Hadley Centre model* do *UK Meteorological Office*.

Venäläinen et al. (2004) concluíram em um estudo realizado para a Finlândia que o potencial climatológico do vento pode ter um aumento 2 a 10% em condições de Mudanças Climáticas Globais.

Pryor et al., (2005) usaram um método de *downscaling* à partir de cinco *GCMs* e 46 estações no Norte da Europa e apontaram uma diminuição da velocidade média e na densidade do vento para as projeções climáticas entre 2080-2100.

Sailor et al., (2008) realizaram um estudo sobre os efeitos das Mudanças Climáticas no vento em superfície para o Nordeste dos Estados Unidos utilizando métodos de *downscaling* das projeções climáticas futuras de quatro *GCMs* (*GISS, MPI, GFDL, MRI*) para os cenários de emissões do *IPCC*, *SRES A1B* e *A2*. O trabalho indica uma diminuição de 40% no recurso eólico para ambos os cenários nos períodos de primavera e verão. Ainda, segundo os autores, os resultados dos *GCMs* apresentam ligeiras diferenças no potencial eólico e tornam-se ainda menores após a regionalização das séries temporais.

O relatório da COPPE / Universidade do Rio de Janeiro, intitulado *Climate Change: Energy Report,* publicado em 2008, aborda a questão do potencial eólico brasileiro usando projeções futuras do modelo climático regional *HadRM3P* para os cenários climáticos de altas e baixas emissões de gases de efeito estufa, *A2* e *B2,* do quarto *Intergovernmental Panel on Climate Change* (*IPCC*).

Essas projeções foram comparadas com dados de ventos para o período atual do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), para todo o território nacional. Os resultados mostram que o litoral do Nordeste terá ocorrências de ventos médios acima de 8,5 m/s, aumentando ao longo das projeções, enquanto em outras regiões do país a velocidade do vento diminuirá significativamente. O balanço dessas variações para as diferentes regiões mostra que o potencial eólico brasileiro de 2100 em relação a 2001 terá um decréscimo de 31% para o cenário A2 e de 60% para o cenário B2.

Lucena et al., (2010) também realizaram um estudo usando um *downscaling* de *50x50km* das projeções do modelo global inglês *HadCM3* feito pelo modelo regional PRECIS para os cenários climáticos *A2* e *B2*. Neste estudo, constatou-se um aumento no potencial eólico brasileiro devido às Mudanças Climáticas

Globais. Além disso, o estudo sugere o aumento do potencial eólico nas regiões costeiras, principalmente na costa do Nordeste brasileiro.

O trabalho publicado por Pereira et al., (2013) utilizando dados observados e derivados do *downscaling* do modelo global *HadCM3* pelo modelo regional Eta (referido a partir daqui como *Eta-HadCM3*), identificou o aumento de 15% a 30% no potencial eólico na maior parte do Nordeste brasileiro. Em alguns pontos, esse aumento chega a 100%. Já na região Sul do Brasil, também foi identificado aumento, porém de forma menos acentuada, em torno de 20%.

O Grupo I do *IPCC AR5* (2012), através de estudos da circulação geral da atmosfera (GCM) para cenários climáticos futuros simulados por modelos GCM, apontou mudanças na circulação geral da atmosfera e índices de variabilidade climática na pressão ao nível do mar, vento, altura geopotencial além de variabilidade multi-decadal na circulação geral de larga escala no sobre o oceano Atlântico e Pacífico.

O relatório concluiu que o vento de leste nas médias latitudes aumentou em ambos os hemisférios, no entanto, devido à deficiência das observações, o *Special Report on Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation* (*IPCC SREX*, 2012) afirmou que o nível de confiança na análise de tendências de vento em superfície é baixa devido ao fato de que as medidas de vento sobre o continente e o oceano são obtidas a partir de diferentes métodos de observação. Por exemplo, primeiros registros de vento no oceano foram realizados baseados na velocidade dos navios através da agua, o impulsionamento das velas ou na estimativa visual através das características da superfície do oceano as quais eram convertidas em velocidade do vento por meio da escala de Beaufort. As medidas de vento com o uso de anemômetros só iniciaram em 1950.

3 REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

Redes Neurais Artificiais (*RNAs*) são ferramentas estatísticas capazes de armazenar conhecimento a partir de exemplos e ser empregadas na solução de problemas de ajuste funcional, reconhecimento de padrões e diversas outras aplicações. Esta forma de computação não algorítmica é caracterizada por sistemas que em algum nível, relembram a estrutura do cérebro humano. Por não ser baseada em regras ou programas, a computação neural se constitui em uma alternativa à computação algorítmica convencional (BRAGA, 1998). Ainda, uma rede neural artificial (RNA) é um processador paralelamente distribuído constituído de unidades de processamento simples, que têm a propensão natural para armazenar conhecimento e torná-lo disponível para o uso (HAYKIN, 2001). Como mencionando anteriormente, as RNAs se assemelham ao cérebro em dois aspectos: o primeiro é o conhecimento adquirido pela rede a partir de seu ambiente através de um processo de aprendizagem; o segundo são as forças de conexão entre neurônios, conhecidas como pesos sinápticos, que são utilizadas para armazenar o conhecimento adquirido.

Em RNAs, o procedimento usual na solução de problemas passa inicialmente por uma fase de aprendizagem em que um conjunto de exemplos é apresentado para a rede, a qual extrai automaticamente as características necessárias para representar a informação fornecida, características essas que são utilizadas posteriormente para gerar respostas para o problema (BRAGA,1998).

As *RNAs* possuem a capacidade de representar fenômenos físicos complexos e por isso vêm sendo largamente utilizada nas geociências, propiciando grandes avanços na área de modelagem (MENDES et al., 2009; MARENGO, 2009).

3.1. Descrição da RNA

As *RNAs* são sistemas paralelos distribuídos compostos por unidades de processamento simples chamadas neurônios, as quais calculam determinadas funções matemáticas a partir de entradas recebidas, e são dispostas em uma ou mais camadas interligadas por um grande número de conexões. Essas conexões estão associadas a pesos sinápticos, os quais armazenam conhecimento representado no modelo e servem para ponderar a entrada recebida por cada neurônio (BRAGA, 1998).

O emprego de uma *RNA* passa inicialmente por uma fase de aprendizagem, onde os pesos das conexões são ajustados até proporcionarem à rede a capacidade de representar o problema. Uma vez treinada, os pesos são fixados e a rede pode ser empregada como um modelo, estimando saídas a partir de um conjunto de dados de entrada.

3.1.1. Perceptron de Múltiplas Camadas (MLP)

A definição da arquitetura de uma *RNA* é um parâmetro importante na sua concepção, uma vez que ela restringe o tipo de problema que pode ser tratado pela rede. Fazem parte da arquitetura da rede os seguintes parâmetros: número de camadas, número de neurônios em cada camada, o tipo de conexão entre os neurônios e topologia da rede (BRAGA, 1998). Existem duas classificações para as *RNAs*: recorrentes (*feedback*) e não-recorrentes (*feedforward*). A *RNA* não recorrente pode conter uma única camada ou múltiplas camadas, sendo que esta última possui as chamadas camadas ocultas (*hidden layers*), podendo a *RNA* conter uma ou mais camadas. As *RNAs* com mais de uma camada são denominadas *Perceptrons* de Multiplas Camadas (*multilayer perceptron – MLP*) conforme ilustrado na Figura 2.4. Ainda, a *RNA* não recorrente possui retroalimentação, ou seja, após a primeira iteração a saída realimenta as entradas da *RNA*.

Figura 2.4. – Representação de uma RNA-MLP.

Dentre os vários tipos e topologias de RNAs, o modelo MLP de treinamento supervisionado é uma das arquiteturas mais empregadas na atualidade, em numerosas áreas de ciência e tecnologia (HAYKIN, 1994; MENDES et al., 2009; MARTINS et al., 2011).

3.1.2. Neurônio Artificial

O neurônio artificial é a unidade fundamental da *RNA* e, de acordo com a representação da Figura 2.5, é um modelo composto por três elementos básicos: pesos sinápticos, função aditiva e função de ativação.

O elemento x_i representa um sinal de entrada de um determinado neurônio k_i o qual possui um peso sináptico w_{ki}, onde o primeiro subscrito refere-se ao neurônio em questão e o segundo subscrito refere-se ao sinal de entrada para qual o peso sináptico se refere. Os valores dos pesos sinápticos podem ser negativos ou positivos de acordo com a relevância a ser dada pelo neurônio ao sinal daquela conexão, indicando se o tratamento deve ser inibitório ou excitatório, respectivamente.

O nível de atividade interna do neurônio (v_i) é resultado da combinação do somatório das entradas ponderadas com outro valor ajustável denominado bias (b_i). O *bias* tem a função de aumentar ou diminuir a entrada líquida da função de ativação ($\varphi(.)$) dependendo se ele é positivo ou negativo.

Figura 2.5 – Modelo de um neurônio.
Fonte: Adaptado de Haykin (2001).

O neurônio índice j pode ser definido por:

$$v_j = \sum_{i=1}^{m} w_{ji}\, x_i + b_j$$

$$y_j = \varphi(v_j)$$

A função de ativação define a saída de um neurônio de acordo com o nível de atividade produzida pelas suas entradas. Funções de ativação comumente empregadas, de acordo com Braga et al. (1998) e Haykin (2001), são: Função Linear ou Degrau, Função Linear, Funções Sigmoide Logística e Função Sigmoide Tangente Hiperbólica representadas na Figura 2.6.

Figura 2.6 – Sinais de saída de diferentes funções de ativação: a) função degrau; b) função linear; c) função sigmoidal logística; d) função sigmoidal tangente hiperbólica.

A função sigmoidal é a mais comumente usada na construção de *RNAs* tipo MLP (HAYKIN, 2001), por serem contínuas, crescentes, diferenciáveis e não lineares.

3.1.3. Aprendizado da *RNA*

A utilização de uma *RNA* na solução de uma tarefa passa inicialmente por uma fase de aprendizagem, quando a rede extrai informações relevantes de padrões de informação apresentados para ela, criando assim uma representação própria para o problema. A etapa de aprendizagem consiste em um processo iterativo de ajuste de parâmetros da rede, os pesos das conexões entre as unidades de processamento, que guardam, ao final do processo, o conhecimento que a rede adquiriu do ambiente em que está operando (BRAGA, 1998). O ajuste dos pesos sinápticos é chamado de algoritmo de treinamento, sendo que o treinamento pode ser classificado como treinamento supervisionado e treinamento não supervisionado.

No treinamento supervisionado, um sinal de entrada e um valor alvo são apresentados à rede, e a partir da entrada a rede calcula a saída, a qual é comparada com o alvo repetindo esse procedimento até a RNA atingir o melhor resultado ajustando os pesos sinápticos. Esse resultado é, dessa forma, a capacidade atingida pela RNA em representar a informação fornecida como entrada.

A cada iteração a RNA adapta-se para corrigir os erros $(\mathrm{e(t)})$ procurando minimizar a diferença entre a soma ponderada das entradas pelos pesos sinápticos, ou seja, a saída da RNA $(\mathrm{y(t)})$ calculada no instante t, e o alvo $(\mathrm{d(t)})$. O erro é determinado pela seguinte equação:

$$\mathrm{e(t)} = d(t) - y(t)$$

A alteração dos pesos sinápticos por correção dos erros é representado pela equação

$$w_{ji}(t+1) = w_{ji}(t) + \eta e(t) x_{ji}(t)$$

Onde o peso sináptico w_{ji} do neurônio j recebe o ajuste $\Delta w_{ji}\,(t)$ e assume um novo valor $w_{ji}(t+1)$. O ajuste é obtido pela minimização da chamada função de custo expressa como:

$$E(t) = \frac{1}{2} e_j^2(t)$$

A minimização desta função para o caso particular de um neurônio de saída com função de ativação linear resulta na já mencionada regra delta (WIDROW; HOFF, 1960) que afirma que o ajuste de um peso é proporcional ao produto entre o erro e a entrada da sinapse (x_i).

Um dos algoritmos mais utilizados para o treinamento de RNAs é o algoritmo de treinamento supervisionado para redes MLP chamado backpropagation. Neste algoritmo, ocorre numa primeira fase a propagação do sinal funcional (feedforward) e numa segunda fase a retropropagação do erro (backpropagation). Na primeira fase, a partir das entradas, o sinal funcional propaga-se pela rede até a geração de uma saída, mantendo-se fixos os pesos das sinapses. Na segunda fase, a saída é comparada com um alvo produzindo um sinal de erro. O sinal de erro propaga-se da saída para entrada, e os pesos são ajustados de maneira a minimizar o erro. O backpropagation é baseado na regra delta, mas oferece uma maneira de ajustar os pesos dos neurônios de todas as camadas da rede neural e não apenas da camada de saída (GUARNIERI, 2006).

4 METODOLOGIA

Nesse capítulo são apresentados os dados e métodos utilizados para a realização desse estudo de ventos extremos mínimos e máximos.

Para o estudo de ventos extremos máximos e mínimos registrados diariamente, são utilizadas séries climatológicas de velocidade e direção do vento observado em superfície ao nível de 10 metros, compostas por séries temporais maiores que trinta anos além de simulações climáticas provenientes do modelo *Eta-HadCM3* referentes ao clima presente (1960-1990) (a partir daqui será denominado *baseline*) e clima futuro (2010-2100) para o cenário A1B do *IPCC*.

Este trabalho está dividido em duas etapas, sendo a primeira o estudo dos ventos extremos em superfície a partir de dados observados. Esta etapa inclui a qualificação dos dados observados, análise de tendências das séries climatológicas, aplicação dos testes de distribuição de probabilidade de ventos extremos e análise da variação de frequência dos ventos.

O estudo das tendências climáticas nas séries de dados procurou identificar tendências de aumento ou diminuição da velocidade do vento, o que poderia estar associado às Mudanças Climáticas Globais, confirmando o que alguns modelos climáticos vêm apontando. O teste não paramétrico denominado Teste de Kendall (SNEYERS, 1975) foi utilizado com este objetivo por ser o mais adequado para identificar tendências climáticas a partir de séries observacionais (GOOSSENS; BERGER, 1986).

As distribuições GEV, Gumbel e Weibull foram escolhidas para análise das distribuições de probabilidade de ventos extremos com base nas bibliografias consultadas. O modelo de distribuição que melhor se ajustou às séries dos dados observados foi utilizado para determinar o período de retorno da velocidade máxima mensal e anual do vento.

A segunda etapa consistiu em configurar e treinar uma rede neural artificial (RNA) para o período *baseline* do modelo *Eta-HadCM3*. A RNA foi validada

com os dados observados em superfície antes de aplica-la no *downscaling* das séries temporais dos cenários futuros de vento, nos pontos de grade de *20x20km* do modelo climático correspondentes aos locais das estações.

Na Fig. 4.1 é apresentado o organograma com as etapas desse estudo.

Figura 4.1. Organograma da Tese.

4.1. Área de Estudo

A área de estudo compreende principalmente regiões do território brasileiro onde há estações de superfície com mais de trinta anos de dados observados, e que atendam ao controle de qualidade estabelecido.

Os principais fatores que determinam o clima brasileiro são a Zona de Convergência Intertropical ao norte, a qual varia de posição sobre o continente brasileiro ao longo do ano; os efeitos causados pelo relevo continental, tal

como a influência da Cordilheira dos Andes e a zona de alta pressão do Anticiclone Tropical Atlântico.

A presença da Cordilheira dos Andes tem forte influência na distribuição das massas de ar que entram na região Sul da América do Sul e do Brasil. Além disso, a Cordilheira dos Andes impede a passagem das massas de ar de oeste para o lado leste e canaliza a massa de ar tropical marítima a leste da montanha na direção sul (COMPAGNUCCI et al., 1997; GAURREAUD, 1999).

No Norte (N) do país destaca-se o clima equatorial úmido, com temperaturas médias de 25°C e 2000 mm/ano de precipitação. Essa área compreende a Floresta Amazônica a qual é mantida pela grande precipitação pluviométrica associada à presença da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), região de convergência dos ventos alísios. Ainda, o clima tropical abrange quase toda a costa brasileira, do extremo Norte até São Paulo, incluindo oeste do Mato Grosso e Mato Grosso do Sul, e em algumas regiões serranas como as de São Paulo e Minas Gerais, o clima é tropical de altitude. Nessas regiões, a sazonalidade das chuvas é bem definida (AMARANTE et al. 2001).

O Sertão Nordestino possui um clima semiárido, com temperatura média anual superior a 25°C e pluviosidade inferior a 750 mm/ano. Essa região é assolada por estiagens com aproximadamente oito meses de duração ao ano.

A região Sul (S) do Brasil é de clima subtropical e está localizada abaixo do Trópico de Capricórnio situado na latitude 23°27'S. Sua temperatura média anual é de aproximadamente 20°C e possui o regime de chuvas bem distribuído durante o ano.

De acordo com o Atlas Eólico Brasileiro (2001) as regiões do Brasil com maiores médias anuais de vento são as regiões Nordeste, Sul e Sudeste (SE). No Nordeste (NE) brasileiro, os ventos em superfície estão associados aos ventos alísios de nordeste e de sudeste, os quais determinam a velocidade média anual do vento entre 6,5 e 8,5 $m \cdot s^{-1}$ e com direção predominante de nordeste.

Na região Sul e Sudeste o regime dos ventos próximos à superfície é influenciado pelo Anticiclone Subtropical do Atlântico, pela entrada de massas de ar e sistemas frontais associados a elas, e a Depressão do Nordeste da Argentina – centro de baixas pressões a leste dos Andes.

As circulações de mesoescala e microescala, que ocorrem em função da variação das propriedades da superfície, podem influenciar nos regimes de vento, gerando ventos locais que podem diferir significativamente do perfil de larga escala da circulação atmosférica (AMARANTE et al., 2001; COMPAGNUCCI et al., 1997).

4.2. Dados Observacionais

As séries temporais observacionais utilizados nesse trabalho são dados *METAR* (*Meteorological Aerodrome Report*) provenientes do Instituto de Controle do Espaço Aéreo (ICEA) do Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA). Parte desse banco de dados ainda é inédita em termos de publicação, pois as séries foram inicialmente registradas em planilhas de papel, as quais foram digitalizadas nos últimos 10 anos.

Contudo, os dados foram obtidos por meio de um longo processo de parceria de cooperação técnico-científica entre o DECEA e INPE. Seguindo os termos do acordo, as etapas iniciais deste trabalho foram realizadas dentro das instalações do próprio DECEA junto à Seção de Estudo Climatológicos, observando a cláusula de sigilo dos dados brutos, por se tratar de informação de carácter estratégico para a Força Aérea Brasileira (FAB). Dessa forma, apenas os resultados gerados poderão ser disponibilizados e publicados.

Os dados do DECEA são dados coletados em aeródromos brasileiros, regionais e internacionais, distribuídos no território brasileiro. As séries históricas de dados são superiores há 30 anos (APÊNDICE A), com resolução temporal de uma hora. Os aeródromos podem ser divididos de acordo com a sua escala de serviço em *H24*, *H18*, *H14* e *H12* indicando que o mesmo

permanece em operação diariamente por 24, 18, 14 e 12 horas respectivamente. Essa regra também se aplica às séries de dados coletadas nos aeródromos.

A Figura 4.2 representa as macrorregiões climáticas brasileiras e nela são apresentados os locais em que se situam as estações aprovadas no pré-processamento bem como suas respectivas siglas e os nomes dos locais.

O período de dados observados do DECEA são séries climatológicas obtidas em aeródromos entre os anos de 1947 a 2014. As variáveis a serem utilizadas nesse trabalho são a velocidade e direção do vento a 10m (*OBS10m*), pressão ao nível da estação, temperatura e umidade do ar a 2m.

Figura 4.2 – Distribuição geográfica das estações de coleta de dados do DECEA.

4.3. Dados do Modelo Regional *Eta-HadCM3*

Os dados de modelo são provenientes do modelo regional Eta o qual foi configurado e integrado por Chou et al. (2011) no INPE com as condições de contorno do modelo global *HadCM3* do *UK Met Office Hadley Centre*.

Dessa forma, o modelo Eta é modificado para realizar integrações decadais de longo termo e reproduz o clima entre 1961 e 1990 (clima presente) razoavelmente bem quando alimentado pelo modelo *HadCM3*. As condições laterais do *HadCM3* possuem resolução de 2,5° de latitude e 3,75° de longitude com frequência de seis horas (CHOU et al., 2011).

O modelo Eta foi configurado para o prazo de integração de 30 anos e gerou séries temporais com frequência de saída de três horas. A resolução horizontal é de 20 *km* com 38 camadas verticais. O modelo foi atualizado a cada seis horas com as condições de contorno provenientes do modelo global *HadCM3*. Foram geradas simulações de clima no período de 1961-1990 e projeções para o período de 2010-2100.

O Eta é um modelo de ponto de grade baseado na coordenada η (MESINGER, 1984; CHOU et al., 2011), sendo a superfície da coordenada η aproximadamente horizontal, o que é mais adequado para regiões com grandes variações topográficas.

O esquema físico do modelo compreende os esquemas de convecção de Betts-Miller-Janjic (JANJIC, 1994). A microfísica de nuvens é produzida pelo esquema de Zhao (ZHAO et al., 1997). O esquema de radiação foi desenvolvido pelo *GFDL* (*Geophysical Fluid Dynamics Laboratory*) inclui tratamento para radiação de onda curta (LACIS; HANSEN, 1974) e onda longa (FELS; SCHWARZKOPF, 1975; EK et al., 2003). O esquema de superfície é o *Noah* (MITCHELL, 2001), com quatro camadas de solo e 13 tipos de cobertura de superfície. A turbulência atmosférica é representada pelo esquema de Mellor-Yamada (MELLOR; YAMADA, 1982). Na camada superficial utiliza-se a teoria de *Monin-Obukhov* com as funções de estabilidade de Paulson (1970).

As seguintes adaptações foram feitas no modelo regional Eta para realizar interações longas utilizando o modelo global HadCM3:

- *Calendário de 360 dias*: o Eta original utiliza calendário de 365 dias em anos normais e 366 em anos bissextos. Nessa configuração utiliza-se o calendário de 360 dias para adaptar-se as condições de contorno do modelo global *HadCM3* que possuem essa resolução temporal (PESQUERO et al., 2009);

- Atualizações de *TSM*: as rotinas de *TSM* foram modificadas para realizarem a atualização para cada passo de tempo. São feitas interpolações entre os valores de *TSM* mensais e para a grade de 1º x 1º lat/lon.

- Atualização da fração de cobertura de vegetação: a variação sazonal da vegetação foi introduzida a partir da variação da fração de cobertura de vegetação da superfície no modelo. Esta variável foi modificada para ser atualizada utilizando valores mensais de fração de cobertura de vegetação.

- O esquema de superfície continental (CHEN et al., 1997; EK et al., 2003) – possui quatro camadas para a temperatura do solo e profundidade de umidade com 10, 30, 60 e 100 cm. O esquema distingue 12 diferentes tipos de vegetação, sete tipos de textura de solo e inclui o mapa de vegetação com desflorestamento da Amazônia revisado (SESTINI et al., 2002).

- Adaptações para projeções de cenários futuros: para as simulações do clima futuro, o modelo passa por uma atualização as concentrações de CO_2. A concentração de CO_2 na atmosfera é atualizada para cada cinco anos da rodada do modelo, levando em conta o cenário de emissão considerado. Os coeficientes absorção, emissão e de transmissividade da atmosfera foram gerados para todo o período da simulação com intervalo de cinco anos através de interpolações dos coeficientes. Esses coeficientes estão relacionados com as concentrações de CO_2 na atmosfera e são usados pelo modelo para modificar o perfil de temperatura pelo esquema de radiação de onda longa do modelo.

4.4. Cenário A1B

Nessa simulação foram usadas como condições de contorno as simulações do modelo *HadCM3* para o cenário *A1B* (Figura 4.3), pertencente à família de cenários do *IPCC AR4*. O Cenário *A1B* considera equilíbrio entre todas as fontes de emissão (em que o equilíbrio é definido como uma dependência não muito forte de uma determinada fonte de energia, supondo-se que taxas similares de aperfeiçoamento apliquem-se a todas as tecnologias de oferta de energia e uso final).

Figura 4.3 – Caminhos de concentração representativos de CO_2 na atmosfera até o ano 2100. A partir de 2000 são apresentados os caminhos de concentração representativos de CO_2 para os cenários de emissões do IPCC *AR4* em partículas por milhão (*ppm*).
Fonte: Adaptado de *IPCC AR4*.

A saída do modelo regional Eta fornece 38 variáveis de um nível de pressão (superfície) e sete variáveis com 20 níveis de pressão (1000, 925, 900, 850, 800, 750, 700, 650, 600, 550, 500, 450, 400, 350, 300, 250, 200, 150, 100, 50 hPa) (ANEXO A).

Informações mais detalhadas sobre o modelo regional Eta *HadCM3* climático podem ser consultadas no artigo "Downscaling of South America present climate drivem by 4-member *HadCM3* runs", publicado por CHOU et al. (2011).

4.5. Controle de Qualidade dos Dados

O controle de qualidade foi aplicado aos dados observados de direção, velocidade do vento, temperatura do ar, pressão atmosférica e umidade relativa do ar. O controle de qualidade tem o propósito de minimizar a possibilidade de resultados tendenciosos devido à inconsistência nos dados causada por má amostragem e manipulação do banco de dados. Dessa forma, todas as análises e resultados gerados neste estudo são referentes apenas aos dados aprovados na qualificação.

Aplicou-se o código de controle de qualidade aos dados observacionais horários no qual dados suspeitos são sinalizados de acordo com os critérios adaptados do *Wind Resource Assessment Handbook (National Renewable Energy Laboratory - U.S. Department of Energy), do Meteorological Monitoring Guidance for Regulatory Modeling Applications (EPA - Environmental Protection Agency)* e da Rede SONDA – mantida pelo CCST/INPE.

O controle de qualidade consiste em teste de intervalo, teste de relação e teste de tendência, e possui os seguintes critérios de avaliação:

a) Testes de Intervalo

A velocidade do vento deve ser maior que zero m/s e menor que 25 m/s;

- Teste de intervalo de desvio padrão da velocidade do vento

O desvio padrão deve ser maior que zero m/s e menor que três m/s;

- Rajada máxima - Velocidade do vento

A velocidade da rajada máxima deve ser maior que o *offset* (sinal de saída do equipamento quando todos os sinais de entrada são iguais à zero) do equipamento e menor que 30 m/s. Por não haver informações sobre os *offsets* dos equipamentos nos aeródromos,

considerou-se o *offset* igual à zero. Este critério procura por valores de rajada fora do intervalo aceitável de rajada máxima do vento.

- Teste de intervalo da direção do vento

O valor em graus da direção do vento deve ser maior que 0° e menor que 360°;

- Teste do intervalo de desvio padrão da direção do vento

O intervalo de desvio padrão da direção do vento deve ser maior que 3° e menor que 75°. Calcula o desvio padrão da direção do vento da série e compara com cada amostra horária;

- Teste de intervalo de temperatura

Variabilidade sazonal. Média sazonal deve ser maior que 5ºC e menor que 40ºC;

- Teste de intervalo da pressão atmosférica

Média da pressão deve ser maior que 940mb e menor que 1060mb;

a) Testes de relação

Se o valor da velocidade do vento for maior que zero, então o valor da rajada máxima deve ser maior que zero e vice-versa;

A velocidade do vento para um mesmo momento deve ser menor que a rajada do vento;

- Rajada máxima diária vs. média diária da velocidade do vento

Velocidade da rajada máx. <= 2,5 * média da velocidade do vento;

Velocidade da rajada máx. <= 5 * média da velocidade do vento;

É importante ressaltar que se aplica o teste de relação para os dados de um dia, calculando a média diária e comparando com os valores horários do mesmo dia.

Parte dos testes de relação previstos na qualificação de dados de vento não pôde ser aplicada, pois é necessário ter informações da velocidade e direção do vento em duas ou mais altitudes diferentes para serem relacionadas através da Lei Logarítmica ou Lei de Potência.

b) Testes de tendência

- Teste de tendência na variação da velocidade e direção do vento

Variação em 1 hora < 5,0 m/s;

- Teste de tendência da temperatura

Mudança em uma hora deve ser menor ou igual a 5ºC;

- Teste de tendência da pressão

Variação da pressão no intervalo de 3 horas deve ser menor ou igual a 10*mb*.

Na Figura 4.4 está representada a estrutura do teste empregado nas séries históricas de vento utilizadas neste trabalho.

Figura 4.4 – Esquema representativo do algoritmo empregado para qualificação dos dados de direção e velocidade do vento.

4.6. Determinação das Regiões Homogêneas da Área de Estudo

O estudo de regiões homogêneas (*RH*) é uma etapa fundamental deste trabalho devido ao grande número de estações envolvidas ao longo do território

De acordo com Hosking e Wallis (1997), uma das etapas fundamentais na análise de estudo de frequência regional de uma determinada variável é o agrupamento de estações, ou séries temporais, com características similares. Isso poder ser feito a partir da identificação de regiões homogêneas, as quais não são necessariamente regiões geográficas.

A hipótese da homogeneidade supõe que as distribuições de frequência dos dados de estações meteorológicas localizadas em regiões homogêneas são aproximadamente as mesmas. As regiões podem ser agrupadas de diferentes formas: por conveniência geográfica, particionamento subjetivo, particionamento objetivo e análise de cluster.

- O método de conveniência geográfica consiste em dividir as regiões com base nas divisões administrativas (regionais, estaduais, municipais, etc.) ou em características físicas (regiões montanhosas, proximidade ao litoral, etc.);

- O método de particionamento subjetivo é possível, particularmente, em estudos de pequena escala no qual as regiões homogêneas são definidas a partir de características locais;

- O método de particionamento objetivo identifica regiões homogêneas ao selecionar estações cujas características atingem um valor definido por critérios de homogeneidade e/ou heterogeneidade;

- O método de analise de cluster é uma técnica de análise multivariada cujo propósito é reunir objetos em grupos com base em suas características.

Dentre os diversos métodos de estudo de *RH* propostos na literatura, optou-se pelo método de análise de agrupamento, pois esse método é o mais prático e amplamente utilizado na literatura científica para formar *RHs* a partir de grandes bases de dados.

4.6.1. Análise de Agrupamento

Neste método de agrupamento, um vetor de dados é associado a cada estação de modo que as estações possam ser particionadas ou agregadas em grupos, de acordo com a similaridade ou dissimilaridade de seus vetores de dados (HOSKING; WALLIS, 1997). Os grupos resultantes desse particionamento devem então exibir um alto grau de homogeneidade (similaridade) intragrupos e alta heterogeneidade (dissimilaridade) intergrupos (CORRAR et al., 2012).

A base de dados pode ser demonstrada matricialmente como uma matriz X de dimensão $m \times n$.

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & x_{22} & \ddots & x_{2n} \\ & & & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \tag{4.1}$$

Onde os vetores coluna da matriz representam as variáveis observadas e as linhas representam o número de observações.

4.6.2. Métodos Hierárquicos

A etapa fundamental antes de aplicarmos o algoritmo de agrupamento, é a identificação numérica de similaridade e dissimilaridade para determinar a correspondência ou semelhança entre os vetores de dados. Isso é feito através de métodos hierárquicos de agrupamento, os quais requerem medidas de dissimilaridade quando procuramos pelos pares de dados mais similares a serem agrupados. Os métodos hierárquicos de agrupamento podem ser aglomerativos ou divisivos. Isso envolve o cálculo de uma matriz de dissimilaridade de dimensões $n \times n$ (XIAOFENG; RICHMAN, 1995).

A similaridade entre objetos pode ser mensurada de diferentes maneiras, mas os métodos mais utilizados na Analise de Agrupamento são a medida de correlação, medida de distância e medida de associação. As medidas de correlação e distância requerem dados quantitativos, enquanto que a medida de associação requer dados qualitativos.

A medida da distância Euclidiana é um dos métodos mais comumente empregados para determinar o grau de similaridade entre objetos. Tais medidas de distância são, na verdade, medidas de dissimilaridade, com autovalores denotando menor similaridade entre os objetos. Essa distância é convertida em uma medida de similaridade através de utilização de uma relação inversa (HOSKING; WALLIS, 1997; XIAOFENG; RICHMAN, 1995; CORRAR et al. 2012).

Os dados envolvidos na análise são normalizados para eliminar o efeito das diferenças de escala e magnitude das variáveis, pois se os dados têm diferentes escalas, estes podem contribuir de maneira desigual para calcular a distância Euclidiana e assim alterar o valor final de similaridade.

Considerando a matriz X de dimensões $\mathrm{m} \times \mathrm{n}$ apresentada anteriormente, com $\mathrm{m}(1 \times \mathrm{n})$ linhas de vetores $\mathrm{x}_1, \mathrm{x}_2, \ldots, \mathrm{x}_\mathrm{m}$, as varias distâncias Euclidianas entre os vetores x_i e x_j podem ser determinadas por

$$\mathrm{d}_{\mathrm{ij}} = \left[\left(\mathrm{x}_\mathrm{i} - \mathrm{x}_\mathrm{j}\right)^\mathrm{T}\left(\mathrm{x}_\mathrm{i} - \mathrm{x}_\mathrm{j}\right)\right]^{1/2} \tag{4.2}$$

A partir da matriz de dissimilaridade obtida, um método hierárquico de agrupamento é empregado para determinar quais são os objetos pertencentes ao mesmo grupo. Hosking e Wallis (1997) sugerem o método de Ward (método da mínima variância) para o agrupamento dos vetores de dados. Este método procura as partições que minimizem a perda associada a cada região similar. Esta perda pode ser quantificada pela diferença entre as soma do erro quadrático médio de cada padrão no agrupamento em relação ao valor médio da partição em que está contido. A soma dos erros quadráticos médios para cada grupo é:

$$\mathrm{ESS} = \sum_{\mathrm{i}=1}^{\mathrm{n}} \mathrm{x}_\mathrm{i}^2 - \frac{1}{\mathrm{n}}\left(\sum_{\mathrm{i}=1}^{\mathrm{n}} \mathrm{x}_\mathrm{i}\right)^2 \tag{4.3}$$

Onde *n* é o número total de dados e x_i é o i-ésimo objeto no grupamento.

As séries temporais aprovadas na qualificação foram utilizadas na análise de *RHs* no Brasil em relação a variável vento a 10m. Foram extraídos os valores de mínimos e máximos diários das séries de vento e a partir deles gerou-se a climatologia anual com as médias mensais.

As variáveis utilizadas na análise de agrupamento são a média da soma da velocidade mínima e máxima do vento de cada mês do ano, as primeiras e segundas predominantes da direção do vento, a altitude em relação ao nível do mar e a latitude e longitude de cada estação. Assim, sendo o vento em superfície o objeto principal desse estudo, as variáveis para a determinação

das *RHs* foram escolhidas de forma a representar o melhor possível as características do vento em cada local.

Utilizando-se as médias mensais do vento, objetiva-se fornecer o perfil do ciclo anual do vento mínimo e máximo. A escolha da primeira e segunda direção predominante do vento visa caracterizar os fenômenos meteorológicos atuantes predominantes na região. Os dados de latitude e longitude permitem que a análise de agrupamento localize espacialmente as estações, considerando assim a variação latitudinal dos climas regionais.

Os dados são organizados em uma única matriz X de dimensões $m \times n$ onde as colunas da matriz correspondem as variáveis de uma determinada série temporal. A matriz é então transposta de forma que as colunas passam a representar os objetos e as linhas as variáveis, e em seguida é normalizada, de acordo com a equação 3.1, a qual é aplicada a cada coluna da matriz X^{T}.

$$\mathrm{Z} = \frac{(\mathrm{x_j} - (\bar{\mathrm{x}}_\mathrm{j}))}{\sigma(\mathrm{x_j})} \tag{4.4}$$

Onde x_j é o vetor coluna da matriz X, $\bar{x}_j$ é a média da coluna, e $\sigma(x_j)$ é o desvio padrão da coluna.

Em seguida, foi determinada a medida do nível de similaridade entre os objetos a serem agrupados por meio do cálculo da distância Euclidiana. Os agrupamentos foram então definidos através do método hierárquico de Ward (WARD, 1969).

4.7. Análise de Tendência

O estudo de tendências climáticas nas séries temporais de velocidade do vento a 10m foi realizada empregando-se o teste de Mann-Kendall.

4.7.1. Teste de Mann-Kendall

O teste de Mann-Kendall usado em séries históricas foi proposto por Sneyers (1975) para identificar as possíveis tendências climáticas existentes nas séries de dados. O teste considera que, na hipótese de estabilidade de uma série temporal, a sucessão de valores ocorre de forma independente, e a distribuição de probabilidade deve permanecer sempre a mesma (BACK, 2001).

Segundo Goossens e Berger (1986), o teste de Kendall é o método mais apropriado para analisar mudanças climáticas em séries climatológicas e permite também a detecção e localização aproximada do ponto inicial de determinada tendência.

Sneyers (1975) descreve o método considerando uma série temporal x_i com N elementos, onde $1 \leq i \leq N$. O teste consiste na soma t_n do número de termos M_i da série, relativo ao valor x_i cujos termos precedentes ($j<i$) são inferiores ao mesmo ($x_j<x_i$).

$$t_n = \sum_{i=1}^{n} M_i \tag{4.5}$$

Para séries com grande número de termos, sob a hipótese nula (H_0) de ausência de tendência (BACK, 2001), t_n apresentará uma distribuição normal com média e variância igual a:

$$E(t_n) = \frac{N(N-1)}{4} \tag{4.6}$$

$$Var(t_n) = \frac{N(N-1)(2N+5)}{72} \tag{4.7}$$

Testando a significância estatística de t_n para a hipótese nula usando um teste bilateral, esta pode ser rejeitada para grandes valores de $u(t)$ dada por

$$u(t) = \frac{[t_n - E(t_n)]}{\sqrt{var\ t_n}} \tag{4.8}$$

A hipótese nula é aceita ou rejeitada se $\alpha_1 > \alpha_0$ ou $\alpha_1 < \alpha_0$ respectivamente, para um nível de significância α_0. O sinal de *u(t)* indica se a tendência é crescente *u(t)>0* ou decrescente *u(t)<0* (BACK, 2001).

O valor da probabilidade α_1 é calculado com o uso de uma tabela normal reduzida, onde

$$\alpha_1 = prob(|u| > |u(t)|) \tag{4.9}$$

A significância do teste é em geral α_0 = 0,05, valor que corresponde ao nível de confiança de 95%. Para isso, o valor de *u(t)* deve estar entre -1,96 e 1,96 para que a hipótese H_0 seja satisfeita, ou seja, para que a série temporal não apresente uma tendência significativa.

Para isso, foram geradas as médias anuais da velocidade mínima e máxima do vento como determina a bibliografia. O nível de confiança considera para o teste é de 95%, portanto, de acordo com a tabela normal reduzida o valor de *u(t)* deve estar entre -1,96 e 1,96 para que a hipótese H_0 seja satisfeita, ou seja, para que a série temporal não apresente tendência significativa.

4.8. Distribuição de Probabilidade de Frequência das Séries de Vento Máximo

Para obter as funções de distribuições de probabilidade (PDF) foram usados os modelos de Gumbel, Weibull e GEV. A determinação dos parâmetros das distribuições foi obtida através do método da máxima verossimilhança. O teste do melhor ajuste das distribuições de frequência foi realizado utilizando-se o teste bilateral *KS.*

A análise de valores extremos é empregada rotineiramente para estudo de enchentes, ciências ambientais, finanças e seguros (REISS E THOMAS, 2007).

Diferentes métodos de distribuição de probabilidade de eventos extremos são utilizados atualmente para dados observados, causando discussões entre os

estatísticos de qual seria o melhor método a ser empregado. No entanto, alguns deles estão bem consolidados na bibliografia e geram resultados consistentes quando comparados entre si, conforme discutido a seguir.

Alguns autores como Gumbel (1958) Reiss e Thomas (2007) consideram os métodos de Gumbel e GEV (Generalized Extreme Value) de análise de extremos como os mais indicados, sendo que o método GEV considera três diferentes métodos de distribuição: Gumbel, Fréchet e Weibull.

Hershfield e Kohler (1960) analisando os dados de estações pluviométricas nos Estados Unidos, concluíram que a distribuição de Gumbel é a mais adequada para estimar as probabilidades de ocorrência de eventos extremos de precipitação de diversas durações.

Ainda, o trabalho publicado por Sansigolo (2008) mostrou que a distribuição que mais se ajustou aos dados de vento foi a Weibull.

Dessa forma, com base nas diferentes bibliografias consultadas, optou-se por adotar os três modelos de distribuição que mais se ajustam ao estudo de ventos extremos, Gumbel, Weibull e GEV.

4.8.1. Distribuição de Gumbel

A distribuição de Gumbel pode ser descrita como uma função de densidade de probabilidade, da seguinte forma:

$$f(x) = \frac{1}{\beta} e^{-\frac{x-\alpha}{\beta}} e^{-e^{-\frac{x-\alpha}{\beta}}} \tag{4.10}$$

e a função cumulativa de probabilidade (CDF) é dada por

$$F(x) = e^{-e^{\pm\frac{x-\alpha}{\beta}}} \tag{4.11}$$

$$X(F) = \alpha - \beta ln(-lnF) \tag{4.12}$$

onde α e β são os parâmetros de posição e escala, respectivamente. O sinal de mais e menos no segundo expoente é referente aos sinais de máximo (positivo) e mínimo (negativo) dos valores extremos.

4.8.2. Distribuição GEV

A distribuição de probabilidade generalizada de valores extremos (GEV) foi introduzida por Jenkinson (1955). Esse método combina os três possíveis tipos de distribuição de valores extremos em uma única forma, vem sendo utilizada para representar a distribuição de valores extremos em diferentes campos principalmente para modelar uma extensa variedade de extremos naturais, como cheias, chuvas, velocidade do vento, temperaturas e outros extremos (QUEIROZ, 2006).

Segundo Sansigolo (2008) a teoria GEV, fundamental para a modelagem de eventos extremos, foi desenvolvida por Fisher-Tippett (1928), que definiram os três tipos possíveis de distribuições assintóticas de valores extremos, conhecidas como de Gumbel (Tipo I), Fréchet (Tipo II) e Weibull (Tipo III), casos especiais da Distribuição Generalizada de Valores.

$$F(x) = exp\left[-\left(1 - k\frac{x-\propto}{\beta}\right)^{\frac{1}{k}}\right] \text{ para } k \neq 0 \tag{4.13}$$

$$F(x) = exp\left[-exp\left(-\frac{x-\propto}{\beta}\right)\right] \text{ para } k \equiv 0 \tag{4.14}$$

sendo,

$-\infty < x < +\infty,\ k = 0$ Distribuição tipo I (Gumbel)

$\varepsilon \leq x < +\infty,\ k < 0$ Distribuição Tipo II (Fréchet)

$-\infty < x \leq \omega,\ k > 0$ Distribuição Tipo III (Weibull)

A distribuição generalizada de valores extremos (GEV) de três parâmetros: *α* parâmetro de posição com $-\infty < \alpha < +\infty$, *β* parâmetro de escala com $0 < \beta < +\infty$ e *k* parâmetro de forma com $-\infty < k < +\infty$.

Quando $k > 0$, o limite superior da distribuição assintótica Tipo III torna-se $\omega = \alpha + \frac{\beta}{k}$, e quando $k < 0$ o limite inferior da distribuição assintótica Tipo II torna-se $\varepsilon = \alpha + \frac{\beta}{k}$.

O p-ésimo quantil da distribuição GEV é dado pela seguinte relação, decorrente da Equação 4.10:

$$X(F) = \alpha + \frac{\beta}{k}\left[1 - \left(-ln(p)\right)^{k}\right],\ 0 < p < 1 \tag{4.15}$$

Combinando a distribuição de Gumbel com a sua variável reduzida *z* (QUADROS et al., 2011), temos:

$$z = \frac{(x-\alpha)}{\beta} \tag{4.16}$$

Obtendo-se $F(x) = exp[-exp(-z)]$ que resulta na equação:

$$z = ln\left[-ln\left(F(x)\right)\right] \tag{4.17}$$

Assim a Função 4.14 pode ser usada para definir *z* com respeito às distribuições Tipo I, II e III. Em um gráfico de intensidade *z versus x*, pode-se observar o comportamento das três formas de distribuição de valores extremos.

4.8.3. Distribuição de Weibull

A distribuição de Weibull é amplamente usada no setor de energia eólica para avaliar a viabilidade do vento na geração de energia elétrica (VAN DER AWERA et al., 1980; SANSIGOLO, 2005). Essa distribuição fornece dois parâmetros denominados parâmetro de forma *k* e um fator de escala *β*.

A partir dos dados de velocidade do vento são determinados histogramas expressando as frequências de ocorrência de cada faixa de velocidade. Juntamente com as curvas de turbinas eólicas, os histogramas permitem estimar o potencial de geração de energia do sítio eólico. A forma geral para a distribuição de Weibull é a seguinte:

$$f(x) = \frac{k}{\beta}\left(\frac{x}{\beta}\right)^{(k-1)} e^{-\left(\frac{x}{\beta}\right)^{k}} \tag{4.18}$$

e sua forma como função de densidade de probabilidade acumulada é dada por:

$$F(x) = 1 - \exp\left[-\left\{\frac{(x-\alpha)}{\beta}\right\}^{\mathrm{k}}\right], \alpha \leq x < \infty \tag{4.19}$$

O quantil da distribuição de Weibull é dado por:

$$X(F) = \alpha + \beta[-\ln(1-F)]^{\frac{1}{k}} \tag{4.20}$$

Onde *x* representa a velocidade do vento. Os fatores de escala β e o de forma *k* são os parâmetros que estão relacionados, respectivamente à velocidade média do vento e à forma da curva (CARVALHO, 2003).

4.9. Período de Retorno – *T*

Um dos maiores objetivos da análise de valores extremos é a estimação do período de retorno *T* (REISS; THOMAS, 2007), sendo ele o período de tempo médio em que um determinado evento é igualado ou superado pelo menos uma vez.

Esse parâmetro estatístico é empregado no estudo de eventos extremos, amplamente utilizado em hidrologia, principalmente na prevenção de inundações.

A análise de período de retorno é mais interessante se as observações forem feitas em intervalos equidistantes de tempo, como é o caso da meteorologia

estatística. Dessa forma, o tempo de retorno são tempos, e para observações anuais, número de anos (GUMBEL, 1958).

Seja *x* um evento e *T* o tempo entre os eventos consecutivos *x*, o valor médio da variável *T* é denominado período de retorno da variável *x.*

O período de retorno é determinado através da seguinte função:

$$T(x) = \frac{1}{1-P(x)} \tag{4.21}$$

Onde P é a probabilidade de um valor qualquer de uma variável x ocorrer novamente ou ser superado ao menos uma vez.

4.10. Método de Ajuste das Distribuições de Frequência

Utilizou-se o teste *KS* nos resultados dos três métodos de distribuição de frequência para escolher o melhor ajuste, considerando o menor valor crítico $\mathrm{D_{max}}$. Ao considerar que os dados de vento não seguem uma distribuição normal, e, portanto o teste da hipótese nula não pode ser aplicado a esse caso, escolheu-se a melhor distribuição adotando como critério o menor $\mathrm{D_{max}}$ resultante do teste *KS*. A Figura 4.5 ilustra o cálculo do $\mathrm{D_{max}}$ entre as curvas CDF teórica e empírica.

Figura 4.5 – Função de distribuição cumulativa de valor empírico e teórico e a maior distância entre as curvas CDF determinada pelo teste *KS*.

No entanto, optou-se também por adotar o menor erro padrão (*SE*) como critério de melhor ajuste (Eq. 4.22) por este considerar todos os valores da série e não somente um valor como o teste *KS*. Embora o SE também tenha suas desvantagem em relação à dependência da posição da plotagem, e considerando que a dependência pode afetar o valor absoluto da soma do quadrado dos desvios, ele não afeta a posição relativa de cada distribuição (BACK, 2001; KITE, 1978).

O *SE* pode ser calculado de acordo com a seguinte equação,

$$\mathrm{SE} = \sqrt{\frac{\sum(\mathrm{x_i} - \mathrm{xe_i})^2}{\mathrm{n-m}}} \tag{4.22}$$

onde *SE* é o erro padrão, x_i é a variável observada, xe_i é a variável estimada pela distribuição de probabilidade teórica, *n* é o número de elementos na série de dados e *m* é o número de parâmetros calculados.

4.11. Treinamento das Redes Neurais Artificiais (RNAs)

As RNAs foram empregadas para realizar o refinamento estatístico das séries de velocidade do vento a 10m do modelo *Eta-HadCM3* a fim de avaliar a frequência e as tendências de ventos extremos para o período de projeções entre 2010 e 2100.

As séries de saída do período *baseline* do modelo *Eta-HadCM3* foram utilizados como entrada (preditores) das *RNAs* na tentativa de modelar numericamente a velocidade do vento a 10m, obtendo assim uma nova série temporal com erro sistemático e *RSME* menores, e maior correlação em relação aos mínimos e máximos de vento *OBS10m*.

As rodadas existentes do modelo *Eta-HadCM3* possuem saídas com resolução temporal de três horas (0, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21), e, apesar da tentativa de integrar o modelo com a resolução de uma hora, este procedimento tornou-se inviável devido ao tempo de processamento e o tamanho dos arquivos gerados

no pós-processamento. No entanto, as séries temporais de vento *OBS10m* têm resolução temporal de uma hora, e portanto, para rodar as *RNAs* a partir das saídas de três horas do modelo *Eta-HadCM3*, a cada intervalo de três horas do modelo são descartadas duas horas de observações. Assim sendo, com o intuito de não desconsiderar essas informações, optou-se por interpolar as saídas do modelo a fim de obter saídas horárias utilizando o método de interpolação linear.

Uma etapa fundamental do refinamento estatístico com o emprego de RNAs é determinar quais variáveis são mais significativas para o estudo em questão, ou seja, a quais variáveis preditoras a RNA apresentará maior sensibilidade e quais variáveis são redundantes. Variáveis com alta correlação são consideradas redundantes e não proporcionam melhoria no desempenho da *RNA*, além de proporcionar um aumento do custo computacional envolvido.

Neste trabalho, tomou-se como referência a análise de sensibilidade apresentada e amplamente discutida por Gonçalves (2011) no trabalho intitulado "Refinamento Estatístico das Previsões de Vento do Modelo Eta Aplicado ao Setor Eólio-Elétrico do Nordeste Brasileiro", no qual calculou-se a correlação cruzada entre as variáveis do modelo Eta e eliminou-se aquelas consideradas redundantes (coeficiente de correlação superior a 0,99). Foram calculadas as correlações de Pearson, Kendall e Spearman entre os preditores e o alvo.

Foram extraídas 12 variáveis meteorológicas de saída do modelo regional para serem usadas como preditores da RNA: pressão ao nível do mar (*PSLM*), pressão na superfície (*PSLC*), temperatura do ar a 2 metros (*TP2M*), componente zonal do vento a 10 metros (*U10M*), componente meridional do vento a 10 metros (*V10M*), fração de nuvens baixas (*LWNV*), energia potencial convectiva disponível (*CAPE*), altura geopotencial (*ZGEO*), vento zonal (*UVEL*), vento meridional (*VVEL*), temperatura (*TEMP*) e umidade relativa (*UMRL*). As variáveis do modelo Eta-HadCM3 possuem saídas em diferentes níveis de pressão.

Os níveis do modelo incluídos para o treinamento foram 1000, 925, 900, 850 hPa, por estarem relacionados aos gradientes verticais e à dinâmica da CLA, e 500 e 200 hPa, por apresentarem uma relação com o vento geostrófico e principalmente com as forçantes dinâmicas de alta troposfera, como os distúrbios ondulatórios e VCANs. Portanto o total de séries de dados do modelo EtaHadCM3 assimiladas para cada estação foi igual a 33 séries de preditores.

As séries do modelo regional *Eta-HadCM3* passaram pelo processo de qualificação a fim de filtrar inconsistências, utilizando-se o mesmo código empregado nas séries observadas. No entanto, as saídas do modelo regional Eta são disponibilizadas em horário *UTC* (*Coordinated Universal Time*) enquanto que as séries temporais observadas são disponibilizadas em horário local. Portanto, fez-se necessário sincronizar os dados de ambas as séries para cada estação, e dessa maneira, após a sincronização, as séries temporais do modelo resultaram em séries com o mesmo tamanho das séries observadas.

Neste estudo empregou-se a RNA Perceptron de Múltiplas Camadas (*Multilayer Perceptron – MLP*) com o método de treinamento *Levenberg-Marquadt* devido à sua capacidade de aproximação de qualquer função contínua aliada à capacidade de generalização (MORÉ, J. 1963). A fim de estabelecer a melhor arquitetura para a *RNA*, foram testadas redes com 8, 10, 12, 14, 16, 18 e 20 neurônios na camada oculta. Além disso, para cada grupo de neurônios na camada oculta foram treinadas entre 20 e 100 *RNAs* com 33 preditores (saídas do modelo regional Eta) e um alvo (velocidade do vento observado a 10m). As amostras de dados de vento *OBS10m* usados para definir a melhor arquitetura da *RNA* foram de 70% para o treinamento, 20% para a validação e 10% para o teste, escolhidos randomicamente ao longo de toda a amostra de vento *OBS10m*.A avaliação do desempenho do modelo Eta e das RNAs em relação às observações é feita considerando-se os valores do coeficiente de correlação de Pearson (R), viés ou erro sistemático médio, *skill*, e a raiz do erro quadrático médio (*RMSE*).

- Coeficiente de Correlação de Pearson entre observações e predições (R): esse coeficiente mede a associação linear entre observações e predições e é definido pela seguinte equação:

$$R = \frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}\left(\frac{P_i-\bar{P}}{S_p}\right)\left(\frac{O_i-\bar{O}}{S_o}\right) \tag{4.23}$$

Onde S_P e S_O são, respectivamente, os desvios padrões das predições e observações, $\bar{P}$ e $\bar{O}$ são as médias das predições e observações, e N é o número de observações e suas respectivas predições. Substituindo S_P e S_O pelas suas equações, o coeficiente de correlação entre P e O pode ser calculado por:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{N}(P_i-\bar{P})(O_i-\bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(P_i-\bar{P})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(O_i-\bar{O})^2}} \tag{4.24}$$

O valor de R é adimensional e pode variar de -1 a 1 e sua previsão perfeita é 1. É possível ocorrer uma correlação elevada para uma previsão com grandes erros, pelo fato desse coeficiente ser independente da escala e por não levar em conta o viés da previsão.

- *Viés* ou Erro Sistemático Médio (*Viés – Mean Error*): Medida da média dos erros (Erro ou desvio = P_i - O_i) que permite verificar se a previsão é sistematicamente subestimada ou superestimada. Varia de infinito negativo a infinito positivo e seu valor para previsão perfeita é 0, mas pode atingir esse valor mesmo para uma previsão ruim, caso hajam erros compensatórios. Possui a mesma unidade das predições e observações.

$$Viés = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(P_i - O_i) \tag{4.25}$$

- *Skill:* medida do ganho de um modelo em relação a outro para um determinado índice estatístico.

$$skill(RMSE, EtaHadCM3) = \frac{RMSE_{RNA-}\ RMSE_{EtaHadCM3}}{RMSE_{EtaHadCM3}} \tag{4.26}$$

- Raiz do Erro Quadrático Médio (*RMSE – Root Mean Squared Error*): Medida da magnitude média dos erros de previsão. Varia de 0 a infinito e seu valor para previsão perfeita é 0. Como é uma média quadrática, erros maiores possuem maior influência sobre o valor final do que os erros menores. Possui a mesma unidade das predições ou observações.A partir do processo de treinamento das RNAs e dos métodos de avaliação descritos acima, determina-se qual arquitetura de *RNA* consegue representar melhor as séries observadas. Assim, a partir da RNA de melhor desempenho, são inseridas como preditores as variáveis das projeções futuras do modelo Eta-HadCM3 correspondentes àquelas utilizadas no treinamento para o período entre 1960 e 1990. A série de saída da *RNA* equivale ao vento extremo mínimo e máximo a 10m (vento *RNA10m*) para o período relativo aos preditores. Ainda, deve-se levar em conta que o erro sistemático, o *RMSE* e o coeficiente de correlação para as projeções futuras corrigidas pelas RNAs são consideradas as mesmas do período baseline.

5 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados do controle de qualidade dos dados observados, as estações aprovadas no pré-processamento, no teste de qualificação e o total de dados sinalizados como suspeitos.

Ainda neste capítulo, são discutidos os resultados da análise de agrupamento em que se determinam as regiões homogêneas (*RHs*) da área de estudo, além da discussão em torno das características das *RHs* relativas aos principais sistemas meteorológicos atuantes, ciclo anual da velocidade do vento, e características geográficas.

Em seguida, são apresentadas as distribuições de frequência de probabilidade do vento máximo *OBS10m* bem como os resultados do teste *KS* e do SE usados para avaliar o ajuste dos modelos de distribuição para escolher aquele que melhor representa a distribuição de frequência de cada série temporal.

Identificado o melhor ajuste de distribuição do vento para cada uma das *RH*, calcula-se com base nesse modelo, o período de retorno dos máximos de velocidade do vento com um nível de significância de 95%.

Em seguida são apresentados os resultados do refinamento estatístico do modelo *Eta-HadCM3* através do emprego de RNAs.

Por fim, O teste de Mann-Kendall é empregado às séries futuras de vento modeladas e ajustadas pela *RNA* a fim de obter informações sobre a existência de tendências no regime de ventos entre 2010 a 2100.

5.1. Resultados da Qualificação dos Dados Observados

Os dados observados disponibilizados pelo DECEA correspondem a séries climatológicas provenientes de 97 estações meteorológicas em superfície, com sensores de medida de velocidade e direção do vento a 10 metros de altura. Conforme é determinado pela *World Meteorological Organization* (*WMO*), para

estudos climáticos são utilizados séries temporais iguais ou superiores a 30 anos, por considerar esse período suficiente para filtrar variações e anomalias existentes, porém curto o bastante para indicar presença de tendências climáticas.

Por terem um papel importante em relação às condições de voo civil e militar, as estações de coleta de dados meteorológicos do DECEA localizadas em aeródromos, são uma das melhores fontes de dados climatológicos do país em termos de representação espacial, tempo de amostragem e controle de qualidade das séries. No entanto, é fundamental em um estudo científico, usar critérios que busquem garantir a confiabilidade dos resultados em relação ao objeto do estudo utilizando meios para reduzir a presença de dados espúrios.

Assim sendo, como parte do pré-processamento dos dados deste estudo, as séries temporais consideradas ideais para análise devem ter registros iguais ou superiores há 30 anos, e os períodos de anos consecutivos faltantes devem ser iguais ou menores que três anos. Como resultados dessa primeira etapa foram aprovados um total de 42 estações (Fig. 3.1), as quais foram submetidas ao algoritmo de qualificação descrito do Capítulo 3 deste trabalho.

Na Tab. 5.1 são apresentadas as latitudes (*lat*) e longitudes (*lon*) das estações utilizadas, bem como informações como sua altitude em relação ao nível do mar e período das séries temporais. Além disso, com o propósito de facilitar o processamento das séries temporais e a análise dos resultados, atribuiu-se a cada estação um número o qual é denominado “indicador”.

O início das observações varia significativamente entre as estações, sendo que algumas delas têm registros a partir de 1947 e outras a partir de 1974, aproximadamente 30 anos de diferença. A altitude das estações em relação ao nível do mar varia de três metros até 1060.

Tabela 5.1 – Sigla da estação, indicador da estação, localização (lat, lon), altitude em relação ao nível do mar e período de aquisição dos dados.

Estação	Indicador	lat	lon	Altitude (m)	Período	Estação	Indicador	lat	lon	Altitude (m)	Período de dados
SBAR	1	-10,00	-37,07	7	1964-2013	**SBMN**	22	-3,00	-60,03	84	1958-2012
SBBG	2	-31,38	-54,12	180	1960-2014	**SBMO**	23	-9,00	-35,78	115	1951-2013
SBBH	3	-19,85	-43,95	777	1947-2014	**SBMQ**	24	0,00	-51,07	17	1968-2014
SBBR	4	-15,01	-47,92	1060	1960-2013	**SBMS**	25	-5,20	-37,37	23	1960-2014
SBBU	5	-22,35	-49,05	608	1959-2014	**SBNT**	26	-5,54	-35,15	52	1951-2013
SBBV	6	2,01	-60,70	83	1961-2012	**SBOI**	27	3,01	-51,83	10	1960-2012
SBCG	7	-20,47	-54,67	550	1951-2014	**SBPA**	28	-30,00	-51,17	4	1951-2014
SBCR	8	-19,02	-57,67	140	1969-2014	**SBPB**	29	-2,90	-41,75	5	1970-2011
SBCT	9	-25,01	-49,17	710	1951-2011	**SBPK**	30	-31,01	-52,33	18	1970-2014
SBCY	10	-15,01	-56,12	185	1963-2013	**SBPV**	31	-8,01	-63,90	88	1969-2013
SBFL	11	-27,01	-48,55	6	1951-2011	**SBRF**	32	-8,08	-34,92	11	1951-2013
SBFZ	12	-3,46	-38,32	25	1951-2011	**SBSL**	33	-2,35	-44,14	53	1951-2012
SBGL	13	-22,83	-43,25	5	1951-2013	**SBSM**	34	-29,71	-53,69	87	1960-2014
SBGO	14	-16,01	-49,22	735	1952-2013	**SBSN**	35	-1,99	-54,78	72	1954-2012
SBGR	15	-23,43	-46,47	763	1951-2013	**SBST**	36	-23,93	-46,30	5	1951-2014
SBIL	16	-14,00	-39,03	5	1961-2013	**SBTE**	37	-5,00	-42,82	67	1955-2013
SBJR	17	-22,98	-43,37	3	1974-2013	**SBTS**	38	2,23	-55,95	344	1972-2012
SBKG	18	-7,00	-35,90	502	1970-2013	**SBUG**	39	-29,78	-57,03	74	1951-2014
SBKP	19	-23,00	-47,13	651	1951-2014	**SBUL**	40	-18,88	-48,23	928	1959-2013
SBLO	20	-23,33	-51,13	570	1962-2012	**SBUR**	41	-19,77	-47,95	810	1964-2012
SBLP	21	-13,27	-43,42	436	1961-2013	**SBVT**	42	-20,27	-40,28	3	1951-2014

A Figura 5.1 representa o total do número de elementos das observações e o total de elementos sinalizados como suspeitos após o processo de qualificação.

Figura 5.1 – Representação do resultado da qualificação das séries temporais de velocidade do vento *OBS10m* de 42 estações meteorológicas. As barras azuis correspondem ao total de dados submetidos ao código de qualificação e as barras vermelhas correspondem aos dados sinalizados como suspeitos.

A Tab. 5.2 complementa a informação da Figura 5.1 indicando a porcentagem de dados sinalizados como suspeitos em cada estação.

Tabela 5.2 – Porcentagem de dados sinalizados como suspeitos no teste de qualificação.

Estação	Dados Suspeitos (%)	Estação	Dados Suspeitos (%)
SBAR	19,82	**SBMN**	46,57
SBBG	14,39	**SBMO**	38,27
SBBH	40,47	**SBMQ**	10,20
SBBR	46,06	**SBMS**	13,36
SBBU	10,60	**SBNT**	8,89
SBBV	43,03	**SBOI**	45,37
SBCG	14,06	**SBPA**	16,28
SBCR	36,47	**SBPB**	12,69
SBCT	17,61	**SBPK**	15,06
SBCY	37,03	**SBPV**	57,98
SBFL	16,72	**SBRF**	9,88
SBFZ	12,02	**SBSL**	21,55
SBGL	22,50	**SBSM**	15,37
SBGO	49,18	**SBSN**	20,33
SBGR	23,95	**SBST**	44,82
SBIL	21,52	**SBTE**	61,28
SBJR	28,64	**SBTS**	25,41
SBKG	0,88	**SBUG**	8,90
SBKP	16,41	**SBUL**	19,73
SBLO	3,98	**SBUR**	17,39
SBLP	48,84	**SBVT**	25,18

As 42 séries de dados usadas nesse trabalho correspondem a um total de 17.178.618 de linhas contendo dados de velocidade e direção do vento com resolução temporal horária, das quais 12.951.913 foram aprovadas pelo teste de qualificação.

5.2. Resultados da Análise de Regiões Homogêneas

A Figura 5.2 representa o dendrograma resultante da análise de agrupamento das 42 estações em que determinou-se as *RHs*. Os indicadores das estações são situados no eixo horizontal enquanto que no eixo vertical é indicado o grau de similaridade entre os objetos da análise.

A linha pontilhada é calculada pelo método hierárquico de Ward e define um limiar que sugere quais objetos devem estar contidos dentro de uma mesma *RH* e a cor das barras verticais representam as *RHs*.

O dendrograma indica a existência de sete *RHs*, sendo que duas delas possuem um objeto (estação) cada, objetos 6 e 29. Essas duas *RHs* são, de acordo com a teoria da analise de agrupamento, suspeitas por divergirem das demais em relação ao seu número de objetos, e dessa forma, precisam ser analisadas com outra abordagem por serem consideradas possíveis *outliers*, embora possam ser séries representativas de características locais.

Figura 5.2 – Dendrograma resultante do método de Análise de Agrupamento. As barras verticais representam o nível de similaridade de cada estação dentro de um determinado grupo, onde cada grupo é representado por uma cor. A linha pontilhada em preto indica o cuttoff determinado pelo método hierárquico de Ward.

A fim de avaliar se as estações 6 e 29 são ou não *outliers*, optou-se em calcular a correlação de Pearson entre suas séries e as séries das estações geograficamente mais próximas, por considerar que estas estão sob influência dos mesmos sistemas meteorológicos ou em regiões de mesma latitude. Dessa forma, a estação 6 foi comparada com as estações 22, 27, 38 enquanto que a estação 29 foi comparada com as estações 12, 33, 37.

A Figura 5.3 representa o ciclo anual e os valores da correlação do vento mínimo e máximo. Observa-se que a forma da curva 6 difere das demais sugerindo uma maior variação anual e maior magnitude da velocidade do vento

nos períodos sazonais de DJF (verão) e MAM (outono). Pode-se verificar no Atlas Eólico Brasileiro (AMARANTE et al., 2001) que a região do estado de Roraima, em que a estação 6 (SBBV) está inserida, destaca-se dentro da região Norte com ventos médios anuais de aproximadamente 9 $m \cdot s^{-1}$. Além disso, o valor de correlação entre as estações é igual ou abaixo de 70%. Dessa forma, pode-se considerar que a estação 6 possui regime de ventos com características que não condizem com as estações circunvizinhas e, portanto, pode ser considerada uma *RH*.

Figura 5.3 – Ciclo anual das estações 6, 22, 27, 35 e 38 e o valor de correlação entre a estação 6 e as demais estações circunvizinhas.

A Figura 5.4 apresenta o ciclo anual e as correlações entre as estações 29, 12, 33 e 37 localizadas na costa Nordeste do Brasil. Nesse gráfico observa-se que a curva da estação 37 diverge das demais apresentando velocidade do vento aproximadamente constante ao longo do ano, enquanto que as outras estações apresentam maior variabilidade sazonal.

O valor da correlação também corrobora com a diferença significativa entre as estações 29 e 37, sugerindo uma baixa correlação de 0,21 da velocidade do vento máximo e uma anticorrelação de -0,31 para a velocidade do vento mínimo.

As curvas das estações 29, 12 e 33 sugerem que elas possuem variação anual semelhante e os valores de correlação e sua proximidade geográfica indica que elas estão sob influência dos mesmos sistemas meteorológicos.

Dessa forma, entende-se que a estação 29 não forma uma *RH* de apenas um objeto, ao contrário do que indica o resultado do método hierárquico de Ward. Assim, com base nos resultados de ciclo anual e correlação, essa estação pode ser considerada como parte do grupo destacado em vermelho no dendrograma da Figura 5.2.

Figura 5.4 – Ciclo anual e o valor de correlação entre a estação 29 e as estações 12, 33, 37.

Na Tab. 5.3 estão identificadas as estações dentro das *RHs*. Deve-se aqui ressaltar que neste caso, os grupos de estações que formam as *RHs*, são na verdade, macro regiões formadas por diferentes subgrupos, ou seja, pode-se determinar um maior número de *RHs* e consequentemente diminuir os objetos em cada uma delas. Como exemplo, podemos tomar os objetos 15 e 20 do dendrograma, os quais formam um subgrupo dentro da *RH6*. No entanto, essa análise mais detalhada foge ao escopo desse trabalho e são considerados unicamente os resultados do método hierárquico de Ward.

Tabela 5.3 – Estações que compõem as *RHs*.

Região Homogênea	Estação	Indicador	Região Homogênea	Estação	Indicador
RH1	SBBV	6	***RH4***	SBIL	16
RH2	SBCR	8		SBJR	17
	SBCY	10		SBMO	23
	SBLP	21		SBST	36
	SBMN	22		SBUL	40
	SBOI	27	***RH5***	SBBG	2
	SBPV	31		SBBU	5
	SBTE	37		SBCG	7
	SBTS	38		SBKP	19
RH3	SBAR	1		SBPK	30
	SBFZ	12		SBUG	39
	SBKG	18		SBVT	42
	SBMQ	24	***RH6***	SBBH	3
	SBMS	25		SBCT	9
	SBNT	26		SBFL	11
	SBPB	29		SBGL	13
	SBRF	32		SBGR	15
	SBSL	33		SBLO	20
	SBSN	35		SBPA	28
RH4	SBBR	4		SBSM	34
	SBGO	14		SBUR	41

A Figura 5.5 representa a distribuição espacial das *RHs* e a Figura 5.6 representa os principais sistemas meteorológicos na baixa troposfera atuantes na América do Sul (SATYAMURTY et al., 1998; REBOITA et al., 2010).

A *RH1* localiza-se no extremo Norte do Brasil onde incidem os ventos alísios de Nordeste (*ANE*). Além disso, ocorrem complexos convectivos de mesoescala (*CCMs*), embora com menos frequência que o Sul do Brasil.

A *RH2* ocupa a maior área dentre todas as *RHs*, com quatro estações no Norte em área de floresta amazônica, duas estação na região do Pantanal e outras duas estações no interior do Nordeste. Por se tratar de uma área relativamente grande incluindo três macrorregiões brasileiras, as estações desta *RH* estão sob influência de diversos sistemas meteorológicos que atuam entre as latitudes 3°N e 20°S (sistemas frontais, *ZCAS*, linhas de instabilidade tropicais, e ventos alísios).

A *RH3* é formada por 10 estações localizadas predominantemente ao longo da costa do Nordeste brasileiro, a qual é influenciada pelos ventos alísios e pela Zona de Convergência Intertropical do Atlântico (ZCIT).

A *RH4* é constituída por sete estações, algumas delas no interior do continente e outras na costa. As estações mais a Nordeste, 16 e 23, localizam-se em regiões onde ocorrem ventos alísios de sudeste (*ASE*) e a linha de instabilidade (*LI*). As estações 4, 14 e 40 localizam-se no interior do país e na linha da Zona de Convergência do Atlântico Sul (*ZCAS*) em uma altitude entre 700 e 1100 metros acima do nível do mar, enquanto que as estações 17 e 36 também estão na região de *ZCAS* e ao nível do mar.

A *RH5* é formada por nove estações distribuídas no Sul e Sudeste do Brasil, entre as latitudes 30°S e 20°S. Essa região é influenciada pela *ZCAS*, pela linha de instabilidade pré-frontal (*LIP*) entre Rio Grande do Sul e Paraná e por regiões ciclogenéticas sobre o Atlântico entre 35°S e 28°S. As estações mais ao Sul recebem maior influência dos sistemas frontais ocasionados pelas massas de ar frio vindas do continente antártico, pelos jatos de baixos níveis formados a leste da Cordilheira dos Andes e pelo complexo convectivo de mesoescala no Norte da Argentina.

A *RH6* localiza-se entre o Norte do Rio Grande do Sul e Sul de Minas Gerais, aproximadamente entre 20°S e 30°S, sendo três delas na costa e quatro no interior do continente. Da mesma forma que a *RH5*, a *RH6* é influenciada pela *ZCAS*, *LIP*, e pelos sistemas frontais e regiões ciclogenéticas.

Figura 5.5 – Distribuição espacial das regiões homogêneas quanto ao regime de ventos máximos e mínimos a 10 metros e a altitude de cada estação em relação ao nível do mar.

Deve-se enfatizar que, conforme discutido no Capítulo 4, as *RHs* não são necessariamente regiões geográficas, ou seja, séries temporais de uma variável meteorológica como o vento podem apresentar características semelhantes em estações localizadas em posições geográficas distantes e até mesmo em contextos meteorológicos distintos, podendo essa semelhança ocorrer em consequência de condições locais. Dessa forma, a caracterização das *RHs* explica em parte as características regionais do vento em superfície

em relação aos principais sistemas meteorológicos atuantes. Porém, fatores locais como topografia, comprimento de rugosidade da superfície e efeitos de brisa também devem ser levados em conta.

Figura 5.6 – Representação dos principais sistemas atmosféricos atuantes na baixa troposfera na América do Sul. Em relação à baixa troposfera tem-se: ANE ventos alísios de nordeste, ASE ventos alísios de sudeste, ASAS anticiclone subtropical do Atlântico Sul, ASPS anticiclone subtropical do Pacífico Sul, B baixa pressão, BC baixa do Chaco – região de baixas térmicas, BNE região de baixas térmicas no noroeste argentino, CCM complexo convectivo de mesoescala, FF frente fria, FQ frente quente, JBN jato de baixos níveis a leste dos Andes, LI linha de instabilidade tropical, LIP linha de instabilidade pré-frontal, NV nuvem vírgula, RC regiões ciclogenéticas, ZCAS zona de convergência do Atlântico Sul e ZCIT zona de convergência intertropical.
Fonte: adaptado de Satyamurty et al. (1998) e Reboita et al. (2010).

Na Figura 5.7 estão representados os ciclos anuais da velocidade média mínima e máxima mensal do vento nas *RHs*. Pode-se observar que os mínimos apresentam menor variação ao longo do ciclo anual quando os comparamos aos máximos, com exceção da estação 29, pertencente a *RH3*, que indica maior magnitude de variação dos mínimos entre os meses 9 e 11. Esse resultado é esperado uma vez que o vento mínimo varia em um intervalo muito

pequeno de velocidade, entre zero e 4 $m \cdot s^{-1}$ associado ao fato de que a medida da velocidade mínima depende da sensibilidade do sensor.

De maneira geral a velocidade máxima tem variação mais acentuada ao longo do ano na *RH1*, *RH3* e *RH5*.

Figura 5.7 – Ciclo anual da velocidade média mínima e máxima do vento em cada *RH*.(Continua)

Figura 5.7 – Conclusão.

As velocidades máximas do vento *OBS10m*, registradas ao longo de toda a série, e os anos de ocorrência em todo o período são apresentadas na Tab. 5.4. A *RH5* e *RH6* apresentam o maior número de estações com os valores mais elevados de velocidade máxima do vento.

Tabela 5.4 – Máximos de velocidade do vento ocorridos nas *RHs* ao longo de todo o período das observações e os anos de ocorrência.

Estação	Indicador	*RH*	Ano	Direção (Graus)	$V_{max}(m \cdot s^{-1})$
SBBV	6	1	1963; 1966	90	18,01
SBCR	8	2	2011	310	25,72
SBCY	10	2	1984	30	18,52
SBLP	21	2	1998; 1999; 2000; 2001	60	18,52
SBMN	22	2	1992	90	13,38
SBOI	27	2	1972; 1986; 1987; 1994; 1996; 2003; 2004	320	10,29
SBPV	31	2	1977; 2000	30	15,43
SBTE	37	2	1998; 1999; 2000; 2001	60	18,52
SBTS	38	2	1980	180	12,86
SBAR	1	3	1988	190	12,86
SBFZ	12	3	1956	90	20,58
SBKG	18	3	1999; 2001	40	17,49
SBMQ	24	3	2013	100	27,27
SBMS	25	3	2000	60	18,01
SBNT	26	3	1960	160	18,01
SBPB	29	3	1999; 2000	40	18,52
SBRF	32	3	1965; 1997; 1999; 2006; 2007	190	12,86
SBSL	33	3	1973	160	15,43
SBSN	35	3	1998; 1999; 2000; 2001	80	18,52
SBBR	4	4	1971	330	15,43
SBGO	14	4	1990	90	20,58
SBIL	16	4	1998; 1999; 2000; 2001	40	18,52

(Continua)

Tabela 5.4 – Conclusão.

SBJR	17	4	1998; 1999; 2000; 2001	40	18,52
SBMO	23	4	1951	180	13,38
SBST	36	4	1987; 1991	230	25,72
SBUL	40	4	1960	40	20,58
SBBG	2	5	2012	310	28,81
SBBU	5	5	1976; 1992; 1996	180	25,72
SBCG	7	5	1988	210	29,84
SBKP	19	5	1958; 1987; 1991	240	25,72
SBPK	30	5	1989	60	22,12
SBUG	39	5	1958	150	27,78
SBVT	42	5	1956	30	25,72
SBBH	3	6	2001	120	28,81
SBCT	9	6	2006	250	20,06
SBFL	11	6	1953	180	20,58
SBGL	13	6	1951; 1989; 1990	240	20,58
SBGR	15	6	1968	230	22,64
SBLO	20	6	1992	210	20,58
SBPA	28	6	1963; 1967; 1968; 1983; 1995	270	25,72
SBSM	34	6	1956	70	25,72
SBUR	41	6	1998; 1999; 2000; 2001	60	18,52

5.3. Resultados do Teste de tendência de Mann-Kendall

Com o objetivo de identificar possíveis tendências climáticas nas séries temporais de velocidade do vento extremo mínimo e máximo, empregou-se o estudo de tendência climática de Mann-Kendall proposto por Sneyers (1975), descrito no Cap. 3 deste trabalho. Para esse estudo, foram geradas as médias mínimas e máximas anuais de cada série temporal de velocidade do vento a 10m.

A Tab. 5.5 apresenta os resultados do teste, onde a tendência “NEGATIVA” sugere que a hipótese H_0 não foi satisfeita, ou seja, há diminuição da velocidade do vento. A tendência “POSITIVA” sugere que a hipótese nula não foi satisfeita e a série apresenta tendência positiva, o que indica aumento na velocidade do vento. A tendência “NÃO SIGNIFICATIVA” sugere que a hipótese nula foi satisfeita e a série temporal não apresenta tendência significativa para o intervalo de confiança escolhido. O índice $u(t)$ é usado para verificar o intervalo de confiança desse teste bilateral. Neste caso, usou-se o nível significância de 95%, que de acordo com a tabela normal reduzida

equivale a -1,96 e 1,96. Portanto, toda série temporal que apresentar o valor de $u(t)$ dentro desse intervalo terá a hipótese nula H_0 satisfeita.

Tabela 5.5 – Resultados do teste de Mann-Kendall.

Estação	Indicador	Período	Vento mínimo		Vento máximo	
			u(t)	Tendência	*u(t)*	Tendência
			RH1			
SBBV	6	1961-2012	-4,61	NEGATIVA	-2,57	NEGATIVA
			RH2			
SBCR	8	1969-2014	1,58	NÃO SIGNIFICATIVA	8,54	POSITIVA
SBCY	10	1963-2013	-1,91	NÃO SIGNIFICATIVA	10,24	POSITIVA
SBLP	21	1961-2013	3,74	POSITIVA	0,82	NÃO SIGNIFICATIVA
SBMN	22	1958-2012	-2,58	NEGATIVA	2,52	POSITIVA
SBOI	27	1960-2012	-1,27	NÃO SIGNIFICATIVA	8,71	POSITIVA
SBPV	31	1969-2013	1,37	NÃO SIGNIFICATIVA	6,55	POSITIVA
SBTE	37	1955-2013	-6,22	NEGATIVA	6,31	POSITIVA
SBTS	38	1972-2012	-1,89	NÃO SIGNIFICATIVA	7,25	POSITIVA
			RH3			
SBAR	1	1964-2013	0,03	NÃO SIGNIFICATIVA	0,83	NÃO SIGNIFICATIVA
SBFZ	12	1951-2011	1,28	NÃO SIGNIFICATIVA	0,67	NÃO SIGNIFICATIVA
SBKG	18	1970-2013	3,05	POSITIVA	8,48	POSITIVA
SBMQ	24	1968-2014	-4,30	NEGATIVA	9,05	POSITIVA
SBNT	26	1951-2013	2,22	POSITIVA	4,28	POSITIVA
SBPB	29	1970-2011	7,19	POSITIVA	9,23	POSITIVA
SBRF	32	1951-2013	2,76	POSITIVA	1,04	NÃO SIGNIFICATIVA
SBSL	33	1951-2012	0,67	NÃO SIGNIFICATIVA	1,87	NÃO SIGNIFICATIVA
SBSN	35	1954-2012	-1,41	NÃO SIGNIFICATIVA	5, 96	POSITIVA
			RH4			
SBBR	4	1960-2013	-3,98	NEGATIVA	-1,37	NÃO SIGNIFICATIVA
SBGO	14	1952-2013	0,48	NÃO SIGNIFICATIVA	5,94	POSITIVA
SBIL	16	1961-2013	2,76	POSITIVA	4,98	POSITIVA
SBJR	17	1974-2013	0,44	NÃO SIGNIFICATIVA	9,69	POSITIVA
SBMO	23	1951-2013	-3,10	NEGATIVA	-2,51	NEGATIVA
SBST	36	1951-2014	2,49	POSITIVA	1,47	NÃO SIGNIFICATIVA
SBUL	40	1959-2013	-3,04	NEGATIVA	0,92	NÃO SIGNIFICATIVA
			RH5			
SBBG	2	1960-2014	-0,50	NÃO SIGNIFICATIVA	-1,25	NÃO SIGNIFICATIVA
SBBU	5	1959-2014	-1,81	NÃO SIGNIFICATIVA	1,81	NÃO SIGNIFICATIVA
SBCG	7	1951-2014	1,77	NÃO SIGNIFICATIVA	2,58	POSITIVA
SBKP	19	1951-2014	-0,37	NÃO SIGNIFICATIVA	1,13	NÃO SIGNIFICATIVA
SBPK	30	1970-2014	3,38	POSITIVA	5,07	POSITIVA
SBUG	39	1951-2014	-1,95	NÃO SIGNIFICATIVA	-3,57	NEGATIVA
SBVT	42	1951-2014	-0,73	NÃO SIGNIFICATIVA	-2,99	NEGATIVA
			RH6			
SBBH	3	1947-2014	-0,61	NÃO SIGNIFICATIVA	-5,31	NEGATIVA
SBCT	9	1951-2011	-0,50	NÃO SIGNIFICATIVA	1,21	NÃO SIGNIFICATIVA
SBFL	11	1951-2011	-4,24	NEGATIVA	-4,97	NEGATIVA
SBGL	13	1951-2013	0,37	NÃO SIGNIFICATIVA	-0,27	NÃO SIGNIFICATIVA
SBGR	15	1951-2013	-2,03	NEGATIVA	0,32	NÃO SIGNIFICATIVA

(Continua)

Tabela 5.4 – Conclusão.

SBLO	20	1962-2012	-3,86	NEGATIVA	0,08	NÃO SIGNIFICATIVA
SBPA	28	1951-2014	-2,04	NEGATIVA	-3,50	NEGATIVA
SBSM	34	1960-2014	-2,99	NEGATIVA	-2,90	NEGATIVA
SBUR	41	1964-2012	0,72	NÃO SIGNIFICATIVA	4,36	POSITIVA

Na Figura 5.8 e Figura 5.9, estão representadas as distribuições espaciais dos resultados da análise de tendência de Mann-Kendall da velocidade mínima e máxima do vento, respectivamente. Os quadrados vazados representam tendência não significativa, as setas azuis representam tendência negativa e as setas vermelhas representam tendência positiva.

A Figura 5.8 representa a análise de tendência das médias mínimas anuais da velocidade do vento *OBS10m*, onde 50% das estações indicam tendência não significativa, 28,5% indicam tendência negativa e 21,4% indicam tendência positiva. Pode-se verificar que das nove estações que apresentam tendência positiva, oito estão localizadas ao longo da costa brasileira. As estações que apresentam tendência negativa estão, na sua maioria, localizadas no interior do continente.

Figura 5.8 – Distribuição espacial do resultado da análise de tendência de Mann-Kendall para as médias mínimas na velocidade do vento entre 1947 e 2014.

A Figura 5.9 representa a análise de tendência das médias máximas anuais do vento *OBS10m*, onde 35,7% das estações indicam tendência não significativa, 19% indicam tendência negativa e 45,2% indicam tendência positiva. Pode-se observar que as estações nos locais como a costa sudeste, a costa nordeste e interior do norte do país são as que mais apresentaram tendências positivas.

Figura 5.9 – Distribuição espacial do resultado da análise de tendência de Mann-Kendall para as médias máximas na velocidade do vento entre 1947 e 2014.

Pode-se verificar que as estações 20, 23, 28, 35 e 37 sugerem tendência negativa da velocidade mínima e máxima do vento.

5.4. Distribuição de Frequência e Período de Retorno do Vento Observado

A análise de extremos foi desenvolvida a partir dos métodos de distribuição de Gumbel, GEV e Weibull, descritos no Cap. 3. Em todos os casos, os parâmetros das distribuições foram estimados com um intervalo de confiança de 95%. Nesta seção são apresentadas as distribuições de extremos por *RH*. Os histogramas das séries estão no APÊNDICE B.

5.4.1. Resultados da distribuição Gumbel

A Figura 5.10 representa a distribuição Gumbel das séries de velocidade média máxima mensal do vento a 10m. Nessas distribuições podemos identificar a discordância entre as séries de algumas curvas de distribuição de probabilidade (PDF), que apresentam diferentes formas, como por exemplo, na Figura 5.10.b em que as estações 4 e 23 têm PDF's diferentes das demais estações em termos de curtose.

Figura 5.10 – Distribuição de Gumbel ajustada para a velocidade máxima mensal do vento *OBS10m*. (Continua)

Figura 5.10 – Conclusão.

5.4.2. Resultados da Distribuição de Weibull

A Figura 5.11 representa o ajuste da distribuição de frequência de Weibull para a velocidade média máxima mensal do vento.

Figura 5.11 – Distribuição de Weibull ajustada para a velocidade máxima mensal do vento *OBS10m*. (Continua)

Figura 5.11 – Conclusão.

5.4.3. Resultados das distribuição GEV

Na Figura 5.12 são apresentadas as distribuições de frequência GEV da velocidade média máxima mensal do vento.

Figura 5.12 – Distribuição de GEV ajustada para a velocidade máxima mensal do vento *OBS10m*. (Continua).

Figura 5.12 – Continuação

Figura 5.12 – Conclusão.

Na Tab. 5.6 são apresentados os valores dos parâmetros de distribuição de frequência das séries temporais observadas de velocidade do vento a 10m obtidos a partir dos métodos de distribuição de Gumbel, Weibull e GEV.

Tabela 5.6 – Valores dos parâmetros de distribuição Gumbel, Weibull e GEV das séries temporais de velocidade mínima e máxima do vento *OBS10m*, onde k é o parâmetro de forma, β é o parâmetro de escala, α é o parâmetro de posição.

	Gumbel		Weibull		GEV		
Estação	Máxima		Máxima		Máxima		
	α	β	β	k	k	β	α
			RH1				
SBBV	14,98	1,71	14,88	8,8	3,76	0,03	0,52
			RH2				
SBCR	14,56	4,5	13,99	3,72	-1,36	0,77	0,98
SBCY	13,3	2,18	13,13	6,47	4,24	0,03	0,52
SBLP	11,69	3,84	11,11	3,37	-0,08	0,34	0,92
SBMN	10,97	1,4	10,88	7,78	5,10	0,04	0,52
SBOI	9,06	1,04	9,00	8,49	4,66	0,06	0,53
SBPV	11,71	1,92	11,56	6,38	3,50	0,00	0,52
SBTE	10,77	4,52	9,93	2,71	4,40	0,03	0,52
SBTS	9,59	1,57	9,46	6,30	0,12	0,32	0,76
			RH3				
SBAR	10,12	1,3	10,04	7,98	-0,10	0,33	0,76
SBFZ	13,12	2,7	12,90	5,62	4,01	0,01	0,52
SBKG	11,55	2,89	11,23	4,45	4,12	0,02	0,52
SBMQ	15,4	4,69	14,83	3,81	2,66	0,00	0,51
SBMS	13,07	2,77	12,77	4,82	1,69	0,00	0,51
SBNT	12,58	2,23	12,40	6,02	4,19	0,01	0,52
SBPB	13,89	2,61	13,65	5,49	0,13	0,37	0,78
SBRF	11,18	1,14	11,12	9,82	4,04	0,01	0,52
SBSL	12,21	1,56	12,11	7,90	4,57	0,03	0,52
SBSN	13,21	3,11	12,84	4,40	3,93	0,00	0,52
			RH4				
SBBR	11,75	1,69	11,59	6,71	3,7	0,00	0,51

(Continua)

Tabela 5.6 - Conclusão

SBGO	13,62	3,35	13,22	4,23	3,55	0,00	0,51
SBIL	13,52	3,02	13,19	4,74	3,49	0,00	0,52
SBJR	13,24	3,49	12,78	3,89	3,97	0,00	0,51
SBMO	10,68	1,41	10,58	7,70	-0,19	0,33	0,79
SBST	17,5	4,2	16,99	4,25	-0,2	0,31	0,79
SBUL	14,02	3,44	13,60	4,19	2,07	0,00	0,51
RH5							
SBBG	18,16	4,73	17,60	4,15	3,37	0,00	0,51
SBBU	18,5	4,55	17,85	3,84	5,43	0,10	0,53
SBCG	19,98	4,03	19,61	5,29	3,82	0,00	0,52
SBUG	19,91	3,2	19,65	6,32	4,28	0,05	0,53
SBPK	16,84	3,52	16,44	4,74	2,56	0,00	0,51
SBKP	21,12	3,93	20,73	5,25	2,39	0,00	0,51
SBVT	17,29	3,45	16,98	5,36	4,00	0,00	0,52
RH6							
SBBH	15	5,13	14,31	3,44	2,45	0,00	0,51
SBCT	14,57	2,55	14,36	6,05	4,34	0,01	0,52
SBFL	15,77	2,42	15,58	6,62	3,89	0,00	0,51
SBGL	14,77	2,85	14,51	5,65	3,73	0,00	0,51
SBGR	14,5	3,3	14,17	4,86	3,58	0,00	0,51
SBLO	13,96	3,07	13,64	4,88	2,55	0,00	0,51
SBPA	20	3,92	19,59	5,05	3,34	0,00	0,51
SBSM	18,25	3,67	17,88	5,15	3,43	0,00	0,51
SBUR	13,89	3,03	13,56	4,72	3,68	0,00	0,52

Os resultados do teste de aderência *KS* e do *SE* das distribuições da velocidade máxima mensal do vento *OBS10m* são apresentados na Tab. 5.7. Ambos os testes são usados para identificar as distribuições de frequência que melhor se ajustam às séries de dados. Utilizaram-se dois parâmetros para determinar o melhor ajuste: o valor crítico obtido através do teste *KS* ($\mathrm{D_{max}}$) e o *SE*. O cálculo do SE tornou-se necessário, uma vez que em alguns casos o valor de $\mathrm{D_{max}}$ é igual para diferentes distribuições de frequência da mesma série de dados observados. Dessa forma, avalia-se primeiramente o valor de $\mathrm{D_{max}}$ e caso haja o mesmo valor $\mathrm{D_{max}}$ para diferentes modelos de distribuição, considera-se o menor SE entre eles.

O modelo Gumbel é o que melhor se ajustou às séries temporais de 25 estações, enquanto que o modelo GEV se ajustou a 16 estações e o modelo Weibull a uma estação. Ao analisar os ajustes por *RH*, pode-se verificar que o modelo Gumbel ajusta-se a *RH2*, *RH4*, *RH5* e *RH6*. O modelo GEV ajusta-se a *RH1* e *RH3*, enquanto que o modelo Weibull não se ajusta a velocidade máxima mensal do vento *OBS10m* a nenhuma *RH*.

Tabela 5.7 – Valor crítico do teste KS e SE dos ajustes da distribuição da velocidade máxima mensal do vento para as distribuições de Gumbel (gbl), Weibull (wbl) e GEV (gev).

Estação	Indicador	D_{max} gbl_máx	D_{max} wbl_máx	D_{max} gev_máx
RH1				
SBBV	6	0,38	0,38	0,26
	SE	13,11	13,11	13,11
RH2				
SBCR	8	0,53	0,54	0,61
	SE	15,77	15,78	15,78
SBCY	10	0,50	0,52	0,52
	SE	13,65	13,65	13,65
SBLP	21	0,50	0,58	0,66
	SE	14,67	14,68	14,68
SBMN	22	0,57	0,58	0,62
	SE	8,63	8,39	8,63
SBOI	27	0,62	0,62	0,62
	SE	9,99	9,46	9,99
SBPV	31	0,59	0,60	0,65
	SE	10,33	9,47	10,33
SBTE	37	0,52	0,57	0,66
	SE	10,44	9,48	10,45
SBTS	38	0,61	0,61	0,61
	SE	10,85	9,50	10,85
RH3				
SBAR	1	0,57	0,57	0,52
	SE	9,46	9,46	9,46
SBFZ	12	0,45	0,45	0,35
	SE	13,59	13,60	13,60
SBKG	18	0,51	0,52	0,47
	SE	12,97	9,48	12,97
SBMQ	24	0,40	0,41	0,54
	SE	13,09	10,52	13,10
SBMS	25	0,46	0,46	0,45
	SE	12,53	11,53	12,53
SBNT	26	0,46	0,46	0,39
	SE	10,46	10,46	10,46
SBPB	29	0,40	0,41	0,35
	SE	17,45	15,82	17,45
SBRF	32	0,52	0,52	0,46
	SE	10,46	10,46	10,46
SBSL	33	0,47	0,46	0,35
	SE	11,50	11,50	11,50
SBSN	35	0,44	0,49	0,56
	SE	9,65	9,42	9,65
RH4				
SBBR	4	0,53	0,55	0,50
	SE	10,49	10,49	10,49
SBGO	14	0,43	0,48	0,60
	SE	8,36	8,36	8,36

Estação	Indicador	D_{max} gbl_máx	D_{max} wbl_máx	D_{max} gev_máx
RH4				
SBIL	16	0,40	0,45	0,54
	SE	13,04	12,59	13,05
SBJR	17	0,44	0,49	0,58
	SE	18,79	16,90	18,80
SBMO	23	0,53	0,53	0,46
	SE	13,68	13,60	13,68
SBST	36	0,44	0,49	0,52
	SE	15,67	15,68	15,68
SBUL	40	0,40	0,45	0,58
	SE	14,69	10,53	14,69
RH5				
SBBG	2	0,37	0,42	0,51
	SE	16,76	16,77	16,77
SBBU	5	0,33	0,38	0,43
	SE	15,71	15,72	15,72
SBCG	7	0,33	0,37	0,37
	SE	18,81	18,82	18,82
SBKP	19	0,28	0,32	0,37
	SE	16,72	16,72	16,72
SBPK	30	0,35	0,40	0,49
	SE	18,35	14,73	18,35
SBUG	39	0,35	0,39	0,39
	SE	16,12	15,69	16,12
SBVT	42	0,28	0,32	0,37
	SE	17,24	17,24	17,24
RH6				
SBBH	3	0,49	0,55	0,66
	SE	16,71	16,72	16,72
SBCT	9	0,47	0,49	0,46
	SE	18,93	18,31	18,94
SBFL	11	0,42	0,43	0,42
	SE	20,33	19,88	20,33
SBGL	13	0,47	0,49	0,46
	SE	21,12	20,91	21,12
SBGR	15	0,48	0,49	0,48
	SE	14,50	13,08	14,50
SBLO	20	0,45	0,50	0,60
	SE	13,51	10,50	13,52
SBPA	28	0,37	0,42	0,40
	SE	21,01	20,90	21,01
SBSM	34	0,39	0,44	0,44
	SE	12,28	11,50	12,28
SBUR	41	0,43	0,48	0,59
	SE	14,34	11,57	14,34

Em relação à velocidade máxima anual do vento, a distribuição de Gumbel foi a que melhor se ajustou (Figura 5.13). Na Tabela 5.8, são apresentados o valor crítico do teste *KS* e o valor de SE.

Figura 5.13 – Distribuição de Gumbel ajustada para as séries de velocidade máxima anual do vento *OBS10m*. (Continua).

RH5

Figura 5.13 – Conclusão.

Na Tabela 5.8 são apresentados os resultados de ajuste das distribuições de frequência da velocidade máxima do vento em cada ano. Apenas a estação 9 (SBTS) apresentou melhor ajuste pela distribuição GEV e na estação 1 (SBAR) não foi possível determinar o melhor ajuste pois os valores de D_{max} e SE são iguais para todos os modelos de distribuição. As séries de vento das demais estações possuem melhor ajuste pela distribuição de Gumbel. Além disso, em alguns casos, como por exemplo, nas estações 22, 27, 31 e 37 os valores de D_{max} são iguais, e portanto, usamos o valor de *SE* como critério para definir o melhor ajuste.

Tabela 5.8 – Valor crítico do teste KS e SE dos ajustes da distribuição da velocidade máxima anual do vento.

Estação	Indicador	D_{max} gbl_máx	D_{max} wbl_máx	D_{max} gev_máx
		RH1		
SBBV	6	0,485	0,533	0,552
	SE	13,116	13,116	13,116
		RH2		
SBCR	8	0,340	0,406	0,476
	SE	15,779	15,788	15,788
SBCY	10	0,395	0,429	0,476
	SE	13,656	13,657	13,657
SBLP	21	0,344	0,344	0,392
	SE	14,671	14,684	14,684
SBMN	22	0,381	0,381	0,429
	SE	8,637	8,638	8,395
SBOI	27	0,476	0,476	0,476
	SE	9,993	9,994	9,461
SBPV	31	0,384	0,384	0,432
	SE	10,335	10,337	9,478
SBTE	37	0,433	0,433	0,481
	SE	10,441	10,459	9,484
SBTS	38	0,404	0,404	0,403
	SE	10,851	10,854	9,505
		RH3		
SBAR	1	0,412	0,412	0,412
	SE	9,463	9,463	9,463
SBFZ	12	0,363	0,411	0,476
	SE	13,597	13,600	13,600
SBKG	18	0,333	0,381	0,429
	SE	12,973	12,979	9,487
SBMQ	24	0,337	0,433	0,502
	SE	13,094	13,102	10,523
SBMS	25	0,373	0,394	0,476
	SE	12,531	12,534	11,535
SBNT	26	0,378	0,381	0,460
	SE	10,460	10,462	10,462
SBPB	29	0,427	0,429	0,476
	SE	17,453	17,455	15,826
SBRF	32	0,381	0,412	0,429
	SE	10,462	10,462	10,462
SBSL	33	0,393	0,393	0,412
	SE	11,508	11,508	11,508
SBSN	35	0,344	0,361	0,429
	SE	9,652	9,657	9,421
		RH4		
SBBR	4	0,457	0,457	0,457
	SE	10,492	10,493	10,493
SBGO	14	0,300	0,381	0,429
	SE	8,362	8,367	8,367

Estação	Indicador	D_{max} gbl_máx	D_{max} wbl_máx	D_{max} gev_máx
		RH4		
SBIL	16	0,410	0,457	0,524
	SE	13,049	13,053	12,592
SBJR	17	0,286	0,381	0,429
	SE	18,793	18,801	16,903
SBMO	23	0,364	0,381	0,429
	SE	13,689	13,689	13,605
SBST	36	0,432	0,461	0,508
	SE	15,676	15,680	15,680
SBUL	40	0,359	0,406	0,476
	SE	14,693	14,698	10,531
		RH5		
SBBG	2	0,444	0,492	0,571
	SE	16,765	16,770	16,770
SBBU	5	0,433	0,481	0,506
	SE	15,718	15,721	15,721
SBCG	7	0,524	0,571	0,651
	SE	18,819	18,821	18,821
SBKP	19	0,589	0,637	0,683
	SE	16,725	16,725	16,725
SBPK	30	0,508	0,508	0,549
	SE	18,352	18,354	14,738
SBUG	39	0,583	0,631	0,667
	SE	16,124	16,125	15,693
SBVT	42	0,493	0,541	0,619
	SE	17,247	17,249	17,249
		RH6		
SBBH	3	0,336	0,429	0,524
	SE	16,711	16,721	16,721
SBCT	9	0,440	0,476	0,524
	SE	18,938	18,940	18,317
SBFL	11	0,488	0,504	0,555
	SE	20,333	20,334	19,881
SBGL	13	0,429	0,476	0,571
	SE	21,122	21,124	20,914
SBGR	15	0,381	0,476	0,524
	SE	14,502	14,506	13,088
SBLO	20	0,429	0,476	0,524
	SE	13,517	13,521	10,503
SBPA	28	0,559	0,589	0,635
	SE	21,010	21,012	20,908
SBSM	34	0,504	0,555	0,651
	SE	12,286	12,288	11,507
SBUR	41	0,411	0,411	0,476
	SE	14,346	14,349	11,578

5.5. Resultados do período de retorno – *T*

A Tab. 5.9 indica a velocidade máxima anual do vento observado a 10m para o período de retorno 2, 5, 10, 20, 25, 50 e 100 anos. Para estas estimativas foi utilizado o modelo de distribuição que melhor se ajustou as velocidade do vento *OBS10m*, neste caso, Gumbel e GEV.

Tabela 5.9 – Período de retorno da velocidade máxima anual do vento.

Estação	Indicador	*RH*	Período de Retorno *T* (anos)						
			2	5	10	20	25	50	100
SBBV	6	1	7,46	9,02	9,69	10,18	10,31	10,67	**10,97**
SBCR	8	2	12,91	16,70	18,31	19,49	19,81	20,69	**21,42**
SBCY	10	2	12,50	14,34	15,12	15,69	15,85	16,28	16,63
SBLP	21	2	10,28	13,52	14,89	15,90	16,18	16,93	17,55
SBMN	22	2	10,46	11,63	12,13	12,50	12,60	12,87	13,10
SBOI	27	2	8,68	9,56	9,93	10,20	10,27	10,47	10,64
SBPV	31	2	11,01	12,63	13,31	13,82	13,96	14,33	14,64
SBTE	37	2	9,11	12,92	14,54	15,72	16,05	16,93	17,67
SBTS	38	2	9,01	10,34	10,90	11,31	11,42	11,73	11,98
SBAR	1	3	4,90	5,42	5,65	5,81	5,85	5,97	6,07
SBFZ	12	3	7,49	8,63	9,11	9,47	9,57	9,83	**10,05**
SBKG	18	3	5,84	6,59	6,90	7,14	7,20	7,38	7,52
SBMQ	24	3	6,09	6,84	7,17	7,41	7,47	7,65	7,80
SBMS	25	3	5,58	6,51	6,91	7,20	7,28	7,49	7,68
SBNT	26	3	6,47	7,74	8,28	8,68	8,79	9,09	9,33
SBPB	29	3	7,09	8,35	8,89	9,28	9,39	9,68	9,92
SBRF	32	3	5,70	6,35	6,62	6,82	6,88	7,03	7,15
SBSL	33	3	6,75	7,99	8,52	8,90	9,01	9,30	9,54
SBSN	35	3	5,52	6,18	6,47	6,67	6,73	6,88	7,01
SBBR	4	4	11,13	12,56	13,16	13,61	13,73	14,06	14,34
SBGO	14	4	12,39	15,22	16,42	17,30	17,54	18,20	18,74
SBIL	16	4	12,42	14,96	16,04	16,83	17,05	17,64	18,13
SBJR	17	4	11,96	14,90	16,15	17,07	17,32	18,00	18,57
SBMO	23	4	10,16	11,35	11,86	12,23	12,33	12,61	12,84
SBST	36	4	15,95	19,50	21,00	22,11	22,41	23,23	**23,92**
SBUL	40	4	12,76	15,66	16,89	17,79	18,04	18,71	19,27
SBBG	2	5	16,43	20,41	22,11	23,35	23,69	24,61	25,39
SBBU	5	5	16,83	20,66	22,30	23,49	23,82	24,71	25,45
SBCG	7	5	18,50	21,89	23,33	24,39	24,68	25,47	26,12
SBKP	19	5	18,74	21,43	22,58	23,42	23,65	24,28	24,80
SBPK	30	5	15,55	18,51	19,77	20,70	20,95	21,64	22,21
SBUG	39	5	19,68	22,99	24,40	**25,43**	25,71	26,48	**27,12**
SBVT	42	5	16,03	18,94	20,17	21,08	21,33	22,00	22,57
SBBH	3	6	13,12	17,44	19,27	20,62	20,99	21,99	22,83

(Continua)

Tabela 5.9 – (Conclusão)

SBCT	9	6	13,64	15,79	16,70	17,37	17,55	18,05	18,46
SBFL	11	6	14,88	16,92	17,78	18,42	18,59	19,06	19,46
SBGL	13	6	13,72	16,12	17,14	17,89	18,10	18,65	19,12
SBGR	15	6	13,29	16,07	17,25	18,12	18,35	19,00	19,54
SBLO	20	6	12,83	15,42	16,52	17,32	17,55	18,14	18,65
SBPA	28	6	18,56	21,86	23,27	24,30	24,58	**25,34**	**25,98**
SBSM	34	6	16,90	19,99	21,30	22,27	22,53	23,25	23,85
SBUR	41	6	12,79	15,33	16,42	17,21	17,43	18,02	18,51

Ao avaliarmos a velocidade do vento e o período de retorno descrito acima, levando-se em consideração a curva de relação entre a potência e velocidade do vento descrita na Figura 2.4, procuramos pelas maiores velocidades ocorridas nas *RHs* ou velocidades de vento iguais ou maiores que 25 $m \cdot s^{-1}$. Verifica-se que na *RH1*, *RH2* e *RH3* e *RH4* há probabilidade da velocidade máxima do vento atingir valores acima de 10,97 $m \cdot s^{-1}$, de 21,42 $m \cdot s^{-1}$, 10,05 $m \cdot s^{-1}$ e 23,92 $m \cdot s^{-1}$ a cada 100 anos.

Na *RH5* a velocidade máxima do vento pode exceder o valor de 24,4 $m \cdot s^{-1}$, 25,43 $m \cdot s^{-1}$ e 27,12 $m \cdot s^{-1}$ uma vez em 10, 20 e 100 anos respectivamente. Já na *RH6*, a velocidade máxima pode atingir valores de 24,58 $m \cdot s^{-1}$, 25,34 $m \cdot s^{-1}$ e 25,98 $m \cdot s^{-1}$ uma vez a cada 25, 50 e 100 anos, respectivamente.

5.6. Resultados do treinamento das RNAs: Observações *vs Eta-HadCM3*

Neste tópico são apresentados os resultados do refinamento estatístico da saída de vento a 10m do modelo *Eta-HadCM3* (vento *Eta10m*) (CHOU et. al, 2011) em relação as séries temporais de velocidade do vento observado a 10m (vento *OBS10m*).

5.6.1. Resultados das *RNAs* para séries de vento horárias – 1960 a 1990

A topologia de *RNA* adotada, apesar de todos os testes realizados, apresentou baixo desempenho em modelar a velocidade do vento *OBS10m* a partir das saídas do modelo climático. Dentre as 42 *RNAs* treinadas, as que apresentaram o melhor desempenho foram a estação SBAR (1) e a estação SBBV (6). A avaliação do desempenho foi feita com base na correlação de Pearson entre o vento *Eta10m* e o vento *OBS10m*, de 0,18 e 0,37, e entre o vento *RNA10m* e o vento *OBS10m*, de 0,33 e 0,59 respectivamente. Dessa forma, o ganho que se obteve em relação à correção do vento a 10m pela *RNA* foi pouco significativo.

Nas Figuras 5.14 e 5.15 são apresentados os desempenhos das *RNAs* usadas para modelar o vento horário a 10m. Os gráficos mostram o desempenho do treinamento assim como as amostras dos dados observados utilizados no treinamento, na validação e no teste da rede, além de um gráfico de dispersão entre a série observada e a série modelada pela *RNA*.

Figura 5.14. Desempenho da RNA para a estação SBAR – 1.

Figura 5.15. Desempenho da RNA para a estação SBBV – 6.

Os resultados reforçam que o modelo climático apesar de ser capaz de representar períodos climatológicos longos, é pouco hábil em representar fenômenos de curto prazo, de escala local e eventos extremos. A *RNA* assimila essa limitação através das variáveis de saída do modelo climático que são usadas como preditores da *RNA*. No entanto, uma *RNA* nada mais é que um modelo de refinamento estatístico e não possui nenhuma equação física representativa dos fenômenos atmosféricos. Dessa forma, a *RNA* não é capaz de ajustar as variáveis do modelo climático às variáveis de maior frequência e variabilidade diária como o vento. Assim, o modelo climático não representa de forma satisfatória os extremos horários e diários da velocidade do vento a 10m.

Assim, com base nos resultados obtidos, as *RNAs* empregadas às séries temporais das 42 estações não foram capazes de modelar satisfatoriamente o vento horário. Além disso, o fator mais importante a ser considerado ao fazermos a comparação do clima presente entre o modelo climático e os dados observados é de que o modelo climático usa dados coletados desde o final do século XIX para modelar o clima entre 1960 e 1990, além de usar calendário de 360 dias. Com isso, a partir do segundo ano de rodada do modelo o seu calendário já está defasado em relação ao calendário real e essa defasagem

aumenta em cinco dias a cada ano. Ainda, deve-se levar em conta que o modelo climático gera simulações para uma área, ou ponto de grade, gerando uma média para uma área de 20x20km, enquanto que o dado observado é pontual. Dessa forma, concluiu-se que o uso de séries temporais com resolução horária não atende o objetivo desse trabalho.

5.6.2. Resultados das RNAs para séries da velocidade mensal do vento – 1960 a 1990

Diante do baixo desempenho das RNAs em modelar as séries temporais com resolução horária, optou-se usar a RNA para modelar as séries temporais de médias mensais dos mínimos e máximos diários do vento a 10m, mantendo-se como preditores as mesmas variáveis meteorológicas escolhidas no teste de sensibilidade.

Na Figura 5.16 estão representadas, por *RH*, as correlações e a raiz do erro quadrático médio entre as séries mínimas e máximas do vento *OBS10m* versus vento *Eta10m* e o vento *OBS10m* versus vento *RNA10m*. As barras azuis representam a correlação *OBS10m versus Eta10m* em cada estação.

Os índices de correlação das séries de máximos indicam que as correlações entre as observações e o modelo variam entre -0,30 e 0,69 sendo que aproximadamente 87% apresentam correlação abaixo de 0,50.

Os índices de correlação entre as séries de mínimos variam entre -0,80 e 0,60 sendo que 97% das estações apresentam valores de *R* abaixo de 0,50. As barras vermelhas representam os índices de correlação *OBS10m versus RNA10m*.

Após o refinamento estatístico das saídas do modelo climático, a correlação entre o vento observado e o modelado para valores entre 0,6 e 0,91, uma melhora de 48% em relação às correlações *OBS10m versus Eta10m*. O desempenho da *RNA* em cada etapa do treinamento pode ser verificado nos

gráficos de regressões e correlação de Pearson apresentados no APÊNDICE C.

Figura 5.16. R e *RMSE* das séries da velocidade média mensal do vento *OBS10m* versus Eta10m climático e vento *OBS10m* versus *RNA10m*. (Continua)

Figura 5.16. Continuação. (Continua)

Figura 5.16. Conclusão.

O uso do coeficiente de correlação *R* é importante, pois o *Viés* influencia as medidas de erro aleatório RMSE. Quando o *Viés* for elevado, positivo ou negativo, as predições encontram-se sistematicamente afastadas das observações, contribuindo para um maior valor nos módulos dos desvios e conduzindo a maiores erros de RMSE. Portanto, usou-se o *R* para medir o espalhamento dos pontos, medindo o grau de linearidade observado entre predições do modelo climático, observações e RNAs.

Ainda, o *Viés* apresentado nesse trabalho refere-se à velocidade de vento em metros por segundo ($m \cdot s^{-1}$) e em alguns casos seu valor é negativo. Deve-se considerar que o valor negativo refere-se à variação do *Viés* em torno das observações e indica a subestimativa do modelo.

A Figura 5.17 representa os valores do *Viés* das séries de extremos mínimos e máximos de *OBSvsEta* (barras azuis) e o *Viés* de OBSvs*RNA* (barras vermelhas).

Com o emprego de *RNAs*, o *Viés* entre o vento observado e o modelado diminue para valores em torno de zero, indicando que a RNA consegue representar bem o vento a 10m em termos de magnitude média, indicando que a *RNA* é eficaz na remoção de erros sistemáticos. Além disso, pode-se observar que o *Viés* entre vento *Eta10m* e vento *OBS10m* é maior para a RH3, RH5 e *RH6*.

Figura 5.17. Viés entre as séries médias mensais mínimas e máximas observadas, e as séries do modelo (azul) e das RNAs (vermelho). (Continua)

Figura 5.17 – Conclusão.

Nos resultados seguintes, são apresentados os gráficos das séries temporais mínimas e máximas mensais do vento *OBS10m*, *Eta10m* e *RNA10m* para o período de 1960 a 1990 de seis estações, uma para cada *RH*, escolhidas utilizando como critério o melhor desempenho na qualificação, ou seja, as que apresentaram menor número de dados suspeitos. As séries da *RNA10m* das demais estações podem ser conferidos no APÊNDICE D.

A Figura 5.18.a representa as séries mensais mínimas, e indica que o modelo Eta superestima o vento a 10m com *Viés* de 0,79 $m \cdot s^{-1}$. Com a *RNA* o *Viés* diminuiu para 0,02 $m \cdot s^{-1}$e houve um aumento significativo na correlação entre as séries observadas e modeladas.

A Figura 5.18.b representa as séries mensais máximas e indica que o modelo Eta subestima o vento a 10m e apresenta *Viés* de -2,75 $m \cdot s^{-1}$, no entanto o *R* de 0,69 indica que neste caso o modelo Eta consegue representar relativamente bem a variabilidade anual. Com a RNA o *Viés* diminuiu para 0,04 $m \cdot s^{-1}$ e a correlação aumentou para 0,76.

Figura 5.18 – Séries das médias mensais da velocidade do vento *OBS10m*, *Eta10m* e *RNA10m* da estação SBBV – 6 para o período de 1960 a 1990; (a) velocidades mínimas; (b) velocidades máximas.

A Figura 5.19 representa as séries temporais mensais *OBS10m*, *Eta10m* e *RNA10m* da estação SBCR (8). O vento mínimo do modelo Eta é superestimado, com *Viés* de 1,42 $m \cdot s^{-1}$ e com o uso as *RNA* esse valor

diminui para 0,02 $m \cdot s^{-1}$. No caso do vento máximo, o modelo Eta representa bem em termos de magnitude, com *Viés* aproximadamente zero, no entanto a correlação é baixa, em torno de 0,11.

Figura 5.19 – Séries das médias mensais da velocidade do vento *OBS10m*, *Eta10m* e *RNA10m* da estação SBCR – 8 para o período de 1960 a 1990; (a) velocidades mínimas; (b) velocidades máximas.

A Figura 5.20 representa as séries mensais da estação SBKG (18) da *RH3*. Pode-se observar na Figura 5.19.a que o modelo Eta superestima as séries mínimas, apresentando um *Viés* de 2,66 $m \cdot s^{-1}$ e baixa correlação de 0,17. Já para a série de máximos, o modelo Eta apresenta *Viés* em torno de zero e correlação de 0,19.

Com o emprego da *RNA* a comparação entre as séries mínimas e máximas do vento modelado e observado apresenta diminuição nos valores de *Viés*, principalmente para os mínimos, e significativo aumento no valor de R.

Figura 5.20 – Séries das médias mensais da velocidade do vento *OBS10m*, *Eta10m* e *RNA10m* da estação SBKG – 18 para o período de 1960 a 1990; (a) velocidades mínimas; (b) velocidades máximas.

A Figura 5.21 representa as séries mensais da estação SBUL (40) da *RH4*. Pode-se observar na Figura 5.21.a que o modelo Eta superestima os mínimos apresentando um *Viés* de 1,2 $m \cdot s^{-1}$ e *R* de 0,16.

A Figura 5.21.b indica subestimação do modelo Eta com *Viés* de -1,47 $m \cdot s^{-1}$ e *R* de 0,34. As séries modeladas ajustadas pela RNA diminuem o *Viés* e aumentam significativamente o *R* para mínimos e máximos de vento.

Figura 5.21 – Séries das médias mensais da velocidade do vento *OBS10m*, *Eta10m* e *RNA10m* da estação SBUL – 40 para o período de 1960 a 1990; (a) velocidades mínimas; (b) velocidades máximas.

A Figura 5.22 representa as séries mensais da estação SBUG (39) da *RH5*. Pode-se observar na Figura 5.22.a que a série de vento *Eta10m* superestima o vento mínimo *OBS10m* em 2,19 $m \cdot s^{-1}$ e apresenta *R* de 0,31. A Fig 5.22.b indica que o *Eta10m* subestima o vento máximo *OBS10m* em 2 $m \cdot s^{-1}$e apresenta *R* de 0,31. Com o ajuste da *RNA*, o *Viés* dos mínimos diminui para -0,02$m \cdot s^{-1}$ e o valor de *R* aumenta para 0,67$m \cdot s^{-1}$, enquanto que o *Viés* dos máximos é zero e o *R* é de 0,76.

Figura 5.22 – Séries das médias mensais da velocidade do vento *OBS10m*, *Eta10m* e *RNA10m* da estação SBUG – 39 para o período de 1960 a 1990; (a) velocidades mínimas; (b) velocidades máximas.

A Figura 4.23 representa as séries de extremos mensais da estação SBLO (20) da *RH6*. A Figura 4.23.a indica que o vento *Eta10m* superestima o vento mínimo *OBS10m* apresentando um *Viés* de 1,46 $m \cdot s^{-1}$ e *R* de 0,02. A Figura 4.23.b indica que o *Eta10m* subestima o vento máximo *OBS10m* em 1,87 $m \cdot s^{-1}$ e apresenta *R* igual a 0,28. Os resultados de ajuste da RNA diminuem os valores de *Viés* em torno de zero e aumentam o valor de *R* para 0,82 no caso dos mínimos e 0,78 no caso dos máximos. Ainda, no caso dos mínimos pode-se observar que o vento *Eta10m* apresenta maior variabilidade anual que o vento *OBS10m*.

Figura 5.23 – Séries das médias mensais da velocidade do vento *OBS10m*, *Eta10m* e *RNA10m* da estação SBLO – 20 para o período de 1960 a 1990; (a) velocidades mínimas; (b) velocidades máximas.

De modo geral, as análises do vento *Eta10m* indicam que o modelo tipicamente superestima a magnitude da velocidade do vento mínimo em 91,5% dos casos e subestima a magnitude da velocidade do vento máximo em 100% dos casos, sendo que as *RH3*, *RH5* e *RH6* são as que apresentam em média os maiores de valores de *Viés* (Tab.4.10).

Tabela 5.10 – Valores do erro sistemático das séries máximas e mínimas mensais de velocidade do vento OBS10m, Eta10m e RNA10m.

	***OBS10mvs*ETA10m Mínimos**	***OBS10mvs*ETA10m Máximos**	***OBS10mvsRNA10m* Mínimos**	***OBS10mvsRNA10m* Máximos**
***Viés* médio**	1,78	-1,27	-0,01	-0,01
***Viés* máximo**	5,86	1,90	0,02	0,11
***Viés* mínimo**	0,36	-3,98	-0,05	-0,17

Apesar da RNA apresentar uma melhora significativa nas séries temporais do dado modelado de vento a 10m, o seu desempenho ainda é sensível à

capacidade de representação dos seus preditores, ou neste caso, as séries de saída do modelo climático, em relação à variável alvo.

5.7. Resultados do Teste de Tendência de Mann-Kendall para o Período de 2010 a 2099

Após realizar o refinamento estatístico da saída de vento *Eta10m* do modelo *Eta-HadCM3* com o uso de RNA, obteve-se séries melhoradas em relação ao vento *OBS10m* em termos de R, *Viés* e RMSE, conforme discutido no tópico 5.5.2 desse estudo. O modelo de RNA treinado para o período *baseline* do modelo climático foi utilizado para fazer o *downscaling* das séries de velocidade do vento a 10m, ou seja, novas séries foram obtidas a partir das projeções futuras do modelo Eta.

De posse das novas séries modeladas pela RNA, realizou-se o teste de tendência climática de Mann-Kendall empregado também nas séries temporais observadas de vento *OBS10m* no tópico 5.3 deste trabalho.

O intuito dessa abordagem é compreender se ocorrerá aumento ou diminuição dos mínimos e máximos de vento do período de 2010 a 2100, o qual será analisado em intervalos de 30 anos.

A Figura 5.24 representa os resultados do teste de Mann-Kendall para as séries de mínimos e máximos do vento *RNA10m* entre os anos de 2010-2040, 2040-2070 e 2070-2100.

Para a velocidade mínima do vento, oito (19,0%) estações apresentam tendências negativas na Figura 5.24.a, seis (14,2%) na Figura 5.24.b enquanto que sete estações (16,6%) indicam tendências negativas na Figura 5.24.c.

A Figura 5.24.*a*, *b* e *c* totaliza um número de 11 (26,1%), 12 (28,5%) e 12 (28,5%) das estações com tendência não significativa. As tendências significativas ocorrem em 23 (54,7%), 24 (57,1%) e 23 (54,7%) das séries de velocidade mínima do vento *RNA10m*.

No que se refere à tendência na velocidade máxima do vento *RNA10m*, pode-se observar que as tendências negativas ocorrem em 10 estações (23,8%) no período entre 2010 e 2040, em oito estações (19,0%) entre 2040 e 2070 e em nove (21,4%) estações entre 2070 e 2100.

Ainda na Figura 5.24, ao analisarmos a distribuição espacial das estações, as setas em vermelho indicam que no caso da velocidade mínima do vento, a maior concentração localiza-se ao longo da costa, no entanto o mesmo não se observa em relação à velocidade máxima.

Na velocidade máxima, os resultados indicam tendências negativas e não significativas ao longo da costa do Nordeste brasileiro, enquanto que as tendências positivas ocorrem no interior do continente, principalmente nas regiões Norte, Sudeste e Sul.

Figura 5.24 – Análise de tendência climática nas séries de velocidade mínima e máxima do vento *RNA10m* para o período de (a) 2010-2040; (b) 2040-2070 e (c) 2070-2100. (Continua)

Figura 5.24 – Conclusão.

Com o propósito de investigar a existência de relações entre as tendências e a latitude da estação, foi plotada a dispersão do parâmetro *u(t)* do teste de Mann-Kendal pela latitude das estações conforme apresentado na Figura 5.25, Figura 5.26 e Figura 27. Uma reta de regressão linear simples também é apresentada bem como sua equação e o valor de R^2.

Os resultados de *u(t)* foram separados entre as séries mínimas e máximas do vento e em seguida entre os valores negativos e positivos de *u(t)*. As séries que são estatisticamente significantes estão plotadas fora da área localizada entre as linhas pontilhada (-1,96 e 1,96). A reta em vermelho representa a tendência linear entre as variáveis.

A Figura 5.25 representa o valor de *u(t)* do teste de Mann-Kendall aplicado às séries futuras de velocidade mínima e máxima do vento *RNA10m versus* a latitude. O que os resultados indicam parece ser a diminuição do módulo de *u(t)* juntamente com a diminuição da latitude visto nas séries observadas, os resultados sugerem haver uma relação entre o valor estatístico *u(t)*, que no caso dos mínimos tende a diminuir juntamente com a latitude. O mesmo verifica-se em relação aos máximos de vento. Em outras palavras, a hipótese é de que em maiores latitudes é que a ocorrência de médias anuais vem aumentando ao longo das séries.

Figura 5.25 – Relação entre *u(t)* e a variação da latitude. Os valores negativos e positivos de *u(t)* são representados pelas figuras da esquerda e da direita respectivamente. (Continua)

Figura 5.25 – Conclusão.

Os resultados das tendências da velocidade do vento *OBS10m* sugerem que para as séries de velocidade mínima do vento, o módulo de *u(t)* aumenta à medida que a latitude diminui. O mesmo se aplica aos máximos.

Figura 5.26 – Relação entre *u(t)* e a variação da latitude das séries temporais de vento *OBS10m* mínimo. Os valores negativos e positivos de *u(t)* são representados pelas figuras da esquerda e da direita respectivamente.

Para as séries de velocidade máxima do vento *OBS10m*, a dispersão da Figura 5.27 sugerem que o módulo de *u(t)* negativo diminui juntamente com a latitude, enquanto que o módulo de *u(t)* positivo aumenta à medida que a latitude diminui.

Figura 5.27 – Relação entre *u(t)* e a variação da latitude das séries temporais de vento *OBS10m* máximo. Os valores negativos e positivos de *u(t)* são representados pelas figuras da esquerda e da direita respectivamente.

Deve-se ressaltar que os resultados de *u(t) versus* latitude não são conclusivos, pelo simples fato do número de amostragem ser relativamente pequena e de sua distribuição espacial não cobrir todo o território brasileiro. Além disso, os valores do coeficiente de determinação (R^2) são relativamente pequenos e a densidade de estações varia na direção Norte-Sul. No entanto, é interessante usar outras bases de dados para investigar se essa relação é consistente ou é apenas um resultado aleatório.

Na Figura 5.28 são apresentadas os locais em que as séries de velocidade do vento *RNA10m* apresentam o mesmo tipo de tendência em relação ao período das observações.

Observa-se que para as tendências da velocidade mínima do vento, a ocorrência de tendências negativas se dá predominantemente no interior do continente nas regiões Norte, Centro-Oeste, Nordeste e Sul. Já as tendências positivas ocorrem predominantemente mais próximas da costa do Nordeste, Sul e Sudeste. As tendências não significativas ocorrem em todos os casos nos locais das estações 8, 33 e 41.

As tendências da velocidade máxima do vento *RNA10m* indicam tendências negativas somente ao longo da costa nas regiões Nordeste, Sudeste e Sul nos locais das estações 23, 28 e 42. Já as tendências positivas ocorrem predominantemente no interior do continente nas regiões Norte, Centro-Oeste e Sudeste. O maior número de tendências não significativas ocorre predominantemente nas regiões Nordeste e Sul.

Figura 5.28 – Locais com tendências iguais entre as observações e as séries obtidas pelas RNAs. (Continua)

Figura 5.28 – Conclusão.

Na Figura 5.29 são apresentadas as tendências correspondentes entre os períodos de 2010-2040, 2040-2070 e 2070-2100.

Nas séries de velocidade mínima do vento, as tendências negativas ocorrem predominantemente nas regiões Norte, Centro-Oeste, Sul e Sudeste, nos locais das estações 6, 4, 20 e 17 respectivamente. As tendências positivas ocorrem principalmente próximas à costa Nordeste, Sul e Sudeste e no interior dessas mesmas regiões. Tendências não significativas ocorrem nos locais 29 (NE) 8 (CO), 11 e 28 (S).

Nas séries de velocidade máxima do vento a tendências negativas ocorrem nos locais 25 (NE), 13 (SE), 4 e 8 (CO). As tendências positivas por sua vez, estão localizadas no Norte, Centro-Oeste, Sul e Sudeste, principalmente no interior do continente. Já as tendências não significativas estão localizadas predominantemente ao longo da costa.

Figura 5.29 – Locais com tendências iguais entre as séries obtidas pelas *RNAs* para os três períodos entre 2010 e 2100.

5.8. Resultados Pertinentes a Região Nordeste e Sul do Brasil.

Conforme discutido nos capítulos 1 e 2 desta Tese, as regiões Nordeste e Sul do Brasil são as que possuem o maior número de investimentos na geração eólica. Dessa forma, discutimos em torno dos resultados obtidos especificamente para essas regiões. Na Tabela 5.11 são apresentadas as ocorrências máximas registradas ao longo de todas as séries de dados o período de retorno determinado a partir da distribuição de frequência de Gumbel. Os resultados indicam que a região Sul é a que apresenta as ocorrências de maiores valores de velocidade do vento ao nível de 10m, especialmente registrados nas estações SBBG (2) e SBUG (39) (28,81 e 27,78$m \cdot s^{-1}$, respectivamente), próximas às divisas do Brasil com Argentina e Uruguai, onde ocorrem fenômenos meteorológicos como os sistemas frontais associados a massas de ar frio e complexos convectivos de mesoescala no Norte da Argentina. Na região Nordeste, as estações localizadas ao longo da costa indicam velocidades máximas registradas de 20,58 $m \cdot s^{-1}$ (SBFZ – 12),.

Tabela 5.11 – Máximos de velocidade do vento ocorridos ao longo de todo o período das observações e os anos de ocorrência.

	Estação	Ind.	Ano de ocorrência	V_{max} $(m \cdot s^{-1})$	Período de Retorno *T* (anos) - Gumbel						
					2	5	10	20	25	50	100
NE	SBLP	21	1998; 1999; 2000; 2001	18,52	10,28	13,52	14,89	15,90	16,18	16,93	17,55
	SBTE	37	1998; 1999; 2000; 2001	18,52	9,11	12,92	14,54	15,72	16,05	16,93	17,67
	SBAR	1	1988	12,86	4,90	5,42	5,65	5,81	5,85	5,97	6,07
	SBFZ	12	1956	20,58	7,49	8,63	9,11	9,47	9,57	9,83	10,05
	SBKG	18	1999; 2001	17,49	5,84	6,59	6,90	7,14	7,20	7,38	7,52
	SBMS	25	2000	18,01	5,58	6,51	6,91	7,20	7,28	7,49	7,68
	SBNT	26	1960	18,01	6,47	7,74	8,28	8,68	8,79	9,09	9,33
	SBPB	29	1999; 2000	18,52	7,09	8,35	8,89	9,28	9,39	9,68	9,92
	SBRF	32	1965; 1997; 1999; 2006; 2007	12,86	5,70	6,35	6,62	6,82	6,88	7,03	7,15
	SBSL	33	1973	15,43	6,75	7,99	8,52	8,90	9,01	9,30	9,54
	SBIL	16	1998; 1999; 2000; 2001	18,52	12,42	14,96	16,04	16,83	17,05	17,64	18,13
	SBMO	23	1951	13,38	10,16	11,35	11,86	12,23	12,33	12,61	12,84
S	SBBG	2	2012	28,81	16,43	20,41	22,11	23,35	23,69	24,61	25,39
	SBPK	30	1989	22,12	15,55	18,51	19,77	20,70	20,95	21,64	22,21
	SBUG	39	1958	27,78	19,68	22,99	24,40	25,43	25,71	26,48	27,12
	SBCT	9	2006	20,06	13,64	15,79	16,70	17,37	17,55	18,05	18,46
	SBFL	11	1953	20,58	14,88	16,92	17,78	18,42	18,59	19,06	19,46
	SBLO	20	1992	20,58	12,83	15,42	16,52	17,32	17,55	18,14	18,65
	SBPA	28	1963; 1967; 1968; 1983; 1995	25,72	18,56	21,86	23,27	24,30	24,58	25,34	25,98
	SBSM	34	1956	25,72	16,90	19,99	21,30	22,27	22,53	23,25	23,85

Conforme foi apresentado na Figura 2.4, velocidades do vento acima de 25 $m \cdot s^{-1}$ são um risco para a integridade dos aerogeradores e os parques eólicos. Os resultados apresentados nessa Tese são referentes ao vento a 10 metros. No entanto, os resultados desta Tese são referentes ao vento a 10m, enquanto que as atuais estruturas de aerogeradores possuem entre 50 e 100 metros de altura. Entre o solo e as camadas do vento geostrófico que não sofrem distúrbios, existe uma camada com alta variação da velocidade dos ventos. Dependendo da rugosidade da superfície, um gradiente da variação vertical da velocidade média do vento do vento é gerado em função da altura.

Para um mesmo local, pode-se calcular a velocidade do vento em uma determinada altitude em função de uma velocidade de referência através da Equação Logarítmica (Eq. 5.1) ou da Lei de Potência do vento (Eq. 5.2). Considerando que a primeira necessita de informações sobre o comprimento

de rugosidade da superfície, utilizamos a segunda alternativa para extrapolar a velocidade do vento para 50m e 100m de altitude.

$$v(z) = \frac{v^*}{k} ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \tag{5.1}$$

Onde $\boldsymbol{v^*}$ é a velocidade de frice.e, $\boldsymbol{k}$ é a constante de von Karmma, z é a altura e $\boldsymbol{z_0}$ é o comprimento de rugosidade.

$$v(z) = v(z_A)\left(\frac{z}{z_A}\right)^n \tag{5.2}$$

Onde $\mathrm{v(z)}$ é a velocidade de refersidad, n é o expoente de Hellmann, z é a altura e $\mathrm{z_A}$ é a altura de referefers.

Na Tabela 5.12 são apresentadas as velocidades máximas do vento extrapoladas para a altitude de 50m e 100m a partir da velocidade máxima do vento registrado a 10m. Podemos ver que em ambas as regiões existem ocorrências de ventos acima de 25 $m \cdot s^{-1}$ e no caso da região Sul, pode-se verificar velocidades de aproximadamente 40 $m \cdot s^{-1}$.

Tabela 5.12 – Máximos de velocidade do vento extrapolados para 50 e 100m de altitude a partir da Lei de Potência.

	Estação	Ind.	V_{max} 50m $(m \cdot s^{-1})$	V_{max} 100m $(m \cdot s^{-1})$
NE	SBLP	21	23,20	25,56
	SBTE	37	23,20	25,56
	SBAR	1	16,11	17,75
	SBFZ	12	25,78	28,41
	SBKG	18	21,91	24,14
	SBMS	25	22,56	24,86
	SBNT	26	22,56	24,86
	SBPB	29	23,20	25,56
	SBRF	32	16,11	17,75
	SBSL	33	19,33	21,30
	SBIL	16	23,20	25,56
	SBMO	23	16,76	18,47
S	SBBG	2	36,09	39,77
	SBPK	30	27,71	30,53

(Continua)

Tabela 5.12 - Conclusão

SBUG	39	34,80	38,35
SBCT	9	25,13	27,69
SBFL	11	25,78	28,41
SBLO	20	25,78	28,41
SBPA	28	32,22	35,50
SBSM	34	32,22	35,50

No que se refere ao período de retorno da velocidade máxima do vento, também foram extrapoladas as velocidades para as altitudes de 50m e 100m para cada período de retorno (Tabela 5.13). O que podemos verificar é que ventos acima de 25 $m \cdot s^{-1}$ podem ser excedidos uma vez a cada cinco anos em alguns locais na região Sul, enquanto que na região Nordeste ventos acima de 25 $m \cdot s^{-1}$ apresentam período de retorno de cem anos.

Tabela 5.13 – Máximos de velocidade do vento ocorridos ao longo de todo o período das observações e os anos de ocorrência.

	Estação	Ind.	Período de Retorno – T (anos)													
			2		5		10		20		25		50		100	
			50m	100m	50m	100m	50m	100m	50m	100m	50m	100m	50m	100m	50m	100m
			$(m \cdot s^{-1})$		$(m \cdot s^{-1})$		$(m \cdot s^{-1})$		$(m \cdot s^{-1})$		$(m \cdot s^{-1})$		$(m \cdot s^{-1})$		$(m \cdot s^{-1})$	
NE	**SBLP**	21	12,88	14,19	16,94	18,66	18,65	20,55	19,92	21,95	20,27	22,33	21,21	23,37	21,99	24,23
	SBTE	37	11,41	12,58	16,19	17,83	18,21	20,07	19,69	21,70	20,11	22,16	21,21	23,37	22,14	24,39
	SBAR	1	6,14	6,76	6,79	7,48	7,08	7,80	7,28	8,02	7,33	8,08	7,48	8,24	7,60	8,38
	SBFZ	12	9,38	10,34	10,81	11,91	11,41	12,58	11,86	13,07	11,99	13,21	12,31	13,57	12,59	13,87
	SBKG	18	7,32	8,06	8,26	9,10	8,64	9,52	8,94	9,86	9,02	9,94	9,25	10,19	9,42	10,38
	SBMS	25	6,99	7,70	8,16	8,99	8,66	9,54	9,02	9,94	9,12	10,05	9,38	10,34	9,62	10,60
	SBNT	26	8,11	8,93	9,70	10,68	10,37	11,43	10,87	11,98	11,01	12,13	11,39	12,55	11,69	12,88
	SBPB	29	8,88	9,79	10,46	11,53	11,14	12,27	11,63	12,81	11,76	12,96	12,13	13,36	12,43	13,69
	SBRF	32	7,14	7,87	7,95	8,77	8,29	9,14	8,54	9,41	8,62	9,50	8,81	9,70	8,96	9,87
	SBSL	33	8,46	9,32	10,01	11,03	10,67	11,76	11,15	12,29	11,29	12,44	11,65	12,84	11,95	13,17
	SBIL	16	15,56	17,14	18,74	20,65	20,09	22,14	21,08	23,23	21,36	23,54	22,10	24,35	22,71	25,03
	SBMO	23	12,73	14,02	14,22	15,67	14,86	16,37	15,32	16,88	15,45	17,02	15,80	17,41	16,08	17,72
S	**SBBG**	2	20,58	22,68	25,57	28,17	27,70	30,52	29,25	32,23	29,68	32,70	30,83	33,97	31,81	35,05
	SBPK	30	19,48	21,46	23,19	25,55	24,77	27,29	25,93	28,57	26,24	28,92	27,11	29,87	27,82	30,66
	SBUG	39	24,65	27,17	28,80	31,74	30,57	33,68	31,86	35,10	32,21	35,49	33,17	36,55	33,97	37,44
	SBCT	9	17,09	18,83	19,78	21,80	20,92	23,05	21,76	23,98	21,99	24,23	22,61	24,92	23,13	25,48
	SBFL	11	18,64	20,54	21,20	23,36	22,27	24,54	23,08	25,43	23,29	25,66	23,88	26,31	24,38	26,86
	SBLO	20	16,07	17,71	19,32	21,29	20,70	22,80	21,70	23,91	21,99	24,23	22,72	25,04	23,36	25,74
	SBPA	28	23,25	25,62	27,38	30,18	29,15	32,12	30,44	33,54	30,79	33,93	31,74	34,98	32,55	35,86
	SBSM	34	21,17	23,33	25,04	27,59	26,68	29,40	27,90	30,74	28,22	31,10	29,13	32,09	29,88	32,92

Em relação às tendências nas séries temporais da velocidade mínima do vento *OBS10m* na região Nordeste de Brasil, 41,6% indicam aumento, 16,6% indicam diminuição e 33,3% indicam não haver tendências significativas, ou seja, não há variação na velocidade mínima do vento. As tendências positivas ocorrem ao longo da costa. Já para a velocidade máxima, os resultados apontam 41,6% de tendências não significativas, 33,3% de tendências positivas e 16,6% de tendências negativas.

Na região Sul, as tendências na velocidade mínima do vento *OBS10m* sugerem que 50% das séries apresentam tendência negativa, 37,5% apresentam tendência não significativa e 12,5% indicam tendência positiva. As tendências da velocidade máxima do vento *OBS10m* indicam 37,5% de tendências negativas e não significativas, e 25% de tendências positivas.

Os resultados da análise de Mann-Kendall para as projeções do modelo *Eta-HadCM3* dos períodos de 2010-2040, 2040-2070 e 2070-2100 indicam que, para a velocidade mínima do vento existe a maior ocorrência de tendências positivas em ambas as regiões. Por outro lado, o teste sugere a diminuição da velocidade dos ventos máximos, principalmente na região Nordeste do Brasil e um maior número de ocorrências de tendências não significativas para o Sul.

5.9. Considerações finais

A energia eólica é um agente cada vez mais presente na matriz de energia elétrica brasileira, contribuindo para a sua diversificação ao mesmo tempo que tem demandado novos desafios para o setor energético brasileiro como a criação de novas redes de transmissão para ligar os parques ao Sistema Integrado Nacional (SIN) e dimensiona-lo a entrada dessa nova fonte. No entanto uma das principais preocupações deste crescimento por parte de órgãos como a ONS é a intermitência na geração pelos parques eólicos. A sazonalidade do vento, embora possa ser um ponto positivo em regiões onde seus máximos ocorrem em momentos de redução das reservas hídricas, é um

fator que influencia diretamente na geração. Regiões como o Sul do Brasil em que ocorrem maiores variações na magnitude do vento ao longo do dia também oferecem incertezas ao planejamento energético.

Ventos extremos, que possuem tempo de duração de minutos até horas, também são um fator a ser considerado, pois além do desgaste e danos estruturais que estes podem causar aos aerogeradores, ocasionam intermitência na geração e consequentemente no fornecimento de energia à rede.

Neste estudo, verificamos que as duas regiões brasileiras que mais têm se desenvolvido na área de geração eólica apresentam ocorrência de extremos máximos de velocidade do vento acima de 25 m/s a 100m.

Obviamente que a intermitência do na geração de energia não limita-se apenas a casos de ventos extremos acima de 25 m/s, mas nas mudanças de velocidade do vento ao longo do dia.

Em um primeiro momento, com base no que se conhece sobre energia eólica e com os resultados obtidos nesse estudo, pode-se afirmar que essa fonte não é uma boa alternativa para o setor energético brasileiro. No entanto, a geração eólica surgiu de uma necessidade legítima de mais disponibilidade energia elétrica que evitasse a geração de gases de efeito estufa a partir de uma fonte e disponível para uso e presente em todos os continentes.

Com o avanço da tecnologia, novas formas de contornar os problemas de intermitência da energia eólica estão sendo propostos. Cigré (2011) apresenta algumas delas os “smart grids”, os quais são novos conceitos em que o sistema elétrico é formado pela integração da infraestrutura elétrica e da infraestrutura de informação, a qual considera as formas alternativas e renováveis de energia como parte da rede e que com base nas informações de consumo em tempo real é capaz de otimizar a eficiência da rede elétrica.

6 CONCLUSÕES

O presente trabalho investigou os aspectos relativos à ocorrência de ventos extremos mínimos e máximos a 10m para períodos superiores a 30 anos de dados observados (1947-2014) e períodos de 30 (1960-1990, 2010-2040,2040-2070, 2070-2100) anos do modelo climático *Eta-HadCM3*, compreendendo desde o pré-processamento dos dados observados e modelados, Análise de Agrupamento, método estatístico de análise de tendência climática, distribuição de eventos extremos e refinamento estatístico com emprego de *RNAs*.

Em relação ao algoritmo de qualificação das séries temporais, pode-se identificar um número expressivo de dados suspeitos nas séries, os quais não puderam ser avaliados como sendo válidos e, portanto foram desconsiderados das análises seguintes para não inserir maiores incertezas dos resultados.

A Análise de Agrupamento utilizando o método hierárquico de Ward resultou em seis regiões homogêneas coerentes ao considerarmos os principais sistemas meteorológicos atuantes e a posição geográfica das estações. Ainda são discutidos os resultados da análise de agrupamento em que se determinam as regiões homogêneas (*RHs*) da área de estudo, além da discussão em torno das características das *RHs* relativas aos principais sistemas meteorológicos atuantes, ciclo anual da velocidade do vento, e características geográficas.

Os métodos de distribuição de frequência adotados tiveram um bom ajuste às séries de velocidade máxima do vento *OBS10m*, porém de acordo com o teste *KS*, o modelo de distribuição Gumbel foi o que melhor se ajustou às séries de velocidade máxima mensal e anual do vento *OBS10m*.

Em relação ao período de retorno da velocidade máxima do *OBS10m*, a região homogênea *RH5* apresenta os maiores valores de velocidade do vento para *T= 2 anos*, podendo ocorrer velocidades iguais ou acima de 19,68 $m \cdot s^{-1}$ e a velocidade de 25 $m \cdot s^{-1}$ pode ser superada uma vez a cada 20 anos. A *RH6* representa o segundo maior valor de velocidade do vento em *T=2*, podendo

ocorrer velocidades iguais ou acima de 18,56 $m \cdot s^{-1}$. Dessa forma, a *RH5* e *RH6* são as regiões que apresentam maiores riscos para a integridade estrutural de aerogeradores.

No entanto, deve-se considerar que as séries temporais de velocidade do vento utilizadas neste estudo possuem resolução temporal horária. Assim, eventos de curta duração (menores que 1 hora) podem não estar representados nos resultados.

Os resultados de correlação e erro sistemático entre as séries observadas mensais de vento *OBS10m* e as séries de saída mensal de vento *Eta10m* do modelo *Eta-HadCM3* apresentaram grandes discrepâncias, com correlação média de 0,16 e erro sistemático entre -0,36 $m \cdot s^{-1}$ e 5,86 $m \cdot s^{-1}$ para o vento mínimo a 10m e correlação média de 0,29 e erro sistemático entre -3,98 $m \cdot s^{-1}$ e 1,9 $m \cdot s^{-1}$ para o vento máximo a 10m.

No entanto o modelo *Eta-HadCM3* não tem o objetivo de representar a variação horária do vento em superfície principalmente por se tratar de um modelo com escala integração de 30 anos além de ter como condição de contorno as saídas do modelo global *HadCM3* com grades da ordem de graus e resolução temporal de 6 horas. Dessa forma, o modelo não representa o estado da atmosfera a cada hora, mas o seu equilíbrio médio ao longo de 30 anos.

Apesar da *RNA* apresentar uma melhora significativa nas séries temporais do dado modelado de vento a 10m, o seu desempenho ainda é sensível à capacidade de representação dos seus preditores, ou neste caso, as séries de saída do modelo climático, em relação ao seu alvo. Portanto, deve-se ressaltar que uma boa representatividade no *baseline* não garante um bom desempenho da *RNA* em relação às projeções futuras, pois os preditores do futuro provenientes do modelo climático podem representar um estado da atmosfera diferente do que foi utilizado no treinamento no *baseline*.

O uso de *RNAs* para corrigir o erro sistemático do modelo *Eta-HadCM3* se mostrou uma boa alternativa para realizar o refinamento estatístico das séries do modelo. Com esse método obteve-se séries ajustadas de velocidade média mensal mínima e máxima do vento a 10m para o período de 1960-1990 para o local de cada estação. A comparação entre o vento *OBS10m* e *RNA10m* resultaram em uma correlação média de 0,76 e 0,78 para os mínimos e máximos respectivamente, enquanto que a média do erro sistemático foi de -0,01 $m \cdot s^{-1}$ para os mínimos e máximos. O *RMSE* teve um ganho de 85,8% para a velocidade mínima do vento e de 67,9% para a velocidade máxima em relação ao modelo EtaHadCM3.

Com base nas análises de tendência climática das séries velocidade mínima e máxima do vento *OBS10m* e do vento modelo pela *RNA10m*, os resultados indicam aumento na velocidade mínima do vento ao longo da costa brasileira, principalmente na costa do Nordeste, e no interior do continente próximo a costa. Já os máximos de velocidade do vento indicam aumento no interior das regiões Norte, Centro-Oeste e Sudeste.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACKERMAN, S. A.; KNOX, J. A. **Meteorology:** understanding the atmosphere. 2. ed. Toronto: Thomson Brooks/Cole, 2007, 486 p. ISBN 0-534-37199-X.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Balanço energético nacional 2008:** ano base 2010. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, 2008. 52 p. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Sum_Executivo_*BEN*_2008.pdf>. Acesso em: 8 de maio de 2011.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL, Ministério de Minas e Energia. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3. ed. Brasília, 2008. 236 p. ISBN: 978-85-87491-10-7.

AMARANTE, O. A. C.; BROWER, M.; ZACK, J.; DE SÁ, A. L. **Atlas do potencial eólico brasileiro**. Brasília: e-dea Technologies, 2001. 45 p CD-ROM.

ARAKAWA, A.; LAMB, V.R. Computational design of the basic dynamical process of the UCLA general circulation model. **Methods in Computational. Physics**, v.17, p. 173-265, 1977.

ARYA, S. P. **Introduction to micrometeorology**. San Diego: Academic Press, 1988, 303 p. ISBN 978-0120-6449-02.

BACK, J. A., Aplicação de análise estatística para identificação de tendências climáticas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, n. 5, p. 717-726, 2001.

BACK, J. A. Seleção de Distribuição de probabilidade para chuvas diárias extremas no estado de Santa Catarina. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 16, n. 2, p., 211-222, 2001.

BLACK, T. L. The new NMC mesoscale Eta model: description and forecast examples. **Weather and Forecasting**, v.9, n.2, p. 265-278, 1994.

BOLZAN, M. J. A.; VIEIRA, P.C. Wavelet analysis of the wind velocity and temperature variability in the Amazon Forest. **Brazilian Journal Of Physics**, v. 36, p. 1217-1222, 2006.

BRAGA, A. P.; CARVALHO, A. P.; LUDERMIR, T. B. **Redes neurais artificiais:** teoria e aplicações. Rio de Janeiro: LTC Editora S.A., 2007. 238 p. ISBN 9788521615644.

CARVALHO, P. **Geração eólica**. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2003. 146 p. ISBN 85-7485-039-X.

CHEN, F.; JANJIC, Z.I.; MITCHELL ,K. Impact of atmospheric surface layer parameterization in the new land-surface scheme of the NCEP mesoscale Eta model. **Bound-Layer Meteorology**, v. 85, 391–421, 1997.

CHENG, D.H. Macroscopic extreme wind regionalization. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 77 & 78, p. 13-21, 1998.

COMPAGNUCCI, R. H.; SALLES, M. A. Surface pressure patterns during the year over southern South America. **International Journal of Climatology**, v. 17, p. 635–653, 1997.

CORRAR, J. L.; PAULO, E.; FILHO, J. M. D. **Análise multivariada**. São Paulo: Editora Atlas, 2012. 541 p. ISBN 978-85-224-4707-7.

DERECZYNSKI, C. P.; ROZANTE, J. R.; CHOU, S. C. Avaliação do desempenho do modelo regional Eta utilizando uma topografia de 30 segundos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 11., 2000, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2000. p. 1599-1608. Disponível em: <http://www.cbmet.com/edicoes.php?pageNum_Recordset_busca=1&totalRows_Recordset_busca=551&cgid=12>. Acesso em: 11 maio de 2008.

DUKES, M. D. G.; PALUTIKOF, J. P. Estimation of extreme winds speeds with very long return periods. **Journal of Applied Meteorology**, v. 34, p. 1950-1961, 1994.

DUTRA, R. Incentive policies for promoting wind power production in Brazil: Scenarios for the Alternative Energy Sources Incentive Program (*PROINFA*) under the New Brazilian electric power sector regulation. **Renewable Energy**, v. 33, p. 65–76, 2007.

EK, M.B.; MITCHEL, K.E.; LIN, Y.; ROGERS E.; GRUMMEN, P.; KOREN V.; GAYNO, G.; TARPLEY J.D. Implementation of NOAH land surface advances in the National centers for environmental prediction operational mesoscale Eta

model. **Journal of Geophysical Research**108:8851, 2003. doi: 10.1029/2002JD003246

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME).EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Plano nacional de energia 2030**. On-line. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/PNE/20070626_1.pdf>. Acesso em: outubro 2010.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Expansão da geração:** empreendimentos eólicos. instruções para solicitação de cadastramento e habilitação técnica com vistas à participação nos leilões de energia elétrica. 2014. Disponível em: < http://www.epe.gov.br/leiloes/Documents/Leil%C3%B5es%202014/EPE-DEE-017_2009_R11_EOL.pdf>. Acesso em: 8 de abril de 2014.

FELS, S. B.; SCHWARZKOPF, M. D. The simplified exchange approximation: a new method for radiative transfer calculations. **Journal Atmospheric Science**, v. 32, p. 1475–1488, 1975.

GASCH, R.; TWELE, J.; **Wind power plants –** fundamentals, design, construction and operation. Germany: Earthscan Publications Ltd, 2002. 416 p. ISBN: 978-1902916385

GAURREAD, R. Cold air incursions over Subtropical South America: mean structure and dynamics. **Department of Geophysics**, v. 128, n. 2, p. 2544-2559, 1999.

GELLER, H. S. **Revolução energética:** políticas para um futuro sustentável. Tradução Maria Vidal Barbosa, Rio de Janeiro, Relume Dumará: USAid, 2003. 299 p. ISBN 85-7316-336-4.

GOLDEMBERG, J.; VILLANUEVA, L. D. **Energia, meio ambiente & desenvolvimento**. 2. ed. São Paulo: Edusp, 2003. 227 p. ISBN: 978-853-1404-528.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. **Energia, meio ambiente e desenvolvimento**. 3. ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2008. 396 p. ISBN 978-314-1113-7.

GONÇALVES, R. C. **Análise de frequência regional de ventos extremos no Paraná**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007. Disponível em:<

http://www.ppgerha.ufpr.br/publicacoes/dissertacoes/files/133-Rafael_Cabral_Goncalves.pdf >. Acesso em: 5 de março de 2012.

GONÇALVES, A. R. **Refinamento estatístico das previsões de vento do modelo Eta aplicado ao setor eólio-elétrico do Nordeste Brasileiro**. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2011. Disponível em: <http://urlib.net/8JMKD3MGP8W/3AM8BUH>. Acesso em: 22 dezembro 2011.

GOOSSENS, C.; BERGER, A. Annual and seasonal climatic variations over the northern hemisphere and Europe during the last century. **Annales Geophysicae**, v. 4, n. B4, p. 385-400, 1986.

GUARNIERI, R. A. **Emprego de redes neurais artificiais e regresso linear múltipla no refinamento das previsões de radiação solar do modelo ETA**. 2006. 171 p. (INPE-14172-TDI/1089). Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2006. Disponível em:<http://urlib.net/sid.inpe.br/MTC-m13@80/2006/05.30.18.50>. Acesso em: 22 dezembro 2011.

HAYKIN, S. **Redes neurais:** princípios e prática. Porto Alegre: Boo*km*an, 2001. 900 p. ISBN 0-13-273350-1.

HERSFIELD, D. M.; KOHLER, M. A, An empirical appraisal of the Gumbel extreme value procedure. **Journal Geophysical Research**, v. 65, n. 6, p. 1737-1746, 1960.

HOSKING, J. R. M. **Some theoretical results concerning L-moments**. IBM Research Division, 1989. 9 p.

HOSKING, J. R. M.; WALLIS, J. R. **Regional frequency analysis:** an approach based on L-moments. Cambridge University Press, 1997. 244 p.

JANJIC, Z. I. The step-mountain Eta coordinate model: further developments of the convection, Viscous sub layer and turbulence closure schemes. **Monthly Weather Review**, v. 122, p. 927–945, 1994.

KATZ, R. W.; PARLANGE, M. B.; NAVEAU, P. Statistics of extremes in hydrology. **Advances in Water Resources**, v. 25, p. 1287-1304, 2002.

KITE, G. H. **Frequency and risk analyses in hydrology**. Fort Collins: Water Resources Publications, 1978. 224 p.

LACIS, A.A., HANSEN, J.E. A parameterization of the absorption of solar radiation in earth's atmosphere. **Journal Atmospheric Science**, v. 31, p. 118–133, 1974.

LUCENA, A. F. P.; SZKLO, A. S.; SCHAEFFER, R.; DUTRA, R. M. The vulnerability of wind power to climate change in Brazil. **Renewable Energy** 2010, v. 35, p. 904-912.

MARTINS, F.R.; GONÇALVES, A. R.; PEREIRA, E. B. The impacts of climate change in Brazilian wind resource. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ENERGY AND METEOROLOGY, 2011, Gold Coast. Final Programme and Abstracts Handbool. Brisbane: CSIRO, 2011.

MARENGO, J. A. **Mudanças climáticas, condições meteorológicas extremas eventos climáticos no Brasil**. Fundação Brasileira para o Desenvolvimento Sustentável, 2009. p. 5-18.

MENDES, D.; MARENGO, J. A.; MESQUITA, M. D. S., Meteorological downscaling methods with artificial neural network models. **Atmospheric Sciences Section of AGU Newsletter**, v. 3, p. 3, 2009.

MESINGER, F. A blocking technique for representation of mountains in atmospheric models. **Rivista di Meteorologia Aeronautica**, v. 44, p. 195–202, 1984.

METOFFICE. **Beaufort wind force scale** - weather and climate change.. Disponível em: <http://www.metoffice.gov.uk/guide/weather/marine/beaufort-scale>. Acesso em: maio de 2012.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Matriz energética nacional 2030.** Brasília: MME. *EPE*, 2007. 254p.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano decenal de expansão de energia 2019**. Brasília: MME.EPE, 2010, 2 v. Disponível em:

<http://www.mme.gov.br/mme/galerias/arquivos/noticias/2010/PDE2019_03Maio2010.pdf>. Acesso em: 22 de fevereiro de 2011.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Programa de incentivo às fontes alternativas de energia elétrica**. Brasília: Departamento de Desenvolvimento Energético, 2009. Disponível em: http://www.mme.gov.br/programas/proinfa/. Acessado em: 23 de março de 2011.

MORÉ, J. The Levenberg-Marquardt algorithm: implementation and theory. In: CONFERENCE ON NUMERICAL ANALYSIS1977, Dundee, Great Britain. **Proceedings…** Dundee, Great Britain: Springer Berlin Heidelberg, 1977. p. 105-116. ISBN. 978-3-540-35972-2.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO – ONS. **Plano da operação energética 2012/2016 – PEN 2012:** relatório executivo. 2012.v.1. Disponível em: <http://www.ons.org.br/download/avaliacao_condicao/operacao_energetica/PEN%202012_VOL1_RELATORIO%20EXECUTIVO.pdf>. Acesso em: 4 de dezembro de 2012.

OSBORN, H. B.; LANE, L. J.; MYERS, V. A. Rainfall watershed relationships for southewestern thunderstorms. **Transactions of the ASAE**, v. 23, n. 1, p. 82-87, 1980.

PAULSON, C. A. The mathematical representation of wind speed and temperature profiles in the unstable atmospheric surface layer. **Journal Applied Meteorology**, v. 9, p. 857–861, 1970.

PEREIRA, E. B. O desafio das energias renováveis e suas implicações ambientais. **Boletim da Sociedade Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 1, p. 36-47, Abril 2007. Disponível em: <http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2007/12.03.11.41>. Acesso em: 2 outubro 2007.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; PES, M. P.; SEGUNDO, E. I. C.; LYRA, A. A. The impacts of global climate changes on the wind power density in Brazil, **Renewable Energy**, v. 49, p. 107-110, 2013.

PESQUERO J.F.; CHOU S.C.; NOBRE C.A.; MARENGO J.A. Climate downscaling over South America for 1961–1970 using the Eta model. **Theoretical and Applied Climatology**, 2009. doi:10.1007/s00704-009-0123-z

PINHEIRO, M. M. G. Análise Regional De Frequência e Distribuição Temporal Das Tempestades Na Região Metropolitana de Belo Horizonte. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.3, n. 4, p. 73-88, 1998.

PORTO, L. **Energias renováveis**. São Paulo: Ministério de Minas e Energia. Departamento de Desenvolvimento Energético, 2007. Disponível em: < http://www.mme.gov.br/programas/proinfa/galerias/arquivos/apresentacao/VI.pdf>. Acesso em: 3 de maio de 2011.

QUADROS, L. E.; QUEIROS, M. F.;VILLAS BOAS, M. A. Distribuição de frequência e temporal de chuvas intensas. **Acta Scientiarium Agronomy**, v. 33, n. 3, p. 401-410, 2011.

QUEIROZ, M. F.; CHAUDHRY, F. H. Análise de eventos hidrológicos extremos, usando-se a distribuição GEV e momentos LH. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 2, p. 381-389, 2006.

REBOITA, M. S.; GAN, M. A.; DA ROCHA, R. P; AMBRIZZI, T. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 2, p. 185-204, 2010.

REISS, R. D.; THOMAS, M. **Statistical analysis of extreme values:** with applications to insurance, finance, hydrology and other fields. 3. ed. Germany: Birkhäuser Press, 2007. 511 p. ISBN 978-3-7643-7230-9.

SAILOR, D.J.; ROSEN, J.N.; HU, T.; LI, X. A neural network approach to local downscaling of GCM output for assessing wind power implications of climate change. **Renewable Energy**, v.19, p. 359–378, 2000.

SANSIGOLO, C. A. Distribuição de extremos de precipitação diária, temperatura e máxima e mínima de velocidade do vento em Piracicaba. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 23, n.3, p. 341-346, 2008.

SAREWITZ, D. How science makes environmental controversies worse. **Environmental Science & Policy**, v. 7, Issue 5, p. 385-403, 2004.

SATYAMURTY, P.; NOBRE, C. A.; SILVA DIAS, P. L. South America. In: Meteorology of the Southern Hemisphere. Eds. Karoly D. J.; Vicent, D. G. **American Meteorological Society, Meteorological Monographs**, v. 27, n. 49, p. 119-139, 1998.

SCHAEFFER, R.; SZKLO, A. S.; LUCENA, A. F. P.; SOUZA, R. R.; BORBA, B. S. M. C.; COSTA, I. V. L.; JÚNIOR, A. P.; CUNHA, S. H. F. **Climate change:** energy security. Rio de Janeiro: Programa de Planejamento Energético. Pesquisa de Engenharia – COPPE, 2008.

SILVA, N. F.; ROSA, L. P.; ARAÚJO, M. R. The utilization of wind energy in the Brazilian electric secto's expansion. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.9, p. 289-309, 2005.

SNEYERS, R. **Sur l`analyse statistique des series d`observations**. Genève: Organisation Météorologique Mondial, 1975. 192 p.

VALVERDE, A. E. L.; LEITE, H. G.; SILVA, D. D.; PRUSKI, F. F. Momentos-L: teoria e aplicação em hidrologia. **Sociedade de Investigações Florestais**, v. 8, n. 6, p. 927-933, 2004.

VAN DER AUWERA, L.; MEYER, F. L.; MALET, L. M. The use of the weibull three-parameter model for estimating mean wind power densities. **Journal Applied Of Meteorology**, v. 19, p. 819-825, 1980.

VENÄLÄINEN, A.; KOSKELA, J.; TURUNEN, M. A.; VEHVILÄINEN, B.; FORSIUS, J.; JÄRVINEN, P. The influence of climate change on energy production and heating energy demand in Finland. **Energy Environmental**, v.15, p. 93–109, 2004.

Ward, J.H. Hierarchical grouping to optimize an objective function. **Journal of the American Statistical Association**, v. 58, p. 236-244, 1963.

WORLD WIND ENERGY ASSOCIATION. **The world wind energy association:** half-year report 2014. Disponível em: <http://www.wwindea.org/webimages/WWEA_half_year_report_2014.pdf> Acesso em: 30 de outubro de 2014.

ZHAO, Q., BLACK; T.L., BALDWIN, M. E. Implementation of the cloud prediction scheme in the Eta model at NCEP. **Weather Forecast**, v. 12, p. 697–712, 1997.

APÊNDICE A

Estação SBAR - 1964 a 2013 - vento horário a 10 metros
Velocidade horária
Velocidade do Vento (m/s)

Velocidade Máxima e mínima do vento a 10 metros
Velocidade mínima
Velocidade máxima
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)

Estação SBBG - 1960 a 2014 - vento horário a 10 metros
Velocidade horária
Velocidade do Vento (m/s)

Velocidade Máxima e mínima do vento a 10 metros
Velocidade mínima
Velocidade máxima
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)

Estação SBBH - 1947 a 2014 - vento horário a 10 metros
Velocidade horária
Velocidade do Vento (m/s)

Velocidade Máxima e mínima do vento a 10 metros
Velocidade mínima
Velocidade máxima
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)

Estação SBBR - 1960 a 2013 - vento horário a 10 metros
Velocidade horária
Velocidade do Vento (m/s)
Velocidade Máxima e mínima do vento a 10 metros
Velocidade mínima
Velocidade máxima
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Estação SBBU - 1959 a 2014 - vento horário a 10 metros
Velocidade horária
Velocidade do Vento (m/s)
Velocidade Máxima e mínima do vento a 10 metros
Velocidade mínima
Velocidade máxima
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Estação SBBV - 1961 a 2012 - vento horário a 10 metros
Velocidade horária
Velocidade do Vento (m/s)
Velocidade Máxima e mínima do vento a 10 metros
Velocidade mínima
Velocidade máxima
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)

Estação SBCG - 1951 a 2014 - vento horário a 10 metros
Velocidade horária
Velocidade do Vento (m/s)
Velocidade Máxima e mínima do vento a 10 metros
Velocidade mínima
Velocidade máxima
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Estação SBCR - 1969 a 2014 - vento horário a 10 metros
Velocidade horária
Velocidade do Vento (m/s)
Velocidade Máxima e mínima do vento a 10 metros
Velocidade mínima
Velocidade máxima
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)

Estação SBCT - 1951 a 2011 - vento horário a 10 metros
Velocidade horária
Velocidade do Vento (m/s)

Velocidade Máxima e mínima do vento a 10 metros
Velocidade mínima
Velocidade máxima
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)

Estação SBCT - 1951 a 2011 - vento horário a 10 metros
Velocidade horária
Velocidade do Vento (m/s)

Velocidade Máxima e mínima do vento a 10 metros
Velocidade mínima
Velocidade máxima
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)

Estação SBCY - 1963 a 2013 - vento horário a 10 metros
Velocidade horária
Velocidade do Vento (m/s)

Velocidade Máxima e mínima do vento a 10 metros
Velocidade mínima
Velocidade máxima
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)

Estação SBFL - 1951 a 2011 - vento horário a 10 metros
Velocidade horária
Velocidade do Vento (m/s)

Velocidade Máxima e mínima do vento a 10 metros
Velocidade mínima
Velocidade máxima
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)

Estação SBFZ - 1951 a 2011 - vento horário a 10 metros
Velocidade horária
Velocidade do Vento (m/s)

Velocidade Máxima e mínima do vento a 10 metros
Velocidade mínima
Velocidade máxima
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)

Estação SBGL - 1951 a 2013 - vento horário a 10 metros
Velocidade horária
Velocidade do Vento (m/s)

Velocidade Máxima e mínima do vento a 10 metros
Velocidade mínima
Velocidade máxima
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)

Estação SBGO - 1952 a 2013 - vento horário a 10 metros
Velocidade horária
Velocidade do Vento (m/s)

Velocidade Máxima e mínima do vento a 10 metros
Velocidade mínima
Velocidade máxima
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)

Estação SBGR - 1951 a 2013 - vento horário a 10 metros
Velocidade horária
Velocidade do Vento (m/s)

Velocidade Máxima e mínima do vento a 10 metros
Velocidade mínima
Velocidade máxima
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)

Estação SBIL - 1961 a 2013 - vento horário a 10 metros
Velocidade horária
Velocidade do Vento (m/s)

Velocidade Máxima e mínima do vento a 10 metros
Velocidade mínima
Velocidade máxima
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)

Estação SBJR - 1974 a 2013 - vento horário a 10 metros
Velocidade horária
Velocidade do Vento (m/s)

Velocidade Máxima e mínima do vento a 10 metros
Velocidade mínima
Velocidade máxima
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)

Estação SBKG - 1970 a 2013 - vento horário a 10 metros
Velocidade horária
Velocidade do Vento (m/s)

Velocidade Máxima e mínima do vento a 10 metros
Velocidade mínima
Velocidade máxima
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)

Estação SBKP - 1951 a 2014 - vento horário a 10 metros
Velocidade horária
Velocidade do Vento (m/s)

Velocidade Máxima e mínima do vento a 10 metros
Velocidade mínima
Velocidade máxima
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)

Estação SBLO - 1962 a 2012 - vento horário a 10 metros
Velocidade horária
Velocidade do Vento (m/s)
Velocidade Máxima e mínima do vento a 10 metros
Velocidade mínima
Velocidade máxima
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)

Estação SBLP - 1961 a 2013 - vento horário a 10 metros
Velocidade horária
Velocidade do Vento (m/s)
Velocidade Máxima e mínima do vento a 10 metros
Velocidade mínima
Velocidade máxima
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)

Estação SBMN - 1958 a 2012 - vento horário a 10 metros
Velocidade horária
Velocidade do Vento (m/s)
Velocidade Máxima e mínima do vento a 10 metros
Velocidade mínima
Velocidade máxima
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)

Estação SBMO - 1951 a 2013 - vento horário a 10 metros
Velocidade horária
Velocidade do Vento (m/s)

Velocidade Máxima e mínima do vento a 10 metros
Velocidade mínima
Velocidade máxima
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)

Estação SBMQ - 1968 a 2014 - vento horário a 10 metros
Velocidade horária
Velocidade do Vento (m/s)

Velocidade Máxima e mínima do vento a 10 metros
Velocidade mínima
Velocidade máxima
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)

Estação SBMS - 1960 a 2014 - vento horário a 10 metros
Velocidade horária
Velocidade do Vento (m/s)

Velocidade Máxima e mínima do vento a 10 metros
Velocidade mínima
Velocidade máxima
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)

Estação SBNT - 1951 a 2013 - vento horário a 10 metros
Velocidade horária
Velocidade do Vento (m/s)
Velocidade Máxima e mínima do vento a 10 metros
Velocidade mínima
Velocidade máxima
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)

Estação SBOI - 1960 a 2012 - vento horário a 10 metros
Velocidade horária
Velocidade do Vento (m/s)
Velocidade Máxima e mínima do vento a 10 metros
Velocidade mínima
Velocidade máxima
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)

Estação SBPA - 1951 a 2014 - vento horário a 10 metros
Velocidade horária
Velocidade do Vento (m/s)
Velocidade Máxima e mínima do vento a 10 metros
Velocidade mínima
Velocidade máxima
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)

Estação SBPB - 1963 a 2011 - vento horário a 10 metros
Velocidade horária
Velocidade do Vento (m/s)
Velocidade Máxima e mínima do vento a 10 metros
Velocidade mínima
Velocidade máxima
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)

Estação SBPK - 1970 a 2014 - vento horário a 10 metros
Velocidade horária
Velocidade do Vento (m/s)
Velocidade Máxima e mínima do vento a 10 metros
Velocidade mínima
Velocidade máxima
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)

Estação SBPV - 1969 a 2013 - vento horário a 10 metros
Velocidade horária
Velocidade do Vento (m/s)
Velocidade Máxima e mínima do vento a 10 metros
Velocidade mínima
Velocidade máxima
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)

Estação SBRF - 1951 a 2013 - vento horário a 10 metros
Velocidade horária
Velocidade do Vento (m/s)
Velocidade Máxima e mínima do vento a 10 metros
Velocidade mínima
Velocidade máxima
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Estação SBSL - 1951 a 2012 - vento horário a 10 metros
Velocidade horária
Velocidade do Vento (m/s)
Velocidade Máxima e mínima do vento a 10 metros
Velocidade mínima
Velocidade máxima
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Estação SBSM - 1953 a 2014 - vento horário a 10 metros
Velocidade horária
Velocidade do Vento (m/s)
Velocidade Máxima e mínima do vento a 10 metros
Velocidade mínima
Velocidade máxima
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)

Estação SBSN - 1954 a 2012 - vento horário a 10 metros
Velocidade horária
Velocidade do Vento (m/s)
Velocidade Máxima e mínima do vento a 10 metros
Velocidade mínima
Velocidade máxima
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Estação SBST - 1951 a 2014 - vento horário a 10 metros
Velocidade horária
Velocidade do Vento (m/s)
Velocidade Máxima e mínima do vento a 10 metros
Velocidade mínima
Velocidade máxima
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Estação SBTE - 1955 a 2013 - vento horário a 10 metros
Velocidade horária
Velocidade do Vento (m/s)
Velocidade Máxima e mínima do vento a 10 metros
Velocidade mínima
Velocidade máxima
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)

Estação SBTS - 1972 a 2012 - vento horário a 10 metros
Velocidade horária
Velocidade do Vento (m/s)
Velocidade Máxima e mínima do vento a 10 metros
Velocidade mínima
Velocidade máxima
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Estação SBUG - 1951 a 2014 - vento horário a 10 metros
Velocidade horária
Velocidade do Vento (m/s)
Velocidade Máxima e mínima do vento a 10 metros
Velocidade mínima
Velocidade máxima
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Estação SBUL - 1959 a 2013 - vento horário a 10 metros
Velocidade horária
Velocidade do Vento (m/s)
Velocidade Máxima e mínima do vento a 10 metros
Velocidade mínima
Velocidade máxima
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)

Estação SBUR - 1964 a 2012 - vento horário a 10 metros
Velocidade horária
Velocidade do Vento (m/s)
Velocidade Máxima e mínima do vento a 10 metros
Velocidade mínima
Velocidade máxima
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)

Estação SBVT - 1951 a 2014 - vento horário a 10 metros
Velocidade horária
Velocidade do Vento (m/s)
Velocidade Máxima e mínima do vento a 10 metros
Velocidade mínima
Velocidade máxima
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)

APÊNDICE B

SBAR
Velocidade média mensal mínima do vento
Velocidade média mensal máxima do vento
SBBG
Velocidade média mensal mínima do vento
Velocidade média mensal máxima do vento
SBBH
Velocidade média mensal mínima do vento
Velocidade média mensal máxima do vento
SBBR
Velocidade média mensal mínima do vento
Velocidade média mensal máxima do vento
SBBU
Velocidade média mensal mínima do vento
Velocidade média mensal máxima do vento
SBBV
Velocidade média mensal mínima do vento
Velocidade média mensal máxima do vento
Ocorrências de velocidade do vento (%)
Velocidade do vento observado (m/s)

SBCG
Velocidade média mensal mínima do vento
SBCR
Velocidade média mensal mínima do vento
Velocidade média mensal máxima do vento
Velocidade média mensal máxima do vento
SBCT
Velocidade média mensal mínima do vento
SBCY
Velocidade média mensal mínima do vento
Velocidade média mensal máxima do vento
Velocidade média mensal máxima do vento
SBFL
Velocidade média mensal mínima do vento
SBFZ
Velocidade média mensal mínima do vento
Velocidade média mensal máxima do vento
Velocidade média mensal máxima do vento
SBGL
Velocidade média mensal mínima do vento
SBGO
Velocidade média mensal mínima do vento
Velocidade média mensal máxima do vento
Velocidade média mensal máxima do vento
Ocorrências de velocidade do vento (%)
Velocidade do vento observado (m/s)

SBGR
Velocidade média mensal mínima do vento
Velocidade média mensal máxima do vento
SBIL
Velocidade média mensal mínima do vento
Velocidade média mensal máxima do vento
SBJR
Velocidade média mensal mínima do vento
Velocidade média mensal máxima do vento
SBKG
Velocidade média mensal mínima do vento
Velocidade média mensal máxima do vento
SBKP
Velocidade média mensal mínima do vento
Velocidade média mensal máxima do vento
SBLO
Velocidade média mensal mínima do vento
Velocidade média mensal máxima do vento
SBLP
Velocidade média mensal mínima do vento
Velocidade média mensal máxima do vento
SBMN
Velocidade média mensal mínima do vento
Velocidade média mensal máxima do vento
Ocorrências de velocidade do vento (%)
Velocidade do vento observado (m/s)

SBMO
Velocidade média mensal mínima do vento
SBMQ
Velocidade média mensal mínima do vento
Velocidade média mensal máxima do vento
Velocidade média mensal máxima do vento
SBMS
Velocidade média mensal mínima do vento
SBNT
Velocidade média mensal mínima do vento
Velocidade média mensal máxima do vento
Velocidade média mensal máxima do vento
SBOI
Velocidade média mensal mínima do vento
SBPA
Velocidade média mensal mínima do vento
Velocidade média mensal máxima do vento
Velocidade média mensal máxima do vento
SBPB
Velocidade média mensal mínima do vento
SBPK
Velocidade média mensal mínima do vento
Velocidade média mensal máxima do vento
Velocidade média mensal máxima do vento
Ocorrências de velocidade do vento (%)
Velocidade do vento observado (m/s)

SBPV
Velocidade média mensal mínima do vento
Velocidade média mensal máxima do vento
SBRF
Velocidade média mensal mínima do vento
Velocidade média mensal máxima do vento
SBSL
Velocidade média mensal mínima do vento
Velocidade média mensal máxima do vento
SBSM
Velocidade média mensal mínima do vento
Velocidade média mensal máxima do vento
SBSN
Velocidade média mensal mínima do vento
Velocidade média mensal máxima do vento
SBST
Velocidade média mensal mínima do vento
Velocidade média mensal máxima do vento
SBTE
Velocidade média mensal mínima do vento
Velocidade média mensal máxima do vento
SBTS
Velocidade média mensal mínima do vento
Velocidade média mensal máxima do vento
Ocorrências de velocidade do vento (%)
Velocidade do vento observado (m/s)

SBUG
Velocidade média mensal mínima do vento
Velocidade média mensal máxima do vento
SBUL
Velocidade média mensal mínima do vento
Velocidade média mensal máxima do vento
SBUR
Velocidade média mensal mínima do vento
Velocidade média mensal máxima do vento
SBVT
Velocidade média mensal mínima do vento
Velocidade média mensal máxima do vento
Ocorrências de velocidade do vento (%)
Velocidade do vento observado (m/s)

APÊNDICE C

SBAR – 1
Treinamento: R=0.87924
RNA ~= 0.7*Alvo + -0.046
Validação: R=0.61598
RNA ~= 0.45*Alvo + -0.061
Teste: R=0.62429
RNA ~= 0.47*Alvo + -0.14
Todos: R=0.79455
RNA ~= 0.62*Alvo + -0.057
SBBG – 2
Treinamento: R=0.75711
RNA ~= 0.5*Alvo + -0.025
Validação: R=0.42849
RNA ~= 0.31*Alvo + -0.02
Teste: R=0.34692
RNA ~= 0.2*Alvo + -0.065
Todos: R=0.6434
RNA ~= 0.42*Alvo + -0.029
SBBH – 3
Treinamento: R=0.83603
RNA ~= 0.67*Alvo + -0.0077
Validação: R=0.60262
RNA ~= 0.54*Alvo + 0.0055
Teste: R=0.71448
RNA ~= 0.5*Alvo + 0.025
Todos: R=0.76611
RNA ~= 0.62*Alvo + -0.00056
SBBR – 4
Treinamento: R=0.73488
RNA ~= 0.51*Alvo + 0.079
Validação: R=0.4915
RNA ~= 0.31*Alvo + 0.11
Teste: R=0.23148
RNA ~= 0.19*Alvo + 0.15
Todos: R=0.61672
RNA ~= 0.42*Alvo + 0.096
SBBU – 5
Treinamento: R=0.97731
RNA ~= 0.95*Alvo + -0.025
Validação: R=0.8252
RNA ~= 0.7*Alvo + -0.16
Teste: R=0.82685
RNA ~= 0.75*Alvo + -0.18
Todos: R=0.93433
RNA ~= 0.88*Alvo + -0.063
SBBV – 6
Treinamento: R=0.95743
RNA ~= 0.86*Alvo + -0.021
Validação: R=0.89702
RNA ~= 0.83*Alvo + 0.0082
Teste: R=0.77334
RNA ~= 0.69*Alvo + -0.013
Todos: R=0.93004
RNA ~= 0.84*Alvo + -0.012
Dado
Ajuste
Y = T
Alvo

SBCG – 7
Treinamento: R=0.89986
RNA ~= 0.8*Alvo + 0.017
Validação: R=0.72205
RNA ~= 0.64*Alvo + 0.013
Teste: R=0.65812
RNA ~= 0.6*Alvo + 0.062
Todos: R=0.84297
RNA ~= 0.75*Alvo + 0.021
SBCR – 8
Treinamento: R=0.8081
RNA ~= 0.6*Alvo + -0.072
Validação: R=0.68573
RNA ~= 0.53*Alvo + -0.16
Teste: R=0.56281
RNA ~= 0.44*Alvo + -0.11
Todos: R=0.74596
RNA ~= 0.55*Alvo + -0.097
SBCT – 9
Treinamento: R=0.79035
RNA ~= 0.62*Alvo + 0.038
Validação: R=0.51725
RNA ~= 0.38*Alvo + 0.02
Teste: R=0.42534
RNA ~= 0.42*Alvo + 0.14
Todos: R=0.71052
RNA ~= 0.56*Alvo + 0.042
SBCY – 10
Treinamento: R=0.86432
RNA ~= 0.71*Alvo + 0.021
Validação: R=0.64493
RNA ~= 0.48*Alvo + 0.029
Teste: R=0.77263
RNA ~= 0.61*Alvo + 0.049
Todos: R=0.81023
RNA ~= 0.65*Alvo + 0.024
SBFL – 11
Treinamento: R=0.88509
RNA ~= 0.7*Alvo + 0.03
Validação: R=0.75991
RNA ~= 0.59*Alvo + 0.052
Teste: R=0.76045
RNA ~= 0.62*Alvo + 0.037
Todos: R=0.84376
RNA ~= 0.67*Alvo + 0.035
SBFZ – 12
Treinamento: R=0.91768
RNA ~= 0.82*Alvo + 0.009
Validação: R=0.84968
RNA ~= 0.86*Alvo + 0.051
Teste: R=0.89741
RNA ~= 0.94*Alvo + -0.055
Todos: R=0.89781
RNA ~= 0.83*Alvo + 0.011
Dado
Ajuste
Y = T
Alvo

SBGL – 13
Treinamento: R=0.88685
RNA ~= 0.79*Alvo + 0.0083
Validação: R=0.80477
RNA ~= 0.65*Alvo + -0.0068
Teste: R=0.82104
RNA ~= 0.8*Alvo + -0.019
Todos: R=0.8636
RNA ~= 0.76*Alvo + 0.0026
SBGO – 14
Treinamento: R=0.81288
RNA ~= 0.62*Alvo + 0.015
Validação: R=0.63161
RNA ~= 0.49*Alvo + -0.0029
Teste: R=0.75549
RNA ~= 0.5*Alvo + -0.04
Todos: R=0.77066
RNA ~= 0.58*Alvo + 0.0055
SBGR – 15
Treinamento: R=0.72946
RNA ~= 0.46*Alvo + -0.1
Validação: R=0.4428
RNA ~= 0.28*Alvo + -0.12
Teste: R=0.44108
RNA ~= 0.33*Alvo + -0.16
Todos: R=0.64514
RNA ~= 0.42*Alvo + -0.11
SBIL – 16
Treinamento: R=0.8017
RNA ~= 0.64*Alvo + -0.072
Validação: R=0.6125
RNA ~= 0.48*Alvo + -0.09
Teste: R=0.67115
RNA ~= 0.51*Alvo + -0.12
Todos: R=0.74453
RNA ~= 0.59*Alvo + -0.081
SBJR – 17
Treinamento: R=0.94088
RNA ~= 0.84*Alvo + -0.009
Validação: R=0.85852
RNA ~= 0.67*Alvo + -0.084
Teste: R=0.77797
RNA ~= 0.65*Alvo + -0.073
Todos: R=0.89434
RNA ~= 0.76*Alvo + -0.032
SBKG – 18
Treinamento: R=0.80522
RNA ~= 0.55*Alvo + -0.1
Validação: R=0.67006
RNA ~= 0.5*Alvo + -0.13
Teste: R=0.62044
RNA ~= 0.45*Alvo + -0.085
Todos: R=0.75629
RNA ~= 0.53*Alvo + -0.11
Dado
Ajuste
Y = T
Alvo

SBKP – 19
Treinamento: R=0.80597
RNA ~= 0.57*Alvo + -0.05
Validação: R=0.51362
RNA ~= 0.33*Alvo + -0.1
Teste: R=0.59174
RNA ~= 0.39*Alvo + -0.024
Todos: R=0.73055
RNA ~= 0.5*Alvo + -0.059
SBLO – 20
Treinamento: R=0.85407
RNA ~= 0.68*Alvo + -0.02
Validação: R=0.68323
RNA ~= 0.49*Alvo + -0.033
Teste: R=0.55518
RNA ~= 0.44*Alvo + 0.005
Todos: R=0.78399
RNA ~= 0.61*Alvo + -0.019
SBLP - 21
Treinamento: R=0.92551
RNA ~= 0.82*Alvo + 0.003
Validação: R=0.72408
RNA ~= 0.73*Alvo + -0.067
Teste: R=0.4534
RNA ~= 0.44*Alvo + 0.0056
Todos: R=0.83426
RNA ~= 0.77*Alvo + -0.0083
SBMN - 22
Treinamento: R=0.89834
RNA ~= 0.75*Alvo + -0.054
Validação: R=0.78788
RNA ~= 0.64*Alvo + -0.079
Teste: R=0.66736
RNA ~= 0.56*Alvo + -0.088
Todos: R=0.85423
RNA ~= 0.71*Alvo + -0.062
SBMO – 23
Treinamento: R=0.91416
RNA ~= 0.79*Alvo + 0.0054
Validação: R=0.79178
RNA ~= 0.63*Alvo + 0.035
Teste: R=0.87614
RNA ~= 0.67*Alvo + 0.059
Todos: R=0.88666
RNA ~= 0.74*Alvo + 0.019
SBMQ – 24
Treinamento: R=0.88493
RNA ~= 0.69*Alvo + -0.045
Validação: R=0.73739
RNA ~= 0.55*Alvo + -0.088
Teste: R=0.81014
RNA ~= 0.76*Alvo + 0.014
Todos: R=0.8433
RNA ~= 0.67*Alvo + -0.048
Dado
Ajuste
Y = T
Alvo

SBMS – 25
Treinamento: R=0.83962
RNA ~= 0.65*Alvo + -0.061
Validação: R=0.6573
RNA ~= 0.56*Alvo + -0.046
Teste: R=0.3079
RNA ~= 0.28*Alvo + -0.087
Todos: R=0.75219
RNA ~= 0.6*Alvo + -0.06
SBNT – 26
Treinamento: R=0.80416
RNA ~= 0.6*Alvo + 0.023
Validação: R=0.63963
RNA ~= 0.55*Alvo + 0.0059
Teste: R=0.70444
RNA ~= 0.52*Alvo + 0.059
Todos: R=0.76041
RNA ~= 0.58*Alvo + 0.022
SBOI – 27
Treinamento: R=0.86357
RNA ~= 0.73*Alvo + -0.0081
Validação: R=0.80865
RNA ~= 0.73*Alvo + 0.032
Teste: R=0.6594
RNA ~= 0.72*Alvo + 0.076
Todos: R=0.83731
RNA ~= 0.72*Alvo + 0.0082
SBPA – 28
Treinamento: R=0.94362
RNA ~= 0.82*Alvo + 0.015
Validação: R=0.65486
RNA ~= 0.55*Alvo + -0.031
Teste: R=0.7766
RNA ~= 0.73*Alvo + -0.0037
Todos: R=0.87658
RNA ~= 0.76*Alvo + 0.0054
SBPB – 29
Treinamento: R=0.7859
RNA ~= 0.57*Alvo + -0.014
Validação: R=0.51896
RNA ~= 0.37*Alvo + -0.022
Teste: R=0.65273
RNA ~= 0.44*Alvo + -0.076
Todos: R=0.70901
RNA ~= 0.51*Alvo + -0.021
SBPK – 30
Treinamento: R=0.78872
RNA ~= 0.56*Alvo + -0.089
Validação: R=0.41519
RNA ~= 0.29*Alvo + -0.11
Teste: R=0.47964
RNA ~= 0.32*Alvo + -0.17
Todos: R=0.69559
RNA ~= 0.49*Alvo + -0.1
Dado
Ajuste
Y = T
Alvo

SBPV – 31
Treinamento: R=0.79868
RNA ~= 0.6*Alvo + 0.0042
Validação: R=0.71637
RNA ~= 0.53*Alvo + 0.041
Teste: R=0.58368
RNA ~= 0.44*Alvo + 0.027
Todos: R=0.76046
RNA ~= 0.57*Alvo + 0.013
SBRF – 32
Treinamento: R=0.79868
RNA ~= 0.6*Alvo + 0.0042
Validação: R=0.71637
RNA ~= 0.53*Alvo + 0.041
Teste: R=0.58368
RNA ~= 0.44*Alvo + 0.027
Todos: R=0.76046
RNA ~= 0.57*Alvo + 0.013
SBSL – 33
Treinamento: R=0.91997
RNA ~= 0.83*Alvo + 0.021
Validação: R=0.70504
RNA ~= 0.61*Alvo + 0.076
Teste: R=0.5566
RNA ~= 0.55*Alvo + 0.073
Todos: R=0.84898
RNA ~= 0.77*Alvo + 0.03
SBSM – 34
Treinamento: R=0.92163
RNA ~= 0.8*Alvo + 0.012
Validação: R=0.65164
RNA ~= 0.57*Alvo + -0.04
Teste: R=0.72618
RNA ~= 0.77*Alvo + -0.037
Todos: R=0.84524
RNA ~= 0.76*Alvo + -0.00094
SBSN – 35
Treinamento: R=0.92616
RNA ~= 0.82*Alvo + -0.018
Validação: R=0.75724
RNA ~= 0.65*Alvo + -0.077
Teste: R=0.73632
RNA ~= 0.68*Alvo + -0.0083
Todos: R=0.86839
RNA ~= 0.77*Alvo + -0.029
SBST – 36
Treinamento: R=0.92452
RNA ~= 0.81*Alvo + -0.03
Validação: R=0.90621
RNA ~= 0.78*Alvo + -0.037
Teste: R=0.82828
RNA ~= 0.72*Alvo + -0.056
Todos: R=0.91148
RNA ~= 0.79*Alvo + -0.035
Dado
Ajuste
Y = T
Alvo

SBTE – 37
Treinamento: R=0.85053
RNA ~= 0.6*Alvo + -0.12
Validação: R=0.46203
RNA ~= 0.39*Alvo + -0.1
Teste: R=0.66489
RNA ~= 0.55*Alvo + -0.0088
Todos: R=0.72097
RNA ~= 0.55*Alvo + -0.11
SBTS – 38
Treinamento: R=0.85035
RNA ~= 0.62*Alvo + -0.076
Validação: R=0.46741
RNA ~= 0.4*Alvo + -0.12
Teste: R=0.477
RNA ~= 0.46*Alvo + -0.08
Todos: R=0.74481
RNA ~= 0.57*Alvo + -0.082
SBUG – 39
Treinamento: R=0.83176
RNA ~= 0.62*Alvo + -0.005
Validação: R=0.62166
RNA ~= 0.56*Alvo + 0.049
Teste: R=0.64179
RNA ~= 0.42*Alvo + -0.0014
Todos: R=0.75611
RNA ~= 0.58*Alvo + 0.0062
SBUL – 40
Treinamento: R=0.95813
RNA ~= 0.91*Alvo + 0.012
Validação: R=0.63459
RNA ~= 0.51*Alvo + 0.11
Teste: R=0.84118
RNA ~= 0.95*Alvo + 0.14
Todos: R=0.87392
RNA ~= 0.83*Alvo + 0.047
SBUR – 41
Treinamento: R=0.98913
RNA ~= 0.94*Alvo + -0.00031
Validação: R=0.52562
RNA ~= 0.48*Alvo + -0.062
Teste: R=0.75987
RNA ~= 0.7*Alvo + 0.068
Todos: R=0.88226
RNA ~= 0.83*Alvo + -0.0089
SBVT – 42
Treinamento: R=0.88053
RNA ~= 0.71*Alvo + -0.099
Validação: R=0.6902
RNA ~= 0.57*Alvo + -0.12
Teste: R=0.779
RNA ~= 0.61*Alvo + -0.16
Todos: R=0.83206
RNA ~= 0.67*Alvo + -0.11
Dado
Ajuste
Y = T
Alvo

APÊNDICE D

Estação SBAR
R: OBSxETA = 0.28
R: OBSxRNA = 0.79
Viés: OBSxETA = 0.23
Viés: OBSxRNA = 0
RMSE: OBSxETA = 0.17
RMSE: OBSxRNA = 0.08
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Vento 10m - Modelo Eta
Vento 10m - Observado
Vento 10m - RNA

Estação SBAR
R: OBSxETA = -0.03
R: OBSxRNA = 0.56
Viés: OBSxETA = 1.85
Viés: OBSxRNA = -0.01
RMSE: OBSxETA = 0.87
RMSE: OBSxRNA = 0.08
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Vento 10m - Modelo Eta
Vento 10m - Observado
Vento 10m - RNA

Estação SBBG
R: OBSxETA = 0.28
R: OBSxRNA = 0.64
Viés: OBSxETA = -1.46
Viés: OBSxRNA = -0.06
RMSE: OBSxETA = 0.29
RMSE: OBSxRNA = 0.1
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Vento 10m - Modelo Eta
Vento 10m - Observado
Vento 10m - RNA

Estação SBBG
R: OBSxETA = 0.15
R: OBSxRNA = 0.51
Viés: OBSxETA = 1.84
Viés: OBSxRNA = -0.01
RMSE: OBSxETA = 0.89
RMSE: OBSxRNA = 0.12
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Vento 10m - Modelo Eta
Vento 10m - Observado
Vento 10m - RNA

Estação SBBH
R: OBSxETA = 0.35
R: OBSxRNA = 0.77
Viés: OBSxETA = -1.73
Viés: OBSxRNA = -0.04
RMSE: OBSxETA = 0.4
RMSE: OBSxRNA = 0.08
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Vento 10m - Modelo Eta
Vento 10m - Observado
Vento 10m - RNA

Estação SBBH
R: OBSxETA = 0.12
R: OBSxRNA = 0.86
Viés: OBSxETA = 1.08
Viés: OBSxRNA = 0.01
RMSE: OBSxETA = 0.66
RMSE: OBSxRNA = 0.08
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Vento 10m - Modelo Eta
Vento 10m - Observado
Vento 10m - RNA

Estação SBBR
R: OBSxETA = -0.01
R: OBSxRNA = 0.62
Viés: OBSxETA = -1.28
Viés: OBSxRNA = 0.01
RMSE: OBSxETA = 0.32
RMSE: OBSxRNA = 0.11
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Vento 10m - Modelo Eta
Vento 10m - Observado
Vento 10m - RNA

Estação SBBR
R: OBSxETA = -0.03
R: OBSxRNA = 0.65
Viés: OBSxETA = 1.72
Viés: OBSxRNA = 0
RMSE: OBSxETA = 0.93
RMSE: OBSxRNA = 0.09
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Vento 10m - Modelo Eta
Vento 10m - Observado
Vento 10m - RNA

Estação SBBU
R: OBSxETA = 0.19
R: OBSxRNA = 0.93
Viés: OBSxETA = -2.71
Viés: OBSxRNA = -0.07
RMSE: OBSxETA = 0.51
RMSE: OBSxRNA = 0.09
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Vento 10m - Modelo Eta
Vento 10m - Observado
Vento 10m - RNA

Estação SBBU
R: OBSxETA = 0.22
R: OBSxRNA = 0.84
Viés: OBSxETA = 0.94
Viés: OBSxRNA = 0
RMSE: OBSxETA = 0.47
RMSE: OBSxRNA = 0.08
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Vento 10m - Modelo Eta
Vento 10m - Observado
Vento 10m - RNA

Estação SBBV
R: OBSxETA = 0.69
R: OBSxRNA = 0.93
Viés: OBSxETA = -2.75
Viés: OBSxRNA = -0.04
RMSE: OBSxETA = 0.43
RMSE: OBSxRNA = 0.1
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Vento 10m - Modelo Eta
Vento 10m - Observado
Vento 10m - RNA

Estação SBBV
R: OBSxETA = 0.49
R: OBSxRNA = 0.76
Viés: OBSxETA = 0.79
Viés: OBSxRNA = -0.02
RMSE: OBSxETA = 0.4
RMSE: OBSxRNA = 0.14
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Vento 10m - Modelo Eta
Vento 10m - Observado
Vento 10m - RNA

Estação SBCG
R: OBSxETA = 0.29
R: OBSxRNA = 0.84
Viés: OBSxETA = -3.35
Viés: OBSxRNA = 0.07
RMSE: OBSxETA = 0.49
RMSE: OBSxRNA = 0.1
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Vento 10m - Modelo Eta
Vento 10m - Observado
Vento 10m - RNA

Estação SBCG
R: OBSxETA = 0.18
R: OBSxRNA = 0.62
Viés: OBSxETA = 1.23
Viés: OBSxRNA = 0.01
RMSE: OBSxETA = 0.57
RMSE: OBSxRNA = 0.13
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Vento 10m - Modelo Eta
Vento 10m - Observado
Vento 10m - RNA

Estação SBCR
R: OBSxETA = 0.11
R: OBSxRNA = 0.75
Viés: OBSxETA = -0.01
Viés: OBSxRNA = 0.02
RMSE: OBSxETA = 0.21
RMSE: OBSxRNA = 0.08
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Vento 10m - Modelo Eta
Vento 10m - Observado
Vento 10m - RNA

Estação SBCR
R: OBSxETA = 0.04
R: OBSxRNA = 0.79
Viés: OBSxETA = 1.42
Viés: OBSxRNA = -0.02
RMSE: OBSxETA = 0.61
RMSE: OBSxRNA = 0.09
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Vento 10m - Modelo Eta
Vento 10m - Observado
Vento 10m - RNA

Estação SBCT
R: OBSxETA = 0.38
R: OBSxRNA = 0.71
Viés: OBSxETA = -1.75
Viés: OBSxRNA = 0.03
RMSE: OBSxETA = 0.32
RMSE: OBSxRNA = 0.08
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Vento 10m - Modelo Eta
Vento 10m - Observado
Vento 10m - RNA

Estação SBCT
R: OBSxETA = 0.12
R: OBSxRNA = 0.66
Viés: OBSxETA = 1.92
Viés: OBSxRNA = 0
RMSE: OBSxETA = 1.09
RMSE: OBSxRNA = 0.09
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Vento 10m - Modelo Eta
Vento 10m - Observado
Vento 10m - RNA

Estação SBCY
R: OBSxETA = 0.19
R: OBSxRNA = 0.81
Viés: OBSxETA = -1.53
Viés: OBSxRNA = -0.01
RMSE: OBSxETA = 0.37
RMSE: OBSxRNA = 0.09
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Vento 10m - Modelo Eta
Vento 10m - Observado
Vento 10m - RNA

Estação SBCY
R: OBSxETA = -0.02
R: OBSxRNA = 0.54
Viés: OBSxETA = 0.79
Viés: OBSxRNA = 0.02
RMSE: OBSxETA = 0.44
RMSE: OBSxRNA = 0.11
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Vento 10m - Modelo Eta
Vento 10m - Observado
Vento 10m - RNA

Estação SBFL
R: OBSxETA = 0.25
R: OBSxRNA = 0.84
Viés: OBSxETA = -2.79
Viés: OBSxRNA = 0.02
RMSE: OBSxETA = 0.44
RMSE: OBSxRNA = 0.07
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Vento 10m - Modelo Eta
Vento 10m - Observado
Vento 10m - RNA

Estação SBFL
R: OBSxETA = 0.1
R: OBSxRNA = 0.68
Viés: OBSxETA = 1.53
Viés: OBSxRNA = 0.01
RMSE: OBSxETA = 0.94
RMSE: OBSxRNA = 0.11
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Vento 10m - Modelo Eta
Vento 10m - Observado
Vento 10m - RNA

Estação SBFZ
R: OBSxETA = 0.54
R: OBSxRNA = 0.9
Viés: OBSxETA = 0.05
Viés: OBSxRNA = 0.02
RMSE: OBSxETA = 0.25
RMSE: OBSxRNA = 0.09
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Vento 10m - Modelo Eta
Vento 10m - Observado
Vento 10m - RNA

Estação SBFZ
R: OBSxETA = 0.27
R: OBSxRNA = 0.85
Viés: OBSxETA = 5.11
Viés: OBSxRNA = 0.02
RMSE: OBSxETA = 2.27
RMSE: OBSxRNA = 0.11
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Vento 10m - Modelo Eta
Vento 10m - Observado
Vento 10m - RNA

Estação SBGL
R: OBSxETA = 0.26
R: OBSxRNA = 0.86
Viés: OBSxETA = -2.27
Viés: OBSxRNA = 0.01
RMSE: OBSxETA = 0.41
RMSE: OBSxRNA = 0.07
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Vento 10m - Modelo Eta
Vento 10m - Observado
Vento 10m - RNA

Estação SBGL
R: OBSxETA = 0.1
R: OBSxRNA = 0.75
Viés: OBSxETA = 1.55
Viés: OBSxRNA = 0.01
RMSE: OBSxETA = 1
RMSE: OBSxRNA = 0.07
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Vento 10m - Modelo Eta
Vento 10m - Observado
Vento 10m - RNA

Estação SBGO
R: OBSxETA = 0.32
R: OBSxRNA = 0.77
Viés: OBSxETA = -2.06
Viés: OBSxRNA = 0.03
RMSE: OBSxETA = 0.43
RMSE: OBSxRNA = 0.09
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Vento 10m - Modelo Eta
Vento 10m - Observado
Vento 10m - RNA

Estação SBGO
R: OBSxETA = 0.11
R: OBSxRNA = 0.88
Viés: OBSxETA = 0.63
Viés: OBSxRNA = -0.01
RMSE: OBSxETA = 0.38
RMSE: OBSxRNA = 0.09
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Vento 10m - Modelo Eta
Vento 10m - Observado
Vento 10m - RNA

Estação SBGR
R: OBSxETA = 0.21
R: OBSxRNA = 0.65
Viés: OBSxETA = -1.3
Viés: OBSxRNA = 0.04
RMSE: OBSxETA = 0.27
RMSE: OBSxRNA = 0.11
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Vento 10m - Modelo Eta
Vento 10m - Observado
Vento 10m - RNA

Estação SBGR
R: OBSxETA = 0
R: OBSxRNA = 0.68
Viés: OBSxETA = 2.6
Viés: OBSxRNA = 0.01
RMSE: OBSxETA = 1.45
RMSE: OBSxRNA = 0.15
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Vento 10m - Modelo Eta
Vento 10m - Observado
Vento 10m - RNA

Estação SBIL
R: OBSxETA = -0.03
R: OBSxRNA = 0.74
Viés: OBSxETA = -0.24
Viés: OBSxRNA = 0.03
RMSE: OBSxETA = 0.2
RMSE: OBSxRNA = 0.1
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Vento 10m - Modelo Eta
Vento 10m - Observado
Vento 10m - RNA

Estação SBIL
R: OBSxETA = 0.16
R: OBSxRNA = 0.85
Viés: OBSxETA = 2.33
Viés: OBSxRNA = 0.01
RMSE: OBSxETA = 1.18
RMSE: OBSxRNA = 0.09
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Vento 10m - Modelo Eta
Vento 10m - Observado
Vento 10m - RNA

Estação SBJR
R: OBSxETA = 0.31
R: OBSxRNA = 0.89
Viés: OBSxETA = -0.9
Viés: OBSxRNA = -0.05
RMSE: OBSxETA = 0.22
RMSE: OBSxRNA = 0.06
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Vento 10m - Modelo Eta
Vento 10m - Observado
Vento 10m - RNA

Estação SBJR
R: OBSxETA = 0.23
R: OBSxRNA = 0.91
Viés: OBSxETA = 2.01
Viés: OBSxRNA = 0
RMSE: OBSxETA = 0.92
RMSE: OBSxRNA = 0.07
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Vento 10m - Modelo Eta
Vento 10m - Observado
Vento 10m - RNA

Estação SBKG
R: OBSxETA = 0.19
R: OBSxRNA = 0.76
Viés: OBSxETA = -0.07
Viés: OBSxRNA = -0.03
RMSE: OBSxETA = 0.19
RMSE: OBSxRNA = 0.09
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Vento 10m - Modelo Eta
Vento 10m - Observado
Vento 10m - RNA

Estação SBKG
R: OBSxETA = 0.17
R: OBSxRNA = 0.89
Viés: OBSxETA = 2.66
Viés: OBSxRNA = 0.04
RMSE: OBSxETA = 1.08
RMSE: OBSxRNA = 0.08
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Vento 10m - Modelo Eta
Vento 10m - Observado
Vento 10m - RNA

Estação SBKP
R: OBSxETA = 0.37
R: OBSxRNA = 0.73
Viés: OBSxETA = -3.98
Viés: OBSxRNA = 0.05
RMSE: OBSxETA = 0.55
RMSE: OBSxRNA = 0.12
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Vento 10m - Modelo Eta
Vento 10m - Observado
Vento 10m - RNA

Estação SBKP
R: OBSxETA = 0.28
R: OBSxRNA = 0.71
Viés: OBSxETA = 1.36
Viés: OBSxRNA = 0.03
RMSE: OBSxETA = 0.66
RMSE: OBSxRNA = 0.11
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Vento 10m - Modelo Eta
Vento 10m - Observado
Vento 10m - RNA

Estação SBLO
R: OBSxETA = 0.28
R: OBSxRNA = 0.78
Viés: OBSxETA = -1.87
Viés: OBSxRNA = 0.03
RMSE: OBSxETA = 0.39
RMSE: OBSxRNA = 0.07
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Vento 10m - Modelo Eta
Vento 10m - Observado
Vento 10m - RNA

Estação SBLO
R: OBSxETA = 0.02
R: OBSxRNA = 0.82
Viés: OBSxETA = 1.46
Viés: OBSxRNA = 0
RMSE: OBSxETA = 0.83
RMSE: OBSxRNA = 0.08
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Vento 10m - Modelo Eta
Vento 10m - Observado
Vento 10m - RNA

Estação SBLP
R: OBSxETA = 0.29
R: OBSxRNA = 0.83
Viés: OBSxETA = -0.84
Viés: OBSxRNA = 0.03
RMSE: OBSxETA = 0.29
RMSE: OBSxRNA = 0.09
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Vento 10m - Modelo Eta
Vento 10m - Observado
Vento 10m - RNA

Estação SBLP
R: OBSxETA = -0.01
R: OBSxRNA = 0.95
Viés: OBSxETA = 0.78
Viés: OBSxRNA = 0.01
RMSE: OBSxETA = 0.5
RMSE: OBSxRNA = 0.08
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Vento 10m - Modelo Eta
Vento 10m - Observado
Vento 10m - RNA

Estação SBMN
R: OBSxETA = 0.1
R: OBSxRNA = 0.8
Viés: OBSxETA = -1.31
Viés: OBSxRNA = 0.04
RMSE: OBSxETA = 0.33
RMSE: OBSxRNA = 0.08
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Vento 10m - Modelo Eta
Vento 10m - Observado
Vento 10m - RNA

Estação SBMN
R: OBSxETA = 0.1
R: OBSxRNA = 0.86
Viés: OBSxETA = 0.69
Viés: OBSxRNA = -0.02
RMSE: OBSxETA = 0.41
RMSE: OBSxRNA = 0.08
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Vento 10m - Modelo Eta
Vento 10m - Observado
Vento 10m - RNA

Estação SBMO
R: OBSxETA = 0.38
R: OBSxRNA = 0.85
Viés: OBSxETA = -1.1
Viés: OBSxRNA = 0.05
RMSE: OBSxETA = 0.25
RMSE: OBSxRNA = 0.08
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Vento 10m - Modelo Eta
Vento 10m - Observado
Vento 10m - RNA

Estação SBMO
R: OBSxETA = 0.25
R: OBSxRNA = 0.82
Viés: OBSxETA = 1.25
Viés: OBSxRNA = -0.01
RMSE: OBSxETA = 0.62
RMSE: OBSxRNA = 0.07
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Vento 10m - Modelo Eta
Vento 10m - Observado
Vento 10m - RNA

Estação SBMQ
R: OBSxETA = 0.45
R: OBSxRNA = 0.89
Viés: OBSxETA = -0.75
Viés: OBSxRNA = 0.03
RMSE: OBSxETA = 0.24
RMSE: OBSxRNA = 0.07
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Vento 10m - Modelo Eta
Vento 10m - Observado
Vento 10m - RNA

Estação SBMQ
R: OBSxETA = 0.48
R: OBSxRNA = 0.94
Viés: OBSxETA = 1.35
Viés: OBSxRNA = -0.01
RMSE: OBSxETA = 0.7
RMSE: OBSxRNA = 0.05
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Vento 10m - Modelo Eta
Vento 10m - Observado
Vento 10m - RNA

Estação SBMS
R: OBSxETA = 0.55
R: OBSxRNA = 0.84
Viés: OBSxETA = -0.07
Viés: OBSxRNA = 0.03
RMSE: OBSxETA = 0.19
RMSE: OBSxRNA = 0.11
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Vento 10m - Modelo Eta
Vento 10m - Observado
Vento 10m - RNA

Estação SBMS
R: OBSxETA = 0.39
R: OBSxRNA = 0.77
Viés: OBSxETA = 2.8
Viés: OBSxRNA = 0
RMSE: OBSxETA = 1.34
RMSE: OBSxRNA = 0.1
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Vento 10m - Modelo Eta
Vento 10m - Observado
Vento 10m - RNA

Estação SBNT
R: OBSxETA = 0.23
R: OBSxRNA = 0.75
Viés: OBSxETA = 1.9
Viés: OBSxRNA = 0.04
RMSE: OBSxETA = 0.41
RMSE: OBSxRNA = 0.13
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Vento 10m - Modelo Eta
Vento 10m - Observado
Vento 10m - RNA

Estação SBNT
R: OBSxETA = 0.09
R: OBSxRNA = 0.67
Viés: OBSxETA = 5.86
Viés: OBSxRNA = 0.01
RMSE: OBSxETA = 3
RMSE: OBSxRNA = 0.13
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Vento 10m - Modelo Eta
Vento 10m - Observado
Vento 10m - RNA

Estação SBOI
R: OBSxETA = 0.01
R: OBSxRNA = 0.76
Viés: OBSxETA = -0.31
Viés: OBSxRNA = 0
RMSE: OBSxETA = 0.3
RMSE: OBSxRNA = 0.1
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Vento 10m - Modelo Eta
Vento 10m - Observado
Vento 10m - RNA

Estação SBOI
R: OBSxETA = 0.03
R: OBSxRNA = 0.84
Viés: OBSxETA = 1.64
Viés: OBSxRNA = 0.03
RMSE: OBSxETA = 0.8
RMSE: OBSxRNA = 0.1
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Vento 10m - Modelo Eta
Vento 10m - Observado
Vento 10m - RNA

Estação SBPA
R: OBSxETA = 0.45
R: OBSxRNA = 0.84
Viés: OBSxETA = -2.79
Viés: OBSxRNA = 0.04
RMSE: OBSxETA = 0.47
RMSE: OBSxRNA = 0.1
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Vento 10m - Modelo Eta
Vento 10m - Observado
Vento 10m - RNA

Estação SBPA
R: OBSxETA = 0.15
R: OBSxRNA = 0.77
Viés: OBSxETA = 1.34
Viés: OBSxRNA = 0
RMSE: OBSxETA = 0.87
RMSE: OBSxRNA = 0.14
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Vento 10m - Modelo Eta
Vento 10m - Observado
Vento 10m - RNA

Estação SBPB
R: OBSxETA = 0.59
R: OBSxRNA = 0.88
Viés: OBSxETA = -0.61
Viés: OBSxRNA = 0.01
RMSE: OBSxETA = 0.29
RMSE: OBSxRNA = 0.11
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Vento 10m - Modelo Eta
Vento 10m - Observado
Vento 10m - RNA

Estação SBPB
R: OBSxETA = 0.6
R: OBSxRNA = 0.91
Viés: OBSxETA = 2.38
Viés: OBSxRNA = 0
RMSE: OBSxETA = 0.94
RMSE: OBSxRNA = 0.11
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Vento 10m - Modelo Eta
Vento 10m - Observado
Vento 10m - RNA

Estação SBPK
R: OBSxETA = 0.42
R: OBSxRNA = 0.71
Viés: OBSxETA = -1.06
Viés: OBSxRNA = 0
RMSE: OBSxETA = 0.24
RMSE: OBSxRNA = 0.11
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Vento 10m - Modelo Eta
Vento 10m - Observado
Vento 10m - RNA

Estação SBPK
R: OBSxETA = 0.32
R: OBSxRNA = 0.71
Viés: OBSxETA = 1.73
Viés: OBSxRNA = -0.02
RMSE: OBSxETA = 0.79
RMSE: OBSxRNA = 0.1
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Vento 10m - Modelo Eta
Vento 10m - Observado
Vento 10m - RNA

Estação SBPV
R: OBSxETA = 0.02
R: OBSxRNA = 0.7
Viés: OBSxETA = -1.26
Viés: OBSxRNA = -0.05
RMSE: OBSxETA = 0.35
RMSE: OBSxRNA = 0.08
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Vento 10m - Modelo Eta
Vento 10m - Observado
Vento 10m - RNA

Estação SBPV
R: OBSxETA = 0.12
R: OBSxRNA = 0.83
Viés: OBSxETA = 0.38
Viés: OBSxRNA = 0
RMSE: OBSxETA = 0.28
RMSE: OBSxRNA = 0.08
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Vento 10m - Modelo Eta
Vento 10m - Observado
Vento 10m - RNA

Estação SBRF
R: OBSxETA = 0.07
R: OBSxRNA = 0.76
Viés: OBSxETA = -0.42
Viés: OBSxRNA = 0.03
RMSE: OBSxETA = 0.19
RMSE: OBSxRNA = 0.09
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Vento 10m - Modelo Eta
Vento 10m - Observado
Vento 10m - RNA

Estação SBRF
R: OBSxETA = -0.08
R: OBSxRNA = 0.68
Viés: OBSxETA = 2.22
Viés: OBSxRNA = -0.01
RMSE: OBSxETA = 1.1
RMSE: OBSxRNA = 0.1
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Vento 10m - Modelo Eta
Vento 10m - Observado
Vento 10m - RNA

Estação SBSL
R: OBSxETA = 0.48
R: OBSxRNA = 0.85
Viés: OBSxETA = -0.46
Viés: OBSxRNA = 0.07
RMSE: OBSxETA = 0.31
RMSE: OBSxRNA = 0.12
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Vento 10m - Modelo Eta
Vento 10m - Observado
Vento 10m - RNA

Estação SBSL
R: OBSxETA = 0.27
R: OBSxRNA = 0.86
Viés: OBSxETA = 3.69
Viés: OBSxRNA = -0.02
RMSE: OBSxETA = 1.8
RMSE: OBSxRNA = 0.1
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Vento 10m - Modelo Eta
Vento 10m - Observado
Vento 10m - RNA

Estação SBSM
R: OBSxETA = 0.26
R: OBSxRNA = 0.85
Viés: OBSxETA = -2.4
Viés: OBSxRNA = 0.03
RMSE: OBSxETA = 0.43
RMSE: OBSxRNA = 0.1
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Vento 10m - Modelo Eta
Vento 10m - Observado
Vento 10m - RNA

Estação SBSM
R: OBSxETA = 0.19
R: OBSxRNA = 0.78
Viés: OBSxETA = 1.62
Viés: OBSxRNA = 0.03
RMSE: OBSxETA = 0.87
RMSE: OBSxRNA = 0.11
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Vento 10m - Modelo Eta
Vento 10m - Observado
Vento 10m - RNA

Estação SBSN
R: OBSxETA = 0.04
R: OBSxRNA = 0.87
Viés: OBSxETA = -2.1
Viés: OBSxRNA = 0
RMSE: OBSxETA = 0.45
RMSE: OBSxRNA = 0.07
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Vento 10m - Modelo Eta
Vento 10m - Observado
Vento 10m - RNA

Estação SBSN
R: OBSxETA = 0.13
R: OBSxRNA = 0.82
Viés: OBSxETA = 0.54
Viés: OBSxRNA = 0
RMSE: OBSxETA = 0.42
RMSE: OBSxRNA = 0.09
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Vento 10m - Modelo Eta
Vento 10m - Observado
Vento 10m - RNA

Estação SBST
R: OBSxETA = 0.12
R: OBSxRNA = 0.91
Viés: OBSxETA = -1.68
Viés: OBSxRNA = 0.01
RMSE: OBSxETA = 0.45
RMSE: OBSxRNA = 0.12
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Vento 10m - Modelo Eta
Vento 10m - Observado
Vento 10m - RNA

Estação SBST
R: OBSxETA = 0.01
R: OBSxRNA = 0.92
Viés: OBSxETA = 1.08
Viés: OBSxRNA = -0.01
RMSE: OBSxETA = 0.58
RMSE: OBSxRNA = 0.08
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Vento 10m - Modelo Eta
Vento 10m - Observado
Vento 10m - RNA

Estação SBTE
R: OBSxETA = 0.36
R: OBSxRNA = 0.72
Viés: OBSxETA = -0.57
Viés: OBSxRNA = 0
RMSE: OBSxETA = 0.3
RMSE: OBSxRNA = 0.08
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Vento 10m - Modelo Eta
Vento 10m - Observado
Vento 10m - RNA

Estação SBTE
R: OBSxETA = 0.03
R: OBSxRNA = 0.69
Viés: OBSxETA = 0.36
Viés: OBSxRNA = 0
RMSE: OBSxETA = 0.4
RMSE: OBSxRNA = 0.08
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Vento 10m - Modelo Eta
Vento 10m - Observado
Vento 10m - RNA

Estação SBTS
R: OBSxETA = 0.27
R: OBSxRNA = 0.74
Viés: OBSxETA = 0.45
Viés: OBSxRNA = -0.04
RMSE: OBSxETA = 0.3
RMSE: OBSxRNA = 0.11
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Vento 10m - Modelo Eta
Vento 10m - Observado
Vento 10m - RNA

Estação SBTS
R: OBSxETA = 0.13
R: OBSxRNA = 0.81
Viés: OBSxETA = 2.31
Viés: OBSxRNA = -0.01
RMSE: OBSxETA = 1.04
RMSE: OBSxRNA = 0.11
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Vento 10m - Modelo Eta
Vento 10m - Observado
Vento 10m - RNA

Estação SBUG
R: OBSxETA = 0.31
R: OBSxRNA = 0.76
Viés: OBSxETA = -2
Viés: OBSxRNA = 0
RMSE: OBSxETA = 0.34
RMSE: OBSxRNA = 0.1
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Vento 10m - Modelo Eta
Vento 10m - Observado
Vento 10m - RNA

Estação SBUG
R: OBSxETA = 0.31
R: OBSxRNA = 0.67
Viés: OBSxETA = 2.19
Viés: OBSxRNA = -0.02
RMSE: OBSxETA = 0.97
RMSE: OBSxRNA = 0.12
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Vento 10m - Modelo Eta
Vento 10m - Observado
Vento 10m - RNA

Estação SBUL
R: OBSxETA = 0.34
R: OBSxRNA = 0.87
Viés: OBSxETA = -1.47
Viés: OBSxRNA = 0.08
RMSE: OBSxETA = 0.33
RMSE: OBSxRNA = 0.07
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Vento 10m - Modelo Eta
Vento 10m - Observado
Vento 10m - RNA

Estação SBUL
R: OBSxETA = 0.16
R: OBSxRNA = 0.89
Viés: OBSxETA = 1.22
Viés: OBSxRNA = 0.02
RMSE: OBSxETA = 0.67
RMSE: OBSxRNA = 0.11
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Vento 10m - Modelo Eta
Vento 10m - Observado
Vento 10m - RNA

Estação SBUR
R: OBSxETA = 0.53
R: OBSxRNA = 0.88
Viés: OBSxETA = -1.29
Viés: OBSxRNA = 0
RMSE: OBSxETA = 0.32
RMSE: OBSxRNA = 0.06
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Vento 10m - Modelo Eta
Vento 10m - Observado
Vento 10m - RNA

Estação SBUR
R: OBSxETA = 0.08
R: OBSxRNA = 0.89
Viés: OBSxETA = 1.41
Viés: OBSxRNA = 0
RMSE: OBSxETA = 0.92
RMSE: OBSxRNA = 0.06
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Vento 10m - Modelo Eta
Vento 10m - Observado
Vento 10m - RNA

Estação SBVT
R: OBSxETA = 0.45
R: OBSxRNA = 0.83
Viés: OBSxETA = -1.42
Viés: OBSxRNA = -0.1
RMSE: OBSxETA = 0.26
RMSE: OBSxRNA = 0.11
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Vento 10m - Modelo Eta
Vento 10m - Observado
Vento 10m - RNA

Estação SBVT
R: OBSxETA = 0.23
R: OBSxRNA = 0.68
Viés: OBSxETA = 3.14
Viés: OBSxRNA = -0.03
RMSE: OBSxETA = 1.51
RMSE: OBSxRNA = 0.09
Velocidade do vento (m/s)
Tempo (anos)
Vento 10m - Modelo Eta
Vento 10m - Observado
Vento 10m - RNA

ANEXO - A

Sigla da variável	Variável	Unidade
PSLM	Pressão ao nível do mar	*(hPa)*
PSLC	Pressão à superfície	*(hPa)*
TP2M	Temperatura a 2 metros acima da superfície	*(K)*
MXTP	Temperatura máxima	*(K)*
MNTP	Temperatura mínima	*(K)*
DP2M	Temperatura do ponto de orvalho a 2 metros acima da superfície	*(K)*
U10M	Componente zonal do vento a 10 metros acima da superfície	*(m/s)*
V10M	Componente meridional do vento a 10 metros acima da superfície	*(m/s)*
U100	Componente zonal do vento a 100 metros acima da superfície	*(m/s)*
V100	Componente meridional do vento a 100 metros acima da superfície	*(m/s)*
PREC	Precipitação total em 6 horas	*(m)*
PRCV	Precipitação convectiva em 6 horas	*(m)*
PRGE	Precipitação de larga escala em 6 horas	*(m)*
NEVE	Precipitação de neve em 6 horas	*(m)*
CLSF	Fluxo de calor latente à superfície	$W.m^{-2}$
CSSF	Fluxo de calor sensível à superfície	$W.m^{-2}$
GHFL	Fluxo de calor para o solo	$W.m^{-2}$
TSFC	Temperatura da superfície	*(K)*
TGSC	Temperatura do solo 0.1m	*(K)*
TGRZ	Temperatura do solo 2.0m	*(K)*
USSL	Soil Moisture Cont. 0.1m	*(0-1)*
UZRS	Soil Moisture Cont. 2.0m	*(0-1)*
SMAV	Soil Moisture Avail	-
RNOF	Storm Sfc Rnoff 6h	-
RNSG	Storm Sfc Rnoff SG 6h	-
EVPP	Potencial Sfc Evaporation	*(m)*
LWNV	Low cloud fraction	*(-)*
MDNV	Mid cloud fraction	*(-)*
HINV	High cloud fraction	*(-)*
OCIS	Ave Incmg Sfc SW Rad	*(W/m2)*
OLIS	Ave Incmg Sfc LW Rad	*(W/m2)*
OCES	Ave Outgo Sfc SW Rad	*(W/m2)*
OLES	Ave Outgo Sfc LW Rad	*(W/m2)*
ROCE	Ave Outgo TOA SW Rad	*(W/m2)*
ROLE	Ave Outgo TOA LW Rad	*(W/m2)*
ALBE	Albedo a superfície	*(0-1 adimensional)*
CAPE	Energia potencial convectiva disponível	*(J/kg)*
AGPL	Água precipitável instantânea	*(mm)*

ZGEO	Altura geopotencial	*(m)*
UVEL	Vento zonal	*(m/s)*
VVEL	Vento meridional	*(m/s)*
TEMP	Temperatura	*(K)*
UMRL	Umidade relativa	*(%)*
OMEG	Ômega	*(hPa/s)*
UMES	Umidade	*(kg/kg)*