



## ESTUDIO DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA EÓLICA PARA ALCALDÍAS DE MAR AISLADAS EN LA ZONA AUSTRAL DE CHILE

Ramón Olfos Besnier\*

En la actualidad, alrededor del 75% de la generación de energía eléctrica es a base de combustibles fósiles: petróleo, gas y carbón<sup>1y2</sup>, recursos que son limitados; de hecho, de acuerdo a los datos de producción anual y de las reservas de petróleo conocidas, éstas debiesen consumirse antes de terminar este siglo<sup>3</sup>. Otra característica de los combustibles fósiles es que para aprovechar su potencial energético se necesita de un proceso de combustión, lo que implica daños ambientales, que favorecen al efecto invernadero y al calentamiento global.

A nivel mundial, es un hecho ampliamente aceptado que es necesario un cambio en la forma de producir y consumir energía y combustibles. En el informe anual "World Energy Outlook 2008", la Agencia Internacional de Energía (AIE) declara que el actual suministro y consumo energético son claramente no sustentables tanto a nivel medio ambiental, económico y social. En consecuencia, el futuro suministro energético debe ser fiable, con bajas emisiones de carbono, eficiente y ecológico.

Debido a esta nueva conciencia colectiva, las tendencias a utilizar energías renovables como alternativa han aumentado en las últimas décadas, destacándose el aumento de la energía eólica para produ-

cir electricidad, cuya producción alcanza actualmente alrededor del 1% del consumo eléctrico mundial; no obstante, existen países como Dinamarca, sexto productor de este tipo de energía en el mundo, cuya producción eólica representa el 19,9% del total de energía eléctrica en el país<sup>4</sup>.

La situación en Chile no es muy distinta al panorama mundial, siendo el 59% de la generación eléctrica a través de combustibles fósiles<sup>5</sup>, condición que estratégicamente hace que el país tenga una alta dependencia energética, dado que la mayoría de estos recursos son importados.

En Chile, la potencia eólica actualmente instalada es de 20 [MW], lo que equivale a menos del 0,2% del consumo eléctrico nacional. Los proyectos eólicos más grandes son la central eólica "Alto Bagueles" de la empresa SAESA y el parque eólico "Canela" de la Empresa ENDES CHILE; el primero está conectado al Sistema Eléctrico de Aysén desde octubre del 2001 con una capacidad de 2 [MW] distribuida en tres aerogeneradores de 660 [kW] cada uno; el segundo, al Sistema Interconectado Central desde noviembre de 2007 con una capacidad de 18,15 [MW] distribuida en 11 unidades de 1,65 [MW] cada una.

Dada la situación geográfica de Chile, en el país alrededor de 20.000 hogares se abastecen de energía eléctrica

\* Teniente 2°. ING.NV.ELN.

1.- International Energy Annual 2006.  
2.- Official Energy Statistics form the U.S. Government  
3.- BP Review of World Energy June 2009.  
4.- Wind Energy Annual Report 2007.  
5.- Balance Nacional de Energía, 2007.

mediante sistemas de autogeneración o sistemas comunitarios, la mayoría de los cuales usan grupos electrógenos<sup>6</sup>. Se estima que en muchos de esos lugares, de aprovecharse los diferentes recursos renovables y combinarse con los actuales sistemas de generación eléctrica, se disminuirían los costos de operación, por el ahorro de combustible y mantenimiento. Lo anterior obedece a la tendencia mundial de considerar el uso de sistemas híbridos que contemplen energías renovables<sup>7</sup>. En el país existen varios proyectos de abastecimiento de pequeñas localidades eléctricamente aisladas, las que se han ido materializando de acuerdo al Programa de Electrificación Rural, de la Comisión Nacional de Energía (CNE) y por algunas iniciativas privadas y de cooperación internacional, usando sistemas híbridos que combinan el diesel con energías renovables.

La situación de algunas Alcaldías de Mar se condice con lo anteriormente expuesto, dado que utilizan sistemas de autogeneración basados en grupos electrógenos para su abastecimiento energético. Al considerar el alto potencial eólico que existe en algunos lugares en los que se encuentran emplazadas las Alcaldías de Mar, el Departamento de Telecomunicaciones Marítimas y Tecnologías de la Información ha considerado evaluar un sistema de generación eólica para abastecer dichas instalaciones, adquiriendo para tal propósito un aerogenerador vertical de baja potencia, modelo Seahawk, de manera de combinar el actual sistema de autogeneración diesel por un sistema híbrido eólico-diesel, con el fin de disminuir los costos de operación, a través del ahorro de combustible.

El artículo comienza con un resumen de la clasificación de los aerogeneradores, con énfasis en los pequeños aerogeneradores de eje vertical. A esto le sigue la descripción de las características de la carga eléctrica del sistema

eléctrico de la Alcaldía de Mar de Cabo de Hornos. Se incluye un análisis del recurso viento disponible a partir de datos recopilados entre 2000 y 2005, caracterizándolos mediante la función de distribución de probabilidad Weibull, a partir de la cual se obtiene la curva de potencia del aerogenerador para calcular la energía suministrada por éste y la penetración promedio del viento. El trabajo concluye con una evaluación económica del proyecto y las conclusiones obtenidas.



Alcaldía de Mar de Cabo de Hornos.

#### - **Aerogeneradores.**

Existen dos tipos de turbinas eólicas o aerogeneradores mundialmente reconocidos: los de eje horizontal o HAWT (Horizontal Axis Wind Turbines) por sus siglas en inglés y los de eje vertical o VAWT (Vertical Axis Wind Turbines).

- **Aerogenerador de eje horizontal (HAWT).**

Éstos prevalecen especialmente para proyectos de mediana y gran escala, por lo tanto, en su mayoría corresponden a turbinas de grandes dimensiones, instalándose varias en una misma zona geográfica, confeccionando así lo que se conoce como parque eólico.

- **Aerogenerador de eje vertical (VAWT).**

Cuando se trabaja en proyectos eólicos de pequeña escala, este tipo de

6.- Programa de Electrificación Rural.  
7.- Wind Power in Power Systems.

turbinas se hacen competitivas y presentan algunas ventajas respecto a las de eje horizontal. Estas son:

- Estructuras más fáciles de construir.
- Costos de implementación y de instalación reducidos.
- Fácil mantenimiento.
- No necesitan de mecanismo de orientación al viento.

En general, los aerogeneradores de eje vertical se emplean para generar potencias de 200 [W] a 4.000 [kW]. Otra característica es que normalmente tienen altos torques de partida. Algunas de las turbinas de eje vertical utilizadas a nivel comercial son la Savonius, Darrieus, tipo H o Giromill, Cicloturbina y Windside.

- **Pequeños aerogeneradores (SWT).**

Se define como pequeño aerogenerador o SWT por sus siglas en inglés (Small Wind Turbine) a aquella turbina eólica cuya área de barrido no supera los 40 [m<sup>2</sup>]<sup>8</sup> o cuya capacidad nominal no supera los 100 [kW]<sup>9</sup>. Existen tanto de eje horizontal como vertical. Se usan principalmente para la producción limpia, libre de emisiones de energía para los hogares, granjas y pequeñas empresas. A través del uso de los SWT, las personas pueden generar su propia energía y reducir así sus facturas, al mismo tiempo que contribuyen a proteger el medio ambiente. Además, hay países en donde existe subvención e incentivos gubernamentales que ayudan a fomentar el uso de SWT.

En zonas aisladas donde no existe red eléctrica, este tipo de aerogeneradores presenta una solución al abaste-



Fig. 1. Aerogenerador Seahawk.

cimiento energético de lugares con bajo consumo de energía, siempre que existan las condiciones eólicas apropiadas. Tal es el caso de varias alcaldías de mar, ubicadas en la zona austral del país, como son las que pertenecen al Distrito Naval Beagle, resaltando la Alcaldía de Mar Cabo de Hornos, que es la usada como referencia en este estudio.

- **Aerogenerador SEAHAWK.**

Construido por la empresa PacWind, actual WePower Inc., la cual se especializa en turbinas eólicas de eje vertical, corresponde a una SWT de eje vertical, el cual para la conversión electromecánica utiliza un generador sincrónico de imanes permanentes (PMSG<sup>10</sup>)<sup>11</sup>. Está destinado principalmente a aplicaciones de cargador de baterías para el suministro eléctrico de 12, 24 ó 48 VDC. La tensión se selecciona a través de un controlador del sistema, basándose en las velocidades medias del viento (ver tabla I). El rotor del Seahawk comienza a girar cuando la velocidad del viento alcanza los 1,8 [m/s] y a generar potencia sobre los 3,1 [m/s]. Las velo-

8.- IEC Versión Oficial en español - Aerogeneradores.

9.- Small Wind Industry Implementation Strategy Project (SWIS).

10.- SeaHawk Vertical Axis Wind Turbine.

11.- Permanent Magnet Synchronize Generator.

condiciones óptimas de funcionamiento se muestran en la tabla I.

Para obtener más potencia a la salida, pueden conectarse varios Seahawk en paralelo. Si se desea obtener corriente alterna para conectar el aerogenerador a una red eléctrica, esto también es posible a través de un inversor DC-AC.

El Seahawk tiene un PMSG que produce corriente alterna trifásica variable en frecuencia y en amplitud, la cual es convertida internamente a corriente continua a través de un rectificador de potencia. La salida continua es conectada al controlador Morning Tristar TS-60, el cual viene incluido con la adquisición del aerogenerador. En la figura 2 se muestra el esquema eléctrico básico del Seahawk, donde los diodos realizan la rectificación de la señal alterna y además protegen al aerogenerador al impedir un flujo de potencia inverso.

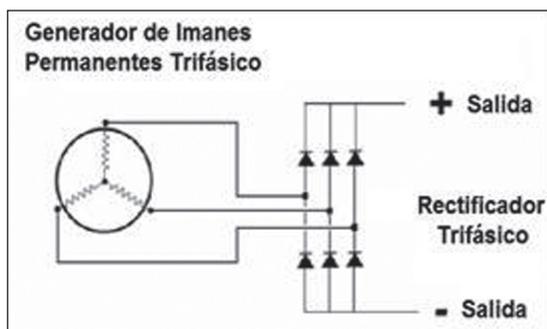


Fig. 2. Esquema eléctrico básico del Seahawk<sup>12</sup>.

De acuerdo a los datos del fabricante, el Seahawk trabaja muy bien en condiciones de vientos fuertes, sin necesidad de protegerlo, soportando vientos de hasta 54 [m/s]. En la tabla II se señalan las principales características técnicas<sup>13</sup>.

TABLA I.  
Voltaje de salida de acuerdo a la velocidad del viento<sup>14</sup>.

Velocidad promedio del viento óptimo [m/s]	Voltaje de Batería [V]	Velocidad óptima [m/s]
0 a 5,4	12	3,1
5,4 a 10,8	24	5,4
10,8 y superiores	48	10,8

TABLA II.  
Especificaciones Técnicas del Aerogenerador Seahawk<sup>15</sup>.

Diámetro de la turbina	0,762 [m]
Altura de la turbina	1,2 [m]
Peso	63,4 [Kg]
Potencia nominal	1000 [W]
Viento nominal	19,3 [m/s] (43 mph)
Velocidad nominal de rotación del rotor	608 [r.p.m]
Viento máximo al que está diseñado	54 [m/s] (120 mph)
Potencia máxima	3400 [W]
Nivel de ruido (a 3 metros)	4,5 [dB]

### - Características de la Carga Eléctrica en Cabo de Hornos.

En la Isla Cabo de Hornos existen 3 señales marítimas:

- Faro Monumental Isla Hornos.
- Faro Cabo de Hornos.
- RACON Monumental Isla Hornos.

El faro Monumental Isla Hornos y su RACON se encuentran emplazados junto a la alcaldía de mar, teniendo ambos un mismo banco de baterías como fuente de alimentación, el cual está conformado por 10 celdas de baterías SUN 52-1 de 1,2 [VDC] cada una. Las baterías son cargadas a través de un cargador marca Veda, el cual es alimentado desde la red eléctrica de 220 [VAC] de la

12.- SeaHawk Vertical Axis Wind Turbine.  
13.- Permanent Magnet Synchronize Generator.  
14.- SeaHawk Vertical Axis Wind Turbine.  
15.- Ibid.

alcaldía. El faro Cabo de Hornos tiene su propia fuente de alimentación cargando una batería por medios fotovoltaicos, ya que se ubica a una distancia de 3 Km del resto del sistema, no teniendo problemas de alimentación dado su bajo consumo eléctrico.

Las estructuras existentes en la Isla Cabo de Hornos son únicamente los faros, la Alcaldía de Mar Cabo de Hornos y algunas dependencias que dependen energéticamente de esta última, como son la capilla, el helipuerto, el embarcadero y una sala de cabrestante que se utiliza para trasladar carga del embarcadero a la alcaldía. De esta forma, el sistema de Cabo de Hornos constituye un buen ejemplo de un sistema aislado, puesto que en la isla no existe interacción con otro sistema o red eléctrica.

En la figura 3 se muestra el diagrama de conexiones del sistema de potencia de la Alcaldía de Mar Cabo de Hornos, agregándole el sistema del aerogenerador. Como se puede observar, la topología se basa en una barra DC, lo cual se debe a que la carga eléctrica es relativamente pequeña, está concentrada en un área reducida y el aislamiento del lugar exige que el sistema sea lo más simple y confiable posible.

Las características de los generadores diesel y del banco de baterías que conforman el actual sistema de potencia de Cabo de Hornos se resumen en la tabla III.

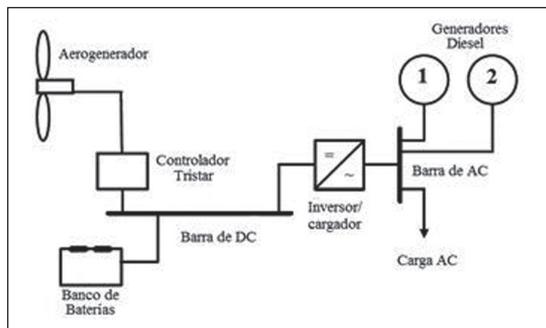


Fig. 3. Circuito eléctrico Alcaldía de Mar Cabo de Hornos con conexión recomendada del aerogenerador.

TABLA III.

Características generales de los generadores y baterías de la alcaldía.

	Generadores		Banco Batería
	Motor N°1	Motor N°2	
Modelo	GTS2A08	R2A08	Baterías Trojan T-105
Voltaje	220 [V <sub>AC</sub> ]	380 [V <sub>AC</sub> ]	48 [V <sub>DC</sub> ]
Potencia	12,7 [kW]	14,4 [kW]	
Amperes-hora	-	-	900 [Ah]

• Grupo Electrónico.

El grupo electrógeno de la alcaldía está compuesto por dos motores diesel marca Lister Petter conectados a generadores marca Stamford, los que a su vez están conectados a un equipo cargador/inversor Trace, el cual controla la alimentación de electricidad hacia la red eléctrica de la alcaldía, controlando además el banco de baterías, el cual alimenta el consumo cuando los generadores diesel están apagados. El sistema eléctrico de la alcaldía es de 220 VAC, el cual es alimentado aproximadamente un tercio del día directamente desde los generadores diesel, y las restantes horas desde el banco de baterías a través del inversor/cargador Trace, el cual transforma el voltaje de 48 VDC de las baterías a los 220 VAC de la red eléctrica. El banco es cargado por los generadores durante sus horas de funcionamiento. Lo anterior es controlado a través de un PLC.

• Banco de baterías y equipo inversor/cargador.

El banco de baterías de la alcaldía tiene una instalación serie-paralelo; ésta consiste en 4 sub-bancos instalados en paralelo, cada uno conformado por 8 baterías en serie. Considerando que cada batería es de 6 [VDC] y 225 [Ah], las características del banco de baterías son: 48 [VDC], 900 [Ah], conformado por 32 baterías.

El proceso de carga del banco de baterías de la alcaldía es controlado por el cargador/inversor Trace, el cual ha sido programado para que el banco no se descargue más de un 50% de su capacidad. Cuando esto sucede, el sistema de control de PLC hace funcionar los generadores para cargar el banco de baterías, independiente del horario proyectado para su funcionamiento.

El inversor/cargador Trace controla el flujo de corriente del generador a las baterías, como también desde las baterías hacia la red eléctrica de la alcaldía, siendo su topología de potencia bidireccional; es decir, actúa tanto como cargador de batería y como inversor.

- **Consumo eléctrico diario estimado.**

Actualmente, el consumo promedio mensual de petróleo usado para la generación de electricidad es de 648 [Lt], estimándose así un consumo anual de 7.776 [Lt].

Debido a que no existe un instrumento para medir el consumo eléctrico de la alcaldía, se realizaron estimaciones para calcular su valor. La primera fue confeccionando una tabla con todos los equipos que se encuentran conectados al sistema eléctrico de la alcaldía, considerando el consumo diario de éstos de acuerdo al tiempo que funcionan y la potencia que requieren; de esta forma, se obtuvo una estimación del consumo anual de 22,25 [MWh]. El segundo método se basa en el consumo anual de petróleo. Al saber que el consumo de los motores diesel marca Lister Petter que conforman el grupo electrógeno, es en promedio de 3,1 [Lt] de combustible por cada 11,0 [kWh] producidos, se tiene que la energía anual entregada por los motores corresponde a 27,59 [MWh]. Dado que la eficiencia de los generadores Stamford es de 0,8, se tiene que

el consumo anual de electricidad es de 22,07 [MWh] (22.071,55 [kWh]). De las dos evaluaciones anteriores, se considera que esta última es más fidedigna, ya que la primera estimación depende del uso diario de los equipos, y la segunda se basa en datos más cuantitativos y, por lo tanto, más significativos.

- **Análisis de Vientos y Densidad del aire en Cabo de Hornos para los años 2000 a 2005.**

Para analizar el potencial eólico del viento en Cabo de Hornos, se estudiaron los vientos y densidades del aire registrados durante los años 2000 a 2005. De esta forma se solicitó al Servicio Meteorológico de la Armada los datos de intensidad y dirección del viento, como también los de temperatura y presión atmosférica con los que se calcula la densidad del aire. Los datos contemplan 6 registros diarios, que corresponden a mediciones atmosféricas observadas siempre a la misma hora (00:00, 06:00, 12:00, 15:00, 18:00 y 21:00 hrs.). De esta manera se obtienen 2.190 muestras por año (2.196 para los dos años bisiestos), lo que da un total de 13.152 muestras.

Para calcular el comportamiento de la velocidad del viento, los parámetros de escala y distribución de la probabilidad de Weibull, se utilizó un método similar al propuesto en un estudio realizado para la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) del gobierno de Colombia en 2003<sup>16</sup>.

- **Frecuencia de la velocidad y de la dirección del viento.**

Con la información de vientos se confeccionaron histogramas para observar el comportamiento de las velocidades y direcciones del viento en Cabo de Hornos.

Los valores promedios mensuales y generales obtenidos se resumen en la tabla IV, de la cual se tiene que el viento promedio tiene una velocidad de 11,03

16.- Permanent Magnet Synchronize Generator.

[m/s] y su dirección predominante corresponde al cuadrante Norweste.

**TABLA IV**  
Valor promedio, Mediana y Dirección.  
Promedio del Viento en Cabo de Hornos.

Mes	Velocidad promedio [m/s]	Varianza V(x)	Dirección promedio
Enero	10,33	10,29	276,1°
Febrero	10,61	10,29	288,0°
Marzo	10,52	9,77	302,2°
Abril	12,17	11,32	292,6°
Mayo	11,64	10,29	300,7°
Junio	11,07	10,29	307,9°
Julio	11,40	10,29	292,9°
Agosto	11,51	10,80	289,3°
Septiembre	11,33	10,29	290,2°
Octubre	11,22	10,29	291,2°
Noviembre	10,65	10,29	304,4°
Diciembre	9,90	9,26	304,9°
<b>Anual</b>	<b>11,03</b>	<b>10,29</b>	<b>295,1°</b>

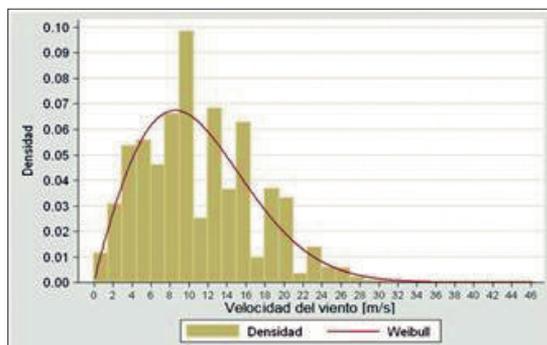


Fig. 4. Histograma de la velocidad del viento en Cabo de Hornos registrada entre los años 2000 a 2005 y curva de la distribución Weibull asociada.

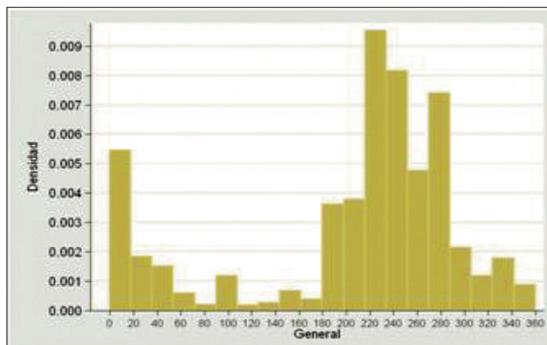


Fig. 5. Histograma de la dirección del viento en Cabo de Hornos registrada entre los años 2000 a 2005.

• **Densidad del Aire en Cabo de Hornos.**

Para la confección de este análisis, la densidad del aire se ha calculado de acuerdo a la ecuación (1):

$$\rho = \frac{mP}{RT} \tag{1}$$

Para todos los cálculos se ha considerado el valor de la masa del aire (m) sin CO2 (m = 0,028964 [Kg/mol]); por otro lado, R es la constante de los gases ideales (R = 8,3144 [J K-1 mol-1]). Con los datos de temperatura (T) y presión atmosférica (P), se ha calculado la densidad promedio del aire en forma mensual y anual, obteniendo los resultados resumidos en la tabla V.

**TABLA V**  
Densidad Promedio del Aire y Densidad de Potencia Específica promedio en Cabo de Hornos.

Mes	Densidad del aire [Kg/m³]	Potencia específica promedio [W/m²]
Enero	1,23151	1240,14
Febrero	1,23492	1492,45
Marzo	1,24078	1495,61
Abril	1,24342	2188,76
Mayo	1,25528	2248,54
Junio	1,26150	1656,62
Julio	1,26459	1835,39
Agosto	1,26273	1752,34
Septiembre	1,26106	1733,85
Octubre	1,24920	1654,48
Noviembre	1,24180	1341,70
Diciembre	1,23632	1222,68
<b>Anual</b>	<b>1,24865</b>	<b>1655,34</b>

• **Distribución de Weibull.**

Los histogramas de frecuencia representan gráficamente la distribución de las velocidades del viento que componen toda la serie de datos, los que pueden ser asociados a modelos matemáticos que describan su comportamiento,

como son las funciones de probabilidad. La función de distribución de probabilidad que mejor describe el comportamiento del viento es la función Weibull<sup>17</sup>, la cual se define según la ecuación (2).

$$f(v, \alpha, \beta) = \frac{\alpha}{\beta^\alpha} \cdot (v)^{\alpha-1} \cdot e^{-\left(\frac{v}{\beta}\right)^\alpha} \quad (2)$$

En esta ecuación “v” es la velocidad del viento; “α”, el parámetro de forma o distribución y “β”, el parámetro de escala. Para determinar el comportamiento del viento con la distribución de Weibull es necesario determinar sus parámetros de forma y escala, lo que se hace con la información del viento que se posee. El valor medio esperado o esperanza y la mediana estadística de una distribución de Weibull se definen por las ecuaciones (3) y (4), recordando que es la función Gamma.

$$E(x) = \delta \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \quad (3)$$

$$\bar{v} = \beta \cdot [\ln(2)]^{1/\alpha} \quad (4)$$

Los valores de la esperanza y mediana (Tabla IV) permiten confeccionar un sistema de ecuaciones para calcular los parámetros “α” y “β” del conjunto de muestras. Este sistema se resolvió numéricamente utilizando MATLAB (versión 7.5), los resultados obtenidos son α = 1,93 y β = 12,44. En la figura 4 se muestra la gráfica obtenida.

- **Estimación del Rendimiento del Aerogenerador Seahawk.**  
La potencia del viento que pasa en forma perpendicular a un área dada, está definida por:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \cdot A \quad (5)$$

De acuerdo a la Ley de Betz, un aerogenerador nunca aprovecha más del 59,26% de esta potencia, por lo que para determinar la potencia mecánica que produce un aerogenerador, debe agregársele a la ecuación el coeficiente de potencia (“cp”) de la turbina, el cual depende de su diseño. El valor de este coeficiente siempre será inferior a 0,5926, lo que es conocido como límite de Betz. Luego, para calcular la potencia eléctrica del aerogenerador, a la ecuación (5) debe agregársele además el valor del “ce”, que corresponde al rendimiento eléctrico del generador. En la ecuación (6) se muestra la ecuación que describe la potencia eléctrica de un aerogenerador.

$$P_{el} = c_e \cdot c_p \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (6)$$

Donde “v” es la velocidad del viento; “A”, el área de barrido de la turbina eólica; “ρ”, la densidad del aire; “ce”, el rendimiento eléctrico y “cp” es el coeficiente de potencia aerodinámico. Para determinar el rendimiento que tiene el aerogenerador en forma teórica, se ha utilizado como referencia la potencia nominal del aerogenerador (1.000 [W]). Según el fabricante, ésta se obtiene a una velocidad del viento de 19,3 [m/s]. El área de barrido que se usa en la ecuación (6) corresponde a la superficie del aerogenerador que se muestra perpendicular al viento, la que para este modelo es de 0,9144 m<sup>2</sup>. La densidad del aire usada por el fabricante corresponde al valor estándar de valor 1,225 [Kg/m<sup>3</sup>]. Sustituyendo estos datos en (6) se obtiene que para condiciones estándares el rendimiento es ce · cp = 0,24816.

17.- SeaHawk Vertical Axis Wind Turbine.

La eficiencia eléctrica (“ce”) para un generador de imanes permanentes menor a 5 [kW], es de aproximadamente 94%<sup>18</sup>. Por lo tanto, se obtiene que el coeficiente de potencia (“cp”) del Seahawk a potencia nominal es aproximadamente 0,2640.

- **Estimación de la Potencia Diaria para el Aerogenerador Seahawk.**

Para calcular la potencia eléctrica que entrega cualquier aerogenerador se usa la ecuación (6). Al utilizar los valores fijos de “cp” y “ce” previamente calculados para el Seahawk junto a su área de barrido, se tiene la ecuación

$$P_{el} = 0,11413 \cdot \rho \cdot v^3 \text{ [W]} \quad (7)$$

(7). Al agregársele la densidad promedio en Cabo de Hornos se tiene la ecuación (8):

$$P_{el}(c_p = 0,264; \rho = 1,2497; v) = 0,1391 \cdot v^3 \text{ [W]} \quad (8)$$

A partir de la ecuación (8), en la figura 6 se ha trazado el gráfico que representa la salida de potencia eléctrica del aerogenerador citado, el que ha sido comparado con el gráfico descrito por el fabricante en el Manual del usuario. Se ha considerado como potencia máxima de salida 3.400 [W]. Como se puede observar, las 2 curvas son semejantes, por lo que considerar “cp” y “ce” fijos, es correcto de acuerdo a la información del manual del Seahawk.

De la ecuación (8) y de los datos que ya se tienen de la densidad del aire e intensidad del viento para cada mes, se ha confeccionado la tabla VI. Para el cálculo de la potencia promedio se utiliza la ecuación (9), la cual, para facili-

tar el trabajo con las curvas de potencia del aerogenerador, se ha aproximado por una sumatoria de productos.

$$P_{av} = \int_0^{\infty} f(v, \delta, \beta) \cdot P_{el}(v) dv \quad (9)$$

De los cálculos realizados, se puede estimar un aporte energético del aerogenerador de unos 2.418,76 [kWh] anual, lo que representa un 10,96% del consumo eléctrico total estimado de la Alcaldía de Mar. Este valor corresponde a la penetración del viento promedio (Eeol/Etotal) para esta instalación aislada. El valor de penetración instantánea (Peol/Ptotal) considerando los generadores diesel actuales más el aerogenerador es de un 3,69%.

Estos resultados permiten además calcular el Factor de Capacidad (o de Planta) de la turbina eólica (Ppromedio/Pinstalada), lo que da un valor de 28,17%, situándolo dentro del rango típico de 20 a 40% para una sola unidad<sup>19</sup>. Esto significa que el aerogenerador tendrá un tiempo de uso del orden de 2.467 horas/año.

Al considerar que la penetración del viento promedio que considera la instalación del Seahawk es de 10,96%, se estima que el ahorro anual de petróleo debiese ser de 852,15 litros.

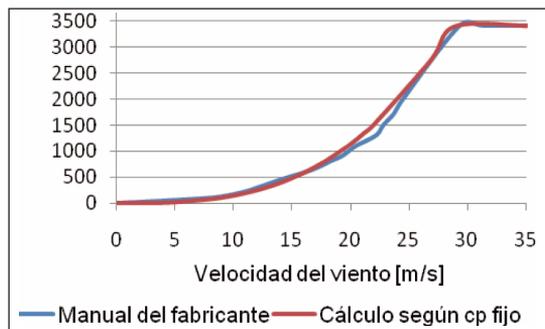


Fig. 6. Potencia de salida del Seahawk para una condición atmosférica estándar.

18.- The Experience of Designing and Testing a 20kW Multi Pole Permanent Magnet Generator for Wind Turbines.  
 19.- Wind Turbines.

**TABLA VI**  
**Resumen de las Condiciones Eólicas y del Rendimiento del aerogenerador Seahawk en Cabo de Hornos.**

Mes	Velocidad promedio [m/s]	Densidad del aire [Kg/m <sup>3</sup> ]	Potencia promedio [W]	Energía diaria [kWh]	Energía mensual [kWh]
Enero	10,33	1,23151	209,682	5,032	156,003
Febrero	10,61	1,23492	248,135	5,955	166,747
Marzo	10,52	1,24078	256,622	6,159	190,927
Abril	12,17	1,24342	332,670	7,984	239,522
Mayo	11,64	1,25528	307,282	7,375	228,618
Junio	11,07	1,26150	285,662	6,856	205,677
Julio	11,40	1,26459	300,199	7,205	223,348
Agosto	11,51	1,26273	305,875	7,341	227,571
Septiembre	11,33	1,26106	297,154	7,132	213,951
Octubre	11,22	1,24920	291,198	6,989	216,651
Noviembre	10,65	1,24180	253,150	6,076	182,268
Diciembre	9,93	1,23632	225,101	5,402	167,475
General	11,03	1,24865	281,729	6,761	202,845

- **Diseño del aerogenerador acorde al viento.**

De acuerdo a los datos del fabricante, el Seahawk está clasificado como un aerogenerador de clase II, lo que significa que está diseñado para soportar velocidades del viento de 42,5 [m/s] y ráfagas no mayores de 59,5 [m/s], de acuerdo a la norma IEC 61.400-1; no obstante, en el manual del fabricante se estipula que por diseño es de 54 [m/s].

De los datos que se tienen de la velocidad del viento entre los años 2000 a 2005, la máxima velocidad es 45,1 [m/s], registrada el 31 de mayo del 2001; no obstante, como los registros corresponden a 6 mediciones diarias, puede haber alguna ráfaga de mayor intensidad que no se haya registrado, de hecho en julio del año 2009 se observó una ráfaga de 52 [m/s]. De esta manera se concluye que los valores recién señala-

dos no son limitantes para que éste sea instalado a una altura igual o inferior a la de la veleta del anemómetro usado para la obtención de las mediciones del viento. Lo anterior se señala, porque a mayores alturas, mayor también es la velocidad del viento.

Dado los estándares de diseño de acuerdo a la norma IEC 61400-1 la vida útil de un aerogenerador se estima en 20 años.

- **Conclusión.**

En el presente artículo se ha efectuado un resumen de los principales factores eólicos y uso de aerogeneradores para presentar el modelo Seahawk adquirido por TECMAR para su aplicación en las Alcaldías de Mar de la zona austral de Chile con el propósito de reducir los costos de los actuales sistemas electrógenos utilizados para la generación eléctrica en lugares aislados.

Fue así que se ha mostrado y explicado el sistema eléctrico que posee la Alcaldía de Mar Cabo de Hornos, proponiendo la posible conexión del aerogenerador a la barra de corriente continua del banco de baterías existente.

Datos reales de viento, presión y temperatura registrados entre los años 2000

y 2005 se utilizaron para caracterizar el recurso eólico disponible en el lugar.

Un cálculo estimativo de la potencia producida por el aerogenerador a un coeficiente de potencia fijo fue realizado, lo que permitió calcular una aproximación de los valores de la energía eólica producida y de la penetración de ésta.

\* \* \*



#### BIBLIOGRAFÍA

- 1.- (2008, Jun.-Dec.). *International Energy Annual 2006*. Energy Information Administration. [Online]. Available: <http://www.eia.doe.gov/iea/>
- 2.- *Official Energy Statistics form the U.S. Government*. Energy Information Administration, 2009. Disponible en: <http://www.eia.doe.gov/oiaf/forecasting.html>
- 3.- (2009, June). "BP Review of World Energy June 2009" [Online]. Available: <http://www.bp.com/statisticalreview>
- 4.- "Wind Energy Annual Report 2007", International Energy Agency, ISBN 0-9786383-2-8, Jul. 2008, pp. 9-12.
- 5.- *Balance Nacional de Energía, 2007*. Comisión Nacional de Energía.
- 6.- J. Ávalos. (2008). *Programa de Electrificación Rural*. Comisión Nacional de Energía, Santiago, CHILE. [Online]. Available: [http://www.cne.cl/archivos\\_bajar/seminario\\_emarina/PER\\_2008\\_Seminario\\_Marina.pdfinfra/html](http://www.cne.cl/archivos_bajar/seminario_emarina/PER_2008_Seminario_Marina.pdfinfra/html)
- 7.- T. Ackermann, "Wind Power in Power Systems", England, John Wiley & Sons, 2005.
- 8.- IEC Versión Oficial en español - Aerogeneradores. Parte 2: Requisitos de diseño para pequeños aerogeneradores, IEC 61400-2 Ed. 2.0, Mar. 2006.
- 9.- (2005). *Small Wind Industry Implementation Strategy Project (SWIS)*. European Commission. [Online]. Available: <http://www.smallwindindustry.org/index.php?id=112>
- 10.- "SeaHawk Vertical Axis Wind Turbine", PacWind Inc., Torrance, CA Owner Manual, Jul. 2006.
- 11.- "Guía para la utilización de la energía Eólica para Generación de Energía Eléctrica", Unidad de Planeación Minero Energética, Bogotá, COLOMBIA, Tech. Rep. ANC-603-18-01, Mar. 2003.
- 12.- E. Hau, *Wind Turbines*, Germany, Springer, 2006.
- 13.- N. Vilsbøll, A. Pinegin, D. Goussarov, and J. Bugge, "The Experience of Designing and Testing a 20kW Multi Pole Permanent Magnet Generator for Wind Turbines", *DEWI Magazin*, N° 9, pp. 74-83, Aug. 1996.
- 14.- "Metodología de Formulación de Proyectos de Electrificación Rural", Ministerio de Planificación, Santiago, CHILE, 2002.