

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE
DARCY RIBEIRO

MARCIEL VAZ MARINHO

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL EÓLICO PARA A GERAÇÃO DE ENERGIA
ELÉTRICA EM RIO DAS OSTRAS e FAROL DE SÃO TOMÉ - RJ

Macaé, março de 2018

MARCIEL VAZ MARINHO

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL EÓLICO PARA A GERAÇÃO DE ENERGIA
ELÉTRICA EM RIO DAS OSTRAS e FAROL DE SÃO TOMÉ - RJ

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 em Ciências Atmosféricas para Engenheiros, Ambientalistas e Educadores.

Orientador: Prof. Isimar de Azevedo Santos (D.Sc.) – UENF

Macaé, março de 2018

MARCIEL VAZ MARINHO

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL EÓLICO PARA A GERAÇÃO DE ENERGIA
ELÉTRICA EM RIO DAS OSTRAS e FAROL DE SÃO TOMÉ - RJ

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 em Ciências Atmosféricas para Engenheiros, Ambientalistas e Educadores.

Aprovada em de de 2018

BANCA EXAMINADORA

Prof. José Ricardo Siqueira (D.Sc.) – UENF

Prof. Nivaldo Silveira Ferreira (D.Sc.) – UENF

Profa. Maria Gertrudes Alvarez Justi da Silva (D.Sc.) – UENF

Prof. Isimar de Azevedo Santos (D.Sc.) – UENF
(PROFESSOR ORIENTADOR)

AGRADECIMENTOS

À Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, pelo ensino gratuito e de qualidade.

Aos Professores Maria Gertrudes Alves Justi da Silva, Nivaldo Silveira Ferreira, José Ricardo Siqueira e ao meu orientador Isimar de Azevedo Santos, pelo conhecimento compartilhado e disponibilidade em ajudar sempre que solicitados.

Aos funcionários do LAMETe LENEP.

Aos colegas de classe pela companhia e amizade ao longo do curso e em especial ao Raphael pela valiosa ajuda ao longo do curso.

À minha mãe pelo apoio incondicional e a Deus por me permitir chegar até aqui.

Obrigado a todos.

“Então ele inclinou os céus e desceu, com nuvem espessa sob os pés. Montado sobre um querubim, voava, pairando sobre as asas do vento.”

Salmos 18:10 - 11

RESUMO

MARINHO, M. V.. **Avaliação do Potencial Eólico para a geração de energia elétrica em Rio das Ostras e Farol de São Tomé – RJ**. Macaé, 2018. 50f. Trabalho de conclusão de curso (Pós-graduação em Ciências Atmosféricas para Engenheiros, Ambientalistas e Educadores) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro-UENF, Campus Macaé, 2018.

Tendo em vista os avanços no uso da energia eólica para a geração de energia elétrica, devido ao seu caráter renovável, abundante e inesgotável, buscou-se, neste trabalho, estimar o potencial eólico anual em função das alturas de 10 m, 50 m, 100 m e 150 m, em quatro localidades pertencentes aos municípios de Rio das Ostras e Campos dos Goytacazes, Estado do Rio de Janeiro, como investigação preliminar para a instalação de sítios eólicos. Também se estudou a variabilidade sazonal na velocidade e direção do vento nestas localidades. Foram utilizados dados de reanálise do NCEP, obtidos a 10 m do solo, e extrapolados para as demais alturas, considerando pontos de grade com resolução de 50 km, no período de 1 de dezembro de 1979 a 1 fevereiro de 2017. Os resultados indicaram direção predominante do vento de Nordeste e maior velocidade do vento no período do verão, e menor velocidade durante o outono. Em todas as estações a velocidade do vento foi maior no período da tarde – 15 h e menor pela manhã – 09 h. Para 10 m de altura, os resultados mostraram velocidade média do vento de 2,7 m/s no Ponto 1 (Farol de São Tomé, 22°S, 41°W), 3,9 m/s no Ponto 2 (Farol de São Tomé, 22°S, 40,5°W), 1,7 m/s no Ponto 3 (Rio das Ostras 22,5°S, 42°W), e 2,7 m/s no Ponto 4 (Rio das Ostras, 22,5°S, 41,5°W). O cálculo do potencial eólico indicou o Ponto 1 como o mais favorável à instalação de um projeto eólico de pequeno porte, em ambiente *onshore* e à partir dos 100 m de altura, situação em que a potência encontrada atingiu 175,7 W/m². Os locais menos favoráveis são os Pontos 3 e 4, cuja potência eólica oscilou entre 5,0 e 19,2 W/m², valores considerados muito baixos para a exploração do vento como fonte de energia.

PALAVRAS-CHAVE: energia eólica, potencial eólico, variação sazonal do vento

ABSTRACT

MARINHO, M. V .. **Evaluation of the Wind Potential for the generation of electric energy in Rio das Ostras and Farol de São Tomé - RJ. Macaé, 2018.** 50f. Completion of course work (Post-graduation in Atmospheric Sciences for Engineers, Ambientalists and Educators) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro-UENF, Campus Macaé, 2018.

Considering the advances in the use of wind energy for the generation of electric power, due to its renewable, abundant and inexhaustible character, this work aimed to estimate the annual wind potential as a function of heights of 10 m, 50 m, 100 m and 150 m, in four locations belonging to the municipalities of Rio das Ostras and Campos dos Goytacazes, State of Rio de Janeiro, as preliminary research for the installation of wind sites. It was also studied the seasonal variability in wind speed and direction in these locations. NCEP reanalysis data, obtained at 10 m from the soil, were used and extrapolated to the other heights at grid points with a resolution of 50 km, from December 1, 1979 to February 1, 2017. The results indicated direction prevailing wind from the Northeast and higher wind speed in the summer period, and slower speed during the fall. In all seasons the wind speed was higher in the afternoon and lower in the morning. At 10 m height, the results showed a mean wind speed of 2.7 m / s at Point 1 (Farol de São Tomé, 22 ° S, 41 ° W), 3.9 m/s at Point 2 (Farol de São Tomé, 22 ° S, 40.5 ° W), 1.7 m/s at Point 3 (Rio das Ostras, 22.5 ° S, 42 ° W), and 2.7 m/s at Point 4 (Rio das Ostras, 22.5 ° S, 41.5 ° W). The calculation of the wind potential indicated Point 1 as the most favorable to the installation of a wind project, in an onshore environment and from 100 m in height, in which the power was found to be 175 W/m². The less favorable sites are Points 3 and 4, whose wind power fluctuated between 5.0 and 19.2 W/m², values considered low for the exploitation of the wind as an energy source.

KEY-WORDS: wind power, wind potential, seasonal wind variation

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Matriz energética brasileira para o ano de 2016. Elaborado pelo autor a partir de MME (2016).....	14
Figura 2: Classificação da profundidade da instalação da turbina e as formas de suporte. Fonte: Raposo, 2014.....	19
Figura 3: Esquema da circulação geral da atmosfera (NUNES, 2012).....	20
Figura 4: Mecanismos sinóticos dominantes no regime de ventos brasileiro e fluminense. Fonte: CRESESB, 2001.....	24
Figura 5: Localização dos pontos de estudo dos dados de velocidade e direção do vento.	26
Figura 6: Variação da velocidade média sazonal do vento medidos a 10 m do solo, por período do dia, considerando dados de reanálise do NCEP, no intervalo de tempo entre 1 de dezembro de 1979 a 1 fevereiro de 2017. A) Ponto 1: Farol de São Tomé (22°S, 41°W), B) Ponto 2: Farol de São Tomé (22°S, 40,5°W), C) Ponto 3: Rio das Ostras (22,5°S, 42°W), D) Ponto 4: Rio das Ostras (22,5°S, 41,5°W).....	31
Figura 7: Direção do vento para o Ponto 1: Farol de São Tomé (22°S, 41°W), de acordo com a estação do ano. I) Inverno, II) Outono, III) Primavera, IV) Verão.....	32
Figura 8: Direção do vento para o Ponto 2: Farol de São Tomé (22°S, 40,5°W), de acordo com a estação do ano. I) Inverno, II) Outono, III) Primavera, IV) Verão.....	32
Figura 9: Direção do vento para o Ponto 3: Rio das Ostras (22,5°S, 42°W), de acordo com a estação do ano. I) Inverno, II) Outono, III) Primavera, IV) Verão.....	33
Figura 10: Direção do vento para o Ponto 4: Rio das Ostras (22,5°S, 41,5°W), de acordo com a estação do ano. I) Inverno, II) Outono, III) Primavera, IV) Verão.....	33
Figura 11: Histograma de frequência e frequência acumulada de distribuição da velocidade do vento (em m/s), para o Ponto 1, medida a 10 m do solo, para N=1710.....	35
Figura 12: Direção do vento para o Ponto 1: Farol de São Tomé (22°S, 41°W), de acordo com os dados obtidos a 10 m de altura em relação ao solo.....	36
Figura 13: Direção do vento para o Ponto 2: Farol de São Tomé (22°S, 40,5°W), de acordo com os dados obtidos a 10 m de altura em relação ao solo.....	37
Figura 14: Histograma de frequência e frequência acumulada de distribuição da velocidade do vento (em m/s), para o Ponto 2, medida a 10 m do solo, para N=1702.....	38
Figura 15: Direção do vento para o Ponto 3: Rio das Ostras (22,5°S, 42°W), de acordo com os dados obtidos a 10 m de altura em relação ao solo.....	40
Figura 16: Histograma de frequência e frequência acumulada de distribuição da velocidade do vento (em m/s), para o Ponto 3, medida a 10 m do solo, para N=1710.....	41
Figura 17: Histograma de frequência e frequência acumulada de distribuição da velocidade do vento (em m/s), para o Ponto 4, medida a 10 m do solo, para N=1703.....	43
Figura 18: Direção do vento para o Ponto 4: Rio das Ostras (22,5°S, 41,5°W), de acordo com os dados obtidos a 10 m de altura em relação ao solo.....	44
Figura 19: Distribuição das velocidades dos ventos, coletados a 10m de altura, para os Pontos 1: Farol de São Tomé (22°S, 41°W); Ponto 2: Farol de São Tomé (22°S, 40,5°W); Ponto 3: Rio das Ostras (22,5°S, 42°W); Ponto 4: Rio das Ostras (22,5°S, 41,5°W).....	45

Figura 20: Potencial Eólico (W/m^2) para todos os pontos estudados, de acordo com a altura. Ponto 1: Farol de São Tomé (22°S , 41°W); Ponto 2: Farol de São Tomé (22°S , $40,5^\circ\text{W}$); Ponto 3: Rio das Ostras ($22,5^\circ\text{S}$, 42°W); Ponto 4: Rio das Ostras ($22,5^\circ\text{S}$, $41,5^\circ\text{W}$)..... 46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1-Potência Instalada, geração e fator de capacidade da energia eólica no mundo para o ano de 2016.....	14
Tabela 2: Geração e Potência Instalada de Energia Eólica no Brasil em 2016, por Estado....	15
Tabela 3: Principais características das escalas atmosféricas. Fonte: Pinto (2013).....	18
Tabela 4: Valores de rugosidade para diferentes superfícies, em mm.....	20
Tabela 5: Localidade e localização de análise da velocidade e direção do vento para avaliação do potencial eólico.....	26
Tabela 6: Estatística Descritiva da velocidade do vento (em m/s) para o Ponto 1: Farol de São Tomé (22°S, 41°W).....	34
Tabela 7: Faixa de frequência de maior ocorrência da velocidade do vento (m/s) de acordo com a altura extrapolada, para o Ponto 1: Farol de São Tomé (22°S, 41°W).....	35
Tabela 8: Potencial Eólico (em W/m ²) para o Ponto 1, Farol de São Tomé (22°S, 41°W)....	35
Tabela 9: Estatística Descritiva da velocidade do vento (em m/s) para o Ponto 2: Farol de São Tomé (22°S, 40,5°W).....	36
Tabela 10: Faixa de frequência de maior ocorrência da velocidade do vento (m/s) de acordo com a altura extrapolada, para o Ponto 2: Farol de São Tomé (22°S, 40,5°W).....	38
Tabela 11: Potencial Eólico (em W/m ²) para o Ponto 2, Farol de São Tomé (22°S, 40,5°W)..	39
Tabela 12: Estatística Descritiva da velocidade do vento (em m/s) para o Ponto 3: Rio das Ostras (22,5°S, 42°W).....	39
Tabela 13: Faixa de frequência de maior ocorrência da velocidade do vento (m/s) de acordo com a altura extrapolada, para o Ponto 3: Rio das Ostras (22,5°S, 42°W).....	40
Tabela 14: Potencial Eólico (em W/m ²) para o Ponto 3: Rio das Ostras (22,5°S, 42°W)....	41
Tabela 15: Estatística Descritiva da velocidade do vento (em m/s) para o Ponto 4: Rio das Ostras (22,5°S, 41,5°W).....	42
Tabela 16: Faixa de frequência de maior ocorrência da velocidade do vento (m/s) de acordo com a altura extrapolada, para o Ponto 4: Rio das Ostras (22,5°S, 41,5°W).....	42
Tabela 17: Potencial Eólico (em W/m ²) para o Ponto 4: Rio das Ostras (22,5°S, 41,5°W)....	43

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

1. INTRODUÇÃO	13
1.1 Justificativa	13
1.2 Objetivos.....	16
2 REVISÃO DA LITERATURA	17
2.1 Energia Eólica.....	17
2.1 Circulação geral da atmosfera	19
2.2 Camada limite planetária	21
2.3 Estabilidade atmosférica.....	21
2.4 Caracterização do vento.....	22
2.4.1 Velocidade do vento	22
2.4.2 Perfis verticais do vento e rugosidade	22
2.4.3 Variações temporais e espaciais do vento	23
2.4.3.1 Variações temporais.....	23
2.4.3.2 Variações espaciais.....	24
2.4.4 Medição do vento	25
3 MATERIAIS e MÉTODOS	26
3.1 Materiais	26
3.1.1 Localização do experimento	26
3.1.2 Dados	27
3.2 Método.....	27
3.2.1 Método estatístico de tratamento dos dados para o cálculo do potencial eólico.....	28
3.2.2 Método de determinação da potência eólica.....	29
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	30

4.1 Variação sazonal da velocidade média e direção do vento.....	30
4.2 Avaliação do Potencial Eólico	34
4.2.1 Ponto 1: Farol de São Tomé (22°S, 41°W)	34
4.2.2 Ponto 2: Farol de São Tomé (22°S, 40,5°W).....	36
4.2.3 Ponto 3: Rio das Ostras (22,5°S, 42°W).....	39
4.2.4 Ponto 4: Rio das Ostras (22,5°S, 41,5°W).....	42
4.3 Comparações acerca dos resultados obtidos para a velocidade média e Potencial Eólico de cada localidade estudada	45
5. CONCLUSÃO	47
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48

1 INTRODUÇÃO

1.1 Justificativa

Em face das discussões acerca da intensificação do aquecimento global causado pela liberação de dióxido de carbono e outros poluentes na atmosfera, especialmente devido à utilização dos combustíveis fósseis, e à finitude destes como fonte de energia, tem-se registrado nos últimos anos um aumento na busca por fontes de energias renováveis¹ e limpas. A energia eólica é um destas fontes: devido ao seu caráter tecnicamente mais versátil, limpo, abundante e inesgotável, tem apresentado um crescimento maior na matriz energética mundial, cerca de 23% em 2016, com um acréscimo de 50,2 GW na potência eólica (SATO, 2015). Em termos de geração de energia, o potencial que o vento oferece é de cerca de 200 vezes maior em comparação ao consumo atual de energia no planeta e estima-se para os próximos anos um aumento entre 25% e 30% no consumo da energia gerada pelo vento (CUSTÓDIO, 2013).

Atualmente, a China é a líder na geração de energia eólica no mundo, seguido por Estados Unidos, Alemanha, Espanha e Índia, conforme dados apresentados na Tabela 1. Neste ranking, do Boletim de Energia Eólica Brasil e Mundo – Base 2016, o Brasil aparece na sétima posição, com uma capacidade instalada de 10 MW e geração estimada em 33,5 TWh. Segundo dados do Balanço Energético Nacional, publicado em 2017 – Base 2016, pelo Ministério de Minas e Energia, a utilização da energia eólica na matriz energética brasileira teve um salto de 2% de 2015 para 2016, quando então atingiu o percentual de 5,0 % (Figura 1). Em comparação à capacidade instalada e à geração eólica, medidas em Megawatts-MW, o aumento observado foi de 32,6% e 54,9%, respectivamente. Projeções futuras, contidas no Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE-2026), apresentado pelo Ministério de Minas e Energia (MME), em 2016, indicam que a capacidade instalada de energia eólica no país deverá chegar a 25,8 GW em 2026, o que corresponderá a 12,5% do total da matriz energética nacional.

Dados contidos no Atlas do Potencial Eólico brasileiro, publicado em 2001, indicam a região Nordeste do país como a mais privilegiada em recursos eólicos, concentrando mais de 35%

¹ Entende-se por Energias Alternativas ou Renováveis quaisquer formas de energia cuja taxa de utilização seja inferior à sua taxa de renovação, podendo-se citar a energia solar, eólica, biomassa, geotérmica e hidráulica (BRACKMANN, 2009).

da potência eólica brasileira (GWEC, 2016). A região Centro-Oeste do país apresenta o menor potencial eólico, em grande parte devido à distância da faixa costeira. A Tabela 2 apresenta dados de potência instalada e geração elétrica por Estado do Brasil no ano de 2016.

Tabela 1-Potência Instalada, geração e fator de capacidade da energia eólica no mundo para o ano de 2016. Fonte: MME, 2017.

País	Geração (TWh)	Potência Instalada (MW)	Fator de Capacidade (%)
China	241	148,6	20
Estados Unidos	228,8	82,5	33
Alemanha	77,4	49,5	19
Espanha	48,9	23,0	24
Índia	44,8	28,7	19
Reino Unido	37,5	15,7	29
Brasil	33,5	10,1	42
Canadá	27,2	11,9	27
França	20,7	11,7	21
Itália	17,6	9,3	22
Turquia	16,5	5,4	37
Suécia	15,1	6,6	27
Austrália	13,2	4,6	33
Dinamarca	12,8	5,1	29
Polônia	12,6	5,8	26
Portugal	12,5	5,0	29
México	10,6	3,7	35
Holanda	7,9	4,2	24
Japão	7,1	3,3	25
Romênia	6,7	3,0	25
Outros	67,1	31,3	27
Total	959,5	469,0	24,7

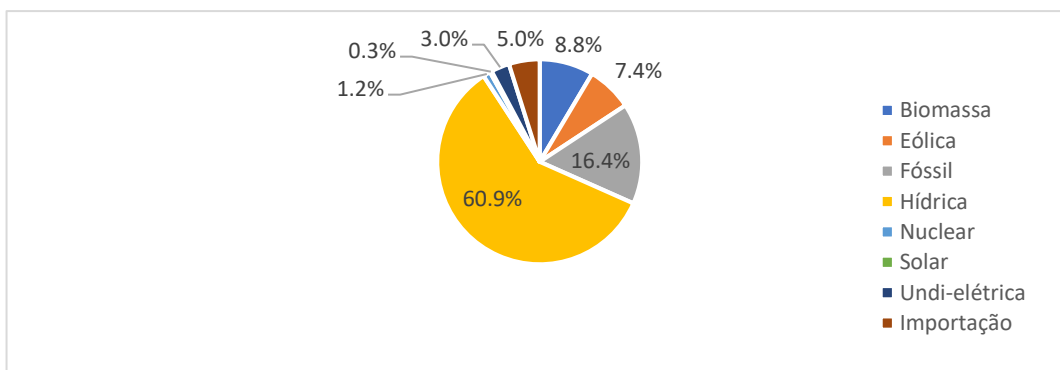


Figura 1: Matriz energética brasileira para o ano de 2016. Elaborado pelo autor a partir do relatório de Ministério de Minas e Energia (MME, 2016).

Tabela 2: Geração e Potência Instalada de Energia Eólica no Brasil em 2016, por Estado.

Estado	Geração (GWh)	Potência Instalada (MW)	Fator de Capacidade (%)
RN	34,7	3.312	44,8
BA	18,8	1.750	46,5
RS	13,9	1.619	33,6
CE	14,8	1.539	39,8
PI	9,4	885	48,4
PE	6,7	648	46,8
SC	0,8	243	13,3
PB	0,5	69	27,0
SE	0,2	35	20,9
RJ	0,2	28	27,9
PR	0,0	3	15,4
BRASIL	100	10.129	41,6

Pensando no desenvolvimento e papel de destaque da energia eólica para o país nos próximos anos, é importante a realização de estudos que objetivem conhecer o potencial energético do Brasil, tanto em áreas *onshore* quanto *offshore*, de forma a serem quantificados e mapeados os locais propícios à instalação de empreendimentos eólicos.

Para o mapeamento do potencial eólico de uma determinada área são necessários trabalhos de coleta e análise sistemática de dados sobre a velocidade e regime dos ventos obtidos, por exemplo, de estações meteorológicas e aeroportos (ANEEL, 2006). Quanto à viabilidade econômica do projeto eólico, é sabido que pode variar grandemente em função da localização geográfica, tais como desníveis topográficos, árvores, construções, que vão influenciar na distribuição do vento, e conseqüentemente, no potencial eólico. Ainda deve-se levar em conta o espaço disponível para a instalação da fazenda eólica, preço da terra, acessibilidade, distância até o centro consumidor, custos de manutenção, infra-estrutura da região, riscos a que as populações podem estar submetidas em função, por exemplo, do desprendimento de partes do equipamento (OCÁCIA, 2002).

Parques eólicos em áreas oceânicas ou *offshore*, embora sejam mais caros, possuem vantagens quanto a maior eficiência energética, já que os ventos no mar tendem a ser mais intensos devido à ausência de barreiras físicas (vegetação, edificações, relevo) e a não ocupação de áreas costeiras de interesse comercial e/ou turístico (NUNES, 2012). Outro fator apontado por Pena *et al.* (2007) diz respeito aos rápidos avanços tecnológicos no setor, o que permitem a instalação de turbinas eólicas de maior capacidade de geração de energia e a alturas de até 100 m, com as pás das turbinas atingindo alturas de 200 m. Tal cenário tende a compensar os custos com instalação, operação e manutenção dos sítios eólicos.

1.2 Objetivos

O presente trabalho tem o objetivo de estudar o potencial eólico em pontos localizados na região de Rio das Ostras e Campos dos Goytacazes, municípios do Estado do Rio de Janeiro, visando os seguintes objetivos específicos:

- Descrever o comportamento sazonal e temporal de dados relativos à velocidade e direção do vento por meio de dados de reanálise, obtidos junto ao NCEP (em inglês, National Center of Environmental Prediction);
- Comparar os resultados de velocidade média e densidade de potência obtidos com dados do Atlas do Potencial Eólico para o Estado do Rio de Janeiro, publicado em 2001, para os pontos localizados em ambiente *onshore*.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Energia Eólica

De acordo com Pinto (2013) energia eólica é definida como a energia cinética contida nas massas de ar em movimento, isto é, os ventos. Através de aerogeradores, essa energia cinética translacional é transformada em energia cinética rotacional e, então, gerando energia elétrica (AMARANTES, 2001).

O aproveitamento da energia eólica, graças aos avanços tecnológicos no setor, pode ocorrer tanto em empreendimentos mais complexos, por exemplo, irrigação e geração de eletricidade para injeção na rede elétrica, quanto em escalas menores, por exemplo, pequenos aerogeradores para geração de eletricidade para eletrodomésticos (SILVA, 1999).

As primeiras experiências para a geração de energia eólica datam do século XIX, e em 1976, na Dinamarca, o primeiro aerogerador ou turbina eólica é ligado à rede elétrica (ALVES, 2009). Atualmente, existem cerca de 95.000 geradores em operação no mundo, concentrados em sua maioria, nos Estados Unidos e em países da Europa, tais como Alemanha, Dinamarca e Espanha (COSTA, 2016).

No Brasil, os primeiros anemógrafos computadorizados e sensores especiais para medição do potencial eólico foram instalados no Ceará e em Fernando de Noronha (PE), no início dos anos de 1990 (ALVES, 2009, p. 03).

Em se tratando de aproveitamento eólico em ambiente *offshore*, a primeira usina foi instalada na Dinamarca em 1991. Tinha capacidade de geração de 450 kW e consistia de 11 turbinas eólicas (BRACKMANN, 2009). A partir daí, devido principalmente ao apoio de políticas públicas governamentais, as usinas eólicas *offshore* se consolidaram como alternativa para a geração de energia nos países europeus, tais como Suécia, Reino Unido, Alemanha e Holanda (NUNES, 2012). Dados da Agência Internacional de Energia Renovável indicam que no ano de 2016 a capacidade eólica *offshore* instalada, na Europa, superou 12,4 GW. Na Ásia, a capacidade instalada somou, em 2016, cerca de 1,5 GW e na América do Norte, apenas 29MW, referente ao parque Block Island, nos Estados Unidos.

A indisponibilidade desse tipo de empreendimento no Brasil se justifica pela grande disponibilidade de área continental desabitada, incapacidade da indústria local de atender a esse segmento e alto custo de instalação das fazendas *offshore*. No entanto, um estudo do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, de 2011, mostra que o potencial energético eólico *offshore* brasileiro é cerca de 12 vezes maior quando comparado ao potencial continental, podendo chegar a 606GW. Entre as áreas de destaque o relatório cita as margens de Sergipe e Alagoas, Rio Grande do Norte e Ceará, e Rio Grande do sul e Santa Catarina.

Dados contidos no Atlas Eólico do Estado do Rio de Janeiro, de 2001, estimam um potencial de geração de energia elétrica offshore de 0,42GW, para uma altura de 50 m, e 0,57GW, para uma altura de 100 m, para ventos iguais ou superiores a 6,5 m/s. Ainda de acordo com o relatório, as três principais áreas para a instalação de empreendimentos eólicos-elétricos são o litoral norte fluminense, aonde estão localizadas as cidades de Macaé e Campos dos Goytacazes; a região dos lagos; e no continente, a região serrana, dentro do polígono Pirai-Vassouras-Petrópolis.

Em se tratando dos custos envolvidos no aproveitamento da energia eólica *offshore*, a empresa Statoil, uma das líderes mundiais no setor, revelou uma redução de 30% nos custos dos seus projetos, concentrados na Europa, entre 2012 a 2017, e a previsão para os próximos anos é que essa redução chegue a 50% (CERNE, 2017).

A queda nos custos dos projetos está diretamente relacionada ao avanço tecnológico na área, que permitiu, por exemplo, o desenvolvimento de turbinas eólicas de maior capacidade de geração de energia elétrica. Atualmente na Europa, há pesquisas para a utilização de turbinas com capacidade de 20MW, podendo serem utilizadas torres de até 200 m de altura. Importante lembrar, para efeitos de comparação, que atualmente, no Brasil, em ambiente *onshore*, são utilizadas turbinas com capacidade de 3MW e torres que atingem o máximo de 100 m de altura (MME, 2017).

De modo similar às turbinas, as fundações têm sido objeto de aprimoramentos tecnológicos. A Figura 2 mostra a classificação da profundidade da instalação e as formas de suporte. Basicamente, existem 3 tipos de fundações: as de estaca (assentadas no fundo do mar), estruturas de armação especial, adequadas para águas de transição e as flutuantes, que estão ancoradas ao fundo do mar, usadas para águas profundas (RAPOSO, 2014). Como regra, os custos do projeto aumentam à medida que a profundidade aumenta (NUNES, 2012).



Figura 2: Classificação da profundidade da instalação da turbina e as formas de suporte. Fonte: Raposo, 2014.

2.2 Circulação geral da atmosfera

Na definição de Pinto (2013) vento é ar em movimento, e como lembra Martins *et al.* (2008), tal definição não se aplica aos movimentos do ar no sentido vertical, apenas horizontal. É o resultado do aquecimento solar diferencial experimentado pelo planeta. Observa-se um excesso e um déficit de radiação absorvida nas regiões equatoriais e polares, respectivamente. De modo a manter o balanço energético do planeta, ocorre uma transferência de energia das latitudes menores para as maiores, principalmente através do vento, mas também pelas correntes oceânicas. Simplificadamente, o ar ao se aquecer torna-se menos denso e ascende, deslocando-se em direção aos polos. Ao se resfriar, desce e retorna ao equador. Cálculos indicam que o fluxo máximo de radiação para os polos ocorre entre 30° e 40° de latitude (BARRY; CHORLEY, 2012; NUNES, 2012).

Nas latitudes entre 30° S e 30° N, a circulação ocorre em direção ao equador na superfície (ventos alísios) e para os polos em nível superior, formando o que se denominou célula de Hadley. Em ambos os hemisférios, entre 30° e 60°, o ar se movimenta em direção aos polos, então se resfria e retorna para as faixas tropicais. São as células de Ferrel, cujos ventos são chamados Ventos de Oeste. Na célula polar, localizada nas latitudes 60° N e 60° S, os ventos deslocam-se dos polos em

direção aos trópicos, se aquecem e retornam à região polar (Figura 3), reiniciando-se o processo (NUNES, 2012).

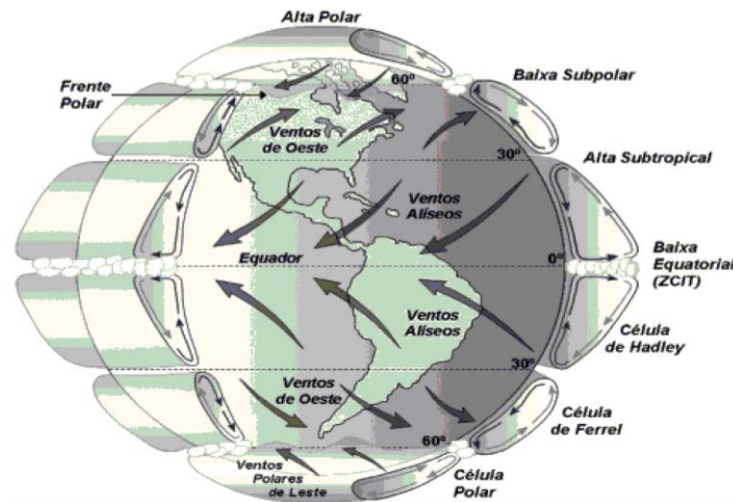


Figura 3: Esquema da circulação geral da atmosfera (NUNES, 2012).

Em meteorologia, os movimentos atmosféricos são classificados de acordo com o tamanho e a duração do vento, que podem variar de acordo com o autor. Ludgens e Tarbuck indicam três grandes escalas de comprimento: microescala, mesoescala e macroescala, que é subdividida em escala sinótica e planetária (Tabela 3) (PINTO, 2013).

Além dos ventos de escala planetária (alísios, polares e ventos de oeste), Dutra (2008) cita a existência de ventos atrelados à estação do ano, por exemplo, os ventos de monções e continentais; ventos periódicos, por exemplo, as brisas marítimas e terrestres, que variam de acordo com o período do dia e são função do aquecimento e resfriamento diferencial do continente e do oceano; e ventos locais que ocorrem devido a diferenças de pressão, por exemplo, os ventos de vales e de montanhas.

Tabela 3: Principais características das escalas atmosféricas. Fonte: Pinto (2013).

Escala	Tamanho (km)	Duração	Fenômeno
Microescala	>1km	Segundos a minutos	Turbulências e rajadas
Mesoescala	1 a 100 km	Minutos a dias	Tempestades, tornados e brisas terrestres
Sinótica	100 a 5000 km	Dias a semanas	Ciclones de latitudes médias, anticiclones e furacões
Planetária	1000 a 40000 km	Semanas a anos	Ventos alísios e ventos de oeste

2.3 Camada limite planetária

A camada limite planetária ou atmosférica é a camada inferior da troposfera em contato com a superfície terrestre, com altura típica de 1 km. Aí, a circulação do ar é influenciada pela ação das forças de atrito, devido à rugosidade da superfície, e pelo aquecimento do ar provocado pela radiação de onda longa refletida pela superfície. Acima desta camada, tem-se o que se denominou atmosfera livre, onde a circulação do ar é essencialmente geostrófica e resulta do balanço entre a força do gradiente de pressão e a força de Coriolis (provocada pelo movimento de rotação da terra em torno do seu eixo) (PEIXOTO; OORT, 1992).

De acordo com Wallace e Hobbs (2006), a camada limite planetária é subdividida em: subcamada laminar, camada limite superficial, camada de mistura e de transição ou entranhamento.

Para a geração de energia eólica, considera-se importante as características e fenômenos ocorridos na camada limite superficial. Varia entre 100 e 200 metros de altura e a intensidade e direção do vento são condicionados especialmente pela natureza da superfície e pelo gradiente vertical da temperatura do ar (VAREJÃO, 2006).

2.4 Estabilidade atmosférica

Para uma atmosfera estável, os fluxos de ar são não turbulentos e estão desacoplados dos fluxos próximos à superfície. Nas situações em que a atmosfera se encontra instável há movimentos convectivos que misturam o ar nas diferentes altitudes (PINTO, 2013).

Para efeitos de avaliação do potencial eólico de determinada região considera-se uma atmosfera neutra, o que permite a aplicação da interpolação logarítmica, técnica utilizada para extrapolar a velocidade do vento a partir da medição realizada a uma determinada altura até a altura do rotor de uma turbina eólica. Para condições neutras o movimento do ar é principalmente governado por processos mecânicos, devido às forças de atrito e assume-se que a velocidade média do vento tem a forma de uma função logarítmica (NUNES, 2012).

2.5 Caracterização do vento

2.5.1 Velocidade do vento

A velocidade do vento é definida pelo vetor tridimensional $V = ui + vj + wk$, onde u é a componente horizontal, v é a componente meridional e w é a componente vertical. Na prática, considera-se a componente vertical desprezível e trabalha-se apenas com as componentes horizontais. Na indústria de energia eólica a velocidade do vento é dada em metros por segundo m/s e sua caracterização é dada em função da sua intensidade e direção (VAREJÃO, 2006).

2.5.2 Perfis verticais do vento e rugosidade

O perfil vertical da velocidade do vento é definido como a alteração da sua componente horizontal em função da altitude. A velocidade do vento tende a aumentar à medida que se afasta da superfície devido à diminuição da força de atrito atuante sobre o fluido e à rugosidade da superfície (SATO, 2015). Na tabela 4 é mostrado os valores de rugosidade de algumas superfícies.

Tabela 4: Valores de rugosidade para diferentes superfícies, em mm.

Tipo de superfície	Z_o (mm)
Superfícies muito lisas, neve	0,01
Mar aberto e calmo	0,20
Mar com ondas	0,50
Gramados	8,00
Pastagens	10,00
Campos cultivados	50,00
Campos com algumas árvores	100,00
Florestas contínuas ou área com construções baixas	1000,00
Centros de cidades com edifícios altos	3000,00

É importante considerar que em áreas *offshore* os ventos são influenciados primordialmente pela rugosidade da superfície oceânica, uma vez que não há obstáculos físicos (vegetação, edificação, relevo) interagindo com o fluido. Na prática as variações da superfície do mar (ondas) produzidas pela velocidade do vento podem ser desconsideradas em análises preliminares de potencial eólico em ambiente *offshore*. Assume-se que a velocidade do vento nos rotores das turbinas eólicas a alturas acima de 80 m dependem da distância efetiva sobre a qual o vento atua sobre a superfície oceânica, perfil vertical da temperatura do ar, condições de estabilidade atmosférica e altura da camada limite planetária (PENA et al., 2009).

2.5.3 Variações temporais e espaciais do vento

2.5.3.1 Variações temporais

As variações temporais podem ser de curto e longo períodos. As variações de longo período, por exemplo interanuais e sazonais, estão relacionadas aos movimentos atmosféricos de escala sinótica e planetária. As variações de curto período, por exemplo, variações diurnas e de curta duração, são influenciadas por gradientes térmicos locais do tipo montanha-vale e oceano-terra (SATO, 2015).

O regime de ventos no Estado do Rio de Janeiro é influenciado por um centro de alta pressão Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul, o que resulta na ocorrência de ventos do quadrante leste e nordeste, e também as incursões de massas polares, denominadas frentes frias (Figura 4). As maiores médias de velocidade do vento situam-se no litoral norte do Estado, na região dos lagos, Cabo Frio e Búzios (CRESESB, 2001).

Via de regra observa-se uma acentuada variação sazonal no regime de ventos no Estado do Rio de Janeiro: os ventos mais intensos são registrados na primavera, entre setembro e novembro, e os mais fracos, de abril a junho, correspondentes ao final do outono e início do inverno (CRESESB, 2001).



Figura 4: Mecanismos sinóticos dominantes no regime de ventos brasileiro e fluminense. Fonte: CRESESB, 2001.

Variações de curta duração na velocidade do vento, tais como turbulências e rajadas podem comprometer a longevidade dos equipamentos de uma turbina eólica. As turbulências são definidas como variações na velocidade do vento entre 1 segundo e 10 minutos em qualquer uma das componentes (horizontal, meridional, vertical) do mesmo. As rajadas são variações bruscas da velocidade e direção do vento (MANWELL *et al.*, 2009).

2.5.3.2 Variações espaciais

As variações espaciais podem ser planetárias, regionais e locais. As variações planetárias são influenciadas pelos mecanismos de circulação geral, devido ao aquecimento desigual da superfície terrestre.

No litoral do Rio de Janeiro, devido a atuação das brisas marinhas e terrestres, o ciclo diurno do vento apresenta variações acentuadas, atingindo um valor mínimo pela manhã e o valor

máximo no final da tarde e início da noite, quando se acentua a influência da brisa marinha (CRESESB, 2001).

Em escala local, os principais mecanismos que influenciam no fluxo atmosférico são a topografia, obstáculos naturais ou artificiais, diferenças de rugosidade entre as superfícies e existência de grandes extensões de massas de água (SILVA, 2007).

2.5.4 Medição do vento

A velocidade do vento é medida por anemômetros. Esses instrumentos podem ser encontrados em edifícios, estações meteorológicas, aeroportos e em turbinas eólicas. Podem ser do tipo rotacionais, de pressão, a laser, de fase, e mais recentemente, de sensoriamento remoto. É importante que estejam calibrados e que as medições sejam as mais precisas possíveis, uma vez que mesmo um erro de 10% na velocidade do vento pode causar uma diferença de 33% na medição da energia gerada (PINTO, 2013).

3 MATERIAIS e MÉTODOS

3.1 Materiais

3.1.1 Localização do experimento

Os locais a serem estudados estão situados no Estado do Rio de Janeiro, nos municípios de Campos dos Goytacazes e Rio das Ostras, conforme Tabela 5 e Figura 5.

Tabela 5: Localidade e localização de análise da velocidade e direção do vento para avaliação do potencial eólico.

Localidade	Localização geográfica
Farol de São Tomé - ponto 1- <i>onshore</i>	22°00'00.0''S, 41°00'00.0''W
Farol de São Tomé - ponto 2 - <i>offshore</i>	22°00'00.0''S, 40°30'00.0''W
Rio das Ostras – ponto 3 – <i>onshore</i>	22°30'00.0''S, 42°00'00.0''W
Rio das Ostras – ponto 4 - <i>offshore</i>	22°30'00.0''S, 41°30'00.0''W

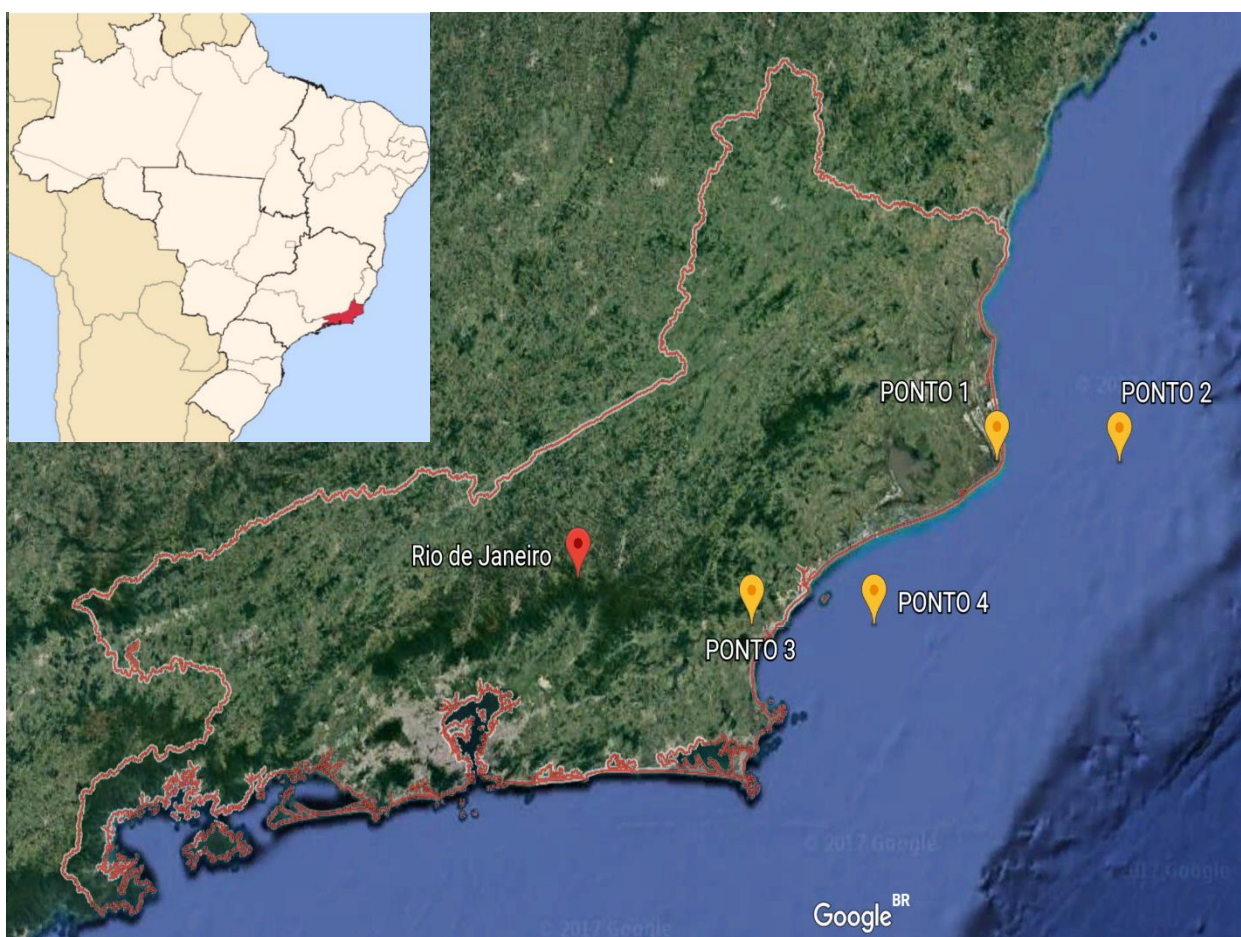


Figura 5: Localização dos pontos de estudo dos dados de velocidade e direção do vento.

3.1.2 Dados

Os dados de velocidade (m/s) e direção do vento (°) foram fornecidos pelo *National Center for Environmental Prediction*-NCEP, no período de 1 de dezembro de 1979 a 1 de fevereiro de 2017, e compilados através do programa GrADS (Grid Analysis and Display System), considerando uma resolução de 50 km, e todos as localidades na interseção entre retas de latitude e longitude. As medidas foram registradas a uma altitude de 10 m, de acordo com os horários 00 UTC, 06 UTC, 12 UTC e 18 UTC, o que no Brasil correspondem a 21 h, 03 h, 09 h e 15 h, respectivamente.

3.2 Método

De posse dos dados, foram feitas avaliações, em escala sazonal e temporal, do comportamento do vento em cada localidade estudada, através do cálculo da velocidade média do vento (Equação 1) e da elaboração de rosas dos ventos, para o conhecimento da direção predominante, com o auxílio do programa WRPLOT (<https://www.weblakes.com/products/wrplot/index.html>).

Para a avaliação do potencial eólico considerou-se todos os dados de velocidade do vento obtidos para cada local considerado (Pontos 1, 2, 3 e 4), não levando em consideração, nessa etapa do trabalho, portanto, sazonalidade e horário das análises.

$$V_m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_i \quad \text{Equação 1}$$

Para a determinação da direção do vento foram considerados oito intervalos correspondentes a cada direção do vento, a saber: norte-N, nordeste-NE, leste-L, sudeste-SE, sul-S, sudoeste-SO, oeste-O e noroeste-NO, cada um representando um intervalo de $\pm 22,5^\circ$, medidos a partir do norte geográfico. Neste caso, por exemplo, a direção nordeste abrange um intervalo entre $22,5^\circ$ e $67,5^\circ$ (SILVA; LOPES; CARVALHO, 2013).

3.2.1 Método estatístico de tratamento dos dados para o cálculo do potencial eólico

A partir da determinação das duas estações a serem investigadas, calculou-se os valores de média (Equação 1), máximos, mínimos, coeficiente de variação em % e o desvio-padrão (equação 2) de cada conjunto de dados.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (V_i - V_m)^2} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

N= número de dados estudados

V_i = velocidade do vento em m/s

O próximo passo consistiu na elaboração dos histogramas de frequência do vento, a fim de determinar a faixa de velocidade do vento que ocorreu com maior frequência.

Após o tratamento estatístico dos dados de velocidade do vento de todas as localidades estudadas a 10 m, os mesmos foram extrapolados para as alturas de 50 m, 100 m e 150 m. Para os Pontos 1 e 3, em ambiente *onshore*, utilizou-se como coeficiente de rugosidade (z_0) o valor de 1 m, e para os Pontos 2 e 4, em ambiente *offshore*, utilizou-se $z_0=0,00002$ m. Em condição atmosférica neutra a velocidade do vento a alturas maiores pode ser estimada por uma curva do tipo logarítmica, a partir de uma altura de referência z_0 , de acordo com a equação 2 (VITERBO, 2008):

$$V = V_{ref} \times \frac{\ln \frac{z}{z_0}}{\ln \frac{z_{ref}}{z_0}} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

V_{ref} = velocidade do vento observada na altura de referência

Z = altura para a qual a velocidade será extrapolada

Z_{ref} = altura de referência

z_0 = rugosidade da superfície

3.2.2 Método de determinação da potência eólica

A densidade de potência fornece uma medida do potencial de geração de energia (Equação 7). É expressa em watts por metro quadrado W/m^2 e representa o fluxo de energia cinética por unidade de área (BRACKMAN *et al.*, 2008; PINTO, 2013).

$$P = \frac{1}{2N} \cdot \rho \cdot \sum_{n=1}^N V_n^3 \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

N = número de dados

v = velocidade do vento em m/s

ρ = densidade do ar em kg/m^3

Ao nível médio do mar, em condições tropicais típicas e a 25°C , a densidade do ar é de aproximadamente $1,18 \text{ kg/m}^3$. Segundo Manwell *et al.* (2009), áreas cujas densidade de potência são superiores a 200 W/m^2 são consideradas adequadas para a instalação de parques eólicos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Variação sazonal da velocidade média e direção do vento

A figura 6 mostra a distribuição da velocidade média sazonal do vento a 10 m de altura do solo, por período do dia, no intervalo de tempo entre 1 de dezembro de 1979 a 1 fevereiro de 2017. Os gráficos A e B representam o Ponto 1 e Ponto 2, respectivamente, ambos os pontos em Farol de São Tomé, e os gráficos C e D, Ponto 3 e Ponto 4, respectivamente, localizados no município de Rio das Ostras. Os pontos 1 e 3 estão localizados em ambiente *onshore*, e os pontos 2 e 4, *offshore* (ver Figura 6).

Observa-se comportamentos semelhantes em todos os Pontos analisados: há um decréscimo na velocidade do vento no outono, e as maiores velocidades médias ocorrem no período de verão, contrariando os resultados expostos no Atlas Eólico do Estado do Rio de Janeiro, de 2001, que aponta a primavera como a estação em que a velocidade média do vento é maior. Ao analisar o período do dia, constata-se que os maiores valores de velocidade média do vento são observados no período de 15 h e o menor, no período de 09 h. Pela manhã, a influência da brisa marítima é acentuada, devido ao aquecimento do continente, atingindo um máximo no período da tarde; com o pôr do sol, o continente começa a se esfriar, e a intensidade da brisa marítima diminui (CRESESB, 2001).

Para 10 m de altura, os resultados mostraram velocidade média do vento de 2,7 m/s no Ponto 1 (Farol de São Tomé, 22°S, 41°W), 3,9 m/s no Ponto 2 (Farol de São Tomé, 22°S, 40,5°W), 1,7 m/s no Ponto 3 (Rio das Ostras 22,5°S, 42°W), e 2,7 m/s no Ponto 4 (Rio das Ostras, 22,5°S, 41,5°W). A diferença de velocidade média do vento entre continente e oceano se deve ao fato de que no oceano valores de rugosidade tendem a ser mais baixos (PENA et al., 2009).

De acordo com as rosas dos ventos (Figuras 7-10), os ventos de Nordeste (NE) são predominantes; nas estações de inverno e outono, para todos os pontos, observa-se uma maior variação na direção do vento, com a presença de ventos de leste, enquanto que na primavera e verão, essas variações são menores.

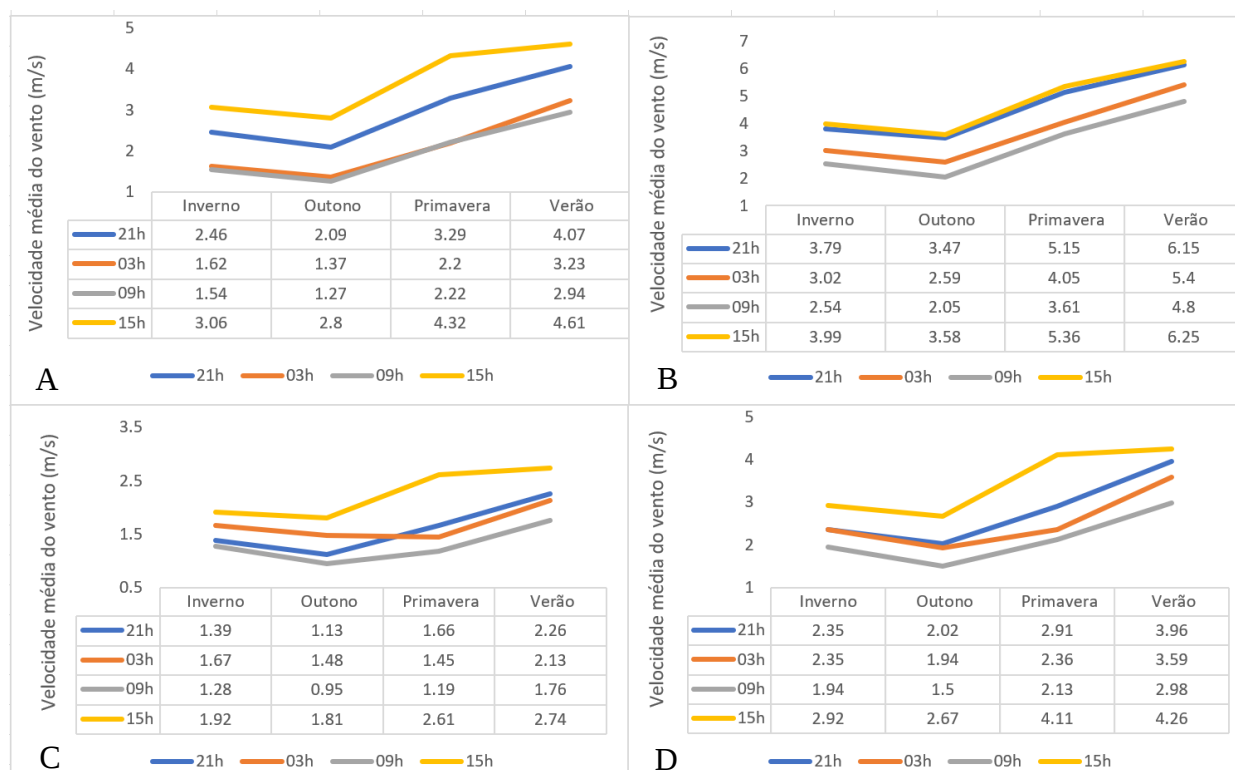


Figura 6: Variação da velocidade média sazonal do vento medidos a 10 m do solo, por período do dia, considerando dados de reanálise do NCEP, no intervalo de tempo entre 1 de dezembro de 1979 a 1 fevereiro de 2017. **A)** Ponto 1: Farol de São Tomé (22°S, 41°W), **B)** Ponto 2: Farol de São Tomé (22°S, 40,5°W), **C)** Ponto 3: Rio das Ostras (22,5°S, 42°W), **D)** Ponto 4: Rio das Ostras (22,5°S, 41,5°W).

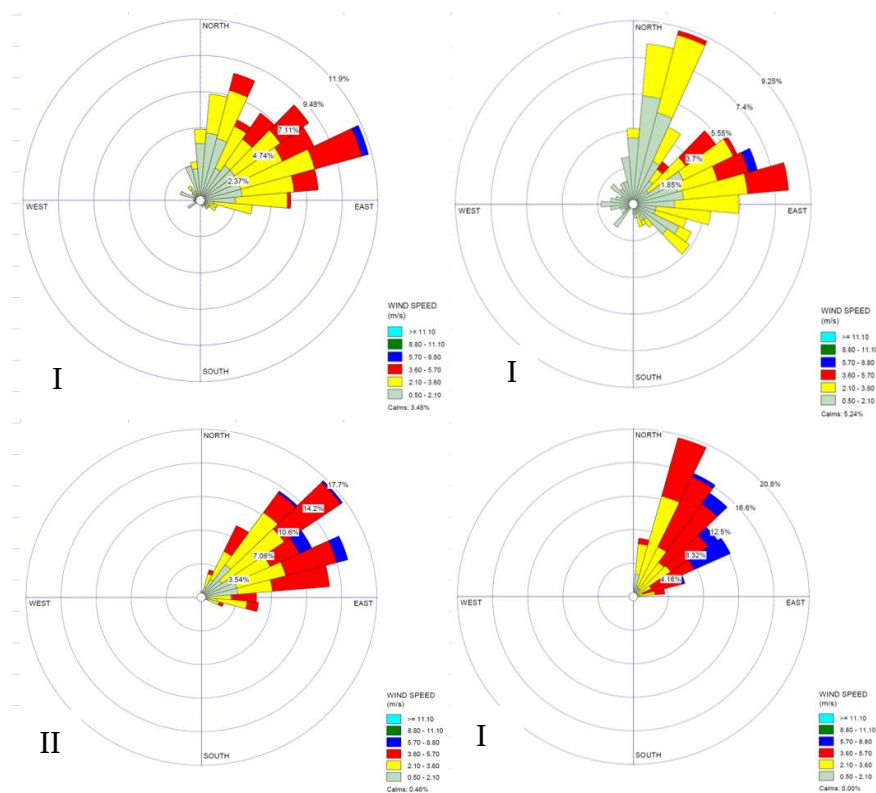


Figura 7: Direção do vento para o Ponto 1: Farol de São Tomé (22°S, 41°W), de acordo com a estação do ano. **I)** Inverno, **II)** Outono, **III)** Primavera, **IV)** Verão.

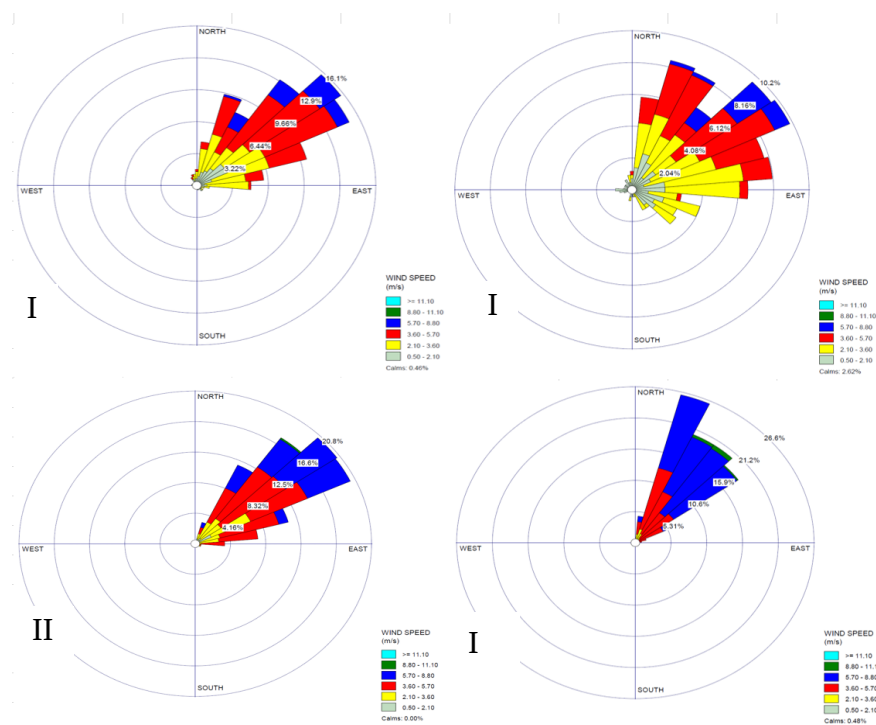


Figura 8: Direção do vento para o Ponto 2: Farol de São Tomé (22°S, 40,5°W), de acordo com a estação do ano. **I)** Inverno, **II)** Outono, **III)** Primavera, **IV)** Verão

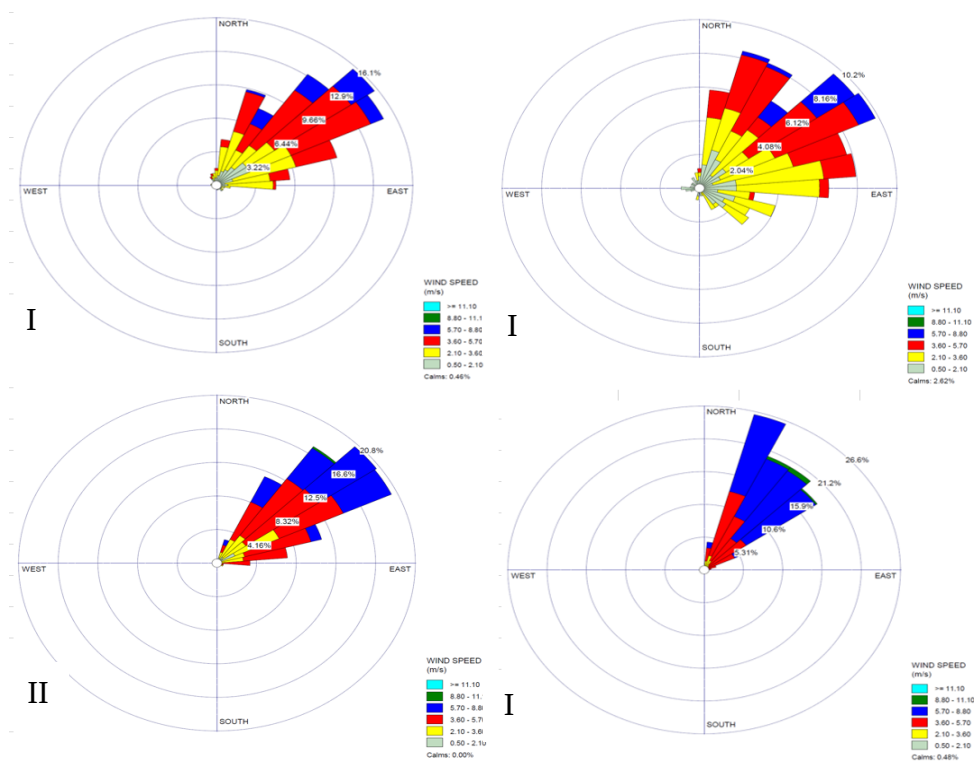


Figura 9: Direção do vento para o Ponto 3: Rio das Ostras (22,5°S, 42°W), de acordo com a estação do ano. **I)** Inverno, **II)** Outono, **III)** Primavera, **IV)** Verão.

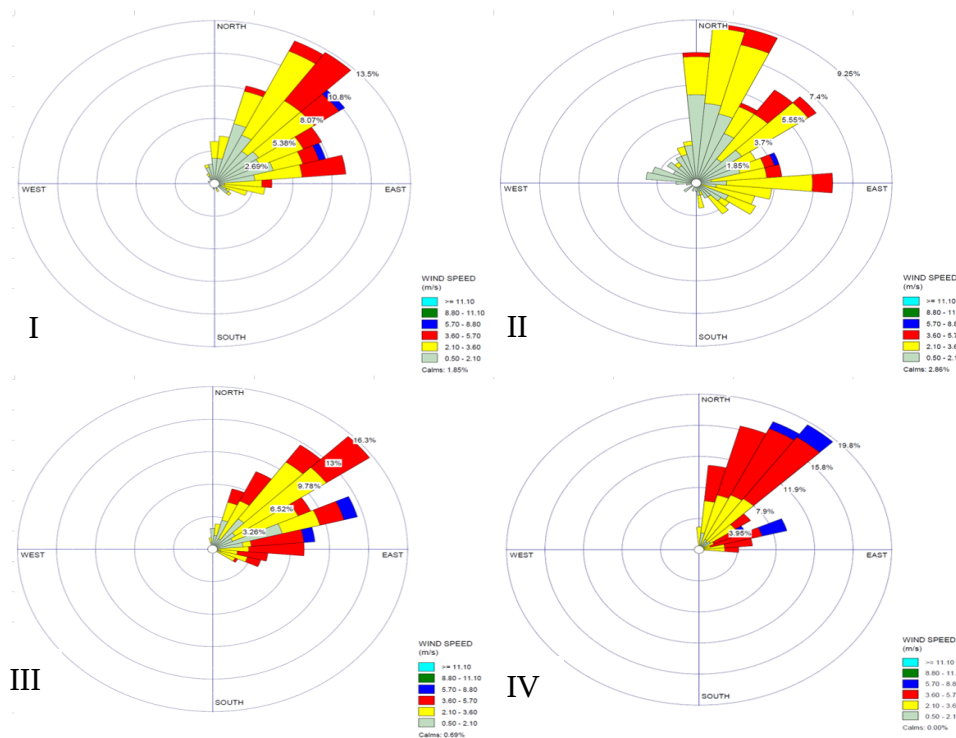


Figura 10: Direção do vento para o Ponto 4: Rio das Ostras (22,5°S, 41,5°W), de acordo com a estação do ano. **I)** Inverno, **II)** Outono, **III)** Primavera, **IV)** Verão.

4.2 Avaliação do Potencial Eólico

4.2.1 Ponto 1: Farol de São Tomé (22°S, 41°W)

A Tabela 6 mostra a velocidade média do vento para as alturas extrapoladas de acordo com os dados. A média das velocidades foram $(2,7 \pm 1,4)$ m/s, a 10 m, $(4,6 \pm 2,4)$ m/s, a 50 m, $(5,4 \pm 2,8)$ m/s, a 100 m, e $(5,9 \pm 3,1)$ m/s a 150 m. O coeficiente de variação ficou em torno de 53%, o que está de acordo com o que comumente se encontra na literatura, que é 55% (SATO, 2015). O Atlas do Potencial Eólico do Estado do Rio de Janeiro indica que a velocidade média anual do vento para o Ponto 1 fica entre 6,0 m/s e 6,5 m/s a 50 m, e entre 6,5 m/s e 7,0 m/s, a 100 m.

Tabela 6: Estatística Descritiva da velocidade do vento (em m/s) para o Ponto 1: Farol de São Tomé (22°S, 41°W).

	10 m	50 m	100 m	150 m
Média	2,7	4,6	5,4	5,9
Desvio Padrão	1,4	2,4	2,8	3,1
Mínimo	0,04	0,06	0,07	0,08
Máximo	8,1	13,8	16,2	17,6
Coeficiente de Variação (%)	52,9	52,9	52,9	52,9

A Figura 11 mostra o histograma de frequência e frequência acumulada para a velocidade do vento, considerando o Ponto 1, à 10 m de altura. Pode-se observar que aproximadamente 80% dos valores encontrados de velocidade do vento estão abaixo de 3,97 m/s e a faixa de maior frequência de ocorrência dos ventos é entre 2,20 m/s e 2,40 m/s. Já para as alturas extrapoladas de 50 m, 100 m e 150 m as faixas de frequência de maior ocorrência estão resumidas na tabela 7, e 90% da ocorrência de vento está abaixo de 8,09 m/s, 9,13 m/s e 9,93 m/s, respectivamente. O histograma para as alturas extrapoladas tem a mesma forma daquele representado na Figura 11 e, por isso, não foi colocado aqui.

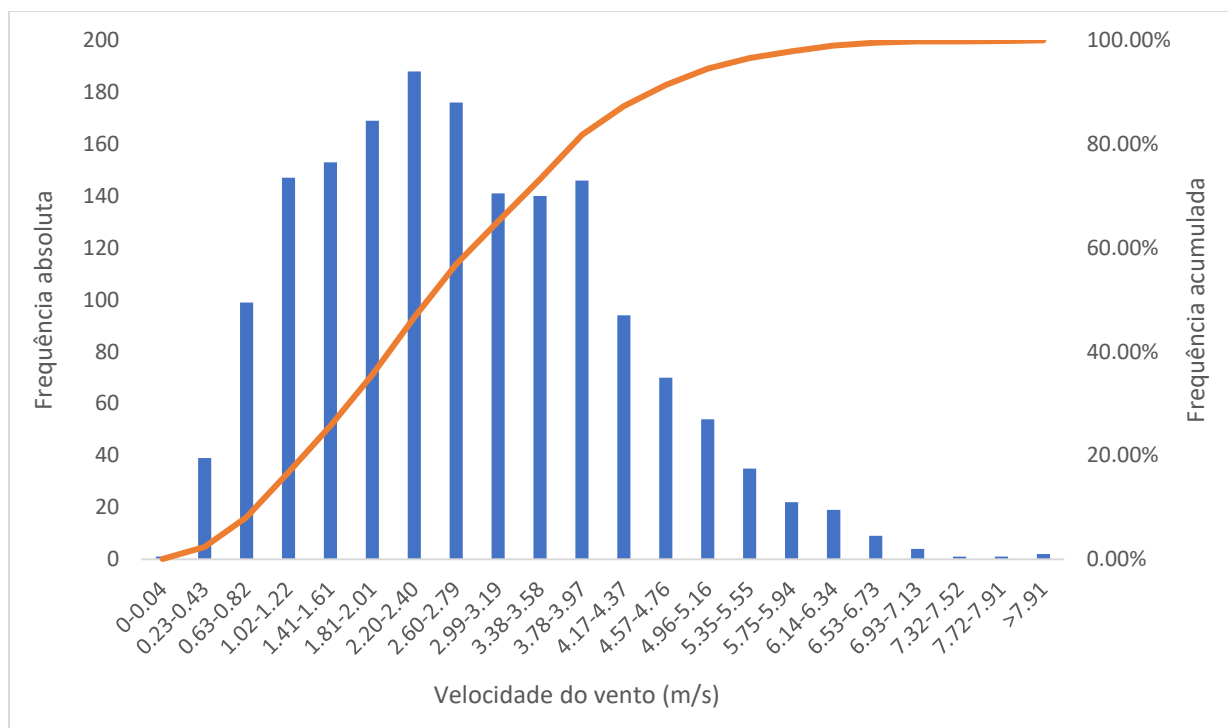


Figura 11: Histograma de frequência e frequência acumulada de distribuição da velocidade do vento (em m/s), para o Ponto 1, medida a 10 m do solo, para N=1710.

Tabela 7: Faixa de frequência de maior ocorrência da velocidade do vento (m/s) de acordo com a altura extrapolada, para o Ponto 1: Farol de São Tomé (22°S, 41°W).

Faixa de frequência de maior ocorrência da velocidade (m/s)	
50 m	3,74 m/s – 4,08 m/s
100 m	4,40 m/s – 4,80 m/s
150 m	4,79 m/s – 5,22 m/s

O potencial eólico para o Ponto 1 está discriminado na Tabela 8. Baseando-se nos valores encontrados pode-se dizer que para o Ponto 1, seria viável a implementação de uma fazenda eólica com turbinas a partir de 150 m de altura do solo. Em se tratando da direção do vento, como exemplificado na Figura 12, predominam os ventos de Nordeste.

Tabela 8: Potencial Eólico (em W/m²) para o Ponto 1, Farol de São Tomé (22°S, 41°W).

Potencial Eólico (W/m ²)	
10m	22,0
50 m	107,7
100 m	175,7
150 m	226,3

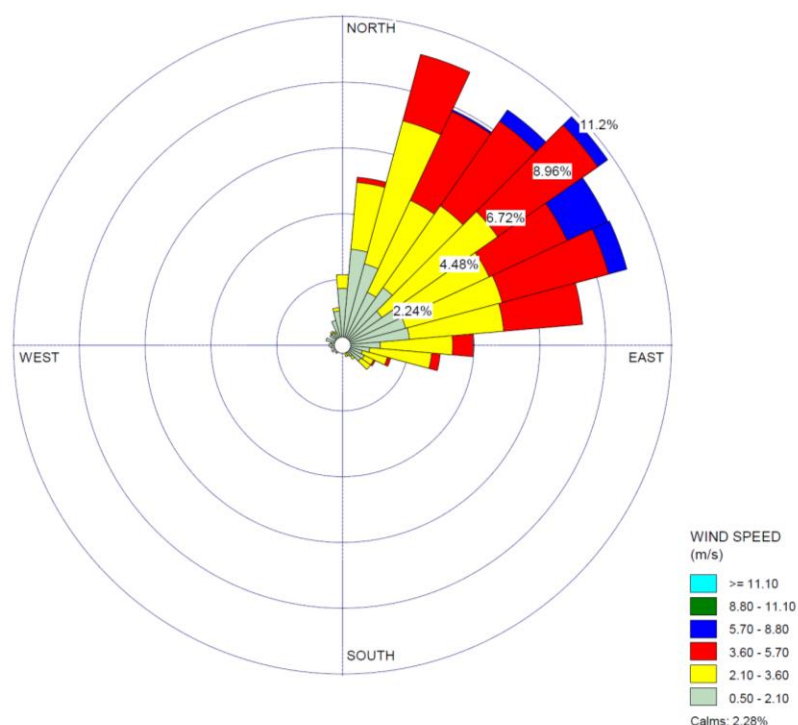


Figura 12: Direção do vento para o Ponto 1: Farol de São Tomé (22°S, 41°W), de acordo com os dados obtidos a 10 m de altura em relação ao solo.

4.2.2 Ponto 2: Farol de São Tomé (22°S, 40,5°W)

A análise descritiva do vento para o Ponto 2 (Tabela 9) mostra que sua velocidade média varia entre $(3,9 \pm 1,8)$ m/s, a 10 m, e $(4,4 \pm 2,0)$ m/s, a 150 m de altura. O coeficiente de variação encontrado ficou em 45,7%. Em se tratando da direção do vento, predominam os de Nordeste, conforme Figura 13.

Tabela 9: Estatística Descritiva da velocidade do vento (em m/s) para o Ponto 2: Farol de São Tomé (22°S, 40,5°W).

	10 m	50 m	100 m	150 m
Média	3,9	4,4	4,6	4,7
Desvio Padrão	1,8	2,0	2,1	2,2
Mínimo	0,109	0,123	0,129	0,132
Máximo	9,9	11,1	11,6	11,9
Coeficiente de Variação (%)	45,7	45,7	45,7	45,7

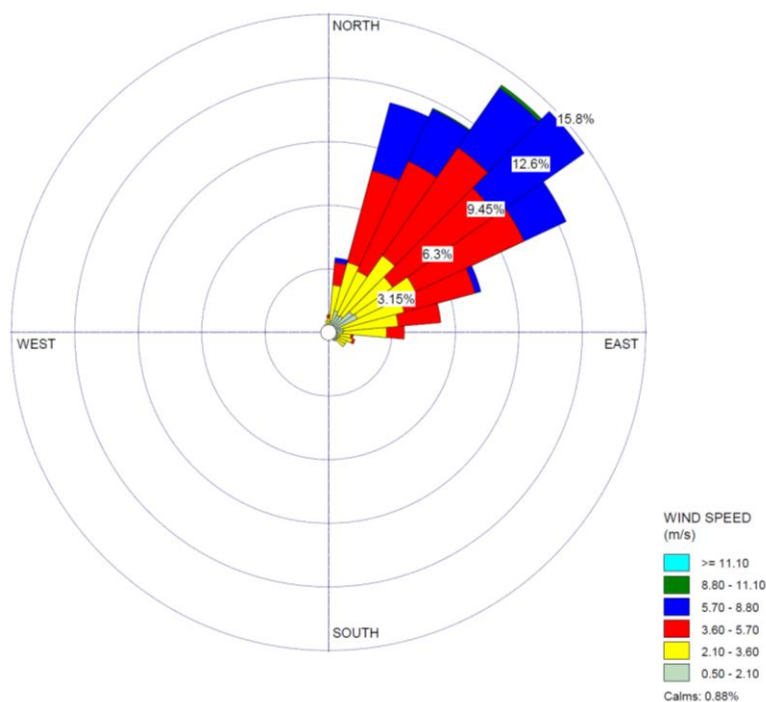


Figura 13: Direção do vento para o Ponto 2: Farol de São Tomé (22°S, 40.5°W), de acordo com os dados obtidos a 10 m de altura em relação ao solo.

A partir do histograma da Figura 14 para o Ponto 2 a 10 m de altura, percebe-se que aproximadamente 80% das velocidades estão abaixo de 5,35 m/s e a maior frequência de ocorrência dos ventos ocorre entre 3,69 m/s e 3,92 m/s. Para as alturas extrapoladas, 50 m, 100 m, e 150 m, os intervalos de velocidade do vento de maior ocorrência constam na Tabela 10, e aproximadamente 90% das velocidades do vento estão abaixo de 7,1 m/s, 7,7 m/s e 7,9 m/s.

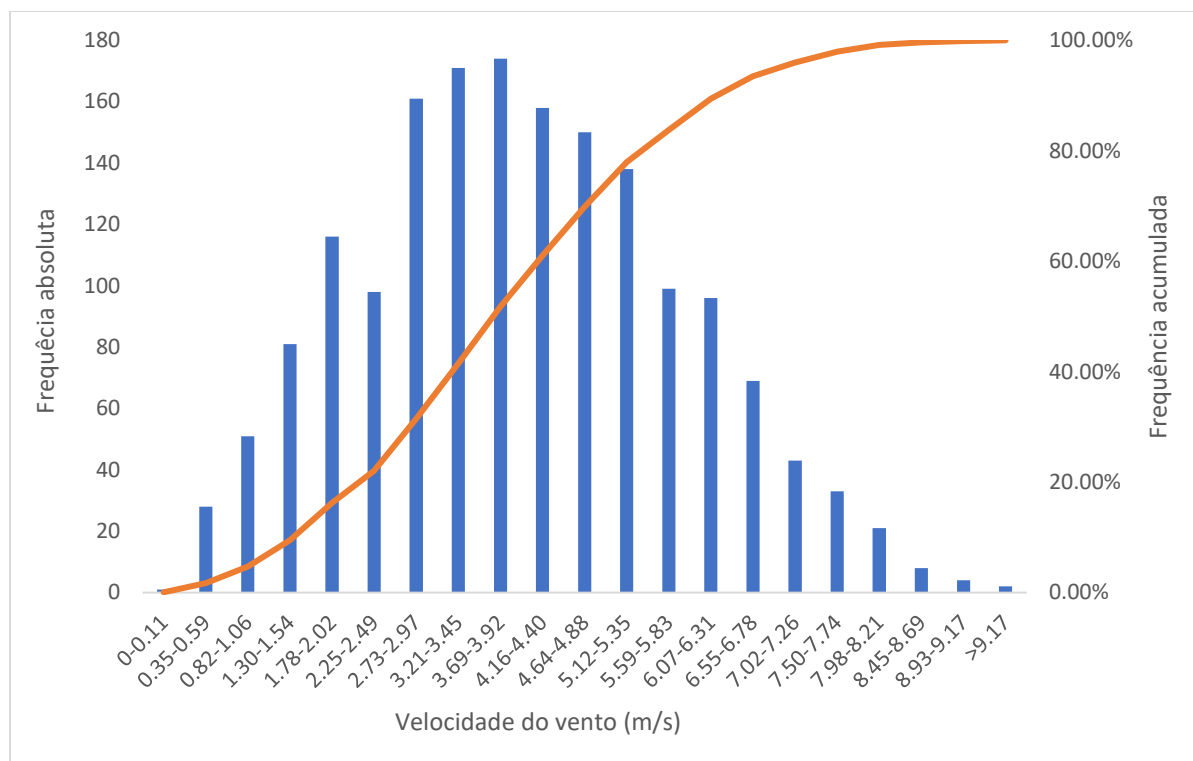


Figura 14: Histograma de frequência e frequência acumulada de distribuição da velocidade do vento (em m/s), para o Ponto 2, medida a 10 m do solo, para N=1702.

Tabela 10: Faixa de frequência de maior ocorrência da velocidade do vento (m/s) de acordo com a altura extrapolada, para o Ponto 2: Farol de São Tomé (22°S, 40.5°W).

Faixa de frequência de maior ocorrência da velocidade (m/s)	
50 m	4,14 m/s – 4,40 m/s
100 m	4,33 m/s – 4,61 m/s
150 m	4,45 m/s – 4,73 m/s

A Potência eólica medida no Ponto 2 consta na Tabela 11. Os valores de potência para as alturas extrapoladas, isto é, 50 m, 100 m e 150 m, são consideravelmente menores quando comparados aos obtidos para o Ponto 1 (item 4.2.1, Tabela 7). Embora os valores observados de velocidade do vento em ambiente *offshore* (Ponto 2) tenham sido maiores quando comparados ao ambiente *onshore*, os resultados obtidos foram influenciados pelo valor do coeficiente de rugosidade utilizado em cada caso, sendo 1 m, para o Ponto 1, e 0,00002 m, para o ponto 2. De modo simplificado, valores baixos de coeficiente de rugosidade indicam que a altitudes maiores a velocidade do vento vai aumentar pouco.

Tabela 11: Potencial Eólico (em W/m²) para o Ponto 2, Farol de São Tomé (22°S, 40.5°W).

	Potencial Eólico (W/m ²)
10m	59,2
50 m	83,7
100 m	96,1
150 m	103,9

4.2.3 Ponto 3: Rio das Ostras (22,5°S, 42°W)

A Tabela 12 indica que a velocidade média do vento no Ponto 3 varia entre $(1,7 \pm 0,8)$ m/s, a 10 m, e $(3,7 \pm 1,7)$ m/s, a 150 m de altura, e coeficiente de variação igual a 45,8%. Observa-se que os valores de velocidade média do vento encontrados neste trabalho estão abaixo dos resultados discriminados no Atlas Eólico do Estado do Rio de Janeiro (2001). Para 50 m de altura, o relatório estima um valor entre 5,0 e 5,5 m/s, e para 100 m, um valor entre 6,0 e 6,5 m/s. A direção predominante do vento é de Nordeste, conforme Figura 15.

Tabela 12: Estatística Descritiva da velocidade do vento (em m/s) para o Ponto 3: Rio das Ostras (22,5°S, 42°W)

	10 m	50 m	100 m	150 m
Média	1,7	2,9	3,4	3,7
Desvio Padrão	0,8	1,3	1,6	1,7
Mínimo	0,05	0,08	0,09	0,1
Máximo	4,6	7,8	9,2	10,0
Coeficiente de Variação (%)	45,8	45,8	45,8	45,8

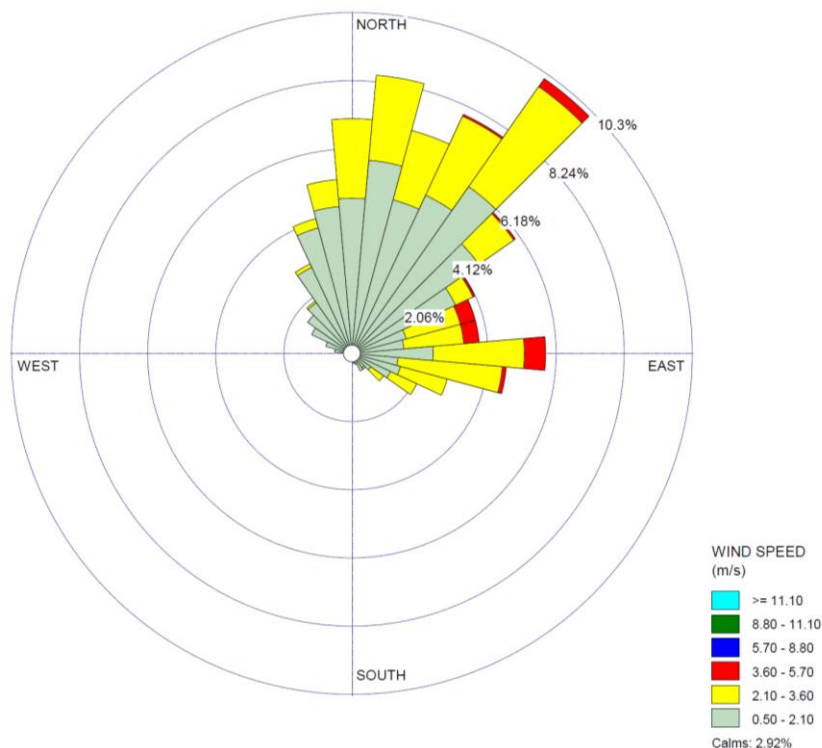


Figura 15: Direção do vento para o Ponto 3: Rio das Ostras (22,5°S, 42°W), de acordo com os dados obtidos a 10 m de altura em relação ao solo.

O histograma da Figura 16 mostra que em cerca de 90% dos casos, a 10 m de altura, a velocidade do vento está abaixo de 2,7 m/s, e que a faixa de ocorrência de maior frequência é entre 1,27-1,38 m/s. As maiores frequências de ocorrência para as alturas extrapoladas constam na Tabela 13 e para essas alturas, cerca de 90% das velocidades observadas estão abaixo de 4,8 m/s (para 50 m), 5,6 m/s (para 100 m) e 6,1 m/s (para 150 m).

Tabela 13: Faixa de frequência de maior ocorrência da velocidade do vento (m/s) de acordo com a altura extrapolada, para o Ponto 3: Rio das Ostras (22,5°S, 42°W)

Faixa de frequência de maior ocorrência da velocidade (m/s)	
50 m	2,2 m/s – 2,3 m/s
100 m	2,5 m/s – 2,8 m/s
150 m	2,8 m/s – 3,0 m/s

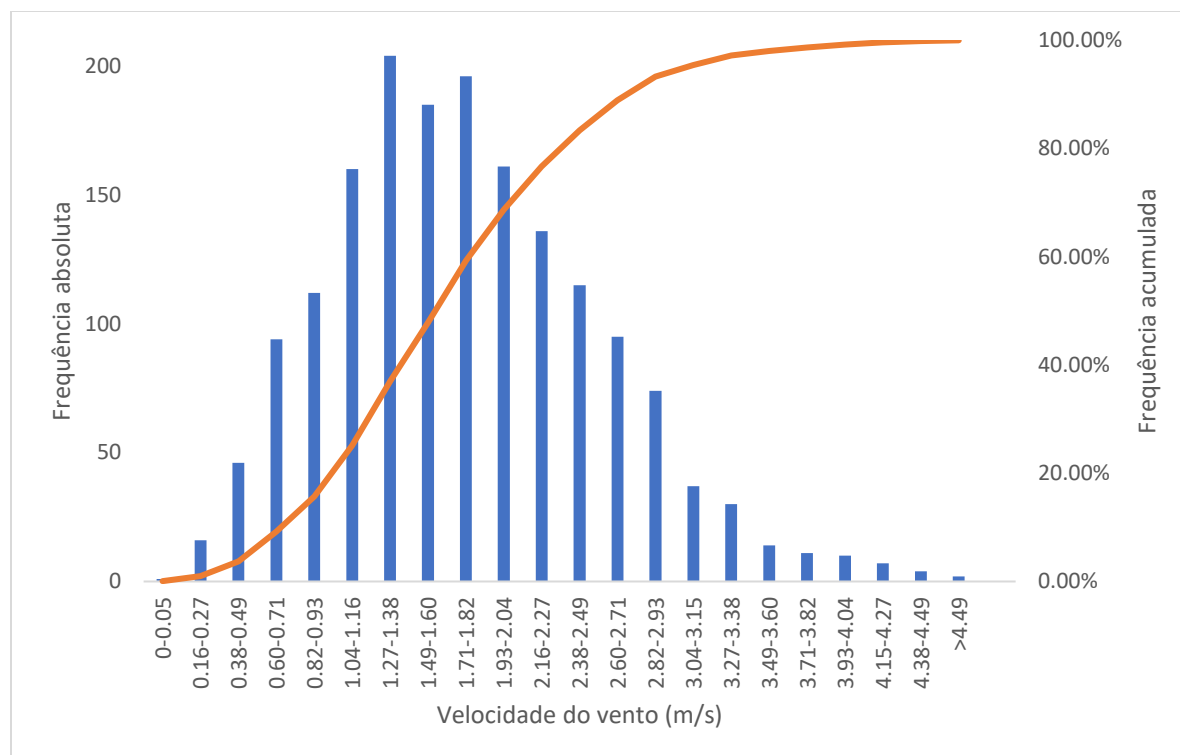


Figura 16: Histograma de frequência e frequência acumulada de distribuição da velocidade do vento (em m/s), para o Ponto 3, medida a 10 m do solo, para N=1710.

O potencial eólico para o Ponto 3 consta na Tabela 14. Baseando-se nos dados obtidos é possível dizer que a instalação de um empreendimento eólico para essa região não seria viável economicamente. Tal resultado está de acordo com o estabelecido no Atlas do Potencial Eólico para o Estado do Rio de Janeiro.

Tabela 14: Potencial Eólico (em W/m²) para o Ponto 3: Rio das Ostras (22,5°S, 42°W)

	Potencial Eólico (W/m ²)
10m	5,0
50 m	24,6
100 m	40,2
150 m	51,7

4.2.4 Ponto 4: Rio das Ostras (22,5°S, 41,5°W)

A estatística descritiva para o Ponto 4, de acordo com a Tabela 15, indica que a velocidade do vento varia entre $(2,7 \pm 1,3)$ m/s, a 10 m, e $(3,3 \pm 1,6)$ m/s, a 150 m de altura, e coeficiente de variação igual a 48,5%. A faixa de variação de maior ocorrência, de acordo com a Figura 17, ocorre entre 1,98-2,16 m/s, e em 90% dos casos a velocidade é menor que 4,63 m/s. As faixas de velocidade de maior ocorrência para as alturas extrapoladas constam na Tabela 16.

Tabela 15: Estatística Descritiva da velocidade do vento (em m/s) para o Ponto 4: Rio das Ostras (22,5°S, 41,5°W)

	10 m	50 m	100 m	150 m
Média	2,7	3,1	3,2	3,3
Desvio Padrão	1,3	1,5	1,6	1,6
Mínimo	0,03	0,03	0,04	0,04
Máximo	7,3	8,2	8,6	8,8
Coeficiente de Variação (%)	48,5	48,5	48,5	48,5

Tabela 16: Faixa de frequência de maior ocorrência da velocidade do vento (m/s) de acordo com a altura extrapolada, para o Ponto 4: Rio das Ostras (22,5°S, 41,5°W)

Faixa de frequência de maior ocorrência da velocidade (m/s)	
50 m	2,2 m/s – 2,4 m/s
100 m	2,3 m/s – 2,5 m/s
150 m	2,4 m/s – 2,6 m/s

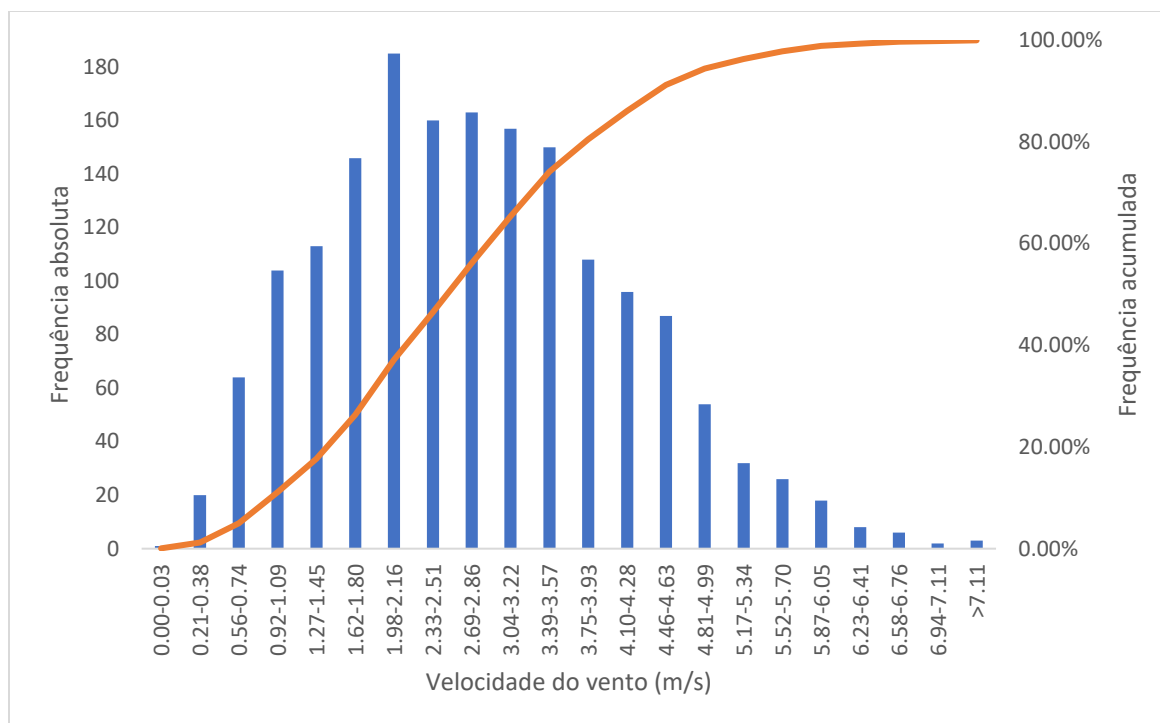


Figura 17: Histograma de frequência e frequência acumulada de distribuição da velocidade do vento (em m/s), para o Ponto 4, medida a 10 m do solo, para N=1703.

A Tabela 17 mostra valores baixos de Potencial Eólico para o Ponto 4, o que leva à conclusão de que esta não é uma localidade propícia à instalação de um parque eólico, baseando-se, é claro, apenas na análise de velocidade de vento. A direção do vento predominante é de Nordeste (Figura 18).

Tabela 17: Potencial Eólico (em W/m^2) para o Ponto 4: Rio das Ostras (22,5°S, 41,5°W)

	Potencial Eólico (W/m^2)
10m	15,9
50 m	17,9
100 m	18,7
150 m	19,2

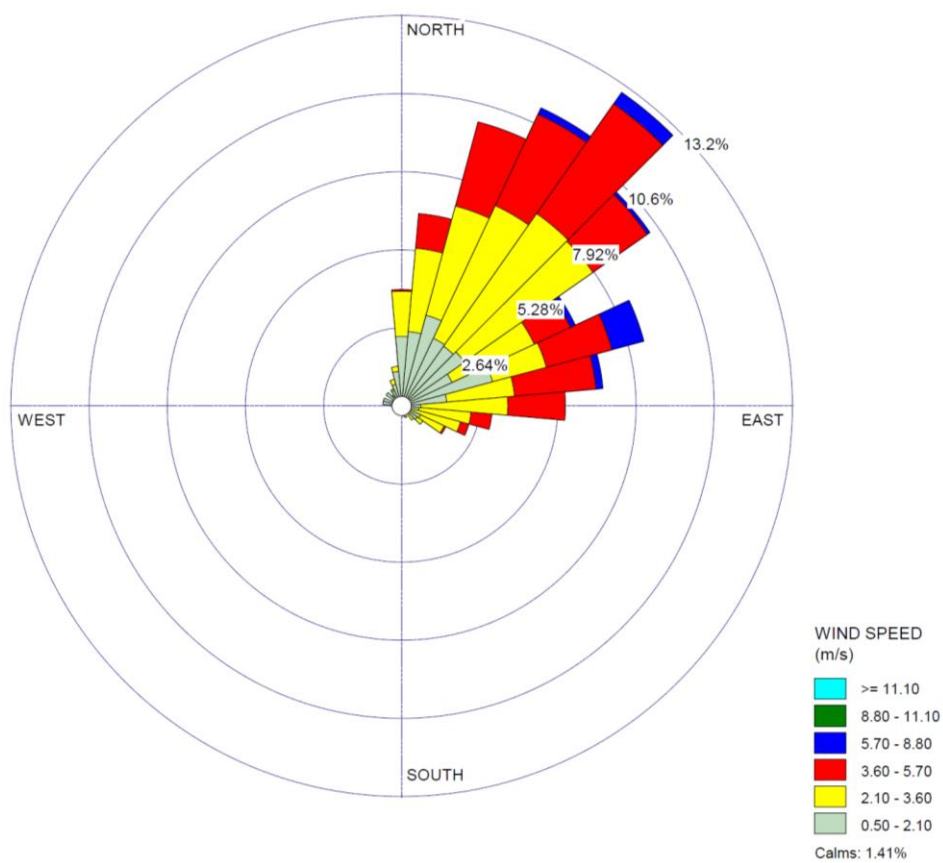


Figura 18: Direção do vento para o Ponto 4: Rio das Ostras (22,5°S, 41,5°W), de acordo com os dados obtidos a 10 m de altura em relação ao solo.

4.3 Comparações acerca dos resultados obtidos para a velocidade média e Potencial Eólico de cada localidade estudada

Através da Figura 19 é possível comparar a distribuição da velocidade dos ventos nos quatro pontos estudados. A maior variação dos dados é observada para o Ponto 2 e a menor, para o Ponto 3. Para os Pontos 1, 2, 3 e 4 as velocidades médias foram de 2,7 m/s, 3,7 m/s, 1,7 m/s e 2,7 m/s, com distribuição simétrica.

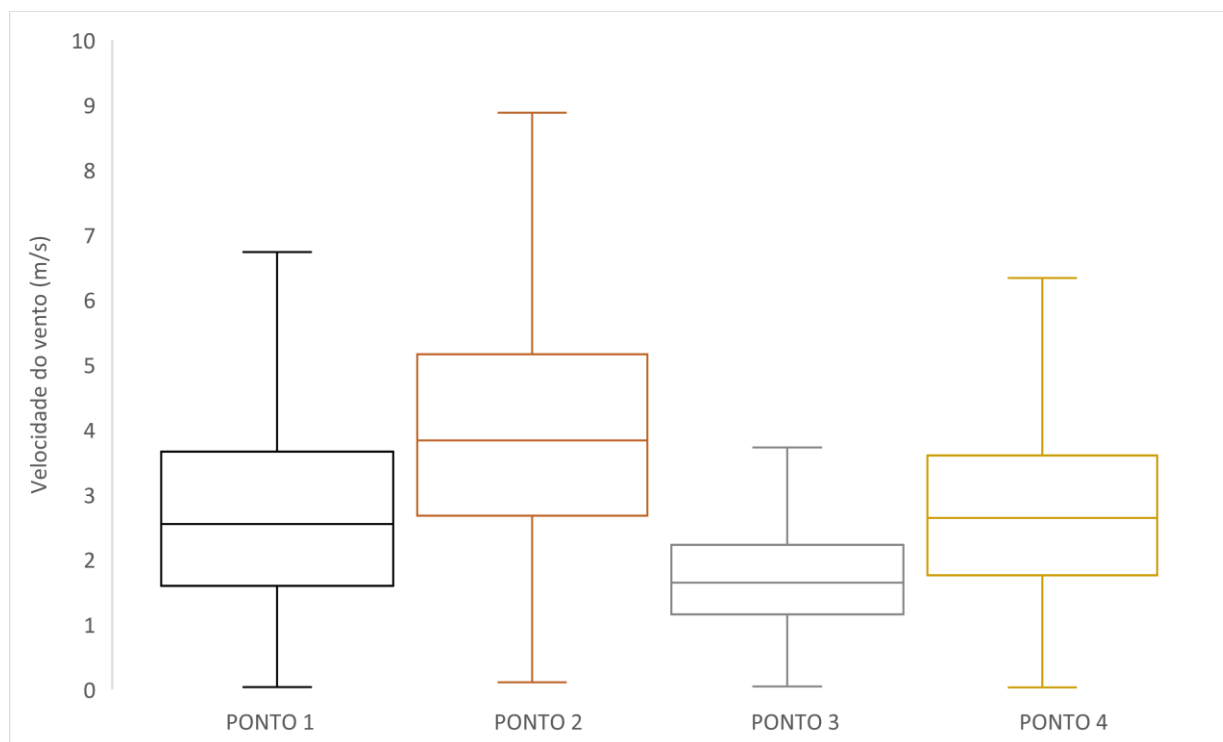


Figura 20: Distribuição das velocidades dos ventos, coletados a 10m de altura, para os Pontos 1: Farol de São Tomé (22°S, 41°W); Ponto 2: Farol de São Tomé (22°S, 40,5°W); Ponto 3: Rio das Ostras (22,5°S, 42°W); Ponto 4: Rio das Ostras (22,5°S, 41,5°W).

Os resultados obtidos para o Potencial Eólico, para todos os pontos, estão concatenados na Figura 19, de acordo com a altura, e mostram que a maior potência eólica ocorre no Ponto 1, a 150 m de altura, cujo valor encontrado foi de 226,3 W/m². No Ponto 4 foram observados os menores valores, embora esteja em ambiente *offshore*, porque o vento varia muito pouco a alturas maiores devido ao baixo coeficiente de rugosidade.

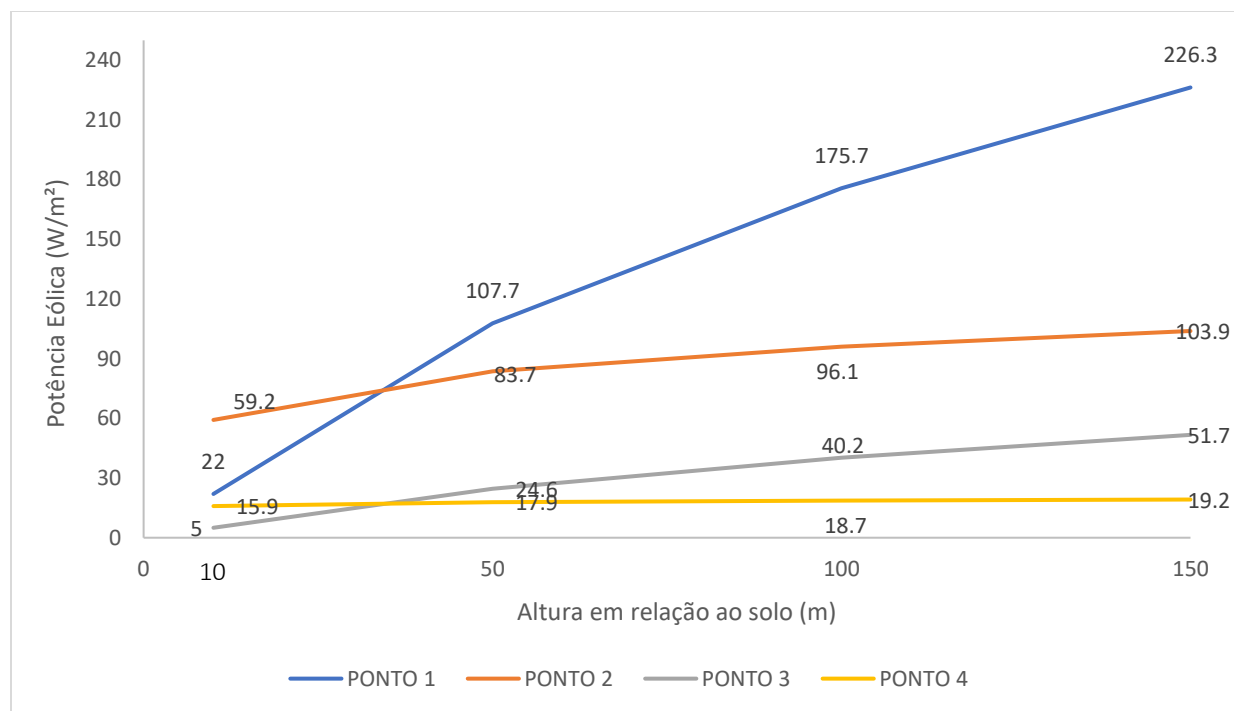


Figura 20: Potencial Eólico (W/m^2) para todos os pontos estudados, de acordo com a altura. Ponto 1: Farol de São Tomé (22°S , 41°W); Ponto 2: Farol de São Tomé (22°S , $40,5^\circ\text{W}$); Ponto 3: Rio das Ostras ($22,5^\circ\text{S}$, 42°W); Ponto 4: Rio das Ostras ($22,5^\circ\text{S}$, $41,5^\circ\text{W}$).

5 CONCLUSÃO

Os resultados apresentados neste trabalho constituem uma avaliação preliminar acerca da possibilidade de instalação de aerogeradores para a produção de energia eólica e sugerem que o Ponto 1: Farol de São Tomé (22°S, 41°W), é mais vantajoso para tal, especialmente a partir de 100 m de altura, em ambiente *onshore*, quando a potência eólica atinge 175,7 W/m². Os Pontos 2, 3 e 4 apresentam valores para o potencial eólico relativamente baixos, variando entre 5,0 W/m² e 103,9 W/m².

A avaliação sazonal da velocidade do vento identificou que os maiores valores de velocidade do vento foram observados no período de verão, e as menores, no outono. Os ventos atingiram um máximo de velocidade no período de 15 h e um mínimo no período de 09 h. As maiores médias de velocidade, foram observadas em ambiente *offshore*: 3,9 m/s no Ponto 2 (Farol de São Tomé, 22°S, 40,5°W) e 2,7 m/s no Ponto 4 (Rio das Ostras, 22,5°S, 41,5°W), contra 2,7 m/s no Ponto 1 (Farol de São Tomé, 22°S, 41°W) e 1,7 m/s no Ponto 3 (Rio das Ostras 22,5°S, 42°W), em ambiente *onshore*.

Em todos os Pontos predominam os ventos de Nordeste.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, J. J. A.. **Estimativa da Potência, Perspectiva e Sustentabilidade da Energia Eólica no Estado do Ceará**. 2006, 163 f. Dissertação (Doutorado em recursos naturais) – Centro de Tecnologia em recursos naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2009.

AMARANTES, O. A. C., BROWER, M., ZACK, J., SÁ, A. L.. **Atlás do Potencial Eólico Brasileiro**. Brasília, Brasil, 2001.

ANEEL (2008). Atlas de energia elétrica do Brasil. 3ª ed. Disponível em <<http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas3ed.pdf>>. Acesso em 08 dez. 2017.

BARRY, R. G.; CHORLEY, J. R. **Atmosfera, Tempo e Clima**. 9. ed. Porto Alegre: Bookman, 2012. 528p.

BRACKMANN, R. *et al.* Avaliação do Potencial Eólico do Sul do Brasil. 2009. 89f. Relatório Final de Iniciação Científica do Programa PIBIC/INPE – CNPQ-MCT. Disponível em <https://www.researchgate.net/profile/Fernando_Martins5/publication/47738245_Avaliacao_do_potencial_eolico_do_Sul_do_Brasil/links/0912f50b749a0c3a8b000000/Avaliacao-do-potencial-eolico-do-Sul-do-Brasil.pdf>. Acesso em 15 dez. 2017.

COSTA, R. F.. Determinação do potencial eólico do município de São Luis-MA. 2016. 36 f. Trabalho de conclusão de curso (graduação em Agronomia) – Universidade Federal do Maranhão, Chapadinha -MA, 2016.

CUSTÓDIO, R. S. **Energia Eólica para Produção de Energia Elétrica**. Rio de Janeiro: Synergia, 2013, 340 p.

CRESESB – Secretaria de Estado de Energia, da Indústria Naval e do Petróleo. Atlas Eólico do Estado do Rio de Janeiro. 2001. Disponível em <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas_eolico/AtlasEolicoRJ.pdf>. Acesso em 02 nov. 2017.

DUTRA, R. (Org.). **Energia Eólica: Princípios e Tecnologias**. Rio de Janeiro: CRESESB, 2008, 58 p.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Plano Decenal de Expansão de Energia 2026. Disponível em <<http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Decenal-de-Expansao-de-Energia-2026>>. Acesso em 05 dez. 2017.

GWEC. GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL. Global Wind Energy Outlook 2010. 2010. Disponível em < <http://gwec.net/publications/global-wind-energy-outlook/global-wind-energy-outlook-2016/>>. Acesso em 14 jan. 2018.

MANWELL, J. F. *et al.*. Wind Energy Explained. New York: Wiley, 2009.

MARRANGHELLO, M.; CONSUL, R. A.. Uso da Energia Eólica no Estado do Rio Grande do Sul, Revista do Centro de Tecnologia da Ulbra, Rio Grande do Sul: ULBRA, vol. 5, no 1, 2004.

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

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Balanço Energético Nacional 2017. Disponível em < <https://www.canalenergia.com.br/biblioteca/53044735/ben-balanco-energetico-nacional-2017-relatorio-final>>. Acesso em 27 nov. 2017.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Sustentável. Energia Eólica no Brasil e Mundo, 2016 (ano ref. 2017). Disponível em < <http://www.mme.gov.br/documents/10584/3580498/15+-+Energia+E%C3%B3lica+-+Brasil+e+Mundo+-+ano+ref.+2016+%28PDF%29+-+NOVO/f63a15ea-9d2c-4d27-9400-5d7c3fd97b22?version=1.4>>. Acesso em 02 dez. 2017.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Resenha Energética Brasileira. 2017 (ano ref. 2016). disponível em <http://www.mme.gov.br/documents/10584/3580498/02+-+Resenha+Energ%C3%A9tica+Brasileira+2017+-+ano+ref.+2016+%28PDF%29/13d8d958-de50-4691-96e3-3ccf53f8e1e4?version=1.0>. Acesso em 13 jan. 2018

NUNES, H. M. P.. Avaliação do Potencial Eólico ao Largo da Costa Nordeste do Brasil. 2012. 132f. Dissertação (mestrado em Geociências Aplicadas) – curso de Geociências, Universidade de Brasília, 2012.

OCÁCIA, G. C.. Energia Eólica – Estado da Arte e Algumas Projeções, Revista do Centro de Tecnologia da Ulbra, Rio Grande do Sul: ULBRA, vol. 3, no. 2, 2002.

PINTO, M. O.. **Fundamentos de Energia Eólica**. Rio de Janeiro: LTC, 2013, 347 p.

PEIXOTO, J.P., OORT, A. H. *Physics of Climate*. United States: New York, NY (United States); American Institute of Physics, 1992.

PENA, A. E.; GRYNING, S.; HASAGER, C. B.. Measurements and modelling of the wind speed profile in the marine atmospheric boundary layer. Boundary layer meteorology, 2008, v. 129, p. 471-495.

RAPOSO, D. M. M.. Estudo da solução da Eólica Offshore. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores) – Curso de Engenharia Eletrotécnica, Universidade de Lisboa, 2014.

SATO, M.. Avaliação do potencial eólico em microescala de Cascavel e região, Paraná. 2005. 87f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia na Agricultura) – Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2005.

SILVA, B. B.; ALVES, J. J. A.; CAVALCANTI, E. P.; DANTAS, R. T.. Potencial Eólico na direção predominante do vento no Nordeste brasileiro. Revista Brasileira de engenharia Agrícola e Ambiental. [Online]. Vol. 6, n. 3, p. 431-439, 2002.

SILVA, D. G.; LOPES, R. P.; CARVALHO, D. F.. Caracterização do Potencial Eólico em Seropédica (RJ). Revista Energia na Agricultura, Botucatu, v. 28, n. 3, p. 185-192, 2013.

SILVA, J. K. A.. Caracterização do vento e estimativa do potencial eólico para a região de tabuleiros costeiros (Pilar, Alagoas). 2007. 83 f. Dissertação (Mestrado em Processos de superfície terrestre) - Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2007.

TEIXEIRA, P. A.. CERNE – Centro de Estratégias em Recursos Naturais e Energia. 2017. Disponível em < <http://cerne.org.br/eolicas-offshore-tao-longe-tao-perto/>>. Acesso em 10 dez. 2017.

VAREJAO, M. A.. Meteorologia e Climatologia. Versão digital. Recife, 2006, 483p.

VITERBO, J. C.. Geração de energia elétrica a partir da fonte eólica offshore. 2008. 168f. Dissertação (Mestrado em engenharia naval e oceânica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

WALLACE, J. M.; HOBBS, P. V.. Atmospheric Science: An Introductory Survey. 2 ed.. Academic Press, 2006, 483p.