

ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO EOLIELÉTRICA PARA A ILHA DE SANTIAGO EM CABO VERDE

Valdemar Gomes Lopes – zitu4life@hotmail.com

Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Engenharia Elétrica.

Oyama Douglas Queiroz de Oliveira Filho – oyamadouglas@gmail.com

Alex Maurício Araújo – ama@ufpe.br

Universidade Federal de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Resumo. Atualmente a geração da energia elétrica em Cabo Verde divide-se em três fontes distintas: a termoelétrica; a solar e a eólica. Apresenta-se uma análise da evolução temporal da produção de energia elétrica para a ilha de Santiago onde se constata mais de 95% de geração diesel para produção de eletricidade, tendo as fontes renováveis uma pequena participação. Faz-se uma análise retrospectiva da fonte energia eólica, considerando-se sua participação na matriz elétrica. Até 2009 a ilha produzia energia eólica a partir de aerogeradores de 300 kW que viriam a ser completamente desativados no mesmo ano. Este parque gerava uma média de 2200 MWh/ano. Neste trabalho será realizada uma estimativa da produção de energia elétrica através da aplicação de aerogeradores de maior potência para a ilha. Com os dados da velocidade média anual do vento e o fator de forma de Weibull pré-determinado, faz-se a extrapolação da velocidade para a altura em estudo e se calcula o fator de escala c . Determinados os dois parâmetros de Weibull, calcula-se a função densidade de probabilidade que se confronta com a curva de potência do aerogerador. Assim, estima-se a produção anual de energia. Os resultados demonstraram que 20 aerogeradores produziram aproximadamente 185 GWh/ano, energia que é superior aos 176 GWh produzidos na ilha pela fonte termoelétrica no ano de 2010. Isto significa que, com o auxílio da energia eólica, diminuiria o consumo de óleo diesel na ilha, dentre outros benefícios.

Palavras-chave: Energia Eólica; Cabo Verde; Produção de Energia.

1. INTRODUÇÃO

Situada a 455 km da costa africana, as ilhas de Cabo Verde (Fig.1) ocupam uma área de 4033 km². O território é composto pelas ilhas de Santo Antão, São Vicente, Santa Luzia, São Nicolau, Sal, Boa Vista, Maio, Santiago, Fogo e Brava. A localização do arquipélago o torna exposto aos ventos alísios (Governo de Cabo Verde, 2012).

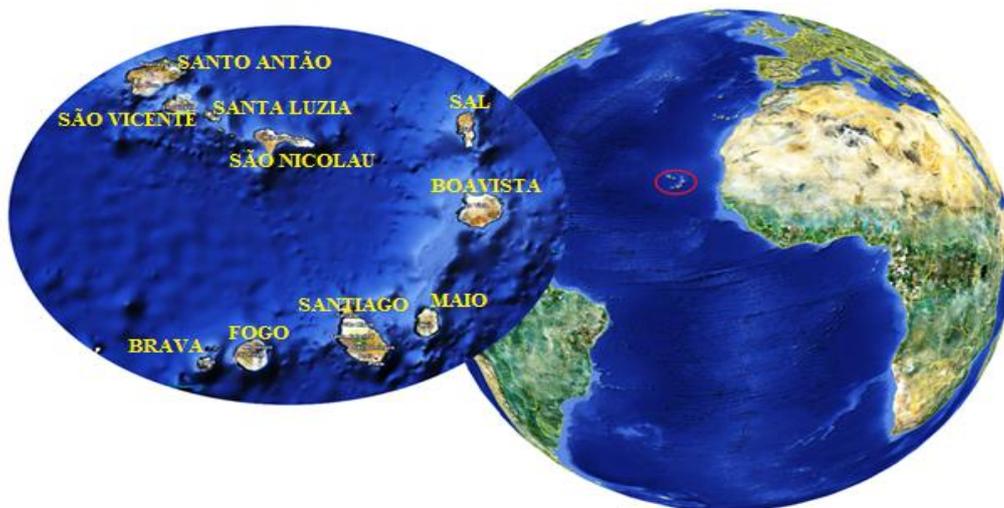


Figura 1 - Localização de Cabo Verde. 16° 0.125'N, 24° 0.792'O. Adaptado de: Google Earth® (2011).

A geração de eletricidade é feita por sistemas isolados em cada ilha devido à descontinuidade do território, tornando inviável a possibilidade de longas linhas de transmissão.

A dependência de combustíveis fósseis é uma das principais razões para as dificuldades no setor elétrico do país. Em 2010, mais de 98% da eletricidade foi produzida a partir dessa fonte (Fig. 2). O aumento do preço de petróleo representou um significativo impacto nos custos da concessionária Electra - Empresa de Eletricidade e Água (Gesto Energy Solutions, 2011).

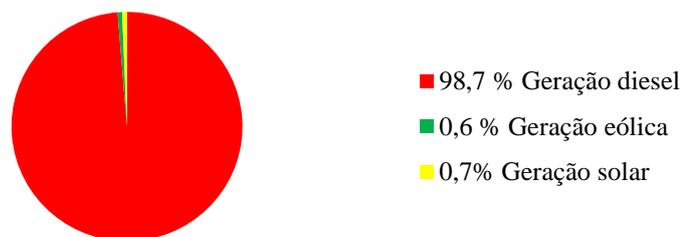


Figura 2 - Matriz elétrica de Cabo Verde no ano 2010. Adaptada de: Relatório Electra (2010).

Esta concentração estrutural da oferta com base no diesel verifica-se em todas as ilhas. Naquelas onde não existe geração eólica ou solar essa concentração é de 100%. Vale enfatizar que o país necessita importar todo o combustível para a produção de energia elétrica.

O diesel representa o maior componente dos produtos importados em Cabo Verde, com uma média de 12,4% no período do 2º trimestre de 2009 e 2º trimestre de 2010. Isso se explica pela sua extrema carência em energia primária, resultando na absorção de uma boa parcela de recursos financeiros que poderiam ser direcionados para outros investimentos (Oliveira, 2010) e (Ministério da Economia Crescimento e Competitividade, 2008).

A distribuição de energia de forma confiável e ininterrupta é uma das principais características que um sistema elétrico de potência deve ter. Isto está relacionado com o conceito de confiabilidade dos sistemas elétricos, que também define condições para uma operação adequada (Camacho, 2007).

O país tem registrado várias interrupções de energia, tornando o sistema pouco confiável. Durante o ano de 2010 foram registradas 518 interrupções nas nove ilhas, com uma duração total de 3303 minutos (Relatório Electra, 2010).

A produção de energia elétrica ao longo dos últimos cinco anos registrou uma taxa média de crescimento de 6%, sendo a geração diesel responsável pela maior parte da produção conforme Tab. 1.

Tabela 1 - Evolução da produção de energia (MWh).

Fonte	2006	2007	2008	2009	2010
Diesel	241.709	260.465	279.645	290.273	314.315
Eólica	7.441	6.869	5.510	4.661	1.992
Vapor	1.772	1.185	640	0	0
Solar	0	0	0	0	2.105
TOTAL	250.921	268.518	285.795	294.934	318.413

Fonte: (Relatório Electra, 2010).

A energia eólica começou a ser produzida no país em novembro de 1994, apenas nas ilhas de São Vicente (3 aerogeradores de 300 kW), Sal (2 aerogeradores de 300 kW) e Santiago (3 aerogeradores de 300 kW) (Santos, 2011). Estes parques operaram por um período de cerca de 16 anos, até sua completa desativação devido à problemas técnicos que cada vez se agravavam, levando a longas paradas para manutenção, o que acarretou a decréscimos de energia produzida de ano para ano conforme Tab. 2. Não se obteve os dados por ilha no ano de 2006, mas apenas a energia total produzida para este ano.

Tabela 2 - Evolução da produção de energia eólica por ilha de 2002 a 2010 (MWh).

	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
São Vicente	2752	2491	3534	3550	-	4735	4407	3656	1802
Sal	773	685	594	601	-	637	462	293	190
Santiago	1990	2170	2302	2299	-	1496	640	711	0
TOTAL	5515	5346	6430	6450	7441	6868	5509	4660	1992

Fonte: (adaptado de Relatórios Electra, 2002 a 2010).

Nos primeiros anos de funcionamento na ilha de São Vicente, por exemplo, registrou-se um fator de capacidade médio de 59,2% no ano de 1997, onde no mês de maio atingiu um pico de 81,6% (*apud* Alves *et al.*, 2000). A instalação de novos parques com modernas tecnologias se tornam promissores visando dar resposta às dificuldades energéticas enfrentadas no país.

Este trabalho foi motivado devido ao potencial eólico ainda pouco explorado em Cabo Verde, pelo grande consumo de óleo diesel no país e também pelo fato da instabilidade do sistema elétrico atual no que diz respeito ao fornecimento de energia à população, resultando em inúmeras interrupções por períodos prolongados.

O estudo de caso será realizado para a ilha de Santiago e tem como objetivo fazer uma estimativa preliminar da produção de energia eólica, consequentemente reduzindo a dependência do consumo de diesel.

2. MÉTODO

A energia anual produzida para a ilha em estudo foi estimada usando a metodologia proposta por Oliveira Filho (2011) para estimar a produção de energia eólica offshore. A metodologia baseia-se nas seguintes etapas:

- 1) Determinam-se os parâmetros de Weibull k (fator de forma, adimensional) e c (fator de escala em m/s). O k foi previamente determinado com os dados de vento locais por Duarte (2004). O parâmetro c é calculado pela Eq. (1) (Lysen, 1983) em função da velocidade média anual (\bar{V}) e do k , onde Γ é a função Gamma.

$$c = \frac{\bar{V}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad [m/s] \quad (1)$$

- 2) Calcula-se a distribuição de frequência de Weibull $f(V)$, Eq. (2) (Burton *et al.*, 2001), em função de k e c para a faixa de velocidades de 0 a 25 m/s discretizada em 1 m/s;

$$f(V) = k \frac{V^{k-1}}{c^k} \exp\left[-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right] \quad (2)$$

Os cálculos para essa distribuição podem ser feitos no Excel® com o uso da função WEIBULL.

- 3) Seleciona-se o modelo de turbina;
- 4) Com as curvas de potência das máquinas corrigidas para a massa específica do local, extrai-se a potência (P em kW) para cada velocidade;
- 5) Com os valores de potência retirados das curvas de potência e da distribuição de frequência calculada, estima-se a produção de energia (PE) para cada velocidade conforme Eq. (3), onde 8760 é o número de horas do ano:

$$PE = \frac{P \times f(V) \times 8760}{1000} \quad [MWh] \quad (3)$$

A produção anual de energia (PAE) é dada pela Eq. (4):

$$PAE = \sum PE \quad [MWh/ano] \quad (4)$$

3. ESTUDO DE CASO

3.1 Características da ilha de Santiago

É a maior das ilhas, onde se localiza Praia, capital do país. A ilha apresenta vários maciços montanhosos além do Pico de Antónia, com 1.392 m de altitude, o ponto mais elevado da ilha. São encontrados vales sinuosos e profundos e uma costa abrupta de recifes negros interrompida em alguns pontos por pequenas praias de areia que mostram o resultado de uma marcada erosão (Embaixada de Cabo Verde, 2002). É a ilha com a maior população (273.919 habitantes) representando cerca da metade do país. Possui uma área de 991 km² (Instituto Nacional de Estatística de Cabo Verde, 2010).

A ilha de Santiago está localizada a 15°4,966'N e 23°37,979'O (Google Earth®, 2011). Devido à localização geográfica, a ilha dispõe de um bom potencial eólico sob ação constante dos ventos alísios, que podem ser utilizados para a produção de energia elétrica (Duarte, 2004).

A produção de energia elétrica na ilha provém de três fontes: diesel, eólica e solar fotovoltaica. A Fig. 3 mostra a evolução da produção da energia elétrica ao longo dos últimos anos.

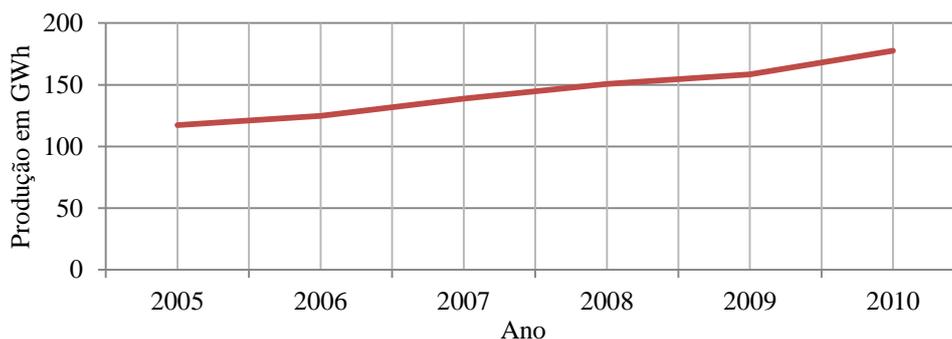


Figura 3 - Evolução da produção de energia elétrica na ilha de Santiago. Adaptada de: Relatório Electra (2010).

A produção de energia eólica nesta ilha teve o ponto marcante em 2005 quando começa a ter uma queda contínua que se prolonga até 2008, conforme o gráfico da Fig. 4, até a sua completa desativação no ano de 2010, devido à problemas técnicos nos aerogeradores.

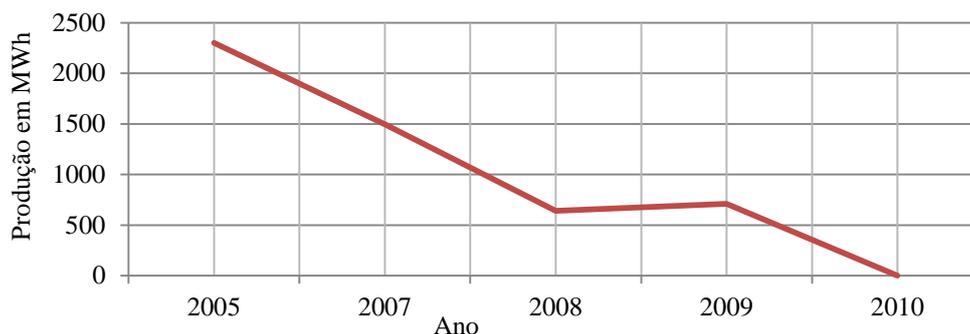


Figura 4 - Produção de energia eólica – Ilha de Santiago. Adaptada de: Relatório Electra (2010).

O parque eólico em Monte São Felipe, inaugurado em outubro de 2011 (Fig. 5), possui atualmente a maior potência eólica instalada no país que é de 10 MW. O parque fica situado a aproximadamente 8 km da cidade da Praia. A região tem uma elevação de mais de 200 m e uma área de 30 hectares, com um total de 11 turbinas de 850 kW.



Figura 5 - Fotomontagem do Parque Monte São Felipe na ilha de Santiago, 14°58.2N, 23°30.7O. (Google Earth®, 2011).

3.2 Estimativa da produção anual de energia

A estimativa da produção eolielétrica neste trabalho foi feita através de dados atualmente disponíveis, ou seja, velocidade média anual do vento e o fator de forma de Weibull k médio anual, no qual se pressupõe estarem implícitas as principais características de vento do local.

Para a região, a 50 m de altitude, a velocidade média estimada do vento é de 8,4 m/s segundo a *Cape Verde Wind Farm Project* (2008). Com esse dado, faz-se a extrapolação para a altura de 90 m. Utiliza-se a lei logarítmica, Eq. (5), para o cálculo dessa extrapolação (Lysen, 1983), onde z_r representa a altura de referência da medida da velocidade em metros, V_r a velocidade nesta altura de referência em metros por segundo e z_0 é o comprimento de rugosidade em metro. Devido à localização geográfica do país, considerou-se sua rugosidade como a de mar calmo, ou seja, $z_0 = 0,0001$ m (Europe Wind Energy Association, 2010).

$$V(z) = V_r \frac{\ln(z/z_0)}{\ln(z_r/z_0)} \quad [m/s] \quad (5)$$

Fazendo-se a extrapolação para 90 m, tem-se uma velocidade média anual do vento de 8,8 m/s. Seguindo a metodologia do Item 2, determina-se o valor de k e c . Para o local, segundo Duarte (2004), o fator de forma de Weibull é $k = 3,4$. Com o k e a velocidade média anual a 90 m, pode-se calcular o fator de escala c a partir da Eq. (1), resultando em um valor de $c = 9,8$ m/s.

A distribuição da variação do vento na ilha é dado pela distribuição densidade de probabilidade de Weibull $f(V)$, calculado através da Eq. (2), para uma faixa de velocidades de vento de 0 a 25 m/s, em intervalos de 1 m/s (Tab. 3). A partir desses valores da função densidade de probabilidade de Weibull, pode-se estimar a produção anual de energia.

Tabela 3 - Distribuição de frequência de Weibull.

V (m/s)	f(V) %	V (m/s)	f(V) %
0	0,00	13	4,92
1	0,15	14	2,76
2	0,77	15	1,32
3	2,01	16	0,54
4	3,89	17	0,18
5	6,29	18	0,05
6	8,93	19	0,01
7	11,33	20	0,00
8	12,98	21	0,00
9	13,41	22	0,00
10	12,47	23	0,00
11	10,36	24	0,00
12	7,62	25	0,00

Para o estudo, foram selecionados os seguintes aerogeradores: Vestas V90-2MW e GE 1,6 MW-100. A Tab. 4 mostra algumas características dessas máquinas.

Tabela 4 - Características das máquinas.

Características	Turbinas	
	V90 - 2,0 MW	GE 1,6 MW - 100
Potência Nominal (MW)	2,0	1,6
Cut-in (m/s)	4	3,5
Velocidade Nominal (m/s)	14	12
Cut-out (m/s)	23	25
Diâmetro do Rotor (m)	90	100
Área Varrida (m ²)	6361,73	7853,98

A Fig. 6 apresenta as curvas de potência das máquinas com a massa específica padrão ($\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$).

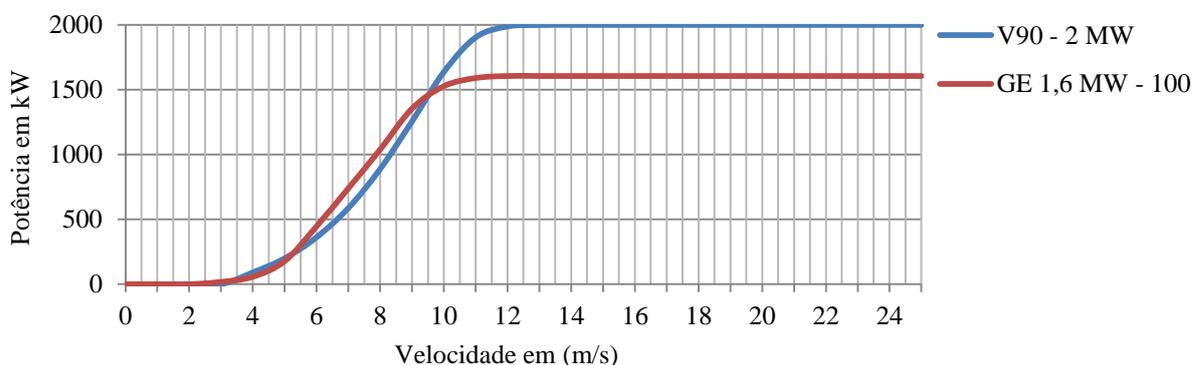


Figura 6 - Curva de potência das máquinas usadas.

Foi feita uma correção da curva de potência para a massa específica do local determinada pela Eq. (6) (Araújo *et al.*, 2009), entrando com valores de temperatura local (em Kelvin) para determinadas altitudes (em metros). A massa específica para a região é $\rho = 1,19 \text{ kg/m}^3$.

A curva corrigida é mostrada na Fig. 7. É verificada nas curvas da Fig. 7 uma pequena perda de potência em relação às curvas da Fig. 6.

$$\rho = \frac{353,049}{T} \cdot e^{\left(-0,034 \frac{Z}{T}\right)} \quad [kg / m^3] \quad (6)$$

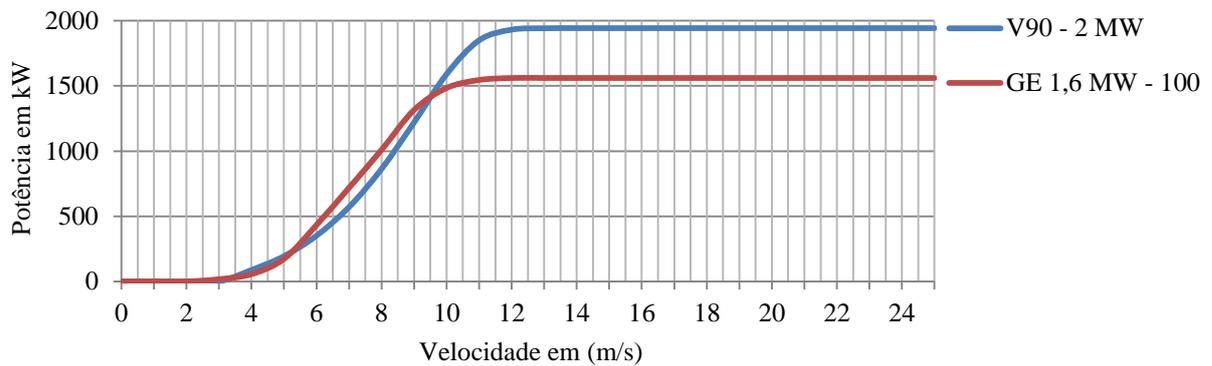


Figura 7 - Curva de potência corrigida.

A Fig. 8 mostra uma comparação dessas curvas de potência com valores normalizados para uma melhor visualização do comportamento das máquinas para o local.

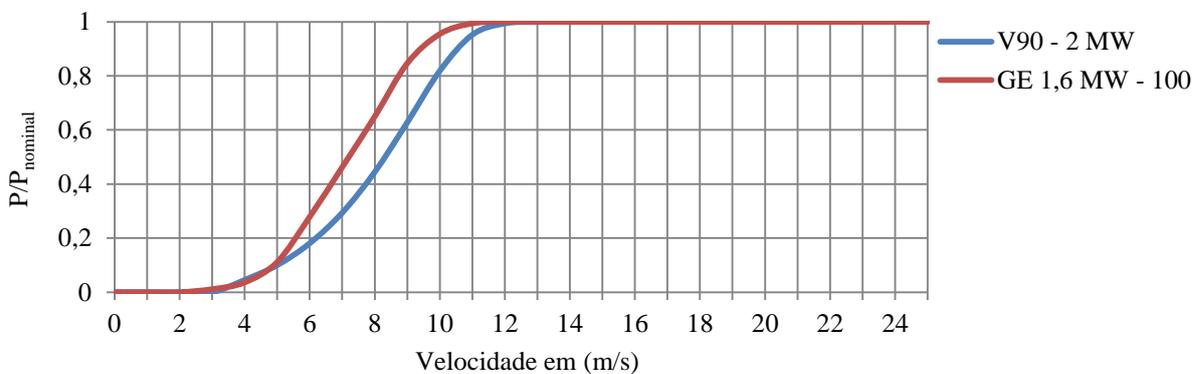


Figura 8 - Curvas de Potência normalizadas.

Com a curva de potência para a massa específica local (Fig. 7) extrai-se a potência produzida para cada máquina na faixa de velocidade de 0 a 25 m/s conforme Tab. 5a. Com os valores de distribuição de frequência de Weibull (Tab. 4) e da potência produzida dada na Tab. 5a, estima-se a produção de energia (*PE*) através da Eq. (3). O resultado está apresentado na Tab. 5b.

Tabela 5 – a) Potência produzida; b) Produção de energia para cada velocidade. (continua)

Velocidade (m/s)	Potência (kW)	
	V90-2,0 MW	GE 1,6 MW-100
0	0	0
1	0	0
2	0	0
3	0	17
4	88	56
5	194	173
6	352	433
7	571	719
8	864	1010
9	1220	1316
10	1590	1484

Velocidade (m/s)	Produção de Energia (MWh)	
	V90-2,0 MW	GE 1,6 MW-100
0	0	0
1	0	0
2	0	0
3	0	3
4	30	19
5	107	96
6	275	339
7	567	714
8	982	1148
9	1434	1546
10	1737	1621

11	1850	1545
12	1931	1560
13	1942	1560
14	1943	1560
15	1927	1560
16	1943	1560
17	1943	1560
18	1943	1560
19	1943	1560
20	1943	1560
21	1943	1560
22	1943	1560
23	1943	1560
24	1943	1560
25	1943	1560

11	1678	1402
12	1289	1042
13	837	673
14	469	377
15	225	181
16	92	74
17	31	25
18	0	0
19	0	0
20	0	0
21	0	0
22	0	0
23	0	0
24	0	0
25	0	0

Com os dados da Tab. 5b e através da Eq. (4), estima-se a produção anual de energia (PAE). Um resumo dessa análise está apresentado na Tab. 6.

Tabela 6 - Produção anual de energia.

Turbina	Vel. média anual a 90 m (m/s)	Potência Nominal Corrigida (kW)	Produção Anual de Energia prevista (MWh/ano)	Fator de Capacidade (%)
V90-2,0 MW	8,78	1943	9754	57
GE 1,6 MW-100	8,78	1560	9258	68

Com essa análise foi possível verificar que a turbina GE 1,6 seria a mais adequada para o local devido ao maior fator de capacidade. A construção de um parque com 20 turbinas produziriam aproximadamente 185 GWh/ano, energia superior à produzida na ilha pelo diesel que foi de 176 GWh para o ano de 2010 (Relatório Electra, 2010). Vale salientar que esses valores dos fatores de capacidade são referidos a médias anuais.

4. CONCLUSÃO

O estudo desenvolvido neste trabalho evidenciou o grande potencial eólico existente em Cabo Verde. A energia eólica é uma opção viável devido ao favorecimento geográfico da região, onde os ventos alísios sopram constantemente.

O estudo de caso foi realizado para a ilha de Santiago e demonstrou que 20 aerogeradores de 1,6 MW podem gerar aproximadamente 185 GWh/ano, energia superior à produzida na ilha pelo diesel que foi de 176 GWh para o ano 2010. A confiabilidade desses resultados depende de um processo de validação que necessariamente deveria ser desenvolvido comparando-se com o procedimento clássico que utiliza uma série histórica de dados de vento medidos no local (Araújo *et al.*, 2009).

Durante a análise não foram considerados as perdas elétricas e perdas devido ao efeito esteira dada a disposição em série dos aerogeradores. O estudo estima a energia possível de se produzir na ilha para a situação considerada, porém vale citar que a instalação de aerogeradores de maior porte requer a avaliação de outros fatores tais como o transporte dessas máquinas até o local da sua instalação, além da necessidade de se ter uma rede elétrica com uma potência de curto circuito adequada e capaz de escoar essa energia gerada.

A geração diesel tem crescido de forma exponencial, visando acompanhar o constante crescimento local. Porém, a necessidade de fontes de energias renováveis torna-se preponderante para o desenvolvimento sustentável da ilha. Nesse aspecto, o estudo realizado mostra que em médio prazo a energia eólica pode ser uma resposta às suas necessidades de produção de energia elétrica.

Agradecimentos

Os autores agradecem os apoios financeiros concedidos pelo CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior).

REFERÊNCIAS

- Alves, L. M. M., Costa, A. L., Carvalho, M. G., 2000. Analysis of potential for market penetration of renewable energy technologies in peripheral islands, *Renewable Energy*, Vol. 19, pp. 311-317.
- Araújo, A. M., Melo, G. M., Medeiros, A. L. R., Santos, M. J., 2009. Simulación de la Producción de Energía Eléctrica con Aerogeneradores de Pequeño Tamaño, *Información Tecnológica*, Vol. 20, n. 3, pp. 37-44.
- Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N., Bossanyi, E., 2001. *Wind Energy Handbook*, John Wiley & Sons.
- Camacho, C., A., L., 2007. Utilização da Técnica de Otimização Simétrica no Ajuste de Tensão de um Gerador Síncrono, *Dissertação de Mestrado, PPGEE, UFMG, Itajubá*.
- Cape Verde Wind Farm Project, 2008. Cape Verde wind farm development, United Kingdom, p. 100.
- Duarte, H. N. M., 2004. Utilização da Energia Eólica em Sistemas Híbridos de Geração de Energia Visando Pequenas Comunidades, *Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande de Sul, Porto Alegre*.
- Embaixada de Cabo Verde no Brasil, 2002. www.embcv.org.br.
- Gesto Energy Solutions, 2011, *Plano Energético Renovável Cabo Verde*, Lisboa.
- Europe Wind Energy Association, *Wind Energy - The Facts*, Volume 1- Technology. Disponível em http://www.ewea.org/fileadmin/ewea_documents/documents/publications/WETF/Facts_Volume_1.pdf. Acesso em 2 de jul 2012.
- Google Earth[®], 2011. www.earth.google.com
- Governo Cabo Verde, *Página Oficial do Governo de Cabo Verde*, 2012. Disponível em http://www.governo.cv/index.php?option=com_content&task=view&id=52. Acesso em 2 de Jul 2012.
- Instituto Nacional de Estatística de Cabo Verde, 2010. *Relatório dos resultados preliminares do RGPH 2010*, p. 26, Cidade da Praia.
- Lysen, E. H., 1983. *Introduction to Wind Energy*, CWD - Consultancy Services Wind Energy Developing Countries.
- Ministério da Economia Crescimento e Competitividade, 2008, *Política Energética de Cabo Verde*, Praia.
- Oliveira Filho, O. D. Q., 2011. *Uma Metodologia Simplificada para Estimativa do Aproveitamento Eólico Offshore no Litoral Brasileiro - Estudo De Caso: A Ilha de Itamaracá/PE*, *Dissertação de Mestrado, PPGEM, UFPE, Recife*.
- Oliveira, J. C. T., 2010, *Análise do Marco Regulatório e Investimento no Setor Elétrico de Cabo Verde – 1990 – 2009*, Monografia, FACE, Departamento de Economia, Brasília.
- Relatório Electra, 2010. *Relatório anual e Contas*, Cidade da Praia, p. 64.
- Santos, R. S. L., *Energias Alternativas em Cabo Verde*, 2011. Disponível em: http://www.portugalcaboverde.com/news_detail.php?id=379. Acesso em: 10 jun 2012.

ESTIMATION OF WIND POWER PRODUCTION FOR SANTIAGO ISLAND IN CAPE VERDE

Currently the generation of electricity in Cape Verde is divided into three distinct sources: thermal, solar and wind sources. An analysis of the temporal evolution of electric power in Santiago Island is presented where it is found that more than 95% of electricity production is based on diesel, and renewable sources have a little participation. A retrospective analysis of wind power is carried out, along with its participation in the energy matrix. Until 2009 the island produced electric power from 300 kW wind turbines which were eventually completely deactivated that same year. The park produced an average of 2200 MWh/year. In this study, an estimated production of electricity will be conducted in the Island through the application of more powerful wind turbines. With the average annual wind speed and the pre-determined Weibull shape factor, a vertical extrapolation is done to determine the average velocity of wind at the desired height. Hence, the scale factor c can then be calculated. After obtaining both parameters, the Weibull density function can be calculated which is then confronted with the power curve of the wind turbine. This way, the annual energy production is estimated. The results showed that 20 turbines would produce about 185 GWh/year, which is higher than the 176 GWh produced in the island from thermoelectric source in 2010. This means that with the help of wind energy the consumption of diesel on the island can be reduced, among other benefits.

Keywords: *Wind Energy; Cape Verde; Energy Production.*