

## **COSTO DE LA ENERGÍA GENERADA POR GRANJAS EÓLICAS EN ARGENTINA**

**Fernando Tilca, Héctor Mattio.**

Instituto de Energías No Convencionales (INENCO), Facultad de Ciencias Exactas, UNSa.  
Avda. Bolivia 5150, (4400), Salta, Argentina. Tel 0387-4255489. e-mail: tilcaf@inenco.net.  
Centro Regional de Energía Eólica (CREE).  
Lewis Jones 280, (U9103BDJ), Rawson, Chubut. Tel: 02965-481572

**RESUMEN:** Presentamos una forma de determinación del costo de la energía eléctrica generada por granjas eólicas en Argentina, según el precio del kW instalado, de la cantidad de energía generada por la granja, y para dos tasa de interés del préstamo del capital para su construcción. Se puede aplicar para cualquier región del país con diseños razonablemente buenos, atendiendo a las características propias del viento del sitio de interés. Se presenta también una forma de estimar el Factor de Capacidad de un sitio según la velocidad nominal del molino y la velocidad media del lugar.

**Palabras clave:** central eólica, costo energía eólica, aerogeneradores.

### **INTRODUCCIÓN**

En el tema del aprovechamiento de la energía del viento para la generación de energía eléctrica a granel, es de sumo interés, tanto para desarrolladores de proyectos como para organismos gubernamentales que tienen poder de decisión en el planeamiento energético del país, el disponer de herramientas para:

- La determinación de sitios con factibilidad cierta para el aprovechamiento del potencial eólico.
- La estimación rápida del costo del kWh generado, con el menor grado de error, y considerando parámetros actuales de precios de los diversos insumos.

En el primer caso, esto es, la determinación de los mejores sitios de viento, el Mapa Eólico Nacional [1] es una excelente herramienta. Nuestro país tiene, en quizás la mitad de su territorio, lugares con un buen potencial eólico.

En cuanto a la determinación, o cálculo, del costo del kWh generado por una granja eólica, es un resultado que depende de varios parámetros. El objetivo abordado en este trabajo, es llegar a ese resultado considerando los principales factores de los que depende.

### **DESCRIPCIÓN**

A menos que se trate de un sistema aislado, en el estudio para el emprendimiento de una granja eólica, lo primero que se debe tener en cuenta, es si existen líneas de transmisión de energía eléctrica cercanas a la ubicación del sitio de interés. La producción de energía de la granja, se transfiere a las líneas, para su distribución hacia los centros de consumo.

En Argentina, el Mercado Eléctrico Mayorista paga un determinado precio a las generadoras. Este precio suele variar según la hora del día, y si se trata de potencia firme o no. A mediados de 2008, varía entre 0.07 y 0.09 \$/kWh.

Para tener una idea de órdenes de magnitud, con los vientos de la Patagonia, basta un cuadrado de un poco más de 100 km de lado, en el que se instalaran aerogeneradores, para generar toda la energía eléctrica que se consume en el país. Esto desde luego respetando las distancias entre los molinos, y considerando un factor de capacidad razonable para la zona.

Sin embargo, solo de origen técnico, hay inconvenientes hasta ahora imposibles de superar, como por ejemplo la penetración eólica en la red de distribución, que actualmente tiene un límite que está alrededor del 20%. La potencia eólica instalada en nuestro país, es del orden del 0.1% de la total, es decir que hay un espacio en la matriz energética del país, que la energía eólica debe comenzar a ocupar.

Es entonces de sumo interés la determinación de los sitios con mayor potencial de aprovechamiento eólico. El costo de la energía eléctrica generada por una granja eólica, está en función de:

- a) La velocidad media anual del viento, la distribución de velocidades y direcciones del viento, y por lo tanto de la cantidad de energía generada anual, medida a través del Factor de Capacidad de la granja.
- b) El precio del kW instalado.

c) La tasa de interés anual del préstamo para la construcción del parque eólico.

En forma menos pronunciada que de los parámetros anteriores, el costo de la energía generada también es función del costo de Operación y Mantenimiento del parque.

Más adelante en este trabajo se presenta una forma de determinar el costo del kWh en función de los tres parámetros mencionados, pero conociendo la cantidad de energía generada por la granja, supuesta en el sitio en estudio. El primer paso entonces es determinar la energía generada, lo que se hace en el apartado siguiente.

### 3. CÁLCULO DE LA ENERGÍA GENERADA

La energía eléctrica neta anual generada por una granja eólica ( $E_{NG}$ ) se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$E_{NG} = P_{INST} * 8760 * F_C \quad (1)$$

Donde:

$E_{NG}$ : Energía neta generada en un año, en MWh.

$P_{INST}$  = Potencia Instalada, en MW.

8760, son las horas del año.

$F_C$  = Factor de Capacidad =  $E_{NG} / (P_{INST} * 8760)$

De la expresión (1) vemos que, para una granja eólica de una dada potencia instalada, si conocemos el  $F_C$ , se puede determinar la energía generada, y viceversa.

Lo que haremos entonces, es determinar el  $F_C$  [3] de un sitio, que tiene una velocidad media anual de viento conocida, y en el que se instalará una granja eólica con molinos de una determinada potencia y velocidad nominal.

El gráfico de la Figura 1 es parte de la curva Factor de Capacidad, versus  $V_{ave}/V_{nom}$ , de la referencia [2].

Lo que se hizo fue determinar la ecuación de esta curva, obteniendo la función  $F_C^* = f(V_{ave}/V_{nom})$ . Dicha ecuación de ajuste es:

$$F_C^* = 0,6891 (V_{ave}/V_{nom})^3 - 0,9856 (V_{ave}/V_{nom})^2 + 1,4285 (V_{ave}/V_{nom}) - 0,257 \quad (2)$$

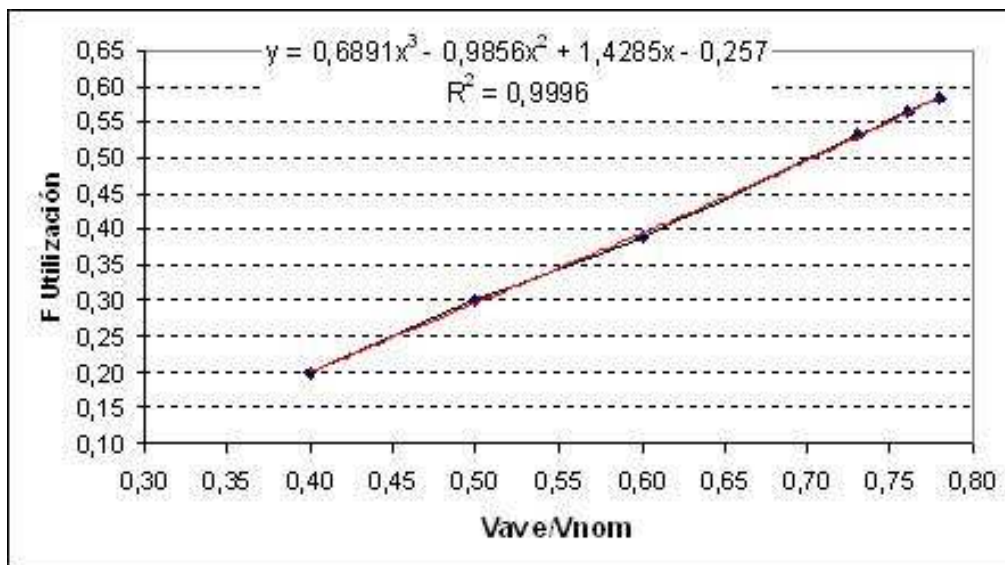


Figura 1: Factor de capacidad en función de  $(V_{ave}/V_{nom})$

La (2) es una herramienta para obtener el Factor de capacidad (sin considerar las pérdidas) de la granja eólica, al que se llamará  $F_C^*$ . Sirve para estimar en forma rápida, la producción de energía, conociendo la velocidad nominal del molino y la velocidad promedio anual del lugar a la altura del eje.

Este  $F_c^*$  obtenido es sin las pérdidas propias de una granja (pérdidas por: indisponibilidad de los molinos, sistema de transmisión, turbulencia, sistema de control, imprecisión en datos de viento); la experiencia en diversas granjas eólicas en el mundo, indican que el valor aproximado de las pérdidas es de un 10%.

Entonces, con este criterio, el  $F_c$  se calcula con la siguiente expresión:

$$F_c = 0.9 * F_c^* \quad (3)$$

Se ha podido contrastar valores del Factor de Capacidad de granjas eólicas de Argentina, Brasil, Ecuador y República Dominicana, con el obtenido a partir de este método, observando lo siguiente:

- La correspondencia es bastante buena, con una diferencia entre el real de la granja y el obtenido de esta forma dentro del 10%, excepto en aquellos sitios donde el valor de  $k$  (el factor de forma de Weibull) es mayor que 2.5, es decir en sitios con velocidad media anual alta y muy poca dispersión de los datos de velocidad. En estos casos, se subestima el valor del Factor de Capacidad al calcularlo de la manera descripta aquí.

Calculado de esta forma el Factor de Capacidad, con la (1) se puede obtener la energía neta generada por la granja.

#### 4. DETERMINACIÓN DEL COSTO DEL kWh

Como se dijo, es de interés, el desarrollar una herramienta que permita estimar el costo de la energía generada por parques eólicos ubicados en cualquier región del país, cada una con sus propias características de viento. Con este fin, es que se han realizado los cálculos siguientes.

Para la determinación del costo del kWh generado por una granja eólica, existen varios métodos en uso internacionalmente. Tienen en cuenta los parámetros mencionados en el parágrafo 2.

En nuestro caso, se han utilizado dos métodos: el del CREE (Centro Regional de Energía Eólica, Chubut, Argentina), y un método danés, desarrollado por Per Sørensen.

El parámetro principal en los costos, es el precio del kW instalado, el que, desde hace unos 5 años, viene incrementándose en forma sostenida. Esto se debe principalmente a dos motivos:

- El aumento del precio del acero en el mundo.
- El aumento casi exponencial de la demanda de aerogeneradores.

Al momento actual, mediados del año 2008, los precios de las instalaciones de granjas eólicas, varían entre:

- 1700 a 2000 U\$/kW instalado, para molinos de 1.5 MW de fabricación nacional<sup>1</sup>.
- 2200 a 2400 U\$/kW instalado, para turbinas de patentes extranjeras<sup>2</sup>.

Teniendo en cuenta las consideraciones realizadas, se obtiene el costo del kWh generado, en función de:

- La cantidad de energía que produce la granja eólica (mediante el Factor de Capacidad, con una variación desde 0.20 hasta 0.48).
- Tres valores del precio del kW instalado (1700, 2000 y 2400 U\$).
- Dos tasas de interés anual del préstamo para la construcción: 4% y 8%.

Los gráficos de las Figuras 2 y 3 muestran estos resultados, con las ecuaciones obtenidas para cada caso.

---

<sup>1</sup> Datos estimados y proporcionados por uno de los fabricantes de nuestro país (IMPSA).

<sup>2</sup> Estos son precios del kW instalado durante 2007 en granjas eólicas en Brasil.

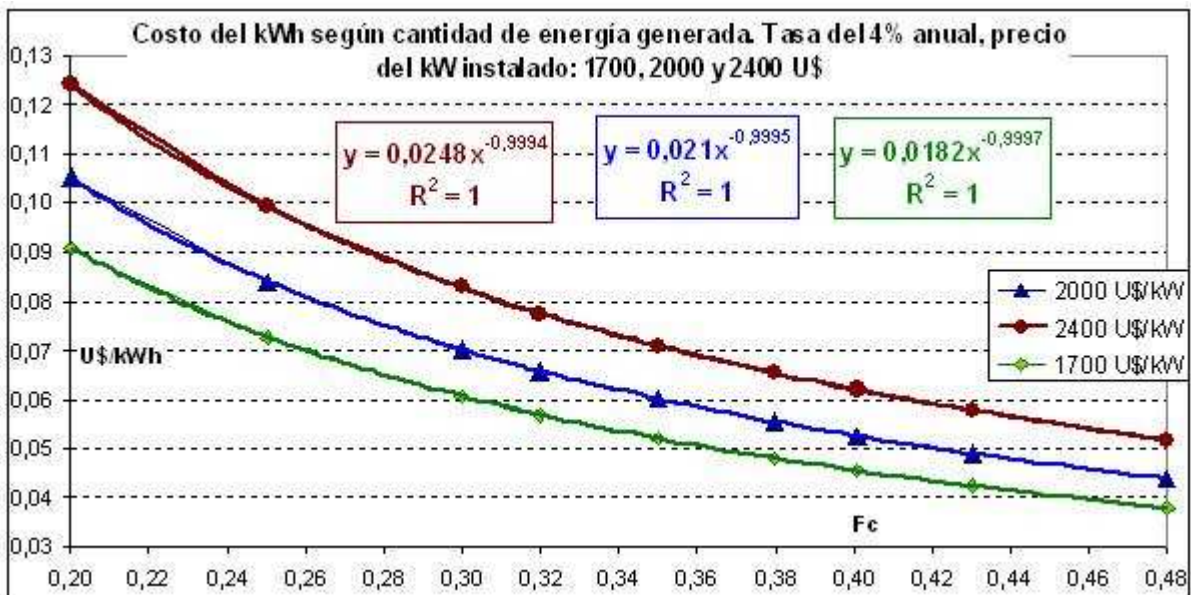


Figura 2: costo del kWh en función de la producción de energía (Factor de Capacidad), para una tasa de interés del préstamo del 4% anual.

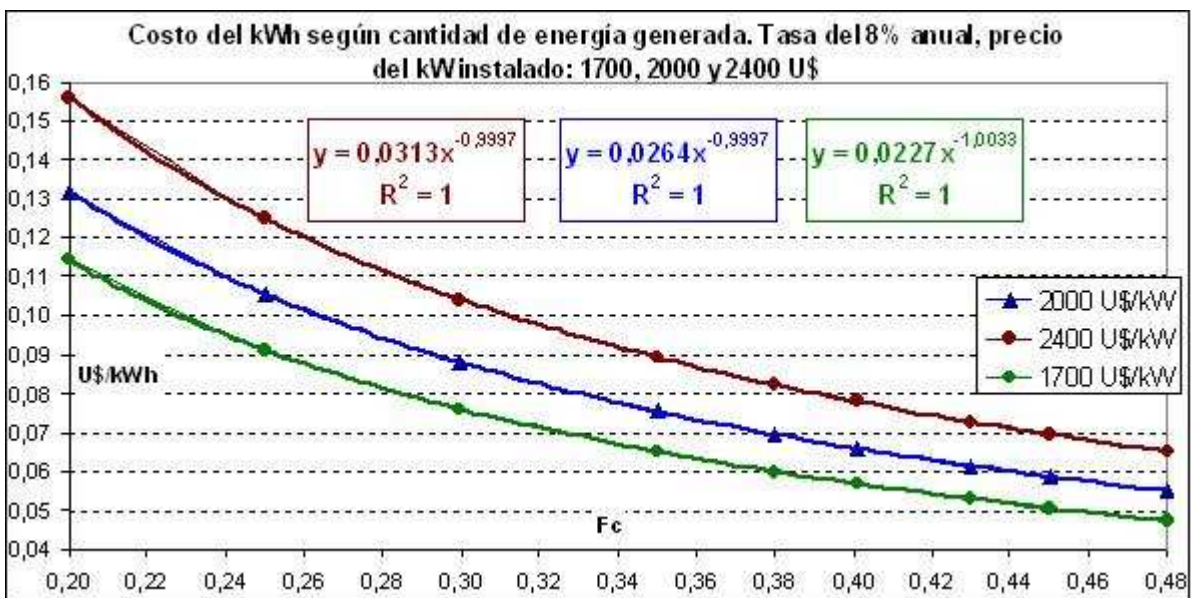


Figura 3: costo del kWh en función de la producción de energía (Factor de Capacidad), para una tasa de interés del préstamo del 8% anual.

Entonces, para una tasa del 4% anual y precio de los molinos de:

- 2400 US/kW instalado, la expresión para obtener el costo del kWh es:

$$\text{Costo [US/kWh]} = 0,0248 * Fc^{-0,9994} \quad (4)$$

- 2000 US/kW instalado, la expresión para obtener el costo del kWh es:

$$\text{Costo [US/kWh]} = 0,021 * Fc^{-0,9995} \quad (5)$$

- 1700 US/kW instalado, la expresión para obtener el costo del kWh es:

$$\text{Costo [US/kWh]} = 0,0182 * Fc^{-0,9997} \quad (6)$$

Mientras que para una tasa del 8% anual y precio de los molinos de:

- 2400 US\$/kW instalado, la expresión para obtener el costo del kWh es:

$$\text{Costo [US$/kWh]} = 0,0313 * Fc^{-0,9997} \quad (7)$$

- 2000 US\$/kW instalado, la expresión para obtener el costo del kWh es:

$$\text{Costo [US$/kWh]} = 0,0264 * Fc^{-0,9997} \quad (8)$$

- 1700 US\$/kW instalado, la expresión para obtener el costo del kWh es:

$$\text{Costo [US$/kWh]} = 0,0227 * Fc^{-1,0033} \quad (9)$$

Se debe tener en cuenta que en Argentina, el Mercado Eléctrico Mayorista (MEM) paga un determinado precio (\$/kWh) a las centrales eléctricas que garantizan “potencia firme”, es decir suministro eléctrico que responde rápidamente a los picos de demanda (centrales térmicas, hidráulicas). La central eólica no tiene esta característica, por lo que recibirá un 15 a 20% menos que el precio de la potencia firme.

Sin embargo, la producción eólica puede atenuar o evitar esta inconveniencia si produce en forma mixta con una central hidráulica (que de esta manera cumpliría con los requisitos para que la energía generada esté contenida en la Resolución 1281/06 del Programa Energía Plus<sup>3</sup>, de la Secretaría de Energía), de manera tal que el parque eólico produzca a pleno en momentos de buen viento, respondiendo la central hidráulica a los picos de demanda, además la central hidráulica debe producir a pleno cuando el viento disminuye.

## 6. RESULTADOS

El costo de producción del kWh, según la tasa de interés del préstamo (4% y 8%), y según precio del kW instalado, para granjas eólicas con valores del Factor de Capacidad propios de la Patagonia, esto es superior a 0.4 (0.48), se muestra en Tabla 1.

US/ kW instalado	Interés anual del préstamo	Costo de la energía US/kWh
2000	4 %	0.052 a 0.043
	8 %	0.066 a 0.055
2400	4 %	0.062 a 0.052
	8 %	0.079 a 0.065

*Tabla 1: costo de la energía producida según precio del kW instalado y tasa de interés de devolución del préstamo.*

El MEM en nuestro país paga entre 0.023 y 0.03 US\$/kWh. Según estos números, el costo de la generación eléctrica mediante granjas eólicas, es del orden del doble de lo que paga el mercado.

Si se toman en cuenta los ingresos por:

- Incentivos por leyes eólicas nacional y provincial, suman 0.0063 US\$/kWh.

<sup>3</sup> Energía Plus: establece que la demanda base es la del año 2005; el precio de la energía de la demanda en exceso estará “en función a la aprobación de sus costos, y el margen de utilidad definido por la SECRETARIA DE ENERGIA”, Anexo I, 5.

- Certificados de no emisión de CO<sub>2</sub>, a 20 US\$/TnCO<sub>2</sub> y un caso base de central a gas, GHG de 0.000452 TnCO<sub>2</sub>/kWh, son 0.00904 US\$/kWh.

Entre ambos hacen un total de 0.01535 US\$/kWh. Aún con estas consideraciones, se ve que no llega a ser rentable la producción de energía eléctrica mediante granjas eólicas.

Para que este escenario cambie, es necesario aumentar el incentivo que otorga la legislación, a menos que el precio de la energía generada en forma convencional aumente, lo que ocurrirá si se quitan las subvenciones a los combustibles de origen fósil, que utilizan las centrales térmicas. Es decir, si se sincera el precio de la energía.

En particular, el precio mínimo para justificar el desarrollo de un proyecto eólico, a mediados del año 2008 se estima en unos 0.070 US\$/kWh. Hay voluntad estatal de recorrer ese camino: además de la ley Nacional 26190 y la ley que puede tener cada provincia, está en vigencia la Resolución 220/07 de la Secretaría de Energía, que marca la tendencia de permitir una mejora en el precio de la generación mediante fuentes renovables.

## 7. CONCLUSIONES

Se observa que la cantidad que falta para llegar al piso de remuneración, es del orden de entre 0.007 y 0.015 US\$/kWh. Esto es de un 30% a un 65% del precio que paga por la energía el MEM.

Es una diferencia importante, pero una política de estado adecuada (más en estos momentos en que el país está rozando la crisis energética), haría posible el desarrollo de parques eólicos en la región patagónica.

Técnicamente, en nuestro país, la región Este de la Patagonia tiene un gran potencial para el aprovechamiento eólico, debido a sus características de viento, a que por su topografía no se trata de un terreno complejo, y a la cercanía de rutas y una línea de 500 kV y otras proyectadas.

El potencial eólico en la zona mencionada existe, aunque es necesario tomar ciertas medidas de orden político y económico para que sea factible económicamente su aprovechamiento. Hay voluntad estatal de recorrer ese camino: como se mencionó antes, además de la leyes de incentivos a la generación por fuentes renovables (Ley Nacional 26190 y la ley que pueda tener cada provincia), están en vigencia las Resoluciones 220/07 y 1281/06 (esta última del Programa Energía Plus) de la Secretaría de Energía, que marca la tendencia de permitir una mejora en el precio de la generación mediante fuentes renovables.

En base a estas consideraciones, esperamos que el gran desarrollo de granjas eólicas pronto sea una realidad.

## REFERENCIAS

[1] Mapa Eólico Nacional: CREE (Centro Regional de Energía Eólica) y Ministerio de Planificación Federal, Inversión y Servicios Públicos. 2007.

[2] De Juana J., Santos F., Crespo A., Herrero M., de Francisco A., Fernández J. Energías Renovables para el Desarrollo. Thomson-Paraninfo. España, 2003.

[3] International Standard. IEC 61400 – 1; IEC 61400 – 21. International Electrotechnical Commission. Web site: <http://www.iec.ch>

## COSTO DE LA ENERGÍA GENERADA POR GRANJAS EÓLICAS EN ARGENTINA.

**ABSTRACT:** Expressions to calculate the cost of the kWh generated from wind farm in Argentina are proposed. They are in related to the Capacity Factor, for different prices of the installed kW; and also two interest rates for the loan needed for the construction of the farm, applicable to any region in the country. An expression for estimated the capacity factor, in function of nominal velocity of the wind turbine promedio and the observated average velocity of the site.

**Keywords:** windfarm; price of wind energy, wind turbine, wind power.