

SISTEMA HÍBRIDO EÓLICO – DIESEL: ESTUDIO DE UN CASO PARA LA PUNA

F. Tilca, C. Cadena
INENCO - Instituto UNSa - CONICET
Universidad Nacional de Salta
Av. Bolivia 5150 – (4400) Salta, República Argentina
FAX 54 387 4255489 - e-mail: tilcaf@inenco.net

RESUMEN: Se presentan los cálculos para el dimensionamiento de un sistema híbrido eólico - diesel, con una penetración eólica relativamente baja, en zona de altura a 4000 msnm, en la Puna del Noroeste Argentino. En esta zona de altura los vientos tienen una mayor magnitud que en el resto de la región, pero como la densidad del aire es un 63% del valor a nivel del mar, el rendimiento es menor. Los cálculos se realizan utilizando datos de viento medidos en el lugar, para dos tipos de demanda típicas de minería de la zona: una, relativamente baja del orden de 500 MWh/año, otra, alta, del orden de los 35000 MWh/año. Se realizan mediante dos métodos distintos, para obtener el costo del kWh producido con el aerogenerador, y comparativamente con el producido mediante el sistema diesel.

Palabras clave: energía eólica, sistemas híbridos, Puna, minería.

INTRODUCCION

En la Puna salteña existen desde hace siglos numerosas empresas mineras, que se proveen de energía eléctrica mediante generadores diesel que se emplean en distintos procesos. Algunas utilizan el gas envasado como combustible, que se transporta mediante camiones pesados, desde el Salar de Pocitos, donde existe una planta de compresión. El recorrido es del orden de 100 km. El recurso eólico, en la zona de las provincias de Salta y Jujuy, podría utilizarse con alguna posibilidad de conveniencia económica para producir energía eléctrica, solo en las zonas de altura que es donde hay mayor velocidad de viento. Se intenta dilucidar precisamente esta cuestión.

La zona de estudio del emplazamiento híbrido diesel – eólico es el lugar llamado Salar del Hombre Muerto, en la Puna del NOA, en este caso en la zona límite entre las provincias de Salta y Catamarca, lugar donde existe una empresa minera que extrae mineral de litio. Las coordenadas geográficas son: 24.29° latitud sur, 67.07° longitud oeste, 4000 msnm.

Los cálculos se realizan para satisfacer dos magnitudes de demanda total de energía. En el primer caso, una demanda que puede considerarse baja del orden de los 500 Mwh/año; en el segundo caso, una demanda considerada alta, del orden de los 35000 MWh/año. Ambos casos con régimen de consumo estable. Como se dijo, la generación de energía se produce con equipos que funcionan con diesel o gas licuado. Se pretende incluir en el sistema, la energía eléctrica que pueden producir aerogeneradores del orden de los 30 kW para el primer caso, y de 250 kW para el segundo, analizando la conveniencia de transformar a los sistemas, en híbridos.

Se van a utilizar dos métodos de cálculo: el primero de ellos desarrollado por Bastianón [2], y en segundo lugar un soft de uso libre, el HOMER, desarrollado por el Departamento de Energía de EEUU [3].

PARÁMETROS A UTILIZAR

La potencia disponible del viento es directamente proporcional a la densidad del aire y al cubo de la velocidad del viento. En zona de altura, la densidad del aire disminuye en forma importante respecto a la de nivel del mar; la calculamos utilizando la siguiente expresión [1]:

$$\rho = (353.05/T).e^{-0.034*z/T} \quad (1)$$

donde z es la altitud y T la temperatura, en este caso 4000 m y 277 °K respectivamente, lo que da como resultado una densidad del aire de 0.780 kg/m³, es decir un 63.7% de su valor a nivel del mar.

El viento se ha medido con un equipo NRG de toma de datos de velocidad y dirección colocado en una torre de 12 m, con datalogger Wind Explorer, entregando un dato cada 10 minutos.

La velocidad del viento a la altura del eje de los molinos en cada caso, se calcula con la expresión logarítmica:

$$V(z) = V_1 * [\ln(z/z_0)/\ln(z/z_1)] \quad (2)$$

donde: $V(z)$ es la velocidad a la altura z ,
 V_1 es la velocidad medida a la altura z_1 ,
 z_0 es un parámetro dado por la rugosidad del terreno, en este caso suelo con pasto corto $z_0=0.010$ a 0.040 m.

La velocidad media anual medida es de 5.45 m/s. El cálculo de $V(z)$ se muestra en la Tabla 1.

V_1 [m/s]	z_0 (m)	z_1 [m]	$V_{(30\text{ m})}$ [m/s]	$V_{(40\text{ m})}$ [m/s]
5.45	0.010	12	6.15	6.38
5.45	0.040	12	6.33	6.60

Tabla 1: velocidad de viento a la altura del eje de los aerogeneradores.

Tomaremos la menor de las velocidades calculadas en cada caso:

$$V_{(30\text{ m})} = 6,15 \text{ m/s, y } V_{(40\text{ m})} = 6.38 \text{ m/s.}$$

PRIMER CASO: BAJA DEMANDA DE ENERGÍA

A) MÉTODO DE BASTIANÓN

Aerogenerador

Se puede estimar la energía producida por la turbina, mediante la expresión:

$$E_a = F_c * P_N * 8760 \quad (3)$$

Donde:

- E_a : energía anual producida por la turbina [kWh];
- P_N : potencia nominal de la turbina [kW], y en este caso se elige una de 30 kW;
- 8760 son las horas del año;
- F_c : factor de capacidad, cociente entre la energía realmente generada por la turbina y la que generaría funcionando siempre a su potencia nominal. Se puede estimar F_c según la ref. [2], siendo para esta velocidad de viento $F_c=0.2$.

Previo al cálculo de la energía producida según la expresión (3), se debe tener en cuenta que en este lugar la densidad del aire es un 63.7% del valor al nivel del mar, por lo que introducimos este dato en dicha expresión, con lo que se obtiene que la energía anual producida por la turbina es la indicada en la Tabla 2.

Aerogenerador	F_c	P_N [kW]	$E_a = F_c * P_N * 8760 * 0.637$ [kWh/año]
A	0.2	30	33481

Tabla 2: energía anual producida por la turbina.

Siguiendo este método, el costo final C_f (US\$/kWh) de la energía producida por la turbina de viento se calcula con la expresión:

$$C_f = (C/E_a) * [i / (1 - 1/(1+i)^N)] + OM \quad (4)$$

donde:

- C : capital, en US\$ de la turbina instalada;
- E_a : energía producida por la turbina en kWh/año;
- i : interés anual (si es del 10%, $i=0.10$);
- N : vida útil en años, para turbinas eólicas es 20;
- OM : operación y mantenimiento, para turbinas de viento de 0.010 a 0.014 US\$/kWh generado.

El costo de una turbina instalada de 30 kW de potencia nominal es de 50000 US\$, al que le sumamos un 27% debido a las características del lugar de instalación, por lo que el costo en el sitio es de 63800 US\$. Este será el valor con el que se realiza el cálculo del costo final del kWh, que se muestra en la Tabla 3.

C [US\$]	E_a [kWh/año]	i	N [años]	OM [US\$/kWh]	C_f [US\$/kWh]
63800	33481	0.10	20	0.010	0.234
63800	33481	0.10	20	0.014	0.238

Tabla 3: costo del kWh generado por la turbina.

Se observa de la tabla, que un valor aceptable puede ser de 0.236 US\$/kWh.

Si al capital se lo obtiene de un préstamo, se puede calcular el monto de las cuotas anuales C_A de igual valor en N años con la siguiente expresión:

$$C_A = C * i / (1 - 1/(1+i)^N) \quad (5)$$

El valor obtenido para este caso es $C_A = 7494$ U\$, y será el importe de la cuota fija durante 20 años, a pagar para devolución del préstamo, tomando una tasa de interés del 10% y con un período de amortización de 20 años (N). Si el período de amortización es de 10 años:

$$C_A = 10383 \text{ U\$}.$$

Generador Diesel

El costo final C_f en U\$/kWh generado por el diesel, se calcula con la expresión siguiente, que tiene en cuenta la amortización del costo del capital del equipo en su vida útil, el interés sobre el capital, los valores operación y mantenimiento y el costo del combustible:

$$C_f = (C/(P_D * t)) * [i / (1 - 1/(1+i)^N) + OM] + C_C * P_C / P_D \quad (6)$$

donde:

- C: capital en U\$;
- P_D : potencia del equipo diesel en kW;
- t: tiempo en hs/año de funcionamiento;
- i: tasa de interés anual;
- N: vida útil en años;
- OM: operación y mantenimiento, que se estima en un 2% del capital;
- C_C : consumo de combustible en litros/hora;
- P_C : precio del combustible en U\$/litro;
- P_D : potencia entregada por el generador en kW.

Vamos a considerar un generador diesel de 65 kW, con un costo en su sitio de 30000 U\$. El costo del combustible es de 0.527 U\$/litro, y le sumamos un 20% puesto en la Puna. Con estos datos:

$$P_C = 0.6324 \text{ U$/litro}.$$

La vida útil es de 4 años, y en este período se calcula su amortización; además el consumo de combustible del generador es $C_C = 20$ litros/hora. Se supone funcionando al generador un 80% de las horas del año. El generador aporta unos 455000 kWh/año. La Tabla 4 muestra el costo del kWh.

C [U\$]	P_D [kW]	t [hs/año]	i	N [años]	OM	C_C [litros/hora]	P_C [U\$/litro]	C_f [U\$/kWh]
30000	65	7008	0.10	4	0.02	20	0.6324	0.217

Tabla 4: costo del kWh generado por el generador diesel.

Le penetración eólica es de: $33481/455000 = 7.3\%$.

Es decir para una demanda del orden de 490000 kWh, un 92.8% la provee el diesel, y el resto el eólico. El precio del kWh diesel es un 9% mas barato que el eólico.

B) CÁLCULO CON EL PROGRAMA HOMER

Este es un programa de uso libre y puede ser obtenido de www.nrel.gov/homer. Permite realizar el diseño de sistemas híbridos de cualquier tipo para producción de energía eléctrica, entregando la combinación más conveniente desde el punto de vista económico para satisfacer la demanda.

Hemos considerado un sistema diesel eólico, con características similares al caso anterior:

- Precios del generador diesel (de 65 kW) y del combustible¹;
- Precio de la turbina eólica de 30 kW;
- Datos de viento;
- Altura sobre el nivel del mar;
- Demanda (del orden de 460000 kWh/año).

En la parte superior de la Figura 1 se observa el tipo de sistema híbrido, y en la parte central otras características del sistema. En esta figura se observa también que:

- El costo de la energía es de 0.211 U\$/kWh.
- La configuración más conveniente, es de un generador diesel y dos turbinas eólicas.

En la Figura 2 se observa la producción de las dos turbinas eólicas (116713 kWh), y del diesel (361578 kWh), siendo la producción total de 478290 kWh, y la producción de uno y otro equipo mes a mes.

¹

El costo del gasoil es puesto en el sitio, incluye el flete desde Salta.

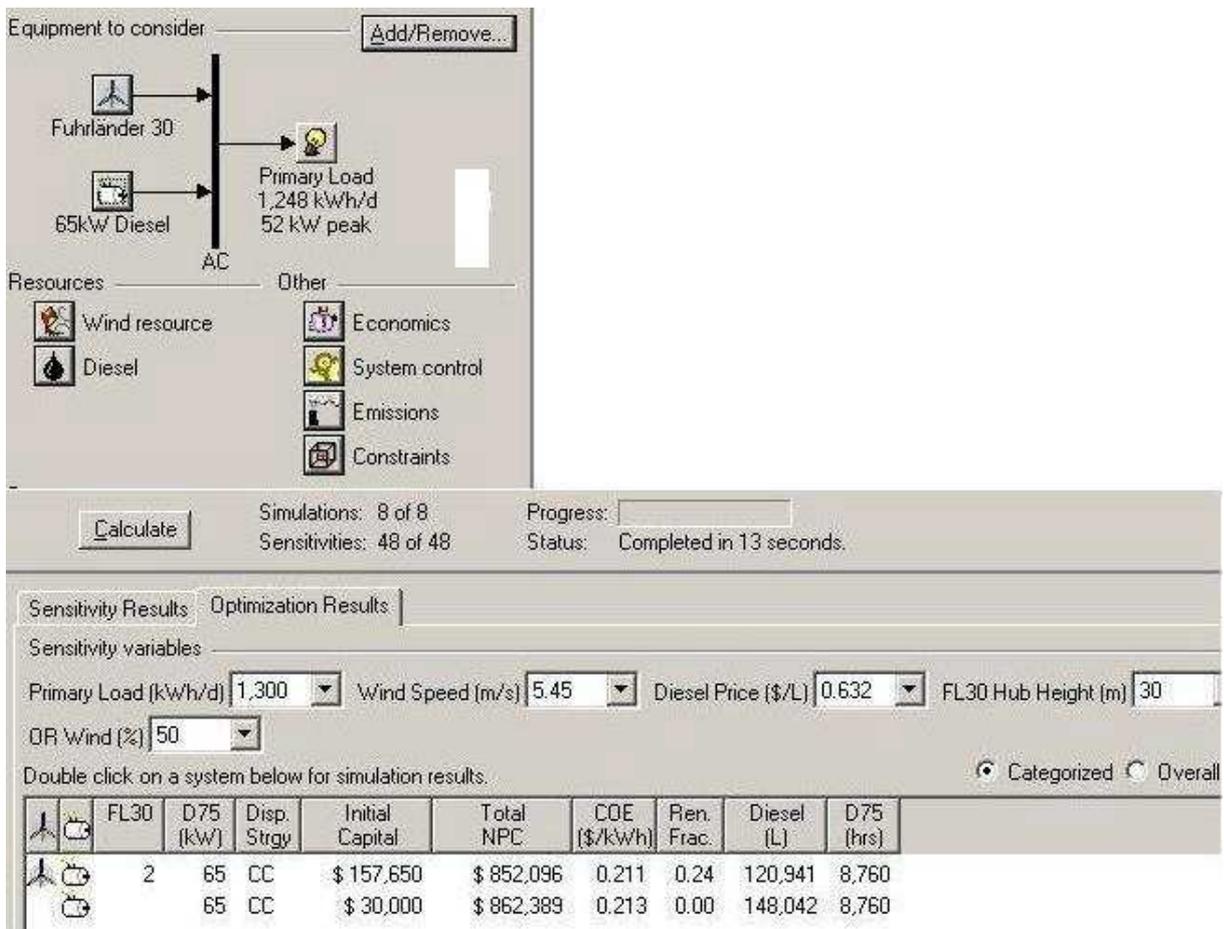


Figura 1: ventana principal del programa.

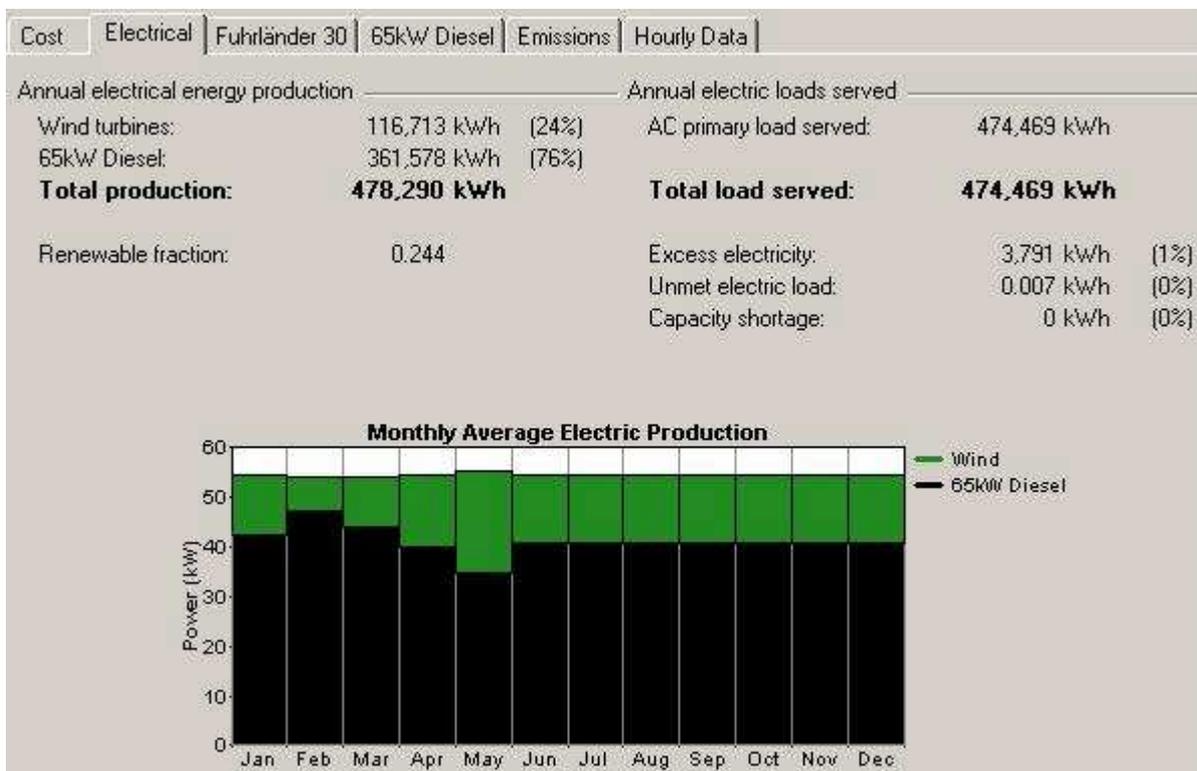


Figura 2: producción de la turbina y del diesel, según Homer Pro.

Este programa, permite también obtener las emisiones de gases nocivos para la atmósfera, producidas por el uso del equipo diesel. Si se calculan las emisiones producidas por el sistema híbrido, y luego las emisiones producidas por un sistema solamente diesel (para la misma producción de energía anual), haciendo la diferencia entre ambas cantidades se obtienen las toneladas de gases nocivos no emitidos debido a la inclusión de la turbina eólica. Esto permitiría el cobro de los Bonos Verdes por la producción de energía limpia, estipulado por el Protocolo de Kyoto. Cuando la magnitud de la no emisión lo meritúa, los ingresos por bonos verdes pueden tenerse en cuenta.

En las Figuras 3 y 4, a efectos de realizar la comparación de emisiones nocivas para la atmósfera, se muestran las emisiones debido al uso del equipo diesel. En la Figura 3 con el híbrido diesel eólico, y en la Figura 4 si toda la demanda fuese satisfecha solo con el equipo diesel (en cuyo caso el precio de la energía es de 0.213 US\$/kWh).

Pollutant	Emissions
Carbon dioxide:	318,477 kg/yr
Carbon monoxide:	786 kg/yr
Unburned hydrocarbons:	87.1 kg/yr
Particulate matter:	59.3 kg/yr
Sulfur dioxide:	640 kg/yr
Nitrogen oxides:	7,015 kg/yr

Figura 3: emisiones del equipo híbrido diesel eólico.

Pollutant	Emissions
Carbon dioxide:	389,843 kg/yr
Carbon monoxide:	962 kg/yr
Unburned hydrocarbons:	107 kg/yr
Particulate matter:	72.5 kg/yr
Sulfur dioxide:	783 kg/yr
Nitrogen oxides:	8,586 kg/yr

Figura 4: emisiones si toda la demanda fuese satisfecha solo con equipo diesel.

C) RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE ESTE CASO

Mediante el primer método, se ha obtenido el siguiente precio para la producción de la energía eléctrica: 0.236 US\$/kWh con el aerogenerador, y 0.217 US\$/kWh con el diesel. A “prima fascie”, no resulta entonces conveniente incluir la turbina eólica.

Con el programa Homer se obtiene un costo de 0.211 US\$/kWh para el sistema híbrido eólico diesel, y 0.213 US\$/kWh para el sistema solo diesel, siendo ésta es una diferencia muy pequeña.

SEGUNDO CASO: DEMANDA ALTA DE ENERGÍA

Se realizan los cálculos de manera similar al primer caso.

A) MÉTODO DE BASTIANÓN

Aerogenerador

Se utilizará un aerogenerador de 250 kW de potencia nominal, de 30 m de diámetro de palas, generador asincrónico, con torre de 40 m de altura. La curva de potencia se muestra en la figura 5.



Figura 5: curva de potencia del aerogenerador WES 30/250.

La Tabla 5 muestra el costo final del kWh según este método. Se utiliza un factor de capacidad de 0.15 para estimar la producción anual de energía, debido a las características del viento y de la turbina.

C [US\$]	Ea [kWh/año]	i	N [años]	OM [US\$/kWh]	C _f [US\$/kWh]
330000	209000	0.10	20	0.010	0.195
330000	209000	0.10	20	0.014	0.199

Tabla 5: costo del kWh generado por el aerogenerador.

Dadas las precauciones asumidas, se adopta el valor de 0.195 \$/kWh.

Equipo diesel

Se sabe, por datos de la empresa minera, que para satisfacer la demanda se cuenta con 5 generadores diesel de 1 MW de potencia cada uno, funcionando el 80% de las horas del año a plena carga. A nuestros cálculos los realizamos considerando uno de los generadores, ya que el costo final del kWh, que se calcula con la expresión (6) y se muestra en la Tabla 6, será el mismo.

C [US\$]	P _D [kW]	t [hs/año]	i	N [años]	OM	C _c [litros/hora]	P _c [US\$/litro]	C _f [US\$/kWh]
136000	1000	7008	0.10	4	0.02	231	0.6324	0.153

Tabla 6: costo del kWh generado por el diesel.

B) CÁLCULO CON EL PROGRAMA HOMER

Manteniendo los costos de los componentes iguales al método de los dos párrafos anteriores, es decir: aerogenerador WES 30/250 con costo de 330000 US\$, los generadores diesel de 1 MW con costo de 136000 US\$, tasa de interés anual del 10%, precio del diesel de 0.6324 US\$/litro, se obtiene que el costo de la energía es de 0.189 US\$/kWh, no incluyendo ningún aerogenerador en el caso más conveniente, como se muestra en la Figura 6.

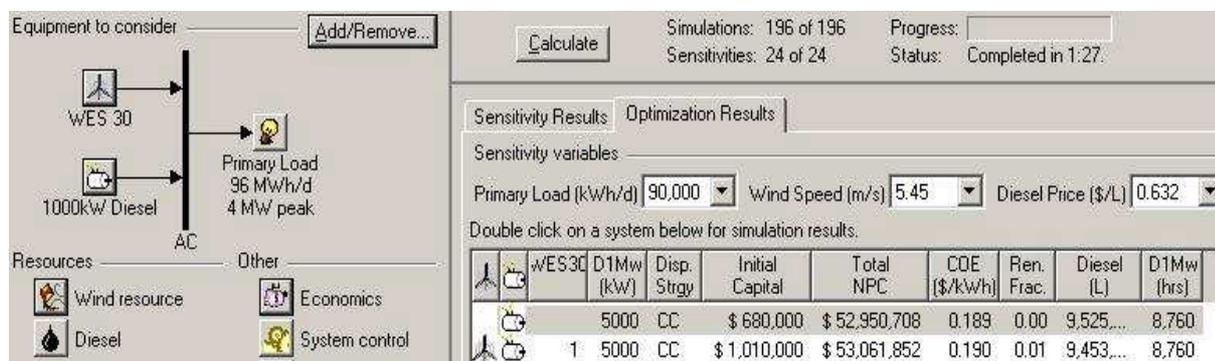


Figura 6: ventana principal del programa donde se aprecia la configuración más conveniente.

CONCLUSIONES

Haciendo un análisis netamente económico, podemos decir lo siguiente:

Para el primer caso de demanda de energía considerada, con el primer método se infiere que es más conveniente la utilización del equipo diesel, sin incluir aerogenerador; con el programa Homer se obtiene una diferencia muy pequeña como para incidir en la decisión de colocar una turbina eólica transformando el sistema en híbrido, por lo que se confirma la conclusión anterior.

En el segundo caso, cuando la demanda de energía es mucho mayor, y por lo tanto el aerogenerador también debe serlo para tener incidencia en la producción de energía, se observa que también es conveniente el equipo diesel en lugar del híbrido.

Cabe señalar que un factor importante en la reducción de producción del aerogenerador, es la baja densidad del aire a los 4000 metros de altitud; esta característica del lugar provoca que la producción del molino sea un 36% menor que si la altitud fuese a nivel del mar.

No obstante las conclusiones anteriores, para tomar decisiones sobre el tipo de sistema de provisión de energía, se deben tener en cuenta algunos factores como:

La disponibilidad del combustible diesel o gas envasado, que en el marco de la situación energética de nuestro país, en períodos críticos del consumo, pueden no estar disponibles. Por ejemplo, en particular para el mes de agosto de 2007, la venta de diesel al por mayor estuvo restringida en Salta.

El aumento sostenido del precio del diesel y del gas envasado, lo que en pocos años puede hacer cambiar significativamente el costo de la energía utilizando estos combustibles.

BIBLIOGRAFÍA.

- [1] Manual de WINDPRO versión 2.4, 2ª edición, septiembre de 2004.
- [2] Ricardo A. Bastianon. Energía del viento y diseño de turbinas eólicas. Tiempo de Cultura Ediciones. Buenos Aires. ISBN 950-9135-29-1.
- [3] www.nrel.gov/homer.

ABSTRACT

The calculations for the design of an hybrid system eolic - diesel, they are presented in this work, with a relatively low eolic penetration, in area of height to 4000 meter on the level of the sea, in the Puna of the Argentinean Northwest. In this area, the winds have a bigger magnitude that in the rest of the region, but as the density of the air it is 63% of the value to level of the sea, the yield is smaller. The calculations were made using data of wind measured in the place, for typical two demand types of mining at the area: a relatively low of the order of 500 MWh/year, other, high, of the order of the 35000 MWh/year. It is made with two different methods, to obtain the cost of the kWh yield by wind turbine, and comparatively with the one by the diesel system.

Keywords: wind energy, hybrid systems,

AGRADECIMIENTO: A la empresa Minera del Altiplano, por el apoyo brindado en la toma de datos de viento.