

## **Coste del kWh eólico generado en Cuba, a partir de datos de viento de una región de buenos potenciales eólicos**

**Deivis Avila - Prats, Ramón Alesanco - García, Feliciano García - García**

Recibido el 29 de abril de 2010; aceptado el 22 de septiembre de 2010

### **Resumen**

En el presente trabajo se muestran los resultados del análisis efectuado acerca de los costes de producción del kWh eólico que se pueden obtener en el archipiélago cubano, a partir de los datos de viento de una región de buenos potenciales eólicos. Para la realización del mismo se procesan los datos de viento de seis estaciones meteorológicas, seleccionando para el estudio la de mayor potencia media de viento. Se calcula la energía eléctrica anual que serían capaces de generar aerogeneradores de: 800, 900, 2000 y 2300 kW de potencia nominal, bajo las condiciones de viento de dicha región. Se determina el coste de producción del kWh eólico generado con las diferentes máquinas, a partir de un coste de inversión por kW eólico instalado.

**Palabras claves:** energía eólica, distribución de Weibull, coste de producción eólico.

## **Cost of the kW h generated with wind energy in Cuba, analyzing the data of wind of a region of good potentials.**

### **Abstract**

In this study, the results of the analysis made about the costs of production of the kWh of wind energy that can be obtained in Cuba are shown. For the realization of the same one the data of wind of six meteorological stations are processed, selecting for the study the stations with the maximum value of annual mean wind speed. A technical assessment has been made of electricity generation from four wind turbines having capacity of (800 kW, 900 kW, 2000 kW and 2300 kW). The yearly energy output for the four different turbines were calculated for the station with the maximum value of annual mean wind speed. It is determined the cost of production of the kWh of wind energy generated with the different machines, taking 1400 dollars per kW installed like inversion cost.

**Key words:** wind energy, Weibull distribution, wind energy production cost.

## 1. Introducción.

El Consejo Mundial de Energía Eólica, más conocido por sus siglas en inglés (GWEC), da a conocer que la potencia eólica a nivel mundial creció en un 31% en 2009, añadiendo 37500 MW al total de las instalaciones, llegando a sumar 157900 MW [1]. Lo que permite aseverar que la energía eólica se encuentra entre las energías con mayor crecimiento dinámico en la actualidad y se sitúa a la vanguardia de las energías renovables.

América Latina cuenta solamente con 1078 MW eólicos instalados, habiendo incorporado 411 MW de los mismos en el año 2009. El país con mayor potencia eólica instalada es Brasil con 602,2 MW, pretendiendo totalizar en un futuro no muy lejano una potencia total instalada de 3140 MW [2]. Cuba es uno de los países del área que no cuenta con grandes yacimientos de petróleo, ni gas natural y que ha decidido invertir en la energía eólica; considerando que es una de las fuentes energéticas renovables más abundantes del territorio, pudiendo estar su capacidad eólica instalable alrededor de los 3500 MW [3].

Los resultados más significativos obtenidos por el archipiélago en este campo son: Culminación en el año 2006 del Mapa Eólico de Cuba. Tener instalados hasta el momento 7,23 MW de potencia eólica, valor que podría ascender hasta 11,73 MW, cuando entre en funcionamiento un cuarto parque eólico a finales del 2010 [4].

Los planes futuros de la empresa eléctrica cubana son seguir desarrollando proyectos eólicos, los cuales deben ser más competitivos desde el punto de vista económico, disminuyendo sus costos de inversión por kW eólico instalado. Atendiendo a esta observación, el siguiente trabajo se traza como objetivo: determinar los costes de producción del kWh generado en Cuba a partir del análisis de los datos de viento de la estación meteorológica de mayor potencia media de viento de las seis estaciones analizadas, la producción de energía eléctrica anual generada por aerogeneradores de: 800, 900, 2000 y 2300 kW de potencias nominal y los costes de inversión por kW eólico instalados en el territorio.

## 2. Caracterización del viento.

El conocimiento de la distribución de frecuencias en que ocurren las distintas velocidades del viento, es un factor muy importante para la evaluación de los potenciales eólicos de cualquier área. El más simple y práctico de los métodos utilizados para su determinación, son las funciones de distribución probabilística.

La distribución de Weibull se puede definir como la distribución estadística por excelencia para describir el comportamiento de las velocidades de viento. La función densidad de probabilidad

$f(v)$  correspondiente a la ley de Weibull es del tipo de dos parámetros: factor de escala  $c$  en (m/s) y factor de forma  $k$ , adimensional, la expresión se plantea como [5]:

$$f(v) = \frac{k}{c} \cdot \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (1)$$

En este estudio los parámetros  $k$  y  $c$  de Weibull se determinan a través del método de los mínimos cuadrados.

Otro parámetro de gran importancia para el tratamiento de los vientos es la extrapolación de sus velocidades; uno de los modelos de cálculo más usados para su realización, se basa en admitir una ley potencial para la variación de la velocidad con la altura según la expresión [6].

$$\frac{v_1}{v_2} = \left(\frac{z_1}{z_2}\right)^\alpha \quad (2)$$

donde  $v_1$  y  $v_2$  son las velocidades de viento a las alturas  $z_1$  y  $z_2$ , respectivamente y  $\alpha$  es un coeficiente que depende de la longitud de rugosidad ( $z_0$ ) del terreno.

En la práctica  $\alpha$  suele estar entre 0,1 y 0,3, para obtener su valor se utiliza la expresión que aparece a continuación; siempre y cuando  $z_0 \leq 0,1$  m.

$$\alpha = 0.24 + 0.04 \cdot \ln z_0 + 0.003 \cdot (\ln z_0)^2 \quad (3)$$

### Cálculo energético del viento.

La potencia eólica disponible ( $P_d$ ) asociada al caudal de aire que atraviesa el área expuesta ( $A$ ), perpendicularmente al flujo de viento se calcula como [6]:

$$P_d = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (4)$$

donde ( $\rho$ ) es la densidad del aire y ( $v$ ) es la velocidad de mismo.

Cuando se desea extrapolar los valores del potencial eólico ( $P_d$ ) a una altura sobre el nivel de suelo ( $z_1$ ) desde otra altura ( $z_2$ ) se emplea la expresión.

$$\frac{P_{d,1}}{P_{d,2}} = \left( \frac{z_1}{z_2} \right)^{3\alpha} \quad (5)$$

Esta expresión solo brinda una variación aproximada del potencial eólico con la altura, siendo válida para cálculos preliminares de potenciales eólicos.

### 3. Cálculo económico.

En el estudio económico de los parques eólicos es de interés conocer el coste unitario de producción eléctrica a partir del viento, para su comparación con los sistemas convencionales.

El coste unitario de producción ( $c_u$ ) se puede determinar actualizando al año cero todos los costes (explotación y financieros) en que incurre el proyecto a lo largo de su vida útil operativa y sumarlos todos ellos a la inversión inicial. El cociente entre la cantidad resultante en unidades monetarias constantes del año cero y la energía eléctrica total que se espera producir a lo largo de toda la vida del proyecto (20 años) permite una estimación razonable del coste unitario de producción (\$/ kW h) referidos al año cero [6].

$$c_u = \frac{\text{Unidades monetarias}}{\text{Unidades de energía producida}} \quad (6)$$

La actualización al año cero de los costes anuales de explotación y financiación se realizara usando la tasa de descuento real, incluidos los efectos de inflación ( $r$ ). Los costes de explotación y de financiación se determinan para cada año en unidades monetarias nominales (umn). De esta forma, el coste unitario de producción ( $c_u$ ) se determinará según la expresión:

$$c_u = \frac{I - V_R \cdot (1+r)^{-n} + \sum_{j=1}^n (OM_j + F_j) \cdot (1+r)^{-j}}{\sum_{j=1}^n E_j} \quad (7)$$

las variables que intervienen en la expresión son:

$c_u$ : coste unitario de producción (\$/kWh) en unidades monetarias constantes (año 0).

$n$ : número de años de vida operativa de la instalación (20 años).

$I$ : inversión inicial (año 0).

$V_R$ : valor residual de la instalación al fin de su vida útil (umn del año  $n$ ).

$OM_j$ : costes de operación y mantenimiento en el año  $j$  (umn del año  $j$ ).

$F_j$ : costes financieros correspondientes al año  $j$  (umn año  $j$ ).

$E_j$ : energía eléctrica producida en el año  $j$  (kWh).

$r$ : tasa unitaria de descuento real, incluyendo también en ella los efectos de la inflación.

La tasa unitaria de descuento real ( $r$ ) puede ser calculada a través de la expresión:

$$r = (k + g + (k \cdot g)) \quad (8)$$

donde (k) es la tasa unitaria de descuento aparente y (g) es tasa unitaria de inflación anual.

La tasa unitaria de inflación (g) y la tasa unitaria de descuento aparente (k) se tomarán constantes para todo el periodo de análisis del parque eólico.

#### 4. Parámetros de las estaciones meteorológicas.

En el trabajo, los datos de velocidades de vientos se toman de los estudios de potenciales eólicos realizados por un grupo de investigadores del Instituto de Meteorología de Cuba (INSMET) [7]. Los estudios fueron realizados a partir de las mediciones de viento de torres meteorológicas colocadas para la estimación del recurso eólico en diferentes condiciones físicas-geográficas del archipiélago.

En la Tabla 1 aparecen las coordenadas geográficas de las seis estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio. La Figura 1 muestra la localización geográfica de las estaciones meteorológicas.

Tabla No. 1. Coordenadas geográficas de las seis estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio (Fuente: [7]).

Estación	Longitud (grados)	Latitud (grados)
Guanito TV	83° 46' 54"	22° 27' 08"
S/ C del Norte	81° 55' 58"	23° 09' 00"
Jagüey	81° 05' 44"	22° 33' 39"
El Brinco	81° 03' 14"	22° 04' 18"
Camagüey TV	77° 52' 32"	21° 21' 50"
Caibarién	79° 29' 02"	22° 30' 02"



Figura 1. Ubicación geográfica de las estaciones meteorológicas estudiadas. (Fuente: [7])

La Figura 2 muestra la distribución probabilística de Weibull, para las velocidades de viento analizadas en el periodo de un año en las seis estaciones meteorológicas estudiadas. La Tabla 2 da a conocer la potencia media que ejerce el viento por metro cuadrado (Pm), los parámetros k, c de la distribución de Weibull y la velocidad media del viento ( $V$ ) para las mismas, a una altura de 50 metros sobre en nivel del suelo.

Tabla No. 2. Franja temporal de datos del viento de las seis estaciones meteorológicas, medidos a una altura de 50 metros sobre el nivel del suelo. (Fuente: [7])

Estación	Parámetros de Weibull $k, c$	Vel. media del viento $\bar{v}$ (m/s)	Potencia Media ( $W/m^2$ )
Guanito TV	$k=2,44; c=6,06$ (m/s)	5,4	163
S/ C del Norte	$k=2,25; c=7,1$ (m/s)	6,44	261
Jagüey	$k=2,81; c=5,8$ (m/s)	5,2	124
El Brinco	$k=2,63; c=6,7$ (m/s)	6,0	197
Camagüey TV	$k=3,02; c=6,8$ (m/s)	6,1	192
Caibarién	$k=2,55; c=6,4$ (m/s)	5,7	175

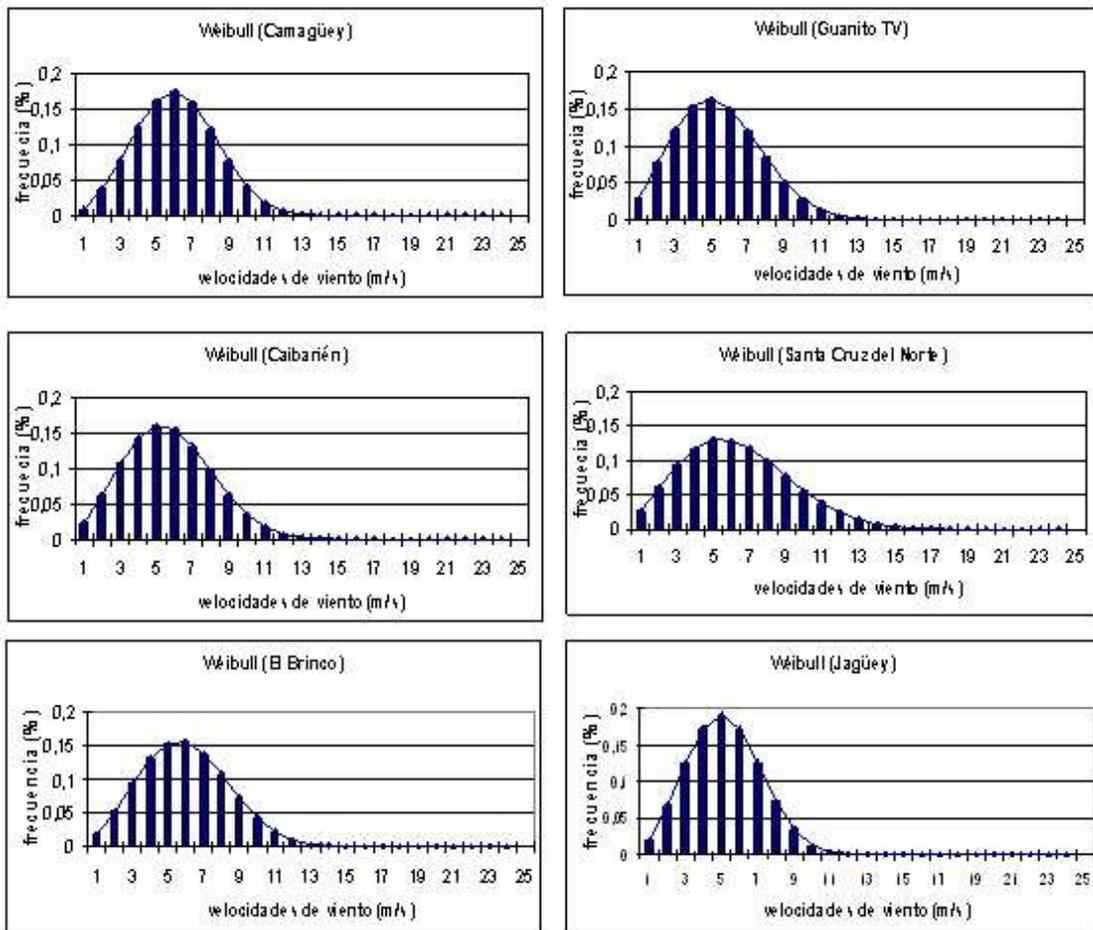


Figura 2. Distribución probabilística de Weibull de las velocidades de viento en el periodo de un año, en las seis estaciones meteorológicas estudiadas. (Fuente: elaboración propia)

### 5. Selección del emplazamiento a estudiar.

Entre los datos que nos ofrece la Tabla 2 se encuentra la potencia media que ejerce el viento por metro cuadrado ( $P_m$ ), encontrándose los valores de las estaciones meteorológicas estudiadas entre 124 y 261  $W/m^2$ . La mayor potencia media de viento de todas las estaciones analizadas pertenece a la de Santa Cruz del Norte, La Habana, la que posee buenas condiciones meteorológicas y de infraestructura, dado que se encuentra en un área de elevaciones montañosas, con muy baja probabilidad de ocurrencia de fenómenos meteorológicos severos (huracanes, trombas marinas, tornados y tormentas, etc.) [8], encontrándose muy cerca de puertos, redes de alta tensión de transmisión eléctrica, centros industriales y contando con buenas condiciones viales en el enclave. Tomando en consideración todo lo antes expuesto, se determina tomar para el estudio los datos de la estación meteorológica de Santa Cruz del Norte, con los que se realizarán distintos

cálculos energéticos a partir de las velocidades de viento en la misma y se determinarán los costes de producción del kW h generado para distintas propuestas.

### 6. Energía producida por los aerogeneradores seleccionados.

Las características de los aerogeneradores seleccionados para el estudio aparecen en la Tabla 3. Estas máquinas presentan un sistema de acoplamiento (rotor- generador) directo sin caja multiplicadora, lo cual minimiza las sobrecargas mecánicas y aumenta la vida útil del equipo, disminuyendo los costes de operación y mantenimiento de la turbina [9,10]. En estudios realizados por investigadores del Centro de Combustión y Energía (CECYEN) de la Universidad Matanzas, Cuba [11], se demuestra que este tipo de turbinas son las óptimas para las condiciones de viento de nuestro archipiélago. Las curvas de potencia de los aparatos se encuentran graficadas en la Figura 3, siendo sus potencias nominales 800, 900, 2000 y 2300 kW.

La selección realizada pretende evaluar turbinas con una avanzada tecnología, las cuales se diferencian por su potencia nominal. La energía eléctrica anual que serian capaces de generar las mismas, así como las horas equivalentes, se muestra en la Tabla 4. Todos los cálculos fueron realizados para una densidad estándar del aire de 1,225 kg/m<sup>3</sup>.

Tabla 3. Características comerciales de los aerogeneradores. (Fuente: [9])

Características	E 44	E 48	E 70	E 82
Potencia nominal (kW)	900	800	2300	2000
Altura de buje ( m )	78	78	78	78
Diámetro del rotor (m)	44	48	71	82
Área de barrido del rotor (m <sup>2</sup> )	1521	1810	3959	5281
Velocidad de arranque (m/s)	2	2	2	2
Velocidad de corte (m/s)	28-34	28-34	28-34	28-34

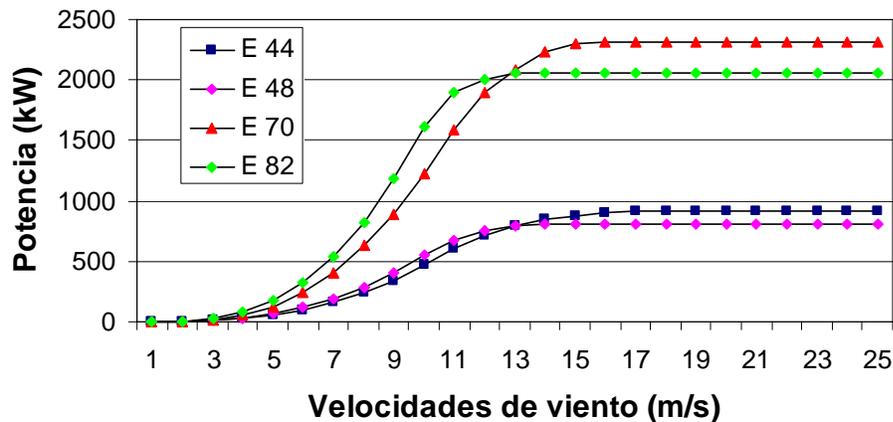


Figura 3. Curvas de potencia de los aerogeneradores seleccionados. (Fuente: [9])

Tabla 4. Energía generada por los aerogeneradores en un año. (Fuente: elaboración propia)

Aerogenerador	Potencia nominal (kW)	Energía producida (kW h/ año)	Horas equivalentes (h/ año)
E 44	900	1 994 741	2217
E 48	800	2 259 983	2825
E 70	2300	5 206 247	2264
E 82	2000	6 265 811	3133

Los resultados obtenidos arrojan que la menor producción de energía eléctrica por año es la del aerogenerador de 900 kW con 1 994 741 kW h/ año y 2217 horas equivalentes. La mayor producción estará a cargo de la máquina de 2000 kW, con 6 265 811 kW h/ año, y 3133 horas equivalentes. Ambos cálculos fueron realizados a una altura de buje de 78 metros.

## 7. Número de aerogeneradores por propuesta.

En la actualidad son puntuales los casos donde se decide colocar un aerogenerador aislado para la producción de energía eléctrica, siendo los llamados parques eólicos las opciones más viables, tanto desde el punto de vista técnico, como económico. Dadas estas razones, se decide realizar la propuesta de parque eólico para el estudio, el cual variará su potencia nominal entre los 11 y los 12 MW, en dependencia de las máquinas utilizadas para el mismo, tal y como aparece en la Tabla 5.

Tabla 5. Número de aerogeneradores por propuesta. (Fuente: elaboración propia)

Variantes	Aerogenerador	Potencia del aerog. (kW)	nº de equipos.	Potencia del Parque (MW)
1	E 44	900	13	11,7
2	E 48	800	15	12
3	E 70	2300	5	11,5
4	E 82	2000	6	12

El número de aerogeneradores para cada propuesta dependerá de la potencia nominal de cada máquina, por los que a menor potencia del equipo, se necesitarán un mayor número de turbinas eólicas.

## 8. Análisis económico.

A continuación se presenta un análisis económico de los costes de producción del kW h generado a partir del viento en Santa Cruz del Norte. Los cálculos se realizaron tomando un costo por kW eólico instalado igual a 1400 \$/kW (valor promedio del costo por kW eólico instalado en Cuba [4, 12], puede ser mayor en algunos casos). Los resultados obtenidos aparecen en la Tabla 6.

Tabla No. 6. Coste de producción del kW h eólico. (Fuente: elaboración propia)

Aerogenerador	Inversión inicial (\$)	Coste unitario de explotación(c\$/ kW)	Coste de producción (c\$/kW h )
E 44	16 380 000	1,75	6,0
E 48	16 800 000	1,75	5,0
E 70	16 100 000	1,75	5,9
E 82	16 800 000	1,75	4,6

Los costes de producción del kW h eólico generado para las inversiones analizadas se encuentran entre los 4,6 y los 6,0 centavos dólar; perteneciendo el menor de ellos a la máquina de 2000 kW de potencia nominal, la cual esta propuesta para formar con seis turbinas un parque eólico de 12 MW.

## 9. Conclusiones.

Tomando en consideración todos los aspectos analizados en este trabajo se llega a las siguientes conclusiones.

1. La estación meteorológica situada en la región de Santa Cruz del Norte, La Habana, se selecciona como la de mayor potencia media de viento por metro cuadrado de las seis estaciones analizadas, con un valor de  $261 \text{ W/m}^2$  a 50 metros de altura sobre el nivel del suelo. La misma posee buenas condiciones meteorológicas y de infraestructura.
2. La mayor producción de energía eléctrica obtenida a partir de los aerogeneradores analizados está a cargo de la máquina de 2000 kW de potencia nominal, con 6 265 811 kW h/ año, una altura de buje de 78 metros y 3133 horas equivalentes anuales.
3. Los costes de producción del kW h eólico generado a partir de los potenciales eólicos existentes en la región seleccionada y una inversión de 1400 \$/kW eólico instalado se encuentran entre los 4,6 y los 6,0 centavos dólar; perteneciendo el menor de los costes a la máquina de 2000 kW de potencia nominal.

## 10. Referencias.

1. *Global wind power boom continues despite economic woes*. GWEC. (Global Wind Energy Council), 2010. [Consultado el: 18 marzo de 2010]. Disponible en: <http://www.gwec.net/>
2. "La energía eólica en América Latina". *Infopower*. LAWEA (Latin American Wind Energy Association). 2009. vol. 120, p. 11-16.
3. **SOLTURA, R.;ROQUE, A.** "Mapa del Potencial Eólico de Cuba ". *Energía y Tú*. 2007. vol. 37, nº Enero – Marzo.
4. "Proyecto (PIN) Parque Eólico Gibara 2 ". *INEL. (Empresa de Ingeniería y Proyectos para la Electricidad)*. 2009, [Consultado el: 8 de febrero de 2010]. Disponible en: <http://www.cdmazaar.net> .
5. **UCAR, A.;BALO, F.** "Evaluation of wind energy potential and electricity generation at six locations in Turkey". *Appl Energy*. 2008. vol. 12, nº 016.
6. **VILLARRUBIA, M.** *Energía Eólica. Energías. Alternativas y Medio Ambiente* : ,. p. ISBN: 8432910627. Barcelona: CEAC, 2004. 322 p. ISBN 8432910627.
7. **ROQUE, A.**; *et al.* Red de torres meteorológicas de referencia para el programa eólico cubano. En *VI Conferencia Internacional de Energía Renovable, Ahorro de Energía y Educación Energética. La Habana, Cuba. 2009.*
8. **LIMIA, M.; VEGA, R.;PÉREZ, R.** *Climatología de los Ciclones Tropicales que han afectado a Cuba y a sus provincias*. Centro del Clima. Instituto de Meteorología de Cuba. Agencia de Medio Ambiente. CITMA, 1999.
9. *Aerogeneradores Enercon, gama de productos*. ENERCON GMBH, 2009. p [Consultado el: 15 de marzo de 2010]. Disponible en: [http://www.enercon.de/es/\\_home.htm](http://www.enercon.de/es/_home.htm)
10. *Parque Eólico de 16,1MW Hoya de Lucas con vertido directo a la red, Arico, Tenerife*. CANETECH (Sociedad Canaria de Tecnologías Medioambientales). Disponible en Escuela Superior de Náutica, Universidad de la Laguna, España, 2007. p 212.
11. **AVILA PRATS, D.** *Análisis de factibilidad técnico-económico para la construcción de un parque eólico en la provincia de Matanzas* Universidad de Matanzas Camilo Cienfuegos. Centro de Documentación del CECYEN, 2003.
12. **LEIVA, G.** "Parque Eólico de Turiguanó". *Energía y Tú*. 1999. vol. 6, nº abril-junio

### **Deivis Avila - Prats, Ramón Alesanco - García, Feliciano García - García**

1. Grupo de Investigación I+D Ingemar, Dpto. de Ingeniería Marítima. Universidad de La Laguna. Avda. Francisco La Roche, s/n. 38001- S/C Tenerife, España..

Email: [deivisavila@yahoo.es](mailto:deivisavila@yahoo.es) , [ralesanco@gmail.com](mailto:ralesanco@gmail.com) , [felicianonautica@yahoo.es](mailto:felicianonautica@yahoo.es)