

# Diseño de un generador síncrono con imanes permanentes y rotor exterior de tracción directa para miniturbinas eólicas

David Ramírez Padillo

Estudiante de grado en ingeniería eléctrica, Universitat Politècnica de Catalunya  
Avenida Valentina Tereshkova, 33, 08800 Vilanova i la Geltrú, Barcelona, España.  
Teléfono: 647330619

## Resumen

En este artículo se describe el proceso de diseño de un generador síncrono de imanes permanentes y rotor exterior capaz de producir 6 kW a 600 rpm.

El generador se ha proyectado para ser instalado en miniturbinas eólicas de eje horizontal, transmitiendo, sin la necesidad de engranajes, la velocidad de giro de las palas al rotor, de esta manera, se reducen las pérdidas mecánicas y su mantenimiento.

Una vez realizado el diseño y determinadas sus características principales, se ha realizado el análisis con un programa de elementos finitos para observar el comportamiento del generador en su rango de funcionamiento.

## 1. Introducción

Actualmente, ha aumentado el uso de miniturbinas eólicas para proporcionar energía eléctrica en lugares donde es difícil el acceso a la red eléctrica o reducir los costes energéticos con el uso de energías renovables [4]. Es muy común el uso de instalaciones fotovoltaicas que complementan a las instalaciones eólicas para así conseguir un aumento de la energía generada.



Figura 1: Esquema básico para una vivienda

El objetivo de este proyecto es diseñar un generador que se adapte a las características de la turbina eólica usada por Bornay, para así proporcionar energía a partir de vientos moderados. No obstante, con ligeras modificaciones dimensionales, podría adaptarse a otras turbinas comerciales.

## 2. Características iniciales del generador

Para el diseño del generador se han seleccionado diversos materiales para cada una de las partes que lo conforman. El estator está constituido por la chapa eléctrica M250-50 para reducir las pérdidas magnéticas, el rotor está hecho con acero dulce con el objetivo de mantener el campo magnético en el interior del generador y, por último, los imanes estarán hechos de neodimio, ya que tienen muy buenas propiedades magnéticas.

Las características técnicas de la turbina eólica de Bornay hacen que se determinen varios parámetros constructivos y determinará el rango de funcionamiento del generador [5]. También lo protegerá de velocidades excesivas, ya que, a partir de una determinada velocidad de giro, las palas de la turbina se desorientarán con la intención de mantener constante la velocidad de giro.

La energía que proporcione el generador ha de ser suministrada a la red eléctrica, por lo que será necesario un equipo electrónico capaz de transformar la tensión y frecuencia variables del generador, a la tensión y frecuencia comunes en la red. Después de ser rectificadas la tensión de salida del generador, se utilizará un inversor de Zigor para realizar esta adaptación, cosa que condicionará las características eléctricas del generador.

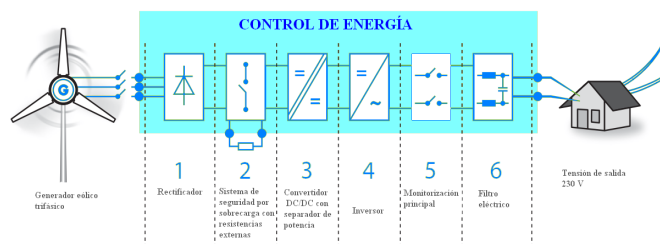


Figura 2: Esquema de conexión entre el generador y la vivienda

### 3. Proceso de diseño del generador

Primeramente, se han fijado las siguientes características que vienen condicionadas por la aplicación.

Diámetro exterior rotor:	310 mm
Diámetro exterior estator:	281,7 mm
Longitud entrehierro:	0,8 mm
Potencia útil:	6 kW
Rango tensión en c.c.	80-500 V
Velocidad máxima de giro:	600 rpm

Tabla 1: Características iniciales

#### 3.1 Longitud del inducido

A partir de la tabla 1, es posible calcular el par producido (1) y con la utilización de las ecuaciones paramétricas de las máquinas síncronas [1][3] (2), se ha podido determinar la longitud del inducido (3).

$$T = \frac{P_{turb}}{\omega_{turb}} \quad (1)$$

$$TVR = \frac{T}{V_r} = \frac{\frac{\pi}{4} \cdot \sqrt{2} \cdot K_w \cdot A \cdot B_\delta \cdot D_r^2 \cdot L}{\frac{\pi \cdot D_r^2 \cdot L}{4}} = \sqrt{2} \cdot K_w \cdot A \cdot B_\delta \quad (2)$$

$$L = \frac{T}{\frac{\pi \cdot D_r^2}{4} \cdot TVR} \quad (3)$$

#### 3.2 Inducción en entrehierro

Se ha realizado el cálculo de la inducción en el entrehierro mediante un análisis simplificado, con una permeabilidad magnética de la chapa magnética muy elevada y el efecto de las ranuras se tendrá en cuenta multiplicando el entrehierro por el factor de Carter (4). Conocido este factor, ya es posible calcular tanto el valor de la inducción en el entrehierro (5) como el flujo magnético (6).

$$K_c = \frac{\tau_\delta}{\tau_\delta + \delta - \frac{3}{4} \cdot a_\delta} \quad (4)$$

$$B_\delta = \frac{B_r}{1 + \frac{\mu_r \cdot \delta_c \cdot D_m}{l_m \cdot D_r}} \quad (5)$$

$$\Phi_\delta = \frac{D_r \cdot L}{p} \cdot B_\delta \quad (6)$$

#### 3.3 Simulación del circuito magnético

Con la ayuda del programa de elementos finitos FEMM, se ha podido realizar la simulación de las líneas de campo producidas por el efecto de los imanes, sin el efecto del paso de corriente por los conductores en la ranura.

También, el programa FEMM ha podido proporcionarnos los datos de como varia la inducción a lo largo del entrehierro.

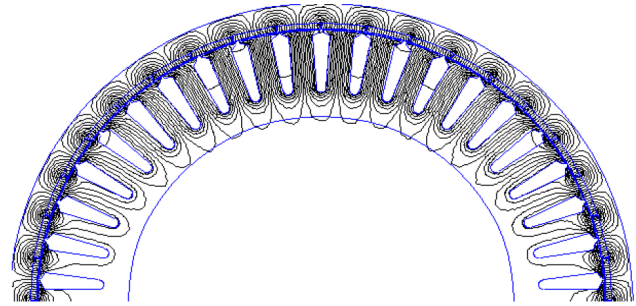


Figura 3: Líneas del campo magnético

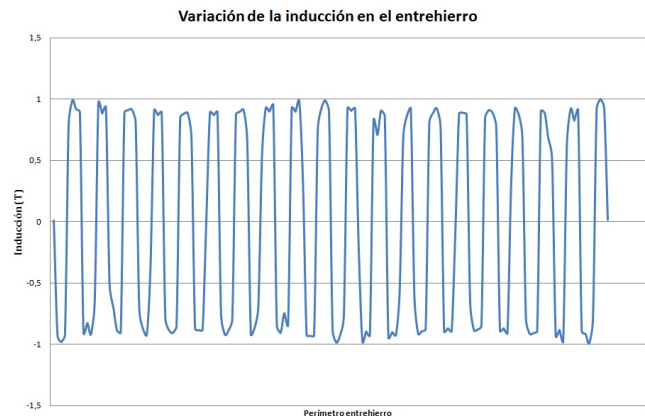


Figura 4: Variación inducción a lo largo del entrehierro

#### 3.4 Características del enrollamiento

En cuanto al enrollamiento, se ha elegido un bobinado concentrado de paso fraccionado de doble capa que, aunque tienen menor factor de enrollamiento que los bobinados distribuidos que se usan normalmente en las máquinas de corriente alterna trifásicos, tienen una forma de onda más sinusoidal, menor contenido en armónicos y bobinados más cortos[2].

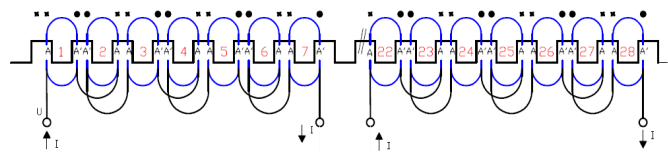
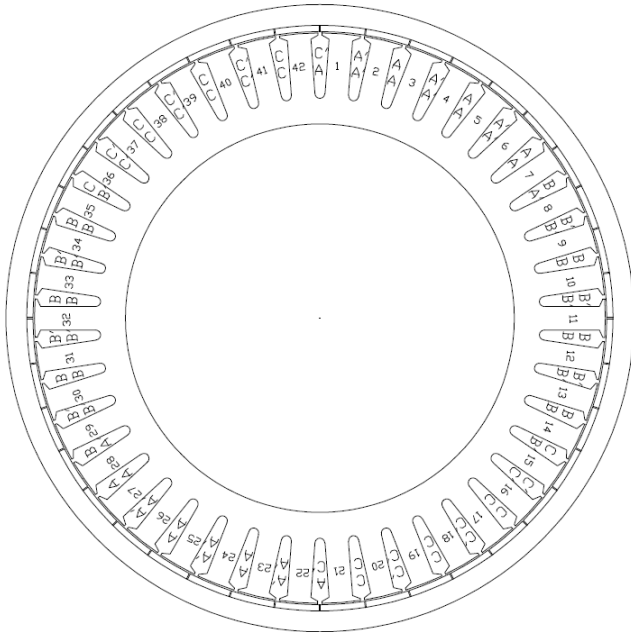


Figura 5: Esquema devanado Fase A

También, se ha elegido una combinación de 40 polos y 42 ranuras en encaja con las características que se pretenden obtener del generador. Por lo tanto, el devanado de doble capa tiene un número de ranuras por polo y fase  $n_{PF} = 0,35$  y un factor de devanado  $k_w = 0,953$ . La distribución del devanado es: A / A'A' / AA / A'A' / AA / A'A' / AA / A'.



**Figura 6:** Distribución de las fases en las ranuras del motor

### 3.5 Número de espiras

En condiciones de vacío, considerando tensión nominal a una velocidad nominal, la tensión se iguala con la fuerza electromotriz, por lo tanto, aplicando la conocida fórmula de las máquinas síncronas [1][2] (7), es posible calcular el número de espiras por fase.

$$U_f \approx E = \pi \cdot \sqrt{2} \cdot f \cdot K_w \cdot N_f \cdot \Phi_\delta \quad (7)$$

Para saber si este número de espiras es posible, se calcula el número de ranuras por fase y el número de espiras por ranura. En caso de que la relación entre el número de espiras y el número de ranuras no sea un número entero (8), se redondeará al número entero más próximo para conocer el número final de espiras por fase.

$$N_{er} = \frac{N_f}{Q_{fase}} \quad (8)$$

### 3.6 Diámetro de los conductores

Es necesario conocer la intensidad de corriente que circularán por los conductores, mediante la ecuación para el cálculo de la potencia en máquinas síncronas(9), se calcula la intensidad proporcionada por el generador síncrono en condiciones nominales.

$$I_{ad} = \frac{P_{turb}}{3 \cdot U_f \cdot \cos \varphi} \quad (9)$$

Una vez conocida la intensidad máxima que circularán por los conductores, ya es posible calcular el diámetro de los conductores para una densidad eléctrica determinada(10).

$$d_c = \sqrt{\frac{I_{ad}}{\pi \cdot \Delta}} \cdot 4 \quad (10)$$

Es imprescindible comprobar si el factor de ocupación de la ranura, ya que, el área que ocupe el cobre dentro de la ranura no ha de ser superior al 40% del área total de la ranura. En caso contrario, el enrollamiento no podría realizarse por falta de espacio.

### 3.7 Resistencia del enrollamiento

Como bien es sabido, la resistencia de un conductor eléctrico es proporcional a su longitud. Para saber la resistencia del enrollamiento, se ha de calcular primeramente la longitud de la espira media (11). Conocido este valor, ya se podrá conocer la longitud del conductor por fase, por lo tanto, es posible realizar el cálculo de su resistencia eléctrica (12).

$$l_{em} = 2 \cdot L + 10 \cdot t_{dm} \quad (11)$$

Donde ( $t_{dm}$ ) es la anchura media del diente en milímetros.

$$R_{fase_{20^\circ C}} = \rho_{cobre} \cdot \frac{N_f \cdot l_{em}}{S_c} \quad (12)$$

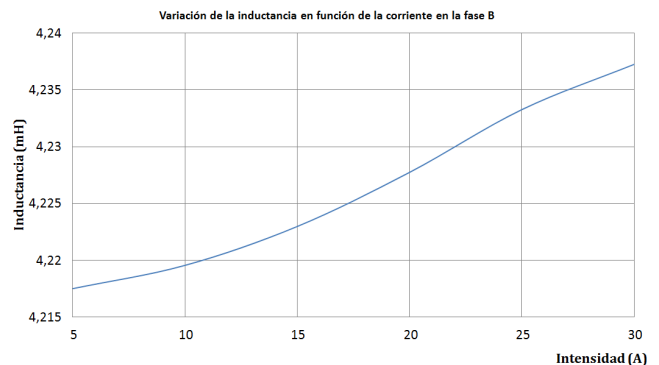
Lógicamente, la resistencia varía en función de la temperatura, por lo que, para calcular dicha resistencia a una temperatura determinada, ha de aplicarse la ecuación siguiente:

$$R_{fase_{T_f}} = R_{fase_{T_i}} \cdot \left( \frac{235 + T_f}{235 + T_i} \right) \quad (13)$$

Donde ( $T_f$ ) es la temperatura de trabajo esperada que alcance el generador en condiciones nominales.

### 3.8 Inductancia en el enrollamiento

En este caso, el valor de la inductancia por fase del devanado, se ha realizado a partir de los datos obtenidos por el programa FEMM. En las simulaciones realizadas se le han aplicado al enrollamiento diferentes niveles de intensidad de corriente para observar su evolución a medida que la corriente que circula por el conductor va aumentando. De esta manera, además de conocer la inductancia en condiciones nominales también se puede observar su evolución incluso en condiciones de sobreintensidad.



**Figura 7:** Evolución de la inductancia en función de la corriente (en valor RMS) en la fase B

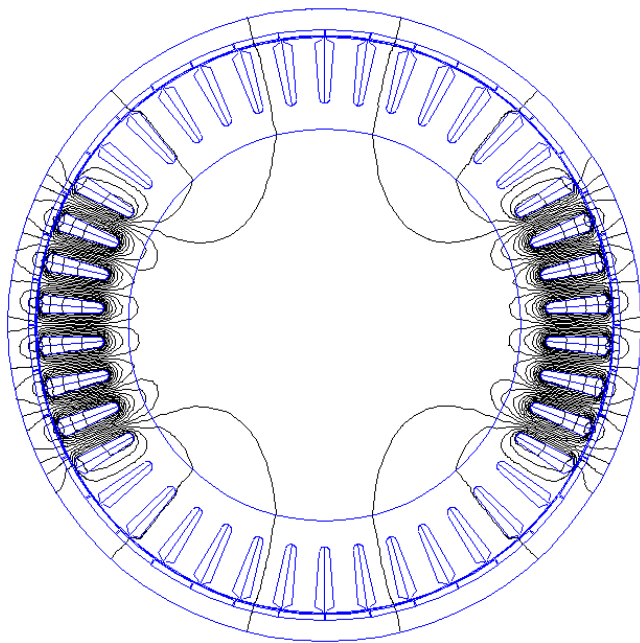


Figura 8: Inducción magnética producida por la fase B

Como se puede observar en la figura 7, la inductancia aumenta sensiblemente al aumentar la intensidad de corriente por sus bobinas. También podemos estimar que, en condiciones nominales y el generador funcionando en vacío, el valor de la inductancia.

### 3.9 Inductancia en cabezas de bobina

Como en el caso anterior, se ha utilizado el programa de elementos finitos FEMM para encontrar la inductancia en las cabezas de bobina, pero en esta ocasión se ha realizado una simulación de su sección longitudinal para ver cómo afectan las cabezas de bobina en el circuito magnético.

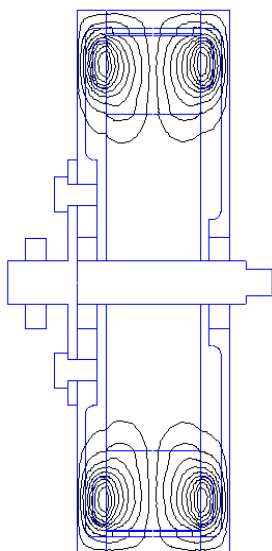


Figura 9: Líneas de campo magnético producido en las cabezas de bobina

Como se puede observar, el flujo se concentra en las cabezas de bobina, pero el campo magnético también es dispersado a través de los elementos adyacentes, como

puede ser la tapa de aluminio.

Para conocer la inductancia total producida por todas las cabezas de bobina que hay en el generador, se ha de aplicar la ecuación siguiente:

$$L_{cbT} = l_{cb} \cdot N_{dientes} \cdot 2 \cdot L_{cb} \quad (14)$$

Donde ( $l_{cb}$ ) es la longitud de la cabeza de bobina.

Para el cálculo de la inductancia total, simplemente se han de sumar las inductancias obtenidas anteriormente.

$$L_T = L_i + L_{cbT} \quad (15)$$

## 4. Circuito equivalente

A partir de los resultados obtenidos en los apartados anteriores, se pueden determinar los valores que componen el circuito equivalente simplificado del generador para cualquiera que sea su velocidad de giro[1][2].

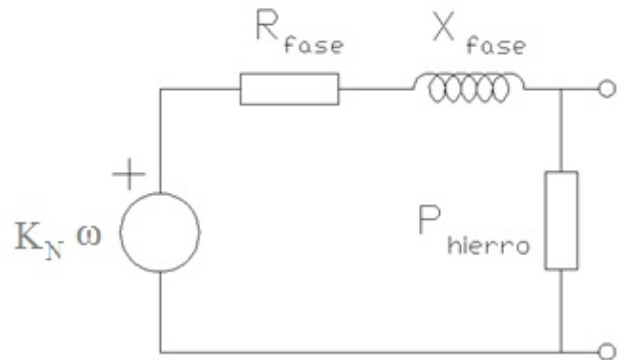


Figura 10: Circuito equivalente del generador

Donde  $K_N$  es la tensión de fase que proporciona el generador en función de su velocidad de giro.  $R_{fase}$  es la resistencia por fase del enrollamiento, este valor no varía a lo largo de su rango de funcionamiento. La expresión que determina el valor de la reactancia por fase en función de la velocidad es la siguiente:

$$X_{fase}(\omega) = p \cdot L_T \cdot \omega \quad (16)$$

Donde ( $\omega$ ) es la velocidad angular de giro en rad/s.

Finalmente,  $P_{hierro}$  son las pérdidas magnéticas producidas en la chapa magnética. Estas pérdidas también varían en función de la velocidad, como podrá verse seguidamente.

## 5. Pérdidas en el generador

Las pérdidas en el generador pueden dividirse en pérdidas magnéticas, pérdidas eléctricas y pérdidas mecánicas[1].

Para el cálculo de las pérdidas magnéticas, es decir, las pérdidas en el hierro, pueden calcularse a partir de la siguiente ecuación:

$$P_{hierro} = k \cdot Perd_{FEO} \cdot \left(\frac{f}{f_0}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot \left( m_d \cdot \left(\frac{B_d}{B_0}\right)^2 + m_{ce} \cdot \left(\frac{B_{ce}}{B_0}\right)^2 \right) \quad (17)$$

Donde;

- $Perd_{FE0}$  = Pérdidas en el hierro por unidad de masa a una frecuencia dada ( $f_0$ ) y a una inducción determinada ( $B_0$ ), para chapa magnética 250-50,  $Perd_{FE0} = 2,5 \text{ W/kg}$ ;  $f_0 = 50 \text{ Hz}$  y  $B_0 = 1,5 \text{ T}$ .
- $K$  = Coeficiente que tiene en cuenta las pérdidas adicionales en el hierro y el incremento de pérdidas que se produce en el punzonado y en la manipulación de la chapa magnética. Valores típicos:  $k = 1,5 - 2$ .
- $f$  = frecuencia de operación
- $B_d$  = Inducción máxima en los dientes
- $B_{ce}$  = Inducción máxima en la corona del estator
- $m_d$  = masa de los dientes
- $m_{ce}$  = masa de la corona del estator

El valor de la inducción máxima en la corona del estator y en los dientes no varía significativamente, por lo que, se puede confirmar que estas pérdidas varían principalmente en función de la frecuencia.

En cuanto al cálculo de las pérdidas eléctricas debidas al efecto Joule en el devanado. Estas pérdidas dependen de la intensidad de corriente que circula por cada una de sus fases (18).

$$P_{cobre} = m \cdot R_{fas_{\phi_0 C}} \cdot I_{ad}^2 \quad (18)$$

Finalmente, las pérdidas mecánicas se pueden dividir entre las causadas por la fricción en los rodamientos (19) y la fricción con el aire producido por el giro del rotor (20). Como se podrá ver, estas pérdidas también varían en función de la velocidad de giro.

$$P_{cojinetes} = 0.15 \cdot n \cdot \left( \frac{N}{1000} \right) \cdot d_c^3 \quad (19)$$

$$P_{rozaire} = k_p \cdot D_r \cdot (L + 0.6 \cdot \tau_p) \cdot v_t^2 \quad (20)$$

Donde;

- ( $n$ ) es el número de cojinetes
- ( $d_c$ ) es el diámetro del eje
- ( $k_p$ ) es un coeficiente de valor 10 al tratarse de una máquina síncrona
- ( $v_t$ ) es la velocidad tangencial del rotor

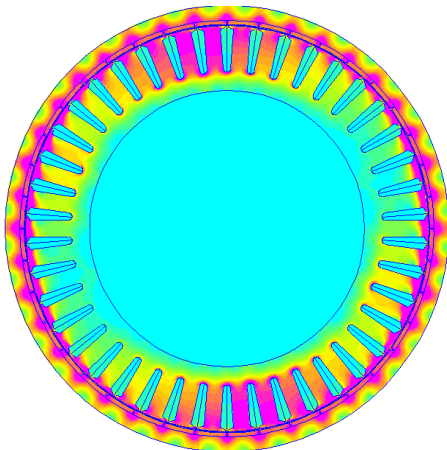


Figura 11: Mapa de la inducción magnética con generador en carga

## 6. Resultados

Una vez realizado todas las etapas del diseño, las características finales del generador que se ha diseñado son las siguientes:

Diámetro exterior del rotor	310 mm
Diámetro exterior del estator	289,7 mm
Entrehierro	0,8 mm
Longitud del estator	55 mm
Número de polos en rotor	40
Número de dientes en estator	42
Número de espiras por diente	19
Número de espiras por fase	266
Longitud de la bobina	4296 mm
Resistencia por fase	0,565 $\Omega$
Inductancia por fase	4,295 mH
Reactancia por fase	7,4595 $\Omega$
Intensidad nominal	12,7 A
Sección conductor de la bobina	2,27 mm <sup>2</sup>
Inducción máxima en entrehierro	0,9344 T
Flujo máximo en entrehierro	921,25 $\mu\text{Wb}$
Constante de proporcionalidad entre tensión y velocidad de giro ( $K_N$ )	0,34 V/rpm

Tabla 2: Características finales del generador síncrono

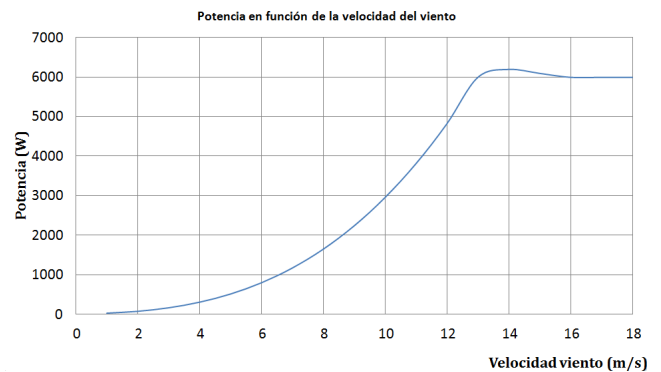
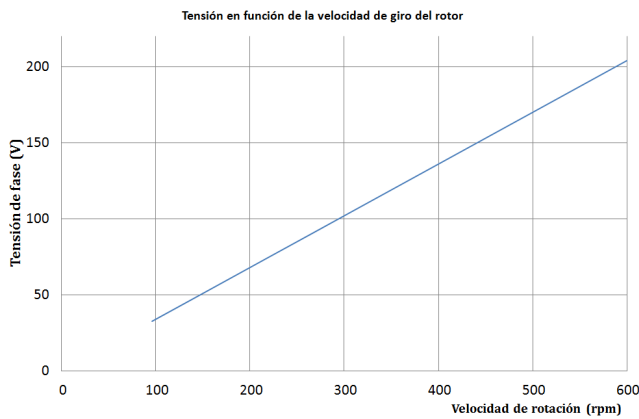
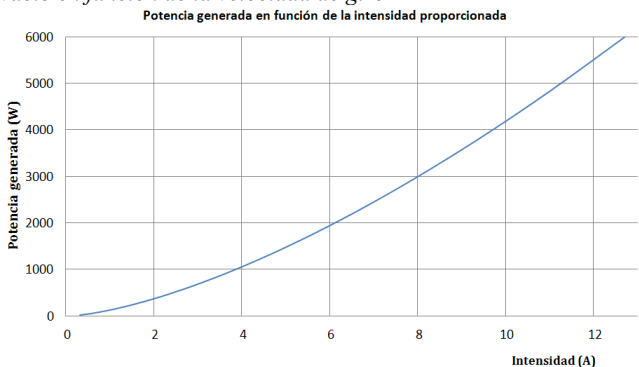


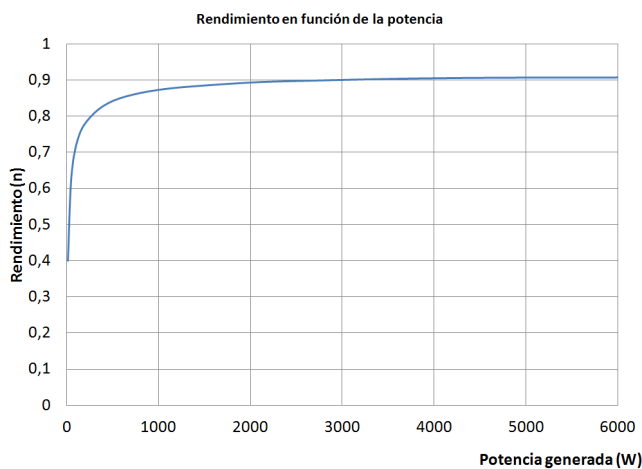
Figura 12: Potencia en función del viento



**Figura 13:** Evolución de la tensión de salida en condiciones de vacío en función de la velocidad de giro



**Figura 14:** Evolución de la potencia en función de la intensidad de corriente generada



**Figura 15:** Evolución del rendimiento a medida que se aumenta la potencia generada

En la figura 12, puede apreciarse como la potencia que proporciona el viento aumenta al cubo de su velocidad, tenemos que la potencia generada por el generador aumenta lentamente entre los 2 m/s y los 5 m/s para luego subir más rápidamente entre los 5 m/s y los 12 m/s, que es donde alcanza su potencia nominal. Cuando la velocidad del viento es de entre los 12 m/s y los 14 m/s es cuando se produce el cambio de la incidencia de las palas para que, a partir de los 14 m/s la velocidad de giro de las mismas se mantenga constante y, de esta manera, también se mantiene constante la potencia que proporciona el generador.

También se puede ver que para potencias inferiores a los 1000 W, el rendimiento del generador es bastante bajo. Esto es debido a que las pérdidas magnéticas y mecánicas son elevadas en comparación a la potencia generada. En cambio, a partir de los 2000 W, el rendimiento tiende a estabilizarse alrededor del 91%, valor bastante cercano al estimado inicialmente. Por lo tanto, podemos decir que, para conseguir un rendimiento óptimo del generador, lo ideal sería instalar el aerogenerador en una zona en la que la velocidad del viento sea la suficiente como para proporcionar, como mínimo, los 2 kW.

## 7. Estudio económico

Con el objetivo de construir un prototipo del generador diseñado para realizarle diferentes ensayos, el coste económico que supone este proceso puede dividirse en tres grupos: coste empleado en la fase del diseño, coste de los materiales y componentes utilizados y el coste de la mano de obra para realizar el prototipo.

El coste que supone la fase de diseño es de 15.000€. Este valor es el más elevado debido a las horas de trabajo necesarias por el diseñador o grupo de diseñadores para la realización del proyecto.

Una vez diseñado, es necesaria la compra de los materiales que se desean utilizar, como la chapa eléctrica, los imanes de neodimio y el acero dulce, y los componentes eléctricos para su conexionado, como puede ser el cableado exterior, el rectificador y el inversor. El coste de los materiales necesarios para la construcción supone una cuantía de 160€. Habría que añadirle también unos 5.120€ en la compra de los componentes necesarios para conectarlo a la red eléctrica, donde el inversor es el componente de mayor valor, unos 3.620€.

Finalmente, es necesario un proceso de construcción del prototipo, en el cual se han de tratar los materiales para que cumplan con las dimensiones y características propuestas en el diseño, como puede ser el corte de las chapas eléctricas y el mecanizado de las piezas. Este proceso supone un coste de 2.380€, donde el proceso de mecanizado es el más costoso.

Por lo tanto, el coste del diseño y la construcción de un prototipo del generador eléctrico supone un valor de 22.660€. Lógicamente, una vez se adapte el sistema de fabricación y se realicen grandes pedidos de los materiales y componentes necesarios, el coste del generador se reducirá considerablemente. Se estima que el coste final del generador será de 1.500€.

## 8. Conclusión

En este artículo se ha descrito los pasos a seguir para el diseño de un generador síncrono con imanes permanentes y rotor exterior que cumple con los requisitos necesarios para ser instalado en una turbina eólica de eje horizontal, y que se adapta, sobretudo, en la aeroturbina que fabrica Bornay para sus generadores de 6 kW.

El generador que se ha diseñado produce energía eléctrica en un amplio rango de velocidades de giro de su rotor, gracias al número elevado de polos y a los mecanismos que regulan la incidencia de las palas de la turbina eólica, de esta manera, hacen que la generación de energía sea posible con vientos de 2 m/s hasta vientos de más de 40 m/s.

El hecho de utilizar un imán permanente como lo es el neodimio, hace que la potencia entregada sea bastante elevada para un generador de tamaño reducido. Como también proporciona un buen rendimiento para potencias superiores a los 2 kW. Esto hace que el aprovechamiento de la energía eólica sea óptima para vientos superiores a los 8 m/s.

## Referencias

[1] Stephen J. Chapman. *Máquina eléctricas*. 4ª Edición. Mc Graw Hill. México: Punta Santa Fe, 2005.

[2] Ion Boldea. *Variable speed generators*. CRC Taylor and Francis. EEUU: New York, 2006.

[3] Rafael Sanjurjo Navarro. *Máquinas eléctricas*. Madrid: García-Maroto Editores. 2011.

[4] Jose M<sup>a</sup> de Juana, et al. *Energías renovables para el desarrollo*. Paraninfo. España: Madrid, 2003.

[5] Miguel Villarrubia López. *Ingeniería de la energía eólica*. Marcombo. España: Barcelona, 2012.