



V SEMINÁRIO E WORKSHOP EM ENGENHARIA OCEÂNICA

Rio Grande, 07 a 09 de Novembro de 2012

ESTUDO DO POTENCIAL EÓLICO *OFFSHORE* NO LITORAL DO PARANÁ.

Bruno Ramos Christófar¹, Carlos Aurélio Nadal², Carlos Roberto Soares³, José Antônio Scotti Fontoura⁴

¹ Universidade Federal do Rio Grande
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica
e-mail: brchristofaro@gmail.com

² Universidade Federal do Paraná
Departamento de Geomática
e-mail: cnadal@ufpr.br

³ Universidade Federal do Paraná
Centro de Estudos do Mar
e-mail: crsoares@ufpr.br

⁴ Universidade Federal do Rio Grande
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica
e-mail: josefontoura@furg.br

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi o de estudar o potencial eólico em ambiente onshore e offshore no Município de Pontal do Paraná – PR, Brasil. Os dados utilizados têm uma abrangência de 3 anos, entre janeiro de 2007, até dezembro de 2009. Os dados foram processados nos softwares livres ALWIN e R. A velocidade média encontrada foi de 3,43 m/s. Os padrões de direção dos ventos revelou o domínio do setor S (4,7%). Os gráficos de calma revelaram que 31,4% dos dados ficaram abaixo da velocidade de 2,0 m/s por períodos de 26 h seguidas. As maiores velocidades diárias ocorrem no período da tarde e noite, não ultrapassando 4,5 m/s. Os valores de fator de capacidade máximos encontrados foram de 15,9% (onshore) e 8,9% (offshore), utilizando o modelo de aerogerador ENERCON E-48. Os valores encontrados não foram atrativos para a conversão eólica.

Palavras-chave: *Energia Eólica, Offshore, Distribuição de Weibull, Software Alwin, Paraná.*

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, a humanidade é fortemente dependente da energia elétrica, havendo uma tendência de que esta demanda aumente, tornando-se um enorme desafio supri-la sem degradar o meio ambiente. A energia provinda de fontes eólicas é um recurso abundante e, além de segura e limpa, não há custos com aquisição e riscos com preços de combustíveis a longo prazo (Millais, 2005). A fonte de energia eólica também é uma grande saída para países que tenham pequenas extensões territoriais, mas que tenham zonas costeiras, que dependendo das condições de vento, também poderiam gerar energia em ambientes *offshore*.

O objetivo deste trabalho é analisar o potencial eólico em ambiente *onshore* e *offshore* no Balneário Pontal do Sul (PR), empregando o *software* livre ALWIM.

2. ÁREA DE ESTUDO

No município de Pontal do Paraná – PR (Figura 1) está localizado o balneário de Pontal do Sul, tendo como coordenadas geográficas a latitude 25° 35'S e longitude 48°21'W, na desembocadura Sul da Baía de Paranaguá.

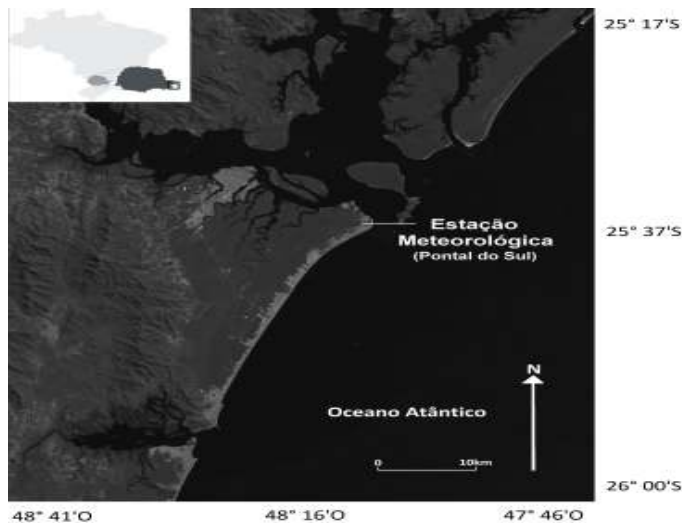


Figura 1. Mapa de localização da área de estudo (quadrado branco) e da estação meteorológica de Pontal do Sul.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Dados Meteorológicos

Os dados meteorológicos utilizados no estudo abrangem o período de Janeiro de 2007 até Dezembro de 2009, totalizando três anos, obedecendo a padrões de testes de potencial eólico, onde é necessário, no mínimo, dois anos de dados e altura mínima do anemômetro de 10 m (Hassan, 2004). Os dados foram obtidos junto ao Grupo de Física Marinha do Centro de Estudos do Mar da UFPR (GFM/UFPR), abrangendo a velocidade e direção do vento, bem como, o registro das datas e horários da coleta das informações.

Em relação à velocidade média do vento, segundo Feitosa *et al.* (1993), ventos com velocidades médias anuais iguais ou maiores que 6 m/s são atrativos para a conversão de eletricidade. Para a obtenção da velocidade média do vento, foi utilizado o *software* livre R, cujos valores foram posteriormente inseridos no ALWIN.

3.2 Atributos do *Software* ALWIN

O *software* ALWIN utiliza distribuição estatística de Weibull, que foi desenvolvida na década de 1930 pelo físico sueco Wallodi Weibull (Dalmaz *et al.*, 2007). A Lei de Weibull é dada pela Eq. (1) (Dantas, 1997 *apud* Miguel & Rossi 2004, p. 56):

$$f(v) = \left(\frac{c}{a}\right) \cdot \left(\frac{v}{a}\right)^{c-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{v}{a}\right)^c\right] \quad (1)$$

Onde c é o parâmetro de forma (adimensional e positivo); a é o parâmetro de escala (dimensão de velocidade e positivo); v = velocidade do vento.

Os fatores c e a são de grande importância para a avaliação das condições do local de estudo. Curvas formadas a partir dos eixos $g(v)$ e a indicam a influência do fator c na curva de distribuição de Weibull (Mirshawka, 1979). Quando o valor de a aproxima-se de 1 e o parâmetro c situa-se entre 3,0 e 4,0 ocorre à formação de perfis de curva semelhantes ao da curva normal. As curvas com fatores de forma 0,5, 1,0 e 2,0 apresentam-se com perfis variáveis (Figura 2), no eixo $g(v)$. Em suma, o parâmetro de forma c assume valores, geralmente, entre 1,5 e 3, (Martínez, 2003), e nos dá a ideia da regularidade dos ventos. Na determinação da distribuição de Weibull, foi utilizado o

ALWIN, bem como os dados de velocidade do vento divididos em faixas de velocidade, a velocidade média e a altura de coleta dos dados.

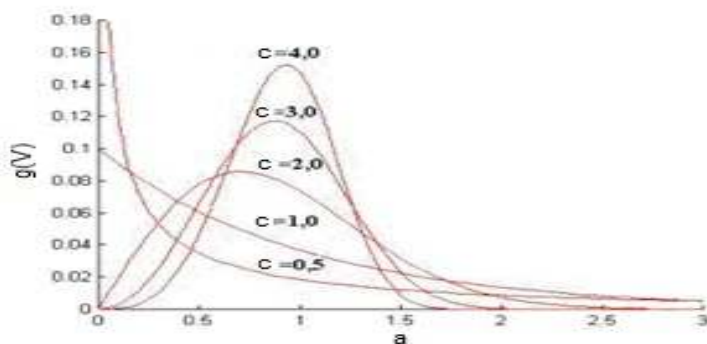


Figura 2. Influência do parâmetro de forma *c* no parâmetro de escala *a*. (Petry & Mattuella, 2007).

O ALWIN possibilita também, determinar a direção predominante do vento, o padrão diário dos ventos e as calmarias da região. Através do diagrama da Rosa dos Ventos, elaborado com “pétalas” radiais, é possível evidenciar as frequências e velocidade dos ventos que sopram nos 16 pontos cardeais, colaterais e sub-colaterais. O comprimento de cada “pétala” mostra a ocorrência de ventos registrada em um dado período de tempo, e as gradações sobre as pétalas mostram a frequência da velocidade dos ventos (Petry & Mattuella, 2007). O padrão diário dos ventos e as calmarias da região disponibilizam os períodos em que não foi produzido energia, podendo inviabilizar o empreendimento se forem períodos significativos (Dalmaz *et al.*, 2007; Petry & Mattuella, 2007).

Para a aquisição da direção predominante do vento foram utilizados os dados de direção e velocidade do vento, divididos em 16 quadrantes de direção obtendo as médias e máximas velocidades do vento em cada quadrante que posteriormente foram inseridos no ALWIN. Para a obtenção das calmarias da região, primeiramente foram geradas as médias e desvios padrões das velocidades do vento no período de 24 h, para então serem inseridos no ALWIN. Foi estabelecido também, como calmaria nesse estudo, velocidades inferiores a 1 e 2 m/s que não podem ser aproveitados para a conversão de eletricidade.

3.3 Extrapolação dos Dados e Previsão de Energia Gerada

A altura ideal de coleta de dados por um anemômetro, para testes eólicos, é de 50 m (Hassan, 2004). Para solucionar esse problema, é possível fazer a extrapolação da frequência da velocidade do vento por meio da Lei Logarítmica utilizando a Eq. (2) até a altura desejada. (Blessmann, 1995; Manwell *et al.*, 2002)

$$V_z = V_{zr} \left[\ln \left(\frac{z}{z_0} \right) / \ln \left(\frac{z_r}{z_0} \right) \right] \quad (2)$$

Em que V_z = velocidade média na altura desejada ($m \cdot s^{-1}$); V_{zr} = velocidade média na altura de referência ($m \cdot s^{-1}$); Z = altura desejada (m); Z_0 = parâmetro de classes de rugosidade (Tab. 1); Z_r = altura de referência (m). Segundo Dutra (2001) a Lei Logarítmica é considerada de maior precisão, por utilizar o ajuste logarítmico.

Tabela 1. Rugosidade superficial para o cálculo da lei logarítmica. (Manwell *et al.*, 2002).

Tipo de Terreno	Rugosidade Z_0 (m)
Gelo	0,00001
Mar calmo	0,0002
Neve	0,003
Pasto	0,01
Poucas árvores	0,100
Muitas árvores; Algumas construções	0,250
Florestas	0,500
Cidades	3,000

Para as rugosidades *onshore* e *offshore*, foram utilizados como referência os dados de rugosidade fornecidos por Manwell *et al.* (2002). A rugosidade adotada para ambiente *onshore* foi de $Z_0 = 0,250$ m, relativo a muitas árvores e algumas construções, e para a região *onshore* a rugosidade adotada foi de $Z_0 = 0,0002$ m, relativo a mar calmo, sendo essas classificações as que mais se aproximam da região estudada.

No que diz respeito à previsão de conversão de energia da região, foi utilizado o *software* ALWIN em conjunto com dados e curvas de potência do modelo de aerogerador E-48 (50 m / 800 kW) da marca ENERCON.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Velocidade Média e Distribuição e Weibull

A velocidade média do vento dos três anos de dados da estação meteorológica de Pontal do Sul é de 3,43 m/s, sendo considerado um valor baixo para a conversão de energia eólica, segundo os valores citados por Feitosa *et al.* (1993). Outro fator que reforça este aspecto é a velocidade de arranque, cuja maioria dos modelos existentes no mercado começa a funcionar com velocidades acima de 3 m/s.

Em relação à distribuição de Weibull, é possível inferir que os dados coletados não estão dentro dos parâmetros para aproveitamento eólico, pois há uma discrepância entre os dados que foram medidos e os ideais de Weibull (Tab. 2). A curva de Weibull (Figura 3) também não acompanha corretamente o histograma das velocidades, mostrando que não há regularidade dos ventos em Pontal do Sul.

Tabela 2. Estatística dos ventos a 10m para o período de 2007 a 2009

Velocidade (m/s)	Medido (%)	Weibull (%)
0 - 1	6.16	9.82
1 - 2	25.40	18.38
2 - 3	20.00	19.84
3 - 4	14.81	17.37
4 - 5	12.18	13.25
5 - 6	8.48	9.07
6 - 7	5.69	5.67
7 - 8	3.47	3.27
8 - 9	2.11	1.75
9 - 10	0.99	0.87

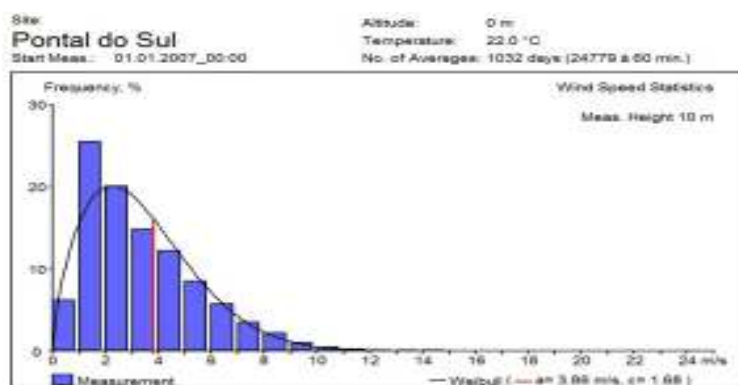


Figura 3. Distribuição de Weibull para o período de 2007 a 2009 da estação de pontal do sul.

Isto pode ser reforçado observando os valores do fator de escala *a* e de forma *c*. Analisando esses valores pode-se afirmar que os dados não são ideais para a conversão eólica. O valor encontrado de *a* (3,86 m/s) está bem próximo da velocidade média de Pontal do Sul (3,43 m/s). O fator de forma *c* (1,68) também não é aceitável, pois está bem distante do valor que seria ideal de 3, como afirma Martínez (2003), mostrando irregularidade nos padrões das velocidades dos ventos.

Observando ainda, na Figura 3, a linha em vermelho que representa o valor de *a*, juntamente com a curva de Weibull em preto, é possível observar o efeito do fator de forma *c* nos dados. Se o valor de *c* estivesse próximo de 3, o pico da curva de Weibull estaria mais estreita, sendo que o traço em vermelho estaria no cento do pico, indicando assim, a configuração ideal de regularidade das velocidades dos ventos para a conversão eólica.

4.2 Direções Predominantes dos Ventos e Calmarias da Região

Analisando o gráfico A (Figura 4), que indica a direção predominante do vento, observa-se a inconstância de direções, ocorrendo variações que vão desde E, S até W. Porém, através da Tabela 3, verificando-se o setor de frequências, é possível determinar que a direção predominante da região está localizada no setor de S até E, com quadrantes preferenciais SSW, S, SSE, ESE e E, ocorrendo ventos com maior frequência no setor S (4,7 %) seguido por E (4,6 %).

A Tabela 3 e o gráfico B (Figura4) confirma esse padrão de direções, no setor de velocidades médias e máximas, sendo que no setor S é encontrada a média mais alta (5,3 m/s), assim como a velocidade máxima (14,9 m/s).

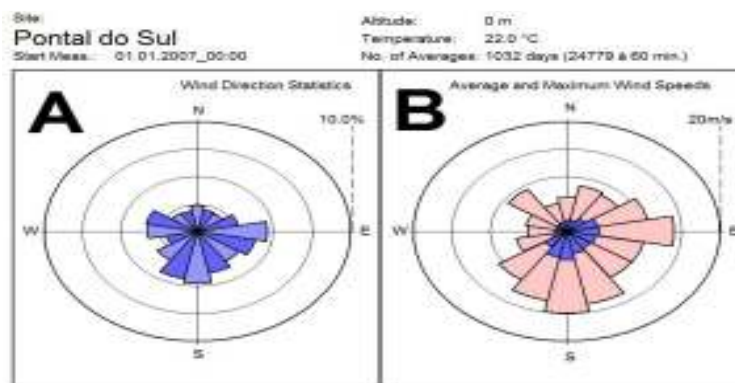


Figura 4. Direção e velocidades dos ventos em pontal do sul.

Tabela 3 - Setores, frequências, médias e máximas de velocidades do vento.

Setor (°)	Frequência (%)	Média (m/s)	Máximo (m/s)
349 - 11	2.4	2.1	6.2
11 - 33	2.0	2.2	8.5
34 - 56	2.0	3.0	8.1
56 - 78	2.8	4.2	10.8
79 - 101	4.6	4.3	14.1
101 - 123	3.9	4.0	10.3
124 - 146	3.3	3.8	10.2
146 - 168	3.9	4.3	13.5
169 - 191	4.7	5.3	14.9
191 - 213	4.4	4.9	12.9
214 - 236	3.2	3.5	10.7
236 - 258	2.1	2.1	6.8
259 - 281	3.3	1.6	5.2
281 - 303	3.5	1.6	5.5
304 - 326	2.1	1.6	9.3
326 - 348	1.9	1.8	5.3

Em relação às calmarias, o gráfico A do padrão diário dos ventos (Figura 5) sinaliza que as maiores velocidades de vento ocorrem nos períodos da tarde e da noite.

Na Tabela 4 é possível analisar os valores hora a hora das médias e desvios padrões desses dados, cujos valores máximos foram encontrados nos períodos entre as 16 e as 18 h, atingindo 4,5 m/s, com o acréscimo ou subtração de 1.8 m/s neste valor, em função do desvio padrão.

O Gráfico B (Figura 5) representa a duração das calmarias que ocorrem na região. Analisando os dados, juntamente com a Tabela 5, é possível concluir que os períodos de calmarias são extensos, não sendo atrativos para a conversão eólica. Relacionando esses valores com a distribuição de Weibull (Figura 3), é possível afirmar que as maiores ocorrências de vento estão nas velocidades de até 2 m/s, possuindo longos períodos de calmarias, com médias variando de 1 a 2 h, com períodos máximos de 15 a 26 h. Esses períodos são considerados longos (Petry & Mattuella, 2007), pois representam os horários que a turbina eólica não estaria em funcionamento, não sendo atrativo para empreendimentos eólicos.

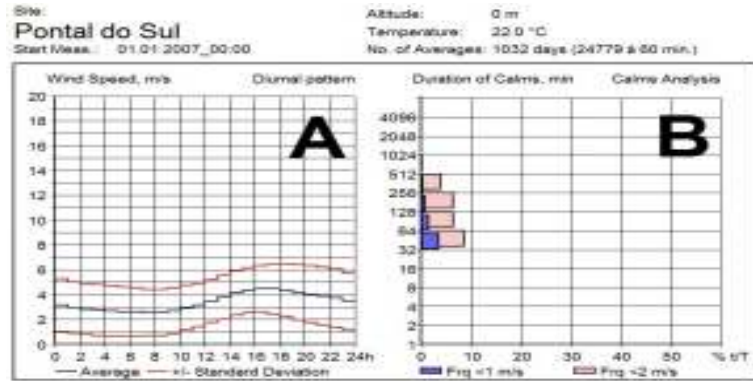


Figura 5. Padrão diário de vento (A) e calmarias(B).

Tabela 4 - Regime diário de ventos para o período de 2007 a 2009.

Tempo (h)	Média (m/s)	Desvio padrão (m/s)
0 - 1	3.2	2.1
1 - 2	3.0	2.1
2 - 3	2.8	2.0
3 - 4	2.8	2.0
4 - 5	2.7	2.0
5 - 6	2.7	2.0
6 - 7	2.6	1.9
7 - 8	2.6	1.9
8 - 9	2.6	1.9
9 - 10	2.7	1.9
10 - 11	3.0	1.8
11 - 12	3.2	1.8
12 - 13	3.5	1.7
13 - 14	3.8	1.8
14 - 15	4.1	1.8
15 - 16	4.4	1.8
16 - 17	4.5	1.9
17 - 18	4.5	2.0
18 - 19	4.4	2.1
19 - 20	4.2	2.2
20 - 21	4.1	2.3
21 - 22	3.9	2.3
22 - 23	3.7	2.3
23 - 24	3.5	2.3

Tabela 5. Análise das calmarias para o período de 2007 a 2009.

Calmarias (min.)	t / T(<1.0) (%)	t / T(<2.0) (%)
>= 64	3.6	8.6
>= 128	1.5	6.4
>= 256	0.9	6.4
>= 512	0.3	3.9
>= 1024	0.0	0.1
Média (min.)	95	135
Máx. (min.)	900	1560

4.3 Previsão de Energia Gerada em Ambiente *Onshore* e *Offshore*.

Analisando a previsão de energia produzida pelo modelo de turbina ENERCON E-48 (Figura 6 (A)), $Z_0 = 0.250$ m (Figura 6 (B)) e $Z_0 = 0.0002$, pode-se afirmar que a produção é baixa, pois o *Average Power* indica a potência média de 129,1 kW para aquele e 71,7 kW para este, já que esse modelo é capaz gerar 800 kW, em média.

O *Energy Measured*, que indica a energia gerada, fornecem valores de 3.196,9 MWh e 1.775,5 MWh, respectivamente, considerados baixos, pois quando é analisado o *Capacity Factor*, pode-se determinar que ela trabalharia somente 15,9% e 8,9% do tempo, considerando o período de 3 anos. Utilizando a porcentagem de 30% que seria ideal (Dalmaz *et al.*, 2007), o valor de conversão elétrica aceitável para esta turbina, com estas rugosidades, seria de 6.031 MWh, e 5.984,8 MWh no período estudado.

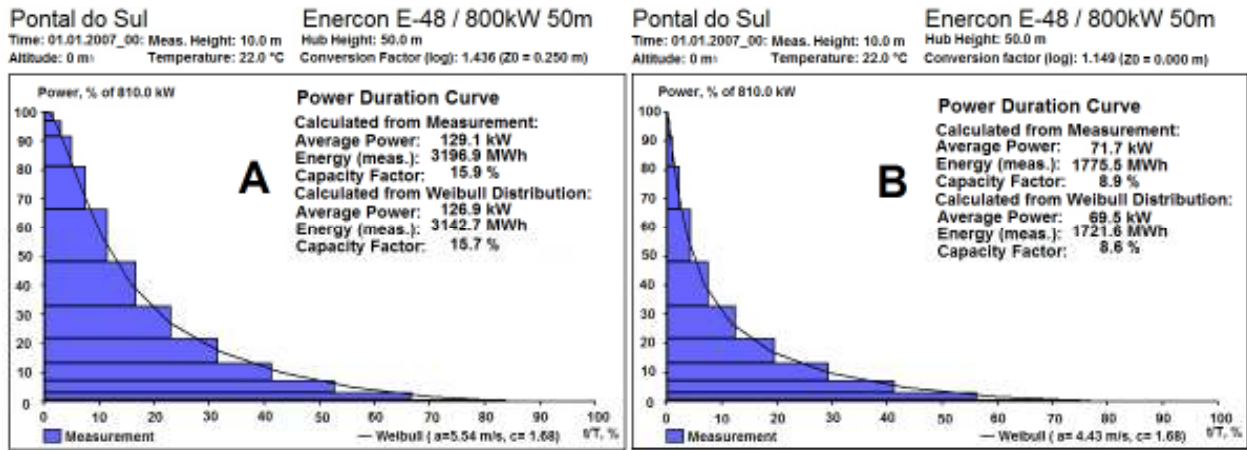


Figura 6. Energia gerada pelo aerogerador ENERCON E-48 com rugosidade $z_0 = 0,250$ m (Muitas Arvores) (A) e $z_0 = 0,0002$ m (Mar Calmo) (B).

As Tabelas 6 e 7 fornecem dados da energia gerada (kW) em cada faixa de velocidade de vento, mostrando a porcentagem utilizada dos dados medidos e dos dados que seriam ideais através da distribuição de Weibull.

Tabela 6. Energia gerada com rugosidade de $Z_0 = 0.0002$ no modelo E-48.

Vel. (m/s)	Potência (kW)	t / T % (medido)	t / T % (Weibull)
0 – 1	0.00 – 0.00	100.00	100.00
1 - 2	0.00 – 0.00	95.71	94.53
2 - 3	0.00 – 4.85	83.87	83.50
3 - 4	4.85 – 24.26	66.66	70.02
4 - 5	24.26 – 58.23	52.73	56.11
5 – 6	58.23 – 106	41.30	43.11
6 – 7	106 – 174	31.46	31.92
7 – 8	174 – 266	22.97	22.77
8 – 9	266 – 388	16.60	15.70
9 – 10	388 – 538	11.44	10.47
10 – 11	538 – 658	7.48	6.76
11 – 12	658 – 740	4.98	4.24
12 – 13	740 – 784	3.04	2.58
13 – 14	784 – 807	1.63	1.52
14 – 15	807 – 810	0.94	0.87

É possível notar que os dados medidos e os ideais são bem próximos, validando tais dados. Porém, a maioria dos dados está em velocidades que não são ideais para a conversão de eletricidade, sendo menores que 3 m/s, cujo é a velocidade de arranque do modelo E-48. Entre as velocidades de 13-14 m/s (Tab. 6) e 11-12 m/s (Tab.7), respectivamente, apenas 1% dos dados utilizados gerariam energia em três anos. As turbinas então, ficariam desligadas grande parte do tempo, confirmando os testes anteriores.

Tabela 7. Energia gerada com rugosidade de $Z_0=0.0002$ no modelo E-48.

Vel. (m/s)	Potência (kW)	t / T % (medido)	t / T % (Weibull)
0 – 1	0.00 – 0.00	100.00	100.00
1 – 2	0.00 – 0.00	94.64	92.14
2 – 3	0.00 – 4.85	75.02	76.91
3 – 4	4.85 – 24.26	56.20	59.53
4 – 5	24.26 – 58.23	41.29	43.13
5 – 6	58.23 – 106	29.32	29.42
6 – 7	106 – 174	19.54	18.97
7 – 8	174 – 266	12.42	11.61
8 – 9	266 – 388	7.47	6.75
9 – 10	388 – 538	4.37	3.75
10 – 11	538 – 658	2.31	1.98
11 – 12	658 – 740	1.11	1.00
12 – 13	740 – 784	0.52	0.49
13 – 14	784 – 807	0.24	0.23
14 – 15	807 – 810	0.08	0.10

5. CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente trabalho foi apresentado o estudo do potencial eólico em ambiente *onshore* e *offshore* no Balneário de Pontal do Sul, no Município de Pontal do Paraná – PR.

Os resultados encontrados nos testes realizados não foram satisfatórios, estando muito abaixo do que seria necessário para a conversão eólica neste ambiente, demonstrando que as turbinas ficariam ociosas grande parte do tempo, não retornando o valor que seria investido.

A velocidade média encontrada de 3,43 m/s é considerada baixa segundo Dalmaz *et al.* (2007) e Feitosa *et al.* (1993), sendo necessários ventos médios superiores a 6 m/s em média.

Os valores de Fator de Capacidade máximos foram de 15,9% para *onshore* e de 8,9% para *offshore* utilizando o modelo ENERCON E-48, cujos valores são enormemente baixos quando comparados com os valores encontrados no Ceará e Rio Grande do Norte que têm Fator de Capacidade de 40% (Dalmaz *et al.*, 2007).

A região apresentou uma tendência de direção dos ventos com maior frequência no setor S (4,7 %), seguido por E (4,6 %).

Os dados de calmarias, revelaram que os ventos de Pontal do Sul (31,4%) ficaram abaixo da velocidade de 2,0 m/s, tendo períodos máximos nessa velocidade de até 26 h seguidas, sendo um tempo extremamente longo para a conversão eólica. Estes também revelaram que as maiores velocidades de vento em Pontal do Sul ocorrem no período da tarde e noite, mesmo assim com velocidades baixas, não passando de 4,5 m/s em média.

Sobre a geração de dados mais concisos na região, seria conveniente instalar boias oceanográficas com anemômetros em *offshore*, e torres a 50 m de altura em *onshore*

Com relação ao *software* ALWIN, pode-se concluir que o mesmo, por possuir licença comercial livre, forneceu elementos suficientes para o desenvolvimento do trabalho acadêmico apresentado. Todavia, o ALWIN não leva em consideração o modelo topográfico digital do terreno e nem a paisagem circundante, cujos itens só poderiam ser avaliados através de outros *softwares*, fornecendo dados mais reais em relação ao ambiente *offshore* (Berg & Furulind, 2008).

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Berg, J.; Furulind, J. 2008. Feasibility Study for a Wind Power Project in Sri Lanka. Royal Institute of Technology. Estocolmo, Suíça. 100 p.
- Blessmann, J. 1995. O vento na engenharia estrutural. Porto Alegre: Ed. Universidade / UFRGS.
- Dalmaz, A. Passos, J. C.; Beyer, H. G. 2007. Estudo do potencial eólico e previsão de ventos para a geração de eletricidade em Santa Catarina. 175 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Santa Catarina: Florianópolis.
- Feitosa, E. A. *et al.* 1993. Projeto e operação da primeira turbina eólica de grande porte do Brasil / Ilha de Fernando de Noronha. In: VI Congresso Brasileiro de Energia. Energia para o Desenvolvimento Sustentável. Rio de Janeiro: Fórum de Ciência e Cultura.
- Hassan, G. 2010. Design Methods for Offshore Wind Turbines at Exposed Sites.
- Manwell, J. F.; McGowan, J. G.; Rogers, A. L. 2002. Wind Energy: Theory, Design and Application. England: Ed. John Wiley & Sons Ltd, 577 p.

- Martínez, C. 2003. Principios de conversión de la energía eólica. In: Amenedo, J.L.R.; Gómez, S. A.; Díaz, J. C. B. Sistemas eólicos de producción de energía eléctrica. Madrid: Rueda,p.27-96.
- Miguel, A. R. F.; Rossi, L. A. 2004. Análise do potencial eólico para geração de energia elétrica usando dados em microescala de estações climatológicas no Estado de São Paulo. 133 f. Dissertação (Mestrado em Planejamentos de Sistemas Energéticos). Universidade Estadual de Campinas. Campinas: Unicamp.
- Millais, C. 2005. Relatório Wind Force 12: segurança global a partir do vento. Revista ECO 21, Rio de Janeiro, n. 104.
- Mirshawka, V. 1979. O modelo de Weibull e aplicações à confiabilidade. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Matemática e Estatística, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Noernberg, M. A. 2001. Processos Morfodinâmicos no Complexo Estuarino de Paranaguá – PR – Brasil: Um Estudo a Partir de Dados in Situe LANDSAT – TM. Curitiba. Tese (Doutorado em Geologia). Universidade Federal do Paraná.
- Petry, A. P.; Mattuella, J. M. L. 2007. Análise do potencial eólico e estimativa da geração de energia empregando o “software” livre Alwin.