

## ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL EÓLICO Y COSTOS DE PRODUCCIÓN DE ENERGÍA EÓLICA EN LA COSTA DE VALDIVIA, SUR DE CHILE

### ESTIMATION OF THE WIND POTENTIAL AND COSTS OF WIND ENERGY IN THE COASTAL RANGE OF VALDIVIA, SOUTHERN CHILE

Ana Almonacid B.<sup>1</sup>, Laura Nahuelhual M.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Economía Agraria, Universidad Austral de Chile, Casilla # 567, Valdivia, Chile.

<sup>2</sup>Fundación Centro de los Bosques Nativos FORECOS, Pedro Aguirre Cerda # 2150, Valdivia, Chile.

#### ABSTRACT

**Key words:** conventional energy, renewable energies, rural economies, wind energy, energy consumption.

Conventional energy is based on the use of non-renewable resources whose transformation has negative side effects. On the contrary, renewable energies, including wind energy, offer an opportunity for diversification and better sustainability. In Chile, the support of renewable sources of energy requires among other things, generating the appropriate technical and economic information regarding their use. The goal of this study was to evaluate the technical feasibility of producing wind energy and to estimate the associated costs for a coastal area of Valdivia (39°48' S and 73°14' W) in Los Ríos Region. The data to estimate the wind energy potential came from the Laboratory of Aquatic Resources of Universidad Austral de Chile. Energy consumption data came from the rural school located in the study area was used. Whereas the wind energy potential was showed to exist in the area, under the circumstances and assumptions of the study, the consumption of energy during some months of the year was higher than the amount that could be supplied. With the available technology and its current cost, energy storage is not feasible restricting the use of the energy generated. The cost of wind energy was estimated at \$257/kWh compared to the cost of conventional energy

#### RESUMEN

**Palabras clave:** energía convencional, energías renovables, economías rurales, energía eólica, consumo de energía.

La energía convencional se basa en el uso de recursos energéticos agotables cuya transformación ha significado externalidades negativas crecientes. Por el contrario, las energías renovables, entre las que se encuentra la energía eólica, se presentan como una alternativa de diversificación y mayor sustentabilidad. En Chile, el fomento de fuentes renovables requiere entre otras cosas generar la información necesaria, técnica y económica, en torno al uso de dichas energías. Este estudio tuvo por objetivo evaluar la factibilidad técnica de generar energía y el costo asociado a su generación, en el sector de Curiñanco (39°48' de latitud Sur y 73°14' de longitud Oeste) en la provincia de Valdivia, Región de los Ríos. Los datos utilizados fueron provistos por el Laboratorio de Recursos Acuáticos Calfuco de la Facultad de Ciencias de la Universidad Austral de Chile. Los datos de consumo tomaron como referencia la escuela del sector de Curiñanco. Si bien el potencial eólico existe, para el caso evaluado se determinó que los consumos de energía en algunos meses son superiores a la oferta de energía. Con la tecnología disponible y los costos de la misma, no es posible almacenarla lo que limita el uso de la energía producida. El costo de la energía eólica se

used at the school which was \$136/kWh. These results suggest that in this case substitution of conventional energy with wind energy is not technically or economically feasible.

calculó en \$257/kWh comparado con el costo de la energía convencional usada en la escuela que fue de \$136/kWh. Estos resultados sugieren que bajo el escenario del caso en estudio no es factible técnica o económicamente sustituir la energía convencional por la eólica.

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad la crisis energética es una preocupación mundial. Los recursos utilizados como fuentes de energía, tales como petróleo, carbón y gas natural (combustibles fósiles), son recursos no renovables y se estima que las reservas existentes no serán suficientes para cubrir las necesidades de una población mundial creciente (Ortega, 2006). Por otra parte, la combustión de energías fósiles es una de las principales fuentes de emisión de gases invernadero (Nguyen, 2006).

Las fuentes energéticas que provienen de recursos renovables se presentan como una alternativa y posible solución a esta problemática. Las llamadas Energías Renovables No Convencionales (ERNC) permiten incorporar a la matriz de generación eléctrica fuentes de energía primaria autóctonas aplicadas como nuevas tecnologías de generación (Comisión Nacional de Energía (CNE), 2008).

Si bien se reconoce que las ERNC tienen un importante potencial de desarrollo en Chile, en la actualidad su contribución a la matriz eléctrica nacional alcanza sólo un 2,4% (CNE, 2009). Dentro de la ERNC, la energía eólica contribuyó en el año 2008 con un 0,15%. La diversificación hacia fuentes alternativas de energía es particularmente relevante considerando que Chile es un país extremadamente dependiente en términos energéticos, importando actualmente cerca del 70% de sus requerimientos (CNE, 2009).

Las ERNC y, particularmente la energía eólica, son relevantes el caso de sectores rurales ya que es en estos lugares donde se encuentran los mejores nichos para su aprovechamiento. Además es importante considerar que los sectores rurales y de bajos ingresos deben destinar porcentajes significativos de su presupuesto familiar a la adquisición de energía,

por lo que en algunos casos la sustitución de energía eléctrica en dichos sectores por ERNC se presenta como una opción eficiente, además de contribuir a la independencia energética. (Inforesources, 2006).

Entre las principales ventajas de emplazamientos eólicos a pequeña escala en sectores rurales se encuentran: posibilidad de suministrar electricidad en lugares aislados y alejados de la red eléctrica; posibilidad de sustituir o complementar la energía obtenida de la red eléctrica; generación de energía junto a los puntos de consumo; accesibilidad para cualquier tipo de usuario debido a su sencilla instalación; y generación de un mayor bienestar y equidad social en comunidades rurales contribuyendo al desarrollo debido a la posibilidad de acceder a un mayor grado de tecnología (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), 2006; Inforesources, 2006; Nguyen, 2006).

Las principales barreras para una mayor utilización de ERNC en Chile son múltiples. Entre ellas están: costo de generación superior a las energías convencionales, falta de recursos humanos especializados y de conocimiento de esta tecnología, desconocimiento del potencial y el uso de las ERNC, inexistencia de estudios exhaustivos que cuantifiquen el potencial disponible, y la no inclusión de externalidades negativas asociadas al uso de energías convencionales (Ortega, 2006).

Este análisis pretende contribuir a disminuir tales barreras a través de un estudio de caso detallado en la costa de la comuna de Valdivia.

El objetivo general de esta investigación fue evaluar la factibilidad técnica y costo de generación de energía eólica a pequeña escala en el sector de Curiñanco, comuna de Valdivia como energía alternativa. Se analiza el caso de la escuela rural de Curiñanco G-24 como usuario potencial de este recurso.

## MATERIAL Y MÉTODO

El estudio se realizó en la localidad de Curiñanco en la zona costera de la provincia de Valdivia, XIV Región de los Ríos. Curiñanco está separado de Valdivia por 36 km de ruta en dirección noroeste y las coordenadas geográficas de su ubicación son 39° 48' de latitud Sur y 73°14' de longitud Oeste (Comité Nacional Pro Defensa de la Fauna y Flora (CODEFF), 2003).

La escuela fue seleccionada para el estudio debido a que es una entidad que representa toda la comunidad de Curiñanco, además logra fortalecer el aprendizaje de los niños sobre las energías renovables y sus ventajas en favor del medio ambiente.

El estudio se dividió en dos ámbitos que fueron el estudio técnico y la estimación del costo de producción de la energía a través de un sistema eólico versus el sistema actual de abastecimiento.

**Estudio técnico.** Este estudio tuvo por objetivo determinar el potencial eólico del sector de Curiñanco. Se reunieron datos de temperatura, dirección y velocidad de viento los cuales fueron obtenidos del Laboratorio de Recursos Acuáticos Calfuco perteneciente a la Facultad de Ciencias de la Universidad Austral de Chile, para un período de un año, desde el 21 de Diciembre de 2006 al 20 de Diciembre de 2007.

A partir de estos antecedentes se calcularon los siguientes parámetros: velocidad media diaria del viento, potencial eólico y oferta de energía generada en el sector de Curiñanco.

La velocidad media diaria del viento se calculó para determinar a qué hora del día ocurren las mayores y menores velocidades de viento, determinando a qué hora del día se obtiene la mayor y menor cantidad de energía. La velocidad del viento (m/s) se promedió en función de las horas del día en forma anual. Se determinó además la frecuencia de distribución de los datos de velocidad anual a través del modelo de probabilidad Weibull. La función de densidad de probabilidad  $f(v)$  correspondiente a la ley de Weibull (1) es del tipo de dos parámetros ( $c$ ,  $k$ ) y está dada por la expresión:

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

Donde:

$v$ : Velocidad del viento (m/s)

$f(v)$ : Función de densidad de probabilidad de Weibull

$c$ : Factor de escala (m/s), valor que suele ser próximo a la velocidad media

$k$ : Factor de forma que caracteriza la asimetría de la función de probabilidad

Luego de establecer los parámetros  $c$  y  $k$  que describen la función Weibull y por lo tanto el comportamiento del viento en términos de su velocidad, se determinó el potencial eólico de la zona en estudio a través del cálculo de la potencia eólica disponible multiplicada por la cantidad de horas comprendidas en el estudio. La potencia eólica disponible es la máxima potencia que es posible extraer al viento si se pudiese convertir toda su energía cinética en energía útil (Villarrubia, 2004), por lo tanto el potencial eólico informa sobre la cantidad de energía presente en un determinado lugar lo que depende directamente de la velocidad de viento existente.

Una vez establecida la oferta de energía eólica que presentó el sector, ésta se contrastó con el consumo de electricidad de la escuela rural de Curiñanco, con el objeto de determinar los niveles de exceso y déficit de energía a lo largo del año en estudio.

**Estimación del costo de producción de la energía.** Este cálculo se basó en la comparación entre el costo de generación de la unidad energética o kilowatt-hora (kWh) a través de un sistema eólico y a través de la energía eléctrica convencional existente en el lugar. La generación de energía a partir de distintas fuentes está asociada a un costo medioambiental y social que varía según el impacto ocasionado, el cual fue considerado en el cálculo de ambos tipos de generación energética.

Para determinar el costo promedio de la unidad energética generada por energía eólica se anualizó el pago de los costos de inversión para sumarlos a los costos de mantención durante el período de evaluación del estudio, que luego fue dividido por la cantidad de energía

anual generada a través de energía eólica. La anualización de costos se obtuvo mediante la siguiente fórmula:

$$A = C_0 \times \left( \frac{i \times (1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right)$$

Donde:

*i*: Tasa de interés por período

*n*: Número de períodos

*C<sub>0</sub>*: Cantidad de dinero presente o en el período cero

*I*: Anualidad o renta anual que ocurre al final de cada período y que se realiza por *n* períodos.

Para el presente estudio la tasa de interés fue de 4,24% la cual se calculó según la variación porcentual promedio del costo por kWh en la escuela de Curiñanco durante el año 2007.

El cálculo del costo promedio de la unidad energética bajo el sistema convencional se realizó de forma diferente, ya que se dividió el costo total de producir electricidad en la escuela por la cantidad de kWh consumidos.

## PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Luego de analizar la situación para cada estación del año en base al estudio de la velocidad media diaria se estableció que la producción de energía aumentó de menor a mayor grado en

el siguiente orden: verano, primavera, otoño e invierno. De esta forma en las estaciones de invierno y otoño se registraron las mayores velocidades de viento promedio, generándose a su vez las mayores cantidades de energía.

Además de conocer el nivel de energía generada para cada estación del año, se determinó la frecuencia de distribución de los datos de velocidad anual a través del modelo Weibull. Cuando se trata de caracterizar al viento la densidad de probabilidad Weibull es el método más utilizado y aceptado en la literatura especializada sobre energía eólica, ya que se ajusta con mayor exactitud a las características del viento (Carta *et al.*, 2009). En la Figura 1 que ilustra la distribución Weibull se observa que las velocidades que se presentan con mayor frecuencia se encuentran en el rango de 4 a 6 m s<sup>-1</sup>. Villarrubia (2004) indica que los lugares ideales para la instalación de los generadores de turbinas son aquellos en los que el promedio anual de la velocidad del viento es a lo menos de 5,8 m s<sup>-1</sup>. Por el contrario, Moreno *et al.*, (2006), afirman que en el caso de Chile para que en la actualidad los medios de generación eólica compitan abiertamente con los sistemas convencionales de generación se requieren ubicaciones con velocidad de viento excepcionales de alrededor de 8 m s<sup>-1</sup> para la construcción de parques eólicos. Sin embargo, cabe destacar que el nivel de competitividad de instalaciones eólicas para sistemas de autoabastecimiento, como es el caso del

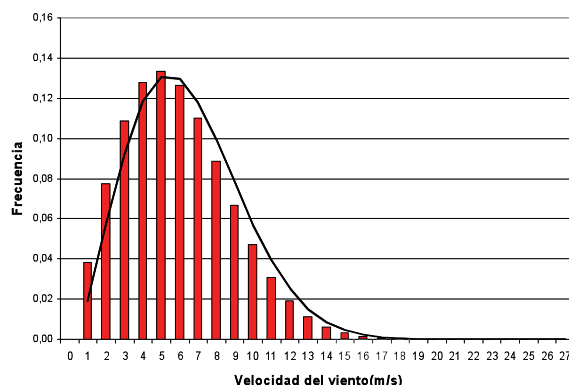


Figura 1. Distribución de frecuencias determinadas a través del modelo estadístico Weibull en el sector de Curiñanco.

Figure 2. Distribution of the frequency of wind velocity determined through the Weibull statistical model in Curiñanco area.

presente estudio, se analiza desde el punto de vista técnico y/o económico como sustitución de la energía actualmente comprada a la red, más que desde el punto de vista de convertirse en un proyecto de gran escala.

Hay que tener en cuenta sin embargo que los resultados de potencial eólico son sensibles a la altura de emplazamiento de la turbina eólica y a la turbina seleccionada, ya que esto influye directamente en la velocidad de viento aprovechada, y por lo tanto en la energía generada (IDAE, 2006).

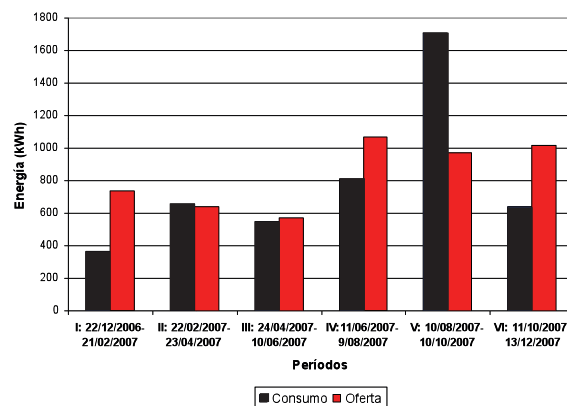
Con respecto al potencial eólico o la energía total disponible en el sector de Curiñanco, se calculó que en una superficie de 1 m<sup>2</sup> la energía generada fue de 1.670 kWh, lo que indica que si se pudiese aprovechar íntegramente la energía que contiene el viento, se podría obtener 1.670 kWh por cada metro cuadrado de superficie de exposición del sistema eólico de captación anualmente. Esta cantidad de energía generada es equivalente a tener encendidas 2 ampollas incandescentes de 100 W durante un año. Sin embargo, la totalidad de dicha energía no puede ser utilizada ya que dependerá del porcentaje de extracción de energía que realice la turbina seleccionada.

La turbina seleccionada en el estudio fue Skystream 3.7, la cual se adapta a sitios que ya poseen energía eléctrica ya que va conectada al medidor de energía que controla y determina que si en un momento dado hay disponibilidad de energía eólica se ocupará aquella, de lo

contrario se hará uso de la energía eléctrica convencional suministrada por la red eléctrica, acomodándose de forma eficiente a la escuela de Curiñanco. La turbina presenta un área de barrido (área captada por las aspas de la turbina) de 10,87 m<sup>2</sup>, a su vez el estudio contempla que la turbina se emplazará a 40 m de altura sobre el nivel del mar.

A través de las cuentas de energía eléctrica se calculó que el consumo de energía de la escuela durante el año 2007 resultó ser de 4.734 kWh. La escuela de Curiñanco es un establecimiento de enseñanza básica que registró una cantidad de 48 alumnos inscritos al 2008 y una superficie de 5.300 m<sup>2</sup>. Cuenta además con un internado que alberga a sus alumnos de domingo a viernes, sin embargo el análisis de consumo no considera al internado de la escuela. Los puntos de consumo de electricidad están representados básicamente por iluminación (ampollas y tubos fluorescentes) y por equipos eléctricos (calefactores, computadores, refrigerador, fotocopiadora, entre otros), distribuidos en sus 5 salas de clases, comedor, sala de profesores, oficina del director, biblioteca y casa habitación de una inspectora, principalmente. El tiempo de funcionamiento de los equipos y de iluminación comprende el período de clases desde las 08:00 de la mañana hasta las 17:00 horas de lunes a viernes desde el mes de marzo a diciembre, y durante el mes de enero el consumo es destinado a los campamentos escolares realizados.

La importancia de determinar los niveles



**Figura 2. Consumo de energía eléctrica de la escuela de Curiñanco versus la oferta de energía generada, año 2007.**

**Figure 2. Consumption of electrical energy at Curiñanco school compared to energy supply in 2007.**

de oferta y consumo de energía se centran en establecer los períodos de déficit de energía y los períodos de excedentes de energía, observados en la Figura 2. Los períodos de déficit de energía en los cuales se utiliza energía de la red corresponden a los períodos II y V que se totalizó en 757 kWh anuales. Los demás períodos fueron cubiertos en su totalidad por energía eólica correspondiente a los períodos I, III, IV y VI que utilizan 3.977 kWh anuales.

El exceso de energía estimado en el estudio fue de 1.151 kWh año<sup>-1</sup>, el cual no es posible almacenar en baterías ya que se necesitaría una enorme cantidad de ellas, siendo técnica y económicamente inviable. Una alternativa propuesta es utilizar dicha energía en sistemas de bombeo de agua, riego, carga de baterías para la comunidad o en el internado de la escuela.

La sustitución de energía eólica sobre la energía convencional calculada fue de 84% siendo el proyecto inviable dentro del contexto de las variables que determinaron la oferta de energía generada, correspondiendo principalmente a la turbina seleccionada y a la altura de emplazamiento de la turbina, las cuales influyen en la velocidad de viento presente y por ende en la cantidad de energía aprovechada.

Cabe destacar que de igual forma el estudio puede ser aplicado a grupos de viviendas del sector, en cuyo caso sería necesario conocer la demanda de energía de una vivienda tipo de Curiñanco contrastando dicho consumo de energía con la oferta generada, para así poder implementar la tecnología en los domicilios.

#### **Cálculo del costo de producción de energía.**

El período de evaluación del estudio fue de 15 años, determinado por la cantidad de años o vida útil del aerogenerador seleccionado. Entre los principales componentes de inversión destacan la turbina eólica, torre de emplazamiento, fundación e instalación, transporte, cables eléctricos que unen la turbina con la escuela y mano de obra. La mantención se realiza de forma anual y tiene un costo de \$100.000 aproximadamente. Los costos determinantes en la utilización de energía eólica son la turbina y la torre de emplazamiento, ya que en conjunto representan el 67% del costo inicial.

El costo de producción de 1 kWh a través del sistema eólico fue calculado en \$255/kWh, a lo

cual se sumó un costo externo, que de acuerdo a European Commission (s.f.) es de \$1,95/kWh. Por lo tanto el costo final de 1 kWh obtenido bajo el sistema eólico resultó ser de \$257/kWh.

El costo de producción de energía a través del sistema convencional fue calculado en \$117/kWh, a lo que se sumó un costo externo de 19 \$/kWh. Por ende el costo total de la generación de 1 kWh bajo este sistema fue de \$136/kWh.

Si bien la diferencia de costos entre ambos sistemas es significativa, cabe señalar que la dependencia del sistema energético nacional por recursos externos crea un nivel de incertidumbre y variabilidad que puede llevar a cambios relevantes en el costo de 1 kWh mediante el sistema convencional, circunstancia bajo la cual el proyecto analizado puede llegar a ser económicamente viable.

## **CONCLUSIONES**

- La producción de energía en el sector de Curiñanco por estación del año en orden decreciente resultó de la siguiente forma: invierno, otoño, primavera y verano.

- La energía total extraída por la turbina Skystream 3.7 fue de 5.128 kWh/año, de los cuales solo 3.977 kWh resultaron ser utilizables por la escuela, debido a la imposibilidad de almacenar la energía (1.151 kWh) de los períodos excedentarios.

- La sustitución de energía eólica con respecto al consumo de la escuela fue de 84%, por lo que se concluye que el proyecto eólico resultó ser técnicamente inviable en base a las variables que determinaron la oferta de energía. (altura de emplazamiento, turbina seleccionada)

- Se concluyó que la generación de energía a través de viento bajo las condiciones y supuestos del estudio resultó más costosa y por lo tanto no se justifica emplazar un sistema eólico ya que genera un mayor costo energético.

## **BIBLIOGRAFÍA**

- CARTA, J.; RAMIREZ, P.; VELASQUEZ, S. 2009. A review of wind speed probability distributions used in wind energy analysis: Case studies in the Canary Islands Renewable and Sustainable Energy

- Reviews 13: 933-955.
- COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA (CNE). 2008. Política energética: Nuevos lineamientos. Comisión Nacional de Energía (CNE). Santiago. 176 p.
- COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA (CNE). 2009. (On line). <<http://www.cne.cl>>. (12 ene. 2009).
- COMITÉ NACIONAL PRO DEFENSA DE LA FAUNA y FLORA (CODEFF). 2003. Diversidad biológica del área costera protegida Punta Curiñanco. Programa Biodiversidad. 62 p.
- EUROPEAN COMMISSION. s.f. External costs: Research results on socio-environmental damages due to electricity and transport. Bruselas, Bélgica. 28 p.
- INFORESOURCES. 2006. Energía sostenible: Mitigación de la pobreza rural. Inforesources Focus. (On line). 2: 1-16. <[http://www.inforesources.ch/pdf/focus06\\_2\\_s.pdf](http://www.inforesources.ch/pdf/focus06_2_s.pdf)>. (14 ene. 2008).
- INSTITUTO PARA LA DIVERSIFICACIÓN Y AHORRO DE LA ENERGÍA (IDAE). 2006. Manuales de energías renovables: Energía Eólica. In: Álvarez, C. (ed.). Madrid, España. 174 p.
- MORENO, J.; MOCARQUER, S.; RUDNICK, H. 2006. Generación eólica en Chile: Análisis del entorno y perspectivas de desarrollo. System Ingeniería y Diseños. Santiago, Chile. 10 p.
- NGUYEN, K. 2006. Alternatives to grid extension for rural electrification: Decentralized renewable energy technologies in Vietnam. Energy Policy 35: 2579-2589.
- ORTEGA, M. 2006. Energías Renovables. 2ª ed. España, Thomson y Spain Paraninfo. 328 p.
- VILLARRUBIA, M. 2004. Energía eólica. Barcelona, España. Ceac. 322 p.