

EVALUACIÓN DEL POTENCIAL EÓLICO PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN EL ESTADO DE VERACRUZ, MÉXICO

ASSESSMENT TO WIND POWER FOR ELECTRICITY GENERATION IN THE STATE OF VERACRUZ (MEXICO)

QUETZALCOATL HERNÁNDEZ-ESCOBEDO

PhD., Centro de Investigación en Recursos Energéticos y Sustentables, Universidad Veracruzana. México, qhernandez@uv.mx

FRANCISCO ESPINOSA-ARENAL

PhD., Centro de Investigación en Recursos Energéticos y Sustentables, Universidad Veracruzana. México, franciespinosa@uv.mx

RICARDO SALDAÑA-FLORES

ING. Instituto de Investigaciones Eléctricas, Cuernavaca, Morelos. México, rsf@iie.org.mx

CARLOS RIVERA-BLANCO

PhD., Centro de Investigación en Recursos Energéticos y Sustentables, Universidad Veracruzana, crivera@uv.mx

Recibido para revisar Noviembre 10 de 2011, aceptado Diciembre 12 de 2011, versión final Diciembre 15 de 2011

RESUMEN: El objetivo de este artículo es la evaluación del recurso eólico para su posible utilización en la generación de energía eléctrica en el Estado de Veracruz, México. Para ello se llevaron a cabo mediciones de viento registradas cada 10 minutos a 50m de altura durante los años 2008 y 2009 en 16 estaciones anemométricas distribuidas dentro del Estado. Se encontró que existen regiones en donde la velocidad promedio del viento es 5.45 m/s, valor que se ajusta para producir energía eléctrica de 14,432 kW mientras la velocidad se mantenga en ese rango. Para evaluar la potencia eléctrica que puede entregar un dispositivo comercial, se utilizó un aerogenerador marca ACCIONA modelo AW 70/1500 Class I que según el fabricante tiene una capacidad 1500kW, el estudio arrojó que instalando un aerogenerador por cada zona estudiada se suministraría energía eléctrica a la red de 10,694 MWh/año, con lo cual se podrán ahorrar 9,933.1 de Toneladas Equivalentes de Petróleo (TEP), y una reducción anual bruta de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) equivalentes a 28,806.1 toneladas de CO₂ (tCO₂). Adicionalmente, se obtuvo la estacionalidad anual de la velocidad media del viento, esto se realizó para observar la variabilidad del viento con respecto a las estaciones del año en el Estado.

PALABRAS CLAVE: Evaluación del potencial eólico, potencia eléctrica, aerogenerador.

ABSTRACT: The aim of this paper is the wind power assessment for possible use in electric power generation in the State of Veracruz, Mexico. For this objective were used wind speed records every 10 minutes at 50m height during 2008 and 2009 in 16 anemometric stations within the State. It was found that there are regions with 5.45 m/s of average wind speed, value that fits to have a total produce of 14,432 kW. To evaluate the output power generation it was selected the wind turbine ACCIONA AW 70/1500 model with 1500 kW of capacity, it was found that installing a wind turbine in a zone assessed it could generate to the electric network supply 10,649 MWh/yr, which could save 9,993.1 of Tonne of Oil Equivalent (TOE) and a annual reduction of Greenhouse Gas equivalentents 28,806.1 tons of CO₂. In addition, it could be demonstrate the annual seasonally of the average wind speed, with the objective of watch de the variability of the wind through the year within the State.

KEYWORDS: wind speed assessment, electric power, wind turbine.

1. INTRODUCCIÓN

Con el rápido desarrollo de la economía global, la demanda de energía se ha incrementado notablemente a nivel mundial [1]. Por otro lado, la necesidad de mitigar

los efectos ambientales adversos por la utilización de combustibles fósiles [2], la volatilidad de los precios de los combustibles y la mejora en la calidad de vida [3], han impulsado un importante crecimiento en la generación de la energía renovable en todo el mundo [4, 1].

La eficiencia energética eólica es una de las más potentes y rentables formas de satisfacer las demandas del desarrollo sostenible [5]. La importancia de aplicar instrumentos de apoyo a las políticas para promover la difusión de estas tecnologías es ya una norma aceptada universalmente [6].

La energía eólica es considerada una gran alternativa para la generación de energía eléctrica desde el punto de vista social y del medio ambiente [7].

Se deben considerar numerosos factores locales que influyen o determinan la intensidad y periodicidad de los movimientos del viento [8]. Estos factores, difíciles de simplificar por su multiplicidad, son los que permiten referirse a vientos locales, los cuales son en muchos lugares más representativos que los de carácter general [9], de ahí la importancia de su estudio y caracterización a nivel local [2]. El rápido aumento de la capacidad instalada de generación eólica ha generado una preocupación sobre la confiabilidad del sistema eléctrico debido a la naturaleza intermitente y variable de la energía eólica [10].

El conocimiento exhaustivo del comportamiento del viento es esencial para múltiples aplicaciones como: Diseñar campos de generación de energía eléctrica [11]; determinar el comportamiento de los ciclones tropicales [12]; determinar la periodicidad del viento [13]; determinar el sitio de evaluación del recurso eólico [14].

Para el país de México se han realizado estudios que evalúan el potencial eólico utilizando mapas de la velocidad del viento, en los Estados de Yucatán [15], Veracruz [16], sin embargo estos trabajos no evalúan la potencia eléctrica que se puede generar en el Estado de Veracruz. Aunque existen trabajos que sí lo hacen pero de modo general para todo el país de México y con poca densidad de datos por Estado y con datos de velocidad de viento a 10m de altura [17].

La energía eléctrica generada en el Estado de Veracruz es mayormente de origen fósil y en el año 2007 ocupó el primer lugar en generación de energía dentro del país de México con 25,488 TWh [16].

En este trabajo se analiza el potencial eólico para su aprovechamiento en la producción de energía eléctrica

en el Estado de Veracruz utilizando un aerogenerador tipo marca ACCIONA AW 70/1500 Class I con capacidad 1500kW, analizando los datos con un Sistema de Información Geográfica (SIG) para limitar las zonas de estudio en detalle a aquellas que presenten un elevado potencial eólico.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1 Datos

El Estado de Veracruz limita al este con el Golfo de México, al sureste con el Estado de Tabasco, al sur con el Estado de Oaxaca, al oeste con el Estado de Puebla y al norte con los Estados de Tamaulipas, San Luis Potosí e Hidalgo, figura 1.

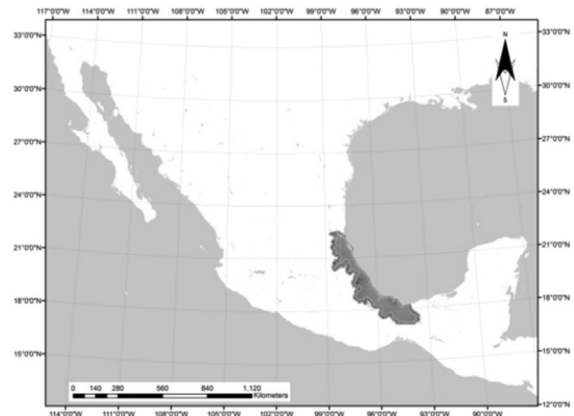


Figura 1. Posición de geográfica del Estado de Veracruz

Actualmente se mantienen registros de la velocidad media del viento y otras variables que pueden emplearse para caracterizar el viento en el Estado de Veracruz donde se encuentran instaladas 16 estaciones anemométricas de diferentes organismos como, el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP); Servicio Meteorológico Nacional (EMAs) y el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) junto con la Universidad Veracruzana (UV), que cuentan con datos cada 10 minutos a 50m de altura de los años 2008 y 2009.

En la tabla 1 se presenta la posición geográfica (longitud, latitud, utilizando como referencia el geoide NAD27) y organismo al que pertenecen las 16 estaciones empleadas en este estudio.

Tabla 1. Estación anemométrica, organismo y Posición geográfica.

Estación Anemométrica	Organismo	Longitud (W)	Latitud (N)
Acayucan 1	INIFAP	94° 55' 53"	18° 02' 41"
Acayucan 2	EMAs	94° 54' 03"	17° 58' 36"
Alvarado	EMAs	95° 37' 57"	18° 42' 54"
C.E. INIFAP Ixtacuaco	INIFAP	97° 05' 53"	20° 02' 36"
Cd. Alemán	EMAs	96° 05' 51"	18° 11' 21"
Coatzacoalcos UV	UV IIE	94° 56' 23"	18° 17' 12"
Córdoba	EMAs	96° 55' 23"	18° 53' 24"
Gutiérrez Zamora	INIFAP	97° 06' 13"	20° 27' 04"
ITSSAT	INIFAP	95° 10' 11"	18° 26' 13"
Jalapa	EMAs	96° 55' 29"	19° 31' 47"
La Tapatia	INIFAP	94° 55' 54"	17° 31' 34"
Ozuluama	INIFAP	97° 51' 32"	21° 40' 30"
Paso del Macho	INIFAP	96° 42' 45"	18° 57' 14"
Resaca La Cangrejera	EMAs	94° 19' 53"	18° 06' 21"

El análisis del aprovechamiento de la velocidad del viento se realizará con el software RETScreen®, Windographer y MatLab, utilizando los métodos de la función de densidad de probabilidad, densidad de potencia, y se ha desarrollado una aplicación informática para determinar el efecto estacional en la velocidad del viento con la técnica de la Transformada Rápida de Fourier (FFT).

2.2 Estacionalidad de la velocidad del viento

El análisis estacional se realiza con el fin de determinar qué cambios se presentan a lo largo de un año en las componentes de la velocidad del viento. Para ello se realizó una aplicación informática en MatLab de la FFT, la cual es una técnica eficaz para el estudio de la periodicidad de los procesos naturales en el dominio de la frecuencia que determina la distribución de la energía en función de la frecuencia o la velocidad de los procedimientos de repetición [12].

Se pueden escribir la definición de la transformada directa e inversa de Fourier, junto las definiciones de espectro de amplitud y espectro de fase de la siguiente manera

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt \tag{1}$$

$$|F(\omega)| = \sqrt{a^2(\omega) + b^2(\omega)} \tag{2}$$

Las fórmulas utilizadas dentro del proceso análisis en el presente estudio, fueron la Transformada de Fourier Directa (1) y el espectro de Amplitud (2), donde f(t) es el registro o serie temporal y es el espectro de amplitud correspondiente a dicha muestra temporal [3].

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Análisis de datos

En la tabla 2 se presentan la media, la media mínima y la media máxima de la velocidad del viento encontrados en las 16 estaciones anemométricas a 50m de altura.

Tabla 2. Parámetros estadísticos de la velocidad del viento a 50m de altura.

Estación (ID)	μ (m/s)	μ_{max} (m/s)	μ_{min}
Aca 1	5.78	16	0
Aca 2	6.07	20.03	0
Alv	4.15	18.50	0
INIFAP Ixt	4.68	17.89	0
CA	5.42	17.52	0
Coat UV	5.81	23.70	0
Cor	5.32	16.92	0
GZam	6.14	14.01	0
ITSSAT	6.34	18.32	0
Jal	5.79	16.87	0
LaTap	6.10	19.53	0
Ozu	4.71	18.72	0
PdelMa	5.59	22.77	0
PLC	5.81	22.56	0
Tux	6.32	18.53	0
UGal	6.44	17.27	0

La velocidad del viento frecuentemente se analiza mediante la función de distribución de Weibull con los parámetros k y c, esta función está definida como,

$$F(u) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{u}{c} \right)^k \right] \tag{3}$$

donde k es el factor de forma y c es el factor de escala (m/s). La correspondiente función de densidad de probabilidad $F(u)$, [18] la define como:

$$F(u) = \frac{dF(u)}{du} = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{u}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{u}{c}\right)^k\right] \quad (4)$$

Como se observa en la tabla 2, el promedio de la velocidad del viento de las estaciones estudiadas es de 5.45 m/s y el promedio de la velocidad máxima de viento es de 18.70 m/s.

3.2 Mapa de la velocidad del viento del Estado de Veracruz

Se hace uso del método de interpolación, Distancia Inversa Ponderada (IDW), para representar a la velocidad del viento. La utilización de la interpolación para cartografiar la distribución de la velocidad del viento es una alternativa, ya que permite realizar una gradación espacial de los valores. En la figura 2, se presenta con SIG un mapa de la velocidad media del viento para el Estado de Veracruz con las velocidades del viento obtenidas de las estaciones anemométricas [18].

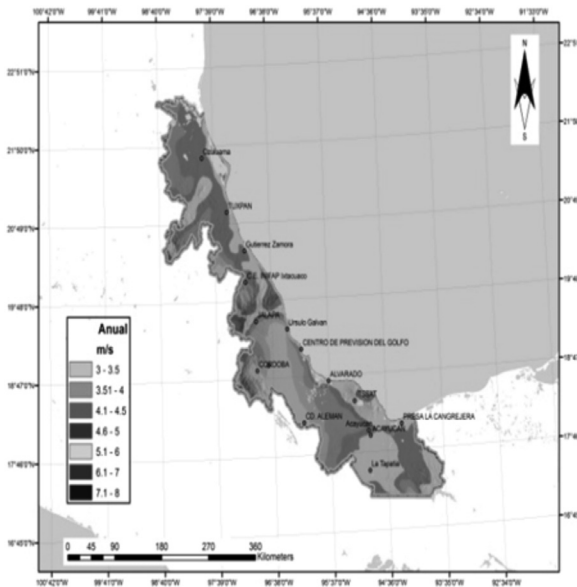


Figura 2. Velocidad del viento a 50m de altura en el Estado de Veracruz, México

Como se observa en la figura 2, las velocidades medias del viento en grandes zonas del Estado de Veracruz, superan los 5 m/s. Este dato permite seleccionar el tipo

de aerogenerador óptimo para implantar en esta zona.

En la tabla 3, se muestra los parámetros estadísticos: el factor de forma k y el factor de escala c , obtenido a partir de la distribución de Weibull, a cada estación anemométrica a 50m de altura.

Tabla 3. Factores de Forma (k) y Escala (c)

Estación (ID)	Factor de Forma k	Factor de Escala c (m/s)
Aca 1	1.99	5.42
Aca 2	1.21	6.85
Alv	1.67	4.64
INIFAP Ixt	1.85	6.55
CA	1.24	6.70
Coat UV	2.01	6.49
Cor	1.82	6.37
GZam	1.93	5.65
ITSSAT	1.44	6.23
Jal	1.49	6.89
LaTap	1.90	6.77
Ozu	1.51	5.99
PdelMa	1.79	6.12
PLC	1.81	6.91
Tux	1.92	6.18
UGal	1.64	6.30

En la tabla 3 se observa que el promedio del factor de escala (c) obtenido por la función de probabilidad de densidad es de 6.25 (m/s) lo que indica que se cuenta con un buen potencial eólico.

3.3 Densidad de Potencia

La densidad de potencia del viento es proporcional al cubo de la velocidad del viento, para una distribución de probabilidad teórica $f(v)$, la cual puede ser calculada por:

$$P_1 = \frac{1}{2} \rho \bar{v}^3 \quad (5)$$

donde ρ es la densidad del aire; \bar{v} es el promedio de las velocidades del viento al cubo.

La densidad de potencia calculada para todas las 16 estaciones anemométricas estudiadas se presenta en la tabla 4.

Tabla 4. Promedio de la Densidad de Potencia de la velocidad del viento

Estación (ID)	Altura (m)	Densidad de Potencia (W/m ²)
Aca 1	50	1,786
Aca 2	50	1,451
Alv	50	1,563
INIFAP_Ixt	50	1,326
CA	50	1,562
Coat UV	50	1,823
Cor	50	1,239
GZam	50	1,368
ITSSAT	50	1,124
Jal	50	1,487
LaTap	50	1,315
Ozu	50	1,225
PdelMa	50	1,914
PLC	50	1,115
Tux	50	1,052

3.4 Evaluación de la velocidad del viento con un aerogenerador tipo

La curva de la potencia generada del aerogenerador ACCIONA AW 70/1500 Class I, se muestra en la figura 3.

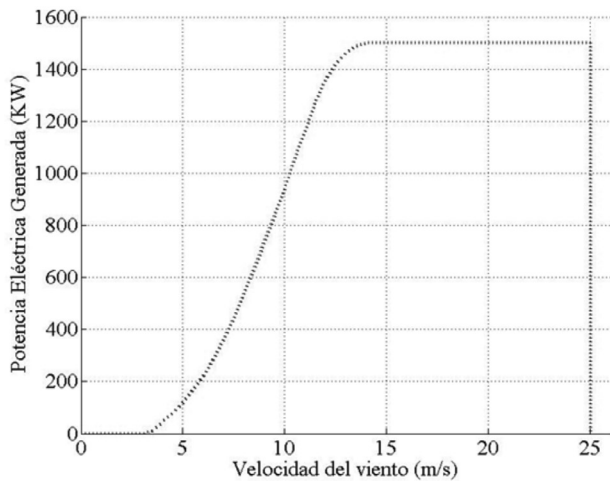


Figura 3. Curva de Potencia Generada

En la tabla 5 se presenta el análisis de la potencia generada (kW), energía generada (kWh/año) por el aerogenerador tipo, así como su correspondiente factor de potencia para las 16 estaciones anemométricas.

Tabla 5. Energía, potencia generada y factor de potencia

Est. Anemo	Vel del Viento a la altura del Buje	Promedio de potencia entregada a la red	Promedio de energía entregada a la red	Factor de Potencia
	(m/s)	(kW)	(kWh/año)	(%)
Aca 1	7.97	906.5	688,367	30.4
Aca 2	5.8	881.5	655,843	28.8
Alv	6.26	1,029.60	761,870	28.6
INIFAP_Ixt	6.33	964.2	707,362	24.3
CA	6.82	1,048.80	755,113	29.9
Coat UV	6.68	1,028.30	765,072	28.6
Cor	6.77	1,034.50	744,850	29
GZam	5.9	981.7	730,411	25.4
ITSSAT	5.87	860.3	619,426	22.1
Jal	5.64	834.7	620,995	20.4
LaTap	5.78	803.8	598,029	26.9
Ozu	5.23	881.3	634,563	27.7
PdelMa	5.28	811.8	604,006	27.3
PLC	5.78	910.5	698,777	20.7
Tux	5.85	723	545,866	28.2
UGal	5.89	731.5	564,260	28.8

Utilizando el software [19] se obtienen los datos de la tabla 5, y se determina que sólo colocando un aerogenerador ACCIONA AW 70/1500 Class I por cada estación estudiada, se exportarían en conjunto al año 59,130 MWh a la red eléctrica.

En la referencia [14], donde establece que la eficiencia de un aerogenerador no es la última variable a considerar, sin embargo, en este estudio se demuestra que los resultados obtenidos son indispensables para desarrollar tecnología eólica.

A los estudios que se han realizado en México como los descritos por [15], [16] y [17], se les ha agregado una técnica que consiste en determinar la estacionalidad del viento dependiendo de la temporada del año, para la evaluación de la velocidad del viento con el fin de producir energía eléctrica.

3.5 Análisis de la estacionalidad de la velocidad del viento

En las figuras 4, 5, 6 se presentan tres ejemplos de la estacionalidad del viento mediante un espectro de amplitud de 3 estaciones anemométricas. Con el fin de comparar los cambios estacionales se eligen las estaciones anemométricas en el siguiente orden: Una del norte, una del centro y por último una estación anemométrica de la zona sur del Estado de Veracruz, respectivamente.

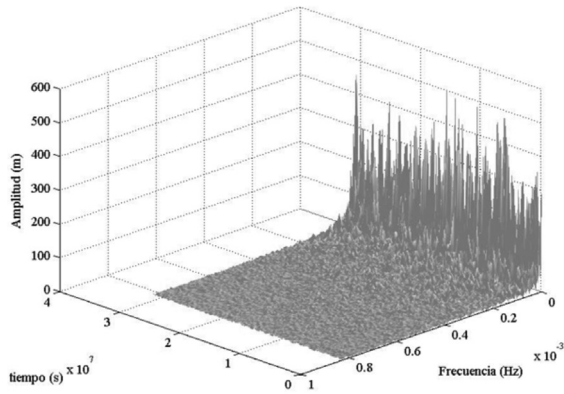


Figura 4. Estacionalidad de la velocidad del viento, de la estación anemométrica de Tuxpan

En la figura 4 se observa la amplitud y frecuencia de la velocidad del viento en el transcurso del año 2008 para la estación de Tuxpan, se puede determinar que la amplitud no varía durante todo el año.

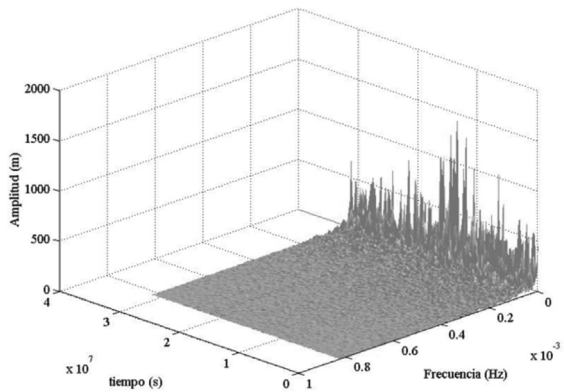


Figura 5. Estacionalidad de la velocidad del viento, de la estación anemométrica de Jalapa.

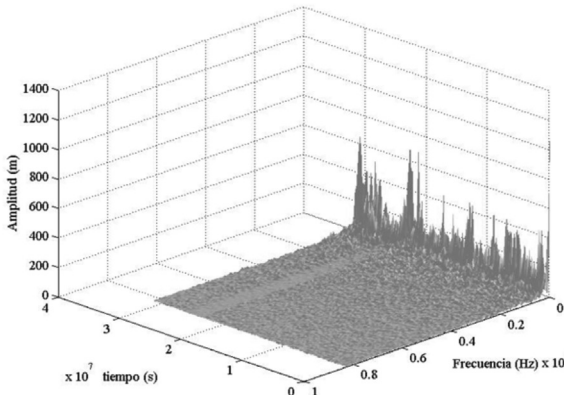


Figura 6. Estacionalidad de la velocidad del viento, de la estación anemométrica de Coatzacoalcos-UV

La estacionalidad del viento para la estación anemométrica de Jalapa durante el año 2008 se muestran en la figura 5, aquí se observa que las mayores amplitudes se presentan a mitad del año.

En la figura 6, se presenta a la estacionalidad del viento de la estación Coatzacoalcos-UV, se muestra que en esta región los vientos más fuertes se presentan en los últimos meses del año.

Como se puede observar en las figuras 4, 5 y 6, el espectro de amplitud muestra el tipo de frecuencia que existe en cada periodo estacional.

4. CONCLUSIONES

El aprovechamiento del potencial eólico en el Estado de Veracruz ha sido analizado con 16 estaciones anemométricas a 50m de altura, que cubren la totalidad del Estado, se ha realizado una evaluación del recurso eólico, y un mapa con SIG para determinar las zonas con mayor potencial.

Los resultados han sido convenientes, se cuenta con un promedio de 5.45 m/s en todo el territorio Veracruzano, la sumatoria del promedio de la potencia y la energía generada en la región alcanzan los 14,432 kW y 10,694 MWh/año de energía exportada a la red, respectivamente, todo ello utilizando un aerogenerador ACCIONA AW 70/1500 Class I. Con estos datos se podrían ahorrar 6,188,646 litros de gasolina y una reducción anual bruta de emisiones GEI equivalentes a 28,806.1 toneladas de CO₂ (tCO₂).

AGRADECIMIENTOS

El autor principal agradece el apoyo otorgado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) del país de México, dentro del programa de Repatriación y Consolidación Institucional.

Los autores agradecen la contribución del Servicio Meteorológico Nacional de México y en especial a Emmanuel Álvarez Ramírez por aportar los datos de las Estaciones Meteorológicas Automáticas.

Los autores agradecen al Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) por la validación de los datos analizados.

REFERENCIAS

- [1] Baños, R., Manzano-Agugliaro, F., Montoya, FG., Gil, C., Alcayde, A., Gómez J. Optimization methods applied to renewable and sustainable energy: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (2011) 1753–1766.
- [2] Hernández-Escobedo, Q., Manzano-Agugliaro, F., Zapata-Sierra, A., Wind strength description in the province of Almeria. *DYNA*, 84, pp. 681-686. 2009
- [3] Manzano-Agugliaro, F., Corchete, V., Lastra, XB., Spectral analysis of tide waves in the Strait of Gibraltar. *Scientific Research and Essays* 6, pp. 453-462. 2011.
- [4] Mirhosseini, M., Sharfi, F., Sedagha, A., Assessing the wind energy potential locations in province of Semnan in Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, pp. 449–455, 2011.
- [5] Rodriguez, VA., Wind power adapted to load hollow on the Canary Island-2015. *DYNA*, 83, pp. 157-163, 2008.
- [6] Sebitosi, AB., Pillay, P., Renewable energy and the environment in South Africa: A way forward. *Energy Policy*, 36, pp. 3312-3316, 2008.
- [7] Xie, K., Billinton, R., Energy and reliability of wind energy conversion systems. *Renewable Energy*, 36, pp. 1983-1988, 2011.
- [8] Manwell, J., McGowan, J., Rogers, A., Wind energy explained: theory, design and application, John Wiley & Sons, Ltd, Sussex, England, 2002.
- [9] Bechrakis, D., Sparis, P., Correlation of wind speed between neighbouring measuring stations. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 19, pp. 4000-4006, 2004.
- [10] Xiao, J, Hodge Bri-mathias, S., Pekny, JF. et al. Operating reserve policies with high wind power penetration. *COMPUTERS & CHEMICAL ENGINEERING*, 35, pp. 1876-1885, 2011
- [11] Degeilh, Y., Singh, C., A quantitative approach to wind farm diversification and reliability. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 33, pp. 303-314, 2011.
- [12] Chao, CC., Liu, GR., Liu, CC., Estimation of the Upper-Layer Rotation and Maximum Wind Speed of Tropical Cyclones via Satellite Imagery. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 50, pp. 750-766, 2011.
- [13] Hernandez-Escobedo, Q., Manzano-Agugliaro, F., Gazquez-Parra, J. A., Is the wind a periodical phenomenon? The Case of Mexico. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. 15, pp. 721-728, 2011.
- [14] Pallabazzer, R., Parametric analysis of wind sitting efficiency. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 91, pp. 1329-1352, 2003.
- [15] Soler-Bientz, R., Preliminary results from a network of stations for wind resource assessment at North of Yucatan Peninsula. *Energy*. 36, pp. 538-548, 2011.
- [16] Cancino-Solorzano, Y., Gutierrez-Trashorras, A. J., Xiberta-Bernat, J., Analytical methods for wind persistence: Their application in assessing the best site for a wind farm in the State of Veracruz, Mexico. *Renewable Energy* 35, pp. 2844-2852, 2010.
- [17] Hernandez-Escobedo, Q., Manzano-Agugliaro, F., Zapata-Sierra, A., The wind power of Mexico. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. 14, pp. 2830-2840, 2010.
- [18] Carta, A., Ramirez, P., Velazquez, S., A review of wind speed probability distributions used in wind energy analysis. Case studies in the Canary Islands. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. 13, pp. 933–955, 2009.
- [19] Software RETScreen International. <http://www.retscreen.net/es/home.php> [citado 14 de Septiembre de 2011]