



# DISEÑO DE UN ALTERNADOR DE FLUJO AXIAL CON IMANES PERMANENTES

AUTOR:

JULIO JAVIER MURILLO JULIÁN

A CARGO DE LA ESCUELA UNIVERSITARIA  
DE INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL

DIRECTOR DE PROYECTO: VICENTE ALCALÁ HEREDIA

ZARAGOZA, FEBRERO DE 2012

## ÍNDICE

	Página
<b>1. Introducción.....</b>	<b>8</b>
1.1 Objetivo del trabajo.....	8
1.2 Alcance del trabajo.....	9
1.3 Etapas del diseño.....	11
1.4 Peticionario del proyecto.....	12
<b>2. Generalidades sobre la energía eólica.....</b>	<b>13</b>
2.1 Características del viento.....	13
2.2 Aerogeneradores de eje horizontal.....	20
2.3 Aerogeneradores de eje vertical.....	24
2.3.1 Generador Darrieus.....	25
2.3.2 Generador Savonius.....	26
<b>3. El alternador de imanes permanentes.....</b>	<b>28</b>
3.1 Principio de funcionamiento.....	28
3.2 Diferentes topologías del rotor.....	31
3.3 Diferentes configuraciones para la máquina de flujo axial.....	33
3.4 Aplicaciones de la máquina de flujo axial de imanes permanentes.....	35
3.4.1 Generación de energía.....	36
3.4.2 Vehículos eléctricos.....	37
3.4.3 Ascensores.....	41

3.4.4 Aplicaciones navales.....	42
3.4.5 Otras aplicaciones.....	44
<b>4. Diseño del prototipo.....</b>	<b>45</b>
4.1 Principio de funcionamiento.....	45
4.2 Rotor utilizado para el diseño.....	48
4.3 Diseño del alternador.....	51
4.3.1 Cálculo del número de polos y de imanes.....	53
4.3.2 Cálculo del número de bobinas.....	57
4.3.3 Fuerza electromotriz inducida en las bobinas.....	58
4.3.4 Elección de los imanes.....	64
4.3.5 Elección de los conductores.....	66
4.3.6 Tamaño y distribución de las bobinas.....	67
4.3.7 Tipo de devanado.....	68
4.3.8 Dimensionamiento del cuerpo del alternador.....	70
4.3.9 Modelo circuital equivalente.....	72
4.3.10 Especificaciones finales del alternador.....	75
4.3.11 Pérdidas eléctricas y magnéticas.....	77
<b>5. Análisis de la onda de inducción magnética en el entrehierro mediante el método de elementos finitos.....</b>	<b>81</b>
5.1 Análisis preliminares de flujo.....	82
5.2 Flujo magnético para $\delta=1.5$ mm.....	85
5.3 Flujo magnético para $\delta=1.3$ mm.....	87
5.4 Flujo magnético para $\delta=1.2$ mm.....	89

	Página
5.5 Flujo magnético para $\delta=1$ mm.....	91
5.6 Consideraciones finales.....	93
<b>6. Conclusiones.....</b>	<b>96</b>
<b>7. Bibliografía.....</b>	<b>98</b>

## **Índice de figuras**

	Página
Figura 1: Distribución de Weibull.....	14
Figura 2: Demostración de la ley de Betz.....	16
Figura 3: Relación entre potencias y velocidades de entrada y de salida.....	18
Figura 4: Potencias en el tubo de corriente.....	19
Figura 5: Comparativa de rendimiento de aerogeneradores.....	21
Figura 6: Aerogenerador de eje horizontal.....	22
Figura 7: Partes principales de un aerogenerador de eje horizontal.....	23
Figura 8: Aerogenerador Darrieus.....	25
Figura 9: Diagrama de flujo del generador Savonius.....	26
Figura 10: Esquema del generador Savonius.....	27
Figura 11: Curva de histéresis para un material ferromagnético.....	29
Figura 12: Curvas de magnetización de distintos materiales.....	30
Figura 13: Rotores de flujo axial y de flujo radial.....	32
Figura 14: Máquina de flujo axial de doble estator.....	33
Figura 15: Máquina de flujo axial simple con balance de estator.....	34
Figura 16: Vehículo híbrido.....	38

Figura 17: Motor en el eje de la rueda.....	39
Figura 18: Densidad de potencia de la máquina de flujo axial.....	46
Figura 19: Estructura del alternador.....	46
Figura 20: Explicación de la Ley de Lorentz.....	58
Figura 21: Curva de magnetización NdFeB 52 MGOe.....	65
Figura 22: Diagrama de ubicación de las bobinas del estator.....	69
Figura 23: Circuito equivalente del alternador.....	74
Figura 24: Inducción magnética y líneas de flujo para estator 10 mm, $\delta=1.5$ mm	82
Figura 25: Inducción magnética y líneas de flujo para estator 5 mm, $\delta = 1.5$ mm.	83
Figura 26: Inducción magnética y líneas de flujo para $\delta = 1.5$ mm.....	85
Figura 27: Intensidad de campo magnético para $\delta = 1.5$ mm.....	86
Figura 28: Inducción magnética y líneas de flujo para $\delta = 1.3$ mm.....	87
Figura 29: Intensidad de campo magnético para $\delta = 1.3$ mm.....	88
Figura 30: Inducción magnética y líneas de flujo para $\delta = 1.2$ mm.....	89
Figura 31: Intensidad de campo magnético para $\delta = 1.2$ mm.....	90
Figura 32: Inducción magnética y líneas de flujo para $\delta = 1$ mm.....	91
Figura 33: Intensidad de campo magnético para $\delta = 1$ mm.....	92
Figura 34: Inducción magnética y líneas de flujo para $B_{\max}= 8000$ Gauss.....	94
Figura 35: Intensidad de campo magnético para $B_{\max}= 8000$ Gauss.....	95

## **Índice de tablas**

	Página
Tabla 1: Exposición de datos eólicos.....	49
Tabla 2: Frecuencia en función de la velocidad del viento.....	55
Tabla 3: Fem inducidas por espira.....	60
Tabla 4: Conexión de 6 bobinas en serie.....	61
Tabla 5: Conexión de 2 grupos en paralelo de 3 bobinas.....	62
Tabla 6: Conexión de 3 grupos en paralelo de 2 bobinas.....	62
Tabla 7: Características de los imanes.....	64
Tabla 8: Características eléctricas del alternador.....	75
Tabla 9: Resumen de características.....	76
Tabla 10: Pérdidas en el hierro.....	78
Tabla 11: Pérdidas en el cobre.....	79
Tabla 12: Pérdidas eléctricas totales.....	80

## **1. INTRODUCCIÓN**

En este capítulo se realiza una presentación general del trabajo, donde se explica el objetivo, alcance y motivación del trabajo, así como las principales etapas de diseño a desarrollar.

### **1.1 Objetivo del trabajo**

En el presente trabajo se expone el diseño de un alternador de flujo axial con imanes permanentes, para aplicación en un generador eólico de tipo Savonius de pequeña potencia, con objeto de trabajar independiente de la red, abasteciendo pequeños consumos. El diseño está orientado a que la máquina genere electricidad a partir de bajas velocidades de viento, lo cual evita el sistema de transmisión del mecanismo elevador de velocidad, lo que mejora el rendimiento del sistema eólico.



## **1.2 Alcance y motivación del trabajo**

Este trabajo se centra en el diseño de un alternador de imanes permanentes, para formar parte de un generador eólico de eje vertical de tipo Savonius, con unos parámetros ya definidos de antemano y que se expondrán más adelante.

No se van a tratar puntos tales como análisis mecánicos de fuerzas o de pares, dejándose abierto el proyecto para una posible ampliación. Tampoco se va a estudiar el sistema de regulación del aerogenerador, estando este, al igual que las palas, definido de antemano.

Una de las ventajas de las máquinas con imanes permanentes, radica en que se reduce su volumen y peso en comparación con una máquina equivalente con devanado de excitación en el rotor.

Las máquinas con imanes permanentes logran altos rendimientos con reducido tamaño. Esto posibilita la aplicación de generadores con flujo axial e imanes permanentes para la producción de energía eléctrica mediante turbinas eólicas.

Las mejoras tecnológicas aplicadas sobre los aerogeneradores de eje horizontal y las consecuentes mejoras en las prestaciones técnicas y económicas de estas máquinas, dejaron en segundo plano el desarrollo de los aerogeneradores de eje vertical. Sin embargo, a pequeña y mediana escala, para consumos independientes de la red eléctrica, los aerogeneradores de eje vertical presentan las siguientes ventajas respecto a los de eje horizontal:

Diseño de un alternador de flujo axial con imanes permanentes

- Estructura simple.
- Bajo coste de implementación.
- Bajo coste de instalación.
- Fácil mantenimiento.

### **1.3 Etapas del diseño**

El trabajo está dividido en varias etapas, que se deberán realizar de forma sucesiva. Estas etapas son las siguientes:

- Exposición de los parámetros eólicos del diseño
  
- Cálculo y diseño de los componentes eléctricos y magnéticos del sistema.
  
- Análisis mediante elementos finitos de la disposición del flujo magnético a lo largo de la longitud axial del alternador, utilizando el programa de análisis FEMM.
  
- Conclusiones obtenidas.

Diseño de un alternador de flujo axial con imanes permanentes

#### **1.4 Peticionario del proyecto**

Este proyecto está realizado por encargo del departamento de Ingeniería Eléctrica de la Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial de Zaragoza, en concepto de Proyecto de Final de Carrera.

## **2. GENERALIDADES SOBRE LA ENERGÍA EÓLICA**

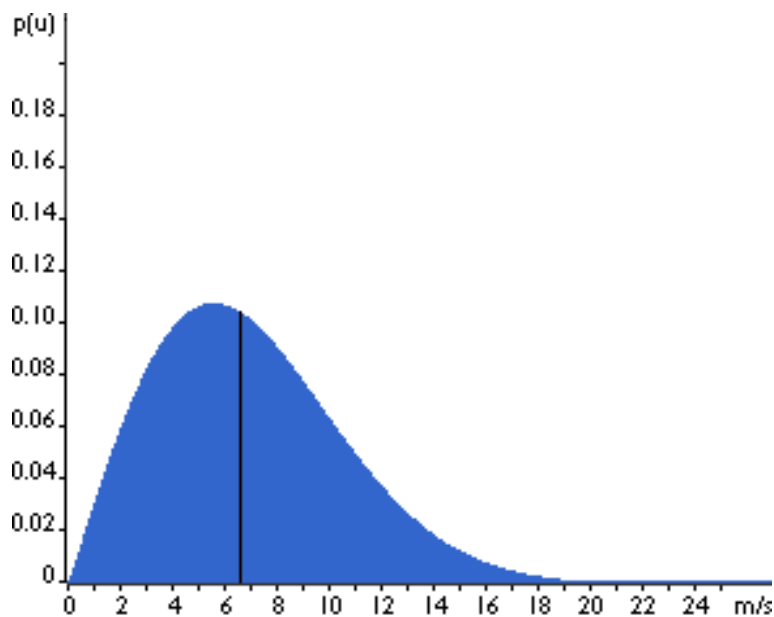
### **2.1 Características del viento**

El viento es una de las consecuencias de los efectos de la energía solar sobre la tierra: el sol calienta los diferentes puntos de la masa atmosférica de una forma desigual, creando variaciones en la densidad y en la presión del aire, de modo que se producen corrientes de aire.

El viento tiene dirección y velocidad irregulares a escala de segundos (turbulencias), de minutos (ráfagas), de días y de semanas. También es muy importante la ubicación geográfica. La altitud hace variar para una misma región la disponibilidad del viento, ya que el viento va siguiendo las sinuosidades del suelo.

Dadas las características tan dispersas y aleatorias de la energía eólica, es obvio que la única manera de estudiar si un emplazamiento es adecuado o no, es utilizando la estadística. Para ello se recurre a la representación de la velocidad del viento como una variable aleatoria con una cierta función de distribución.

Normalmente se utiliza la distribución de Weibull, que representa la probabilidad de que se produzca una determinada velocidad del viento:



**Figura 1: Distribución de Weibull**

Se observa que a velocidades cercanas a cero, y a partir de unos 13 m/s se presentan probabilidades muy bajas de que se produzca el viento, obteniéndose la probabilidad más alta alrededor de 5.5 m/s.

La máxima potencia que podemos conseguir del viento, utilizando cualquiera de las formas conocidas de aprovechamiento de energía eólica, se calcula con la siguiente fórmula aproximada, que tiene en cuenta todas las pérdidas de la máquina (mecánicas y aerodinámicas):

$$P = 0.15 * D^2 * v^3 \quad (2.1)$$

Donde:

- P: Potencia [W]
- D: Diámetro del rotor [m]
- v: Velocidad del viento [m/s]

Lo que más cabe destacar en esta expresión, es que la potencia que obtenemos del viento aumenta con el cubo de su velocidad, por tanto, como el alternador que vamos a diseñar trabajará a bajas velocidades, se puede apreciar que la potencia obtenida será pequeña. Por otra parte, su rango de velocidad de trabajo estará comprendido en la zona más favorable de la distribución de Weibull.

Para calcular la potencia promedio que es aprovechada por el rotor debemos usar la llamada ley de Betz que es demostrada de la siguiente manera:



**Figura 2: Demostración de la ley de Betz**

Supongamos que la velocidad a la que entra el viento al tubo de corriente es de valor  $v_1$  y a la velocidad que sale es de  $v_2$ , podemos suponer que la velocidad a la que el viento entra al aerogenerador es de  $(v_1+v_2)/2$ , ya que se encuentra a la mitad del recorrido del viento. El flujo másico que entra al rotor entonces tiene valor de:

$$M=\rho*A*((v_1+v_2)/2) \quad (2.2)$$

Donde:

- M: Flujo másico (Kg/s)
- $\rho$ : Densidad del aire (Kg/m<sup>3</sup>)
- A: Área barrida por las palas del rotor (m<sup>2</sup>)
- $v_1, v_2$ : Velocidad del viento a la entrada y a la salida del tubo de corriente (m/s)



Dado que en el tubo de corriente se debe conservar la potencia, la potencia a la entrada tiene que ser igual a la suma de la potencia de salida más la potencia generada en el rotor.

$$P_1 = P_{\text{rotor}} + P_2 \quad (2.3)$$

Entonces la potencia que se produce en el rotor es:

$$P_{\text{rotor}} = 1/2 * M * (v_2^2 - v_1^2) \quad (2.4)$$

Y juntando las expresiones (2.2) y (2.4), obtenemos:

$$P_{\text{rotor}} = (\rho/4) * (v_1^2 - v_2^2) * (v_1 + v_2) * A \quad (2.5)$$

La potencia del viento antes de llegar al rotor viene dada por:

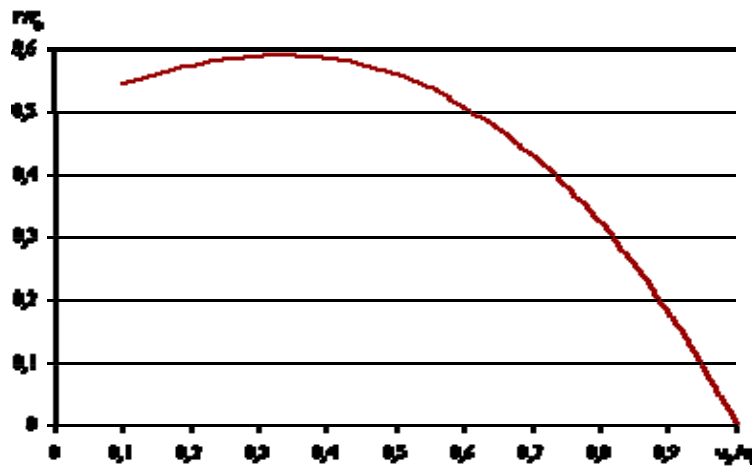
$$P_1 = (1/2) \rho A v_1^3 \quad (2.6)$$

Por tanto, la potencia obtenida a la salida del tubo de corriente es:

$$P_2 = P_{\text{rotor}} - P_1 = 1/2 \rho A * (1/2 * (v_1^2 - v_2^2) * (v_1 + v_2) - v_1^3) \quad (2.7)$$

Al dividir la expresión (2.5) por la expresión (2.6), para una misma área A, se obtiene el coeficiente de potencia, en función de las velocidades  $v_1$  y  $v_2$ , como se indica en la expresión (2.8). Al derivar esta expresión con respecto al cociente  $v_2/v_1$ , se obtiene el máximo coeficiente de potencia posible, que se obtiene para una razón de 1:3 entre  $v_2$  y  $v_1$ , y que marca el límite de Betz de aprovechamiento de la energía eólica, de 0,5926.

$$P/P_0 = 1/2(1 - (v_2/v_1)^2) * (1 + v_2/v_1) \quad (2.8)$$



**Figura 3: Relación entre potencias y velocidades de entrada y de salida**

Cabe destacar que en este cálculo se desprecian factores de pérdida tales como la fricción de las aspas, la rotación de la estela de aire detrás del rotor y las pérdidas en la cercanía de la punta de las aspas.

En general, el viento incide sobre las palas del rotor para producir un movimiento de rotación. El viento golpea físicamente al generador y lo arrastra con esa fuerza de choque. El límite teórico máximo o límite de Betz es aproximadamente del 60 % de la energía disponible en la corriente del viento.

Una razón de este bajo aprovechamiento de la energía tiene que ver con la cuestión de que es lo que va hacerse con el aire después de que pase por las palas del aerogenerador. Si pudiera extraerse toda la energía del viento, se tendría una gran cantidad de aire quieto detrás de las palas bloqueando el acceso a una nueva corriente de aire. Entonces, la máquina se pararía hasta que se eliminara el aire quieto de detrás de las palas, para lo cual sería necesario un gasto de energía. Por lo tanto para que la máquina pueda tener un funcionamiento continuo, no se puede utilizar una cantidad de energía superior a la marcada por el límite de Betz.

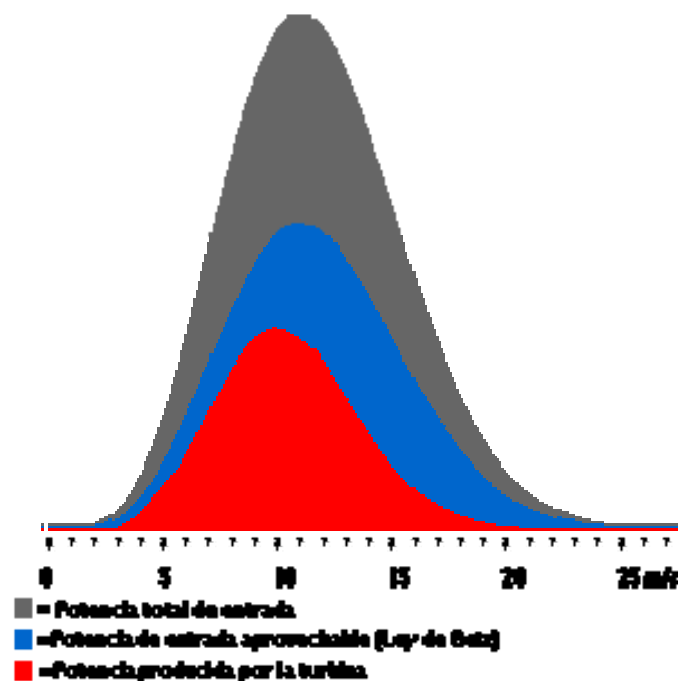


Figura 4: Potencias en el tubo de corriente

## **2.2 Aerogeneradores de eje horizontal**

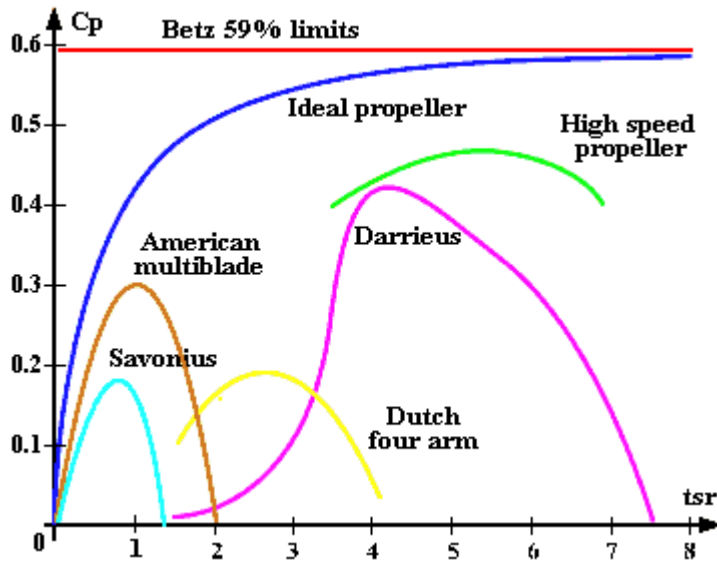
En base a la orientación de las palas, los aerogeneradores se pueden dividir en dos grandes grupos: de eje horizontal y de eje vertical.

El funcionamiento básico de un aerogenerador es muy simple. El viento, al hacer girar las palas del rotor, genera una energía cinética que se transmite, a través del eje principal, al generador. Se genera una corriente eléctrica que es transmitida mediante cables conductores a un sistema de regulación o control, y más adelante se almacena en baterías o se evacua hacia la red de transporte de energía eléctrica.

Los aerogeneradores de eje horizontal son los que han tenido más aplicación industrial a lo largo de la historia. La mayoría de los aerogeneradores instalados en el mundo para producción de energía en grandes cantidades son de eje horizontal y velocidad fija. Emplean mucho mejor la energía del viento que los de eje vertical, ya que se sitúan en torres a mucha distancia del suelo, donde la velocidad del viento es mucho mayor. La mitad aproximadamente, limitan la potencia por entrada en pérdida, y la mitad emplean un control activo de ángulo de pala.

La mayoría de los sistemas de velocidad fija emplean generadores de inducción, ya sean de jaula de ardilla o doblemente alimentados. Las principales ventajas frente al generador síncrono son el menor precio, robustez, ausencia de circuito de excitación, mejor comportamiento transitorio y mejor comportamiento ante sobrecarga. No obstante, también existen sistemas que emplean alternadores síncronos. Entre los aerogeneradores de velocidad variable, los generadores más empleados son los de inducción doblemente alimentados.

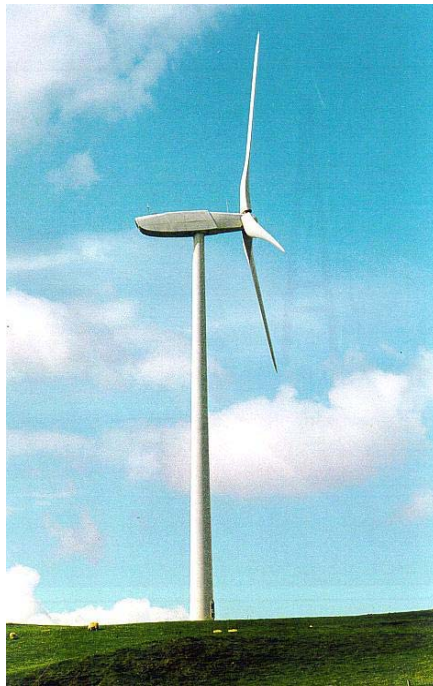
Además, los aerogeneradores modernos de eje horizontal y alta velocidad, son los que más acercan su rendimiento al límite teórico marcado por el análisis de Betz.



**Figura 5: Comparativa de rendimiento de aerogeneradores**

En la gráfica, se presenta el coeficiente de potencia enfrenteado al TSR. Este parámetro representa la relación de velocidad específica o periférica TSR (Tip-Speed-Ratio), es un término que sustituye al número de revoluciones por minuto del rotor. Sirve para comparar el funcionamiento de máquinas eólicas diferentes, por lo que también se le suele denominar velocidad específica. El TSR indica que la periferia de la pala circula a una velocidad tantas veces mayor que la velocidad del viento, y es la relación entre la velocidad periférica de la pala y la velocidad del viento.

Todos los aerogeneradores de eje horizontal tienen su eje de rotación principal en la parte superior de la torre, que tiene que orientarse hacia el viento de alguna manera. Los aerogeneradores pequeños se orientan mediante una veleta, mientras que los más grandes utilizan un sensor de dirección y se orientan por servomotores.



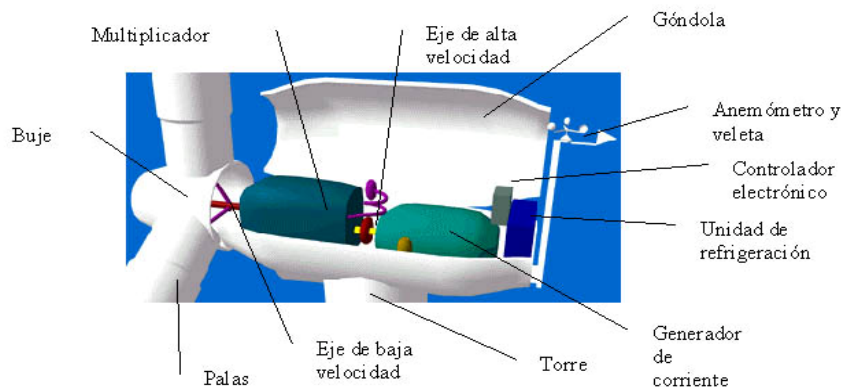
**Figura 6: Aerogenerador de eje horizontal**

Pueden trabajar de manera aislada o agrupados en parques eólicos o plantas de generación eólica, distanciados unos de otros, en función del impacto ambiental y de las turbulencias generadas por el movimiento de las palas.

## Diseño de un alternador de flujo axial con imanes permanentes

Para aportar energía a la red eléctrica, los aerogeneradores deben estar dotados de un sistema de sincronización para que la frecuencia de la corriente generada se mantenga perfectamente sincronizada con la frecuencia de la red.

Las partes principales de un aerogenerador de eje horizontal son el rotor, que puede estar formado por varias palas, siendo la configuración mas típica de 3 palas, el buje, la góndola que sirve de alojamiento a los elementos mecánicos y eléctricos, la caja multiplicadora para aumentar la velocidad de rotación en el eje, el generador, los sistemas de control y la torre.



**Figura 7: Partes principales de un aerogenerador de eje horizontal**

### **2.3 Aerogeneradores de eje vertical**

Las máquinas de eje vertical, también llamadas de arrastre diferencial, presentan la ventaja de evitar todo tipo de dispositivos de orientación a causa de su configuración simétrica y de su construcción, que es muy simple. Por sus características, este tipo de generadores no son aptos para la producción de energía eléctrica en grandes cantidades, quedando reservado su uso al abastecimiento aislado de pequeños y medianos consumos. Existen varias configuraciones de aerogeneradores de eje vertical, a continuación se expondrán las más importantes.



### 2.3.1 Generador Darrieus

El generador Darrieus está constituido por varias hojas perfiladas que giran alrededor de un eje vertical. Su característica principal es que el eje de rotación se encuentra en posición perpendicular al suelo. La máquina incluye dos o tres palas en forma de 'C' que giran alrededor del eje y tiene las ventajas de que los equipos de conversión y control están en la base del grupo, y el aerogenerador no tiene que orientar su posición según la dirección del viento. En contrapartida, como la velocidad de viento es menor al nivel del suelo, el rendimiento es bajo.

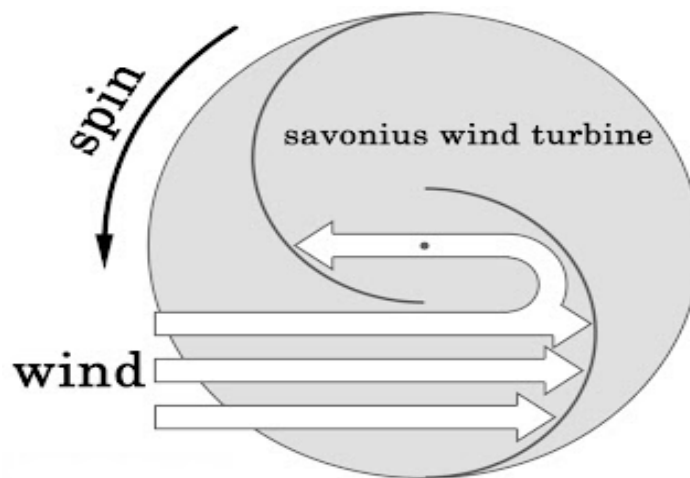
El generador Darrieus alcanza su máximo rendimiento si la velocidad del viento es constante, pero en la práctica esto difícilmente sucede a causa de las tensiones físicas, las limitaciones impuestas por el diseño y la variación de la velocidad del viento. También hay grandes dificultades en la protección del generador Darrieus contra las condiciones de viento extremo y en el momento del arranque.



**Figura 8: Aerogenerador Darrieus**

### 2.3.2 Generador Savonius

El generador Savonius se compone de dos semicilindros de igual diámetro, de ejes paralelos acoplados al eje de giro y separados una cierta distancia. Las fuerzas que ejerce el viento en la parte cóncava y convexa son diferentes, y ello hace que el conjunto gire alrededor de un eje. Debido a la curvatura, las palas experimentan menos resistencia cuando se mueven en contra del viento que a favor de él. Como es una máquina de arrastre, extrae mucha menos fuerza del viento que las turbinas de sustentación con similar tamaño, ya que tiene que vencer la fuerza del viento, y se producen más pérdidas por rozamiento.



**Figura 9: Diagrama de flujo del generador Savonius**

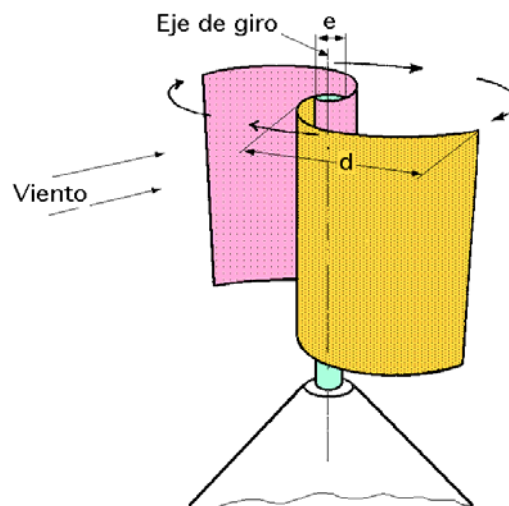
## Diseño de un alternador de flujo axial con imanes permanentes

Las ventajas que presenta un generador de tipo Savonius son:

- Su rotor es de eje vertical y por eso no necesita disponer de un mecanismo de orientación.
- Acepta mucho mejor los vientos turbulentos que las turbinas que funcionan por sustentación.
- Se frenan automáticamente al llegar a cierta velocidad límite.
- Coste bajo en comparación con aerogeneradores de eje horizontal.
- Requieren bajo mantenimiento.

Por otra parte, presenta los siguientes inconvenientes:

- Bajo rendimiento (cercano al 15%).
- El mecanismo que convierte la energía de giro de las palas, se sitúa en la base del generador.



**Figura 10: Esquema del generador Savonius**

### **3. EL ALTERNADOR DE IMANES PERMANENTES**

#### **3.1 Principio de funcionamiento**

El término imán permanente hace referencia a la capacidad de un material de retener un valor de magnetismo remanente después de ser imantado por algún medio. Además de ser resistente a la desmagnetización, un imán permanente tiene la propiedad de conservar su magnetismo con el tiempo.

Desde hace tiempo es conocido que una corriente eléctrica genera un campo magnético a su alrededor. En el interior de la materia existen pequeñas corrientes cerradas debidas al movimiento de los electrones que contienen los átomos. Cada una de estas corriente origina un microscópico dipolo magnético. Cuando estos dipolos están orientados en direcciones aleatorias, sus efectos se anulan mutuamente y el material no presenta propiedades magnéticas; en cambio si todos los dipolos se alinean actúan como un único imán y en ese caso decimos que la sustancia se ha magnetizado.

Mediante la curva de histéresis podemos observar la forma en que se produce la magnetización de un material. Esta curva representa la intensidad del campo magnético enfrentada a la densidad de flujo. A la hora de comprobar las capacidades magnéticas de un material, lo más importante es el valor máximo del producto  $B \times H$ .

A continuación se expone la curva de magnetización de un material ferromagnético:

- Al principio, la magnetización no es permanente hasta que se alcanza un valor límite. Este intervalo es la llamada zona reversible.
- En un determinado punto, la magnetización se produce de forma proporcional. En ese punto se inicia la denominada zona lineal.
- Finalmente, se llega un instante a partir del cual, por mucha fuerza magnética que induzcamos al material, ya no se magnetiza más. Este es el llamado punto de inducción de saturación, que determina el inicio de la llamada zona o codo de saturación. El punto *a* refleja el producto  $B \times H$  máximo.

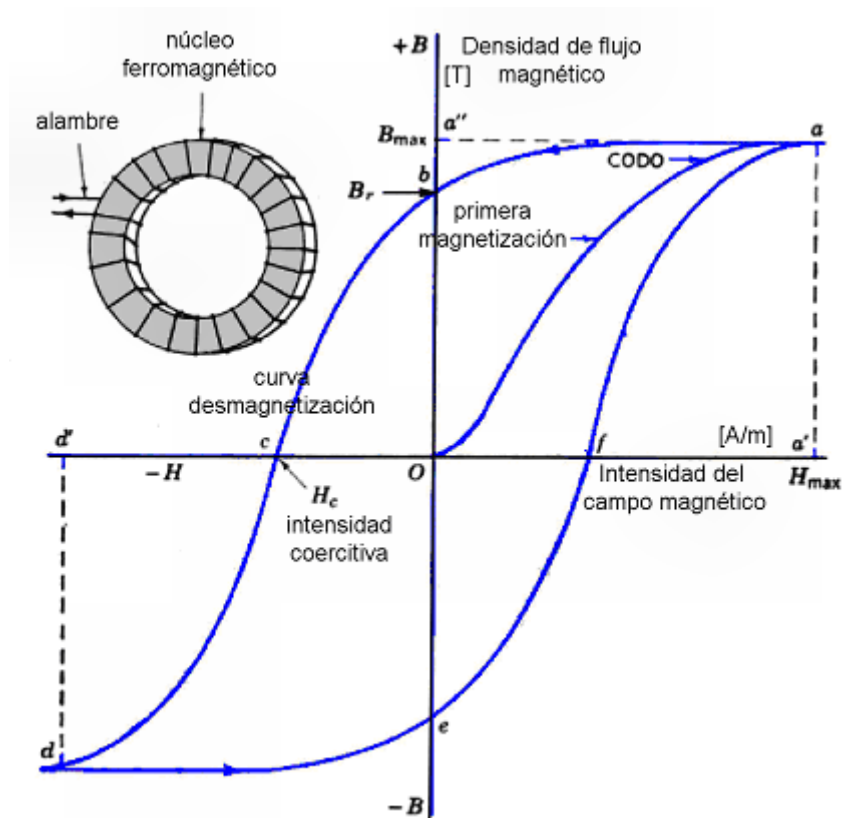
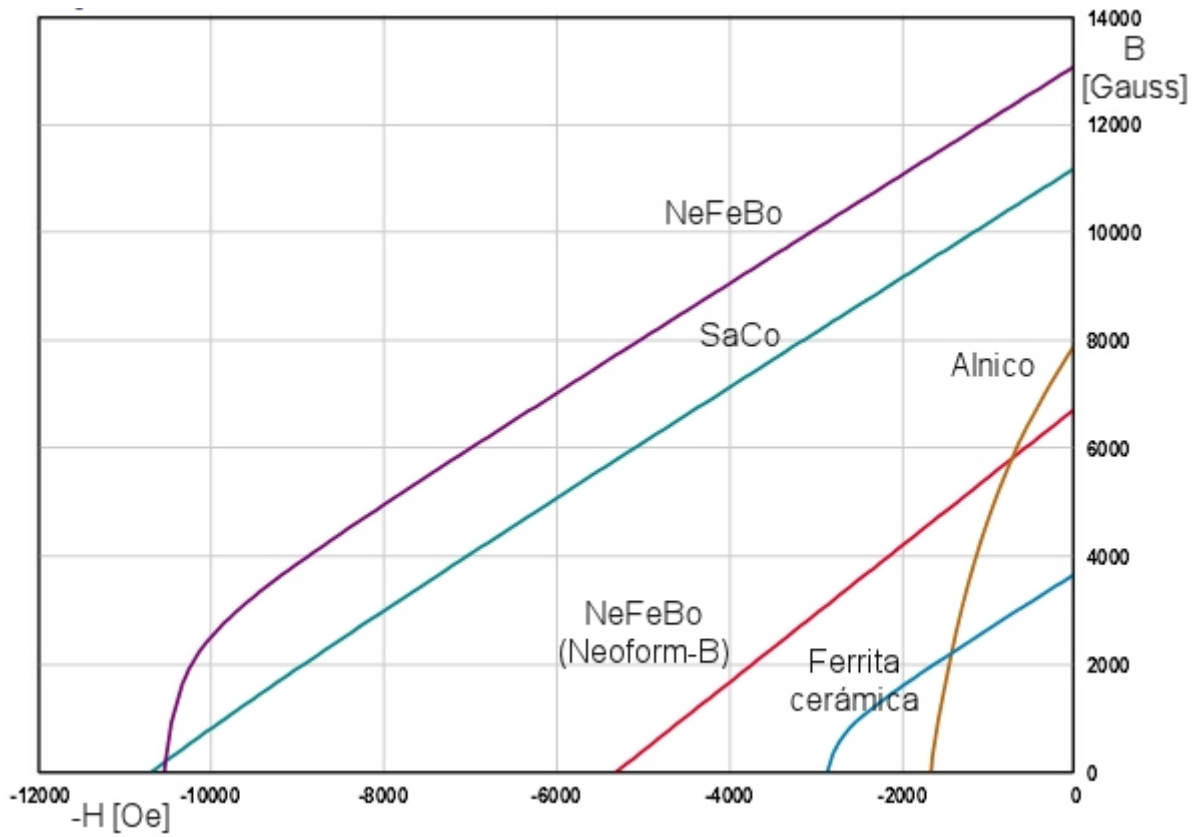


Figura 11: Curva de histéresis para un material ferromagnético

Existen varios tipos de materiales adecuados para sintetizar los imanes, siendo los más importantes las ferritas, Aluminio-Niquel-Cobalto (AlNiCo), Samario-Cobalto (SmCo), y Neodimio-Hierro-Boro (NdFeB). A continuación se muestran las curvas de magnetización para estos elementos:



**Figura 12: Curvas de magnetización de distintos materiales**

### **3.2 Diferentes topologías del rotor**

Según sea el eje de giro del flujo magnético, los alternadores de imanes permanentes pueden ser de dos tipos, de flujo axial y de flujo radial. En los alternadores de flujo axial el eje de giro es paralelo al campo magnético de los imanes , mientras que en los alternadores de flujo radial el eje de giro es perpendicular al campo magnético de los imanes .

Las expresiones “flujo axial” y “flujo radial” no son físicamente correctas, puesto que el flujo es una magnitud escalar y por tanto no puede tener sentido axial ni radial, pero esta terminología se ha establecido como distintiva de los dos tipos de alternadores.

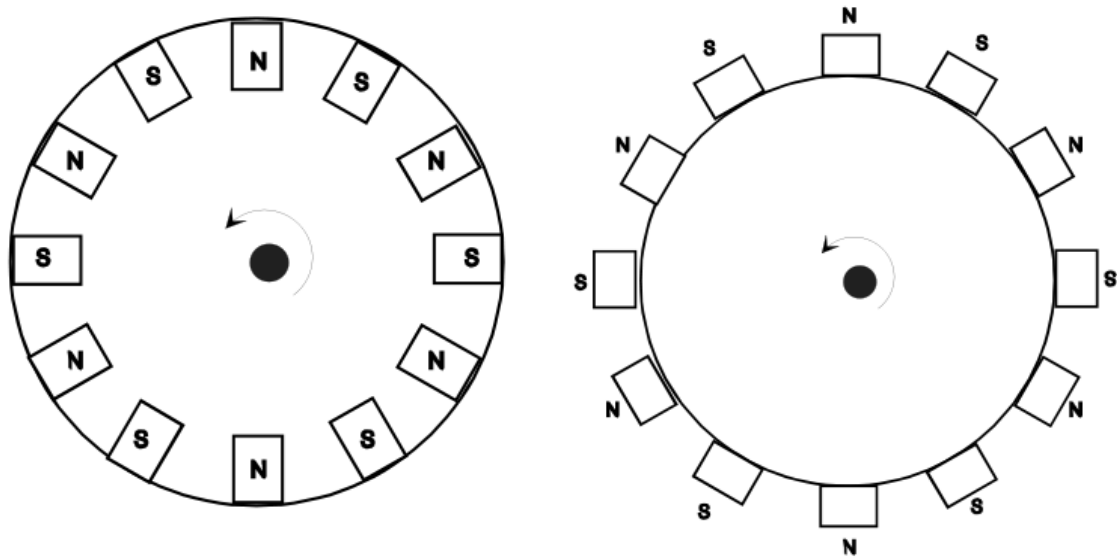
En los alternadores de flujo radial, los imanes se colocan sobre la superficie lateral de un cilindro que gira alrededor de su propio eje. En este caso el campo magnético de los imanes es perpendicular al eje de giro, y por tanto va en dirección radial. Este tipo de máquinas presentan una multitud de configuraciones distintas, la principal diferencia entre ellas es la forma de ubicar los imanes sobre la superficie del rotor.

En los alternadores de flujo axial, los imanes se disponen sobre un disco de hierro que gira alrededor de un eje perpendicular que pasa por su centro. Así pues el campo magnético de los imanes es paralelo al eje de giro.

Los alternadores de flujo axial, presentan las ventajas de que por su configuración son fácilmente magnetizables, tienen un bajo coste, y al poder construir el estator de madera los pares pulsantes son nulos.

## Diseño de un alternador de flujo axial con imanes permanentes

Por contra, las pérdidas en el hierro se incrementan al aumentar la velocidad, y la potencia que entregan no es excesivamente elevada.



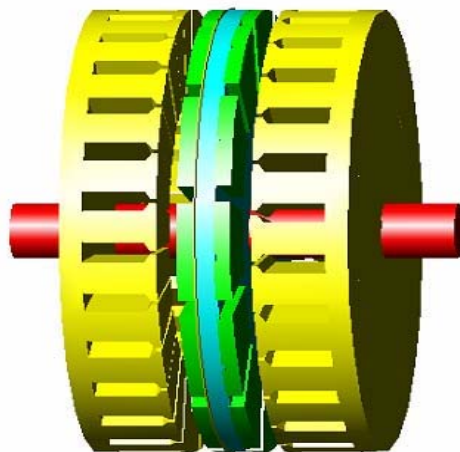
**Figura 13: Rotores de flujo axial y de flujo radial**



### **3.3 Diferentes configuraciones para la máquina de flujo axial**

Existen múltiples configuraciones para diseñar un alternador de flujo axial de imanes permanentes. En este apartado nos vamos a centrar en las posibles configuraciones que puede presentar un alternador de flujo axial. Se pueden utilizar configuraciones con un solo rotor y estator balanceados, o con varios rotores y estatores.

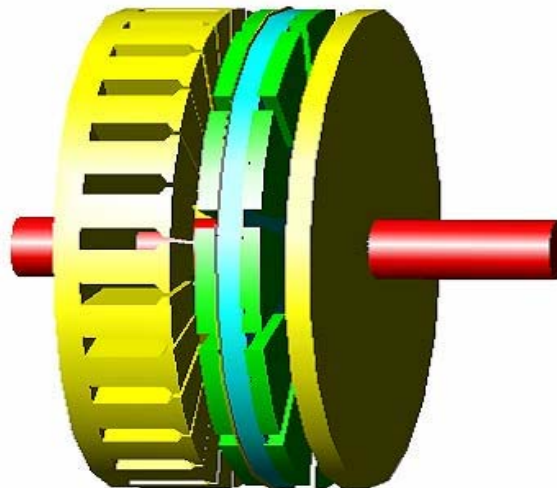
La máquina de doble estator consiste en dos estatores externos, y un rotor ubicado entre ellos. Los imanes permanentes están montados sobre las dos caras del rotor, de manera que hay imanes enfrentados hacia los bobinados de ambos estatores. Los dos estatores están bobinados con el mismo número de bobinas y de espiras. El núcleo de hierro del estator está laminado formando anillos concéntricos.



**Figura 14: Máquina de flujo axial de doble estator**

La configuración con doble rotor consigue una onda de inducción magnética del doble de amplitud, al estar las bobinas enfrentadas a dos imanes de polos opuestos cada vez. Esta configuración es muy similar a la de doble estator, con la diferencia de que tiene dos rotores externos y un estator interior. El estator está ranurado y bobinado en ambas caras. Como el flujo se cierra por el camino entre los dos rotores, el hierro del estator puede eliminarse y fabricarse de madera. De esta manera se evitan los problemas relacionados con los pares pulsantes.

También existen configuraciones con un solo rotor y un solo estator. En este caso existe una gran fuerza de atracción entre el rotor y el estator. Para prevenir desplazamientos de alguna de las piezas, se puede añadir un rotor o estator adicional, según sea el caso, de forma que la fuerza quede balanceada. Un ejemplo se muestra en la **figura 15**.



**Figura 15: Máquina de flujo axial simple con balance de estator**

### **3.4 Aplicaciones de la máquina de flujo axial de imanes permanentes**

Los motores axiales fueron los primeros en desarrollarse por su concepción intuitiva, a mediados del siglo XIX, pero su utilización cayó en descenso a partir de 1870 debido sobre todo a las dificultades de fabricación existentes en el inicio del desarrollo de las máquinas eléctricas. Las ventajas de las máquinas de flujo axial se presentan cuando se dan las siguientes condiciones:

- Elevado número de polos.
- Baja velocidad.
- Geometría exterior con pequeña longitud comparada con el radio.
- Geometrías con radio interior y exterior similares.
- Grandes radios.
- Elevado número de discos.

Aunque actualmente todavía no están tan integradas a nivel industrial como los alternadores de rotor cilíndrico o de polos salientes, o las máquinas de inducción, las máquinas de flujo axial son utilizadas en diversas aplicaciones.

### **3.4.1 Generación de energía**

Los alternadores de flujo axial de imanes permanentes son compactos, tienen un buen rendimiento y no necesitan excitación externa. Esto hace que puedan ser usados como generadores de alta y baja velocidad. Tienen las ventajas de tener una densidad de potencia alta, y al fabricarse de forma modular es muy fácil ampliarlos e integrarlos con otros componentes mecánicos, como turbinas. La tensión a la salida normalmente debe ser rectificadora e invertida con un convertidor estático.

Los alternadores de baja velocidad suelen ser usados en turbinas eólicas. Con la energía eólica presentándose como una de las alternativas más fiables como fuente de energía alternativa, los alternadores de flujo axial ofrecen una solución eficiente y de bajo coste comparado con el resto de tecnologías, como pueden ser los paneles solares. Además, al funcionar a bajas velocidades se evita el uso de mecanismos de multiplicación de velocidad, con lo que se reduce el coste y se aumenta el rendimiento al disminuir las pérdidas mecánicas.

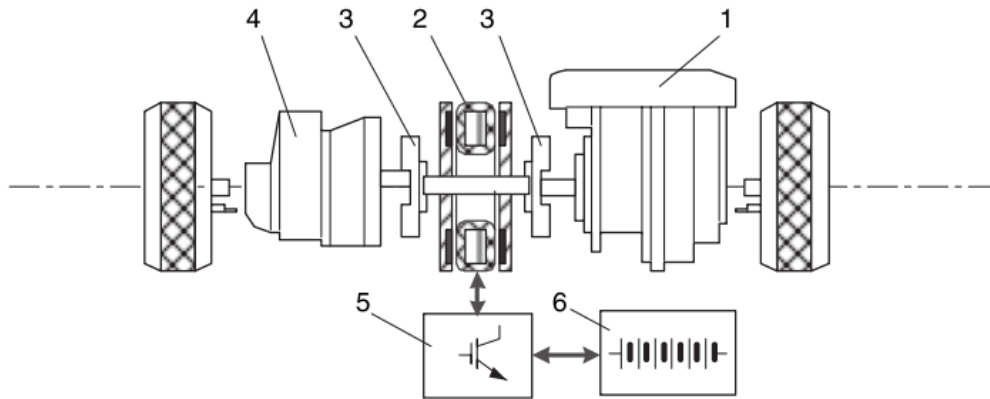
### 3.4.2 Vehículos eléctricos

Los vehículos eléctricos pueden dividirse en vehículos híbridos, con baterías, o con células de combustible. La transición de gasolina a vehículos alimentados con energía eléctrica supone un gran paso para reducir la gran cantidad de petróleo consumida en el transporte personal.

Las máquinas eléctricas de tracción aplicadas a los vehículos eléctricos deben cumplir las siguientes requisitos:

- Elevada potencia instantánea.
- Elevada densidad de potencia para reducir el peso del vehículo.
- Par elevado a velocidades bajas para zonas con pendientes elevadas.
- Alta velocidad a bajo par para zonas de llano.
- Alta rendimiento en cualquier régimen de trabajo.
- Fiabilidad y robustez en condiciones como altas temperaturas, lluvia, nieve...
- Coste lo más reducido posible.

En los vehículos híbridos, el motor-generator eléctrico está ubicado entre el motor de combustión y la caja de cambios. Por un lado está unido a la parte del embrague que está en contacto con el motor de combustión, mientras que por el otro está unido a la parte del embrague que conecta con la caja de cambios, como se ve en la **Figura 16**.



**Figura 16: Vehículo híbrido**

En esta figura podemos observar:

- 1- Motor de combustión
- 2- Motor-generador de flujo axial
- 3- Embrague
- 4- Caja de cambios
- 5- Inversor
- 6- Baterías

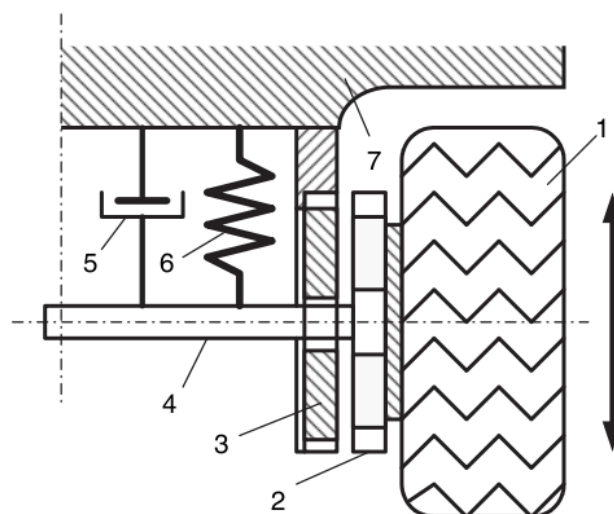
Las funciones que realiza la máquina de flujo axial en el montaje anteriormente descrito de un vehículo híbrido son las siguientes:

- Ayudar a la propulsión del vehículo cuando es necesario, posibilitando el uso de un motor de combustión más pequeño.

- Actuar como generador, utilizando el exceso de energía de frenado para cargar las baterías.
- Reemplazar al alternador convencional.
- Arrancar el motor de combustión rápida y silenciosamente.
- Amortiguar las variaciones de velocidad del cigüeñal y la caja de cambios, dando lugar a un funcionamiento más suave.

En los vehículos eléctricos con baterías, se usan motores de flujo axial de imanes permanentes acoplados a las ruedas. Instalando estos motores el mecanismo diferencial mecánico puede cambiarse por un diferencial electrónico. El sistema de accionamiento electromecánico se simplifica considerablemente cuando el motor está montado en la rueda, debido a que los ejes de transmisión no son necesarios.

Sin embargo, aumenta el peso de la rueda debido al peso del motor. Además, los motores montados en las ruedas sufren mayores sobrecargas debido a que la velocidad del rotor es menor de lo que sería en una configuración con mecanismos de transmisión. Esto lleva a un aumento del volumen de los conductores del motor.



**Figura 17: Motor en el eje de la rueda**

## Diseño de un alternador de flujo axial con imanes permanentes

En esta figura podemos observar:

- 1- Rueda
- 2- Rotor
- 3- Estator
- 4- Eje
- 5- Amortiguador
- 6- Muelle
- 7- Chasis



### **3.4.3 Ascensores**

La utilización de motores axiales en aplicaciones de elevación es reciente y su desarrollo ha sido relativamente rápido, apoyándose en el empleo de imanes permanentes comerciales de inducción magnética elevada.

El sistema de tracción convencional de un tren elevador de ascensores consiste en un motor de alta velocidad, conectado mediante un reductor mecánico a la cabina del ascensor. Un sistema como este presenta la desventaja del elevado mantenimiento debido al elevado número de componentes mecánicos, lubricación, y sobre todo ruido.

Además, normalmente se requiere un espacio en la planta de servicio del edificio para colocar el sistema de tracción del ascensor. En ocasiones este espacio es muy reducido o no existe, por condicionantes de arquitectura o por tratarse de edificios rehabilitados donde no había ascensor.

Utilizando un motor lineal de flujo axial de imanes permanentes se resuelve el problema del espacio, ya que un motor lineal de forma plana puede formar parte del propio ascensor, evitando así la sala de máquinas, y su tamaño es muy reducido en comparación con un motor radial de potencia similar. Además utilizando motores con estatores de material no ferromagnético y sin ranuras, se evitan los pares pulsantes y los problemas de ruido.

### **3.4.4 Aplicaciones navales**

El empleo de motores eléctricos en aplicaciones navales ofrece ventajas respecto a los motores diésel o turbinas de gas, puesto que son más silenciosos y pueden ser ubicados en cualquier lugar del barco.

Las máquinas axiales a base de imanes permanentes constituyen la opción más adecuada para esta aplicación, ya que reúnen las características necesarias de velocidades bajas y elevadas densidades de par. Las máquinas axiales más adecuadas son las de imanes permanentes de una o varias etapas en función de la potencia y par que tengan que entregar.

Debido a la gran potencia de estas máquinas es deseable que sean modulares, ya que esto permite su rápida reparación en caso de avería, incluso su funcionamiento con algún bobinado fuera de uso. Esto tiene implicaciones en el proceso de fabricación y en los costes finales de la máquina. Evitar el ranurado del estator es una buena solución para esta aplicación ya que es un diseño fácil de fabricar, y además se evita el ruido producido por los pares pulsantes.

Las máquinas axiales de imanes permanentes presentan las siguientes ventajas para esta aplicación:

- Bajo coste.
- Posibilidad de fabricar la máquina de forma modular.
- Poco ruido.

Diseño de un alternador de flujo axial con imanes permanentes

Al tener diámetros muy grandes, los módulos polares son trapezoidales, lo que facilita aún más su fabricación. Incluso se puede alimentar cada fase individualmente constituyendo una máquina trifásica a base de módulos monofásicos.

### **3.4.5 Otras aplicaciones**

Además de las aplicaciones ya citadas, existen multitud de aplicaciones más de las máquinas de flujo axial de imanes permanentes. Algunas ya se usan y fabrican a nivel industrial, y otras están todavía en desarrollo. A continuación se citan algunas de ellas:

- Grabadores de vídeo y lectores de disco.
- Ventiladores.
- Volantes de inercia.
- Motores sin cojinetes.
- Micromotores.
- Propulsión aeronáutica.
- Máquinas superconductoras sin hierro.

## 4. DISEÑO DEL PROTOTIPO

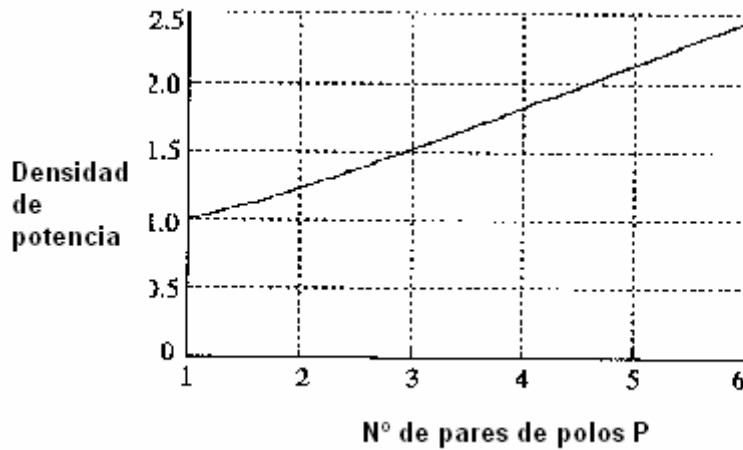
En este apartado se expondrán los cálculos utilizados en el diseño del alternador, en base a las especificaciones de su aplicación en un aerogenerador de tipo Savonius. Este generador es la solución más adecuada para el caso planteado por sus características de funcionamiento, que se expondrán más adelante en este mismo apartado.

### 4.1 Principio de funcionamiento

Como ya se ha comentado anteriormente, las máquinas de flujo axial son especialmente recomendables en aplicaciones donde se cumplen los siguientes requisitos:

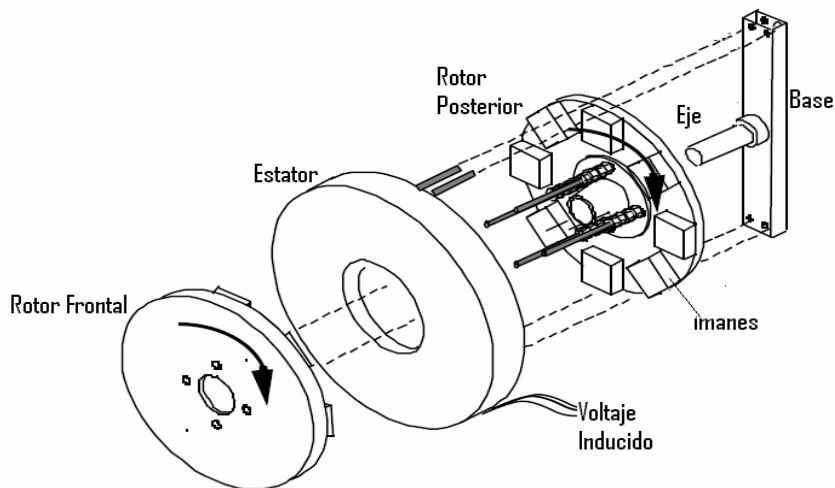
- Bajas velocidades.
- Pares elevados.
- Bajo peso.
- Sobrecargas elevadas y frecuentes.

Las máquinas eléctricas de flujo axial pueden diseñarse con un relación potencia/peso mucho más alto que las máquinas de flujo radial para rendimientos similares. Esta relación tan alta se consigue con un número de polos elevado. Como se puede observar en la **figura 18**, al aumentar el número de polos aumenta la densidad de potencia, por lo que se consigue mayor potencia con una máquina más ligera. Por tanto, este tipo de máquinas son recomendables en aquellas aplicaciones que requieran pares elevados y velocidades bajas.



**Figura 18: Densidad de potencia de la máquina de flujo axial**

En un generador de flujo axial, el flujo magnético pasa por las bobinas en dirección paralela al eje de la máquina. El diseño aquí presentado se compone de un rotor frontal de acero, un estator de madera sin ranuras, sobre el cual se arrollará directamente el bobinado, y un rotor posterior también de acero. Ambos rotores y el estator están unidos por un eje longitudinal, como puede observarse en la **Figura 19**.



**Figura 19: Estructura del alternador**

Diseño de un alternador de flujo axial con imanes permanentes

Esta configuración de dos entrehierros tiene la ventaja de cancelar las fuerzas longitudinales sobre el estator, además esta topología minimiza la inductancia de dispersión. Además al utilizar un estator sin ranuras, conseguimos eliminar el par de ranura y las vibraciones provocadas por él. El hecho de no usar hierro disminuye las pérdidas por histéresis y corrientes de Foucault.

Los imanes permanentes se ubican sobre la superficie de los rotores, de tal forma que el flujo magnético pasa de un rotor a otro a través de las bobinas del estator mientras el eje del rotor gira. De esta forma, se induce una tensión eléctrica en los terminales de las bobinas. El hecho de usar imanes permanentes elimina las pérdidas en el devanado de excitación, que normalmente suelen representar entre el 20 y el 30 por ciento de las pérdidas de un generador. Cabe indicar que dicha configuración permite el crecimiento modular de la máquina al añadir otro conjunto de estator bobinado y rotor con imanes.

La tensión en bornes del alternador, pasa a un sistema de regulación, formado por una etapa inversora seguida de una etapa rectificadora. Una vez modelada la forma de onda, pasa a cargar el sistema de baterías a 24 V en corriente continua. Como ya se ha comentado, el sistema de regulación no va a ser tratado en este trabajo.

## **4.2 Rotor utilizado para el diseño**

A la hora de realizar el diseño del alternador, se consideraran los datos referentes al rotor eólico utilizado en el prototipo. Se ha hecho un análisis de potencia generada respecto a la velocidad del viento, para el equipo a utilizar, y además se ha añadido la comparativa con otros dos rotores de características similares. Además se incluye un estudio de viento sobre la zona de la cuenca del Ebro, por ser el lugar donde previsiblemente se podría montar el prototipo.

El primer prototipo VENTURY modificado tiene un diámetro de 55 cm, 2 m de alto de pala, un perímetro de palas de 1.73 m y 1 m<sup>2</sup> de superficie. El coeficiente de potencia estimado es de  $C_p = 0.2$ , con un coeficiente TSR=1 (velocidad específica de Savonius), esto quiere decir que la periferia de la pala se mueve a la misma velocidad que el viento.

Se ha realizado un estudio en el que se compara el prototipo con el equipo GUS10 (Tangarde) y el equipo WINSIDE, ambos de 4 m<sup>2</sup> de superficie, en el que vemos que en ambos rotores se ha observado (o estimado) un rendimiento aproximado del 25%.

Esta tabla se refiere a potencias obtenidas en el eje, no a potencias eléctricas. Habría que descontar pérdidas por rozamientos, rendimiento del alternador y del sistema de regulación eléctrica.



Velocidad del viento (m/s)	n (rpm) (TSR= 1)	Potencia viento (w/m <sup>2</sup> )	Potencia VENTURY (w/m <sup>2</sup> )	Potencia GUS10 (4m <sup>2</sup> )	Potencia WINSIDE (4 m <sup>2</sup> )
4	138.7	39	8	39	40
5	173.41	76.5	15.3	77	70
6	208.10	132	26	132	100
7	242.77	210	42	210	150
8	277.46	313	62	314	210
9	312.14	446	89	447	300
10	346.82	612.5	122	613	400
12	416.18	1058	211		
15	520.23	2067	413		
18	624.28	3572	714		
21	728.32	5672	1134		

**Tabla 1: Exposición de datos eólicos**

Estas cifras no están compensadas con la constante de Weibull, y se refieren a velocidades de viento constantes medidas en túnel de viento, no a velocidades medias de una zona.

El viento medio anual en la cuenca del Ebro a 80 m. de altura es de 6.5-7 m/s. La potencia media anual compensada con Weibull en la cuenca del Ebro es de 300 W/m<sup>2</sup>. Con un rendimiento aproximado del 20% obtenemos unos 60 vatios continuos con el prototipo VENTURY, que serían unos 525 kW/h anuales, o 1.37 kW/h diarios. Esta potencia es la que va a servir de referencia al prototipo, porque es la potencia máxima que se pueden conseguir, estimando un rendimiento del alternador y de la regulación eléctrica del 100 %.

Diseño de un alternador de flujo axial con imanes permanentes

Para obtener la potencia real entregada a las baterías, habría que descontar las pérdidas producidas por histéresis magnética, las pérdidas en calor por efecto Joule, y las pérdidas del sistema electrónico de regulación.

### **4.3 Diseño del alternador**

En este apartado se va a realizar una exposición detallada de todos los parámetros necesarios para diseñar el alternador de forma que cumpla las especificaciones prescritas. El alternador debe arrancar a una velocidad de 4 m/s, y parar a una velocidad de 15 m/s. En este intervalo de funcionamiento debe cumplir con la potencia prevista en la **Tabla 1**.

Los principales pasos que se deben llevar a cabo para completar el estudio son los siguientes:

- Cálculo del número de polos y de imanes
- Cálculo del número de bobinas
- Fuerza electromotriz inducida en las bobinas
- Elección de los imanes.
- Elección de los conductores.
- Tamaño y distribución de las bobinas.
- Tipo de devanado.
- Conexión de devanados del estator.

Diseño de un alternador de flujo axial con imanes permanentes

- Dimensionamiento del cuerpo del alternador
- Cálculo del modelo circuital equivalente

### 4.3.1 Cálculo del número de polos y de imanes

El número de polos que llevará el alternador está directamente relacionado con la frecuencia de trabajo a la que queremos que funcione el equipo, y la tensión que se va a generar. La velocidad mínima de rotación va a ser de 139 rpm, cuando el viento lleve una velocidad de 4 m/s. Se ha impuesto una frecuencia mínima de diseño de 20 Hz.

La relación entre la velocidad del viento y la velocidad del generador se obtiene de la siguiente fórmula:

$$TSR = \omega * R / v \quad (4.1)$$

Donde:

- TSR: Velocidad específica de giro del aerogenerador
- $\omega$ : Velocidad angular del aerogenerador (rad/s).
- R: Radio del aerogenerador (m).
- v: Velocidad del viento (m/s).

O lo que es lo mismo en rpm:

$$TSR = (2\pi * n * R) / 60v \quad (4.2)$$

Sustituyendo los valores ya conocidos de TSR y radio del aerogenerador, y despejando la velocidad de giro del rotor, obtenemos:

$$n = (\text{TSR} * 60 * v) / (2\pi R) = 60v * 1 / 2\pi * 0.275 = 34.72v \text{ (rpm)} \quad (4.3)$$

Por otro lado, la fórmula que relaciona la velocidad de giro del rotor con el número de polos es la siguiente:

$$n = 120f/p \quad (4.4)$$

Donde:

- n: velocidad de rotación (rpm)
- f: frecuencia (Hz)
- p: número de polos

Igualando las expresiones (4.3) y (4.4), obtenemos:

$$120f/p = 34.72v \quad (4.5)$$

Ahora tomamos el caso más restrictivo. El alternador debe funcionar a una frecuencia mínima de 20 Hz, siendo la velocidad mas baja la de arranque, en este caso 4 m/s.

Sustituyendo ambos valores en la expresión (4.5):

$$p = 120f / 34.72v = 120 * 20 / 34.72 * 4 = 17.28 \text{ polos} \quad (4.6)$$

Redondeando obtenemos 18 polos, o lo que es lo mismo 9 pares de polos.

Con este valor de número de polos tenemos los siguientes valores máximos y mínimos de frecuencia. Estos valores están calculados con las velocidades de viento mínima y máxima de funcionamiento del aerogenerador.

$$f_{\min} = p \cdot 34.72v / 120 = 18 \cdot 34.72 \cdot 4 / 120 = 20.832 \text{ Hz} \quad (4.7)$$

$$f_{\max} = p \cdot 34.72v / 120 = 18 \cdot 34.72 \cdot 15 / 120 = 78.12 \text{ Hz} \quad (4.8)$$

A continuación se muestra una tabla donde se expone la frecuencia a la que va a trabajar el alternador en función de la velocidad del viento, en el intervalo de funcionamiento de la máquina, que va desde 4 m/s hasta 15 m/s.

Velocidad del viento (m/s)	Frecuencia (Hz)
4	20.832
5	26.04
6	31.248
7	36.456
8	41.664
9	46.872
10	52.08
12	62.496
15	78.12

**Tabla 2: Frecuencia del alternador en función de la velocidad del viento**

Diseño de un alternador de flujo axial con imanes permanentes

A la vista de estos resultados podemos concluir que el alternador tendrá 18 polos, y dada la configuración a usar, de rotor delantero y trasero, ambos con imanes, se requieren 36 imanes para el desarrollo del alternador.



#### **4.3.2 Cálculo del número de bobinas**

En este caso, al llevar el alternador un estator sin hierro, no aparecerán problemas de pares pulsantes, por lo tanto no es necesario desparejar el número de polos y el de bobinas. Entonces, se ha elegido que el alternador tenga 18 bobinas (6 por fase), las cuales es posible conectar de tal forma que las fem inducidas en ellas puedan sumarse.

Para este diseño se ha elegido un estator sin ranuras, ya que con esto evitamos las pulsaciones de par de ranura, y disminuyen el ruido y las vibraciones. Además desaparece la inductancia de dispersión de ranura.

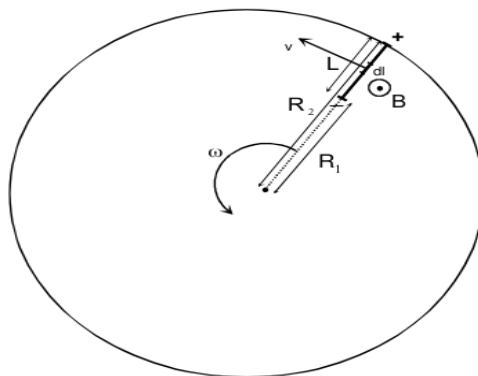
### 4.3.3 Fuerza electromotriz inducida en las bobinas

Un generador de imanes permanentes consta de un conjunto de imanes que se mueven frente a unas bobinas fijas. Los imanes se mueven con un movimiento circular uniforme, y el número de imanes es siempre par y con los polos magnéticos alternados. Partiendo de la ley de Lorentz, la fem que se induciría en una espira sería:

$$\begin{aligned}\varepsilon &= \int (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot d\mathbf{l} = \int v B dl = \int \omega r B dl = \omega B \int r dr = \omega B (R_2 - R_1) l / 2 = \\ &= \omega B (R_2 - R_1)(R_2 + R_1) l / 2 = \omega B L (R_2 + R_1) / 2\end{aligned}\quad (4.9)$$

Donde:

- $\varepsilon$ : Fuerza electromotriz inducida (V)
- $v$ : Velocidad lineal del rotor (m/s)
- $\omega$ : Velocidad angular del rotor (rad/s)
- $B$ : Inducción magnética (T)
- $L$ : Longitud de la bobina (m)
- $R_1$ : Radio del rotor menos longitud de la bobina (m)
- $R_2$ : Radio del rotor (m)



**Figura 20: Explicación de la ley de Lorentz**

Esta expresión tiene validez en el caso de que solo se mueva un imán por delante de la bobina. Al aplicar la expresión a la configuración de un rotor con un grupo de imanes, alternados en sus polos magnéticos, la fem inducida en una espira será justo el doble de la que induciría un solo imán, puesto que cada lado de la espira esta siendo atacada continuamente por dos imanes de polos opuestos. Además, al ser una configuración de doble rotor, las bobinas están enfrentadas a dos imanes cada vez, cuya inducción magnética se suma, por lo tanto la fem total sería 4 veces la que se induciría en un rotor homopolar con imanes solo en un lado de la espira.

Por tanto la fem inducida total en una espira será:

$$\varepsilon = 4 \omega BL (R_2+R_1)/2 = 2 \omega BL(R_2+R_1) \quad (4.10)$$

Como esta fem es alterna su valor eficaz será:

$$\varepsilon = 1/\sqrt{2} * 2 \omega BL(R_2+R_1) \quad (4.11)$$

Midiendo la velocidad angular en rpms:

$$\varepsilon = 0.148nBL(R_2+R_1) \quad (4.12)$$

Como todo el disco no está repleto de imanes, sino que hay una separación entre ellos, hay que introducir un factor corrector para representar esta situación. El factor geométrico corrector es la superficie de todos los imanes dividido por la superficie total de la corona circular donde esta colocados los imanes:

$$f_c = S_{\text{imanes}}/S_{\text{corona circular}} = 18 * 15.2012 / \pi * 9.98^2 = 0.874 \quad (4.13)$$

Obteniéndose al final la expresión:

$$\varepsilon = 0.148 f_c nBL (R_2+R_1) \quad (4.14)$$

Para el rango de velocidades en las que va a trabajar el alternador, y tomando unos valores de referencia de  $L= 50.8$  mm,  $R_{rotor}= 122.35$  mm, y  $B= 13200$  Gauss (tomados de los valores de referencia del diseño), obtenemos la siguiente tabla :

Velocidad viento (m/s)	Velocidad giro rotor (rpm)	Fem inducida/espira (V)
4	138.7	0.233
5	173.41	0.29
6	208.10	0.35
7	242.77	0.41
8	277.46	0.466
9	312.14	0.524
10	346.82	0.58
12	416.18	0.7
15	520.23	0.874

**Tabla 3: Fem inducidas por espira**

A continuación se presentan distintas posibilidades de conexión de las bobinas del estator, así como valores de inducción magnética y secciones de los conductores que van a formar el arrollamiento de las bobinas. Con estos datos se intentará llegar a la solución más conveniente para minimizar costes y pérdidas por efecto Joule. Las dimensiones del rotor y de los imanes se modificarán más adelante en función de la solución elegida.

Las siguientes tablas hacen referencia a un régimen de trabajo del alternador con una velocidad de viento de 4 m/s, que equivale a una velocidad de giro del aerogenerador de 138.7 rpm. Representan las diferentes posibilidades de diseño para conseguir una tensión entre fases de aproximadamente 20 V.

Los valores de R hacen referencia a la resistencia eléctrica por fase del devanado.

B (G)	N <sub>espiras</sub>	N <sub>espiras</sub> /bobina	R(S=1.5mm <sup>2</sup> ) (mΩ)*	R(S=1 mm <sup>2</sup> ) (mΩ)	R(S=0.7 mm <sup>2</sup> )(mΩ )	R(S=0.5 mm <sup>2</sup> ) (mΩ)
13000	54.761	10	21.89	39.74	84.48	163.20
12000	59.325	10	21.89	39.74	84.48	163.20
10000	71.19	12	26.27	47.69	101.38	195.84
9000	79.10	14	30.64	55.64	118.27	228.48
8000	88.987	15	32.83	59.62	126.72	244.80
7000	101.70	17	37.21	67.56	143.62	277.44
6000	118.65	20	43.78	79.49	168.96	326.40
5000	142.38	24	52.53	95.39	202.75	391.68
4000	177.97	30	65.66	119.23	253.44	489.60

**Tabla 4: Conexión de 6 bobinas en serie**

B (G)	N <sub>espiras</sub>	N <sub>espiras</sub> /bobina	R(S=1.5mm <sup>2</sup> ) (mΩ)	R(S=1 mm <sup>2</sup> ) (mΩ)	R(S=0.7 mm <sup>2</sup> ) (mΩ)	R(S=0.5 mm <sup>2</sup> ) (mΩ)
13000	54.761	19	10.40	18.88	40.13	77.52
12000	59.325	20	10.94	19.87	42.24	81.60
10000	71.19	24	13.13	23.85	50.69	97.92
9000	79.1	27	14.77	26.83	57.02	110.16
8000	88.987	30	16.42	29.81	63.36	122.40
7000	101.7	34	18.60	33.78	71.81	138.72
6000	118.65	40	21.89	39.74	84.48	163.20
5000	142.38	48	26.27	47.69	101.38	195.84
4000	177.97	60	32.83	59.62	126.72	244.80

**Tabla 5: Conexión de 2 grupos en paralelo de 3 bobinas**

B (G)	N <sub>espiras</sub>	N <sub>espiras</sub> /bobina	R(S=1.5mm <sup>2</sup> ) (mΩ)	R(S=1 mm <sup>2</sup> ) (mΩ)	R(S=0.7 mm <sup>2</sup> )(mΩ )	R(S=0.5 mm <sup>2</sup> ) (mΩ)
13000	54.761	28	6.81	12.36	26.28	50.77
12000	59.325	30	7.30	13.25	28.16	54.40
10000	71.19	36	8.76	15.90	33.79	65.28
9000	79.1	40	9.73	17.66	37.55	72.53
8000	88.987	45	10.94	19.87	42.24	81.60
7000	101.7	51	12.40	22.52	47.87	92.48
6000	118.65	60	14.59	26.50	56.32	108.80
5000	142.38	72	17.51	31.80	67.58	130.56
4000	177.97	89	21.64	39.30	83.54	161.39

**Tabla 6: Conexión de 3 grupos en paralelo de 2 bobinas**

## Diseño de un alternador de flujo axial con imanes permanentes

La elección final ha sido colocar en el rotor imanes de NdFeB con una inducción magnética máxima de 5000 Gauss, y conectar el devanado del estator formando tres grupos en paralelo de dos bobinas en serie cada uno, con un número de 72 espiras de  $0.5 \text{ mm}^2$  por bobina.

En los apartados siguientes se desglosarán todos estos puntos. También se expondrán los valores de tensión y corriente obtenidos, una vez modificados los parámetros de diseño necesarios.

#### 4.3.4 Elección de los imanes

Al principio, se pensó en incluir unos imanes de NdFeB con una inducción máxima de 13200 Gauss. A la vista de los resultados obtenidos en las tablas 4, 5 y 6, al final se decidió cambiar los imanes por otro modelo con una inducción magnética de 5000 Gauss, reduciendo el coste final del prototipo, a cambio de aumentar el número de espiras de las bobinas, como se explicará con más detalle en el apartado siguiente.

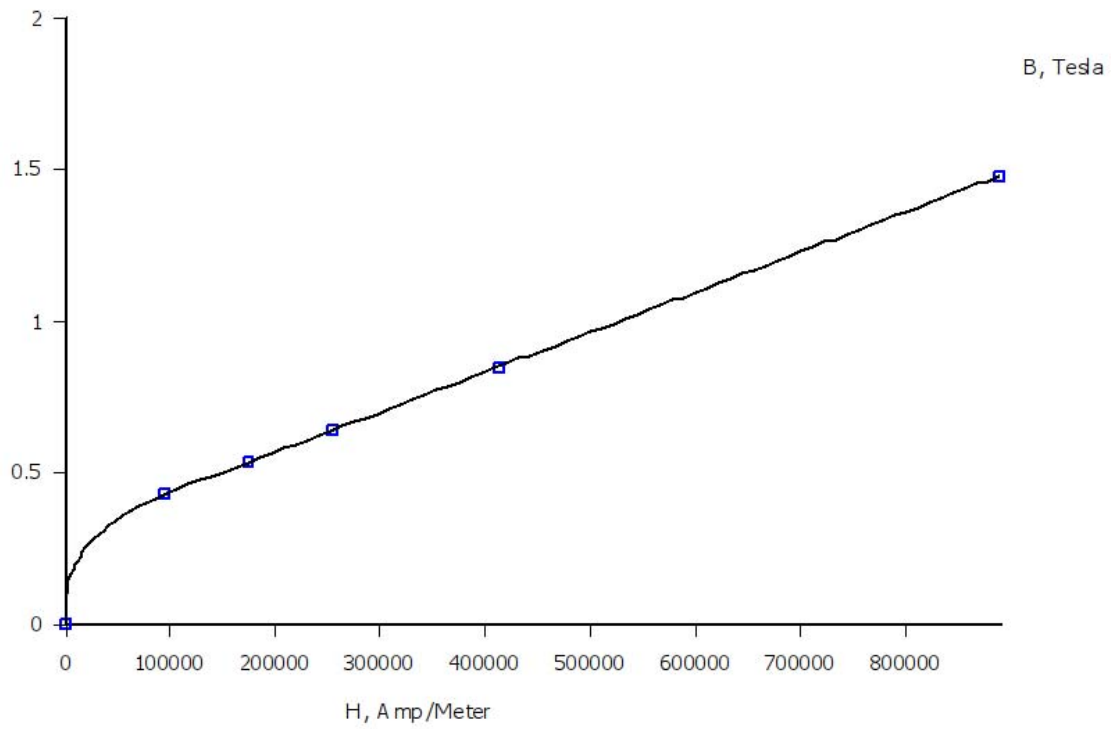
Los imanes elegidos, están fabricados de aleación de neodimio, hierro y boro (NdFeB), y tienen una inducción magnética máxima de 5000 Gauss, con un producto  $B \times H$  de 52 MGOe. Tienen forma de segmento de arco circular, lo que los hace ideales para una configuración en forma de anillo. Sus características son las siguientes:

Composición	NdFeB
Base mayor	19.939 mm
Base menor	9.906 mm
Lado	50.8 mm
Espesor	6.35 mm
Ángulo de inclinación	20°
$B_{\max}$ (Gauss)	5000
$H_c$ (A/m)	175100
$B \times H$ (MGOe)	52

**Tabla 7: Características de los imanes**



A continuación se expone la curva de magnetización del material:



**Figura 21: Curva de magnetización NdFeB 52 MGOe**

#### 4.3.5 Elección de los conductores

Para la elección de los conductores se han tenido en cuenta varios factores, cómo que el hilo de cobre no fuera demasiado fino para no tener problemas por sobrecalentamiento, ni demasiado grueso para que no perdiera maleabilidad a la hora de bobinar, ni ocupara un espacio mayor del necesario.

La corriente máxima que va a circular por el devanado corresponde a la mayor velocidad del viento a la cual va a trabajar el alternador, en este caso 15 m/s. Cómo la conexión elegida es en estrella, la corriente de fase y la de línea van a ser la misma, en este caso, como se verá más adelante, 3.717 A. Con un sobredimensionamiento del 30% por razones de seguridad, para esta aplicación se ha elegido hilo de cobre esmaltado de 0.5 mm<sup>2</sup> de sección. Se trabajará con una densidad de corriente máxima de  $J=7.54 \text{ A/mm}^2$ . La corriente de desconexión de la máquina es de 4 A.

Este hilo de cobre presenta unos parámetros de resistividad  $\rho = 0.0425 \text{ } \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ , y un coeficiente de temperatura  $\alpha = 3.9 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ . Además presenta una resistencia eléctrica de 85 m $\Omega$ /m a 20° C.

#### **4.3.6 Tamaño y distribución de las bobinas**

Se requiere que las bobinas puedan enlazar la totalidad del flujo generado por los imanes, por tanto se han elegido unas bobinas que sigan la forma del imán, con una superficie un poco superior a la del imán para que haya el menor flujo disperso posible.

La configuración final elegida, una vez cambiados los imanes inicialmente previstos, ha sido la de conectar tres grupos en paralelo, cada uno de ellos formado por dos bobinas en serie, por cada fase. Cada bobina lleva arrolladas 72 espiras de  $0.5 \text{ mm}^2$ , distribuidas en dos capas, lo que nos da una sección de cobre de  $36 \text{ mm}^2$ . Las bobinas tienen forma trapezoidal, y sus dimensiones finales son 25 mm de lado mayor, 12 mm de lado menor, 8 mm de espesor, y 55 mm de longitud.

#### 4.3.7 Tipo de devanado

Para esta aplicación se ha elegido un devanado concentrado de paso diametral distribuido en un número de bobinas igual al de polos. Con esto obtenemos una forma de onda de la fuerza magnetomotriz no muy sinusoidal. En este caso no es importante obtener una distribución sinusoidal de la fuerza magnetomotriz, y por tanto de la fem en bornes del alternador, ya que esta será rectificadora para ser llevada a las baterías.

El devanado elegido es por polos consecuentes, por lo que los finales de las bobinas impares irán unidos con el principio de las bobinas pares, y el principio de las pares con el final de las impares.

Para que el alternador produzca unas tensiones y corrientes equilibradas tiene que tener sus fases separadas  $120^\circ$  eléctricos. Esto equivale a la separación física indicada en la expresión **4.15**:

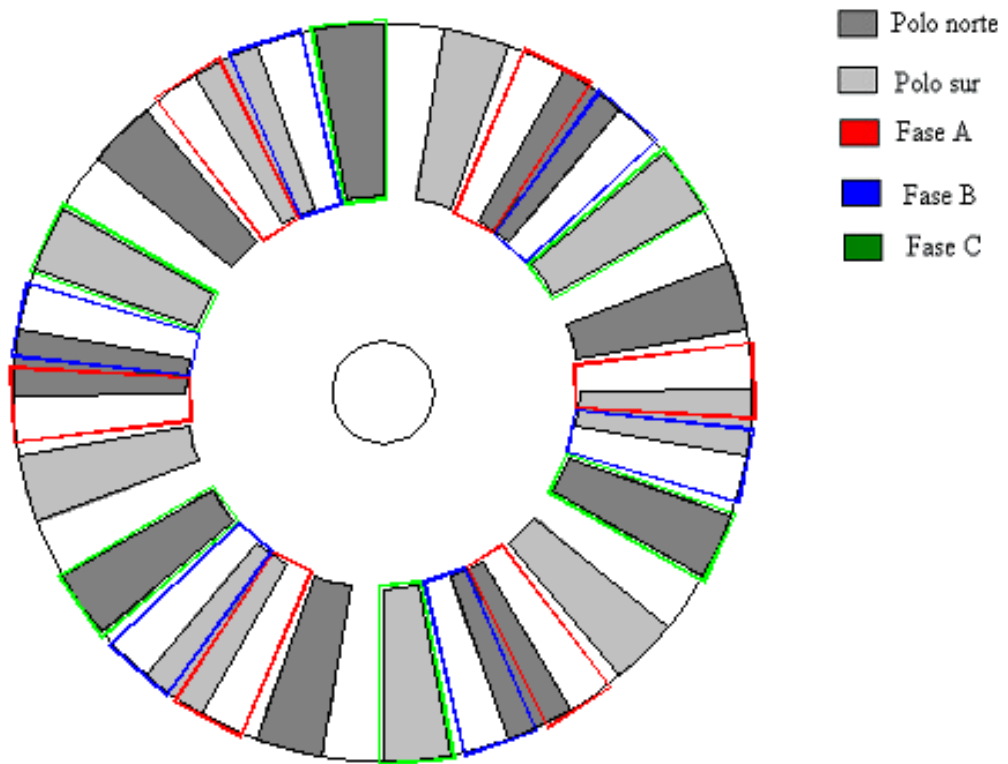
$$\alpha = 120^\circ/p \quad (4.15)$$

Donde:

- $\alpha$ : Ángulo de separación entre bobinas
- p: Número de pares de polos

Como en este caso tenemos 9 pares de polos, se obtiene una separación de  $\alpha = 13.33^\circ$  geométricos entre bobinas.

En la figura se puede observar el diagrama de ubicación de las bobinas del estator, así como de los imanes en el rotor. Se puede apreciar en la distribución que hay 6 bobinas por fase, y también se observa la ubicación de los 9 pares de polos norte-sur.



**Figura 22: Diagrama de ubicación de las bobinas del estator**

#### 4.3.8 Dimensionamiento del cuerpo del alternador

Para dimensionar el rotor y el estator del alternador es necesario saber la forma y las dimensiones de las bobinas y de los imanes, así como la disposición espacial que ocuparán. Partiendo de los cálculos realizados en apartados anteriores, la separación entre imanes que se ha elegido es de 18 mm.

Partiendo de este valor, y de las dimensiones de los imanes especificadas en la **Tabla 1**, tenemos:

$$\begin{aligned} L_{\text{perímetro}} &= N^{\circ}_{\text{polos}} * \text{Anchura}_{\text{imanes}} + (N^{\circ}_{\text{polos}} - 1) * \text{Separación}_{\text{imanes}} = \\ &= 18 * 19.939 + 18 * 18 = 682.902 \text{ mm} \end{aligned} \quad (4.16)$$

Sabemos que:

$$d = L_{\text{perímetro}} / \pi = 682.902 / \pi = 217.37 \text{ mm} \quad (4.17)$$

Con lo que obtenemos un diámetro total para los rotores y para el estator de 218 mm. El diámetro interior elegido por características de diseño es de 30 mm para los rotores, y 50 mm para el estator.

La distancia entre los imanes y las bobinas tiene que ser la menor posible para que haya la menor cantidad de flujo disperso. A la hora de construir el prototipo, no se pueden conseguir distancias inferiores a 1 mm por problemas de diseño.

## Diseño de un alternador de flujo axial con imanes permanentes

Las dimensiones finales elegidas para el alternador son de 4 mm para el estator, 10 mm para los rotores, y 1 mm para el entrehierro. En el apartado de análisis de inducción magnética mediante elementos finitos se expondrán los cálculos llevados a cabo para adoptar esta solución.

El espesor total del alternador, una vez decididas todas las dimensiones será:

$$E_{\text{alternador}}=2*E_{\text{rotor}}+E_{\text{estator}}+E_{\text{bobina}}+2*E_{\text{imanes}}+2*\delta_{\text{entrehierro}} \quad (4.18)$$

Con las dimensiones citadas anteriormente el espesor total del alternador es de 46.7 mm.

#### 4.3.9 Modelo circuital equivalente

La cantidad de cobre utilizada en total en el devanado de cada fase se calcula de la siguiente manera. Primero calculamos el largo promedio de cada espira, como la media aritmética entre la longitud de la espira más interior y la más exterior de cada bobina:

$$l_{\text{espira}} = (4 \cdot 7 + 4 \cdot 9) / 2 = 32 \text{ mm} \quad (4.19)$$

La longitud total del devanado se obtiene multiplicando la longitud promedio de cada espira por el número de espiras:

$$l_{\text{bobina}} = l_{\text{espira}} \cdot N^{\circ}_{\text{espiras}} = 32 \cdot 72 = 2.304 \text{ m} \quad (4.20)$$

La resistencia por fase que presenta el estator al estar constituido por 3 grupos de 2 bobinas, es la siguiente:

$$R_{\text{fase}} = 2 \cdot R_{20^{\circ}\text{C}} \cdot l_{\text{bobina}} / 3 = 2 \cdot 85 \cdot 2.304 / 3 = 130.56 \text{ m}\Omega \quad (4.21)$$

Ahora, para obtener el valor de la inductancia de fase del alternador, se aplica la ley circuital de Ampère:

$$F_{\text{mm}} = \int H \, dl = N \cdot i \square B \cdot l / \mu_0 = N \cdot i \square \Phi \cdot l / \mu_0 \cdot A = N \cdot i \quad (4.22)$$



Por otra parte:

$$N \cdot \Phi = L \cdot i \quad (4.23)$$

Si despejamos la corriente en las dos expresiones anteriores, y las juntamos, después de despejar la inductancia obtenemos:

$$L = N^2 \cdot \mu_0 \cdot A / l \quad (4.24)$$

Donde:

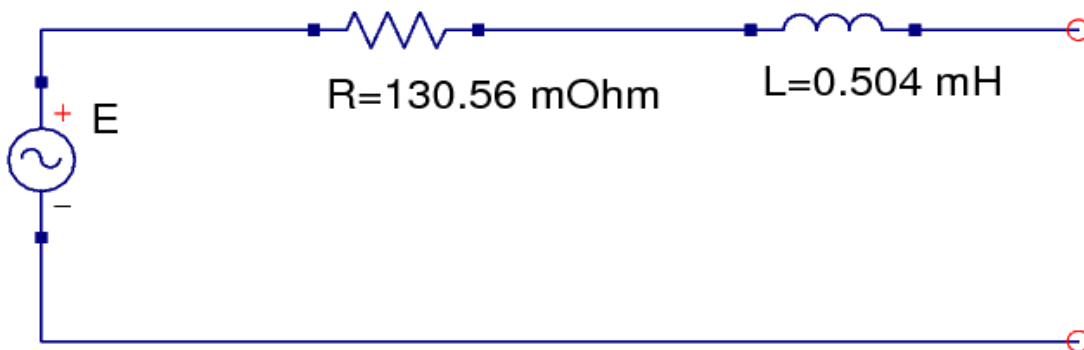
- H: Campo coercitivo (A/m)
- B: Inducción magnética (T)
- $\Phi$ : Flujo magnético (Wb)
- $\mu_0$  = Permeabilidad magnética del vacío (  $4 \cdot 10^{-7}$  H/m )
- N = Número de espiras por fase
- l = Longitud que recorre el flujo (m)
- A = Área por la que atraviesa el flujo (m<sup>2</sup>)

Para el cálculo, es necesario considerar todas las espiras de una fase, lo que corresponde a  $72 \cdot 6 = 432$  espiras. Sin embargo, no es posible considerarlas todas como una sola gran bobina, sino que se deben calcular las espiras por cada polo y luego multiplicar este valor por el número de polos, ya que de esta forma se suman inductancias que están en cuadratura magnética y no tienen interacciones que produzcan inductancias mutuas.

De esta manera obtenemos:

$$L = n_{\text{polos}}^2 \left[ \frac{N}{n_{\text{polos}}} \right]^2 \mu_0 \frac{A}{l} = 18^2 \left[ \frac{432}{18} \right]^2 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{7.6 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 2.5 \cdot 10^{-3}} = 0.504 \text{ mH} \quad (4.25)$$

Conocidos los valores de la resistencia e inductancia de fase del estator, se obtiene el modelo circuital equivalente de fase del alternador, como se observa en la **figura 23**:



**Figura 23: Circuito equivalente del alternador**

#### 4.3.10 Especificaciones finales del alternador

Con todos los datos ya decididos en los apartados anteriores, podemos calcular los valores de fem inducida en las bobinas del alternador, y la corriente que circula por el devanado, utilizando la expresión (4.14) multiplicada por el número de espiras:

Velocidad del viento (m/s)	Frecuencia (Hz)	Potencia en el eje (W)	Fem inducida/bobina(V)	Tensión fase (Conex. Y) (V)	Tensión línea (Conex. Y) (V)	Corriente fase (Conex. Y) (A)*
4	20.832	8	5.485	10.97	19	0.27
5	26.04	15.3	6.858	13.717	23.758	0.413
6	31.248	26	8.23	16.461	28.511	0.585
7	36.456	42	9.602	19.204	33.262	0.81
8	41.664	62	10.974	21.948	38.015	1.046
9	46.872	89	12.345	24.691	42.766	1.33
10	52.08	122	13.717	27.435	47.518	1.646
12	62.496	211	11.961	32.922	57.022	2.373
15	78.12	413	20.576	41.152	71.277	3.717

**Tabla 8: Características eléctricas del alternador**

\*Para el cálculo de la corriente de fase se ha utilizado un valor de  $\cos\phi = 0.9$ .

A estos valores de tensión habría que aplicarles un pequeño factor corrector correspondiente al flujo disperso que no atraviesa las bobinas.

A continuación se presenta un resumen de los parámetros elegidos y calculados a lo largo del documento para que el alternador cumpla con las especificaciones prescritas:

$D_{\text{ext}}$ (mm)	218
$D_{\text{int rotor}}$ (mm)	30
$D_{\text{int estator}}$ (mm)	50
$E_{\text{rotor}}$ (mm)	10
$E_{\text{estator}}$ (mm)	4
$\delta$ (mm)	1
$E_{\text{alternador}}$ (mm)	46.7
Número de polos	18
Número de bobinas	18
Número de espiras por bobina	72
$L_{\text{bobina}}$ (mm)	55
$E_{\text{bobina}}$ (mm)	8
$L_{\text{imán}}$ (mm)	50.8
$E_{\text{imán}}$ (mm)	6.35
$B_{\text{imán max}}$ (Gauss)	5000
$S_{\text{hilo}}$ (mm <sup>2</sup> )	0.5
$J_{\text{max}}$ (A/mm <sup>2</sup> )	7.54
$R_{\text{fase}}$ (m $\Omega$ )	130.56
$L_{\text{fase}}$ (mH)	0.504
$I_{\text{desconexión}}$ (A)	4

**Tabla 9: Resumen de características**

#### 4.3.11 Pérdidas eléctricas y magnéticas

Las pérdidas en una máquina eléctrica están representadas por la energía que se pierde por histéresis magnética y las corrientes parásitas que circulan por el núcleo, también llamadas pérdidas en el hierro, y las pérdidas eléctricas por calor en el devanado, o pérdidas en el cobre. En este caso, al tener un estator fabricado de material no ferromagnético, van a disminuir mucho las pérdidas por histéresis. Las pérdidas por corrientes parásitas serán despreciadas tomando como base el uso de aleaciones de acero amorfas.

Las pérdidas por histéresis son proporcionales a la frecuencia de trabajo, por tanto a velocidades bajas de viento serán reducidas, y se irán incrementando conforme aumente la velocidad del viento, y con ello la frecuencia. Estas pérdidas se pueden modelizar a través de la ecuación de Steinmez:

$$P_h = K_h * f * V * B_{\max}^{\alpha} \quad (4.26)$$

Donde:

- $K_h$  = Constante que depende del tipo de material
- $f$ : frecuencia a la que se recorre el ciclo de histéresis (Hz)
- $V$ : Volumen del material ( $\text{cm}^3$ )
- $B_{\max}$ : Valor máximo de inducción (T)
- $\alpha$ : Coeficiente de Steinmez (oscila entre 1.5 y 3)

El valor de inducción máxima en el hierro, como se verá más adelante, es 1.136 T, el valor de  $K_h$  se tomado como valor estándar de acero fundido, 0.012, y para el coeficiente de Steinmez se ha tomado un valor de 2. El volumen de acero de los rotores se ha calculado como:

$$V_{\text{rotor}} = 2 * E_{\text{rotor}} * (\pi * D_{\text{ext rotor}}^2 / 4 - \pi * D_{\text{int rotor}}^2 / 4) =$$

$$= 2 * 1 * (\pi * 2.18^2 / 4 - \pi * 0.3^2 / 4) = 0.7323 \text{ cm}^3 \quad (4.27)$$

Donde:

- V: Volumen total de los rotores (cm<sup>3</sup>)
- $E_{\text{rotor}}$ : Espesor de los rotores (cm)
- $D_{\text{ext rotor}}$ : Diámetro exterior de los rotores (cm)
- $D_{\text{int rotor}}$ : Diámetro interior de los rotores (cm)

Velocidad del viento (m/s)	Frecuencia (Hz)	Potencia en el eje (W)	Pérdidas en el hierro (W)
4	20.832	8	0.236
5	26.04	15.3	0.295
6	31.248	26	0.354
7	36.456	42	0.413
8	41.664	62	0.473
9	46.872	89	0.532
10	52.08	122	0.591
12	62.496	211	0.709
15	78.12	413	0.886

**Tabla 10: Pérdidas en el hierro**

Cómo el diseño lleva un volumen de hierro muy pequeño, y la frecuencia no es muy elevada, las pérdidas en el hierro serán muy reducidas cómo se observa en la **tabla 10**.

Las pérdidas por efecto Joule en el cobre aumentan con la resistencia de los devanados, y con el cuadrado de la corriente. Al tener una resistencia de fase baja, las pérdidas en el cobre van a ser reducidas. Además, a velocidades bajas del viento circula una corriente muy pequeña por los devanados, hecho que también contribuye a reducir las pérdidas. Se presenta un resumen en la siguiente tabla:

Velocidad del viento (m/s)	Potencia en el eje (W)	Pérdidas en el cobre (W)
4	8	0.028
5	15.3	0.066
6	26	0.134
7	42	0.257
8	62	0.428
9	89	0.692
10	122	1.061
12	211	2.205
15	413	5.411

**Tabla 11: Pérdidas en el cobre**

A continuación se presenta una tabla con el resumen de las pérdidas eléctricas y magnéticas totales de la máquina. A estos valores habría que sumarle las pérdidas mecánicas y las pérdidas en el sistema electrónico de regulación.

Velocidad del viento (m/s)	Pérdidas eléctricas totales (W)
4	0.264
5	0.361
6	0.488
7	0.67
8	0.901
9	1.224
10	1.652
12	2.914
15	6.297

**Tabla 12: Pérdidas eléctricas totales**

Como se puede observar en esta tabla, las pérdidas debidas al sistema eléctrico son muy reducidas. A velocidades del viento altas aumentan las pérdidas en el cobre debido a una mayor circulación de corriente por los devanados, manteniéndose bastante reducidas las pérdidas en el hierro. A falta de descontar las pérdidas mecánicas y en el sistema de regulación, se puede afirmar que el rendimiento del alternador va a ser elevado, con valores en torno al 95 %.



## **5. ANÁLISIS DE LA ONDA DE INDUCCIÓN MAGNÉTICA EN EL ENTREHIERRO MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS**

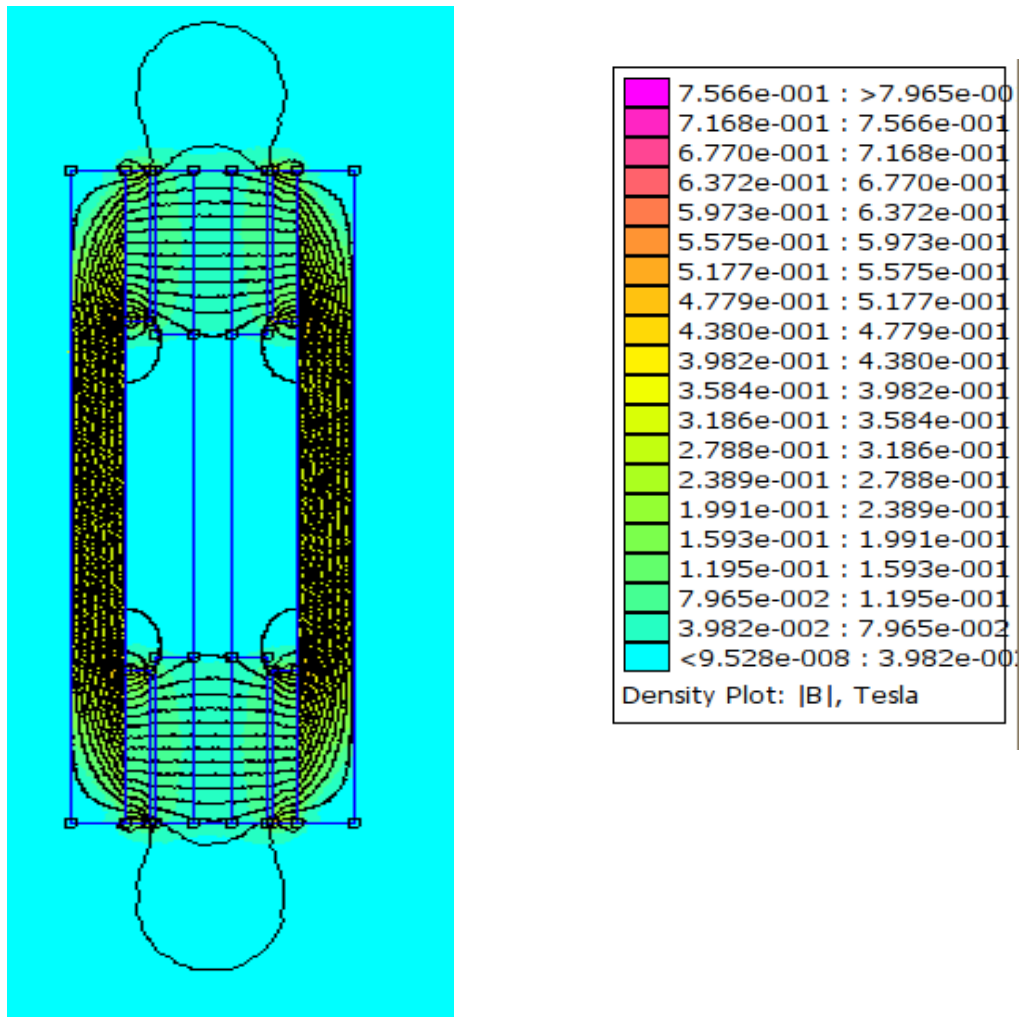
La baja velocidad de operación del alternador permite desde el punto de vista constructivo poder ajustar entrehierros de tamaño reducido, lo que ayuda a alcanzar niveles elevados de densidad de flujo magnético en el entrehierro.

Con el objetivo de conseguir el mejor aprovechamiento posible del flujo magnético, se han realizado diversos análisis mediante el método de elementos finitos, modificando diferentes parámetros constructivos del diseño. Se han reducido lo máximo posible los espesores de las diferentes piezas en vista a cumplir con este objetivo.

### 5.1 Análisis iniciales de flujo magnético

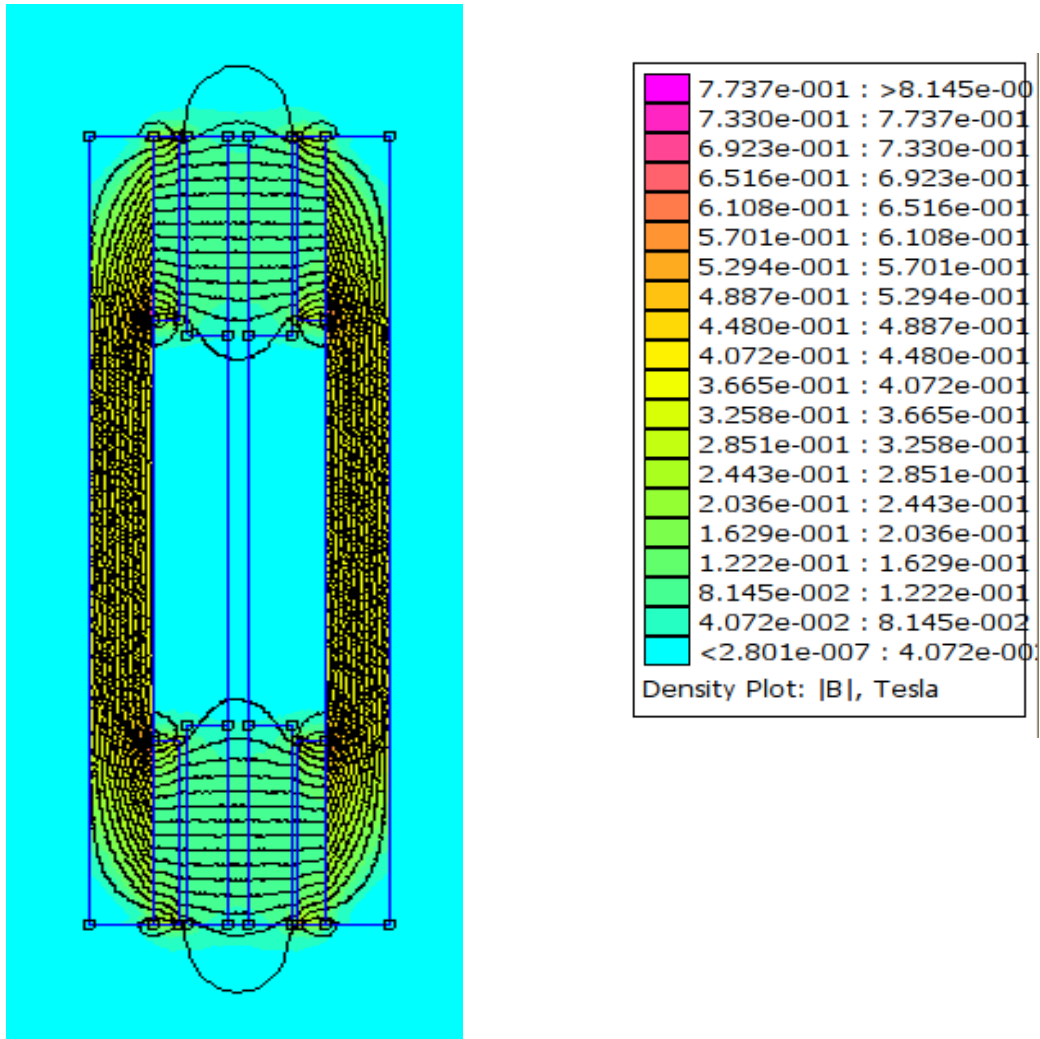
Antes de decidir las dimensiones finales de las piezas, se han realizado diversos análisis con diferentes medidas de espesores para los rotores, el estator y las bobinas.

La siguiente imagen muestra la distribución de flujo obtenida para una anchura de estator de 10 mm, una anchura de rotor de 15 mm, y una anchura de bobinas de 10 mm.



**Figura 24: Inducción magnética y líneas de flujo para estator 10 mm,  $\delta=1.5$  mm**

Esta sería la distribución de flujo para unas dimensiones de anchura de estator de 5 mm, anchura de rotor de 15 mm, y anchura de bobinas de 10 mm.



**Figura 25: Inducción magnética y líneas de flujo para estator 5 mm,  $\delta=1.5$  mm**

Como se puede observar, cuanto más se reduce la distancia entre los imanes menos flujo disperso aparece, y aumenta la inducción magnética. Esto lleva a que crucen más líneas de flujo a través de las bobinas, y por tanto generarán más fuerza electromotriz.

Diseño de un alternador de flujo axial con imanes permanentes

Después de varias pruebas, y respetando los condicionantes de fabricación, las dimensiones elegidas han sido 4 mm de espesor para el estator, 10 mm de espesor para el rotor, y 8 mm de espesor para las bobinas.

En los apartados siguientes se expone una comparación entre diferentes tipos de entrehierros, para las dimensiones aquí elegidas de los componentes del alternador.

## 5.2 Análisis del flujo magnético para $\delta=1.5$ mm

Una vez decididas el resto de dimensiones, se ha procedido ha hacer varios análisis con distintas longitudes de entrehierros. La menor distancia que se puede conseguir con los medios disponibles de fabricación es 1 mm. Estos son los resultados:

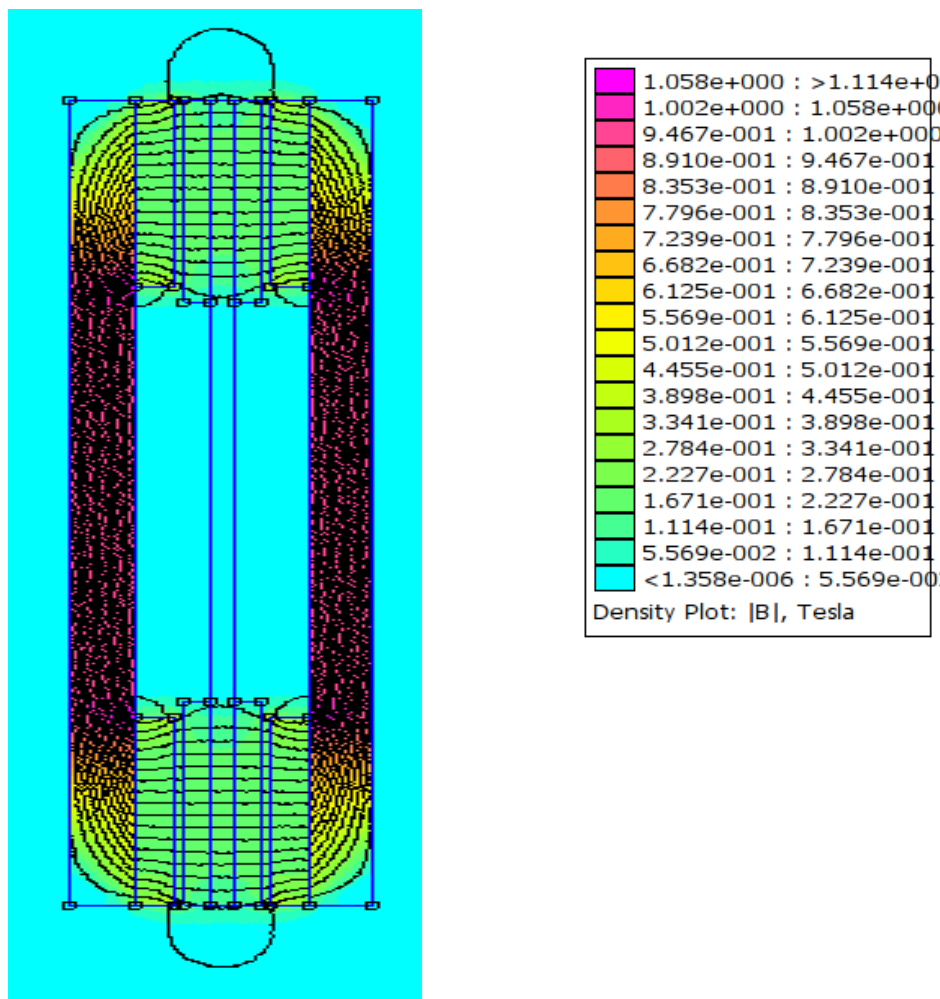
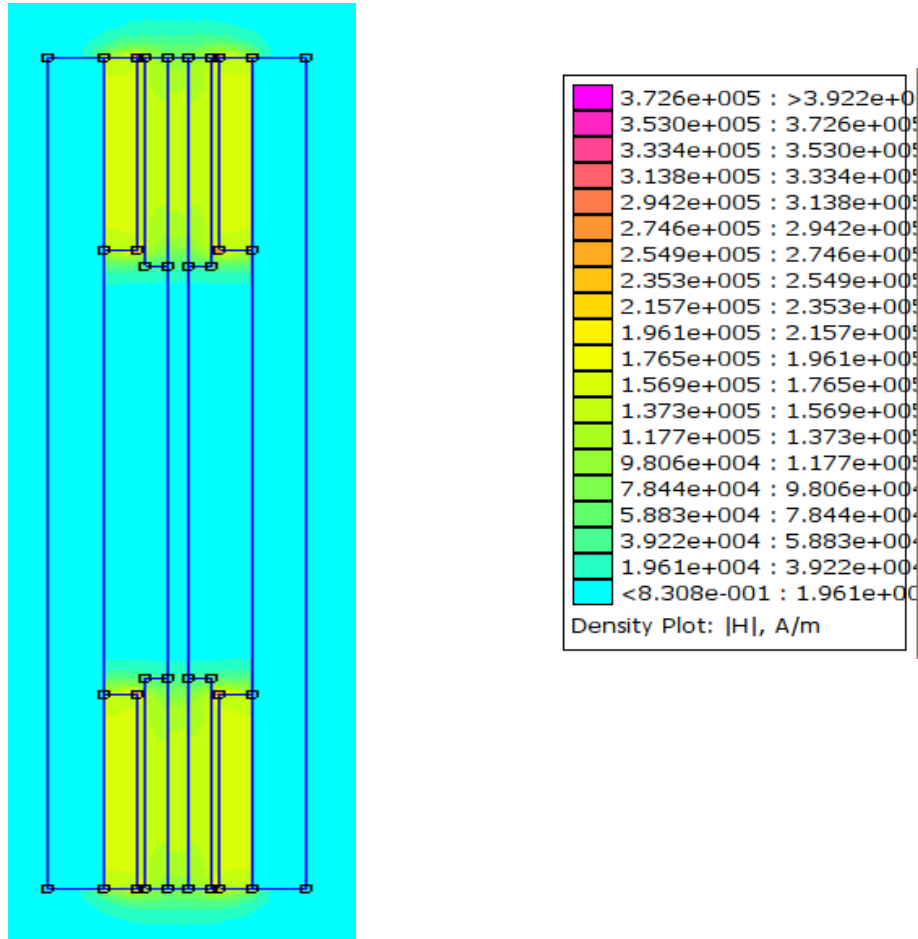


Figura 26: Inducción magnética y líneas de flujo para  $\delta = 1.5$  mm



**Figura 27: Intensidad de campo magnético para  $\delta = 1.5$  mm**

### 5.3 Análisis del flujo magnético para $\delta=1.3$ mm

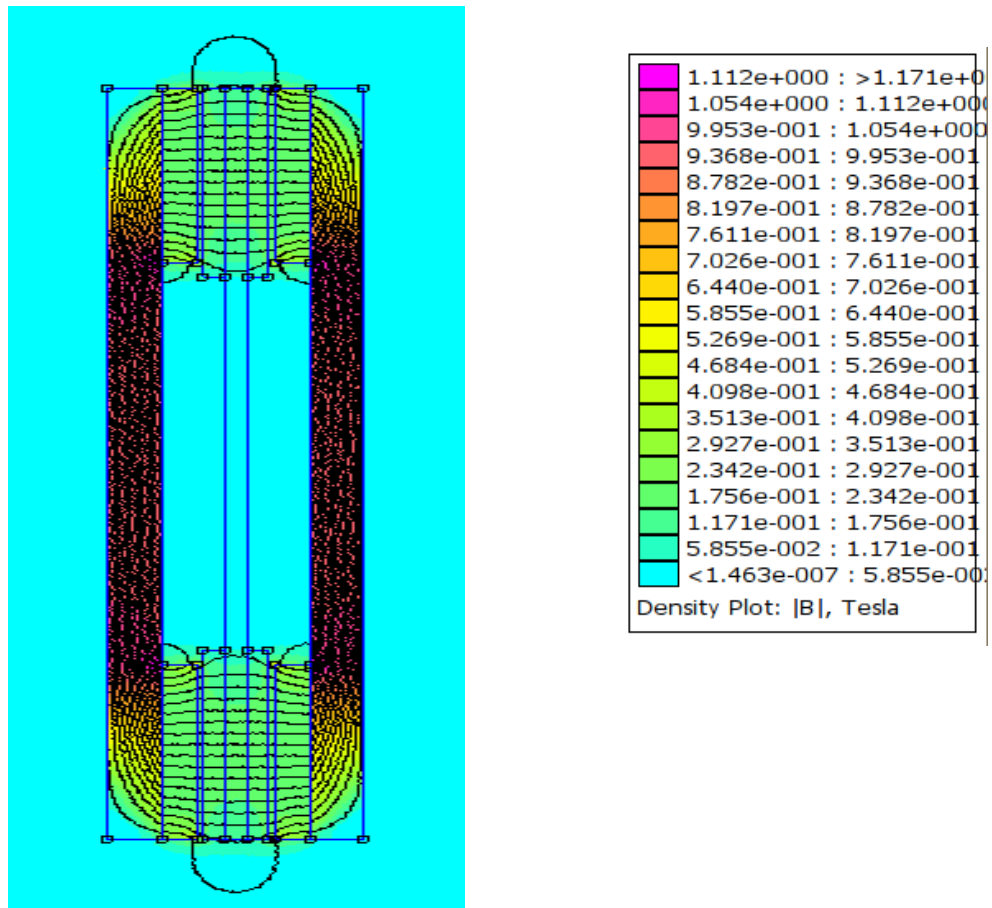


Figura 28: Inducción magnética y líneas de flujo para  $\delta = 1.3$  mm

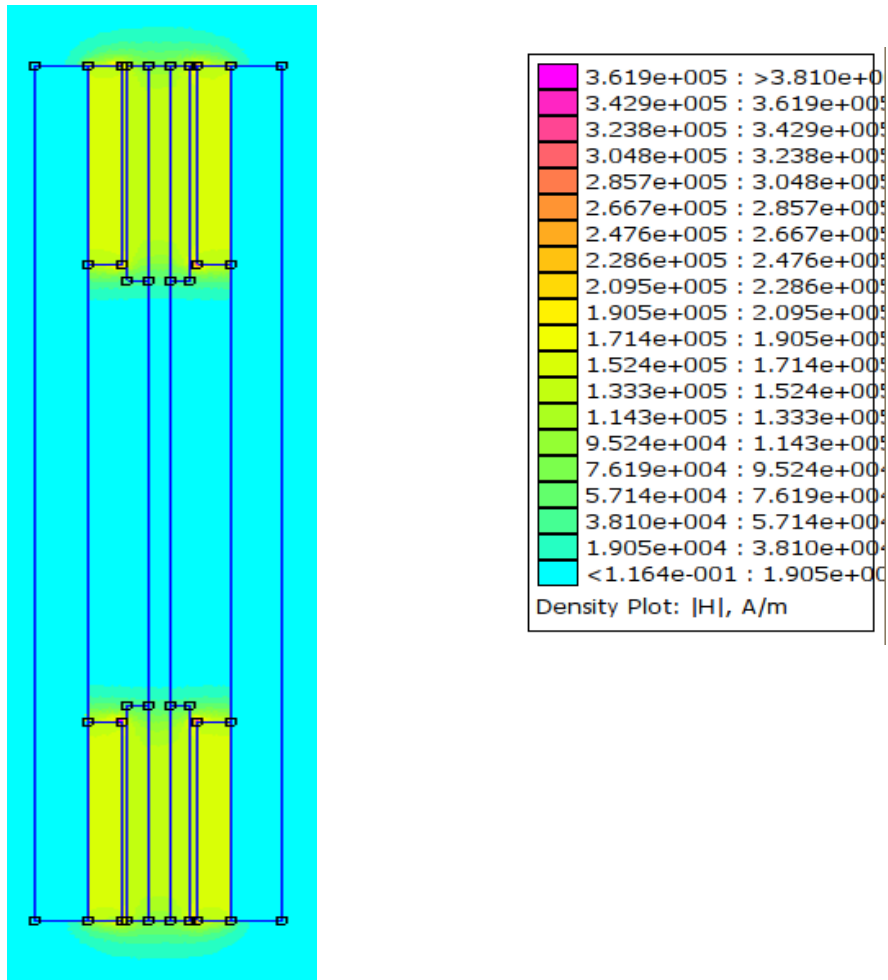


Figura 29: Intensidad de campo magnético para  $\delta = 1.3 \text{ mm}$



### 5.4 Análisis del flujo magnético para $\delta=1.2$ mm

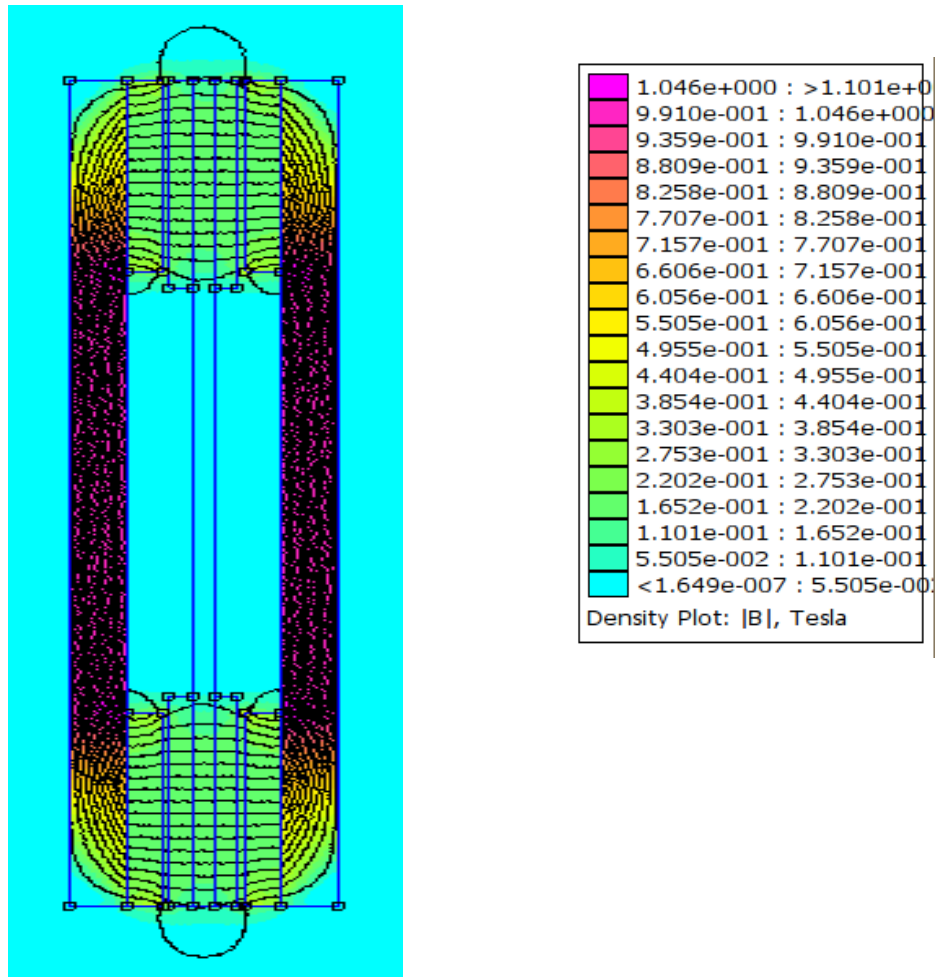
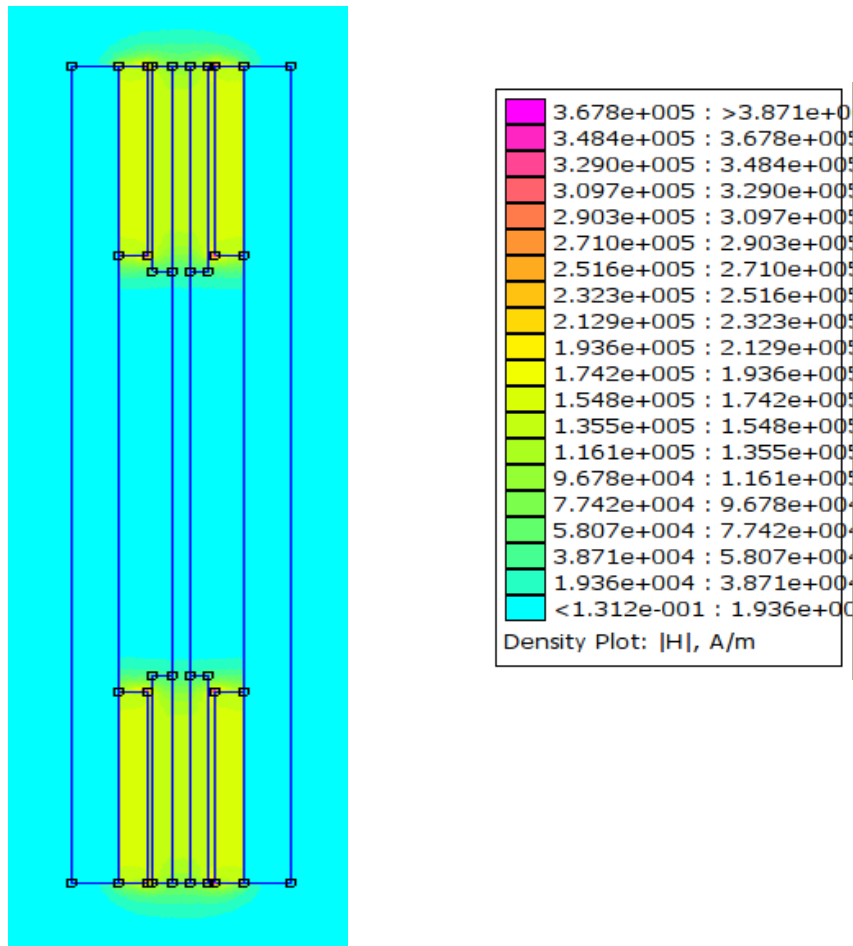


Figura 30: Inducción magnética y líneas de flujo para  $\delta = 1.2$  mm



**Figura 31: Intensidad de campo magnético para  $\delta = 1.2$  mm**

### 5.5 Análisis del flujo magnético para $\delta=1$ mm

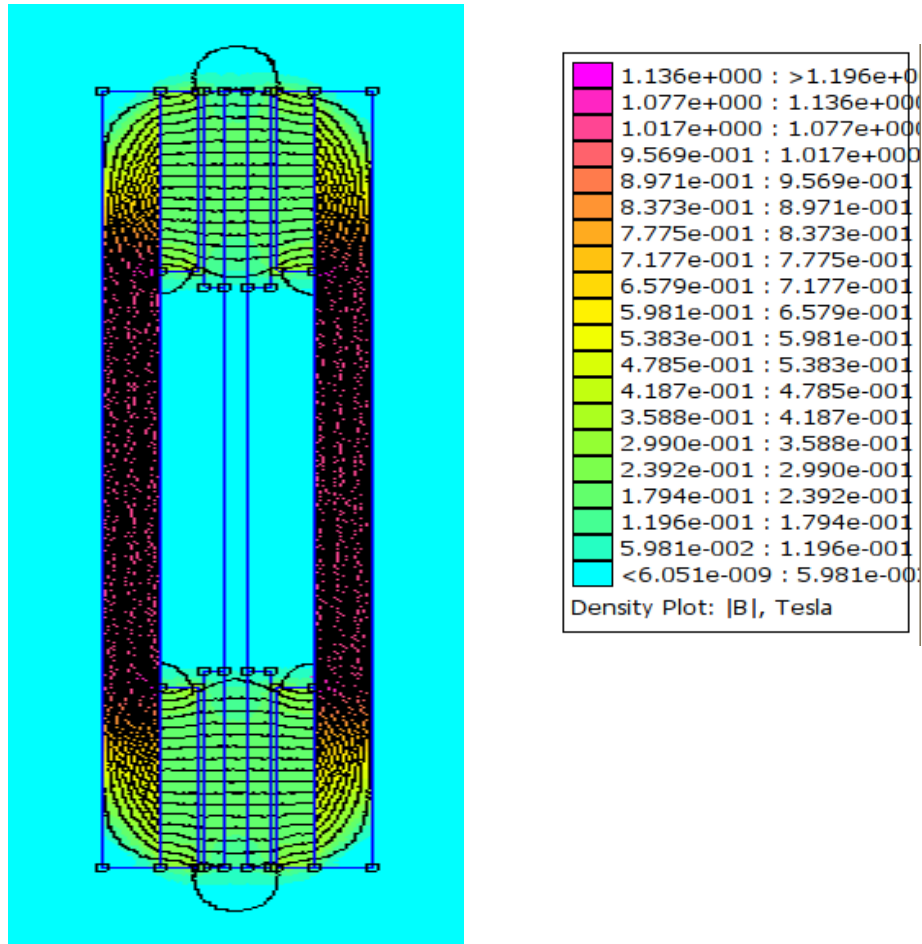
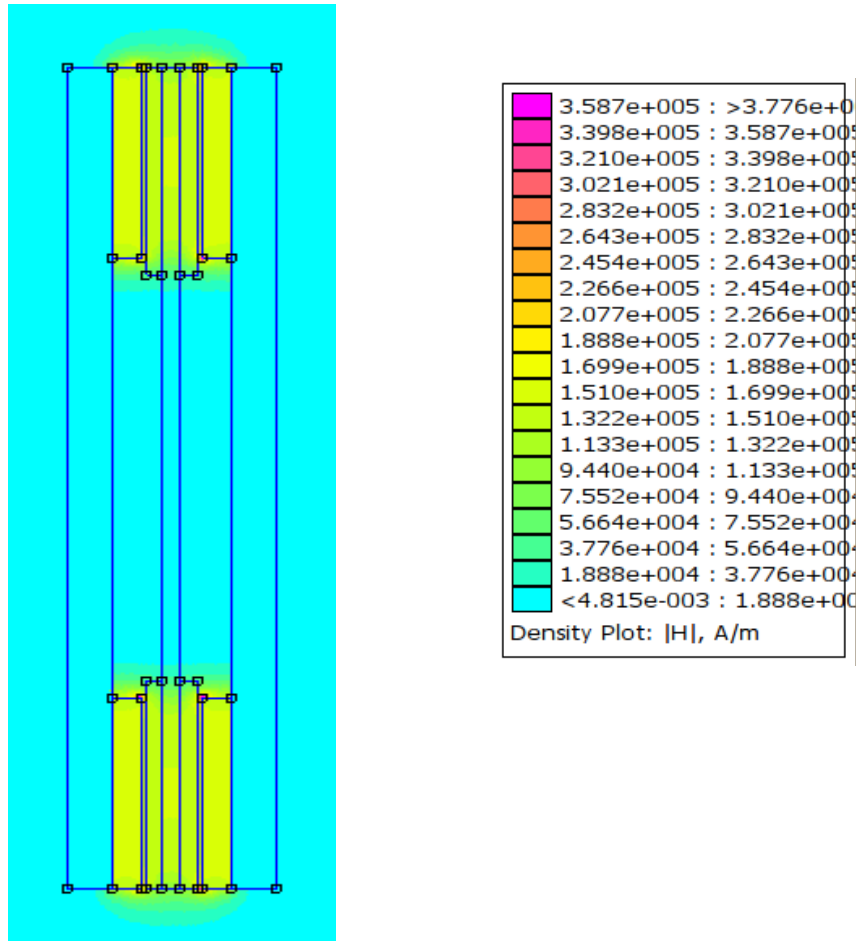


Figura 32: Inducción magnética y líneas de flujo para  $\delta = 1$  mm



**Figura 33: Intensidad de campo magnético para  $\delta = 1$  mm**

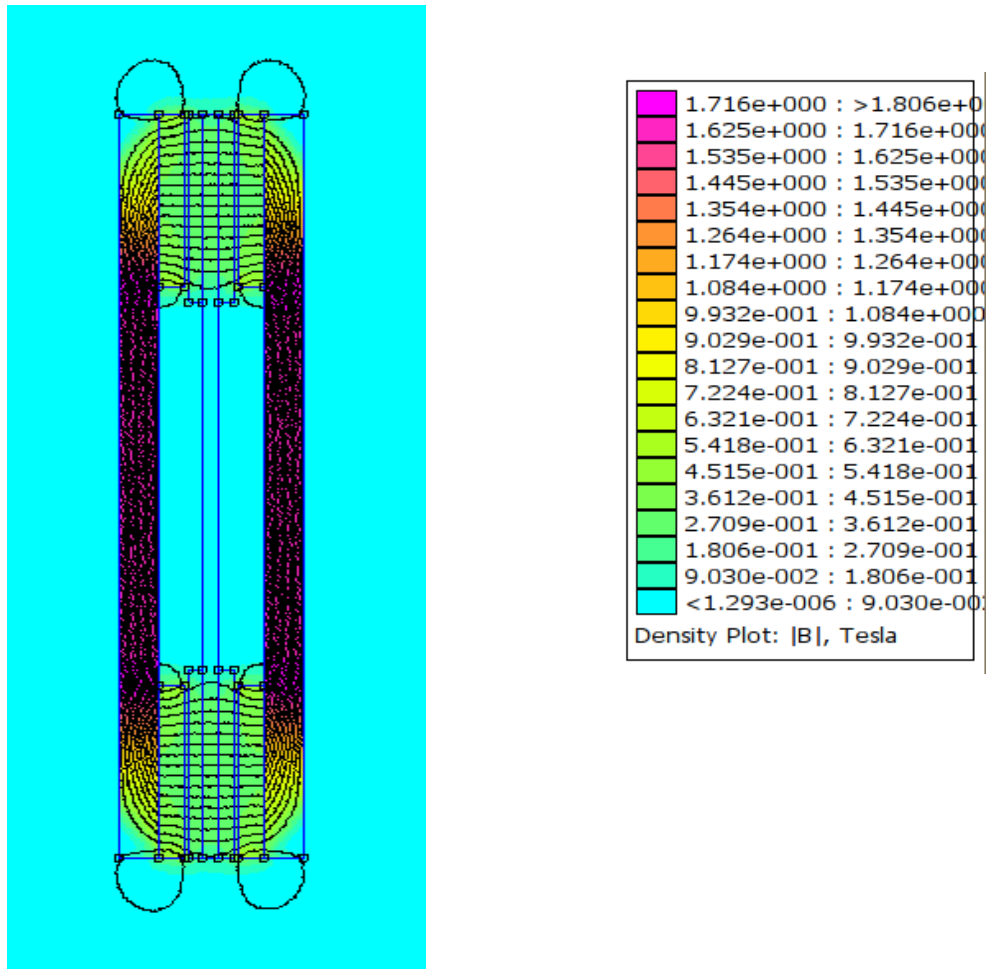
Cómo puede observarse en las imágenes, al ir disminuyendo el entrehierro aumenta un poco la inducción magnética, a la vez que disminuye la intensidad de campo magnético. Por tanto para optimizar el paso de las líneas de flujo a través de las bobinas se ha elegido una longitud de entrehierro de 1 mm, la menor que se puede conseguir con los medios de fabricación disponibles para el prototipo.

## 5.6 Consideraciones finales

Como se ha visto en los puntos anteriores, reducir la distancia entre los imanes haciendo la máquina lo más estrecha posible, y disminuir al máximo el entrehierro aumentan la inducción magnética en las bobinas.

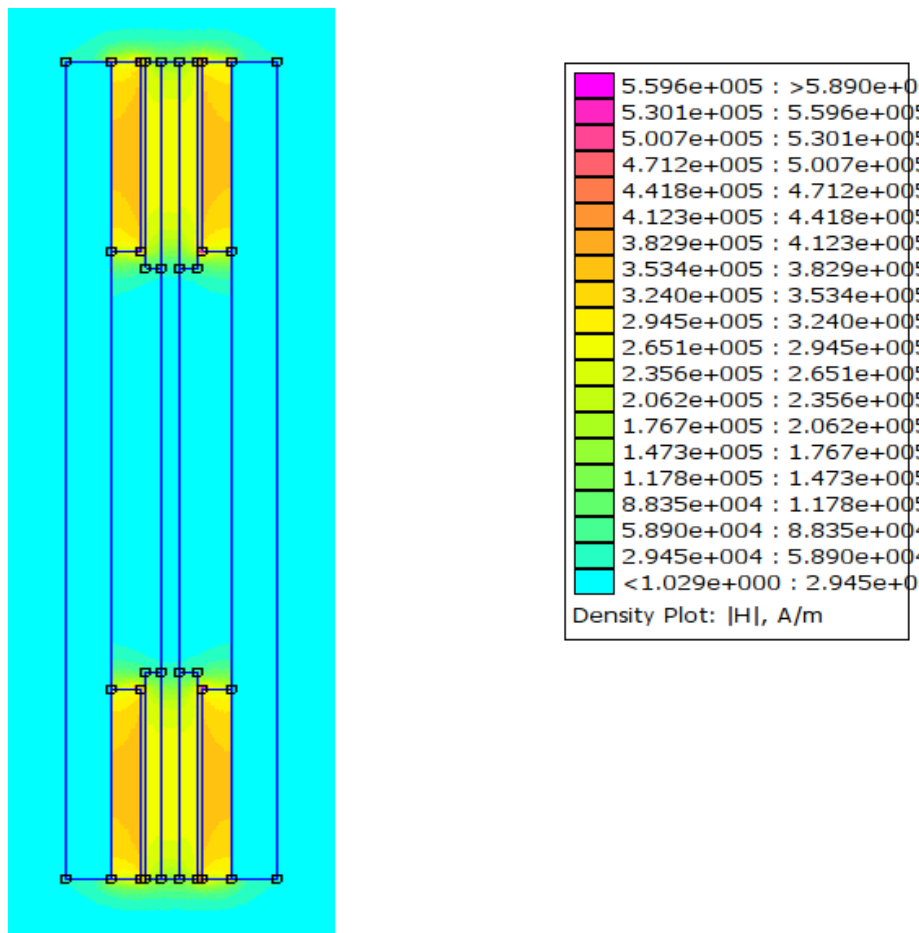
Con la solución elegida de un entrehierro de 1 mm, se consigue la mejor distribución de flujo para los imanes elegidos, pero la inducción magnética en el entrehierro no llega a los 0.5 T previstos.

Por todo esto se ha decidido dejar la configuración final del alternador como se ha calculado en este apartado, y modificar los imanes por otros de mayor inducción remanente. Después de hacer varias pruebas se han elegido unos imanes con las mismas especificaciones que los descritos en la **tabla 7**, pero con una inducción remanente de 8000 Gauss. Con esto conseguiremos los 5000 Gauss previstos en el entrehierro.



**Figura 34: Inducción magnética y líneas de flujo para  $B_{max}= 8000$  Gauss**

A continuación se expone la distribución de la intensidad de campo magnético para la configuración descrita en este apartado:



**Figura 35: Intensidad de campo magnético para  $B_{\max} = 8000$  Gauss**

A la vista de estos resultados podemos asegurar el valor requerido de inducción magnética en el entrehierro, por tanto la solución final adoptada ha sido la de utilizar en el diseño unos imanes de NdFeB con una inducción máxima de 8000 Gauss.

El resto de características de los imanes son las reflejadas en la **tabla 7**.

## 6. CONCLUSIONES

A lo largo de este proyecto se han expuesto el procedimiento y los pasos necesarios para realizar el cálculo y diseño de un alternador síncrono de flujo axial, con imanes permanentes, para su utilización en un aerogenerador eólico de tipo Savonius.

Se ha diseñado un alternador que cumple con las especificaciones de diseño en el rango de trabajo definido por el generador Savonius, con un buen aprovechamiento del flujo magnético generado por los imanes, consiguiendo minimizar las pérdidas, y los posibles costes de producción del prototipo.

Al implementar un número de polos elevado, se ha conseguido que el alternador genere energía a partir de una baja velocidad de viento. El intervalo de funcionamiento está comprendido entre 4 m/s y 15 m/s. Este diseño presenta la ventaja de poder prescindir de elementos de transmisión mecánica elevadores de velocidad, con lo que se contribuye a reducir las pérdidas mecánicas.

El hecho de fabricar un estator de madera donde se arrolla el bobinado hace desaparecer los pares pulsantes, eliminando ruidos y vibraciones. Además al no llevar ranuras, se minimizan los pares de ranuras y la inductancia de dispersión, obteniéndose un rendimiento elevado.

La tensión obtenida en bornes del alternador tendrá forma trapezoidal, debido a la configuración y conexión de los devanados. Este tipo de tensión facilita la rectificación y la obtención de una señal continua a la hora de cargar las baterías.



## Diseño de un alternador de flujo axial con imanes permanentes

Las potencias obtenidas a la salida del alternador no son muy elevadas, en parte debido al bajo aprovechamiento de la energía del viento por parte del aerogenerador, por lo que este diseño no es adecuado para la generación de energía en grandes cantidades. Su uso es aplicable a la generación aislada de electricidad para consumo independiente de la red, mejorando su utilización al conectar varios alternadores en paralelo para obtener una potencia mayor, o supliendo la posible falta de potencia eléctrica instalando unas pequeñas placas solares.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- "Axial flux permanent magnet brushless machines" -- Jacek Gieras & Rong-Jie Wang
- "Aportaciones al estudio de las máquinas eléctricas de flujo axial mediante la aplicación del método de los elementos finitos" -- Eduardo Frías Valero, Tesis doctoral
- "Slotless, toroidal wound, axially magnetized permanent magnet generator for small wind turbine systems" -- S.E. Skaar, O. Krovel, R. Nilssen and H. Erstad; Department of Electrical Power Engineering Norwegian University of Science and Technology
- "Permanent magnets wind generator comparison of different topologies " -- Yicheng Chen, Pragasen Pillay, Azheem Khan
- "Axial flux and radial flux generators in small-scale wind power production" -- T. Rovio, H. Vihriälä; Institute of Electromagnetics, Tampere University of Technology
- "Permanent magnet axial-flux generator with toroidal winding " -- Ants Kallaste, Aleksander Kilk ; Tallinn University of Technology
- "A state of art on different configurations of permanent magnet brushless machines" -- B. Singh, B. P. Singh, S. Dwivedi

Diseño de un alternador de flujo axial con imanes permanentes

- "Optimum design aspects of a power axial flux permanent magnet synchronous machine" -- Paul Curiac
- "Diseño de un generador de flujo axial con imanes permanentes para aplicaciones eólicas" -- Rogel Wallace, Alejandro Rodríguez
- "Máquinas de imanes permanentes" -- Mario Guillermo Macri; Universidad Nacional de Mar del Plata
- "Generalidades sobre imanes permanentes y su caracterización " -- Instituto Nacional de Tecnología Industrial , Centro Regional Córdoba
- "Conversión de la energía del viento" -- <http://www.mailxmail.com/curso-agua-energia-sinergia-hidroenergetica-1/energia-eolica-conversion-energia-viento>
- "Parámetros de diseño de aerogeneradores" -- [http://libros.redsauce.net /](http://libros.redsauce.net/)
- "Generadores eólicos" -- [http://www.windgenkits.com/vcom/product\\_info.php?cPath=26&products\\_id=49](http://www.windgenkits.com/vcom/product_info.php?cPath=26&products_id=49)
- "Imanes permanentes de NdFeB" -- [http://www.magnet4less.com/product\\_info.php?cPath=15&products\\_id=501](http://www.magnet4less.com/product_info.php?cPath=15&products_id=501)
- Programa de análisis de campos magnéticos mediante elementos finitos FEMM