

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO

ROSE ANGELA HILDA WANZELER BRAGA

**VALIDAÇÃO DE DADOS DE VENTO DA REANÁLISE ERA5-LAND PARA
ESTIMATIVA DE POTENCIAL EÓLICO NO ESTADO DO RIO DE JANEIRO**

Macaé, dezembro de 2019

ROSE ANGELA HILDA WANZELER BRAGA

**VALIDAÇÃO DE DADOS DE VENTO DA REANÁLISE ERA5-LAND PARA
ESTIMATIVA DE POTENCIAL EÓLICO NO ESTADO DO RIO DE JANEIRO**

Monografia apresentada ao Laboratório de Meteorologia do Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para a conclusão do Curso de Pós-Graduação *Lato Sensu* em Clima, Água e Energia: uma Abordagem Técnica e Integrada.

Orientadora: Prof.^a Dra. Eliane Barbosa Santos

Coorientador: Prof. Me. Matheus Ferreira de Barros

Macaé, dezembro de 2019

ROSE ANGELA HILDA WANZELER BRAGA

**VALIDAÇÃO DE DADOS DE VENTO DA REANÁLISE ERA5-LAND PARA
ESTIMATIVA DE POTENCIAL EÓLICO NO ESTADO DO RIO DE JANEIRO**

Monografia apresentada ao Laboratório de Meteorologia do Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para a conclusão do Curso de Pós-Graduação *Lato Sensu* em Clima, Água e Energia: uma Abordagem Técnica e Integrada.

Aprovado em 18 de dezembro de 2019

BANCA EXAMINADORA

Prof. Isimar de Azevedo Santos, D.Sc., UENF

Prof. Rafael Malheiro da Silva do Amaral Ferreira, D.Sc., UFRJ

Prof. Matheus Ferreira de Barros, M.Sc., UFRJ
(Coorientador)

Prof.^a Eliane Barbosa Santos, D.Sc., UENF
(Orientadora)

Ao vento impetuoso
(Atos 2:1-4), dedico.

AGRADECIMENTOS

A *El Shaddai*, pelas abundantes promessas concretizadas.

À minha família, pelo apoio sempre presente, em especial aos meus filhos Gabriela, Arthur e Isabela, por me mostrarem o lado bom da vida.

Às integrantes da célula M12 *Hanukkah* Milagres, por sonharem comigo os sonhos de Deus.

À minha orientadora Profa. Dra. Eliane Barbosa Santos, pela admirável diligência ao me auxiliar neste desafio.

Ao meu coorientador, Prof. Me. Matheus Ferreira de Barros, pela sensata e relevante colaboração neste estudo.

À Profa. Dra. Maria Gertrudes Alvarez Justi da Silva, pela alegria inspiradora ao ensinar.

Aos demais professores dos eixos clima, água e energia, pela brilhante condução das disciplinas proporcionando a integração perfeita entre essas áreas.

À Universidade Estadual Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF) e à Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), pela excelente oportunidade concedida.

RESUMO

O potencial para geração de energia eólica no Brasil é crescente. Todavia, ainda é difícil encontrar regiões com disponibilidade de dados de vento consistentes e confiáveis. Uma solução alternativa para este problema é a utilização de dados de reanálise meteorológica. Diante disso, o objetivo principal deste trabalho foi avaliar a confiabilidade dos dados de vento da reanálise ERA5-Land visando obter uma avaliação preliminar do potencial eólico no estado do Rio de Janeiro. Para tanto, foram utilizados dados horários de velocidade e direção do vento de duas estações meteorológicas automáticas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), localizadas nos municípios de Macaé e Campos dos Goytacazes, nos períodos de 01/01/2007 a 31/12/2018 e de 01/01/2009 a 31/12/2018, respectivamente. Os dados do ERA5-Land foram extraídos, para os mesmos períodos, do ponto de grade mais próximo das duas estações meteorológicas selecionadas. O desempenho dos dados de reanálise foi avaliado através da evolução temporal, sazonal (por estação do ano) e horária (de 6 em 6 horas). Inicialmente, a comparação dos dados foi realizada com gráficos de análise descritiva. Em seguida, foram utilizadas métricas estatísticas que auxiliam na avaliação do grau de semelhança entre a reanálise e a observação. Por fim, foi calculada a densidade de potência dos dois conjuntos de dados. De acordo com os resultados obtidos, há uma boa concordância entre os dados observados e os de reanálise ao longo de todo o período analisado. Os dados da reanálise ERA5-Land conseguem reproduzir os ciclos sazonais e horários da velocidade do vento nas duas regiões estudadas, assim como o comportamento geral da série temporal. No entanto, o ERA5-Land apresentou tendência de superestimar a velocidade do vento. Com isso, a densidade de potência estimada com base nos dados do ERA5-Land atingiu, em geral, aproximadamente o dobro do valor obtido quando estimado com base nos dados observados, deixando transparecer uma fragilidade quanto à aplicação em estudos de aproveitamento eólico.

Palavras-chave: Energia Eólica. Litoral Norte Fluminense. Densidade de Potência.

ABSTRACT

The potential for wind power generation in Brazil is increasing. However, regions with consistent and reliable wind data availability are still difficult to find. An alternative solution to this problem is the use of meteorological reanalysis data. Therefore, the main objective of this work was to evaluate the reliability of ERA5-Land reanalysis wind data, aiming to obtain a preliminary evaluation of the wind potential in the state of Rio de Janeiro. For that, hourly data of wind speed and direction were used from two automatic meteorological stations of the National Institute of Meteorology (INMET), located in the municipalities of Macaé and Campos dos Goytacazes, in the periods from 01/01/2007 to 12/31 / 2018 and from 01/01/2009 to 12/31/2018, respectively. ERA5-Land data were extracted, for the same periods, from the grid point closest to the two selected weather stations. The performance of the reanalysis data was evaluated by temporal, seasonal (by season) and hourly (every 6 hours) evolution. Initially, the data comparison was performed with descriptive analysis graphs. Then, statistical metrics were used to help assess the degree of similarity between reanalysis and observation. Finally, the power density of the two data sets was calculated. According to the results obtained, there is a good agreement between the observed data and the reanalysis data throughout the analyzed period. The ERA5-Land reanalysis data can reproduce the seasonal and hourly cycles of wind speed in the two regions studied, as well as the overall behavior of the time series. However, the ERA5-Land tended to overestimate wind speed. Thus, the power density estimated based on ERA5-Land data reached generally about twice the value when estimated on the basis of the observed data, showing a weakness in the application in wind farm studies.

Keywords: Wind Energy. Fluminense North Coast. Power Density.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mecanismo de formação dos ventos.	15
Figura 2. Representação esquemática da circulação geral da atmosfera.	16
Figura 3. a) Circulação em brisas marítimas e b) Circulação em brisas terrestres.	17
Figura 4. Comportamento do vento sob a influência das características do terreno.	18
Figura 5. Efeito do obstáculo sobre os ventos.	19
Figura 6. Aceleração orográfica em um morro.	19
Figura 7. Perfil vertical da velocidade do vento.	20
Figura 8. As classes de rugosidade e as paisagens adotadas pelo Atlas Eólico Europeu.	21
Figura 9. Evolução da geração eólica.	23
Figura 10. Matriz elétrica brasileira de 2012 e 2018.	23
Figura 11. Potência instalada (MW) e número de parques eólicos em operação no país.	24
Figura 12. Localização dos municípios e das estações meteorológicas utilizadas.	26
Figura 13. Boxplot da velocidade do vento (m/s) dos dados observados (INMET) e da reanálise (ERA5-Land), por estação do ano para: a) Macaé e b) Campos dos Goytacazes – São Tomé.	31
Figura 14. Frequência (%) da direção do vento dos dados observados (INMET) e da reanálise (ERA5-Land) por estação do ano para: a) Macaé e b) Campos dos Goytacazes – São Tomé.	33
Figura 15. Rosa dos ventos dos dados observados (INMET) e da reanálise (ERA5-Land) por estação do ano para Macaé: a) Verão (DJF), b) Outono (MAM), c) Inverno (JJA) e d) Primavera (SON).	34
Figura 16. Rosa dos ventos dos dados observados (INMET) e da reanálise (ERA5-Land) por estação do ano para Campos dos Goytacazes – São Tomé: a) Verão, b) Outono, c) Inverno e d) Primavera.	35
Figura 17. Boxplot da velocidade do vento (m/s) dos dados observados (INMET) e da reanálise (ERA5-Land), de 6 em 6 horas (UTC) para: a) Macaé e b) Campos dos Goytacazes – São Tomé.	36
Figura 18. Frequência (%) da direção do vento dos dados observados (INMET) e da reanálise (ERA5-Land) de 6 em 6 horas (UTC) para: a) Macaé e b) Campos dos Goytacazes – São Tomé.	38

Figura 19. Rosa dos ventos dos dados observados (INMET) e da reanálise (ERA5-Land) de 6 em 6 horas (UTC) para Macaé: a) 00-05 UTC, b) 06-11 UTC, c) 12-17 UTC e d) 18-23 UTC.	39
Figura 20. Rosa dos ventos dos dados observados (INMET) e da reanálise (ERA5-Land) de 6 em 6 horas (UTC) para Campos dos Goytacazes – São Tomé: a) 00-05 UTC, b) 06-11 UTC, c) 12-17 UTC e d) 18-23 UTC.	40
Figura 21. Série temporal da velocidade média mensal dos dados observados (INMET) e da reanálise (ERA5-Land) para: a) Macaé e b) Campos dos Goytacazes – São Tomé.	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Potencial eólico estimado no Brasil.....	23
Tabela 2. Código, coordenadas geográficas, altitude, período de análise e porcentagem de falhas das estações meteorológicas utilizadas neste estudo.	26
Tabela 3. Velocidade média (m/s) sazonal do vento dos dados observados (INMET) e da reanálise (ERA5-Land) para Macaé e Campos dos Goytacazes – São Tomé.....	32
Tabela 4. Velocidade média (m/s) horária do vento dos dados observados (INMET) e da reanálise (ERA5-Land) para Macaé e Campos dos Goytacazes – São Tomé.....	37
Tabela 5. Métricas estatísticas entre os dados observados (INMET) e da reanálise (ERA5-Land) para Macaé e Campos dos Goytacazes – São Tomé, para toda série temporal.	42
Tabela 6. Métricas estatísticas entre os dados observados (INMET) e da reanálise (ERA5-Land) para Macaé e Campos dos Goytacazes – São Tomé, por estação do ano.....	42
Tabela 7. Métricas estatísticas entre os dados observados (INMET) e da reanálise (ERA5-Land) para Macaé e Campos dos Goytacazes – São Tomé, de 6 em 6 horas (UTC).	43
Tabela 8. Velocidade média (m/s) dos dados observados (INMET) e da reanálise (ERA5-Land) para Macaé e Campos dos Goytacazes – São Tomé, nas alturas de 10, 50 e 100 metros.	43
Tabela 9. Densidade de Potência (DP) com base nos dados observados (INMET) e da reanálise (ERA5-Land) para Macaé e Campos dos Goytacazes – São Tomé, nas alturas de 10, 50 e 100 metros.	44
Tabela 10. Velocidade média (m/s) sazonal dos dados observados (INMET) e da reanálise (ERA5-Land) para Macaé e Campos dos Goytacazes – São Tomé, nas alturas de 10, 50 e 100 metros.	45
Tabela 11. Densidade de Potência (DP) sazonal com base nos dados observados (INMET) e da reanálise (ERA5-Land) para Macaé e Campos dos Goytacazes – São Tomé, nas alturas de 10, 50 e 100 metros.	45
Tabela 12. Velocidade média (m/s) horária dos dados observados (INMET) e da reanálise (ERA5-Land) para Macaé e Campos dos Goytacazes – São Tomé, nas alturas de 10, 50 e 100 metros.	46

Tabela 13. Densidade de Potência (DP) horária com base nos dados observados (INMET) e da reanálise (ERA5-Land) para Macaé e Campos dos Goytacazes – São Tomé, nas alturas de 10, 50 e 100 metros.	46
--	----

LISTA DE SIGLAS

ABEEólica	Associação Brasileira de Energia Eólica
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BEN	Balanco Energético Nacional
BRAMS	<i>Brazilian Regional Atmospheric Modeling System</i>
CBEE	Centro Brasileiro de Energia Eólica
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
CELPE	Companhia Energética de Pernambuco
CEPEL	Centro de Pesquisa de Energia Elétrica
DJF	Dezembro, janeiro e fevereiro
DP	Densidade de Potência
EAM	Erro Absoluto Médio
ECMWF	<i>European Centre for Medium-Range Weather Forecasts</i>
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ERA	<i>European Reanalysis</i>
GW	Gigawatts
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
JJA	Junho, julho e agosto
MAM	Março, abril e maio
MW	Megawatts
PROINFA	Programa de Incentivos a Fontes Alternativas de Energia Elétrica
REQM	Raiz do Erro Quadrático Médio
SON	Setembro, outubro e novembro
UTC	<i>Coordinated Universal Time</i>
WRF	<i>Weather Research and Forecasting</i>
WRPLOT	<i>Wind Rose Plots</i>
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVOS	14
1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO	14
2.REVISÃO DA LITERATURA	15
2.1. FORMAÇÃO DOS VENTOS E CIRCULAÇÃO ATMOSFÉRICA	15
2.2. SISTEMAS DE VENTOS LOCAIS.....	17
2.3. FATORES QUE INFLUENCIAM NA VELOCIDADE DOS VENTOS	18
2.4. ENERGIA EÓLICA NO BRASIL.....	21
3.METODOLOGIA.....	26
3.1. DADOS.....	26
3.2. ANÁLISE ESTATÍSTICA	27
3.3. POTENCIAL EÓLICO	29
4.RESULTADOS E DISCUSSÕES	31
4.1 ANÁLISE SAZONAL	31
4.2. ANÁLISE HORÁRIA.....	36
4.3. SÉRIE TEMPORAL E MÉTRICAS ESTATÍSTICAS.....	41
4.4 POTENCIAL EÓLICO	43
5.CONCLUSÕES.....	47
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49
APÊNDICE A – DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA DA VELOCIDADE DO VENTO.....	54

1. INTRODUÇÃO

O crescimento da demanda energética mundial, agregado a fatores como a atenuação de impactos ambientais decorrentes do aumento das emissões de poluentes atmosféricos e do aumento da concentração de gases de efeito estufa na atmosfera, tem motivado a busca por fontes de energia limpas e renováveis (IPCC, 2011). Nos últimos anos, o Brasil, na busca pela diversificação da matriz energética, tem envidado esforços na identificação de potenciais sítios para geração de energia eólica (PINTO *et al.*, 2014), valorizando, com isso, as características regionais do país.

De acordo com o Boletim Anual de Geração Eólica (ABEEólica, 2018), no ano de 2018, o Brasil manteve a 8ª posição no ranking mundial de capacidade eólica acumulada elaborado pelo *Global Wind Energy Council*, com 14,71 GW de capacidade instalada e mais de 7 mil aerogeradores funcionando em 583 parques eólicos em 12 estados. O Nordeste brasileiro foi o responsável pela maior parte dessa geração eólica (85,4%), seguido pelo Sul (12,4%), Norte (2,1%) e Sudeste (0,1%) (ABEEólica, 2018).

Apesar da pequena parcela do potencial eólico aproveitado no Sudeste, esta região, segundo o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro (AMARANTE; ZACK; SÁ, 2001), é a segunda com maior valor estimado, com estimativa anual de 29,7 GW de potência para vento médio anual igual ou superior a 7,0 m/s. No estado do Rio de Janeiro, o Norte Fluminense e a Região dos Lagos são as regiões com maiores potenciais eólicos, com destaque para o litoral, por apresentar as maiores velocidades médias do vento (AMARANTE; ZACK; SÁ, 2001).

É importante destacar que a viabilidade de um projeto de energia eólica está diretamente associada ao aproveitamento da energia cinética dos ventos e de como esse recurso energético varia no local do empreendimento. Portanto, a confiabilidade da estimativa e da variabilidade do vento em um determinado local é essencial, tanto para a avaliação da viabilidade econômica, quanto para o planejamento e gerenciamento do sistema de distribuição de eletricidade a que a planta eólica está conectada (PINTO *et al.*, 2014).

Todavia, em algumas regiões não existe a disponibilidade de dados de vento consistentes e confiáveis. Uma solução alternativa para este problema é a utilização de dados de reanálise meteorológica, que são dados obtidos através da assimilação e análise de dados observados em superfície (estações), aviões, navios, imagens de satélite, imagens de radar e radiossondagens em todo o planeta (KALNAY *et al.*, 1996). No entanto, vale ressaltar que esses dados podem apresentar diferenças significativas em relação aos dados observados.

Diante do exposto, faz-se necessária a verificação da confiabilidade dos dados de reanálise, mediante um estudo comparativo com as séries temporais efetivamente observadas na região de interesse.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é avaliar a confiabilidade dos dados de vento da reanálise ERA5-Land, visando obter uma avaliação preliminar do potencial eólico no estado do Rio de Janeiro.

Os objetivos específicos são:

- ✓ Fazer um estudo comparativo entre os dados de vento da reanálise ERA5-Land e os dados das estações meteorológicas automáticas do Instituto Nacional de Meteorologia;
- ✓ Avaliar as estimativas do potencial eólico utilizando os dados da reanálise ERA5-Land.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado da seguinte forma: na presente seção, estão apresentadas a contextualização da pesquisa, o problema, a justificativa e os objetivos. A seção dois apresenta uma revisão da literatura, abordando temas importantes para o desenvolvimento deste trabalho como mecanismos de formação dos ventos e de circulação atmosférica, os fatores que influenciam na velocidade dos ventos, além de apresentar informações acerca da evolução da energia eólica no Brasil. Na seção três, consta a metodologia utilizada para a realização do trabalho, com a descrição dos dados e dos procedimentos utilizados para que os objetivos pudessem ser atendidos. Os resultados e discussões são apresentados na seção quatro, com análises na escala sazonal (por estação do ano) e horária (intervalos de 6 em 6 horas), além da evolução temporal dos dados. Por fim, na seção cinco são apresentadas as considerações finais da pesquisa e sugestões para trabalhos futuros.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. FORMAÇÃO DOS VENTOS E CIRCULAÇÃO ATMOSFÉRICA

O aquecimento desigual da superfície terrestre, gerado pela distribuição diferencial da radiação solar incidente e pelo movimento de rotação da terra, provoca diferenças de pressão atmosférica entre duas regiões distintas, ocasionando o deslocamento do ar das áreas de alta pressão para as de menor pressão (força do gradiente de pressão), dando origem aos ventos (AHRENS, 2011).

As regiões tropicais, que recebem os raios solares quase que perpendicularmente, são mais aquecidas do que as regiões polares, onde a incidência é oblíqua. O ar dessas regiões mais aquecidas torna-se menos denso e mais leve, tendendo a subir em direção às camadas superiores, enquanto o espaço deixado é substituído por massas de ar menos aquecidas (PICOLO; BUHLER; RAMPINELLI, 2014), conforme mostra a Figura 1.

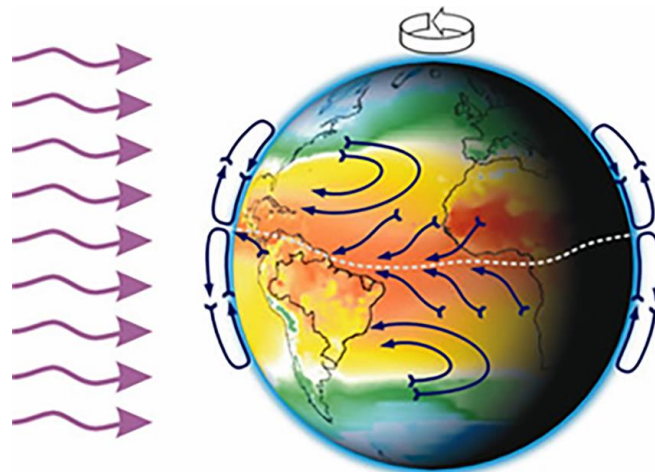


Figura 1. Mecanismo de formação dos ventos.
Fonte: Amarante, Zack e Sá (2001).

Os fluídos, ar e água, encarregam-se de redistribuir o calor das regiões com excesso (região tropical) para as regiões com déficit (regiões polares) de energia. Segundo Grimm (1999), essa redistribuição é feita por meio dos movimentos horizontais (nas direções leste/oeste e norte/sul) e verticais (movimento ascendente e descendente), sendo que, estes últimos, embora em menor intensidade se comparados aos primeiros, são de extrema importância já que atuam na formação de nuvens e de precipitação. Em relação ao movimento horizontal do ar, Barry (2013) afirma que, além da força do gradiente de pressão, há outros controles atuantes, dentre eles: a força de Coriolis e as forças friccionais decorrentes do atrito da superfície terrestre.

A força do gradiente de pressão, tanto em altitude quanto em superfície, provoca o movimento do ar das altas para as baixas pressões, na tentativa de igualar as diferenças geradas pelo aquecimento diferencial da terra. Esse deslocamento é desviado de seu curso pela força de Coriolis, originada em razão do movimento de rotação do planeta, cujo valor máximo é identificado nos polos e, o mínimo, no equador (AHRENS, 2011). Essa força não altera o módulo da aceleração ou da velocidade do ar, apenas a direção, posto que atua perpendicularmente ao movimento, provocando a curvatura de trajetórias para a direita no Hemisfério Norte e para a esquerda no Hemisfério Sul (MARTINS; GUARNIERI; PEREIRA, 2008). Além disso, o deslocamento do ar sobre a superfície da terra sofre a influência de uma força que retarda o fluxo nas proximidades do solo: a força de atrito (CANAL, 2018).

Como a convergência e divergência dos ventos na superfície estão ligadas a regiões de baixa e alta pressão, respectivamente, é de se esperar áreas de baixa pressão na região equatorial e em torno de 60° (latitudes médias), e áreas de alta pressão em torno de 30° (latitudes subtropicais) e nas regiões polares. Na Figura 2, observa-se que a convergência na região equatorial proporciona o levantamento do ar, que se resfria e desce em torno de 30° de latitude, aquecendo-se e tornando-se mais seco (DERECZYNSKI; MENEZES, 2015).

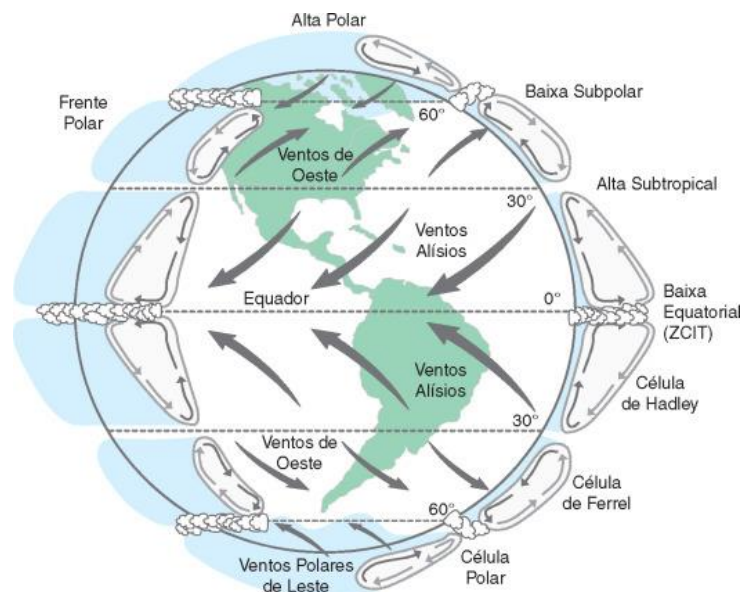


Figura 2. Representação esquemática da circulação geral da atmosfera.
Fonte: Derezynski e Menezes (2015).

Parte desse ar descendente dirige-se para o equador em baixos níveis, formando a chamada célula de *Hadley* (VAREJÃO-SILVA, 2006). Como aponta Aguiéiras Junior (2011), os ventos resultantes deslocam-se dos trópicos para o equador, possuindo uma componente de leste para oeste, pois são defletidas pela força de Coriolis, e são chamados de alísios. A

confluência dos ventos alísios do hemisfério norte com os ventos alísios do hemisfério sul, em baixos níveis, é conhecida como Zona de Convergência Intertropical (ZCIT).

Nas latitudes médias, em ambos os hemisférios, parte do ar descendente em aproximadamente 30° de latitude dirige-se para os polos, em baixos níveis, até encontrar o ar mais frio e denso da região polar e ascender, em torno de 60° de latitude (MARTINS; GUARNIERI; PEREIRA, 2008), resultando na célula de Ferrel (Figura 2). Segundo Varejão-Silva (2006), o ar, após ascender em torno de 60° de latitude, desloca-se para os polos, desce sobre eles e retorna para o equador, formando as células polares.

2.2. SISTEMAS DE VENTOS LOCAIS

O deslocamento do ar, além de ser caracterizado pela circulação global, é marcado também por outros sistemas de ventos locais, como brisas marítimas e terrestres, brisas de montanha e de vale, dentre outros (YNOUE *et al.*, 2017). As brisas marítimas e terrestres resultam do aquecimento e resfriamento diferenciais entre continente e oceano (FEDOROVA, 2001). A brisa marítima desenvolve-se durante o dia, quando a temperatura do litoral é maior do que a da superfície do mar, o que faz com que o vento à superfície se desloque do oceano para o continente, em virtude da diferença de densidade estabelecida. O sentido inverso ocorre nas brisas terrestres, quando o ar se desloca do litoral para o oceano, à noite, momento em que o resfriamento do continente é maior do que o do oceano (FERREIRA; MELLO, 2005), conforme mostra a Figura 3.

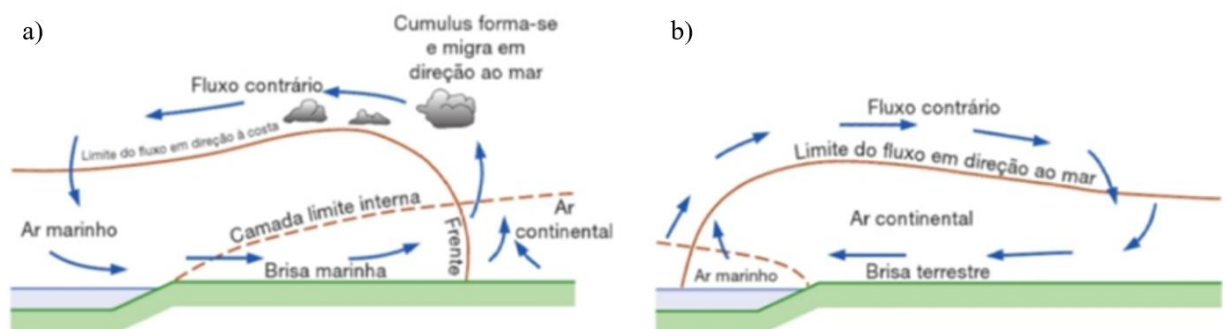


Figura 3. a) Circulação em brisas marítimas e b) Circulação em brisas terrestres.
Fonte: Oke (1978).

Em regiões de entremontes, durante o dia, o ar sobre as montanhas aquece mais rapidamente do que o ar sobre o vale, fazendo surgir um deslocamento de ar do vale para a montanha, originando as chamadas brisas de vale (ventos anabáticos). À noite, o ar da montanha

se resfria mais rapidamente do que o ar sobre o vale, provocando o escoamento em sentido contrário, gerando as brisas de montanhas (ventos catabáticos) (REBOITA *et al.*, 2014).

2.3. FATORES QUE INFLUENCIAM NA VELOCIDADE DOS VENTOS

Segundo Aguietas Junior (2011), o vento é caracterizado por dois parâmetros: direção e velocidade. A direção dos ventos é resultante da composição das forças atuantes (gradiente de pressão, força de Coriolis, etc.), enquanto que a velocidade desse deslocamento sofre influência das características do terreno, como a presença de obstáculos, o relevo e a rugosidade, podendo ser diferenciada, ainda, pela altura em que o vento se encontra na camada limite (CALDAS, 2010). A Figura 4 demonstra, de forma singela, a influência das características do terreno no comportamento do vento.

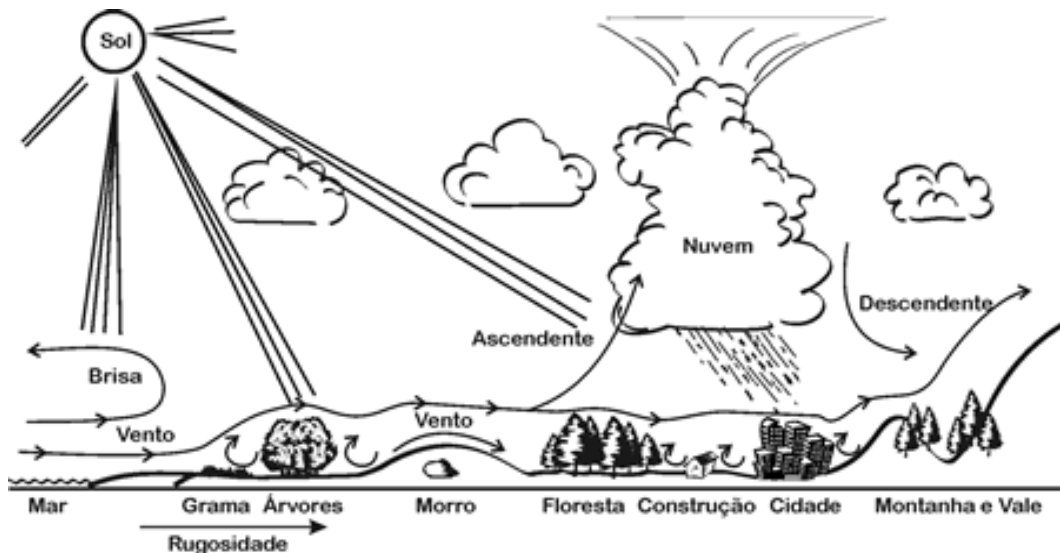


Figura 4. Comportamento do vento sob a influência das características do terreno.
Fonte: CEPEL (1998).

Para Fadigas (2011), as construções são obstáculos que afetam o comportamento do vento local, causando redução na velocidade do escoamento em virtude da turbulência associada. A influência do obstáculo na redução da velocidade do vento está relacionada às suas dimensões, principalmente à sua altura, tendo em vista o efeito de sombreamento que provoca. Tal influência é demonstrada na Figura 5, onde as curvas indicam o percentual dessa redução e evidenciam a perturbação no perfil de velocidade, especialmente a jusante (esteira viscosa) (DUTRA, 2001).

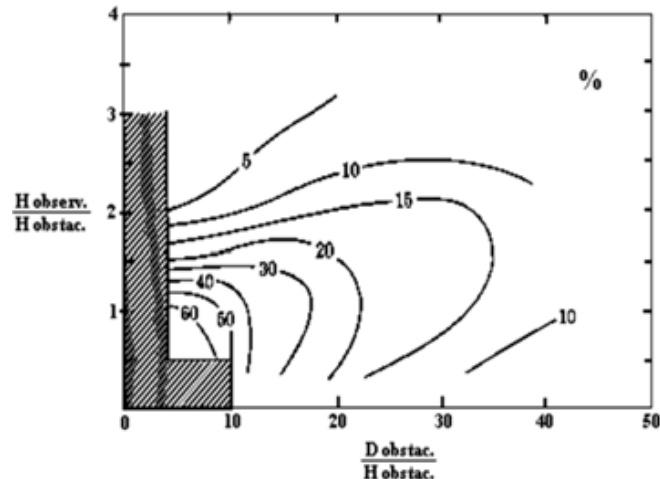


Figura 5. Efeito do obstáculo sobre os ventos.
Fonte: Mortensen (1993).

O relevo do terreno (orografia) é fator de extrema importância na análise do regime do escoamento, uma vez que as maiores velocidades dos ventos são registradas próximo aos ápices ou cumes dos morros, falésias, cordilheiras e escarpas, sofrendo desaceleração quando perto do sopé e nos vales (BARRY, 2013), conforme mostra a Figura 6.



Figura 6. Aceleração orográfica em um morro.
Fonte: Caldas (2010).

Na camada superficial, compreendida entre 10 e 200 metros de altura (FADIGAS, 2011), os ventos sofrem a ação de fricções internas que resistem à tendência do escoamento, denominadas forças viscosas resistivas ou forças de atrito, que provocam a desaceleração dos ventos, em virtude da rugosidade do terreno sobre o qual se deslocam (JERVELL, 2008).

Diniz (2018) esclarece que, em virtude das perturbações sofridas pela massa de ar durante sua movimentação, a velocidade do vento não será uniforme verticalmente, tendo valores menores, próximo à superfície, e crescentes na medida em que alturas mais elevadas são atingidas. Próximo ao solo, a altura em que a velocidade do vento assume valor zero corresponde ao comprimento da rugosidade Z_0 , a partir do qual encontra-se a camada limite atmosférica, uma faixa entre 100 e 3000 metros onde, em geral, o escoamento ocorre de modo turbulento (DUTRA, 2001). Acima dessa camada, as forças de atrito não são significativas e a

aproximação dos ventos reais em altos níveis pode ser representada pelo modelo idealizado indicado na Figura 7 (CALDAS, 2010).

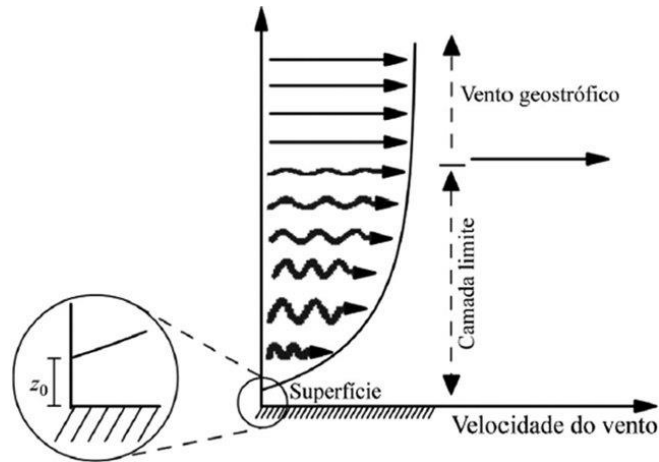


Figura 7. Perfil vertical da velocidade do vento.
Fonte: Martins, Guarnieri e Pereira (2008).

Krüger (2016) define rugosidade como sendo o efeito conjunto dos elementos do terreno (vegetação, cobertura de neve, condições do mar, tipos de agricultura, usos do solo, etc.), cuja irregularidade causa a desaceleração dos ventos em superfície. Dessa forma, o perfil vertical da velocidade do vento na camada limite é influenciado por essa variável, necessária, inclusive, para estimativa da velocidade do vento em uma determinada altura. O comprimento de rugosidade pode ser parametrizado conforme Figura 8, onde a interferência das características do terreno na velocidade do vento é mais intensa nas proximidades da superfície, na faixa atmosférica de 10 a 200 metros acima do nível do solo, região de interesse da energia eólica (FADIGAS, 2011).

Considerando a existência de tais interferências, e visando uma análise mais precisa dos recursos eólicos disponíveis, estudos preliminares de viabilidade técnica e econômica estimam a velocidade do vento em uma determinada altura (altura dos aerogeradores), a partir de uma altura de referência (torres anemométricas), por meio da extrapolação da velocidade do vento (LIRA; SILVA; ALVES, 2011).

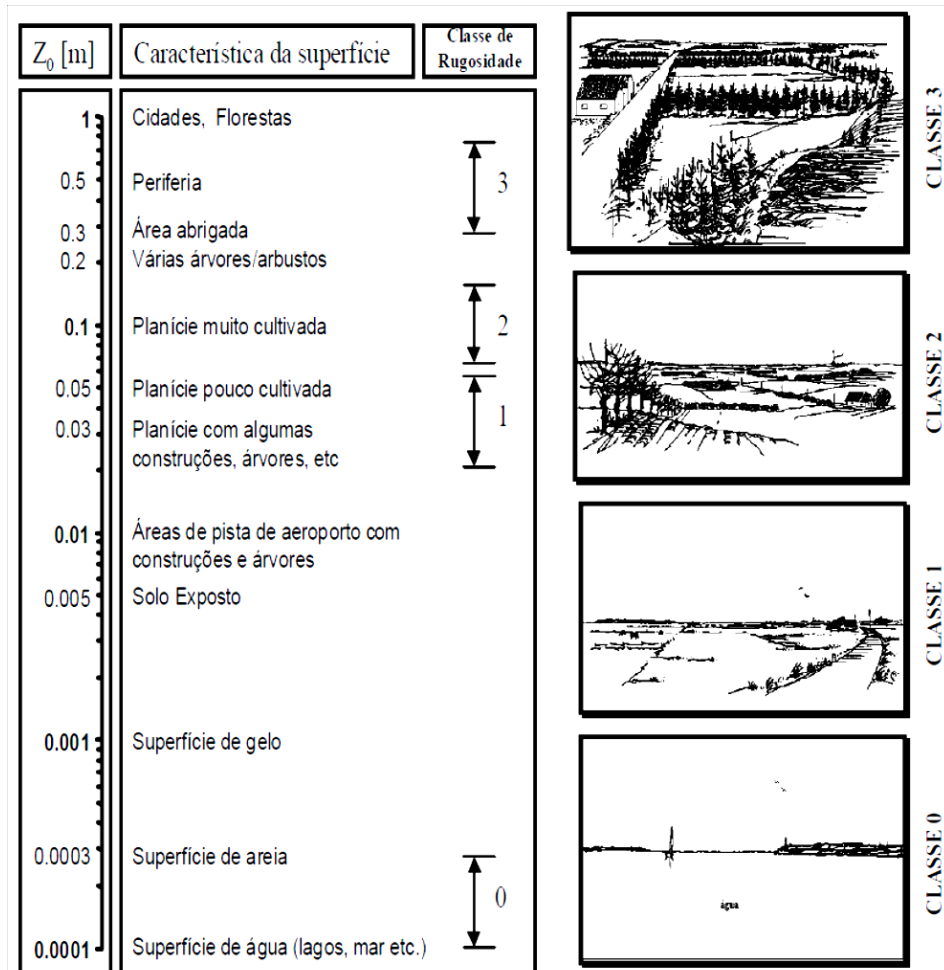


Figura 8. As classes de rugosidade e as paisagens adotadas pelo Atlas Eólico Europeu.
Fonte: Mortensen (1993) e Troen (1989).

2.4. ENERGIA EÓLICA NO BRASIL

De acordo com o Balanço Energético Nacional (BEN) (EPE, 2019), no ano de 2018, a participação de renováveis na matriz elétrica brasileira foi de 83,3%, dos quais 66,6% foram provenientes de hidrelétricas, fonte predominante no país. A energia hidráulica, no entanto, é suscetível às variações do regime hidrológico, podendo ter a geração comprometida em determinados períodos do ano, sobretudo nas estações menos chuvosas, necessitando ser compensada com a utilização de fontes alternativas de energia visando à segurança no abastecimento energético.

Neste cenário, a conversão da energia dos ventos em eletricidade torna-se uma opção viável a ser implementada, uma vez que, além de não gerar os impactos ambientais ocasionados pelas fontes alternativas que utilizam combustíveis fósseis, ela conta com o favorável regime de ventos do país (AMARANTE; ZACK; SÁ, 2001), apresentando, ainda, preços de venda relativamente competitivos – inferiores, na maioria das vezes, quando comparados aos da

energia gerada pelas hidrelétricas (COSTA FILHO, 2019). Por esses fatores, a geração de energia eólica está em ampla expansão no Brasil, embora seja uma atividade recente no território nacional.

O Brasil teve seu primeiro aerogerador instalado em Fernando de Noronha (Pernambuco), no ano de 1992, fruto da parceria entre o Centro Brasileiro de Energia Eólica (CBEE) e a Companhia Energética de Pernambuco (CELPE), com financiamento do instituto dinamarquês *Folkecenter*, representando o primeiro aerogerador comercial a entrar em operação na América do Sul (CORRÊA, 2017). Em 2006, entrou em operação o primeiro Parque Eólico do Brasil (Parque Eólico de Osório, no Rio Grande do Sul), integrado por três parques – Osório, Sangradouro e Índios – que reúnem 75 aerogeradores de 2 megawatts cada, instalados em torres de concreto a 100 metros de altura e pás que medem 35 metros, com capacidade de produzir 150 MW de energia (COSTA FILHO, 2019).

Em 2011, o Brasil já contabilizava 41 empreendimentos eólicos implantados (DINIZ, 2018). O crescimento do setor foi estimulado essencialmente pela criação, em 2002, do Programa de Incentivos a Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), que tinha o objetivo de aumentar a participação de fontes alternativas renováveis (eólica, pequenas centrais hidrelétricas e biomassa) na produção de energia elétrica, por meio de financiamentos e incentivos à construção de novas indústrias. Uma das metas iniciais deste programa era a instalação de 1.422MW, divididos em 54 usinas eólicas, até 31 de dezembro de 2006 (FERREIRA; BLASQUES; PINHO, 2014).

No Brasil, os leilões representam a principal forma de contratação de energia, cuja realização é operacionalizada pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), por delegação da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). O primeiro leilão exclusivo para a fonte eólica no país ocorreu em 2009 e foi responsável pela contratação de 1.805,7 MW de capacidade instalada (FERREIRA; BLASQUES; PINHO, 2014).

A criação do PROINFA e do sistema de leilões impulsionaram o setor, reduzindo custos na geração e transformando o segmento eólico em um dos mais viáveis e promissores para o país (CICHELERO, 2019). Com tais incentivos, a energia eólica vem crescendo (Figura 9) e se consolidando como fonte complementar para fornecimento de energia, passando a corresponder de 0,9% em 2012 (EPE, 2013) a 7,6% em 2018 (EPE, 2019) da matriz elétrica nacional, como pode ser observado na Figura 10.

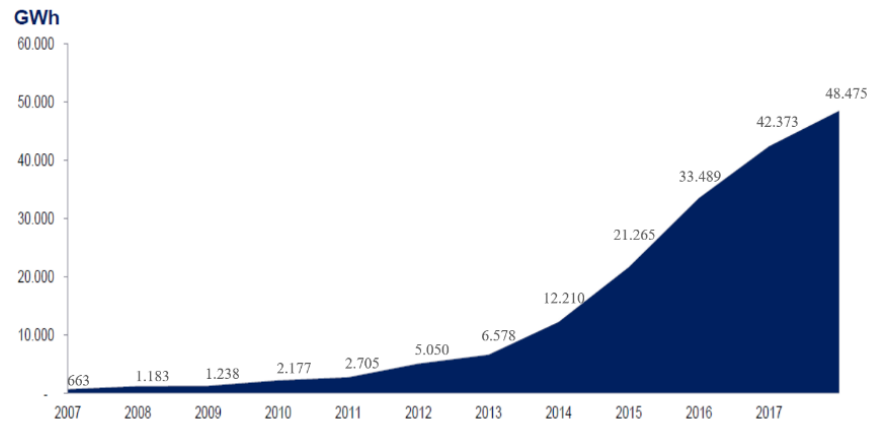


Figura 9. Evolução da geração eólica.
Fonte: Adaptado da EPE (2019).

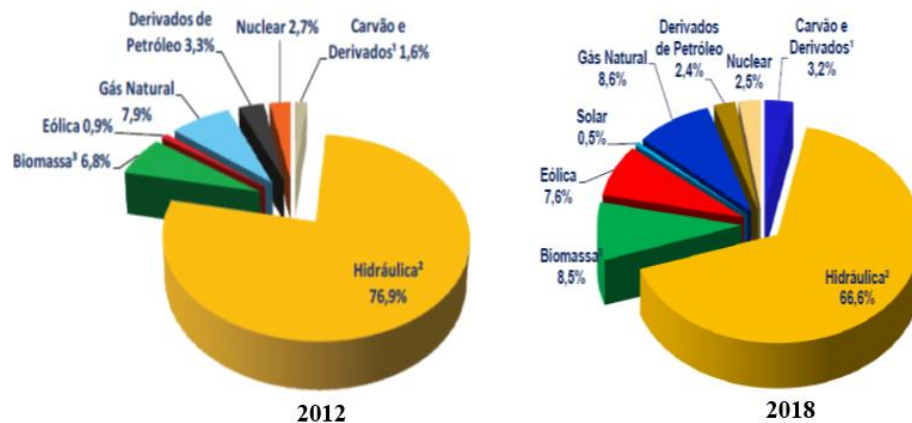


Figura 10. Matriz elétrica brasileira de 2012 e 2018.
Fonte: EPE (2013; 2019).

Segundo o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro (AMARANTE; ZACK; SÁ, 2001), o potencial eólico anual estimado para o Brasil é de 143,5 GW a 50 metros de altura, distribuídos conforme regiões indicadas na Tabela 1. No referido Atlas, são apontadas as melhores áreas de potencial eólico e as principais características dos ventos incidentes (direções predominantes, regimes diurnos, etc.), indicando que todo o litoral brasileiro tem potencial para aproveitamento da energia dos ventos.

Tabela 1. Potencial eólico estimado no Brasil.

Região	Potencial (GW)
Nordeste	75,0
Sudeste	29,7
Sul	22,8
Norte	12,8
Centro-oeste	3,1
Brasil	143,5

Fonte: Amarante, Zack e Sá (2001)

O Nordeste do Brasil apresenta um grande potencial eólico devido à incidência dos ventos alísios. A região gera a maior parte da energia eólica do Brasil e se destaca pela quantidade de parques eólicos em operação comercial. Segundo a ABEEólica (2018), somente no ano de 2018 foram instalados 75 novos parques no Nordeste, que é o responsável, atualmente, por 85,4% da produção nacional, seguido das regiões Sul, Norte e Sudeste, que contribuem, respectivamente, com 12,4%, 2,1% e 0,1% desse total (ABEEólica, 2018). A Figura 11 especifica a distribuição dos 583 parques em operação no país.

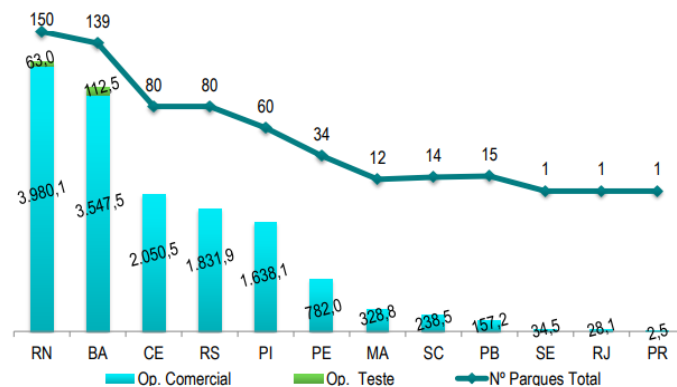


Figura 11. Potência instalada (MW) e número de parques eólicos em operação no país.
Fonte ABEEólica (2019).

O primeiro parque eólico da região Sudeste – Parque Eólico Gargaú – foi instalado no município de São Francisco de Itabapoana (Praia de Gargaú), localizado na região Norte Fluminense do estado do Rio de Janeiro. Com 5 km² e 17 turbinas eólicas de 1,65 MW cada, somando uma potência de 28 MW, o parque produz energia capaz de abastecer uma cidade de 80 mil habitantes. Cada aerogerador tem 120 m de altura, sendo 80 m de torre mais 40 m de pá da hélice, que gira incessantemente numa velocidade de até 160 quilômetros por hora (BOENTE *et al.*, 2015). Esse parque ocorreu com incentivos do PROINFA, e tinha previsão de entrar em operação em dezembro de 2006, mas foi em abril de 2010 que iniciou sua geração comercial, com um custo total aproximado de R\$ 280 milhões de reais, o dobro do orçamento inicial previsto (COMBAT, 2014).

Segundo Amarante, Silva e Rios Filho (2002), as mesorregiões do estado do Rio de Janeiro com maiores potenciais eólicos estimados, com regimes de vento propícios a aproveitamentos eólicos, são o Norte Fluminense e a Região dos Lagos. O litoral Norte Fluminense tem extensa planície costeira, com baixa rugosidade e ventos com velocidades médias anuais em torno de 6,5 m/s (a 50 m de altura) nas melhores áreas, enquanto que a região dos lagos é uma área litorânea que possui ventos com velocidades médias anuais próximas de

7,0 m/s (a 50m de altura), características favoráveis para a implantação de empreendimentos eólico-elétricos no estado.

3. METODOLOGIA

3.1. DADOS

Para o desenvolvimento deste trabalho, foram utilizados dados horários de velocidade e direção do vento, medidos a dez metros de altura, de duas estações meteorológicas automáticas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), localizadas no estado do Rio de Janeiro (Macaé e Campos dos Goytacazes – São Tomé), conforme mostra a Figura 12. As coordenadas, período de análise e porcentagem de falhas das estações são apresentadas na Tabela 2.

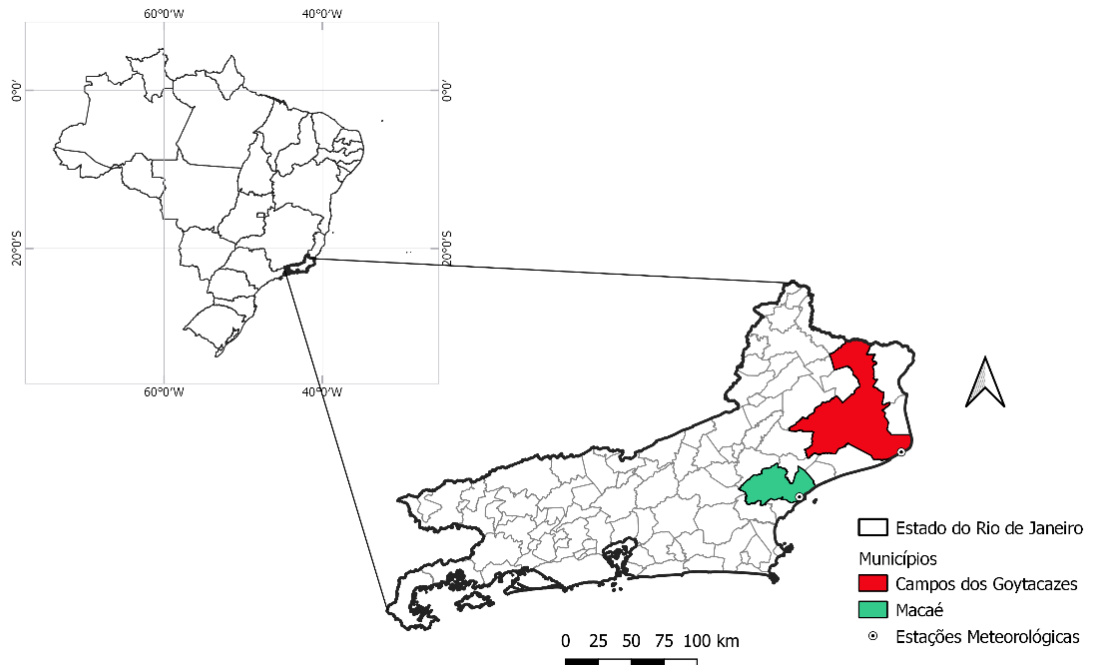


Figura 12. Localização dos municípios e das estações meteorológicas utilizadas.
Fonte: Autor (2019).

Tabela 2. Código, coordenadas geográficas, altitude, período de análise e porcentagem de falhas das estações meteorológicas utilizadas neste estudo.

Município	Código Estação	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Período Inicial	Período Final	Falhas (%)
Macaé	86891	-22.376318°	-41.812053°	25	01/01/2007	31/12/2018	4,9
Campos – São Tomé	86890	-22.041647°	-41.051871°	7	01/01/2009	31/12/2018	15,2

Fonte: Autor (2019).

Os dados observados obtidos do INMET foram utilizados para verificar a confiabilidade de dados de reanálise, que é um conjunto de dados obtidos através da assimilação e análise de grande quantidade de dados observados em superfície (estações), aviões, navios, imagens de

satélite, imagens de radar e radiossondagens em todo o planeta (KALNAY *et al.*, 1996). Portanto, as séries históricas de reanálise são obtidas a partir de uma grande variedade de fontes. A técnica de reanálise processa, simultaneamente, essa grande variedade de dados, usando as leis físicas contidas nos modelos de previsão do tempo (PINTO *et al.*, 2009).

Neste estudo, foram utilizados dados da reanálise ERA5-Land, que é uma versão do ERA5, quinta geração de reanálises atmosféricas do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) de clima global. O ERA5-Land apresenta uma série de melhorias e é executado com uma resolução horizontal aprimorada (9 km vs 31 km no ERA5). A resolução temporal dos dados é horária, com dados de 2001 até o presente. Neste trabalho, o período analisado foi o mesmo indicado na Tabela 2, relativo às estações meteorológicas do INMET.

Como o ERA5-Land fornece apenas as componentes zonal (leste-oeste, denotada por u) e meridional (norte-sul, denotada por v) do vento, foram utilizadas as seguintes equações para obtenção da velocidade (\bar{V}) e da direção (\bar{D}) do vento (STÜKER *et al.*, 2016):

$$\bar{V} = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (1)$$

$$\bar{D} = -\arctg\left(\frac{u}{v}\right) \quad (2)$$

As componentes zonal e meridional (u e v) do vento a 10 metros da reanálise ERA5-Land foram extraídos para o mesmo período e do ponto de grade mais próximo das duas estações do INMET selecionadas (Tabela 2).

Importante esclarecer que a direção do vento é definida como a direção de onde ele sopra e a sua medida é feita no sentido horário, a partir do norte geográfico (verdadeiro), no sentido do movimento dos ponteiros do relógio. Assim, de acordo com os graus da circunferência, e tendo por referência os pontos cardeais, 360° indica o norte, 90° o leste, 180° o sul e 270° o oeste.

3.2. ANÁLISE ESTATÍSTICA

Visando à avaliação do desempenho das séries de dados da reanálise ERA5-Land, foi realizada a comparação com os dados observados das estações do INMET. Inicialmente, a comparação foi realizada com gráficos de análise descritiva, utilizando o *software R* versão 3.6.1. Também foi utilizado o *software WRPLOT View*, desenvolvido pela *Lakes Environmental*, para gerar gráficos do tipo rosa dos ventos. Em seguida, foram utilizadas métricas estatísticas que auxiliam na avaliação do grau de semelhança entre a reanálise e a

observação (DEGOLA, 2013). Neste trabalho, os dados foram analisados em intervalos de 6 em 6 horas (análise horária) e por estações do ano (análise sazonal).

As métricas estatísticas utilizadas foram: o viés, o erro absoluto médio (EAM), a raiz do erro quadrático médio (REQM) e o coeficiente de correlação de Pearson (r), que podem ser calculadas pelas seguintes fórmulas (WILKS, 2006; DE MARIA; COSTA; SOMBRA, 2008; MARIANO; CAVALCANTI; BESERRA, 2017):

$$Viés = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (\phi_i - \phi_{oi}) \quad (3)$$

$$EAM = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n |\phi_i - \phi_{oi}| \quad (4)$$

$$REQM = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (\phi_i - \phi_{oi})^2} \quad (5)$$

$$r = \frac{\sum(\phi_i - \bar{\phi}_i)(\phi_{oi} - \bar{\phi}_{oi})}{\sqrt{\sum(\phi_i - \bar{\phi}_i)^2 \sum(\phi_{oi} - \bar{\phi}_{oi})^2}} \quad (6)$$

Nas equações 3 a 6, N é o número de amostras, ϕ_i representa o dado da reanálise, ϕ_{oi} é o observado nas estações meteorológicas, $\bar{\phi}_i$ é a média dos dados de reanálise e $\bar{\phi}_{oi}$ é a média dos dados observados. Na equação 6, o nível de significância do coeficiente de correlação foi verificado pelo teste t de Student (STUDENT, 1908).

Segundo Mariano, Cavalcanti e Beserra (2017), o viés é um parâmetro que quantifica a diferença média entre dois conjuntos de dados, indicando a tendência para superestimativa ou subestimativa de uma variável. Um viés igual a zero indica aproximações perfeitas ($\phi_i = \phi_{oi}$), enquanto um valor positivo de viés indica uma tendência de superestimativa da variável em questão. Da mesma forma, um viés negativo implica uma tendência de subestimativa dos dados de reanálise em relação aos observados.

O EAM foi utilizado para verificar o afastamento (desvio) médio absoluto dos dados da reanálise em relação aos dados observados. Este parâmetro só pode atingir valores positivos e quanto menor seu valor, maior é a semelhança entre as séries de dados confrontadas (De Lima *et al.*, 2012). Já o REQM, foi utilizado com o objetivo de avaliar a dispersão dos desvios entre reanálise e observação (PINTO *et al.*, 2014). Por ter a diferença elevada ao quadrado, os valores de REQM serão sempre positivos. Nesse sentido, quanto mais próximo seu valor for de zero, mais similares serão as médias dos dois conjuntos de dados. Este índice aumenta de zero (simulações/previsões perfeitas) para valores mais elevados positivos, à medida que as discrepâncias entre simulações e observações se tornam maiores (DEGOLA, 2013).

Por fim, foi utilizado o coeficiente de correlação de Pearson (r), que mede a associação entre duas variáveis quantitativas indicando o grau de correlação linear entre elas. Esse coeficiente pode assumir valores entre -1 e 1, onde um valor igual a 1 significa correlação perfeita e positiva entre as duas variáveis. De forma semelhante, um valor igual a -1 significa correlação perfeita, porém negativa, ou seja, enquanto uma variável aumenta a outra diminui. Já valores iguais a zero sinalizam a ausência total de correlação (FIGUEIREDO FILHO; SILVA JÚNIOR, 2009).

3.3. POTENCIAL EÓLICO

A avaliação do potencial eólico foi realizada por meio do cálculo da densidade de potência, utilizando os dados observados (INMET) e de reanálise (ERA5-Land), através da Equação 7 (TEIXEIRA; CAMELO, 2013):

$$\frac{P}{A} = \frac{1}{2} \rho V^3 \quad (7)$$

onde $\frac{P}{A}$ é a densidade de potência (Watts/ m²), ρ é a massa específica do ar (kg/m³) e V é a velocidade do vento (m/s) na altura em estudo.

Da Equação 7, destaca-se que a velocidade do vento é o principal fator no cálculo da densidade de potência, uma vez que tal potencial é diretamente proporcional ao cubo da velocidade média. Portanto, pequenas mudanças na velocidade do vento acarretam em grandes alterações na energia produzida.

A densidade de potência foi calculada a partir da massa específica do ar de 1,225 Kg/m³ e velocidade do vento nas alturas de 10, 50 e 100 metros. Para a extrapolação das velocidades para as alturas de 50 e 100 metros, foi utilizada a lei logarítmica apresentada na Equação 8 (LIRA; SILVA; ALVES, 2011).

$$V(Z) = V(Z_R) \frac{\ln\left(\frac{Z}{Z_0}\right)}{\ln\left(\frac{Z_R}{Z_0}\right)} \quad (8)$$

onde:

$V(Z)$ = velocidade do vento na altura Z

$V(Z_R)$ = velocidade do vento na altura de referência (medida)

Z = altura desejada

Z_R = altura de referência

Z_0 =comprimento de rugosidade local

Neste estudo, o comprimento de rugosidade foi escolhido com base na Figura 8, considerando $Z_0=0,5$ m (Periferia) para a estação de Macaé e $Z_0=0,3$ m (Planície com algumas construções, árvores, etc.) para Campos dos Goytacazes – São Tomé.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ANÁLISE SAZONAL

A Figura 13 mostra a comparação entre a velocidade do vento dos dados observados (INMET) e da reanálise (ERA5-Land), por estação do ano, para Macaé e Campos dos Goytacazes – São Tomé. Em relação à dispersão, observa-se que os dados apresentam comportamentos semelhantes, no entanto, nota-se, nas medidas de tendência central (média e mediana), que o ERA5-Land apresenta uma predisposição em superestimar a velocidade do vento, em ambas as cidades. Ademais, constata-se que há uma concordância entre os dados no que diz respeito à existência de extremos (outliers), como se observa no verão (dezembro, janeiro, fevereiro - DJF) em Macaé.

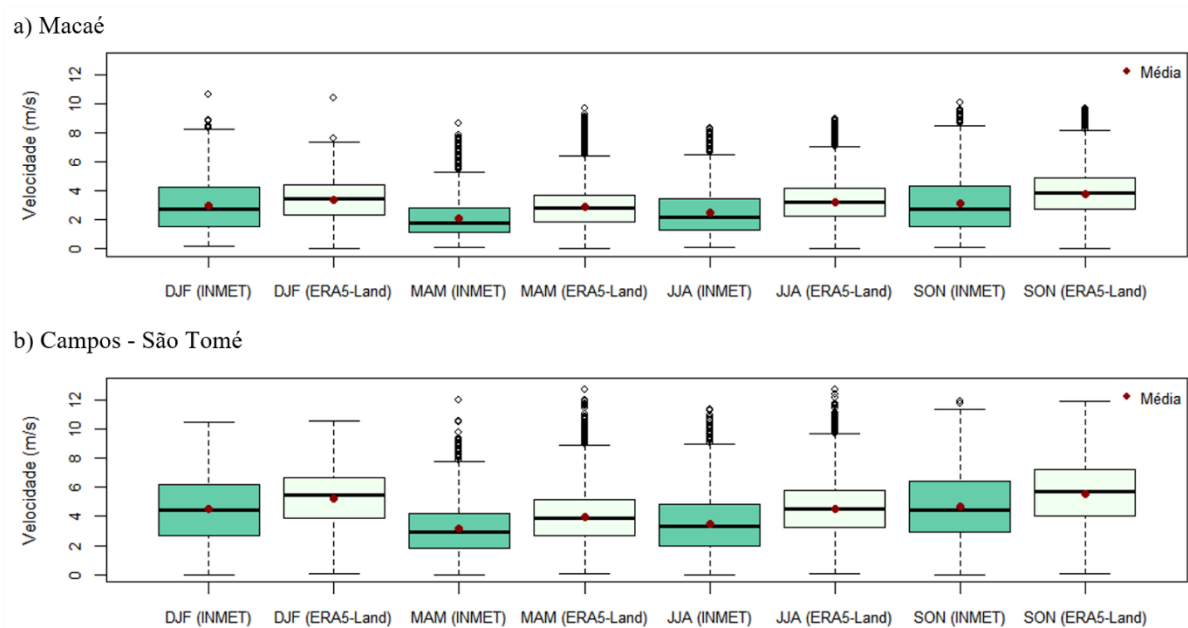


Figura 13. Boxplot da velocidade do vento (m/s) dos dados observados (INMET) e da reanálise (ERA5-Land), por estação do ano para: a) Macaé e b) Campos dos Goytacazes – São Tomé.

Fonte: Autor (2019).

De forma geral, verifica-se na Figura 13 e Tabela 3, que as maiores velocidades (dados observados e reanálise) são registradas na primavera (setembro, outubro, novembro - SON) e, as menores, no outono (março, abril, maio – MAM), em ambas as regiões. Esse resultado está de acordo com Teixeira (2018), que, utilizando o método de análise de *cluster*, verificou que a velocidade do vento em Macaé e Campos dos Goytacazes – São Tomé apresentam comportamento semelhante.

Na Tabela 3, também é possível observar as diferenças entre as médias dos dados observados (INMET) e da reanálise (ERA5-Land). As médias dos dados de reanálise foram sempre acima das médias dos dados observados, sobretudo no inverno (junho, julho, agosto - JJA) em Campos dos Goytacazes – São Tomé. A menor diferença foi observada no verão (DJF), com valores de 0,47 m/s e 0,74 m/s em Macaé e Campos dos Goytacazes – São Tomé, respectivamente, ressaltando-se que o erro baseado na diferença é maior nas estações em que os ventos são mais fracos, como no outono (MAM) de Macaé e no inverno (JJA) de Campos dos Goytacazes – São Tomé. Além disso, frisa-se que as velocidades médias, sejam observadas ou da reanálise, são maiores em Campos dos Goytacazes – São Tomé, em todas as estações do ano.

Tabela 3. Velocidade média (m/s) sazonal do vento dos dados observados (INMET) e da reanálise (ERA5-Land) para Macaé e Campos dos Goytacazes – São Tomé.

	Estação do Ano	Média INMET (m/s)	Média ERA5-Land (m/s)	Diferença entre as Médias (m/s)	Erro (%)
Macaé	DJF	2,91	3,38	0,47	16,15
	MAM	2,10	2,85	0,75	35,71
	JJA	2,49	3,23	0,74	29,72
	SON	3,09	3,79	0,70	22,65
Campos – São Tomé	DJF	4,48	5,22	0,74	16,52
	MAM	3,13	3,94	0,81	25,88
	JJA	3,49	4,52	1,03	29,51
	SON	4,65	5,57	0,92	19,78

Fonte: Autor (2019).

Na Figura 14, é possível observar as frequências (%) da direção do vento para os dados observados (INMET) e da reanálise (ERA5-Land). De forma geral, existe concordância entre os dados, com predominância de nordeste ao longo do ano. Observa-se que, tanto em Macaé quanto em Campos dos Goytacazes – São Tomé, a persistência do vento na direção nordeste é maior no verão (DJF), em torno de 41% (INMET) e 53% (ERA5-Land) em Macaé, e 54% (INMET) e 67% (ERA5-Land) em Campos dos Goytacazes – São Tomé. É importante ressaltar que, a predominância de ventos em uma direção é condição favorável para a implantação de empreendimentos eólicos, considerando a disposição permanente dos equipamentos utilizados (COSTA; LYRA, 2012).

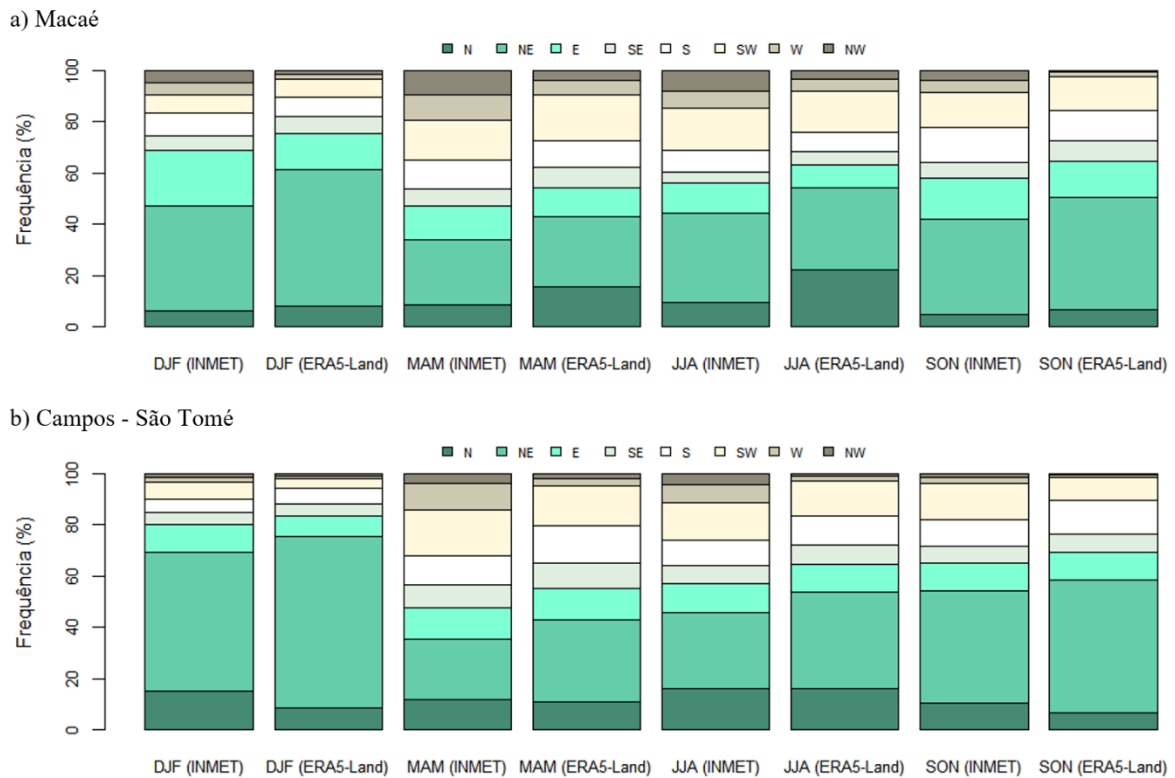


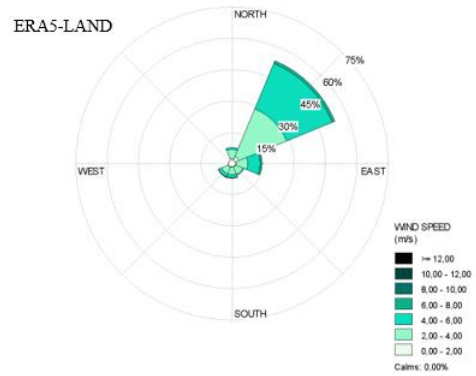
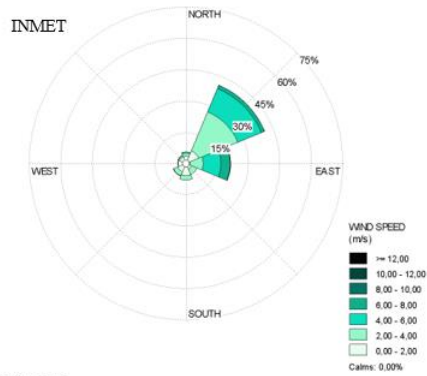
Figura 14. Frequência (%) da direção do vento dos dados observados (INMET) e da reanálise (ERA5-Land) por estação do ano para: a) Macaé e b) Campos dos Goytacazes – São Tomé.

Fonte: Autor (2019).

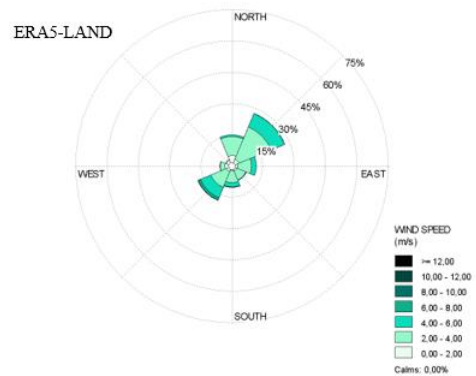
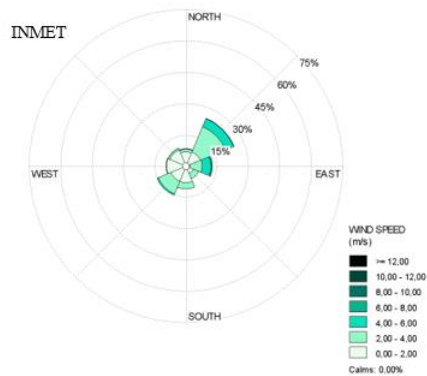
Nas Figuras 15 e 16, observa-se a comparação da direção e intensidade da velocidade através das rosas dos ventos. Com relação à direção, confirma-se a predominância de nordeste, com maior frequência no verão (DJF), seguido da primavera (SON), em ambas as regiões. No outono (MAM) e inverno (JJA), é possível verificar que o vento apresenta padrão de vários quadrantes, mas sempre com predominância de ventos de nordeste, em todas as estações do ano, estando em concordância com o estudo de Aguiéiras Junior (2011), que estudou as características do vento em Macaé. As Figuras 15 e 16 mostram, ainda, que as distribuições da direção por quadrante são semelhantes entre os dados observados e de reanálise.

Com relação à intensidade da velocidade, confirma-se nas Figuras 15 e 16 a tendência de superestimativa, por parte da reanálise. Observa-se que, nas faixas de maiores (menores) velocidades, a frequência é maior (menor) para os dados de reanálise. Para maiores detalhes, ver a distribuição de frequência da velocidade do vento no apêndice A (A1 - Macaé e A2 - Campos dos Goytacazes – São Tomé). Nesse contexto, vale ressaltar que a distribuição de probabilidade que faz um bom ajuste da velocidade do vento é a distribuição de Weibull (AMARANTE; ZACK; SÁ, 2001; OLIVEIRA; SOUZA, 2017).

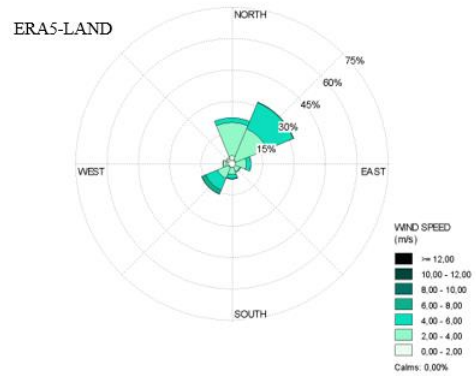
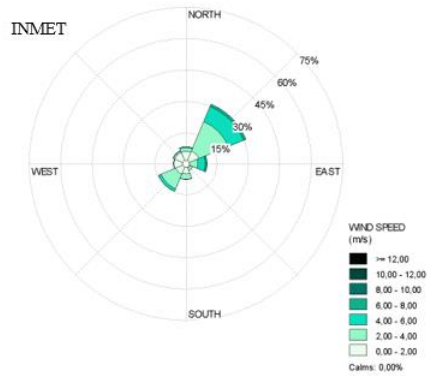
a) DJF



b) MAM



c) JJA



d) SON

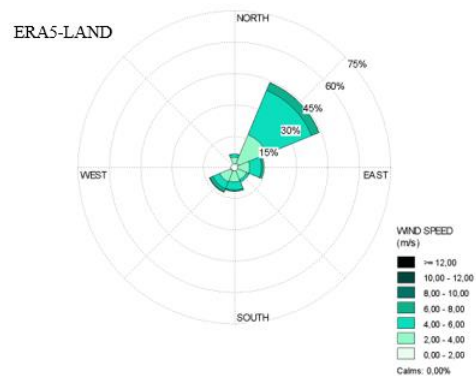
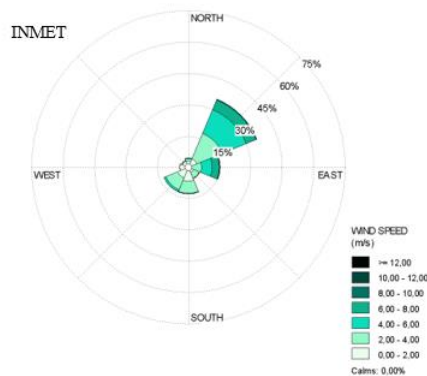
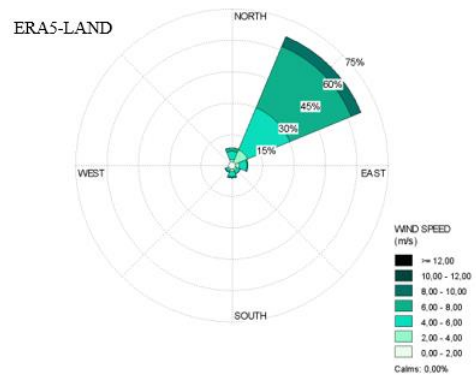
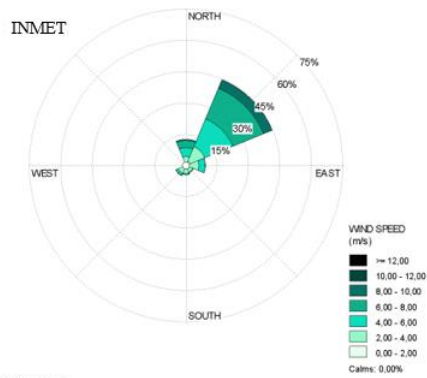
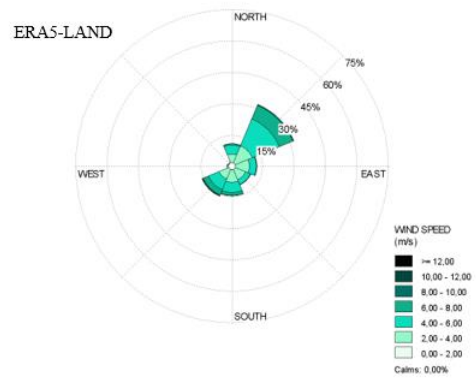
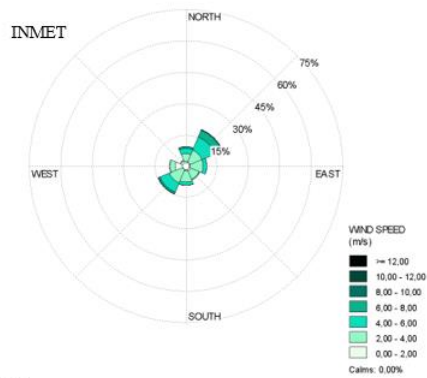


Figura 15. Rosa dos ventos dos dados observados (INMET) e da reanálise (ERA5-Land) por estação do ano para Macaé: a) Verão (DJF), b) Outono (MAM), c) Inverno (JJA) e d) Primavera (SON).
 Fonte: Autor (2019).

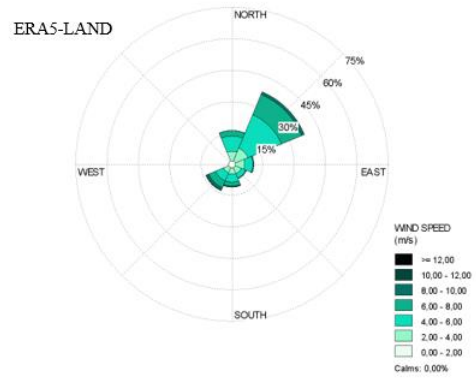
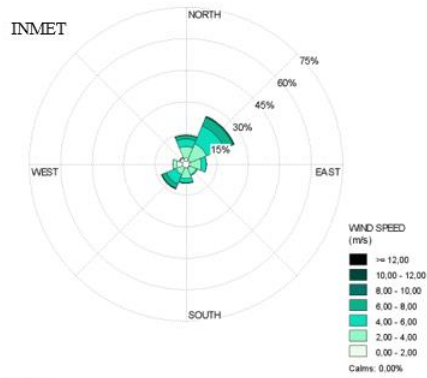
a) DJF



b) MAM



c) JJA



d) SON

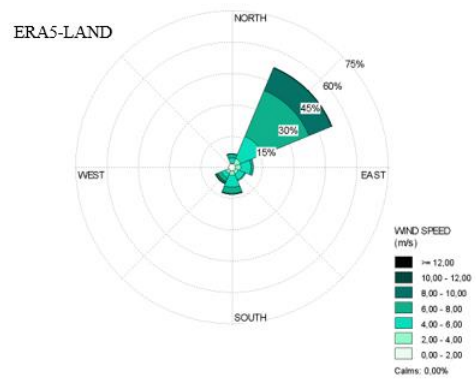
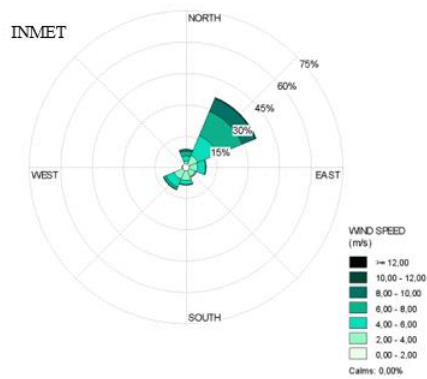
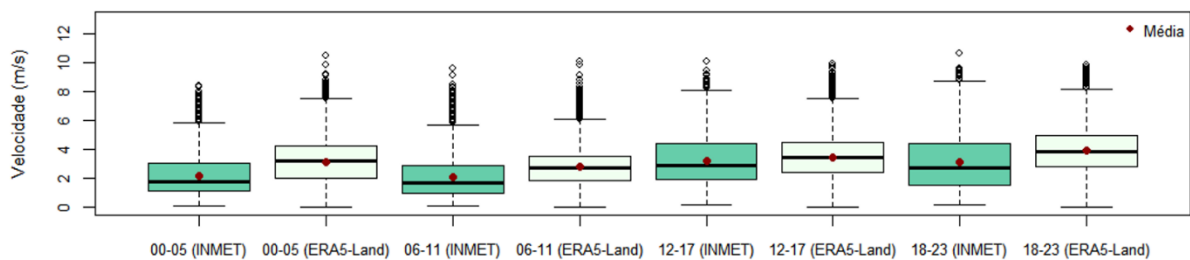


Figura 16. Rosa dos ventos dos dados observados (INMET) e da reanálise (ERA5-Land) por estação do ano para Campos dos Goytacazes – São Tomé: a) Verão, b) Outono, c) Inverno e d) Primavera. Fonte: Autor (2019).

4.2. ANÁLISE HORÁRIA

Na escala horária (6 em 6 horas), conforme mostra a Figura 17, os dados também apresentam comportamento semelhante, com velocidades maiores registradas entre 12 e 23 horas (UTC). Nesse período (12 - 23 horas), as médias foram maiores que 3 e 4 m/s, em Macaé e Campos dos Goytacazes – São Tomé, respectivamente (Tabela 4). Nota-se também que o horário que apresentou maior concordância entre os dados observados e de reanálise foi entre 12 e 17 horas (UTC), em ambas regiões (Figura 17).

a) Macaé



b) Campos - São Tomé

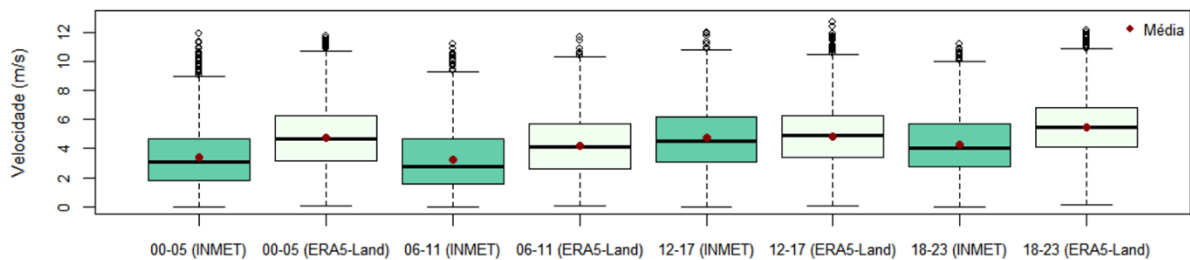


Figura 17. Boxplot da velocidade do vento (m/s) dos dados observados (INMET) e da reanálise (ERA5-Land), de 6 em 6 horas (UTC) para: a) Macaé e b) Campos dos Goytacazes – São Tomé.

Fonte: Autor (2019).

Na Tabela 4, é possível confirmar a maior concordância entre os dados no período de 12 a 17 horas (UTC), pois apresentaram as menores diferenças entre as médias, sendo de 0,23 m/s, em Macaé, e 0,09 m/s, em Campos dos Goytacazes – São Tomé. Também é possível confirmar a tendência do ERA5-Land em superestimar a velocidade do vento e verificar que o erro relativo à diferença entre as médias é maior nos horários em que os ventos são mais fracos, como ocorre de 00h-11h em ambas as cidades.

Tabela 4. Velocidade média (m/s) horária do vento dos dados observados (INMET) e da reanálise (ERA5-Land) para Macaé e Campos dos Goytacazes – São Tomé.

	Horário UTC	Média INMET (m/s)	Média ERA5-Land (m/s)	Diferença entre as Médias (m/s)	Erro (%)
Macaé	00h-05h	2,18	3,12	0,94	43,12
	06h-11h	2,09	2,77	0,68	32,54
	12h-17h	3,22	3,45	0,23	7,14
	18h-23h	3,10	3,90	0,80	25,81
Campos – São Tomé	00h-05h	3,40	4,73	1,33	39,12
	06h-11h	3,24	4,22	0,98	30,25
	12h-17h	4,74	4,83	0,09	1,90
	18h-23h	4,29	5,49	1,20	27,97

Fonte: Autor (2019).

Observa-se na Figura 18a, que, de forma geral, os dados de Macaé apresentam comportamento semelhante na frequência horária (6 em 6 horas) da direção do vento, com predominância de nordeste entre 00 e 11 horas (UTC). No entanto, mostra divergência no intervalo entre 12 e 17 horas (UTC), pois, enquanto os dados da reanálise apontam para ventos predominantemente de nordeste (40%), os dados observados apresentam predominância de leste (25%). No período entre 18 e 23 horas (UTC), os dados indicam preponderância de ventos de leste, com frequências em torno de 30% nos dois conjuntos de dados, demonstrando, inclusive, uma distribuição mais uniforme nos setores do gráfico. Segundo Costa e Lyra (2012), a tendência de ventos de leste verificada neste intervalo pode ter relação com a brisa marítima presente em regiões litorâneas.

Em Campos dos Goytacazes – São Tomé (Figura 18b), verifica-se boa concordância entre os dados observados e de reanálise, no que diz respeito à direção predominante dos ventos (de nordeste). No entanto, é possível notar que os dados do ERA5-Land superestimaram a frequência dos ventos de nordeste em todos os horários, como, por exemplo, entre 06 e 11 horas (UTC), com frequência dos ventos de nordeste de 27% (INMET) e 43% (ERA5-Land).

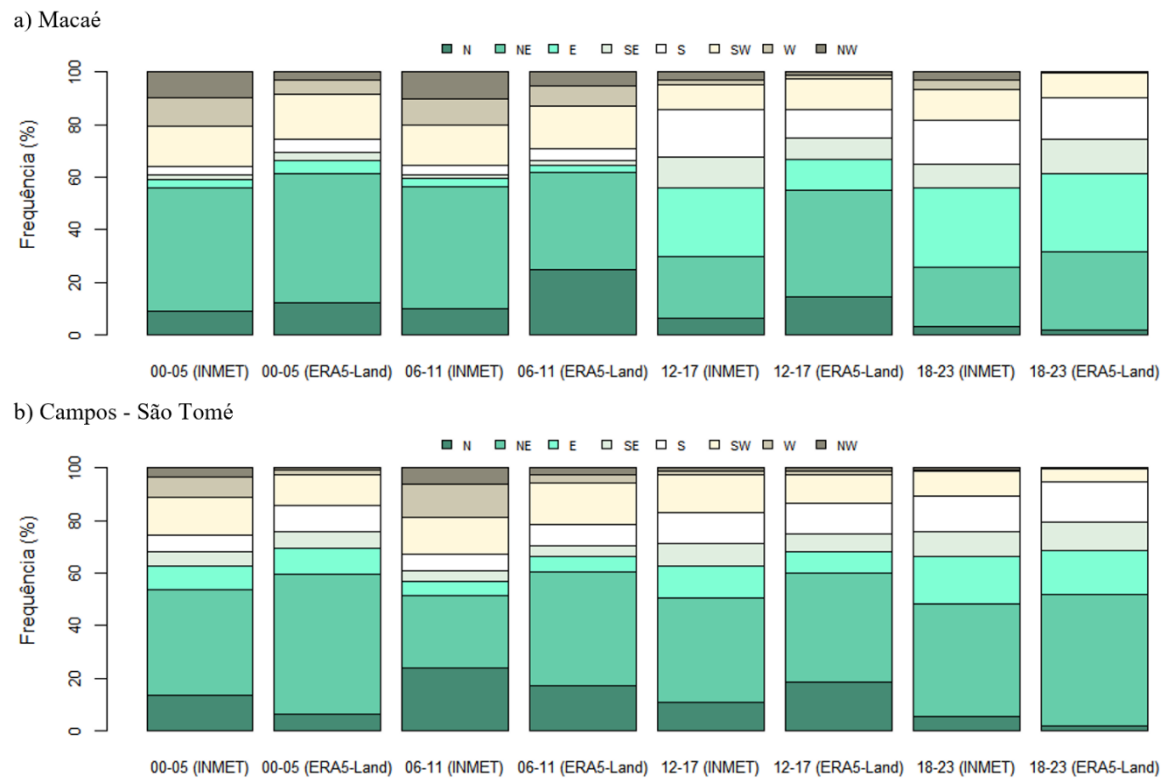
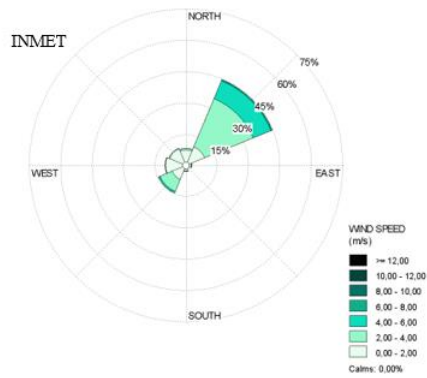


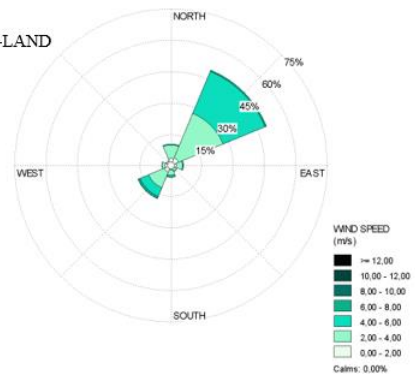
Figura 18. Frequência (%) da direção do vento dos dados observados (INMET) e da reanálise (ERA5-Land) de 6 em 6 horas (UTC) para: a) Macaé e b) Campos dos Goytacazes – São Tomé.
Fonte: Autor (2019).

O comportamento observado na Figura 18, pode ser confirmado nas Figuras 19 e 20, que mostram a comparação da direção da velocidade através das rosas dos ventos. Também é possível fazer a comparação da intensidade da velocidade do vento, confirmando que os dados do ERA5-Land foram superestimados nas duas cidades em estudo (ver Apêndice A3 e A4). Em Macaé, por exemplo, destaca-se o período entre 00 e 05 horas (UTC), intervalo em que os dados do ERA5-Land mostram frequência em torno de 27%, na faixa entre 4 m/s e 6 m/s, o que equivale aproximadamente ao triplo do percentual observado nos dados do INMET (10%).

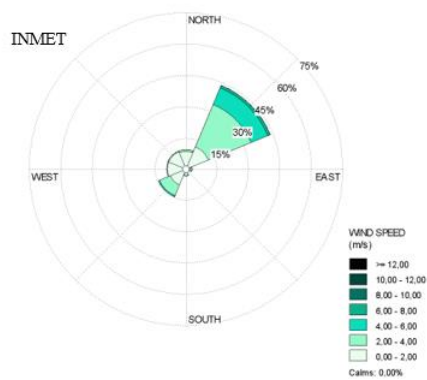
a) 00-05 UTC



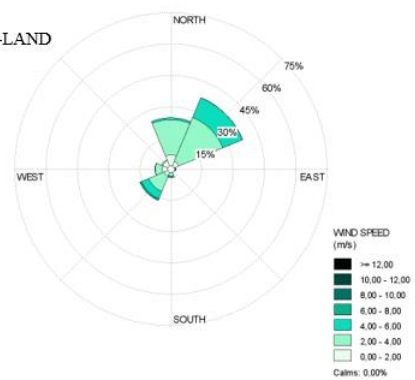
ERAS-LAND



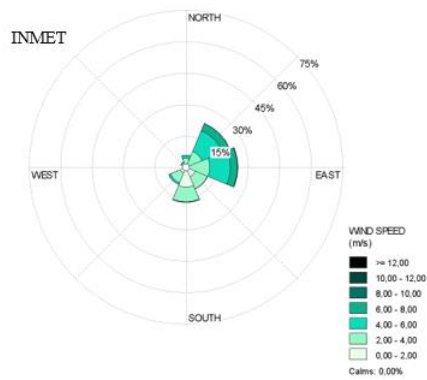
b) 06-11 UTC



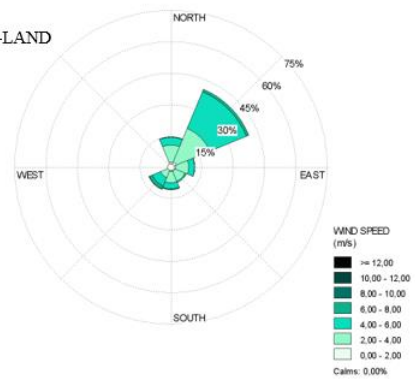
ERAS-LAND



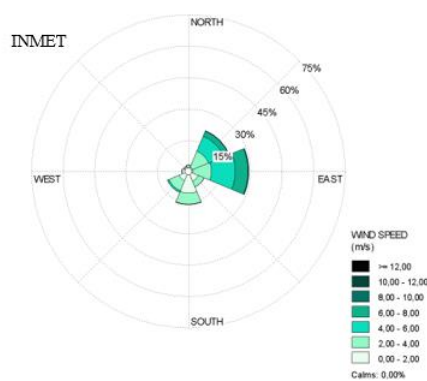
c) 12-17 UTC



ERAS-LAND



d) 18-23 UTC



ERAS-LAND

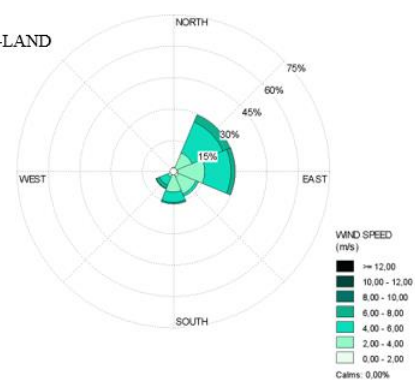
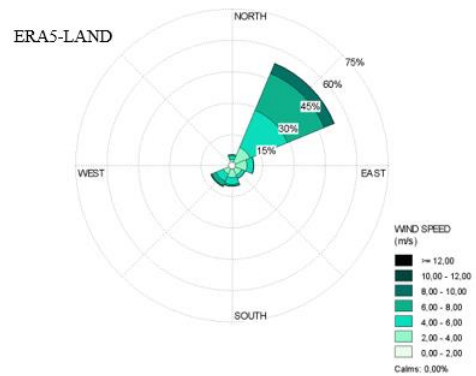
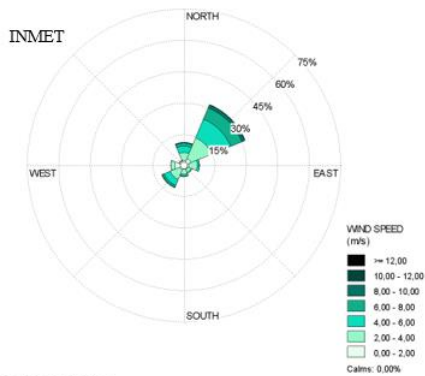


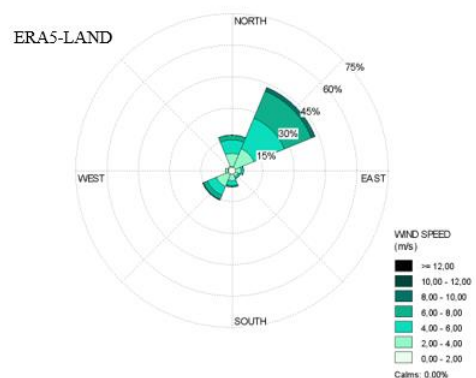
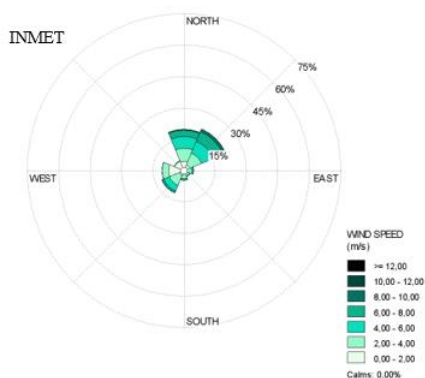
Figura 19. Rosa dos ventos dos dados observados (INMET) e da reanálise (ERA5-Land) de 6 em 6 horas (UTC) para Macaé: a) 00-05 UTC, b) 06-11 UTC, c) 12-17 UTC e d) 18-23 UTC.

Fonte: Autor (2019).

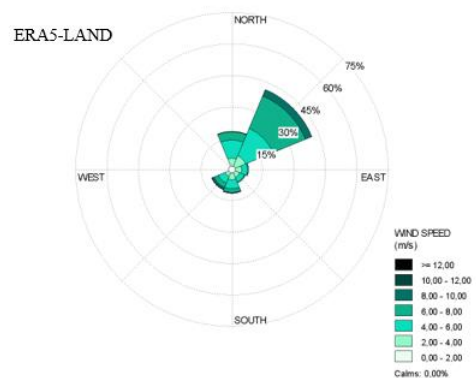
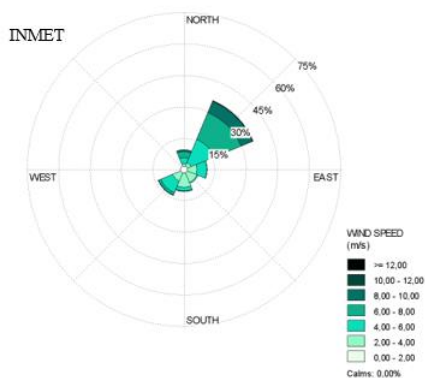
a) 00-05 UTC



b) 06-11 UTC



c) 12-17 UTC



d) 18-23 UTC

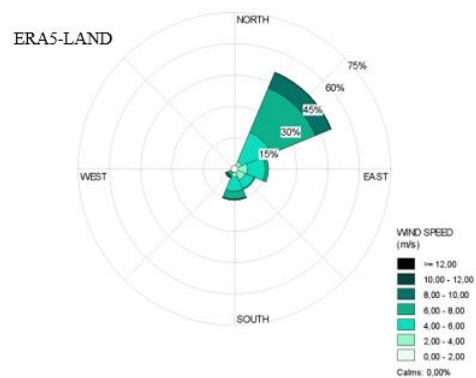
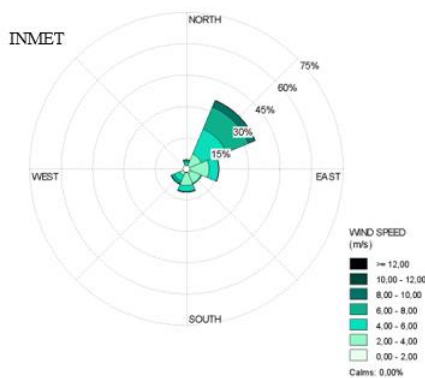


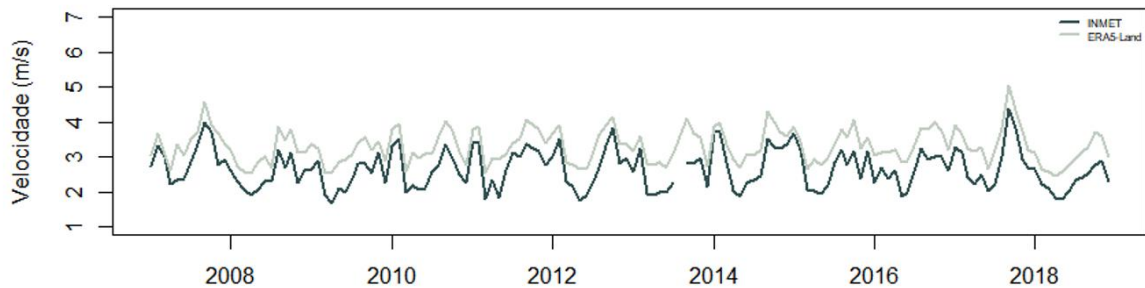
Figura 20. Rosa dos ventos dos dados observados (INMET) e da reanálise (ERA5-Land) de 6 em 6 horas (UTC) para Campos dos Goytacazes – São Tomé: a) 00-05 UTC, b) 06-11 UTC, c) 12-17 UTC e d) 18-23 UTC.

Fonte: Autor (2019).

4.3. SÉRIE TEMPORAL E MÉTRICAS ESTATÍSTICAS

A Figura 21 mostra a comparação das séries temporais da velocidade média mensal do vento. Através da análise dessas séries nota-se uma boa concordância entre os dados observados e os de reanálise ao longo de todo o período analisado. Os dados da reanálise ERA5-Land conseguem reproduzir os ciclos sazonais da velocidade do vento nas duas regiões estudadas, assim como o comportamento geral da série temporal.

a) Macaé



b) Campos - São Tomé

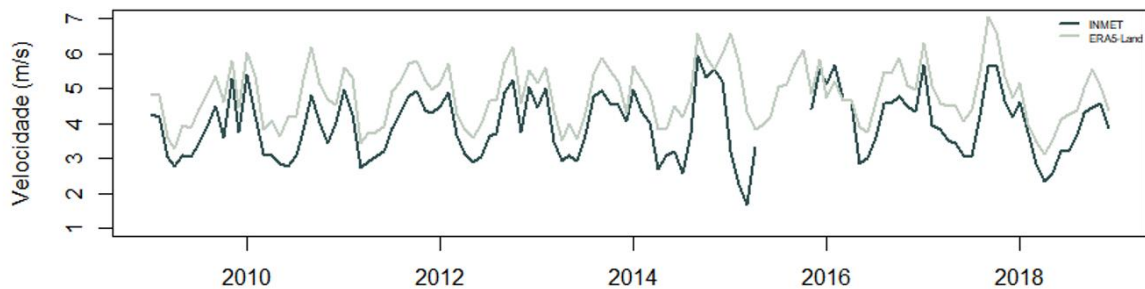


Figura 21. Série temporal da velocidade média mensal dos dados observados (INMET) e da reanálise (ERA5-Land) para: a) Macaé e b) Campos dos Goytacazes – São Tomé.

Fonte: Autor (2019).

As métricas estatísticas utilizadas para avaliar a qualidade dos dados do ERA5-Land foram aplicadas para toda série temporal (Tabela 5), assim como na escala sazonal (Tabela 6) e horária (Tabela 7). Em todas as escalas analisadas, observa-se que o viés foi positivo, confirmando a tendência dos dados do ERA5-Land a superestimar a velocidade do vento. Em termos da dispersão do erro, expressa pelo EAM, os valores são em torno de 1, considerando toda série temporal, para ambas regiões. Vale ressaltar que o EAM indica o afastamento médio absoluto dos dados comparados, apresentando bons resultados quanto mais próximo de zero for o seu valor (STÜKER *et al.*, 2016). No REQm, embora a diferença seja pequena, observa-se que o valor é menor para os dados de Macaé, indicando menor discrepância entre os dados.

Tabela 5. Métricas estatísticas entre os dados observados (INMET) e da reanálise (ERA5-Land) para Macaé e Campos dos Goytacazes – São Tomé, para toda série temporal.

Estação	Viés	EAM	REQM	<i>r</i>
Macaé	0,62	1,06	1,37	0,69
Campos – São Tomé	0,72	1,08	1,48	0,79

Fonte: Autor (2019).

Na escala sazonal (Tabela 6), de maneira geral, observa-se que as estações do ano com melhor performance dos dados de reanálise, ou seja, as que apresentaram os menores valores de viés, do EAM e da REQM, foram verão (DJF) e inverno (JJA) em Macaé e verão (DJF) e outono (MAM) em Campos dos Goytacazes – São Tomé. Vale ressaltar que as menores diferenças entre as médias dos conjuntos dos dados foram observadas no verão (Tabela 3).

Tabela 6. Métricas estatísticas entre os dados observados (INMET) e da reanálise (ERA5-Land) para Macaé e Campos dos Goytacazes – São Tomé, por estação do ano.

	Estação do Ano	Viés	EAM	REQM	<i>r</i>
Macaé	DJF	0,47	0,99	1,27	0,73
	MAM	0,73	1,08	1,38	0,60
	JJA	0,63	0,99	1,32	0,65
	SON	0,67	1,18	1,51	0,70
Campos – São Tomé	DJF	0,57	1,03	1,43	0,77
	MAM	0,65	1,01	1,39	0,71
	JJA	0,89	1,17	1,54	0,76
	SON	0,78	1,13	1,53	0,81

Fonte: Autor (2019).

Na escala horária (6 em 6 horas), as menores dispersões dos erros (EAM), assim como as menores discrepâncias (REQM) dos dados, foram identificadas entre 06 e 11 horas (UTC) para Macaé, e entre 12 e 17 horas (UTC) para Campos dos Goytacazes – São Tomé (Tabela 7).

No que concerne ao coeficiente de correlação (*r*), para toda série temporal (Tabela 5), as correlações foram de 0,69 (Macaé) e 0,79 (Campos dos Goytacazes – São Tomé). Em Campos dos Goytacazes – São Tomé, observa-se coeficientes maiores que 0,7 em todas as estações do ano (Tabela 6) e em todos os horários analisados (Tabela 7); já em Macaé, as correlações foram menores, com valores igual ou maior que 0,7 apenas no verão (DJF) e na primavera (SON). Segundo Dancey e Reidy (2006), correlações acima de 0,7 podem ser consideradas fortes e, entre 0,40 e 0,69, moderadas. Todavia, todos os coeficientes mostrados nas Tabelas 5, 6 e 7, foram significativos a 1% pelo teste t de Student ($p < 0,01$).

Tabela 7. Métricas estatísticas entre os dados observados (INMET) e da reanálise (ERA5-Land) para Macaé e Campos dos Goytacazes – São Tomé, de 6 em 6 horas (UTC).

	Horário UTC	Viés	EAM	REQM	<i>r</i>
Macaé	00h-05h	0,89	1,14	1,49	0,61
	06h-11h	0,64	0,99	1,27	0,64
	12h-17h	0,21	1,07	1,40	0,60
	18h-23h	0,76	1,25	1,59	0,66
Campos – São Tomé	00h-05h	1,03	1,26	1,74	0,75
	06h-11h	0,77	1,07	1,49	0,78
	12h-17h	0,08	1,00	1,35	0,75
	18h-23h	0,99	1,24	1,65	0,75

Fonte: Autor (2019).

4.4 POTENCIAL EÓLICO

Para calcular a densidade de potência nas alturas 50 e 100 metros, inicialmente foi extrapolada a velocidade nessas alturas, por meio da equação 8. A Tabela 8 mostra a velocidade média do vento a 10 metros de altura, bem como os valores extrapolados para 50 e 100 metros.

Cabe salientar que os mais recentes geradores eólicos possuem velocidade de partida (*cut-in*) a partir de 2,5 m/s, quando iniciam a geração de energia, inferindo-se, portanto, que as velocidades médias encontradas neste estudo são favoráveis à produção de energia eólica, sobretudo em Campos dos Goytacazes – São Tomé, por serem constatados valores geralmente acima dessa média de entrada (LIRA; SILVA; ALVES, 2011).

Tabela 8. Velocidade média (m/s) dos dados observados (INMET) e da reanálise (ERA5-Land) para Macaé e Campos dos Goytacazes – São Tomé, nas alturas de 10, 50 e 100 metros.

	Altura (metros)	Velocidade INMET (m/s)	Velocidade ERA5-Land (m/s)
Macaé	10	2,65	3,31
	50	4,06	5,08
	100	4,68	5,85
Campos- São Tomé	10	3,94	4,81
	50	5,74	7,02
	100	6,52	7,98

Fonte: Autor (2019).

Os resultados da Tabela 9, evidenciam claramente a discrepância gerada pelos conjuntos de dados, tendo em vista que uma pequena diferença entre as velocidades médias obtidas

(Tabela 8) remetem a grandes diferenças no potencial calculado, considerando a potência cúbica a que esta variável está submetida. Diante disso, o potencial eólico estimado com base nos dados do ERA5-Land atinge, em geral, aproximadamente o dobro do valor obtido quando estimado com base nos dados observados, deixando transparecer uma fragilidade para estudos de aproveitamento eólico.

Tabela 9. Densidade de Potência (DP) com base nos dados observados (INMET) e da reanálise (ERA5-Land) para Macaé e Campos dos Goytacazes – São Tomé, nas alturas de 10, 50 e 100 metros.

	Altura (metros)	DP INMET (Watts/ m²)	DP ERA5-Land (Watts/ m²)
Macaé	10	11,36	22,21
	50	41,29	80,70
	100	62,88	122,90
Campos – São Tomé	10	37,48	68,42
	50	116,42	212,50
	100	170,44	311,11

Fonte: Autor (2019).

Na escala sazonal (Tabela 10) e horária (Tabela 12), observa-se que, de maneira geral, as velocidades médias em Macaé também foram menores em comparação as de Campos dos Goytacazes – São Tomé, nas três alturas analisadas (10, 50 e 100 metros), apresentando as maiores médias na primavera (SON) e no verão (DJF), assim como entre 12 e 17 horas (UTC), considerando-se os dados do INMET. Em Macaé, a 100 metros, a maior velocidade média foi de 5,46 m/s (SON) e, em Campos dos Goytacazes – São Tomé, foi de 7,72 m/s (SON), consequentemente apresentaram, nesses períodos, as maiores densidades de potência. Nas Tabelas 11 e 13, confirma-se a discrepância entre as densidades de potência, onde o potencial eólico estimado utilizando os dados do ERA5-Land foi, em alguns casos, aproximadamente o triplo daquele relativo aos dados do INMET, como ocorreu em ambas as cidades entre 00 e 05 horas (UTC).

É importante destacar que a causa dessa discrepância entre as densidades de potência, como anteriormente destacado, é a dependência cúbica da velocidade do vento. Fontenelle (2019) obteve resultado semelhante ao analisar a densidade de potência utilizando a reanálise ERA Interim, constatando que este banco de dados também superestima os valores de velocidade média e da densidade de potência, em relação aos dados do INMET, para a cidade do Rio de Janeiro e de São Paulo, bem como para outras cidades do Brasil. Rio (2008), ao avaliar a viabilidade da estimativa do potencial eólico em Portugal, verificou que tanto a

potência como a velocidade média do vento previstas através das séries de reanálise encontram-se bastante longe dos valores esperados, identificando uma subestimativa sistemática do vento. Assim, tem-se que a qualidade dos resultados não é igual para qualquer ponto do globo, podendo existir locais com melhores ou piores resultados.

É importante ressaltar que não existe um produto de reanálise ou de modelo único que seja melhor em todos os casos (WANG; GUO; HUANG, 2011), portanto, outros produtos podem apresentar estimativas melhores nas regiões analisadas. Santos (2019), por exemplo, indica que a utilização de modelos regionais tem gerado resultados satisfatórios no que se refere à simulação da velocidade do vento, com destaque para o *Weather Research and Forecasting* (WRF), um modelo atmosférico de mesoescala, aberto e flexível, comumente utilizado em pesquisa científica e previsão operacional do tempo.

Tabela 10. Velocidade média (m/s) sazonal dos dados observados (INMET) e da reanálise (ERA5-Land) para Macaé e Campos dos Goytacazes – São Tomé, nas alturas de 10, 50 e 100 metros.

	Estação do Ano	Velocidade INMET (m/s)			Velocidade ERA5-Land (m/s)		
		10 metros	50 metros	100 metros	10 metros	50 metros	100 metros
Macaé	DJF	2,91	4,48	5,15	3,38	5,20	5,99
	MAM	2,10	3,24	3,73	2,85	4,38	5,05
	JJA	2,49	3,82	4,40	3,23	4,96	5,70
	SON	3,09	4,75	5,46	3,79	5,82	6,70
Campos – São Tomé	DJF	4,48	6,55	7,43	5,22	7,62	8,65
	MAM	3,13	4,57	5,19	3,94	5,76	6,54
	JJA	3,49	5,10	5,79	4,52	6,60	7,50
	SON	4,65	6,79	7,72	5,57	8,14	9,24

Fonte: Autor (2019).

Tabela 11. Densidade de Potência (DP) sazonal com base nos dados observados (INMET) e da reanálise (ERA5-Land) para Macaé e Campos dos Goytacazes – São Tomé, nas alturas de 10, 50 e 100 metros.

	Estação do Ano	DP INMET (Watts/ m ²)			DP ERA5-Land (Watts/ m ²)		
		10 metros	50 metros	100 metros	10 metros	50 metros	100 metros
Macaé	DJF	15,14	54,98	83,73	23,74	86,23	131,32
	MAM	5,73	20,83	31,73	14,22	51,64	78,65
	JJA	9,41	34,18	52,05	20,55	74,64	113,67
	SON	18,04	65,55	99,83	33,24	120,77	183,92
Campos – São Tomé	DJF	55,34	171,88	251,63	87,31	271,17	396,99
	MAM	18,84	58,52	85,67	37,68	117,01	171,30
	JJA	26,12	81,12	118,76	56,77	176,31	258,11
	SON	61,87	192,15	281,32	106,36	330,30	483,56

Fonte: Autor (2019).

Tabela 12. Velocidade média (m/s) horária dos dados observados (INMET) e da reanálise (ERA5-Land) para Macaé e Campos dos Goytacazes – São Tomé, nas alturas de 10, 50 e 100 metros.

	Horário UTC	Velocidade INMET (m/s)			Velocidade ERA5-Land (m/s)		
		10 metros	50 metros	100 metros	10 metros	50 metros	100 metros
Macaé	00h-05h	2,18	3,34	3,85	3,12	4,80	5,52
	06h-11h	2,09	3,21	3,69	2,77	4,26	4,90
	12h-17h	3,22	4,95	5,70	3,45	5,30	6,10
	18h-23h	3,10	4,76	5,48	3,90	6,00	6,90
Campos – São Tomé	00h-05h	3,40	4,96	5,63	4,73	6,90	7,83
	06h-11h	3,24	4,72	5,36	4,22	6,15	6,98
	12h-17h	4,74	6,91	7,85	4,83	7,05	8,00
	18h-23h	4,29	6,26	7,11	5,49	8,01	9,10

Fonte: Autor (2019).

Tabela 13. Densidade de Potência (DP) horária com base nos dados observados (INMET) e da reanálise (ERA5-Land) para Macaé e Campos dos Goytacazes – São Tomé, nas alturas de 10, 50 e 100 metros.

	Horário UTC	DP INMET (Watts/ m ²)			DP ERA5-Land (Watts/ m ²)		
		10 metros	50 metros	100 metros	10 metros	50 metros	100 metros
Macaé	00h-05h	6,30	22,90	34,88	18,62	67,63	102,99
	06h-11h	5,57	20,25	30,83	13,01	47,27	71,99
	12h-17h	20,46	74,31	113,16	25,14	91,32	139,07
	18h-23h	18,17	66,02	100,54	36,35	132,07	201,13
Campos – São Tomé	00h-05h	24,05	74,68	109,34	64,72	200,98	294,24
	06h-11h	20,79	64,57	97,53	45,88	142,48	208,59
	12h-17h	65,19	202,44	296,38	69,03	214,38	313,85
	18h-23h	48,43	150,41	220,21	101,45	315,05	461,24

Fonte: Autor (2019).

5. CONCLUSÕES

Este estudo consistiu em avaliar a confiabilidade dos dados de vento da reanálise ERA5-Land, visando obter uma avaliação preliminar do potencial eólico no estado do Rio de Janeiro. Para isso, os dados de vento (velocidade e direção) da reanálise ERA5-Land foram comparados com dados de duas estações meteorológicas automáticas do INMET, localizadas em Macaé e Campos dos Goytacazes – São Tomé.

Diante dos resultados obtidos, conclui-se que há uma boa concordância entre os dados da reanálise ERA5-Land e os dados observados do INMET, pois conseguem reproduzir os ciclos sazonais da velocidade do vento, assim como o comportamento geral da série temporal, nas duas regiões analisadas. Com relação à direção dos ventos, os resultados foram semelhantes, com predominância de ventos de nordeste na maioria dos casos analisados, com persistência maior no verão (DJF), com frequência em torno de 41% (INMET) e 53% (ERA5-Land) em Macaé, e 54% (INMET) e 67% (ERA5-Land) em Campos dos Goytacazes – São Tomé.

De forma geral, as maiores velocidades (dados observados e reanálise) foram registradas na primavera (SON) e, as menores, no outono (MAM), em ambas as regiões. Na análise horária, o período que apresentou maior concordância entre os dados observados e de reanálise foi entre 12 e 17 horas (UTC), nas duas localidades. Vale ressaltar que, em comparação com Macaé, a estação meteorológica localizada em Campos dos Goytacazes – São Tomé apresentou maiores velocidades em todas as estações do ano e em todos os períodos (horários) analisados.

Com relação à velocidade do vento, é importante destacar a tendência dos dados do ERA5-Land em superestimar os valores, o que gera discrepâncias entre as densidades de potência estimadas, já que a potência eólica é diretamente proporcional ao cubo da velocidade do vento. Algumas estimativas de densidade de potência, utilizando os dados do ERA5-Land, foram de aproximadamente o triplo daquele relativo aos dados do INMET.

Por fim, conclui-se que o ERA5-Land pode ser uma alternativa para regiões nas quais existem dificuldades na obtenção de dados, seja por ausência de medições ou pela baixa qualidade da série observada. No entanto, a utilização desse banco de dados deve ser feita com cautela, sobretudo no que diz respeito ao aproveitamento eólico, sendo necessária a averiguação e adequação da metodologia aplicada.

Para trabalhos futuros nessa linha de pesquisa, sugere-se investigar a confiabilidade das estimativas de vento de modelos de mesoescala, como *Weather Research and Forecasting*

(WRF) e *Brazilian Regional Atmospheric Modeling System* (BRAMS), testando diferentes combinações de parametrizações, visando o aproveitamento eólico no estado do Rio de Janeiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIEIRAS JUNIOR, R. L. **Caracterização Preliminar da Direção e Velocidade do Vento na Cidade de Macaé, RJ**. 2011. Monografia (Graduação em Engenharia Agrônoma) – Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2011.

AHRENS, C. D. **Essentials of Meteorology: An Invitation to the Atmosphere**. 6. ed. Belmont, CA: Cengage Learning, 2011.

AMARANTE, O. A. C. do; SILVA, F. J. L. da; RIOS FILHO, L. G. **Atlas Eólico do Estado do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro, 2002. Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas_eolico/AtlasEolicoRJ.pdf Acesso em: 09 set. 2019.

AMARANTE, O. A. C. do; ZACK, M. B. J.; SÁ, A. L. de. **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro**. Brasília, 2001. Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas_eolico/Atlas%20do%20Potencial%20Eolico%20Brasileiro.pdf. Acesso em: 09 set. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA (ABEEólica). **Boletim Anual de Geração Eólica**. São Paulo, 2018. Disponível em: http://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2019/05/Boletim-Anual_2018.pdf. Acesso em: 07 set. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA (ABEEólica). **Números ABEEólica**. São Paulo, fev. 2019. São Paulo. Disponível em: <http://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2019/02/N%C3%BAmoros-ABEE%C3%B3lica-02.2019.pdf>. Acesso em: 07 set. 2019.

BARRY, R. G. **Atmosfera, Tempo e Clima**. 9. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

BOENTE, A. N. P. *et al.* Produção de Energia Limpa para Redução dos Impactos Ambientais: Estudo de Caso do Parque Eólico de Gargaú no Estado do Rio de Janeiro. In: SIMPÓSIO DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO E TECNOLOGIA – SEGET, 7., 2015, Rio de Janeiro. **Anais** [...]. Rio de Janeiro: Associação Educacional Dom Bosco, 2015

CALDAS, D. M. **Estudo do Potencial Eólico e Estimativa de Geração de Energia de um Projeto Eólico na Cidade do Rio de Janeiro Utilizando o WINDPRO e o WASP**. 2010. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

CANAL, E. **Estudo de Viabilidade de Sistema de Geração Distribuída de Energia Eólica no Município de Santa Vitória do Palmar, Rio Grande do Sul**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS – ELETROBRAS. CEPEL. **Atlas Eólico do Brasil – versão preliminar**, Relatório Interno, CEPEL, Rio de Janeiro, 1998.

- CICHELERO, N. B. **Tecnologia, Estado e Mercado: Um Estudo sobre a Energia Eólica no Brasil**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Economia) – Faculdade de Ciências Econômicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.
- COMBAT, T. L. M. **Avaliação e Análise de Viabilidade Eólica na Região Norte Fluminense Visando o Atendimento às Demandas Futuras de Energia**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.
- CORRÊA, F. S. **Projeto de uma Turbina Eólica de Eixo Horizontal para Região Litorânea do Estado do Rio de Janeiro**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.
- COSTA FILHO, A. **Análise dos Leilões de Energia Eólica Brasileira no Período de 2009 a 2017**. 2019. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia de Energia). Universidade Federal de Itajubá, Minas Gerais, 2019.
- COSTA, G. B.; LYRA, R. F. da F. Análise dos padrões de vento no Estado de Alagoas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 27, n. 1, 31 – 38, 2012.
- DANCEY, C.; REIDY, J. Estatística sem Matemática para Psicologia: Usando SPSS para Windows. Porto Alegre, Artmed, 2006.
- DE MARIA, H. S.; COSTA, A. A.; SOMBRA, S. S. Modelagem Numérica em Alta Resolução para Previsão de Geração de Energia Eólica no Ceará. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 23, n. 4, p. 477-489, 2008.
- DE LIMA, F. J. L. *et al.* Evaluation of the Wind Power in the State of Paraíba Using the Mesoscale Atmospheric Model Brazilian Developments on the Regional Atmospheric Modelling System. International Scholarly Research Network – **ISRN Renewable Energy**. Volume 2012, Article ID 847356, 16 pages doi:10.5402/2012/847356, 2012.
- DEGOLA, T. S. D. **Impactos e Variabilidade do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul sobre o Brasil no Clima Presente e em Cenários Futuros**. 2013. Dissertação (Mestrado em Meteorologia). Departamento de Ciências Atmosféricas do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.
- DERECZYNSKI, C. P.; MENEZES, W. F. Meteorologia da Bacia de Campos. In: Martins, R.P., Grossmann-Matheson, G.S., editores. **Meteorologia e Oceanografia**. Rio de Janeiro: Elsevier. Habitats, v. 2. p. 1-54, 2015.
- DINIZ, T. B. Expansão da Indústria de Geração de Eólica no Brasil: Uma Análise à Luz da Nova Economia das Instituições. **Planejamento e Políticas Públicas** – PPP, São Paulo, n. 50, jan./jun. 2018.
- DUTRA, R. M. **Viabilidade Técnico-Econômica da Energia Eólica Face ao Novo Marco Regulatório do Setor Elétrico Brasileiro**. 2001. Dissertação (Mestrado em Ciências em Planejamento Energético) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balço Energético Nacional – BEN 2013**. Relatório Síntese/Ano Base 2012. Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-129/topico-100/Relat%C3%B3rio%20S%C3%ADntese%202013.pdf> . Acesso em: 21 nov. 2019.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balço Energético Nacional – BEN 2019**. Relatório Síntese/Ano Base 2018. Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-377/topico-470/Relat%C3%B3rio%20S%C3%ADntese%20BEN%202019%20Ano%20Base%202018.pdf> . Acesso em: 07 set. 2019.

FADIGAS, E. A. F. A. **Energia Eólica**. 1. Ed. São Paulo: Editora Manole, 2011.

FEDOROVA, N. **Meteorologia Sinótica**. Pelotas: Editora e Gráfica Universitária – UFPEL, 2001.

FERREIRA, A. C.; BLASQUES, L. C. M; PINHO, J. T. Avaliações a Respeito da Evolução das Capacidades Contratada e Instalada e dos Custos da Energia Eólica no Brasil: Do PROINFA aos Leilões de Energia. **Revista Brasileira de Energia Solar**, v. V, n. 1, p. 82-91, 2014.

FERREIRA, A. G.; MELLO, N. G. S. Principais Sistemas Atmosféricos Atuantes sobre a Região Nordeste do Brasil e a Influência dos Oceanos Pacífico e Atlântico no Clima da Região. **Revista Brasileira de Climatologia**, Aracaju, v. 1, n. 1, 2005.

FIGUEIREDO FILHO, D. B.; SILVA JÚNIOR, J. A. da. Desvendando os Mistérios do Coeficiente de Correlação de Pearson (r). **Revista Política Hoje**, Pernambuco, Vol. 18, n. 1, 2009.

FONTENELLE, A. L. P. **Geração Eólica Urbana e Segurança Energética: Uso de Dados de Reanálise Atmosférica para Avaliação do Potencial Preliminar**. 2019. Dissertação (Mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos). Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2019.

GRIMM, A. M. **Meteorologia Básica** – Notas de Aula. Paraná, 1999. Disponível em: <https://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/>. Acesso em: 9 set. 2019.

IPCC. **Intergovernmental Panel on Climate Change: Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation**. Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 2011.

JERVELL, J. T. **Estudo da Influência das Características do Vento no Desempenho de Aerogeradores**. 2008. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica). Universidade do Porto, Portugal, 2008.

KALNAY, E. *et al.* The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. **Bulletin of the American Meteorological Society**. Washington, DC, v. 77, n. 3, p. 437–471, 1996.

KRÜGER, E. A. **Análise de Viabilidade técnica de Turbinas de Vento Canalizado na Geração de Energia Eólica**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, 2016.

LIRA, M. A. T; SILVA, E. M. da; ALVES, J. M. B. Estimativa dos Recursos Eólicos no Litoral Cearense usando a Teoria da Regressão Linear. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.26, n.3, 349 - 366, 2011.

MARIANO, E. B.; CAVALCANTI, E. P.; BESERRA, E. A. Análise Comparativa da Velocidade do Vento Simulado Pelo BRAMS com Dados Observados e de Reanálises. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.32, n. 2, 269-276, 2017.

MARTINS, F. R.; GUARNIERI, R. A.; PEREIRA, E. B. O aproveitamento da energia eólica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**. São José dos Campos: Sociedade Brasileira de Física, v. 30, n. 1, 2008.

MORTENSEN, N. G.; L. LANDBERG, I. T.; PETERSEN, E. L. **Wind Atlas Analysis and Application Program (WasP)**. User's Guide, Ris National Laboratory. Roskilde, 1993.

OKE, T. R. *Boundary Layer Climates*, Methuen: London, 372pp, 1978.

OLIVEIRA, S. S.; SOUZA, E. P. Análise de Modelos de Mesoescala para Caracterização do Potencial Eólico do Estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 2, 277-291, 2017.

PICOLO, A. P.; BUHLER, A. J.; RAMPINEI, G. A. Uma Abordagem sobre a Energia Eólica como Alternativa de Ensino de Tópicos de Física Clássica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 36, n. 4, 4306, 2014.

PINTO, L. I. C. *et al.* Comparação de Produtos de Precipitação para a América do sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.24, n.4, 461 - 472, 2009.

PINTO, L. I. C. *et al.* Confiabilidade nas Estimativas do Regime de Vento Fornecidas pelo BRAMS no Estado de Alagoas: Influência do Aninhamento e da Resolução Horizontal de Grades. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.29, n.2, 242 – 258, 2014.

REBOITA, M. S. *et al.* Evidências de Circulação de Brisa Vale-Montanha na Serra da Mantiqueira: Cidade de Itajubá – MG – **Revista Ciência e Natura**, Santa Maria, v. 36, n. 1, 2014.

RIO, J. F. G. do. **Estimativas Preliminares do Potencial Eólico na Ausência de Dados de Vento Locais**. 2008. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2008.

SANTOS, I. G. S. **Previsão da Velocidade do Vento na Escala do Parque Eólico Utilizando o Modelo WRF e Rede Neural Artificial**. 2019. Dissertação (Mestrado em Meteorologia). Universidade Federal de Alagoas – UFAL, Alagoas, 2019.

STUDENT. The Probable Error of a Mean. **Biometrika Trust**, v. 6, n. 1, p. 1-25, 1908.

STÜKER, E. *et al.* Comparação entre os Dados de Vento das Reanálises Meteorológicas ERA-Interim e CFSR com os Dados das Estações Automáticas do INMET no Rio Grande do Sul. **Revista Ciência e Natura**, v.38, Ed. Especial- IX Workshop Brasileiro de Micrometeorologia, p. 284– 290, 2016.

TEIXEIRA, L. S. C. **Análise dos Padrões de Vento no Estado do Rio de Janeiro**. 2018. Monografia (Pós-Graduação *Lato Sensu* em Ciências Atmosféricas para Engenheiros, Ambientalistas e Educadores). Laboratório de Meteorologia do Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Rio de Janeiro, 2018.

TEIXEIRA, W. F.; CAMELO, H. N. Análise da Densidade de Potência Eólica em Regiões de Serra e Litoral do Estado do Ceará. **Revista Ciência e Natura**, Santa Maria EISSN: 2179-460X, Edição Esp. Dez. 2013, p. 459 – 462, 2013.

TROEN, I.; E. L. PETERSEN. **European Wind Atlas**. Ris National Laboratory. Roskilde, Denmark, 1989.

VAREJÃO-SILVA, M. A. **Meteorologia e Climatologia** – Versão Digital 2, Recife, 2006. Disponível em:
http://www.icat.ufal.br/laboratorio/clima/data/uploads/pdf/METEOROLOGIA_E_CLIMATOLOGIA_VD2_Mar_2006.pdf . Acesso em: 7 set. 2019.

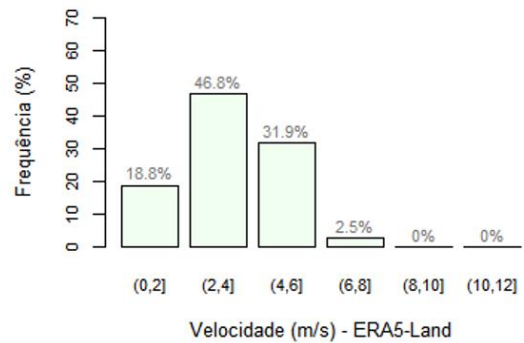
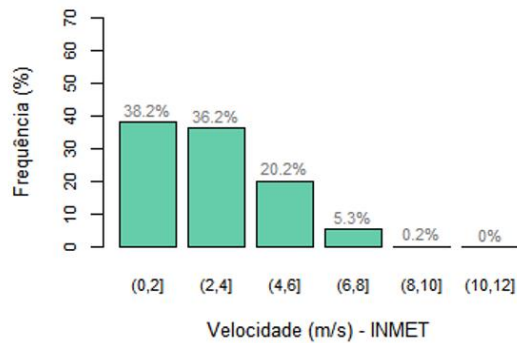
WANG, X.; GUO, P.; HUANGA, X. A Review of Wind Power Forecasting Models. **Energy Procedia** **12**, 770 – 778, 2011.

WILKS, D. S. **Statistical Methods in the Atmospheric Sciences**. Internacional Geophysics Series, vol 91, 2o edn. Academic Press, 2006.

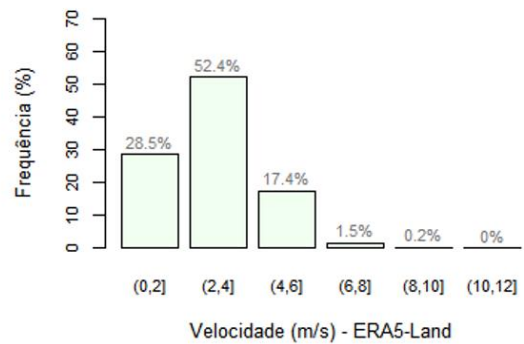
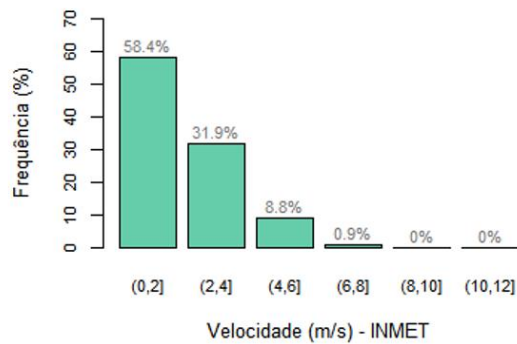
YNOUE, R. Y. *et al.* **Meteorologia: Noções Básicas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2017.

APÊNDICE A – DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA DA VELOCIDADE DO VENTO

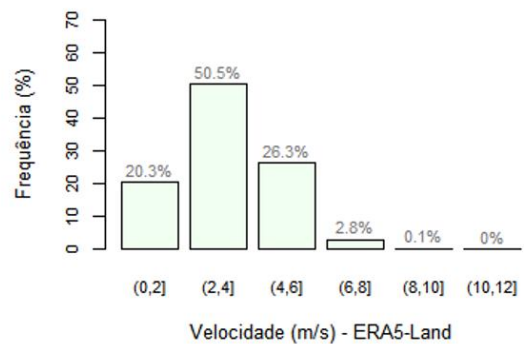
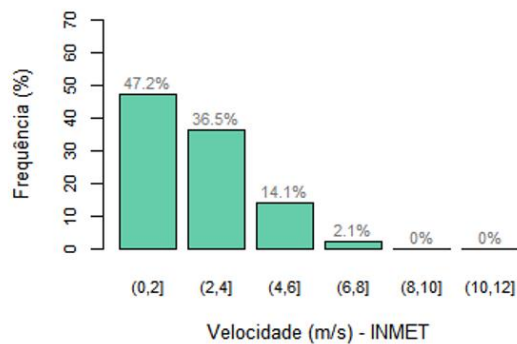
a) DJF



b) MAM



c) JJA



d) SON

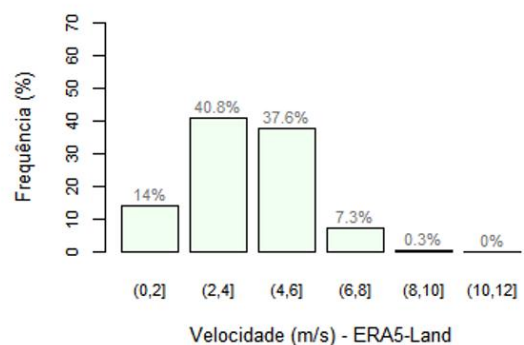
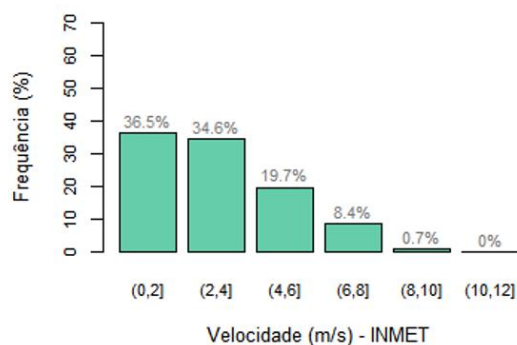
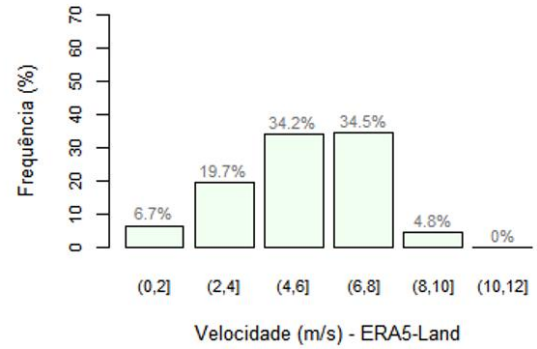
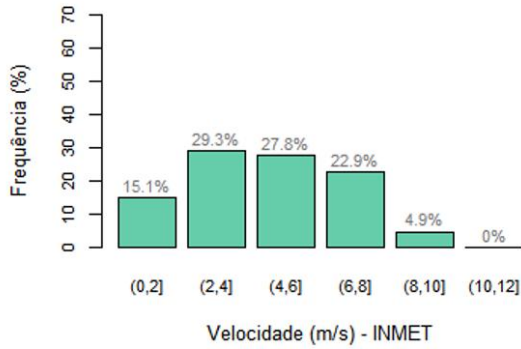
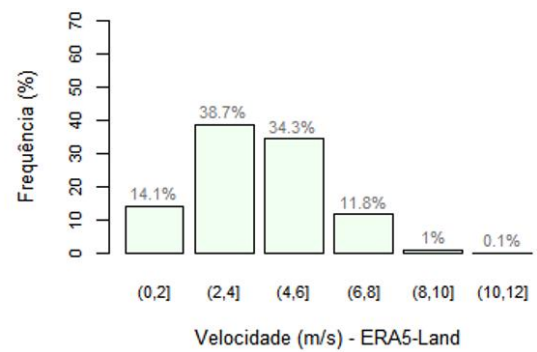
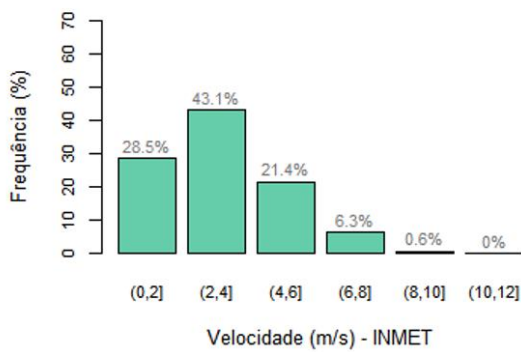


Figura A1. Distribuição de frequência da velocidade do vento dos dados observados (INMET) e da reanálise (ERA5-Land) por estação do ano para Macaé: a) Verão (DJF), b) Outono (MAM), c) Inverno (JJA) e d) Primavera (SON).

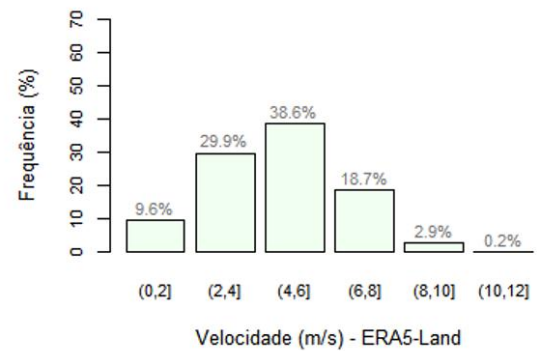
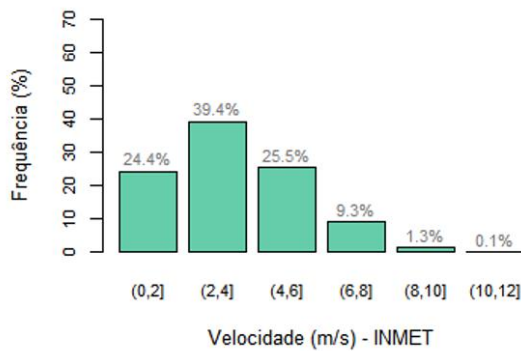
a) DJF



b) MAM



c) JJA



d) SON

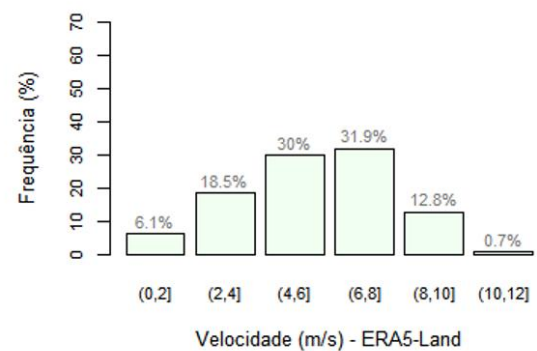
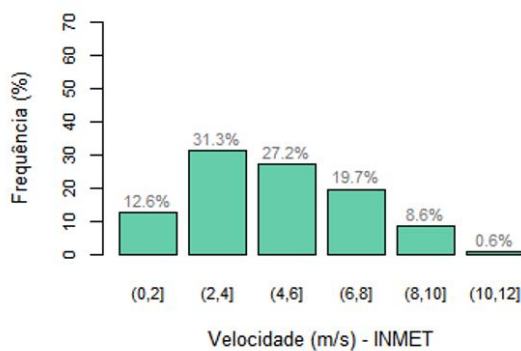
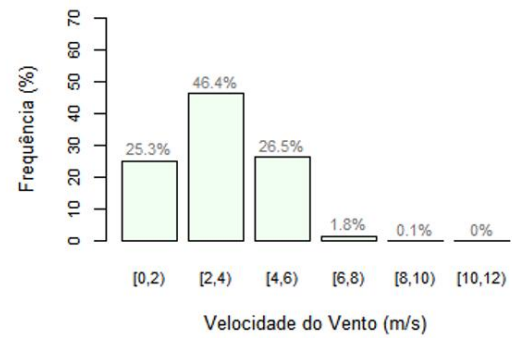
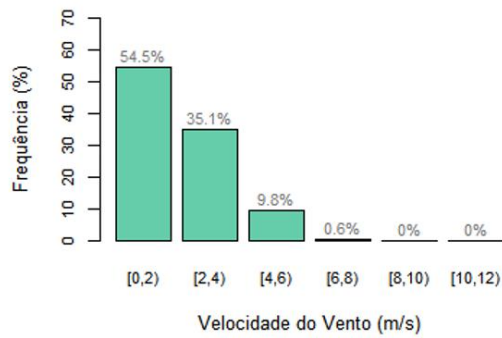
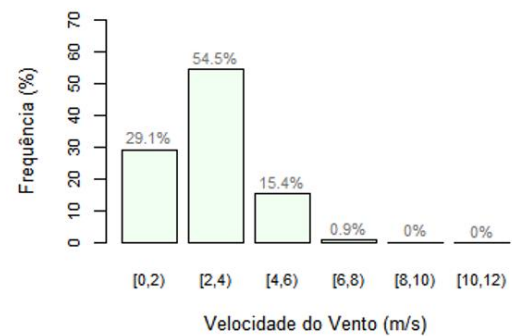
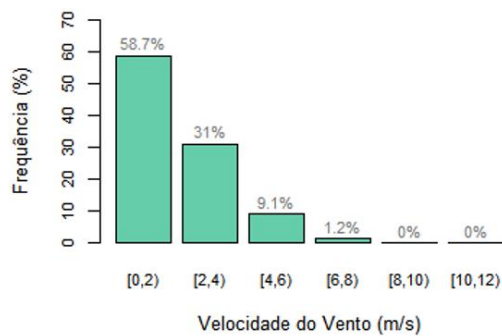


Figura A2. Distribuição de frequência da velocidade do vento dos dados observados (INMET) e da reanálise (ERA5-Land) por estação do ano para Campos dos Goytacazes – São Tomé: a) Verão (DJF), b) Outono (MAM), c) Inverno (JJA) e d) Primavera (SON).

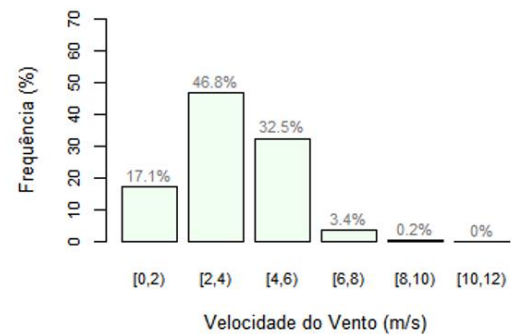
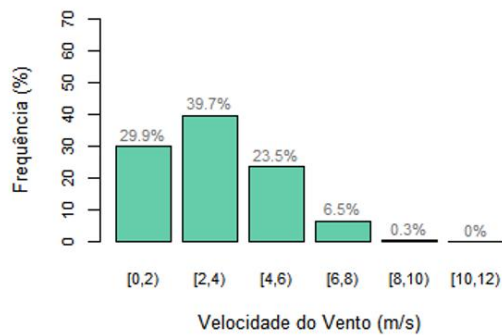
a) 00-05 UTC



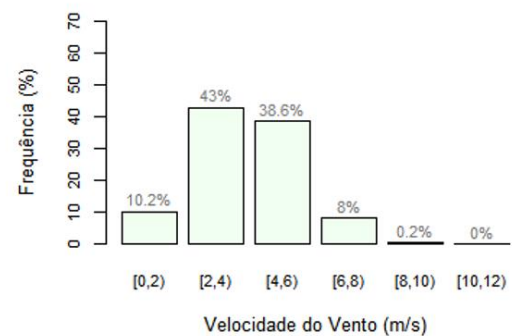
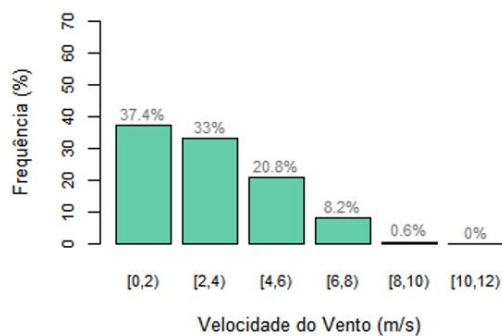
b) 06-11 UTC



c) 12-17 UTC

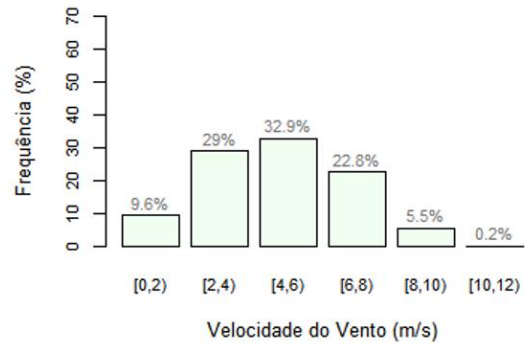
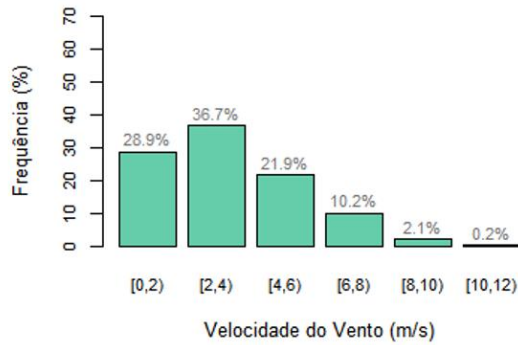


d) 18-23 UTC

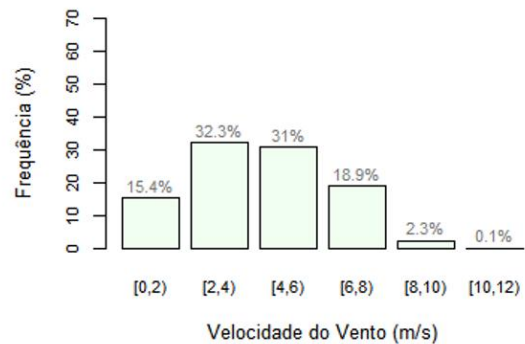
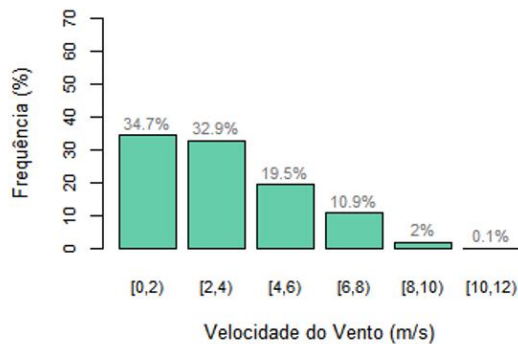


A3. Distribuição de frequência da velocidade do vento dos dados observados (INMET) e da reanálise (ERA5-Land) de 6 em 6 horas (UTC) para Macaé: a) 00-05 UTC, b) 06-11 UTC, c) 12-17 UTC e d) 18-23 UTC. Fonte: Autor (2019).

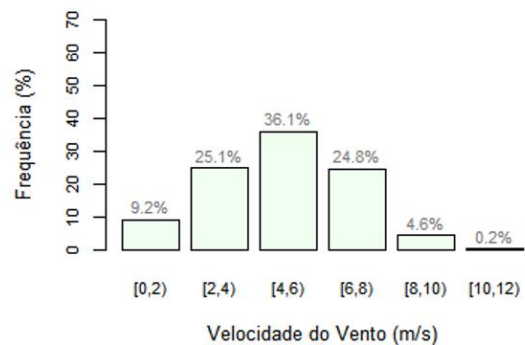
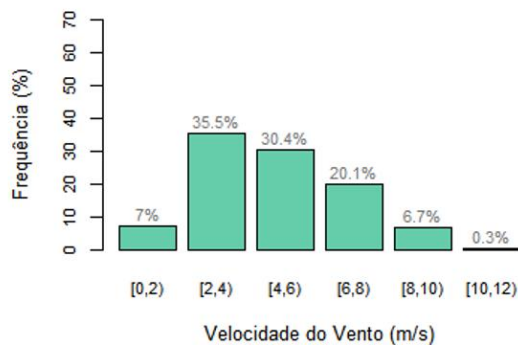
a) 00-05 UTC



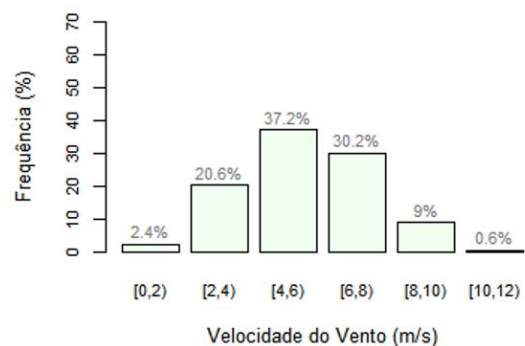
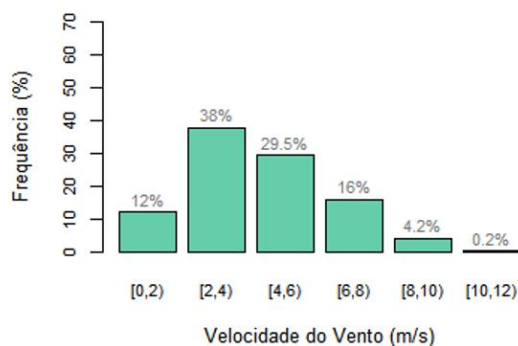
b) 06-11 UTC



c) 12-17 UTC



d) 18-23 UTC



A4. Distribuição de frequência da velocidade do vento dos dados observados (INMET) e da reanálise (ERA5-Land) de 6 em 6 horas (UTC) para Campos dos Goytacazes – São Tomé: a) 00-05 UTC, b) 06-11 UTC, c) 12-17 UTC e d) 18-23 UTC.

Fonte: Autor (2019).