

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN AEROGENERADOR DE 500W CON IMANES PERMANENTES PARA PEQUEÑAS DEMANDAS ELECTRICAS DE ZONAS RURALES

DESIGN AND CONSTRUCTION OF WIND TURBINE 500 W WITH PERMANENT MAGNET GENERATOR FOR SMALL ELECTRIC DEMANDS OF RURAL AREAS

Salomé Gonzáles Chávez¹, José Chiroque BalderaTeodoro²

RESUMEN

El presente trabajo trata del diseño, construcción y caracterización de un prototipo de aerogeneración de 500 W, utilizando tecnología nacional. Comprende el diseño y fabricación de cada uno de los componentes del sistema aerogenerador -generador de imanes permanentes, rotor eólico y elementos de dirección; así como la evaluación en campo para determinar su performance. Su aplicación se presenta como una solución energética y socioeconómica de las zonas rurales que poseen el recurso eólico, contribuyendo así a la mejora de las condiciones de vida bajo el principio de aprovechamiento del recurso local y la preservación del medio ambiente. Como resultados de las pruebas de campo se tiene, la verificación de las condiciones de diseño así como su operación de acuerdo al recurso eólico. Si bien el sistema fue dimensionado para alcanzar una potencia nominal de 500 W a una velocidad de viento de 8 m/s, en campo se ha obtenido dicha potencia a una velocidad de viento de 8,3 m/s, y un comportamiento estable en las demás condiciones.

Palabras clave.- Aerogenerador, Imán permanente, Zona rural, Socioeconómico, Energía limpia.

ABSTRACT

The present work is about the design, construction and characterization of Wind Turbine 500 W prototype, using national technology; it is the design and production of the wind turbine components - permanent magnet generator, rotor and auxiliary elements-, as well as the performance evaluation in field. The Wind Turbine 500 W application will be an energetic and socioeconomic solution of the rural areas with wind resources. With field tests results we carry out the verification of design conditions, as well as the operation of wind turbine according to wind resource. Although the system was designed for 500 Watts nominal power and 8 m/s wind speed, in field this power has been obtained to 8,3 m/s wind speed, and a stable behavior under the other conditions

Key words.- Wind turbine, Permanent magnet, Rural areas, Socioeconomic, Clean energy.

INTRODUCCIÓN

El aprovechamiento de la energía eólica se ha incrementado significativamente especialmente en

aplicaciones de mediana y gran escala, debido principalmente al desarrollo de un competitivo mercado internacional de tecnologías, así como al apoyo de acertadas políticas de promoción

¹Doctor, Ingeniero Industrial de la Universidad de Oviedo – España, Ingeniero Mecánico Electricista de la Facultad de Ingeniería Mecánica, Docente investigador, Decano de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Nacional de Ingeniería, ²Ingeniero Mecánico de Fluidos, egresado de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Candidato a Master en Ciencias con Mención en Energética de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Nacional de Ingeniería.

especialmente en Europa. Sin embargo, el desarrollo de tecnologías para la aerogeneración a pequeña escala no ha tenido el mismo avance, especialmente en países en vías de desarrollo donde las energías renovables aún no son consideradas en los planes energéticos.

En estos países como el Perú, el grado de cobertura eléctrica en zonas rurales aisladas es extremadamente baja, ello debido a la existencia de una economía de subsistencia, alta dispersión poblacional y complejidad geográfica, que impiden la extensión de la red del sistema eléctrico interconectado nacional: para estas zonas es necesario considerar el aprovechamiento estratégico de las energías renovables, según las condiciones y disponibilidades de cada región geográfica, utilizando tecnología nacional y bajos costos de inversión.

Las poblaciones rurales más desfavorecidas pero con potencial eólico aprovechable se encuentran en mayor número en los andes, en donde se desarrollan vientos locales de montaña que se caracterizan por un ciclo diurno que cambia de dirección dos veces por día, producidos por la diferencia horizontal de temperatura del aire. En la Fig. 1 se muestra la orografía del terreno y las configuración de las viviendas en comunidades de los andes peruanos.



Fig. 1 Características orográficas y distribución poblacional en los Andes del Perú.

Para este escenario, se requiere realizar investigación y desarrollo de tecnologías tales que permitan aprovechar esta disponibilidad diversa de fuentes

renovables de energía. Así se desarrolla el primer modelo aerogenerador de 100 W en ITDG (que actualmente esta siendo comercializado por una empresa local quién recibió la transferencia tecnológica), base para el diseño y fabricación del sistema de aerogeneración de 500 W, trabajo que está siendo subvencionado por el Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica, CONCYTEC.

FUNDAMENTOS DE DISEÑO Y CONSTRUCCION DEL AEROGENERADOR

El diseño de los componentes del sistema aerogenerador -generador eléctrico, rotor eólico y sistema de orientación, se basa en la compatibilidad de los parámetros de la turbina eólica con los del generador eléctrico y a su vez con las características típicas del viento predominante en las zonas de influencia.

GENERADOR ELÉCTRICO DE IMANES PERMANENTES

En este tipo de máquinas, el campo de excitación es de dirección constante formado por medio de los imanes permanentes; ante la falta de pérdidas en el devanado de excitación, poseen un mejor rendimiento siempre que la geometría de diseño sea óptima y los imanes trabajen en su punto máximo de operación de energía $(HB)_{max}$.

Esta máquina eléctrica se distingue de sus análogas, por la estructura de sus sistemas magnéticos de hierro giratorio, cuyas características están gobernadas bajo la teoría de las máquinas de excitación electromagnética. Es de característica geométrica tipo disco, diseñada para trabajar específicamente con una turbina eólica.

Las consideraciones para el diseño son: velocidad de giro del rotor condicionado por la velocidad del viento, voltaje de salida y, la geometría constructiva para encontrar el punto máximo de trabajo del imán en el circuito magnético.

En la Fig. 2 se muestra el arreglo que tienen los imanes y el bobinado, considerando un núcleo de aire, de

esta forma se puede hallar el campo magnético dentro del núcleo de aire con una longitud l_g .

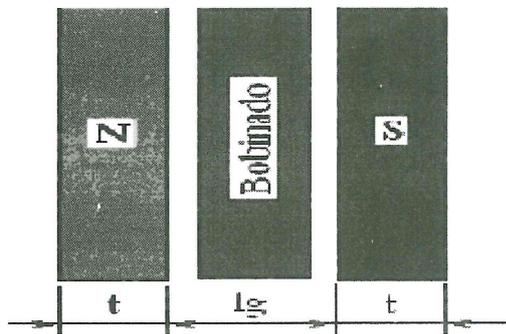


Fig. 2 Configuración de diseño de los imanes y del bobinado.

Ecuación de carga

Definida de la siguiente forma:

$$B_m = \mu \cdot \frac{A_g}{A_m} \cdot \frac{2t}{l_g} \cdot H_m \quad (1)$$

Siendo:

B_g .- Densidad de campo magnético promedio dentro del entrehierro.

A_g .- Área transversal promedio del entrehierro.

B_m .- Densidad de Campo magnético en la superficie del imán.

A_m .- Área transversal del imán.

μ .- Permeabilidad magnética del núcleo (aire).

H_m .- Intensidad de campo magnético en la superficie del imán.

Para el siguiente paso se define una geometría de referencia del imán, el cual da el punto de partida para los cálculos; estas dimensiones serán recalculadas posteriormente según el requerimiento.

$$\begin{aligned} \mu &= 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \\ t &= 8 \cdot 10^{-3} \text{ m} \\ a &= 50 \cdot 10^{-3} \text{ m} \\ b &= 50 \cdot 10^{-3} \text{ m} \end{aligned}$$

Área de la cara del imán.- $A_m = a \cdot b = 2.5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$.

Entrehierro.- distancia entre los imanes: $l_g = 15 \cdot 10^{-3} \text{ m}$.

Área transversal del entrehierro, considerando efecto de borde.- $A_g = (a + l_g) \cdot (b + l_g) = 4.225 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$.

La geometría de diseño es óptima si los imanes trabajan en su punto máximo de operación (H_B)_{max}, para determinarlo se hace la intersección de las curvas de magnetización del tipo de imán a utilizar y la curva de carga (ver Fig. 3). La curva de rojo representa la curva de magnetización, característico para imán tipo NdFeB N35 (para cada tipo de imán existe una curva característica diferente). La curva de azul es la curva de carga según la ecuación B_m para las dimensiones tomadas como referencia.

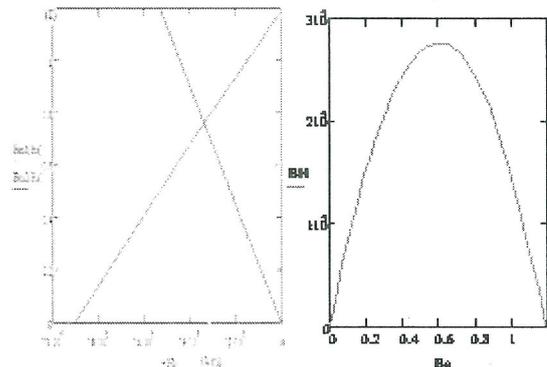


Fig. 3 Intersección de la curva de magnetización y curva de carga; curva de transferencia de energía de imán.

En el presente caso el punto de operación está prácticamente en el punto de máxima transferencia de energía; de no ser así se debe modificar las dimensiones de los imanes o del entrehierro, para tener un mejor circuito magnético. Se obtiene los siguientes resultados:

$$B_m = 0.761 \text{ T}$$

$$H_m = 3.361 \cdot 10^5 \text{ A/m}$$

Densidad de campo dentro del núcleo de

$$\text{aire: } B_g = \frac{A_m}{A_g} \cdot B_m = 0.451 \text{ T}$$

Cálculo de los voltajes máximos

Los parámetros de entrada requeridos para nuestro diseño son:

Velocidad de giro del rotor.-
300 rpm

Voltaje de salida.-

$$24 \text{ V DC}$$

Número de pares de polos.-

$$16$$

Frecuencia del voltaje inducido.-

$$f = \frac{300 \cdot 16}{120} = 40 \text{ Hz}; \text{ siendo la velocidad}$$

angular del voltaje inducido $\omega = 2\pi \cdot f$

Número de espiras por fase.- $N_c = 160$

Número de bobinas por fase.- $M_b = 8$

Número de espiras por bobina.- $N_b = \frac{N_c}{M_b} = 20$

Se asume inicialmente un área del núcleo de aire del bobinado. El cálculo del voltaje máximo de fase se realiza en vacío, es decir; sin colocar ninguna carga al generador.

Área del núcleo de aire.-

$$A_n = 1367 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$$

Voltaje eficaz de Fase.-

$$V_f := 4.44 \cdot N_c \cdot B_g \cdot A_n \cdot f = 17.5 \text{ V}$$

Voltaje máximo de fase.-

$$V_{fm} = \sqrt{2} \cdot V_f = 24.749 \text{ V}$$

Voltaje máximo de línea en vacío.-

$$V_{lmo} = \sqrt{3} \cdot V_{fm} = 42.866 \text{ V}$$

Cálculo de la corriente eficaz de línea

Dado que se requiere una potencia máxima específica, no conociendo la caída de voltaje debido a la impedancia del conductor, se asume que el voltaje de vacío será el voltaje de carga, verificándose al final. Entonces se tendrá un valor inicial de la corriente de la carga:

Potencia asumida para el cálculo.-

$$Pot := 600 \text{ W}$$

Voltaje eficaz de línea.-

$$V_{ef} = \frac{24}{\sqrt{2}} = 16.971 \text{ V}$$

Corriente eficaz de línea y de fase.-

$$I = \frac{Pot}{\sqrt{3} \cdot V_{ef}} = 20.412 \text{ A}$$

Cálculo del circuito eléctrico equivalente

Rin: Radio interior del imán

Rout: Radio exterior del imán

kw1: Factor de enrollamiento, Kw1=1

m1: Número de fases, m1=3

P: Número de polos

Nc: Número de espiras por fase

I: Corriente en el estator

g: Entrehierro

kfd: Factor de forma en dirección d, kfd = 1.2

kfq: Factor de forma en dirección q, kfq = 1.2

Xad: Reactancia del eje directo

Xaq: Reactancia de eje en cuadratura

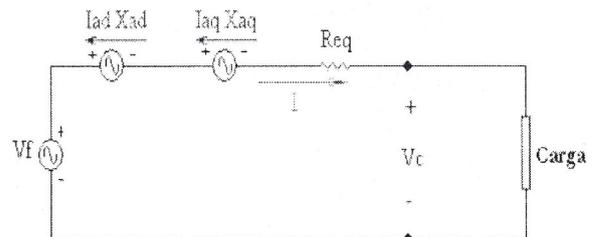


Fig. 4 Circuito eléctrico equivalente del generador.

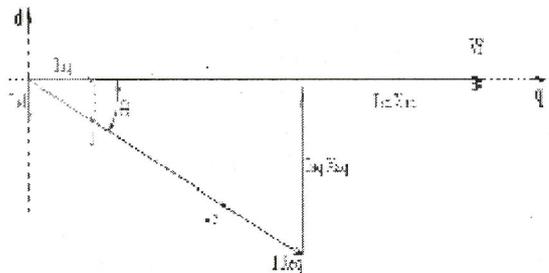


Fig. 5 Diagrama fasorial del circuito.

Resistencia equivalente del cable por fase.-

$$R_{eq} = \frac{\rho \cdot L}{A_c} = 0.2569 \Omega$$

$$X_{ad} = 2 \cdot m1 \cdot \mu \cdot f \left(\frac{N_c \cdot kw1}{P} \right)^2 \left(\frac{R_{out}^2 - R_{in}^2}{lg1} \right) \cdot kfd = 0.025 \Omega$$

$$X_{aq} = 2 \cdot m1 \cdot \mu \cdot f \left(\frac{N_c \cdot kw1}{P} \right)^2 \left(\frac{R_{out}^2 - R_{in}^2}{lgq} \right) \cdot kfq = 0.019 \Omega$$

Voltaje eficaz en la carga por fase.-

$$V_c = 12.25 \text{ V}$$

Voltaje máximo de línea.-

$$V_{ml} = \sqrt{6} \cdot V_c = 30.006 \text{ V}$$

Potencia de la carga.-

$$S_c = 3 \cdot V_c \cdot I = 750.155 \text{ W}$$

Potencia disipada por el conductor.-
 $P_{cu} = 3 \cdot I^2 \cdot R_{eq} = 321.085 \text{ W}$

Eficiencia eléctrica

$$\eta = \frac{S_c}{P_{eje}} = 70.027\%$$

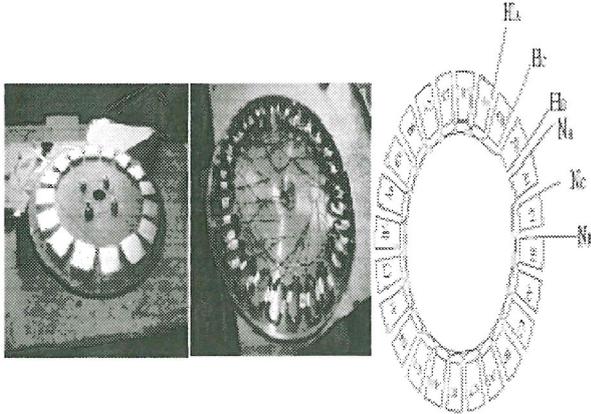


Fig. 6 Distribución de los imanes en un disco
 distribución de las bobinas en el molde
 forma de conexión de las bobinas.

TURBINA EÓLICA

El diseño del álabes está basado en la teoría del ala, utilizando un perfil estandarizado para las secciones de los álabes. Para el cálculo de las dimensiones del rotor se ha empleado las ecuaciones aerodinámicas.

Cálculo del diámetro del rotor

Se obtiene a partir de la ecuación de potencia de la turbina eólica:

$$d = \sqrt{\left(\frac{8 \cdot P}{\pi \cdot \rho \cdot V^3 \cdot C_p \cdot \eta_e \cdot \eta_t} \right)} \quad (2)$$

Donde:

- d: Diámetro del rotor de la turbina eólica (m)
- P: Potencia de diseño del aerogenerador (W)
- ρ : Densidad del aire, variable con la a.s.n.m (1.23 kg/m³ a nivel del mar)
- V: Velocidad del viento (m/s)
- A: Area barrida por la turbina (m²)
- C_p : Coeficiente de potencia (adimensional)

η_e : Eficiencia del generador
 η_t : Coeficiente de transmisión

La velocidad de giro de la turbina eólica se obtiene de la siguiente expresión:

$$N = \left(\frac{60 \cdot \lambda \cdot V_D}{\pi \cdot d} \right) \quad (3)$$

Donde:

- λ : Celeridad
- N: Velocidad de giro de la turbina eólica (RPM)
- V_D : Velocidad de diseño (m/s)

Cálculo de la sección del álabes y selección del perfil

Para el cálculo de la sección del álabes se utilizaron las siguientes ecuaciones:

$$\left. \begin{aligned} \lambda_r &= \frac{\lambda}{R} \\ \phi &= \frac{2}{3} \cdot \arctan\left(\frac{1}{\lambda_r}\right) \\ C &= \frac{8 \cdot \pi \cdot r (1 - \cos \phi)}{z \cdot C_1} \\ \beta &= \phi - \alpha \\ N &= \frac{w \cdot c}{\mu} \quad (\text{N}^\circ \text{ de Reynolds}) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Donde:

- λ_r : Celeridad local para el radio r
- λ : Celeridad de diseño
- r: Distancia del centro del rotor a la sección evaluada (m)
- R: Radio de la turbina (m)
- β : Angulo formado por la velocidad relativa con el plano de giro del rotor
- C: Cuerda de la sección del álabes
- z: Número de álabes o palas
- C_1 : Coeficiente de sustentación del álabes
- ϕ : Angulo formado por el álabes con el plano de giro
- α : Angulo de ataque, tomado del perfil seleccionado
- w: Velocidad relativa al perfil m/s
- μ : Viscosidad cinemática del aire

En resumen, los parámetros de diseño considerados son los siguientes:

Potencia eléctrica:	500 W
Velocidad de nominal de diseño:	8 m/s
Perfil utilizado:	NACA 4412
Número de palas:	3
λ :	6.5
RPM:	300
C_p :	0.35
C_l :	0.8
Eficiencia de transmisión (η_t): directa)	1 (transmisión directa)
ρ :	1,2 kg/m ³
α :	5°

C_p es el coeficiente de sustentación que se obtiene de la gráfica C_l vs C_d del perfil seleccionado, cuyo valor tomado es conservador. Para rotores de gran tamaño se toma como valor alrededor de 0.44, en base a diseños empleando poderosos programas computacionales y una fabricación altamente especializada.

Utilizando las diferentes relaciones anteriores, los resultados para cada una de las secciones de los álabes dan valores no lineales, tanto para la cuerda del perfil como para el ángulo de posición; ello requiere elementos de fabricación complejos y costosos. Para simplificar el proceso se hace una linealización del álabes, que consiste en transformar la cuerda (C) y el ángulo (β) en parámetros lineales en función de la posición del radio.

De acuerdo a recomendaciones, se toman puntos de paso $r=0.5R$ y $r=0.9R$, con lo que se tiene los valores definitivos de la cuerda y el ángulo para la construcción del molde. Los resultados se muestran en la Fig. 7.

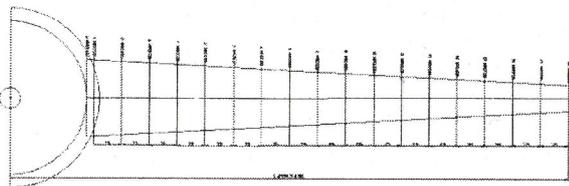


Fig. 7 Secciones en las que se ha dividido la pala.

Fabricación de la pala

Para la fabricación del molde es necesario dividir la longitud de pala en diferentes secciones, cada radio tendrá una cuerda y un ángulo de posición. La tabla 1 muestra estos datos y con las características del perfil NACA 4412 se obtiene la geometría de cada sección, que son dibujados a escala real con la finalidad de elaborar las plantillas.

La Fig. 8 muestra las plantillas de metal que se colocan a lo largo de un eje para dar forma al molde base, trabajo que requiere de pericia y experiencia para alcanzar el detalle y exactitud del molde. En esta misma figura se muestra el resultado del trabajo terminado en material fibra de vidrio (que también puede ser de aluminio o madera). Una vez terminado el molde, la fabricación de la pala se torna más simple dado que se usa fibra de vidrio, material que se acomoda a cualquier geometría y con excelentes características mecánicas.

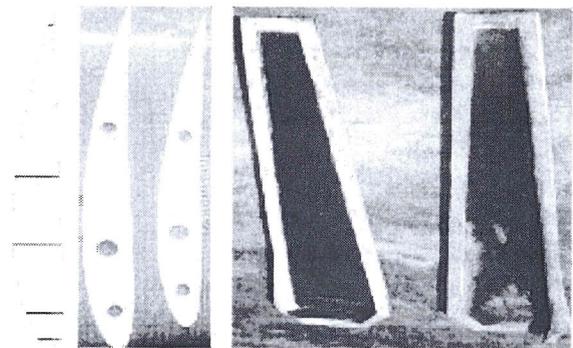
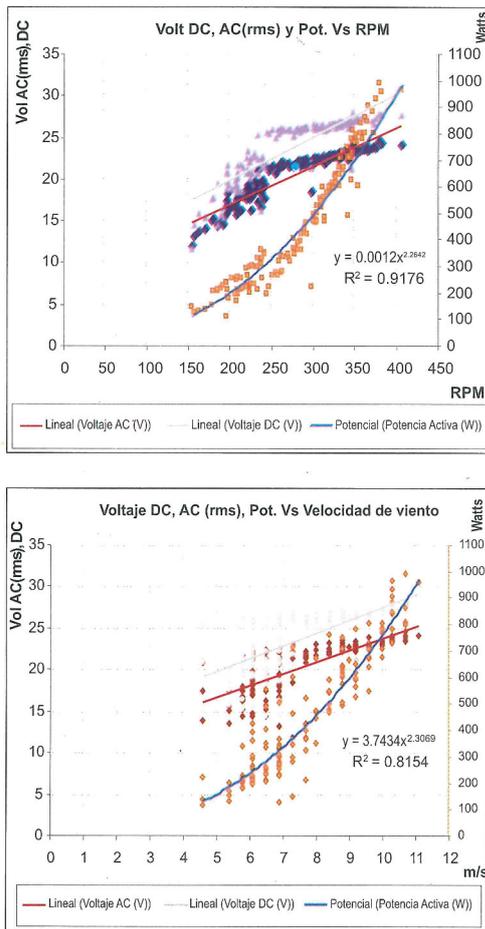


Fig. 8 Forma del perfil de una sección del álabes, dos plantillas de perfiles y moldes de los intrados y extrados del álabes.

RESULTADOS

La evaluación del sistema aerogenerador se realizó en campo, en Huacho-Lima. Para el equipamiento se preparó un panel de focos y dos baterías de 12 voltios conectadas en serie y se dotó de la instrumentación apropiada para medir los parámetros de salida: potencia, voltaje, corriente, frecuencia. Los resultados obtenidos se muestran en la Fig. 9, en donde el gráfico de la izquierda muestra el comportamiento del aerogenerador en función de la velocidad de giro del rotor, y el gráfico de la derecha muestra la potencia obtenida en función de la velocidad del viento.

Diseño y construcción de un aerogenerador de 500W con imanes permanentes para pequeñas demandas eléctricas de zonas rurales



En la fig. 10 se muestra la instalación del sistema prototipo de aerogeneración.



Fig. 10 Izamiento del aerogenerador en campo.

CONCLUSIONES

De las pruebas de campo se tiene que, si bien el sistema fue diseñado para alcanzar una potencia nominal de 500 W a una velocidad de viento de 8 m/s, de acuerdo a las mediciones en campo esta potencia se obtiene aproximadamente a 8.3 m/s.

El bajo costo y la disponibilidad en el mercado de la materia prima e insumos para la fabricación de un aerogenerador de las características del presente trabajo, son indicadores de que esta tecnología se presenta como una gran alternativa energética para atender las pequeñas demandas energéticas de las zonas rurales del Perú.

REFERENCIAS

1. Hansen, O.L., "Aerodynamics Wind Turbines, Rotors, Loads and Structure", James & James-Inglaterra-1995.
2. Gasch, R., Tvele J., "Wind Power Plants: Fundamentals, Design, Construction and Operation", James & James, Inglaterra 1995.
3. ITDG, "Small Wind Systems for Battery Charging", Documentos internos, Lima 2000.
4. Campbell, P., "Permanent Magnet Materials and Application", Cambridge University Press 1994.
5. Muljadi, E. Green, J., "Cogging Torque Reduction in a Permanent Magnet Wind, Turbine Generator", National Renewable Energy Laboratory, U.K. 2002.

6. **González, S.**, "Aerogeneración: Una Fuente Energética Competitiva", Depósito Legal AS-3233-98 ISBN 8492334533, 2000.

Correspondencia: salome@uni.edu.pe

Recepción de originales: agosto 2006

Aceptación de originales: octubre 2006