



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO ELÉCTRICO

**PRE-INDUSTRIALIZACIÓN DE UN SISTEMA DE
GENERACIÓN EÓLICO URBANO DE EJE VERTICAL.
DISEÑO DEL GENERADOR, ESTUDIO DE
IMPLANTACIÓN**

Autor: Miguel Roa Prieto
Director: Arnaud Davigny

Madrid
Mayo 2016

AUTORIZACIÓN PARA LA DIGITALIZACIÓN, DEPÓSITO Y DIVULGACIÓN EN RED DE PROYECTOS FIN DE GRADO, FIN DE MÁSTER, TESIS O MEMORIAS DE BACHILLERATO

1ª. Declaración de la autoría y acreditación de la misma.

El autor D. MIGUEL ROA PRIETO

DECLARA ser el titular de los derechos de propiedad intelectual de la obra:

Reconstrucción de un sistema de gestión ética basado en el utilitarismo. Dación del presente, título de inscripción
que esta es una obra original, y que ostenta la condición de autor en el sentido que otorga la Ley de Propiedad Intelectual.

2ª. Objeto y fines de la cesión.

Con el fin de dar la máxima difusión a la obra citada a través del Repositorio institucional de la Universidad, el autor CEDE a la Universidad Pontificia Comillas, de forma gratuita y no exclusiva, por el máximo plazo legal y con ámbito universal, los derechos de digitalización, de archivo, de reproducción, de distribución y de comunicación pública, incluido el derecho de puesta a disposición electrónica, tal y como se describen en la Ley de Propiedad Intelectual. El derecho de transformación se cede a los únicos efectos de lo dispuesto en la letra a) del apartado siguiente.

3ª. Condiciones de la cesión y acceso

Sin perjuicio de la titularidad de la obra, que sigue correspondiendo a su autor, la cesión de derechos contemplada en esta licencia habilita para:

- Transformarla con el fin de adaptarla a cualquier tecnología que permita incorporarla a internet y hacerla accesible; incorporar metadatos para realizar el registro de la obra e incorporar "marcas de agua" o cualquier otro sistema de seguridad o de protección.
- Reproducirla en un soporte digital para su incorporación a una base de datos electrónica, incluyendo el derecho de reproducir y almacenar la obra en servidores, a los efectos de garantizar su seguridad, conservación y preservar el formato.
- Comunicarla, por defecto, a través de un archivo institucional abierto, accesible de modo libre y gratuito a través de internet.
- Cualquier otra forma de acceso (restringido, embargado, cerrado) deberá solicitarse expresamente y obedecer a causas justificadas.
- Asignar por defecto a estos trabajos una licencia Creative Commons.
- Asignar por defecto a estos trabajos un HANDLE (URL *persistente*).

4ª. Derechos del autor.

El autor, en tanto que titular de una obra tiene derecho a:

- Que la Universidad identifique claramente su nombre como autor de la misma
- Comunicar y dar publicidad a la obra en la versión que ceda y en otras posteriores a través de cualquier medio.
- Solicitar la retirada de la obra del repositorio por causa justificada.
- Recibir notificación fehaciente de cualquier reclamación que puedan formular terceras personas en relación con la obra y, en particular, de reclamaciones relativas a los derechos de propiedad intelectual sobre ella.

5ª. Deberes del autor.

El autor se compromete a:

- Garantizar que el compromiso que adquiere mediante el presente escrito no infringe ningún derecho de terceros, ya sean de propiedad industrial, intelectual o cualquier otro.
- Garantizar que el contenido de las obras no atenta contra los derechos al honor, a la intimidad y a la imagen de terceros.
- Asumir toda reclamación o responsabilidad, incluyendo las indemnizaciones por daños, que pudieran ejercitarse contra la Universidad por terceros que vieran infringidos sus derechos e

intereses a causa de la cesión.

- d) Asumir la responsabilidad en el caso de que las instituciones fueran condenadas por infracción de derechos derivada de las obras objeto de la cesión.

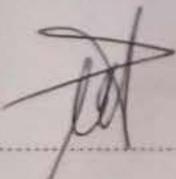
6°. Fines y funcionamiento del Repositorio Institucional.

La obra se pondrá a disposición de los usuarios para que hagan de ella un uso justo y respetuoso con los derechos del autor, según lo permitido por la legislación aplicable, y con fines de estudio, investigación, o cualquier otro fin lícito. Con dicha finalidad, la Universidad asume los siguientes deberes y se reserva las siguientes facultades:

- La Universidad informará a los usuarios del archivo sobre los usos permitidos, y no garantiza ni asume responsabilidad alguna por otras formas en que los usuarios hagan un uso posterior de las obras no conforme con la legislación vigente. El uso posterior, más allá de la copia privada, requerirá que se cite la fuente y se reconozca la autoría, que no se obtenga beneficio comercial, y que no se realicen obras derivadas.
- La Universidad no revisará el contenido de las obras, que en todo caso permanecerá bajo la responsabilidad exclusiva del autor y no estará obligada a ejercitar acciones legales en nombre del autor en el supuesto de infracciones a derechos de propiedad intelectual derivados del depósito y archivo de las obras. El autor renuncia a cualquier reclamación frente a la Universidad por las formas no ajustadas a la legislación vigente en que los usuarios hagan uso de las obras.
- La Universidad adoptará las medidas necesarias para la preservación de la obra en un futuro.
- La Universidad se reserva la facultad de retirar la obra, previa notificación al autor, en supuestos suficientemente justificados, o en caso de reclamaciones de terceros.

Madrid, a 26 de Mayo de 2016

ACEPTA

Fdo. 

Motivos para solicitar el acceso restringido, cerrado o embargado del trabajo en el Repositorio Institucional:

Proyecto realizado por el alumno/a:

Miguel Roa Prieto

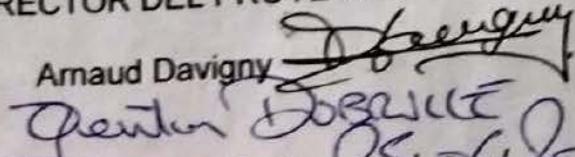
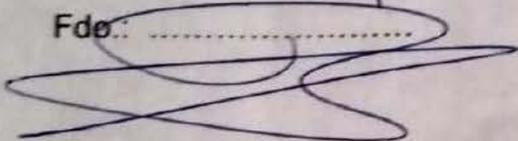
Fdo.: 

Fecha: 25.4.16

Autorizada la entrega del proyecto cuya información no es de carácter
confidencial

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

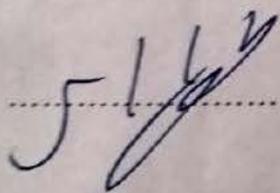
Arnaud Davigny

Fdo.: 


Fecha: 25.04.2016

Vº Bº del Coordinador de Proyectos

Fernando de Cuadra García

Fdo.: 

Fecha: 26.5.16

ÍNDICE

ÍNDICE.....	1
ÍNDICE DE FIGURAS.....	3
ÍNDICE DE TABLAS.....	4
PARTE I: MEMORIA.....	5
CAPÍTULO 1. Introducción.....	6
CAPÍTULO 2. Generalidades de la energía eólica.....	7
I. La Ley de Betz y el coeficiente de potencia.....	7
II. Presentación de los diferentes tipos de turbinas eólicas.....	8
III. Estudio de la potencia mecánica prevista.....	11
IV. Turbulencia de los vientos urbanos.....	15
CAPÍTULO 3. Dimensionamiento del generador eléctrico.....	15
I. Generalidades sobre los generadores.....	15
II. Problemática del generador.....	17
III. Suposiciones de partida.....	18
IV. Dimensionamiento del entrehierro.....	19
V. Bobinado del estator.....	22
VI. Coeficiente de Carter y la altura del imán.....	28
VII. Inducciones y campos magnéticos.....	29
VIII. Inducción remanente ficticia del imán. Bar.....	34
IX. Circuito equivalente del generador.....	34
X. Flujo y voltaje. Behn-Eshenburt.....	40
XI. Resistencias equivalentes.....	41
XII. Constantes de tiempo.....	45

XIII.	Cálculo de las pérdidas y el rendimiento.....	45
XIV.	Dimensionamiento de los imanes	49
CAPÍTULO 4. Regulación y explotación de la energía producida		50
CAPÍTULO 5. Optimización del rotor Savonius.....		54
I.	Elección del número de palas	54
II.	Estudio del perfil	54
III.	Descripción general del sistema	55
IV.	Características técnicas de la turbina	60
CAPÍTULO 6. Estudio de implantación de la turbina		61
I.	Estudio del viento.....	61
II.	Industrialización.....	64
PARTE II: IMPACTO AMBIENTAL		66
PARTE III: ANEJOS.....		68
Anejo I. Catálogos		69
I.	Catálogo Imanes de Nedominio	69
II.	Catálogo Cobre.....	70
III.	Catálogo Cojinetes.....	71
IV.	Catálogo Rectificador	72
V.	Catálogo Rodamientos.....	75
Anejo II. Clasificación		77
Anejo III. Resumen de los resultados del generador.....		81
PARTE IV: REFERENCIAS.....		88
PARTE V: PRESUPUESTO.....		90

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 : Coeficiente de potencia en función de la estructura	8
Figura 2 : Clasificación de los aerogeneradores según el número de palas	9
Figura 3 : Principio de sustentación.....	9
Figura 4: Turbina Darrieus	10
Figura 5: Comportamiento del viento en una turbina Savonius	11
Figura 6 : Velocidad de rotación en función del viento	12
Figura 7: Potencia suministrada en función de la velocidad de rotación y viento	12
Figura 8: Par en función de la velocidad de rotación y del viento	13
Figura 10: Modelización del viento en OpenFOAM	13
Figura 9: Modelización del viento en OpenFOAM.....	13
Figura 11: Flujo de viento urbano.....	15
Figura 12: Estructura básica de un generador	16
Figura 13: Detalle de un generador de jaula de ardilla	17
Figura 14 : Esquema de la geometría del generador.....	31
Figura 15: Esquema equivalente del generador síncrono de imanes permanentes.....	34
Figura 16 : Detalle de funcionamiento de un rectificador de onda.....	51
Figura 17: Detalle del MPPT en la cadena de transmisión de energía	52
Figura 18: Convertidor rectificador con sistema MPPT incorporado.....	52
Figura 19 : Detalle de funcionamiento de un convertidor boost	53
Figura 20 : Cadena de transmisión de energía eléctrica completa	53
Figura 21: Turbina Savonius bipala.....	54
Figura 22: Turbina Savonius de perfil helicoidal	55
Figura 23 : Esquema de la subdivisión del diseño.....	55
Figura 24 : Estructura mecánica completa de la turbina	56
Figura 25 : Perspectiva de alzado del sistema mecánico completo de la turbina.....	57
Figura 26 : Detalle de la unión superior.....	58
Figura 27: Detalle de la unión inferior.....	58
Figura 28 : Detalle de la unión inferior	59
Figura 29 : Esquema de la plataforma de anclaje	59
Figura 30 : Bloque unitario de la plataforma de anclaje	60
Figura 31 : Sistema de anclaje completo.....	60
Figura 32 : Detalle del viento de la zona de implantación	62
Figura 33 : Modelo 3D Autodesk Ecotec Analysis del entorno	62
Figura 34 : Modelo 3D y estudio de viento a una altura de 2m del suelo.....	63
Figura 35 : Estudio de viento a 11m de altura.....	63
Figura 36 : Detalle de máximo potencial de viento.....	64

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 : Dimensiones principales del generador	22
Tabla 2 : Cálculos de las ranuras	23
Tabla 3 : Medidas tomadas para el aislamiento.....	26
Tabla 4 : Cálculos de las ranuras	31
Tabla 5 : Inducciones en las ranuras y entrehierro	33
Tabla 6 : Impedancias del esquema equivalente	35
Tabla 7 : Datos para el cálculo de la impedancia de dispersión.....	35
Tabla 8 : Datos para el cálculo de la impedancia de dispersión en las ranuras 1	36
Tabla 9 : Datos para el cálculo de la impedancia de dispersión en las ranuras 2	36
Tabla 10 : Datos para el cálculo de la impedancia de dispersión en las ranuras 3	37
Tabla 11 : Resultado del valor de impedancias	38
Tabla 12 : Datos para el cálculo de la reactancia síncrona.....	39
Tabla 13 : Datos para el cálculo de la resistencia estática	42
Tabla 14 : Datos para el cálculo de la resistencia de los imanes	43
Tabla 15 : Datos para el cálculo de la profundidad de penetración.....	43
Tabla 16 : Datos para el cálculo del campo magnético de la corriente de rizado	44
Tabla 17 : Datos para el cálculo de las pérdidas en el hierro	46
Tabla 18 : Datos para el cálculo de la masa de los dientes	46
Tabla 19 : Datos para el cálculo de las pérdidas en el hierro en la culata.....	47
Tabla 20 : Datos para el cálculo de la masa de la culata.....	47
Tabla 21 : Datos para el cálculo de las pérdidas mecánicas.....	48
Tabla 22 : Datos para el cálculo de las dimensiones de los imanes.....	49

PARTE I: MEMORIA

CAPÍTULO 1. Introducción

El desarrollo de las nuevas tecnologías de la información y de la comunicación ha iniciado la denominada Tercera Revolución Industrial (TRI). Una revolución que consiste, según el influyente sociólogo Jeremy Rifkin, en una transición hacia un desarrollo más responsable.

Este principio se basa en varios pilares que tienen todos como punto común la energía. Promete un aumento de la producción, un impacto reducido sobre el medio ambiente, el ahorro de recursos y la ampliación de su accesibilidad. Todo esto requiere de nuevas formas de producción de energía a través de nuevas tecnologías renovables descentralizadas e inteligentes.

La región de Hauts-de-France se compromete a esta revolución mediante el apoyo a diversos proyectos existentes en el territorio que la delimita. Dicha región se está moviendo hacia una economía más creativa y más eficiente de los recursos, más responsable y cooperativa.

El participar en esta revolución es el desafío de Unéole, en el desarrollo de una turbina eólica urbana acompañada por su software llamado MesWatts, que administra la producción y el consumo de la turbina a tiempo real. Encontrar la manera de producir energía con el mínimo impacto ambiental es su principal objetivo.

Unéole ofrece una alternativa a las energías convencionales. Considerada renovable por el aprovechamiento del viento como fuente inagotable. La producción se distribuye mediante la colocación de turbinas de viento en entornos urbanos, concretamente edificios, excluidos de las áreas de producción. También es sostenible en su diseño, respetando los recursos naturales, mediante el reciclaje de lino para la fabricación de las palas. Se da preferencia a las empresas de la región para reducir el transporte y reactivar su economía. Finalmente, el consumo es inteligente gracias a la aplicación MesWatts que permite una mejor gestión de la energía.

Es en este contexto en el que este proyecto se ve involucrado. Se pretende el diseño de una turbina eólica a eje vertical de bajo coste, tanto a nivel de dimensionamiento como de utilización.

Actualmente, las turbinas de eje vertical están todavía poco explotadas debido a su bajo rendimiento en comparación con las turbinas de viento de eje horizontal. Hay dos tipos de turbinas eólicas de eje vertical Darrieus y Savonius. La opción que se ha tomado en este proyecto es la turbina Savonius, buscando una visión de turbina urbana: sencilla, ecológica y sobre todo económica. Esta turbina eólica también es conocida por ser muy robusta, lo que le da una ventaja significativa en caso de tormenta. Además, tiene una velocidad de arranque muy baja, lo que también hace que sea conveniente para condiciones en las que el viento es débil. Su velocidad específica es baja (alrededor de 8 veces menos que los convencionales de tres palas) que es interesante en términos de

seguridad y ruido. Por último, es completamente insensible a la dirección del viento en el plano horizontal e incluso en el caso de vientos arremolinados, ya que por el diseño siempre tiene una pala de cara al viento. A diferencia de las otras, es una turbina de resistencia: recupera directamente la energía cinética del viento barrido por sus palas.

CAPÍTULO 2. Generalidades de la energía eólica

I. La Ley de Betz y el coeficiente de potencia

Un aerogenerador está diseñado para convertir la energía cinética del viento en energía mecánica. A partir de la energía cinética de las partículas de la masa de aire en movimiento pasando por la sección de la superficie activa del ala, se puede determinar la potencia suministrada, por la turbina, del viento.

$$P_{\text{viento}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V^3$$

ρ : masa volumétrica del aire, aproximadamente igual a 1,23 kg/m³

S : sección de la superficie activa, en m²

V : velocidad del viento, en m/s

En realidad, esta potencia no puede ser extraída en su totalidad. Según la Ley de Betz la potencia máxima que puede ser obtenida por una turbina eólica se rige por la siguiente expresión:

$$P_{\text{max}} = \frac{16}{27} \cdot P_{\text{vent}} = 0,59 \cdot P_{\text{viento}}$$

El coeficiente entre las potencias P_{max} y P_{vent} es diferente en cada turbina. Este coeficiente es denominado C_p , coeficiente de potencia.

$$C_p = \frac{P_{\text{max}}}{P_{\text{viento}}}$$

Otra característica propia de cada eólica es su velocidad específica, denominada λ . Esta magnitud es fruto de la relación entre la velocidad lineal de las palas en su extremo y la velocidad del viento:

$$\lambda = \frac{\omega \cdot R}{V_{\text{viento}}}$$

V_{viento} : velocidad del viento, en m/s

R : radio de la turbina eólica, en m

ω : velocidad de rotación, en rad/s

II. Presentación de los diferentes tipos de turbinas eólicas

Existen dos familias de aerogeneradores, los de eje horizontal y los de eje vertical. Cada uno posee características específicas que permiten una mejor adaptación al medio en el que son instaladas.

Comparación de características

El diagrama siguiente presenta el coeficiente de potencia de diferentes tipos de turbinas eólicas en función de su velocidad específica, es decir, de la relación entre su velocidad de rotación y la velocidad del viento.

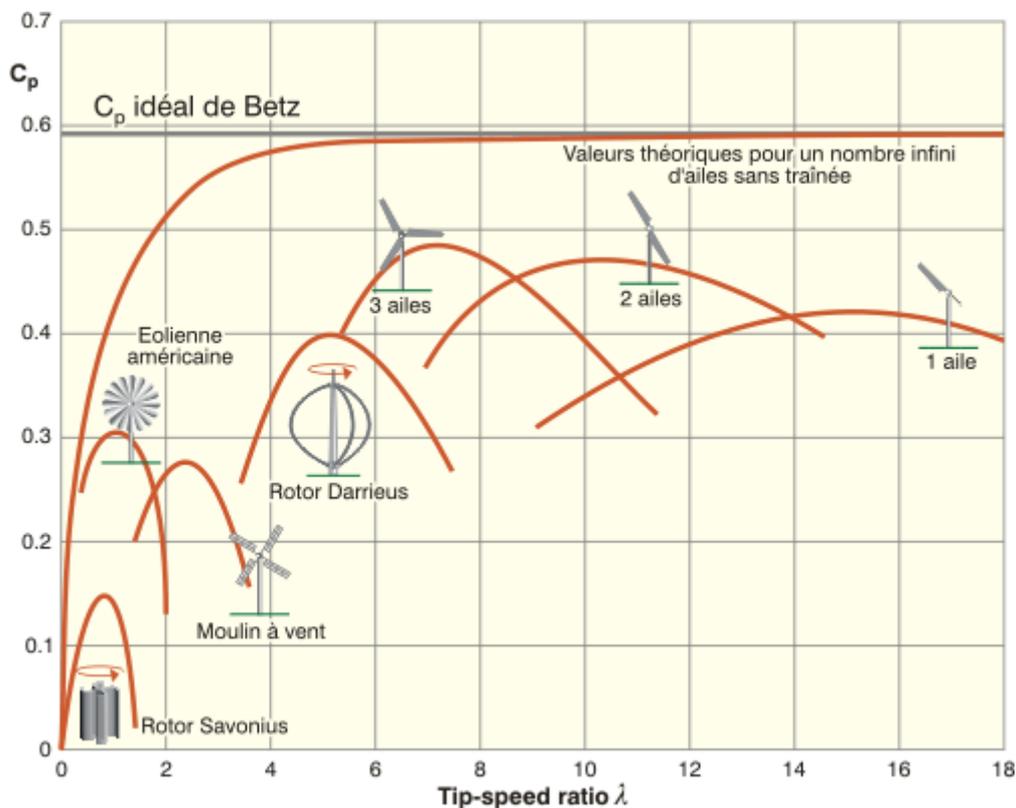


Figura 1 : Coeficiente de potencia en función de la estructura

Se ha de remarcar que cada tipo de eólica posee una velocidad específica óptima, para la cual el coeficiente de potencia es máximo.

A. Turbinas eólicas de eje horizontal

Las turbinas eólicas de eje horizontal son, con diferencia, las más utilizadas actualmente. Esto se explica por el hecho de que poseen, en general, un rendimiento mejor que las eólicas de eje vertical. Su coeficiente de potencia puede llegar a valores cercano a 0,5 en condiciones óptimas, siendo 0,59 es valor máximo posible.

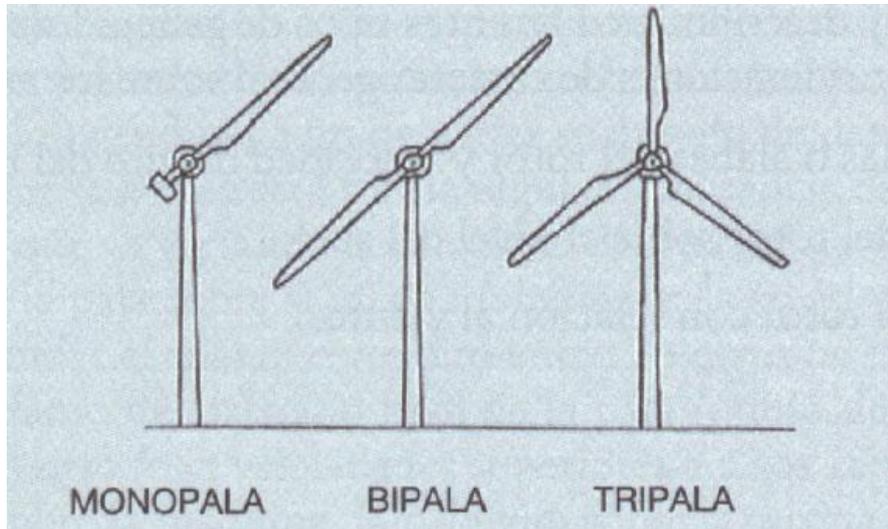


Figura 2 : Clasificación de los aerogeneradores según el número de palas

Este tipo de turbinas es también llamado de **sustentación**. Esto se debe a que el perfil de las palas perturba el flujo del aire, dando lugar a una diferencia de presión entre cada una de las zonas de la pala. De esta forma, la pala se encuentra sometida a una fuerza perpendicular al viento, que hace que empuje al eje de transmisión para que este rote.

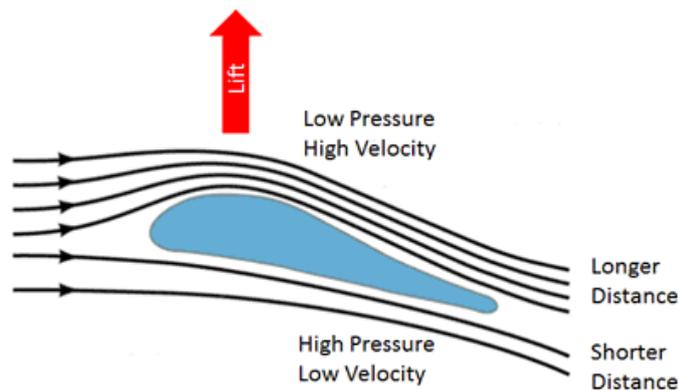


Figura 3 : Principio de sustentación

El par que ejerce esta turbina aumenta proporcionalmente con el número de palas, mientras que su velocidad de rotación disminuye con un factor igual al del par. Se ha determinado que los mejores rendimientos son obtenidos por los sistemas de 3 palas lo que justifica la fuerte presencia de este tipo de modelos en los parques eólicos.

Desde un punto de vista mecánico, la disposición de las palas a 120° permite, además, limitar los inconvenientes de la estructura: cuando una pala alcanza la altura máxima, donde el viento es más fuerte, las dos otras se encuentran en la posición más baja, por lo tanto equilibrando las fuerzas de flexión sobre el árbol.

Entre los inconvenientes de este tipo de turbinas, cabe destacar dos:

- Tienen necesidad de un viento relativamente importante para arrancar y comenzar a producir energía, lo que limita en gran medida las zonas de posible implantación.
- Para su correcto funcionamiento, necesitan de estar de cara al viento. Algunos modelos pueden girar sobre sí mismas buscando una mejor adaptación a la dirección del viento. face au vent.

B. Turbinas eólicas de eje vertical

Actualmente, las turbinas de eje vertical, no han sido explotadas en gran medida debido a su bajo rendimiento en comparación con las turbinas de eje horizontal. Existen dos tipos: los aerogeneradores de tipo Darrieus y los de tipo Savonius.

La turbina Darrieus está basada en la sustentación. Es decir, un funcionamiento similar a las turbinas de eje horizontal vistas anteriormente. Posee un coeficiente de potencia cercano a 0,4, el cual es muy alto para tratarse de una turbina de eje vertical. Por otra parte, es relativamente frágil y su par de arranque es próximo a cero, lo que hace que necesite un dispositivo auxiliar para arrancar.

Mientras que la turbina Savonius es una turbina es la solución menos costosa por su funcionamiento simple.

Esta turbina es conocida por ser muy robusta, esto le da una ventaja importante en caso de tempestad. Además, posee una velocidad de arranque muy baja que le permite adaptarse a los vientos débiles.

Su velocidad específica, λ , es baja (cerca de ocho veces menor a las tripalas clásicas) lo que es interesante en términos de seguridad y ruidos sonoros.

Es decir, es totalmente indiferente a la dirección del viento en el plano horizontal, igual que en el caso de vientos arremolinados, ya que por el diseño siempre presenta una pala de cara al viento.

A diferencia de las otras, es una turbina de **resistencia al viento**: recupera directamente la energía cinética del viento barrido con su ala, como se muestra en el siguiente diagrama:



Figura 4: Turbina Darrieus

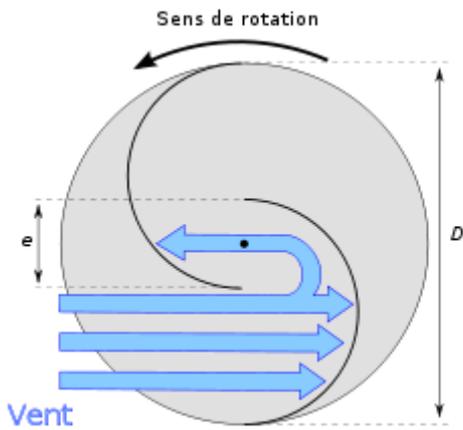


Figura 5: Comportamiento del viento en una turbina Savonius

Su bajo coeficiente de potencia (alrededor de 0,2) puede parecer insuperables, pero es posible aumentar de manera significativa mediante la optimización de la geometría. Al ajustar apropiadamente la distancia e , por lo que es posible obtener un nivel de potencia óptimo.

En efecto, el hecho de dejar un hueco entre las cuchillas permite que el viento fluya mejor en la turbina y no crear un "tapón" en la zona de sobrepresión.

Varios estudios científicos y experimentales han mostrado que el rendimiento es óptimo cumpliendo la relación:

$$\frac{e}{D} = \frac{1}{6}$$

III. Estudio de la potencia mecánica prevista

Para calcular la energía eléctrica de la turbina eólica, es necesario conocer la potencia mecánica suministrada al árbol.

La potencia mecánica es dada por la siguiente ecuación:

$$P_{\text{méca}} = C \cdot \omega$$

C : Par mecánico (N.m)

ω : Velocidad de rotación angular (Rad/s)

Hay que calcular la potencia y el par desarrollado por la turbina para diferentes velocidades de viento, con el fin de extraer su curva de potencia mecánica.

- **En vacío**, para una velocidad de viento dada, la turbina eólica gira a una determinada velocidad angular:

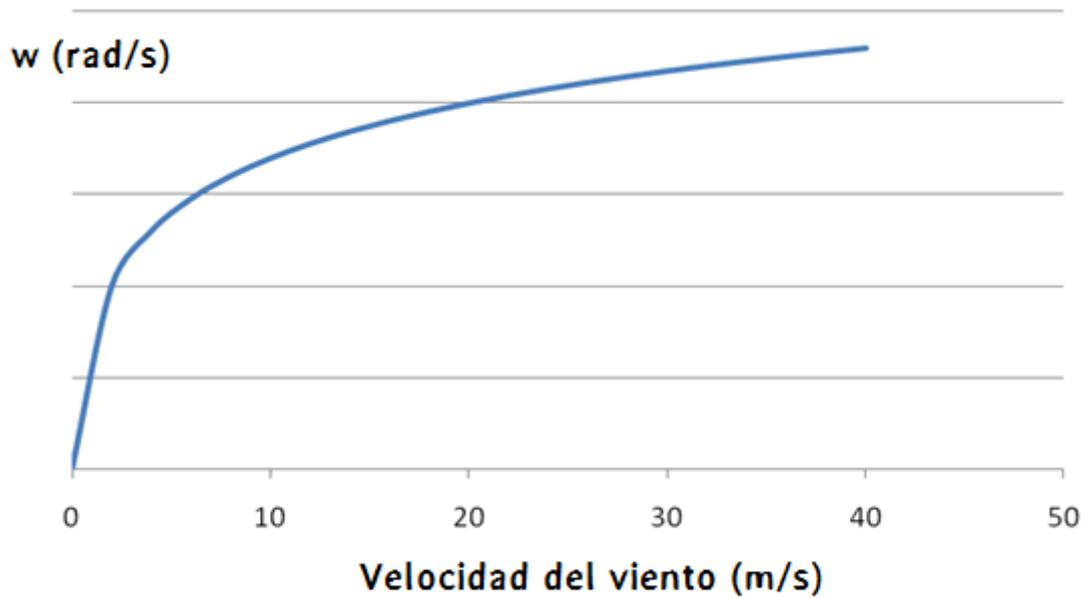


Figura 6 : Velocidad de rotación en función del viento

Como se ha visto, para cada velocidad del viento, el coeficiente de potencia c_p es máximo para una velocidad específica dada, λ . Esto significa que la potencia, P , disponible es máxima para una velocidad de rotación dada, como se muestra en el siguiente gráfico:

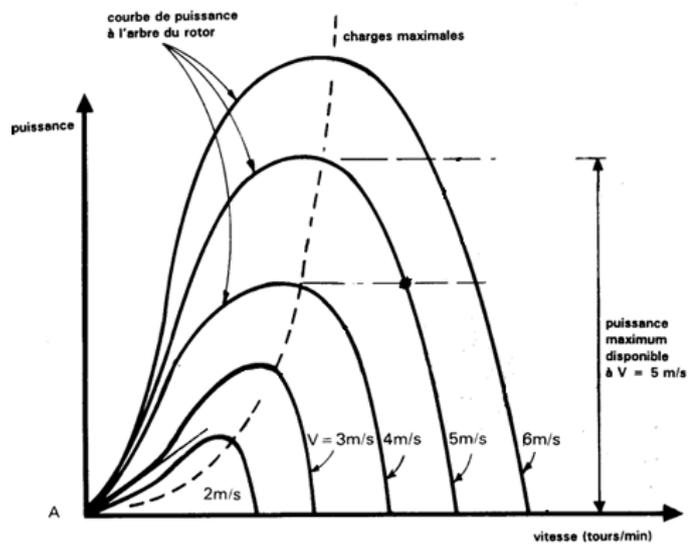


Figura 7: Potencia suministrada en función de la velocidad de rotación y viento

Para optimizar el rendimiento, por lo tanto la potencia, hay que asegurarse de que la turbina gira a una velocidad relativa al viento. A continuación, busca la obtención de estas curvas características para diferentes velocidades del viento. Para calcular estos valores, dos enfoques son posibles:

- **El enfoque experimental** que consiste en hacer pruebas de túnel de viento. La turbina eólica se coloca en un túnel de viento para simular diferentes velocidades del viento. Para cada velocidad del viento, la velocidad del viento es variada por medio de un freno. Para cada velocidad del viento se mide el par dinámico en el eje. Uno puede entonces trazar las curvas del par desarrollado en relación con la velocidad de rotación.

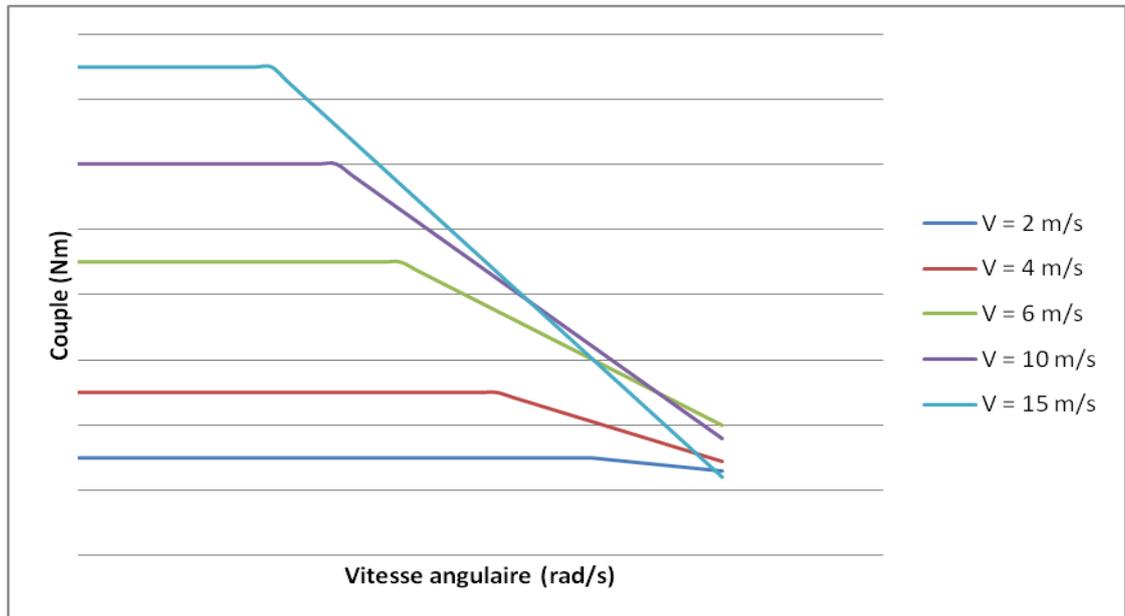


Figura 8: Par en función de la velocidad de rotación y del viento

- **El método digital** consiste en modelar el sistema utilizando un software de CFD (Computational Fluid Dynamics) como OpenFOAM. Para obtener valores utilizables, hay que llevar a cabo el estudio en régimen no estacionario, lo que requiere una potencia de cálculo considerable.

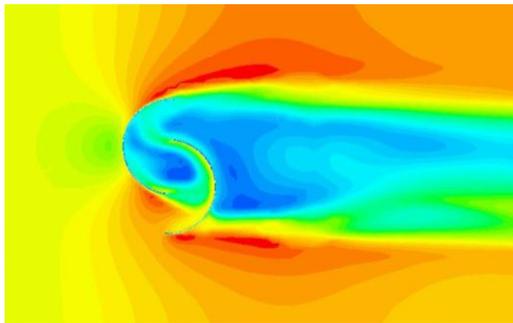


Figura 10: Modelización del viento en OpenFOAM

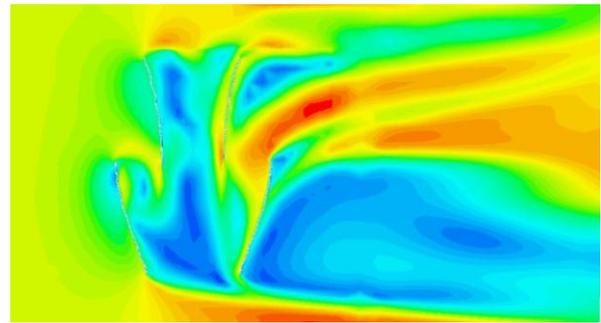


Figura 9: Modelización del viento en OpenFOAM

Al igual que antes, se obtendrán las curvas de par en función de la velocidad de rotación.

Basándose en las siguientes fórmulas, entonces es posible trazar las curvas características del coeficiente de potencia en función de la velocidad específica:

$$C_p = \frac{C \cdot \omega}{P_{\text{viento}}}$$

$$\lambda = \frac{\omega \cdot R}{V_{\text{viento}}}$$

A partir de extensas pruebas o exámenes no siempre son posibles debido a la falta de recursos, también se puede obtener una aproximación de λ_{ideales} basado en la ecuación de la λ_{ideal} para un turbina eólica Savonius helicoidal girada 90° :

$$\lambda = \frac{1}{0,0128} \times \left(0,0162 - \frac{C_t}{Re^{0,3}} \right)$$

C_t : Coefficient de torsión

Re : Número de Reynolds

El coeficiente de torsión es un parámetro similar al coeficiente de potencia. Este refleja el rendimiento de la turbina para desarrollar un par motor en función de su geometría. Se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$C_t = \frac{4 \cdot C}{\rho \cdot V_{\text{vent}}^2 \cdot D^2 \cdot H}$$

C: Par generado por el viento (Nm)

ρ : densidad del aire, igual a $1,23 \text{ kg / m}^3$

V viento: Velocidad del viento, en m / s

D: Diámetro de la turbina, en m

H: Altura de la turbina, en m

El número de Reynolds es un número adimensional usado en la mecánica de fluidos. Su función es caracterizar un flujo alrededor de una forma cualquiera, en particular, la naturaleza de su régimen (laminar, en transición y turbulento). Depende de las propiedades físicas del fluido en cuestión y de la geometría del objeto. Cuando el objeto alrededor del cual circula el fluido se puede comparar a un cilindro, el número de Reynolds se calcula utilizando la fórmula:

$$\text{Re} = \frac{\rho \cdot D \cdot V_{\text{vent}}}{\mu}$$

ρ : Densidad del aire, igual a 1,23 kg / m³

V viento: Velocidad del viento, en m / s

D: Diámetro de la turbina de viento, en m

μ : Viscosidad dinámica del aire, igual a 1,8 veces 10⁻⁵kg / ms

Este método tiene un interés limitado ya que no permite conseguir λ ; el par sigue siendo desconocido. Sin embargo, puede simplificar en gran medida las simulaciones numéricas: conociendo ya λ_{ideal} para cada velocidad del viento, un único cálculo del par por cada condición del viento es necesario.

IV. Turbulencia de los vientos urbanos

En este estudio de una turbina eólica adaptada al entorno urbano, es conveniente centrarse en las en ciudades caracterizadas con mucho viento.

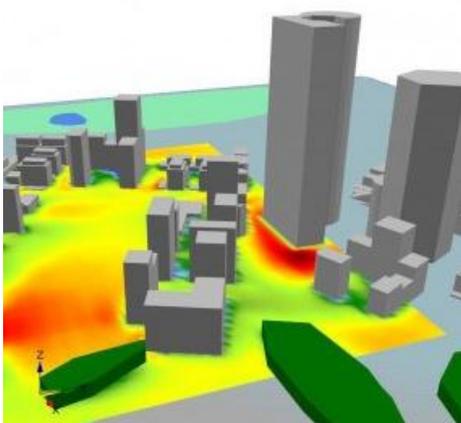


Figura 11: Flujo de viento urbano

En las zonas urbanas, debido a la presencia de edificios, el viento es más débil y también más turbulento que en las zonas rurales.

El siguiente mapa ilustra las perturbaciones generadas por los edificios. Esta configuración conduce a la concentración del viento en ciertos lugares, mientras que otros están "protegidos". Este fenómeno provoca la aparición del viento arremolinado que hace ineficaz las turbinas eólicas de eje horizontal.

La contaminación acústica es también un punto importante a tener en cuenta, debido a su proximidad a las viviendas, la turbina debe ser lo más silenciosa posible.

Además de estos aspectos importantes, la estética, la compacidad y fiabilidad del aerogenerador Savonius hacen que sea muy adecuado para el uso urbano. Son estas razones las que han llevado a la elección en este modelo.

CAPÍTULO 3. Dimensionamiento del generador eléctrico

I. Generalidades sobre los generadores

Los generadores son dispositivos capaces de convertir la energía mecánica en energía eléctrica. Se componen de un rotor, que desempeña el papel del inductor, y un estator, que tiene el papel de la armadura que interactúa magnéticamente con el inductor.

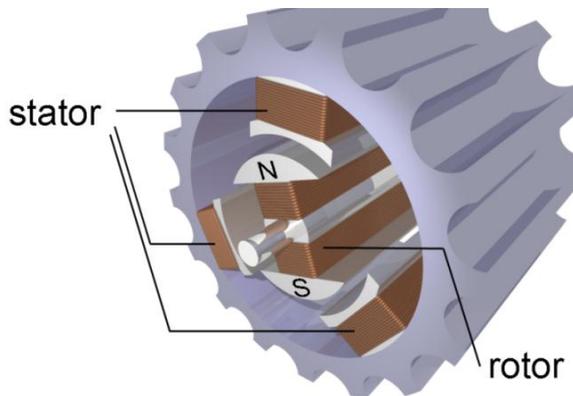


Figura 12: Estructura básica de un generador

A través de diversas técnicas, el rotor está magnetizado; por lo que es atravesado por un campo magnético. La acción de este campo en la bobina de estator genera una corriente en las mismas. Como el campo gira con el rotor, cada bobina es energizada cíclicamente, lo que resulta en la creación de una salida de corriente alterna de tres fases del generador. La frecuencia de la señal de salida depende de la velocidad de rotación y el número de polos del estator.

Existen dos tipos de generadores que producen una corriente alterna trifásica. Generadores síncronos y generadores asíncronos.

A. Generadores síncronos

Los generadores síncronos se componen de un rotor auto-magnetizado; por lo tanto, el flujo magnético gira a la misma velocidad que el rotor, de ahí su nombre de síncrono.

- **Los generadores síncronos de imanes permanentes** tienen un rotor compuesto de imanes permanentes. Aunque esta técnica es bastante cara, los recientes avances en materia de imanes han hecho que esta tecnología sea muy competitiva, lo que explica su fuerte desarrollo. Tienen la ventaja de un rendimiento superior a los demás y requieren poco mantenimiento.
- **Los generadores síncronos de rotor bobinado** utilizan un electro-imán como rotor. Por lo tanto, se le debe suministrar una corriente continua de manera que produzca un campo magnético. Esta técnica tiene la ventaja de ser capaz de variar el campo magnético que actúa sobre la potencia del rotor. Por lo tanto, se puede modificar el par de carga y controlar así fácilmente la relación entre la tensión y la potencia de salida del generador. Además, este tipo de generador es barato. Las desventajas son su baja eficiencia (más pérdidas por efecto Joule) y su fragilidad (el rotor se alimenta por medio de anillos).

B. Generadores asíncronos

La característica principal de los generadores asíncronos es que su rotor no tiene capacidad para magnetizarse a sí mismo. Debe ser excitado para magnetizarse.

Existen dos tipos de generadores asíncronos: de rotor bobinado y de jaula de ardilla.

El caso del generador de la Figura 13, se trata de un generador asíncrono de "jaula de ardilla". Se trata de un conjunto de barras de hierro en cortocircuito desde ambos lados.

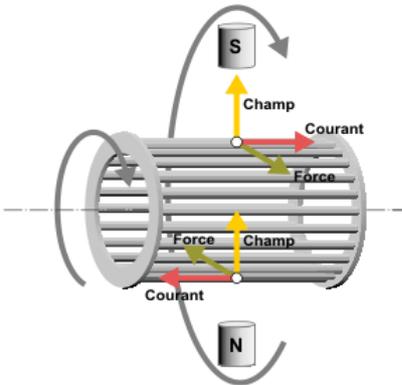


Figura 13: Detalle de un generador de jaula de ardilla

Para que el rotor esté excitado, la jaula debe ser recorrida por un campo electromagnético producido por el estator. Las bobinas de estator crean un campo magnético que gira a la velocidad de sincronismo, pero al mismo tiempo inducen un campo magnético creado por las corrientes que recorren la jaula de ardilla. Este campo magnético inducido gira a una velocidad ligeramente superior o inferior al campo inicial creado por las bobinas. Por tanto, es necesario proporcionar una potencia reactiva al estator para magnetizar el rotor.

En modo generador, el rotor es entrenado mecánicamente, lo que implica que su velocidad de rotación es superior a la velocidad de sincronismo. Cierta potencia activa es proporcionada a la red en este caso.

Debido a la necesidad de proporcionar potencia reactiva para magnetizar el rotor, este tipo de generador conviene para sistemas conectados a la red. También es posible proporcionar la potencia reactiva desde fuera de la red, conectando los condensadores a los terminales del generador; sin embargo, es una solución muy complicada de diseñar.

En este caso, el sistema debe funcionar en la red y fuera de la red, y debe tener un buen rendimiento eléctrico. Por lo tanto, se opta por un generador síncrono de imanes permanentes.

II. Problemática del generador

Uno de los principales problemas que afronta Unéole es el diseño de un generador adecuado para este tipo de turbina eólica, que se encuentra en la fase de prototipo. El diseño actualmente integrado en sus generadores eólicos no está optimizado para las características que posee la turbina. Por tanto, se ha de llevar a cabo el diseño de un nuevo generador que satisfaga las características de la turbina.

Para ello, el dimensionamiento del generador Unéole se ha llevado a cabo en el desarrollo de un fichero Excel dinámico, al cual se le han integrado los ábacos y tablas normalizadas para la obtención directa de las variables de salida manipulando únicamente un reducido número de variables de entrada. Dichas entradas son los valores nominales que se deseen en cada diseño.

El diseño completo incluirá:

- El cálculo de los parámetros globales del generador (tensión, la tensión de carga, rendimiento nominal, la duración de hierro, etc.).
- El dimensionado de los componentes del estator y el rotor (diámetro exterior y el interior del estator, la longitud de los dientes, diámetro interior y exterior del rotor, etc.).
- El cálculo de inducciones y los campos magnéticos en los diferentes componentes del generador.
- El número de imanes que conforman un polo.
- El cálculo de las impedancias del generador.
- El cálculo de las pérdidas en el generador.

El archivo presentará todos los parámetros necesarios para diseñar un generador.

III. Suposiciones de partida

El aerogenerador deseado por Unéole, no se centra en las características de potencia máxima que se puede emitir, está interesado principalmente en cuestiones de desarrollo sostenible, el precio y su vida útil. Es decir, la potencia no es el parámetro primordial a mejorar en primer lugar. En cuanto al tamaño, las dimensiones de sujeción mecánicas de la turbina permiten una longitud máxima de 450mm. El diámetro no es un problema dada la gran anchura del bastidor inferior de la turbina.

Por lo tanto, se trata del diseño de un generador a imanes permanentes y flujo radial que está acoplado directamente al eje de la turbina. No hay presencia multiplicador entre la turbina y el generador. La velocidad de rotación nominal de la turbina es de 70 rpm (revoluciones por minuto), se toma como hipótesis una velocidad de rotación nominal de del generador de 350 rpm con la idea de integrar un sistema transmisión por correas de 1x5. Tanto el coste del generador, al ser mayor la velocidad y necesitar un menos número de polos (imanes), como el sistema de transmisión, serán reducidos. Sin embargo, el rendimiento se reducirá debido a las pérdidas en el sistema de correas.

Además, se tomará como potencia mecánica nominal 1500 W, suponiendo un rendimiento nominal de 0,87. De hecho, se quiere diseñar una máquina síncrona de baja velocidad, lo que implica que el par es importante debido a la relación:

$$P_{mec} = \Omega \times C$$

El par suministrado por la turbina no es muy alto, que limitan el un par nominal de 40,93Nm.

La turbina no se encontrará a una distancia alejada de los edificios circundantes, por lo que se elige una salida de tensión de 48V nominal.

Los imanes seleccionados son de neodimio cuyo material presenta las mejores propiedades de inducción remanentes. Se toma una forma de paralelepípedo que tiene varias características:

- Buena relación calidad-precio
- El espacio ocupado es reducido
- Presenta una potencia alta
- La inducción remanente del imán es de 1,3 T

Además, las dimensiones del imán tomadas son las siguientes:

- Longitud del imán 51 mm
- Anchura del imán = 4,5 mm
- Altura del imán = 3 mm

Estos son todos los supuestos para iniciar el dimensionamiento del generador.

IV. Dimensionamiento del entrehierro

A. Diámetro de entrehierro Da y longitud de hierro Lf

Estos valores se refieren al diámetro máximo del entrehierro, es decir, la circunferencia limitada por las ranuras del estator; y a la longitud del mismo.

Suponiendo un rendimiento η de 0,87 y un factor de potencia $\cos \phi = 1$, se puede calcular la potencia aparente nominal, Sn :

$$Sn = \frac{P_{mec} \times \eta}{\cos \phi} = \frac{1500 \times 0,87}{1} = 1305 VA$$

El tamaño de la máquina depende principalmente de la par mecánico que necesita. Los fabricantes de máquinas síncronas utilizan una fórmula empírica para determinar las principales dimensiones de la máquina tomando un factor de utilización denominado C . Los coeficientes de utilización difieren muy poco en términos de maquinaria y se acepta que su valor común que se fija en 0,09. Por otra parte, este valor responde a la siguiente expresión:

$$C = \frac{Da^2 \times Lf \times N}{Sn}$$

El resultado es esta igualdad:

$$Da^2 \times Lf = \frac{Sn \times C}{N}$$

Con:

Lf : Longitud de hierro

Da : Diámetro de entrehierro

N : velocidad de rotación nominal (rpm)

Tras aplicación numérica, se obtiene:

$$Da^2 \times Lf = \frac{1305 \times 0,09}{350}$$

$$Da^2 \times Lf = 0,745 \text{ mm}^3$$

El valor de la longitud de hierro se encuentra generalmente entre Da y $2Da$. De hecho, no debería ser demasiado bajo por riesgo a elevadas pérdidas magnéticas y que resultaría una baja proporción de cobre útil. Además, de lo contrario habrá una mala distribución de la temperatura en todo el paquete de hierro. Esta presión, también implicaría pérdidas en las cargas muy elevadas en el circuito de ventilación de la máquina.

Llevando a cabo iteraciones tales que el valor del diámetro de entrehierro es el más alto posible, ya que deberá albergar un gran número de imanes a su alrededor, y cumpliéndose las dos condiciones siguientes:

$$Da < Lf < 2Da$$

$$Da^2 \times Lf = 0,745 \text{ mm}^3$$

Después de varias iteraciones, se obtiene un diámetro de entrehierro y una longitud de hierro óptimo, con los siguientes valores:

$$Da = 90 \text{ mm}$$

$$Lf = 91 \text{ mm}$$

B. Determinación del número de pares de polos y paso de polo

El cálculo del número de pares de polos de la máquina síncrona se lleva a cabo por medio de la siguiente expresión:

$$p = \frac{2 \times \pi \times f}{\Omega}$$

Y tras aplicación numérica, aproximando al número entero más cercano:

$$p = \frac{2 \times \pi \times 50}{350 \times 2 \times \pi} = 9$$

Se elige una frecuencia nominal para el generador de 50 Hz. Sin embargo, se podría reducir la frecuencia para reducir el número de pares de polos y por lo tanto los imanes, lo que reduciría el coste de la máquina. Pero esto solo es posible si el convertidor de potencia puede manejar esas frecuencias, lo que encarecería su coste.

Por último, se calcula la distancia entre los polos de la máquina τ_p .

$$\tau p = \frac{\pi \times Da}{2 \times p}$$

$$\tau p = \frac{\pi \times 0,09}{2 \times 9} = 15,71 \text{ mm}$$

Se observa que el paso polar es muy bajo, lo que se debe al gran número de polos de la máquina.

C. Cálculo del entrehierro magnético

El parámetro e representa el espacio magnético, que depende de otras dos características:

- e_m : entrehierro mecánico
- e_f : espesor de la greca de ajuste, que debe ser al menos de 2 mm

Se obtiene un entrehierro mecánico de:

$$e_m = 0,005 \times Da$$

$$e_m = 0,005 \times 0,090 = 0,45 \text{ mm}$$

Para calcular el espesor de la greca, se ha de calcular antes la velocidad periférica:

$$v = \frac{\pi \times Da \times N}{60}$$

Dos casos son posibles: Si la velocidad periférica está por debajo de 50 m/s, dónde tomará un espesor de banda 2 mm (valor mínimo); sino el espesor de la greca será igual a:

$$e_f = 2 + 0,05(v - 50)$$

En este caso, se obtiene una velocidad punta de:

$$v = \frac{\pi \times 0,090 \times 350}{60} = 1,65 \text{ m/s}$$

Se toma, por lo tanto, un espesor de greca de 2mm.

Se deduce finalmente en valor de entrehierro total:

$$e = e_m + e_f$$

$$e = 0,45 + 2 = 2,45 \text{ mm}$$

A continuación se presenta un resumen de los parámetros más relevantes hasta el momento:

S_n	Potencia aparente nominal	1305 VA
N	Velocidad de rotación	350 rpm
p	Número de pares de polos	9
Da	Diámetro de entrehierro	90 mm
L_f	Longitud de hierro	91 mm
e	Espesor de entrehierro	2,45 mm

Tabla 1 : Dimensiones principales del generador

V. Bobinado del estator

A. Número de ranuras por polo y por fase

El paso de los dientes del estator se define por el número de ranuras Q_s y el diámetro de entrehierro Da :

$$\tau_s = \frac{\pi \times Da}{Q_s}$$

También, se ha de introducir el parámetro q que representa el número de ranuras por polo y por fase. Se define como sigue:

$$q = \frac{Q_s}{2 \times p \times m}$$

La variable m representa el número de fases. Tratándose de un generador síncrono trifásico: $m = 3$. Además, q debe ser un número entero o medio $\{1-1,5-2-2,5,\dots\}$.

Tomando $q = 1$ a fin de obtener número entero de q y Q_s .

$$Q_s = 2 \times p \times m \times q$$

$$Q_s = 2 \times 9 \times 3 \times 1 = 54 \text{ ranuras}$$

Se deduce que el paso de los dientes es:

$$\tau_s = \frac{\pi \times Da}{Q_s}$$

$$\tau_s = \frac{\pi \times 0,090}{48} = 5,24 \text{ mm}$$

Así, se tiene:

τ_s	Paso de los dientes del estator	5,24 mm
Da	Diámetro de entrehierro	90 mm
Q_s	Número de ranuras	54

Tabla 2 : Cálculos de las ranuras

B. Hipótesis y estimación

- Estimación de la tensión simple, E_c

El objetivo es diseñar una máquina síncrona de imanes permanentes de modo que la tensión de la línea sea de 48V. El cálculo de la tensión de fase E_c se realiza a través de diagrama Behn-Eschenburg. Sin embargo, no es posible obtener un valor aproximado de esta tensión en un primer momento. De hecho, el valor de la tensión de fase se modificará en el futuro en base al valor de inductancias calculadas más adelante. Por ahora, se obtiene un valor de E_c aproximado:

$$E_c = \frac{U_n}{\sqrt{3}} = 27,71 V$$

- Factor de bobinado, k_s

El coeficiente de bobinado k_s resulta del producto de dos coeficientes: coeficiente de distribución, k_z y el coeficiente de acortamiento, k_r ($k_s = k_z \cdot k_r$). El coeficiente de bobinado tiene como finalidad reflejar en los cálculos las imperfecciones debidas a la distribución del devanado en el estator.

Con un total de 54 ranuras del estator y 18 polos en el generador síncrono, el paso entero (número de ranuras por polo) resultante es de $\tau_{ent} = 3$. Y el coeficiente de acortamiento, k_r :

$$k_r = \sin \frac{\pi \times c}{2 \times \tau_{ent}}$$

El parámetro c representa el paso acortado, en el que influye entre otras cosas, la inducción del entrehierro B_e así como los coeficientes de distribución, k_z , y de acortamiento, k_r . Por experiencia, es necesario tener una relación entre c y τ_p de dos tercios. Por lo tanto, es posible tomar un valor de paso acortado de entre 2 y 3. Por experiencia también, es necesario un alto k_r , por lo que se toma $c = 3$.

$$k_r = \sin \frac{\pi \times 3}{2 \times 3} = 1$$

Por tanto, se debe calcular el factor de distribución de k_z . Calculando como sigue:

$$k_z = \frac{\sin\left(\frac{\pi \times q \times q}{2 \times m}\right)}{q \times \sin\left(\frac{\pi \times 1 \times q}{2 \times m}\right)} = 1$$

$$k_z = \frac{\sin\left(\frac{\pi \times 1 \times 1}{2 \times 3}\right)}{1 \times \sin\left(\frac{\pi \times 1 \times 1}{2 \times 3}\right)} = 1$$

Por lo tanto, se deduce:

$$k_s = k_z \cdot k_r = 1$$

- *Estimación de la inducción de entrehierro B_e*

Es necesario estimar el valor de la inducción de entrehierro B_e que normalmente está comprendido entre 0,7 y 0,8 teslas. Se toma:

$$B_e = 0,8 \text{ T}$$

C. Número de espiras por fase

Siguiendo los cálculos anteriores, se puede determinar el valor del número de espiras por fase del estator, n_s :

$$n_s = \frac{E_c}{4,44 \times k_s \times f \times \phi}$$

El parámetro ϕ es el flujo magnético de un polo, que expresado en Webber:

$$\phi = \frac{2}{\pi} \times \tau_p \times L_f \times B_e$$

$$\phi = \frac{2}{\pi} \times 0,01571 \times 0,091 \times 0,8 = 0,00073 \text{ Wb}$$

Se tiene un número total de espiras por fase en el estator, n_s :

$$n_s = \frac{27,71}{4,44 \times 1 \times 50 \times 0,00073} = 171 \text{ espiras}$$

Además, con el fin de comprobar el resultado del número de vueltas por fase en el estator, hay que recurrir a otro cálculo:

$$\frac{nc}{a} = \frac{2 \times m \times ns}{Qs}$$

Siendo nc el número de conductores por ranura y a el número de circuitos paralelos.

El número de circuitos en paralelos, a , debe ser necesariamente un divisor del número de polos. Ya que se dispone de 18 polos, el parámetro debe tener un valor de {1,2,3,9}. Se elige tener un circuito paralelo.

$$nc = \frac{173 \times 2 \times 3 \times 1}{54} = 19 \text{ conductores/ranura}$$

D. Dimensionamiento de los conductores

En primer lugar, se ha de calcular la corriente nominal I_n , sabiendo que se tiene $U_n = 48$ V, $S_n = 1282,5$ VA

$$I_n = \frac{S_n}{\sqrt{3} \times U_n}$$

$$I_n = \frac{1282,5}{\sqrt{3} \times 48} = 15,70 \text{ A}$$

De este modo se puede determinar la sección mínima de los conductores con la densidad de corriente máxima permitida, sabiendo que los conductores de un generador eléctrico tienen una clase de calentamiento F. Para una clase de calentamiento F, se tiene una máxima densidad de corriente permisible $\delta < 5$ A/mm²

$$\delta = \frac{I_n}{S} \leq 5 \text{ A/mm}^2$$

$$S \geq \frac{I_n}{\delta} = \frac{15,70}{5} = 3,139 \text{ mm}^2$$

Entonces, se ha de calcular altura de cobre, h_{cu} , y el ancho del mismo, l_{cu} . Sin embargo, la anchura de cobre depende de la anchura de la ranura, obtenida a través del paso entre los dientes, τ_s , ya calculado. A continuación se aproxima el valor de la anchura de la ranura que posteriormente se recalculará:

$$le1 = \frac{\tau s}{2} = \frac{5,24}{2} = 2,62 \text{ mm}$$

Este ancho de la ranura es la suma total del ancho del cobre más aislamientos y acabados. Es necesario retirar el aislamiento de papel, el aislamiento a tierra, el espesor de acabado, el grosor del barniz y el área de la ranura.

Aislamiento de papel	0,33 mm
Planta de aislamiento	0,24 mm
Grosor de acabado	0,88 mm
Espesor de barniz	0,22 mm
Área de la ranura	0,3 mm

Tabla 3 : Medidas tomadas para el aislamiento

Se obtiene así:

$$Lcu = le1 - 0,33 - 0,24 - 0,88 - 0,22 - 0,3$$

$$Lcu = 0,648 \text{ mm}$$

Sin embargo, este valor está estandarizado y debe estar comprendido de entre 2mm y 12,5mm. Por lo tanto, se ha optado por un conductor con un ancho de 2mm.

Así se tiene:

$$Lcu = 2 \text{ mm}$$

La sección resultante, Scu , correspondiente será el valor normalizado superior más cercano a este. Pero la anchura del cobre no es el único valor del que depende la sección, también se ha de tener en cuenta la altura del cobre. El valor de altura de cobre correspondiente a $Lcu = 2\text{mm}$ es de 1,4mm.

$$hcu = 1,4 \text{ mm}$$

Además, se debe cumplir:

$$\frac{Lcu}{hCu} \leq 5$$

$$\frac{Lcu}{hcu} = \frac{2}{1,4} = 1,43$$

La condición se comprueba y, finalmente, se obtiene una sección del cobre:

$$S_{cu} = h_{cu} \times L_{cu} = 2,8 \text{ mm}^2$$

El valor está por debajo del valor mínimo requerido de $S = 3,139 \text{ mm}^2$. De manera que se han de cambiar los valores de la anchura y la altura del cobre.

Los valores definitivos normalizados son:

$$L_{cuN} = 2,24 \text{ mm}$$

$$h_{cuN} = 1,6 \text{ mm}$$

Se comprueba que se cumple la condición anterior:

$$\frac{L_{cu}}{h_{cu}} \leq 5$$

$$\frac{L_{cu}}{h_{cu}} = \frac{2,24}{1,6} = 1,4 \leq 5$$

La condición se cumple y se obtiene, definitivamente, una sección normalizada, de acuerdo con las tablas normalizadas, de:

$$S_{cuN} = 3,369 \text{ mm}^2$$

La densidad de corriente resultante es:

$$\delta_{Cu} = \frac{I}{S_{cuN}} = \frac{15,43}{3,369} = 4,38 \text{ A/mm}^2 \leq 5 \text{ A/mm}^2$$

Lo que es correcto, ya que la densidad de corriente es menor a 5 A/mm^2 , valor máximo para los conductores de clase F. Ahora, es posible calcular la altura de una bobina aislada añadiendo algunos coeficientes con valores típicos de los generadores de estas dimensiones, necesarios para albergar las bobinas.

$$h_{bob} = (h_{cuN} + I_{papel}) \times \frac{nc}{2} + I_{masa} + I_{acabado} + I_{barniz}$$

$$h_{bob} = (1,6 + 0,33) \times \frac{19}{2} + 0,24 + 0,88 + 0,22 = 19,675 \text{ mm}$$

En consecuencia, se constata que la altura de la ranura, h_e , es:

$$h_e = 2 \times h_{bob} + I_{masa} + I_{verniz}$$

$$h_e = 2 \times 19,675 + 0,24 + 0,22 = 40,27 \text{ mm}$$

A continuación, se recalcula la anchura final de la ranura:

$$l_e = L_{cuN} + I_{papel} \times 2 + I_{masa} + I_{acabado} + I_{barniz} + I_{holgura}$$

$$le = 2,24 + 0,33 \times 2 + 0,24 + 0,88 + 0,22 + 0,3 = 4,54 \text{ mm}$$

VI. Coeficiente de Carter y la altura del imán.

En primer lugar, se ha de comprobar que la altura del imán escogida es admisible, ha , que a su vez permitirá calcular el coeficiente de Carter, kc :

$$Be = Br \times \frac{ha}{(ha + e) \times kc}$$

$$ha = \frac{e \times Be \times kc}{Br - Be \times kc}$$

Además, se tiene:

$$kc = \frac{\tau s}{\tau s - \frac{Fen^2}{Fe + 5 \times (ha + e)}}$$

Donde:

- e : espesor de entrehierro
- Fen : ancho de la ranura
- τs : paso entre los dientes
- Be : inducción de entrehierro
- Br : inducción remanente del imán

Se supone inicialmente $kc = 1$ para calcular la altura del imán. La remanencia Br depende del material del imán elegido para la máquina, el cual es de neodimio, con una remanencia $Br = 1.3 \text{ T}$. Así:

$$ha = \frac{2,45 \times 0,8}{1,3 - 0,8} = 3.9 \text{ mm}$$

Se comprueba que los imanes escogidos de $ha = 5 \text{ mm}$ son razonables. Y se deduce ahora el coeficiente de Carter:

$$kc = \frac{0,0052}{0,0052 - \frac{0,0043^2}{0,0043 + 5 \times (0,003 + 0,00245)}} = 1,14$$

Sin embargo, se supone que el valor era de unidad de kc , lo cual ha cambiado. El coeficiente de Carter y la altura teórica del imán serán recalculados con el cálculo que se hará más tarde de la inducción residual, Bar .

VII. Inducciones y campos magnéticos

A. Geometría de las ranuras

A continuación se calcula la longitud útil del rotor y el estator designadas por L_{ur} y L_{us} , respectivamente. Estas dos longitudes corresponden a las longitudes sobre las que circula el campo magnético. Es posible deducir la longitud equivalente, L_e , fijando el coeficiente de expansión k_{fe} en 0,94, comúnmente tomado. Las relaciones son las siguientes:

$$L_{us} = L_f \times k_{fe} = 0,0855 \text{ m}$$

$$L_{ur} = L_f = 0,091 \text{ m}$$

$$L_e = L_{ur} = 0,091 \text{ m}$$

Se procede ahora al cálculo de ciertos parámetros de la chapa del estator y el rotor. Esto se refiere a la anchura de los dientes en tres niveles (alto, medio y bajo); las alturas de la armadura, h_{yr} y h_{ys} ; y las longitudes de línea de flujo L_{yr} y L_{ys} .

$$h_{ys} = \frac{D_{s \text{ ext}} - D_a - 2 \times h_e}{2}$$

En esta fórmula, $D_{s \text{ ext}}$ representa el diámetro exterior, el cual se desconoce. Este se determina gracias al máximo valor de inducción en el estator $B_{cs} = 1,4 \text{ T}$. Además, la altura de la armadura debe cumplir una condición con respecto a la longitud útil del rotor y el valor máximo de la inducción:

$$h_{ys} \geq \frac{\phi}{2 \times B_{cs} \times L_{us}}$$

Se concluye con esto:

$$D_{s \text{ ext}} \geq \frac{2 \times \phi}{2 \times 1,4 \times L_{us}} + D_a + 2 \times h_e$$

$$D_{s \text{ ext}} \geq \frac{2 \times 0,00073}{2 \times 1,4 \times 0,0855} + 0,09 + 2 \times 0,04027 = 0,175 \text{ m}$$

Por lo que el valor de h_{ys} mínimo, con la fórmula anterior, es de 0,00303 m. Y los valores tomados definitivamente son:

$$D_{s \text{ ext}} = 190,6 \text{ mm}$$

$$h_{ys} = 10,03 \text{ mm}$$

Ahora, se ha de calcular la altura de la armadura del rotor h_{yr} . Esta depende del diámetro exterior del rotor, Dr_{ext} , y del interior, Dr_{int} , calculado simplemente:

$$h_{yr} = \frac{Dr_{ext} - Dr_{int}}{2}$$

De la misma forma que para el estator, hay que calcular estos dos diámetros.

$$Dr_{int} = Da - 2 \times e - 2 \times ha$$

El valor máximo de inducción del rotor, B_{cr} , es idéntico al del estator: $B_{cr} = 1,4 \text{ T}$

$$h_{yr} \geq \frac{\phi}{2 \times B_{cr} \times L_{ur}}$$

$$Dr_{int} \leq \frac{-2 \times \phi}{2 \times B_{cr} \times L_{ur}} + Dr_{ext}$$

Obteniendo una altura de la armadura del rotor mínima de $h_{yr} = 2,9 \text{ mm}$, el diámetro interior del rotor es:

$$Dr_{int} \leq 0,073386 \text{ mm}$$

Para obtener un valor razonable del eje se tomarán los valores:

$$Dr_{int} = 20 \text{ mm}$$

$$h_{yr} = 29,55 \text{ mm}$$

El siguiente paso consiste en la determinación de las longitudes de línea de flujo de estator y rotor:

$$L_{ys} = \pi \times \frac{(Ds_{ext} - h_{ys})}{2 \times p} = 31,15 \text{ mm}$$

$$L_{yr} = \pi \times \frac{(Dr_{int} + h_{yr})}{2 \times p} = 8,65 \text{ mm}$$

En la Figura 14 se muestra un esquema simplificado, sin escala, de las medidas.

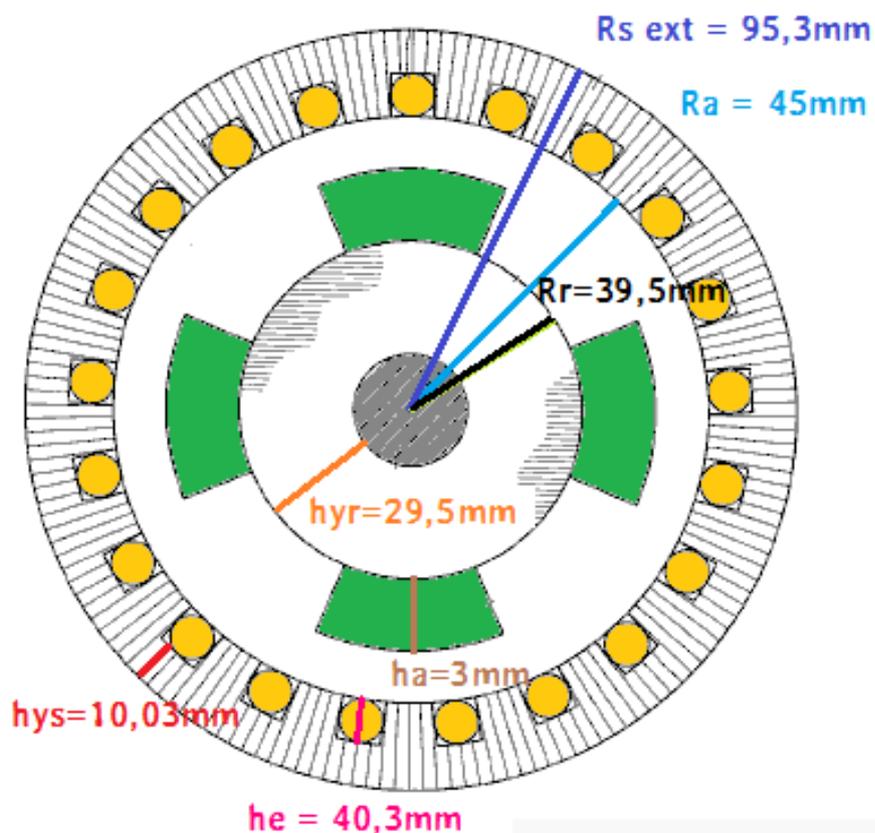


Figura 14 : Esquema de la geometría del generador

Queda por calcular las anchuras, diámetros y el paso de los dientes del estator:

	Diámetro (mm)	Paso dentario (mm)	Anchura del diente (mm)
Alto del diente	$D_p = D_m + h_e = 170,54 \text{ mm}$	$T_{osp} = (D_p \cdot \pi) / Q_s = 9,92 \text{ mm}$	$B_p = 0,7 \cdot T_{osp} = 6,95 \text{ mm}$
Medio del diente	$D_m = D_a + h_e = 130,27 \text{ mm}$	$T_{osm} = (D_m \cdot \pi) / Q_s = 7,58 \text{ mm}$	$B_m = b_p \cdot D_m / D_p = 5,31 \text{ mm}$
Bajo del diente	$D_a = D_a = 90 \text{ mm}$	$T_{ost} = (\pi \cdot D_a) / Q_s = 5,24 \text{ mm}$	$B_t = b_p \cdot D_a / D_p = 3,67 \text{ mm}$

Tabla 4 : Cálculos de las ranuras

B. Cálculo de inducciones y campos magnéticos

A continuación se calculan las inducciones en los dientes del estator y las armaduras con las longitudes de las líneas de flujo y las dimensiones de los dientes encontrados:

Inducciones del estator:

- Alto de la ranura:

$$B_t = \frac{L_f \times \tau_s \times Ber}{L_{us} \times bs} = 1,06 T$$

- Medio de la ranura:

$$B_m = \frac{L_f \times \tau_s \times Ber}{L_{us} \times bm} = 0,73 T$$

- Bajo de la ranura:

$$B_p = \frac{L_f \times \tau_s \times Ber}{L_{us} \times bp} = 0,56 T$$

Inducciones en las armaduras:

- Armadura del rotor:

$$B_{cr} = \frac{\phi}{2 \times L_{ur} \times h_{yr}} = 0,135 T$$

- Armadura del estator:

$$B_{cs} = \frac{\phi}{2 \times L_{us} \times h_{ys}} = 0,424 T$$

Además, hay un campo magnético, H, que corresponde a cada campo de inducción. Por tanto, hay que calcular estos campos magnéticos en: el entrehierro; las ranuras del estator y el rotor para los tres niveles (alto, medio y bajo); y en las armaduras del rotor y del estator. Estos campos magnéticos se deducen de las curvas características correspondientes: $B = f(H)$.

Se obtiene:

En las ranuras del estator:

$$H = 268 \times B + 26,3 \times B^{10}$$

Para la culata del estator y la armadura del rotor, se obtiene:

$$H = 275 \times B + 10 \times B^{10}$$

Además, el consumo de Amperio·revolución en el entrehierro y los imanes será necesario para recalcular el valor de la inducción remanente ficticia, B_{ar} . Dicho consumo se obtiene como sigue, siendo μ_0 la permeabilidad del vacío ($\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$):

$$ATE = \frac{2}{\mu_0} \times (e + ha) \times kc \times Ber$$

$$ATE = \frac{2}{4 \times \pi \times 10^{-7}} \times (0,00245 + 0,003) \times 1,10 \times 0,7 = 9900,531 \frac{A}{m}$$

A continuación se presenta una tabla de resultados obtenidos:

	Máxima densidad de flujo B (T)	Valores habituales de inducción (T)	Campo magnético (H)
Entrehierro	Ber = 0,7T	0,7 T <Ber <0,8 T	ATE = 9900,53 A/m
Alto de la ranura	Bp = 0,56 T	Bt ≤ 1,3 T	Hp = 150,54 A/m
Medio de la ranura	Bm = 0,73 T		Hm = 198,18 A/m
Bajo de la ranura	Bt = 1,06 T		Ht = 333,94 A/m
Culata del estator	Bcs = 0,424 T	Bcs ≤ 1,4 T	Hcs = 116,67 A/m
Armadura del rotor	Bcr = 0,135 T	Bcr ≤ 1,4 T	Hcr = 37,225 A/m

Tabla 5 : Inducciones en las ranuras y entrehierro

Se puede deducir el consumo de Amperios·revolución en el hierro:

$$Hd \text{ moy} = \frac{Hp + 4 \times Hm \times +Ht}{6} = 212,87 \text{ A/m}$$

Así:

El consumo de Amperios·revolución en las ranuras del estator:

$$Uqs = Hd \text{ moy} \times he = 8,57 \text{ A.rev}$$

El consumo de Amperios·revolución en la culata del estator

$$Uys = Hcs \times lys = 3,68 \text{ A.rev}$$

El consumo de Amperios·revolución en la armadura del rotor:

$$Uyr = Hcr \times lyr = 0,322 \text{ A.rev}$$

Se obtiene el consumo de Amperios·revolución en el hierro:

$$\sum ATF = 2 \times Uqs + Uys + Uyr$$

$$\sum ATF = 2 \times Uqs + Uys + Uyr = 21,14 \text{ A.rev}$$

VIII. Inducción remanente ficticia del imán. Bar

Con el consumo de Amperios·revolución resultante en el entrehierro, ahora se puede calcular la inducción remanente ficticia del imán:

$$Bar = \frac{Br \times (ATE - \sum ATF)}{ATE}$$

$$Bar = \frac{1,3 \times (9900,531 - 21,14)}{9900,531} = 1,297 T$$

IX. Circuito equivalente del generador

El circuito equivalente de una máquina síncrona está compuesto de la tensión auto-inducida por los imanes, un valor de resistencia despreciable y la reactancia síncrona, que es la suma de la reactancia de dispersión y la reacción de inducido representada por una reactancia.

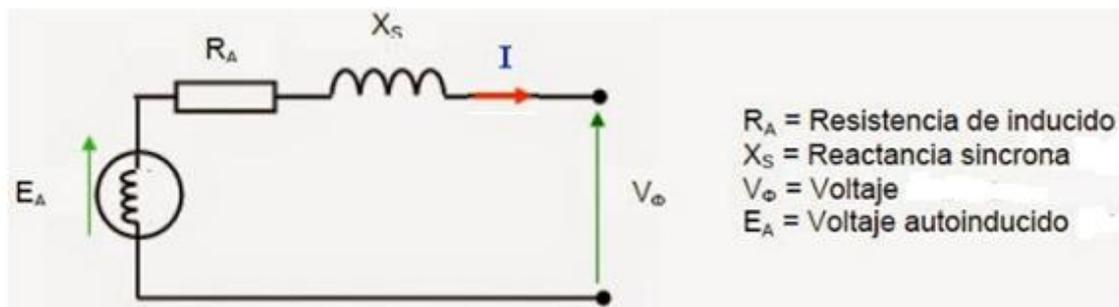


Figura 15: Esquema equivalente del generador síncrono de imanes permanentes

➤ Cálculo de la reactancia de dispersión del estator, X_s

La reactancia de dispersión del estator se calcula utilizando tres parámetros que se presentan a continuación:

X _e	Impedancia de dispersión de la ranura	Ω
X _{tb}	Impedancia de dispersión de la parte baja de las bobinas	Ω

Xtd	Impedancia de dispersión de la parte baja de los dientes	Ω
-----	--	---

Tabla 6 : Impedancias del esquema equivalente

A. Impedancia de dispersión de los dientes

El cálculo de la impedancia de la cabeza de los dientes se realiza a través de un coeficiente, λ_{td} , que se calcula utilizando la fórmula de Arnold:

$$\lambda_{td} = 0.732 \log\left(\frac{\pi \times \tau_s}{2 \times F_{en}}\right) + c_1$$

El parámetro c_1 es un coeficiente que varía en función de q (número de ranuras por polo y por fase). Para $q = 1$, $c_1 = 0$. Además, se tiene que la anchura de la ranura, le , también denominada en ocasiones F_{en} .

$$\lambda_{td} = 0.732 \log\left(\frac{\pi \times 0,0052}{2 \times 0,00454}\right) + 0 = 0,189$$

Entonces, se puede calcular X_{td} con la expresión siguiente:

$$X_{td} = \frac{4 \times \pi \times f \times ns^2 \times \lambda_{td} \times \mu_0 \times Lus}{p \times q}$$

Con:

f	Frecuencia de la máquina	50 Hz
p	Número de pares de polos	9
Lus	Longitud útil del estator	0,086 m
q	Número de ranuras por polo y por fase	1
ns	Número de espiras	171 vueltas
μ_0	Permeabilidad del vacío	$4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$

Tabla 7 : Datos para el cálculo de la impedancia de dispersión

$$X_{td} = \frac{4 \times \pi \times 50 \times 171^2 \times 0,189 \times 4 \times \pi \times 10^{-7} \times 0,086}{9 \times 1} = 0,041 \Omega$$

B. Impedancia de dispersión de las ranuras

El cálculo de la impedancia de la ranura se realiza a través de un coeficiente, λ_e , correspondiente a la permeabilidad de la ranura:

$$\lambda_e = K1 \times \frac{\sum h}{3le} + K2 \times \frac{\sum h}{le}$$

La permeabilidad de la ranura es proporcional, para las partes no bobinadas, a:

$$\frac{\sum h}{3 \times le} = \frac{hcu \times nc}{3 \times le}$$

Con:

nc	Número de conductores por ranura	19
le	Ancho de la ranura	0,00454 m
hcu	Alto del cobre	0,0016 m

Tabla 8 : Datos para el cálculo de la impedancia de dispersión en las ranuras 1

Se obtiene:

$$\frac{\sum h}{3 \times le} = \frac{hcu \times nc}{3 \times le} = 2,23$$

Para las partes bobinadas, la permeabilidad de la ranura es proporcional a:

$$\frac{\sum h}{le} = \frac{(he - hcu) \times nc}{le}$$

Con:

nc	Número de muesca de conductor	19
le	Ancho de la ranura	0,00454 m
he	Alto de la ranura	0,04027 m
hcu	Alto del cobre	0,0016 m

Tabla 9 : Datos para el cálculo de la impedancia de dispersión en las ranuras 2

Se obtiene:

$$\frac{\sum h}{le} = \frac{(0,00403 - 0,0016) \times 19}{0,00454} = 10,17$$

Los coeficientes K1 y K2 de reducción de fugas dependen del paso polar y de paso acortado:

$$\frac{c}{\tau p} = \frac{3}{3 \times q} = 1$$

Se obtiene entonces, K1 = 1 y K2 = 1.

Ahora, se puede calcular λe :

$$\lambda e = K1 \times \frac{\sum h}{3 \times le} + K2 \times \frac{\sum h}{le} = 8,93$$

Se deduce la impedancia de dispersión de la ranura con la relación siguiente:

$$X_e = \frac{4 \times \pi \times f \times ns^2 \times \lambda e \times \mu_0 \times Lus}{p \times q} = 1,959 \Omega$$

C. Impedancia de dispersión del bobinado

En cuanto a los otros dos cálculos de impedancia, se realizan a través de la permeabilidad, λ_{tb} :

$$\lambda_{tb} = 1,13 \times \mu_0 \times kr \times \left(x + \frac{h}{2}\right)$$

Con:

kr	Coficiente de acortamiento del paso	1
x	Desbordamiento fuera hierro, depende de la tensión aplicada al motor	0 mm

Tabla 10 : Datos para el cálculo de la impedancia de dispersión en las ranuras 3

El parámetro h se calcula como la fórmula que sigue:

$$h = \left(AB^2 - \left(\frac{cm}{2}\right)^2\right)^{1/2}$$

Sabiendo que:

- AB es una longitud definida por:

$$AB = \frac{Ls \text{ moy} - 2 \times lf - 4 \times x}{4}$$

$Ls \text{ moy}$ se define por:

$$ls \text{ moy} = 2 \times \left(lf + 2,2 \times \frac{Da}{p} \right) = 226 \text{ mm}$$

Por lo tanto:

$$AB = \frac{226 - 2 \times 91 - 4 \times 0}{4} = 11 \text{ mm}$$

- El parámetro cm es el paso de la bobina, la relación es la siguiente:

$$cm = \frac{Qs}{2 \times p} \times \tau_s = 15,71 \text{ mm}$$

Se deduce que h :

$$h = \left(AB^2 - \left(\frac{cm}{2} \right)^2 \right)^{1/2} = 7,70 \text{ mm}$$

Recapitulando, el resultado es:

$$\lambda_{tb} = 1,13 \times 4 \times \pi \times 10^{-7} \times 1 \times \left(0 + \frac{0,0077}{2} \right) = 5,468 \times 10^{-9}$$

Finalmente, se obtiene la impedancia de dispersión de la cabeza de las bobinas X_{tb} :

$$X_{tb} = \frac{4 \times \pi \times f \times n_s^2 \times \lambda_{tb}}{p}$$

$$X_{tb} = \frac{4 \times \pi \times 50 \times 171^2 \times 5,468 \times 10^{-9}}{9} = 0,011 \Omega$$

D. Cálculo de la reactancia de dispersión del estator

Los tres cálculos de las impedancias de dispersión permiten obtener fácilmente la reactancia de dispersión del estator, X_s :

X_e	Impedancia de dispersión en la ranura	1.959 Ohm
X_{tb}	Impedancia de dispersión de de las bobinas	0,0112 Ohm
X_{td}	Impedancia de dispersión de los dientes	0,0415 Ohm

Tabla 11 : Resultado del valor de impedancias

Por lo que:

$$X_s = 1,959 + 0,0112 + 0,0415 = 2,012 \Omega$$

➤ Cálculo de la reactancia síncrona, X_d

Se busca calcular la reactancia síncrona, X_d , definida por la relación:

$$X_d = X_{ad} + X_s$$

Siendo X_s la impedancia de dispersión y X_{ad} la reactancia de magnetización.

A continuación se va a calcular la reactancia de magnetización a través de un coeficiente λ_{ad} que representa la reacción del inducido:

$$\lambda_{ad} = \frac{\tau p}{k_c \times (e + ha) \times \pi^2} \times m \times q$$

Donde:

τp	Paso polar	0,0157 m
k_c	Coficiente de Carter	1,14
e	Entrehierro	0,00245 m
ha	Altura del imán	0,003 m
m	Número de fases	3
q	Número de ranuras por polo y por fase	1

Tabla 12 : Datos para el cálculo de la reactancia síncrona

$$\lambda_{ad} = \frac{0,00245}{1,104 \times (0,00245 + 0,003) \times \pi^2} \times 3 \times 1 = 0,768$$

Se deduce el valor de la reactancia de magnetización:

$$X_{ad} = \frac{4 \times \pi \times f \times ns^2 \times \lambda_{ad} \times \mu_0 \times Lus}{p \times q}$$

$$X_{ad} = \frac{4 \times \pi \times 50 \times 171^2 \times 0,768 \times 4 \times \pi \times 10^{-7} \times 0,0855}{9 \times 1} = 0,168 \Omega$$

Conociendo que la impedancia de dispersión tiene un valor de 2.012 Ω . Se obtiene un valor de reactancia síncrona:

$$X_d = X_{ad} + X_s = 2,18 \Omega$$

La razón por la que el valor de impedancia de dispersión es tan alto es el muy reducido valor de potencia del generador, obteniéndose resultados totalmente atípicos.

X. Flujo y voltaje. Behn-Eshenburt

Ahora, ya están calculados todos los parámetros necesarios para determinar las tensiones E_c y V . Se va a suponer que el régimen es no saturado (el imán tiene una permeabilidad alta y constante).

Hay que tener en cuenta varios parámetros en el siguiente diagrama:

- El ángulo φ es la diferencia de fase entre la tensión V y la corriente I nominal del generador. Se supondrá que $\cos \varphi = 1$ ($\varphi = 0^\circ$)
- El ángulo δ es la diferencia de fase entre la tensión nominal, V , y la tensión de simple en vacío, E_o .

Este principio implica tres etapas:

- El cálculo del número de espiras, n_s , se realizó por medio de un valor de tensión simple eficaz equivalente en el entrehierro, E_c , de 27,71 V. Se mantiene ese valor.
- A partir de este valor se debe calcular la tensión nominal de la máquina. Se tienen tres ecuaciones para el cálculo, partiendo de los valores de reactancia síncrona X_s y la resistencia del estator R_s (calculado en el punto 8.2, $R = 0,226 \Omega$):

$$E_c \times \cos \theta = V - R_s \times I \times \cos \varphi - X_s \times I \times \sin \varphi$$

$$E_c \times \sin \theta = R_s \times I \times \sin \varphi - X_s \times I \times \cos \varphi$$

$$E_c = \sqrt{(E_c \times \cos \theta)^2 + (E_c \times \sin \theta)^2}$$

Después del cálculo, se obtiene:

$$V = \sqrt{(E_c + R_s \times I)^2 + (X_s \times I)^2}$$

$$V = \sqrt{(27,71 + 0,226 \times 15,70)^2 + (2,018 \times 15,70)^2} = 44,43 \text{ V}$$

- Queda por calcular la tensión en vacío, E_o .

$$E_o \times \cos \delta = V - R_s \times I \times \cos \varphi - X_d \times I \times \sin \varphi$$

$$E_o \times \sin \delta = R_s \times I \times \sin \varphi - X_d \times I \times \cos \varphi$$

$$E0 = \sqrt{(Ec \times \cos \delta)^2 + (Ec \times \sin \delta)^2}$$

Por último, se obtiene:

$$E0 \times \cos \delta = 44,60 - 0,241 \times 15,70 \times \cos 0^\circ - 2,139 \times 15,70 \times \sin 0^\circ = 40,82 \text{ V}$$

$$E0 \times \sin \delta = 0,241 \times 15,7 \times \sin 0^\circ - 2,139 \times 15,7 \times \cos 0^\circ = -33,58 \text{ V}$$

$$E0 = \sqrt{(Ec \times \cos \delta)^2 + (Ec \times \sin \delta)^2} = 53,32 \text{ V}$$

Se puede ahora, gracias a la tensión en vacío obtenida, calcular la inducción de vacío:

$$Be0 = \frac{E0 \times Be}{Ec} = \frac{53,32 \times 0,8}{27,71} = 1,54 \text{ T}$$

XI. Resistencias equivalentes

A. Corriente de cortocircuito en régimen permanente

Se procede al cálculo del valor de la corriente de cortocircuito con los valores obtenidos anteriormente:

$$I_{cc} = \frac{E0}{\sqrt{Rs^2 + Xd^2}}$$

$$I_{cc} = \frac{53,32}{\sqrt{0,226^2 + 2,18^2}} = 24,32 \text{ A}$$

B. La resistencia del estator por fase, Rs

Se obtendrá con la expresión siguiente:

$$Rs(75^\circ C) = 2,1 \times 10^{-8} \times \frac{Ltc}{ScuN \times a}$$

$$Ltc = ns \times Lspm$$

Sabiendo que:

$2,1 \times 10^{-8}$	Resistividad del cobre	$\Omega \cdot m$
Ltc	Longitud total de los conductores	m
Lspm	Longitud de la espira media	m
Scu	Sección de un controlador	3,369mm ²
a	Número de circuitos paralelos	1 circuito paralelo

Tabla 13 : Datos para el cálculo de la resistencia estática

Así que se puede calcular la longitud de la espira media a su vez a través de la siguiente relación:

$$Lspm = 2 \times \left(Lf + 2,2 \times \frac{Da}{p} \right)$$

$$Lspm = 2 \times \left(0,091 + 2,2 \times \frac{0,090}{9} \right) = 0,226 \text{ m}$$

Así se tiene:

$$Ltc = 171 \times 0,226 = 38,65 \text{ m}$$

$$Rs(75^\circ C) = 2,1 \times 10^{-8} \times \frac{38,65}{3,369 \times 10^{-6} \times 1} = 0,226 \Omega$$

C. Imanes resistencia equivalente y pérdidas en Julios imanes

Se define el parámetro Rm que caracteriza las pérdidas por corrientes de Foucault en los imanes y en la armadura del rotor. Por lo tanto, estas son las pérdidas debidas a los armónicos de corriente.

$$Rm = \frac{3}{2 \times p} \times (ns \times ks)^2 \times \frac{V^2}{Paim}$$

Siendo $Paim$ las pérdidas que tienen lugar en los imanes. Se definen mediante la ecuación:

$$Paim = 4p \times Lf \times \rho m \times \frac{e + ha}{\delta p} \times Hmli^2 \times \frac{\sinh\left(\frac{ap}{\delta p}\right) + \sin\left(\frac{ap}{\delta p}\right)}{\cosh\left(\frac{ap}{\delta p}\right) - \cos\left(\frac{ap}{\delta p}\right)}$$

Con:

p	Número de pares de polos	9 pares de polos
---	--------------------------	------------------

Lf	Longitud de hierro	0,091 m
ρ_m	Resistividad del imán	0,0000015 $\Omega \cdot m$
δp	Profundidad de penetración del imán	
Hmli	Campo magnético creado por la corriente de rizado	
ap	Ancho del imán	0,0045 m

Tabla 14 : Datos para el cálculo de la resistencia de los imanes

La profundidad de penetración del imán δp se define por la relación siguiente:

$$\delta p = \sqrt{\frac{2 \times \rho_m \times (ha + e)}{4 \times \pi \times f_{mli} \times \mu_0 \times ha}}$$

Con:

ha	Altura del imán	0,003 m
e	Entrehierro	0,00245 m
f _{mli}	Frecuencia de impulsos de modulación	f _{mli} = 20.f = 1000 Hz
μ_0	Permeabilidad del aire	$4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$
Hmli	Campo magnético creado por la corriente de rizado	

Tabla 15 : Datos para el cálculo de la profundidad de penetración

$$\delta p = \sqrt{\frac{2 \times 0,0000015 \times (0,003 + 0,00245)}{4 \times \pi \times 1000 \times 4 \times \pi \times 10^{-7} \times 0,003}} = 0,0186$$

Así que se ha de calcular el campo magnético creado por la corriente de rizado Hmli:

$$H_{mli} = \frac{\alpha/2 \times A_s \times a_p}{2 \times (e + ha) \times kc}$$

Con:

α	Tasa de ondulación de corriente pico a pico	Se elige $\alpha = 5\%$
A_s	Corriente de carga lineal	
k_c	Coefficiente de Carter	1,14
a_p	Ancho del imán	Se toma $a_p = 0,0045$ m

Tabla 16 : Datos para el cálculo del campo magnético de la corriente de rizado

Se determina la corriente de carga lineal:

$$A_s = \frac{2 \times 3 \times ns \times I}{\pi \times Da}$$

$$A_s = \frac{2 \times 3 \times 171 \times 15,7}{\pi \times 0,090} = 56959,17 \text{ A/m}$$

Se puede determinar el campo magnético creado por la corriente de rizado, H_{mli} :

$$H_{mli} = \frac{\frac{0,05}{2} \times 56959,17 \times 0,0045}{2 \times (0,00245 + 0,003) \times 1,104} = 515,08 \text{ A/m}$$

Esto resulta en pérdidas en los imanes, P_{aim} :

$$P_{aim} = 4 \times 9 \times 0,091 \times 0,0000015 \times \frac{0,00245 + 0,003}{0,0168} \times 515,08^2 \times \frac{\sinh\left(\frac{0,0045}{0,0186}\right) + \sin\left(\frac{0,0045}{0,0186}\right)}{\cosh\left(\frac{0,0045}{0,0186}\right) - \cos\left(\frac{0,0045}{0,0186}\right)} = 0,108 \text{ W}$$

Se deduce de las pérdidas debidas a corrientes de Foucault la resistencia equivalente de los imanes, R_m :

$$R_m = \frac{3}{2 \times p} \times (ns \times ks)^2 \times \frac{V^2}{P_{aim}}$$

$$R_m = \frac{3}{2 \times 9} \times (171 \times 1)^2 \times \frac{44,44^2}{0,108} = 89109493,78 \Omega$$

XII. Constantes de tiempo

Se tienen que calcular dos constantes de tiempo asociadas al generador. La primera constante de tiempo es relativa al diagrama equivalente del generador en el eje de inducido q:

$$T_o = \frac{X_d}{\omega \times R_s}$$

$$T_o = \frac{2,18}{314,16 \times 0,226} = 0,031 \text{ s}$$

La segunda constante de tiempo T1 es relativa al diagrama equivalente del generador en el eje de inducido, d:

$$T1 = \frac{X_s}{\omega \times (R_s + R_m)}$$

$$T1 = \frac{2,012}{314,16 \times (0,226 + 89109493,78)} = 7,19 \times 10^{-11} \text{ s}$$

XIII. Cálculo de las pérdidas y el rendimiento

➤ Pérdidas del estator

Se han de tener en cuenta todos los parámetros para el cálculo de las pérdidas de la máquina y así conocer su rendimiento. Conociendo con las pérdidas en julios del estator, P_j :

$$P_j = 3 \times R_s \times I$$

$$P_j = 3 \times 0,226 \times 15,70 = 167,37 \text{ W}$$

➤ Pérdidas en el hierro

El cálculo de las pérdidas de hierro, P_{fer} , se lleva a cabo con la siguiente ecuación:

$$P_{fer} = P_{fd} + P_{fcs}$$

Con:

Pfd Pérdidas en el hierro de los dientes del estator

Pfcs Pérdidas en el hierro en la culata

Las pérdidas en el hierro en la culata del estator cumplen la siguiente relación:

$$Pfd = 3 \times 2,6 \times Bd \text{ moy}^2 \times \left(\frac{f}{50}\right)^{1/3} \times Xmd$$

Con:

Bd moy	Inducción media en los dientes del estator	Bd moy = Bm = 0,735 T
f	Frecuencia de la máquina	50 Hz
Xmd	Masa de los dientes	

Tabla 17 : Datos para el cálculo de las pérdidas en el hierro

Hay que determinar la masa de los dientes, Xmd:

$$Xmd = Lus \times he \times \frac{bp + bt}{2} \times Qs \times 7850$$

Con:

Lus	Longitud útil del estator	0,08554 m
he	Altura de la ranura	0,04027 m
bp	Ancho de la parte alta del diente	0,00695 m
bt	Ancho de la parte baja del diente	0,00367 m
Qs	Número de ranuras	54
7850	Densidad del hierro	7850 kg / m ^ 3

Tabla 18 : Datos para el cálculo de la masa de los dientes

$$Xmd = 0,08554 \times 0,04027 \times \frac{0,00695 + 0,00367}{2} \times 54 \times 7850 = 7,747 \text{ kg}$$

Esto da lugar a las pérdidas de hierro en los dientes del estator, Pfd:

$$Pfd = 3 \times 2,6 \times 0,735^2 \times \left(\frac{50}{50}\right)^{\frac{1}{3}} \times 7,747 = 32,640 \text{ W}$$

Ahora se tiene que determinar las pérdidas de hierro en la culata, $Pfcs$:

$$Pfcs = 2 \times 2,6 \times Bcs^2 \times \left(\frac{f}{50}\right)^{1/3} \times Xmc$$

Con:

Bcs	Inducción en culata	1,4 T
f	Frecuencia de la máquina	50 Hz
Xmc	Masa de la culata del estator	

Tabla 19 : Datos para el cálculo de las pérdidas en el hierro en la culata

La masa de la culata se determina mediante la relación:

$$Xmc = \left(\frac{\pi}{4}\right) \times (Ds \text{ ext}^2 - (Da + 2 \times he)^2) \times 7850 \times Lus$$

Con:

Ds ext	Diámetro exterior del estator	0,1906 m
Da	Diámetro del entrehierro	0,09 m
he	Altura de la ranura	0,04027 m
7850	Densidad del hierro	7850kg / m ^ 3
Lus	Longitud útil de estator	0,08554 m

Tabla 20 : Datos para el cálculo de la masa de la culata

$$Xmc = \left(\frac{\pi}{4}\right) \times (0,1906^2 - (0,09 + 2 \times 0,04027)^2) \times 7850 \times 0,08554 = 3,82 \text{ kg}$$

Esto se traduce en pérdidas en la culata del estator, $Pfcs$:

$$Pfcs = 2 \times 2,6 \times 1,4^2 \times \left(\frac{50}{50}\right)^{\frac{1}{3}} \times 3,82 = 38,94 \text{ W}$$

Así, se obtiene que las pérdidas de hierro son, $Pfer$:

$$Pfer = 38,94 + 32,64 = 71,58 \text{ W}$$

➤ Pérdidas mecánicas

$$P_{méca} = 10 \times Da \times Lf \times \left(\frac{\pi \times Da \times N}{60}\right)^2$$

Con:

Da	Diámetro de entrehierro	0,090 m
Lf	Longitud de hierro	0,091 m
N	Velocidad de rotación	350 rpm

Tabla 21 : Datos para el cálculo de las pérdidas mecánicas

Se obtiene:

$$P_{méca} = 10 \times 0,090 \times 0,091 \times \left(\frac{\pi \times 0,090 \times 350}{60}\right)^2 = 0,2228 \text{ W}$$

➤ Pérdidas adicionales

Las pérdidas adicionales, P_{sup} , se definen por:

$$P_{sup} = 0,5\% \times P_n$$

Siendo P_n la potencia nominal de la máquina. Se obtiene:

$$P_{sup} = 0,5\% \times 1500 = 7,5 \text{ W}$$

➤ Cálculo de las pérdidas totales

Ahora se pueden calcular la pérdida total de la máquina:

$$\Sigma p_{ertes} = P_j + P_{aim} + P_{fer} + P_{sup} + P_{méca}$$

$$\Sigma p_{ertes} = 167,38 + 0,108 + 71,58 + 7,5 + 0,2228$$

$$\Sigma p_{ertes} = 246,79 \text{ W}$$

➤ Rendimiento de la máquina

$$\eta = \frac{P_n - \Sigma p_{ertes}}{P_n}$$

$$\eta = \frac{1500 - 246,79}{1500}$$

$$\eta = 0,84$$

Se puede observar que el rendimiento final está muy cerca de la suposición que se ha supuesto a principios del diseño (que fue de 0,87).

Esto resulta en una salida de energía eléctrica:

$$S_n = P_n \times \eta$$

$$S_n = 1500 \times 0,84$$

$$S_n = 1260 \text{ VA}$$

XIV. Dimensionamiento de los imanes

Las dimensiones de imán de neodimio se definen por varios parámetros:

- El diámetro exterior del imán $D_{ext \text{ imán}}$
- El diámetro interior del imán $D_{int \text{ imán}}$

Los valores elegidos de los imanes anteriormente son:

- La anchura del imán, a_p , es 0,0045 m
- La altura del imán, $h_a = 0,003$ m
- La longitud del imán $l_g = 0,051$ m

Así se ha de calcular el diámetro exterior del imán y el diámetro interior:

Diámetro exterior del imán:

$$D_{ext \text{ imán}} = D_{r \text{ ext}} + 2 \times h_a + 2 \times e_f$$

Diámetro interior del imán:

$$D_{int \text{ imán}} = D_r$$

Con:

ha	Altura del imán	0,003 m
Dr	Diámetro exterior del rotor	0,0791 m
ef	Espesor de la banda	0,002 m

Tabla 22 : Datos para el cálculo de las dimensiones de los imanes

Se obtiene:

$$D_{ext} \text{ imán} = 0,0751 + 2 \times 0,005 + 2 \times 0,002 = 0,0891 \text{ m}$$

$$D_{int} \text{ imán} = 0,0791 \text{ m}$$

Se deduce de este modo el número de imanes que se colocarán en el generador:

$$n \text{ imanes} = \text{Redondear} \left(\frac{L_f}{l_g \text{ imán}} \right) * p * 2$$

$$n \text{ imanes} = \text{Redondear} \left(\frac{0,091}{0,051} \right) * 9 * 2$$

$$n \text{ imanes} = 36 \text{ imanes}$$

Existe, pues, un número de imanes por polo:

$$nb \text{ imanes} / polo = \frac{n \text{ imanes}}{p * 2}$$

$$nb \text{ imanes} / polo = \frac{36}{9 * 2} = 2 \text{ imanes/polo}$$

En el Anejo III se presenta un resumen en tablas de los resultados obtenidos.

CAPÍTULO 4. Regulación y explotación de la energía producida

La cadena de transmisión de la energía eléctrica está compuesta de varias etapas, comenzando por la generación y finalizando en el conexionado con la red.

El generador síncrono de imanes permanentes proporciona una corriente alterna trifásica de frecuencia y tensión fluctuantes, que varía proporcionalmente con la velocidad a la que se acciona el generador. Además, el valor de la velocidad depende de la potencia eléctrica total obtenida.

Para mejorar la calidad de onda y permitir el almacenamiento de energía en baterías, la cadena eléctrica necesita un bus de CC. Por un lado, la conversión de corriente alterna a corriente continua proporciona una cierta estabilidad a la tensión y, por lo tanto, a la transmisión de potencia. Por otra parte, el almacenamiento de energía es necesariamente

llevarlo a cabo en tensión continua. En cambio, la inyección de energía en la red (220V AC) está hecha de corriente alterna, para cumplir esto la solución incluye tres etapas.

- La primera etapa consiste en la generación de una corriente alterna del generador y su transformación en corriente continua por un rectificador. Este dispositivo es un puente de diodos en la conmutación natural.

En cuanto al rectificador, se trata de un sistema basado en la electrónica de potencia, con una constitución relativamente simple tal y como se muestra en la Figura 16.

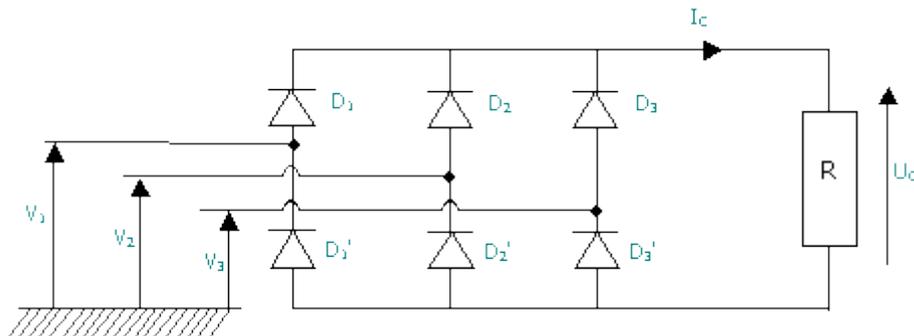


Figura 16 : Detalle de funcionamiento de un rectificador de onda

El diodo es un elemento electrónico que tiene dos funciones principales: dejar la corriente pasar en el sentido que marca su propio símbolo. En este caso, se dice que está en modo pasante (pasante o directo). En caso contrario, no pasa corriente a través del diodo, entonces se dice que está en modo bloqueo (bloqueo o inverso). El bloqueo o la conducción de la corriente de cada diodo, en función de la tensión alterna de entrada, dan como resultado una salida de tensión en continua.

Por otra parte, para una velocidad de viento dada, es necesario proporcionar una velocidad de rotación concreta para para obtener la máxima potencia posible. Es decir, no siempre la máxima velocidad en el eje ofrece la máxima potencia en salida. Así, para cada tensión nominal del generador, se ha de aplicar una cierta carga.

En esta búsqueda del máximo rendimiento posible, existe un sistema que consta de un rectificador programable para imponer la carga deseada en función de cada tensión de entrada. Este es el sistema MPPT (Maximum Power Point Tracking). Mediante la configuración adecuada del sistema, ajustando la tensión de la curva de potencia/tensión, se obtiene un sistema capaz de proporcionar una potencia máxima para cada valor de la velocidad de viento.

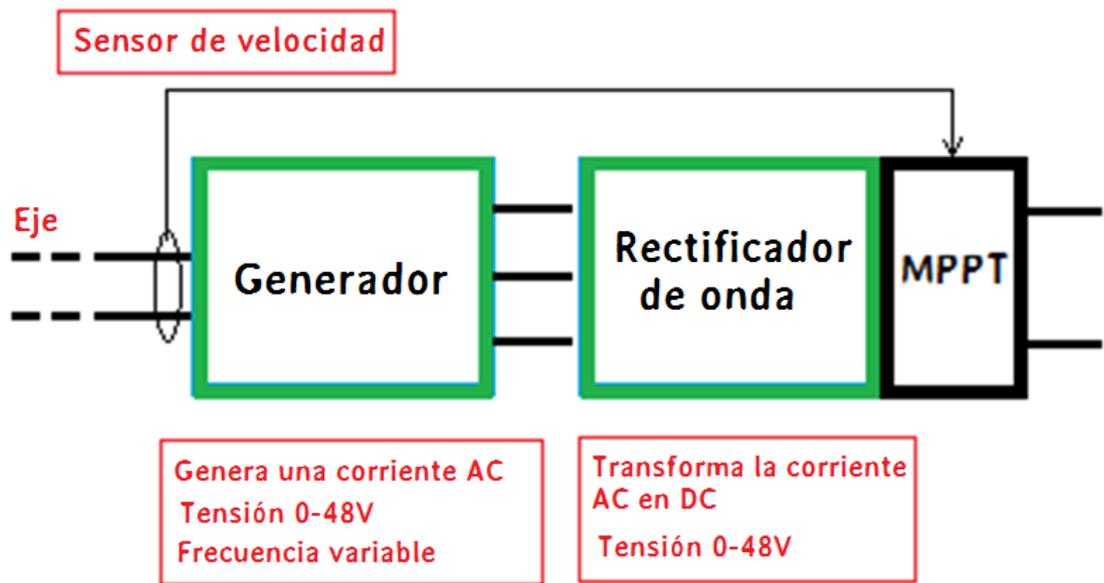


Figura 17: Detalle del MPPT en la cadena de transmisión de energía

Se ha elegido el rectificador con sistema MPPT incorporado de la sociedad Jiangsu Naier Wind Power, con referencia WW10-48-L00 y un precio de 280€. Cuyas características se encuentran en el Anexo I.



Figura 18: Convertidor rectificador con sistema MPPT incorporado

- El segundo paso consiste en la estabilización de la tensión en el mismo bus de continua y el almacenamiento en las baterías. La conexión de la batería se debe realizar con la implementación de un convertidor DC / DC y un controlador de carga.

Para recargar las baterías, se tiene que proporcionar una tensión constante y ligeramente superior a su tensión nominal (en este caso 48 V). De lo contrario, el generador podría operar en el modo de motor y consumir energía. Así que se ha de encontrar una manera de aumentar el voltaje para dar un valor fijo.

Es posible aumentar la tensión por medio de un convertidor de tipo boost.

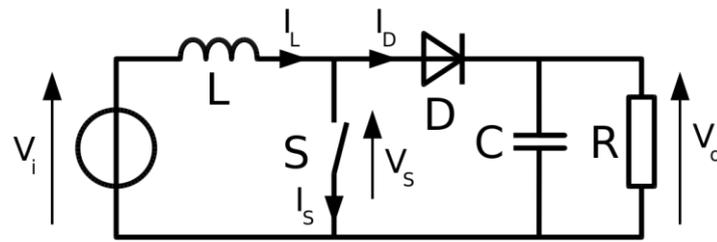


Figura 19 : Detalle de funcionamiento de un convertidor boost

La potencia de entrada y la potencia de salida han de ser siempre las mismas (despreciando ligeras pérdidas), el aumento de tensión provoca una disminución de la corriente disponible.

Se obtiene, por lo tanto, a la salida de este convertidor una tensión continua fijada cerca de los 48V. Dependiendo de la potencia disponible, se puede ajustar la corriente consumida por la carga con el convertidor.

El convertidor boost escogido es de la sociedad YSLUN con una tensión de entrada permisible de 10-38 V (DC), valores entre los que variará la tensión y una salida ajustable de 36-60 V (DC), muy recomendable para la carga de baterías, pudiéndola ajustar a 48V si varía la salida entre 48 y 60 V.

- El tercer paso consiste en la conexión a la red. Si se desea inyectar energía a la red se debe obtener una tensión alterna constante (220V AC) y de frecuencia constante (50Hz). Para lograr dichas condiciones, es necesario instalar un inversor a cargo de la transformación de la tensión de continua en tensión de alterna y el aumento a 220V. El funcionamiento de este dispositivo es similar a la del rectificador pero con una lógica de conmutación más compleja. El inversor seleccionado es de la marca OEM, conversión 48V DC – 220V AC de 1500W.

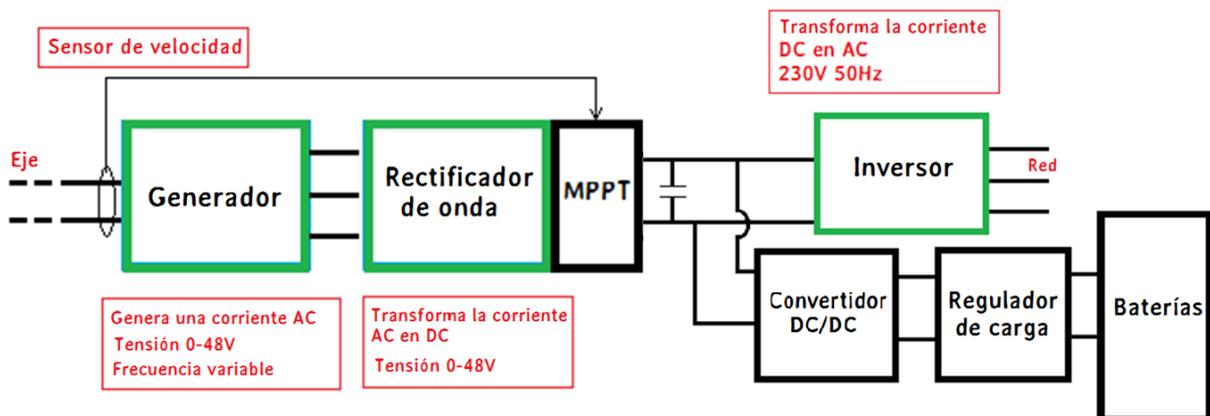


Figura 20 : Cadena de trasmisión de energía eléctrica completa

Seguridad en caso de grandes ráfagas

En los casos en los que el viento es extremadamente fuerte, la potencia producida por la turbina puede llegar a ser muy importante. Si la corriente generada es superior a la capacidad de absorción de las baterías, la velocidad de rotación de la turbina y la tensión se elevan, lo que podría dañar considerablemente el aparato.

En estas condiciones, el sistema MPPT aplica una carga de gran valor al generador. Este valor de carga produce una reducción de la velocidad de rotación de la turbina. El aumento de la corriente produce consigo el aumento del par resistente que es lo que hace disminuir dicha velocidad.

CAPÍTULO 5. Optimización del rotor Savonius

El diseño de la estructura de la turbina se ha tomado de los proyectos anteriores buscando una optimización vistas algunas imperfecciones de diseño.

I. Elección del número de palas

Como para las turbinas eólicas de eje horizontal, el número de palas tiene un impacto directo en la velocidad de rotación de la turbina eólica y sobre su par motor. En el caso de la turbina de viento Savonius, la velocidad es ya muy baja. Por lo tanto, para producir una corriente eléctrica interesante, lo mejor es rotar a una velocidad alta.

La implantación de un multiplicador de velocidad entre el rotor de la turbina y el generador es bastante posible, sin embargo, una relación de multiplicación significativa conduciría a mayores pérdidas mecánicas y acortar el rango de funcionamiento del generador. En efecto, si esta relación es alta, la velocidad de accionamiento del alternador se multiplicará en gran medida. Esto implica que para una pequeña variación de la velocidad del viento la variación del generador será fuerte.

Por lo tanto, teniendo en cuenta la experiencia hasta la fecha en términos de velocidad y la complejidad de la estructura, se elige diseñar un modelo de dos palas.

II. Estudio del perfil

Para optimizar aún más las ventajas de turbina eólica Savonius es interesante de hacer girar el cubo helicoidalmente alrededor de su eje de rotación. De hecho, el problema de



Figura 21: Turbina Savonius bipala

una Savonius “clásica” es que su par motor varía sinusoidalmente ya que la superficie de acoplamiento del viento varía de acuerdo con la orientación de la turbina en relación con el viento.

Al girar las palas 180° entre la base y la parte superior del aerogenerador, se tendrá siempre la misma superficie de agarre al viento sin tener en cuenta la dirección del mismo. Por tanto, este permite un par continuo y aumentar el rendimiento global de la turbina. Este tipo de turbina ha tenido un fuerte desarrollo en los últimos años, ya que, además de aumentar el factor de potencia de hasta un 30%, tiene un aspecto mucho más compacto y estético que las turbinas Savonius normales.

Figura 22: Turbina Savonius de perfil helicoidal

III. Descripción general del sistema

Con el objetivo de clarificar el desarrollo del estudio de la turbina se ha dividido en siete subsistemas:

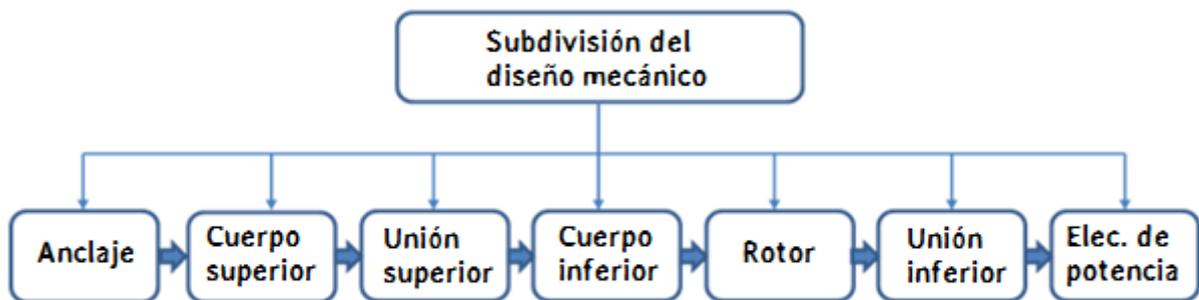


Figura 23 : Esquema de la subdivisión del diseño

El sistema de subdivisión se ha llevado a cabo de esta forma por motivos del ensamblaje final. En términos de montaje, todos los subsistemas están acoplados de forma independiente y se instalan uno tras otro.

Desde el punto de vista del mantenimiento, se plantean los mismos problemas. Es posible aislar un subsistema, desmontar el conjunto si es necesario, para llevar a cabo las tareas de mantenimiento o reparación necesarias y después poder reconstruirlo fácilmente.

En primer lugar, se muestra una imagen del diseño en conjunto del dimensionamiento mecánico para tener una perspectiva general. A continuación, se explicaran los elementos más importantes que lo conforman.



Figura 24 : Estructura mecánica completa de la turbina

➤ Rotor

El rotor de la turbina es la pieza principal y más llamativa. Su función es convertir la energía cinética del viento en energía mecánica de rotación. El diseño del rotor se simplifica dividiendo cada una de las dos palas helicoidales en ocho piezas diferentes que se montan una encima de la otra. Además, la unión de ambas palas se lleva a cabo con dos piezas de acero de forma helicoidal. El material que lo conforma es fibra de lino, en abundancia en la región de Nord Pas de Calais.

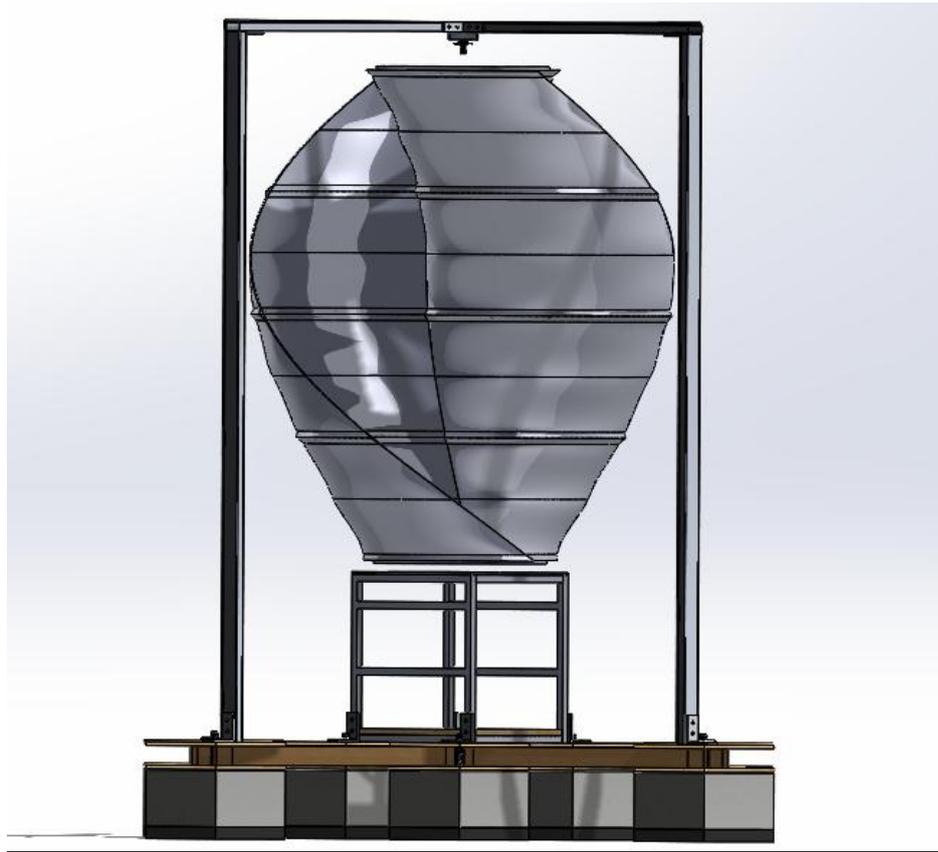


Figura 25 : Perspectiva de alzado del sistema mecánico completo de la turbina

➤ Cuerpo superior e inferior

El cuerpo superior tiene la función de la estabilización y sujeción exterior de la turbina.

Inicialmente, el diseño partía de vigas con una sección de 30x30 mm, debido al peligro que podría suponer una fuerte tempestad se ha considerado que habría que reforzar considerablemente esta estructura. Finalmente, se ha decidido optar por un total de siete vigas de acero de sección 80x40 mm, cuatro de ellas verticales y las otras tres, una con la mitad de la longitud de las otras dos, formando una cruz. La fijación entre las vigas se realiza con piezas de aluminio, ya que es más ligero que el acero, con forma de “L” y de dimensiones 100x100x10 mm.

La idea es la misma para el cuerpo inferior, aunque de menores dimensiones. Su función es la protección del generador y su conexión al rotor de la turbina.

➤ Unión superior e inferior

Tiene lugar entre el cuerpo de sujeción superior y el eje de la turbina. El elemento principal es el rodamiento, situado entre el eje y la pieza que se acopla al cuerpo

superior, como se aprecia en la Figura 26. Un error de dimensionamiento ha hecho necesario un cambio de rodamiento, ya que este no trabajaba bajo ningún tipo de carga axial (peso del rotor), por lo tanto deslizaba sobre el eje.

El rodamiento seleccionado es el un rodamiento a bolas de referencia SKF 2204 E-2RS1TN9 del proveedor “123roulement”. Las características técnicas se encuentran en el Anexo I,

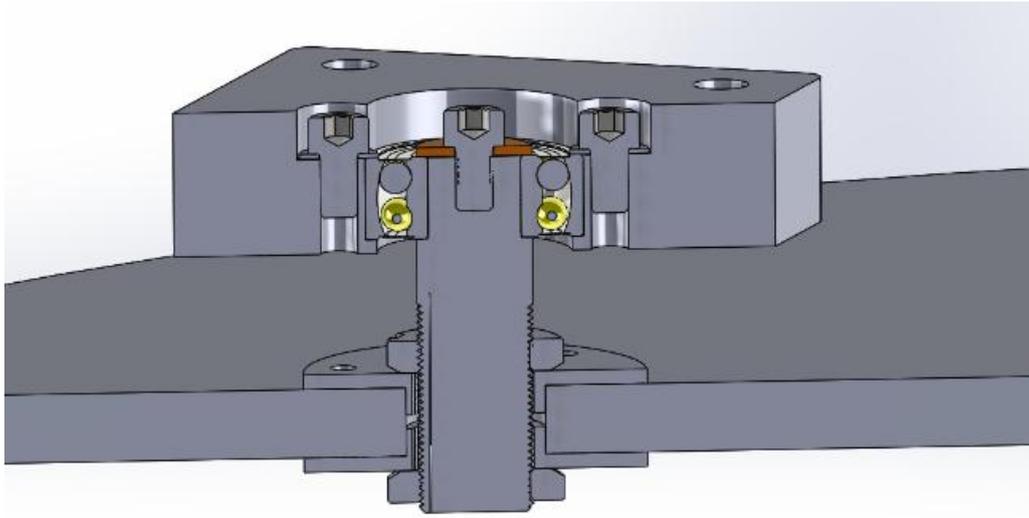


Figura 26 : Detalle de la unión superior

Mientras que la unión inferior conecta el eje de rotación con el cuerpo de sujeción inferior, en el que se encuentra el generador.

El problema que presenta la unión inferior es similar al de la superior, la dificultad de rotación con respecto al eje. Vista la complejidad que presenta la detección del error, se ha decidido rehacer los cálculos y seleccionar los rodamientos correctos. La solución obtenida son dos rodamientos cónicos del proveedor 123roulement, cuyas especificaciones se presentan en el Anexo I.

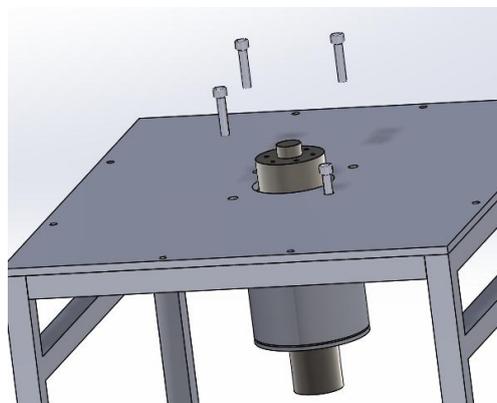


Figura 27: Detalle de la unión inferior

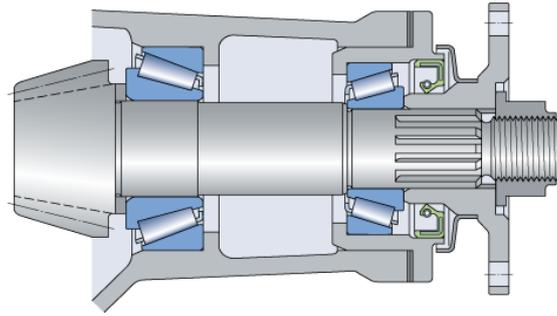


Figura 28 : Detalle de la unión inferior

➤ Anclaje

El anclaje de la turbina eólica se compone de varios bloques de hormigón y vigas de madera. Estos se apoyan sobre un material elástico que protege de la impermeabilización de la cubierta y amortigua las vibraciones del viento.

La disposición de los bloques será como se muestra en la Figura 29:

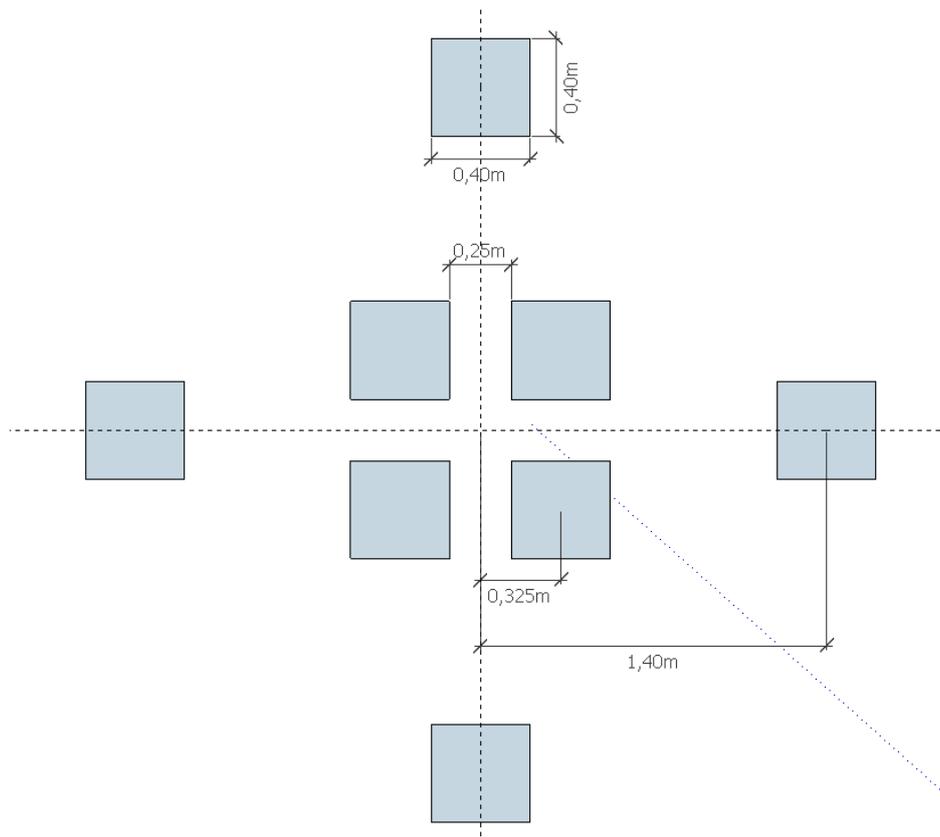


Figura 29 : Esquema de la plataforma de anclaje

Estos bloques incluyen una barra roscada que permite la fijación de la estructura de la turbina eólica.

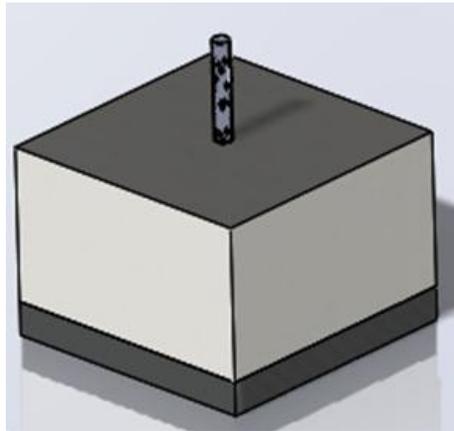


Figura 30 : Bloque unitario de la plataforma de anclaje

Además, las diferentes plataformas están conectadas entre sí por vigas de madera para asegurar su posición.

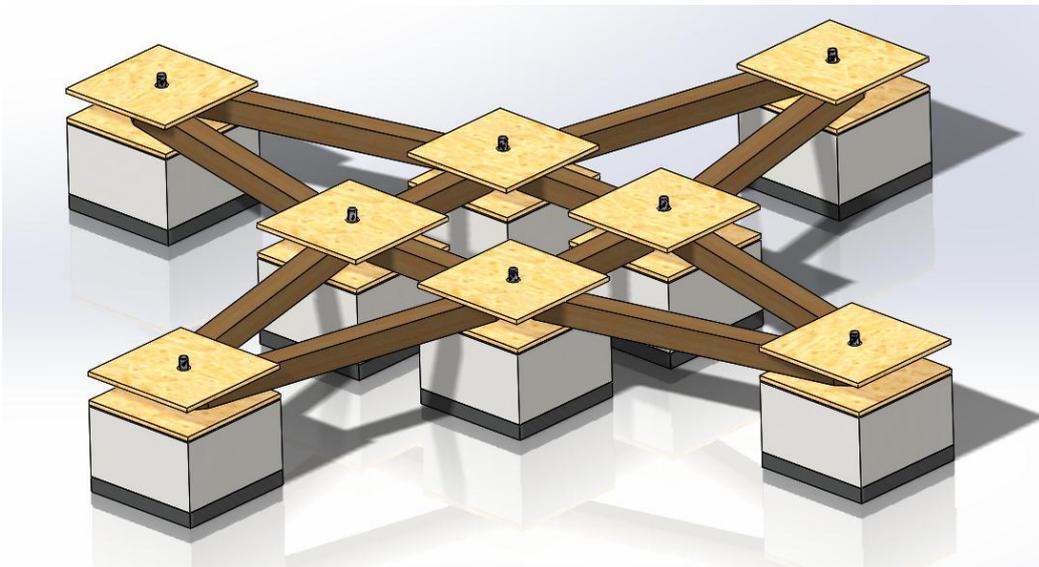


Figura 31 : Sistema de anclaje completo

IV. Características técnicas de la turbina

Dimensiones:

- Altura: 2,5 m
- Diámetro del rotor: 2 m
- Área de barrido: 5 m²
- Peso: 150 kg (con exclusión del anclaje de hormigón y madera)

- Materiales: lino textil (rotor), aluminio (estructura), acero (mecánica), madera y hormigón (anclaje)

Características técnicas:

- Potencia nominal: 1 kWh
- Velocidad del viento nominal: 17 m / s
- Velocidad de arranque: 5 m / s
- Velocidad de frenado: 25 m / s

Información adicional:

- La producción anual: 2000 h
- Vida útil: 10 años
- Frecuencia de mantenimiento: una vez al año (aceite de actualizar, tuercas de apriete, la verificación de la estructura)

Equipo eléctrico:

- Sensor de velocidad, anemómetro
- Generador
- Rectificador / MPPT
- Inversor
- Baterías
- Regulador de carga
- Convertidor DC/DC

CAPÍTULO 6. Estudio de implantación de la turbina

I. Estudio del viento

Al tratarse de una turbina destinada al medio urbano, es muy interesante realizar un estudio del viento, con el objetivo de encontrar la posición más favorable para la turbina.

En primer lugar, es necesario obtener una estimación de la velocidad y dirección del viento predominante en la zona donde se desea implantar el proyecto. La brújula que se observa en la Figura 32 se puede encontrar en la dirección web: <https://fr.windfinder.com/>, en ella están disponibles gratuitamente muchas estaciones y los datos del viento durante todo el año.

Los vientos dominantes son, en general, desde el Sur-Oeste en el Cambrai y Valenciennes.

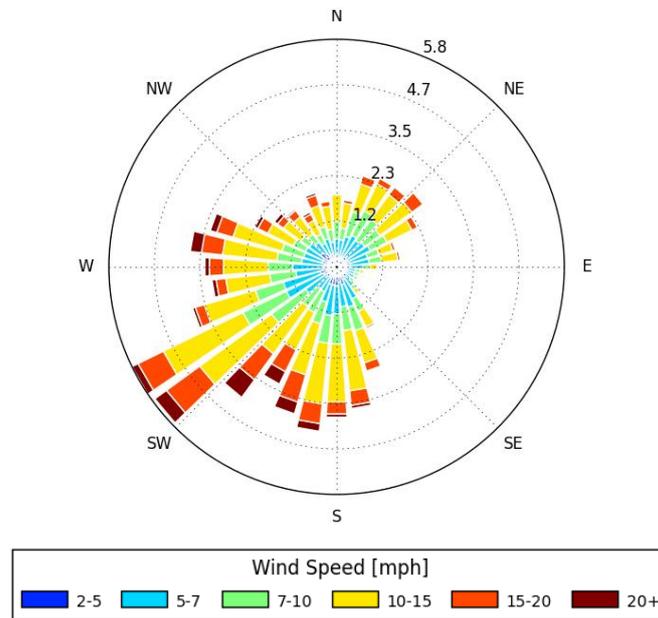


Figura 32 : Detalle del viento de la zona de implantación

Como sugiere la brújula, el viento del suroeste es considerado claramente el más favorable con el fin de posicionar las turbinas de los lugares más sensibles, con el fin de obtener el mejor rendimiento posible.

El modelado de este proyecto se realiza con Autodesk Ecotect Analysis, un software para modelar proyectos en 3D y realizar más adelante análisis ambientales a través de los programas pertinentes.

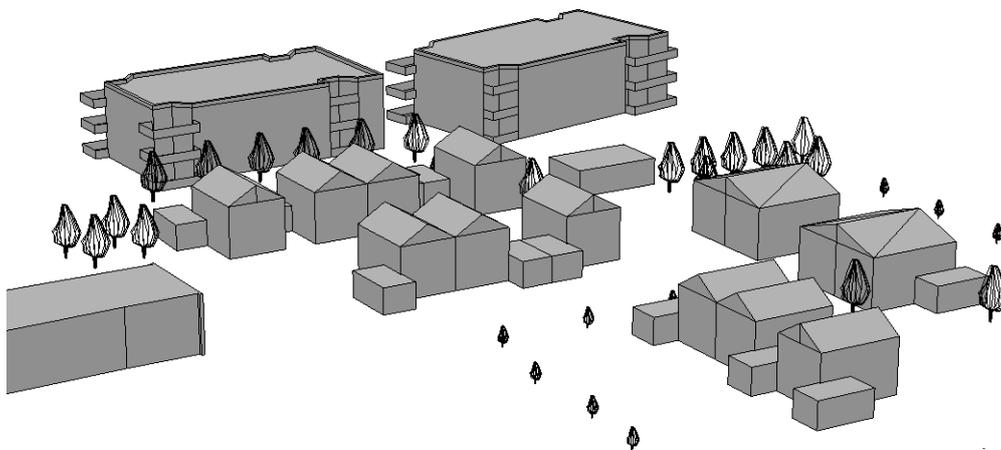


Figura 33 : Modelo 3D Autodesk Ecotect Analysis del entorno

Una vez completado el modelado 3D de Autodesk Ecotec Analysis y recopilada la información del viento, los cálculos se realizan con el programa Winair4 para la CFD (Computational Fluid Dynamics).

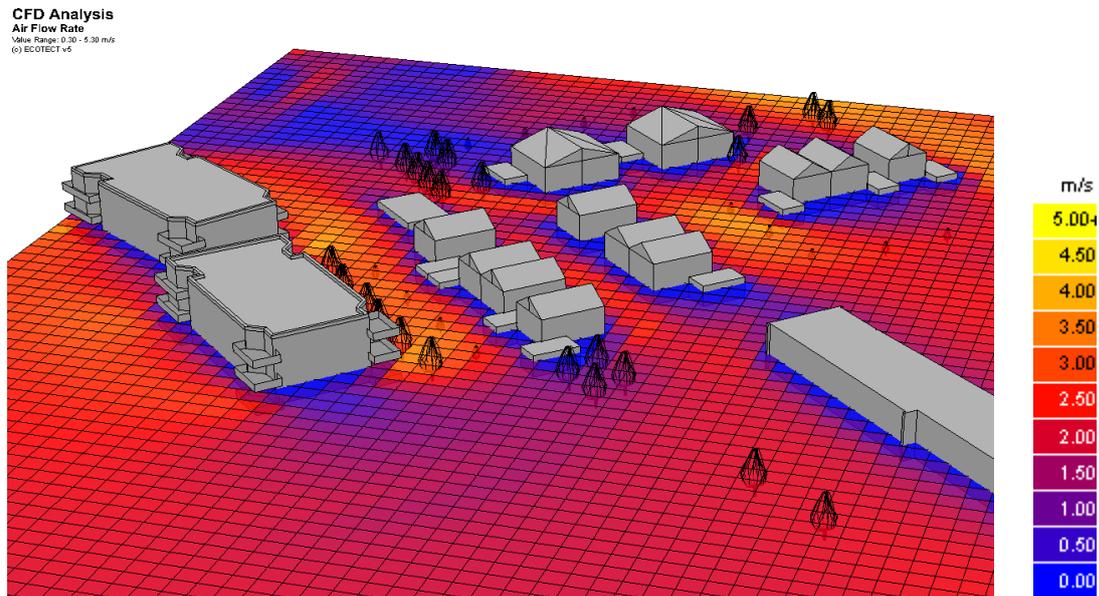


Figura 34 : Modelo 3D y estudio de viento a una altura de 2m del suelo

Por motivos de seguridad, se ha decidido colocar la turbina en lo alto de un edificio. El principal motivo es la restricción al perímetro circundante de cualquier persona. El estudio de viento permite identificar fundamentalmente la posición ideal de la turbina eólica en uno de los tejados de los dos edificios.

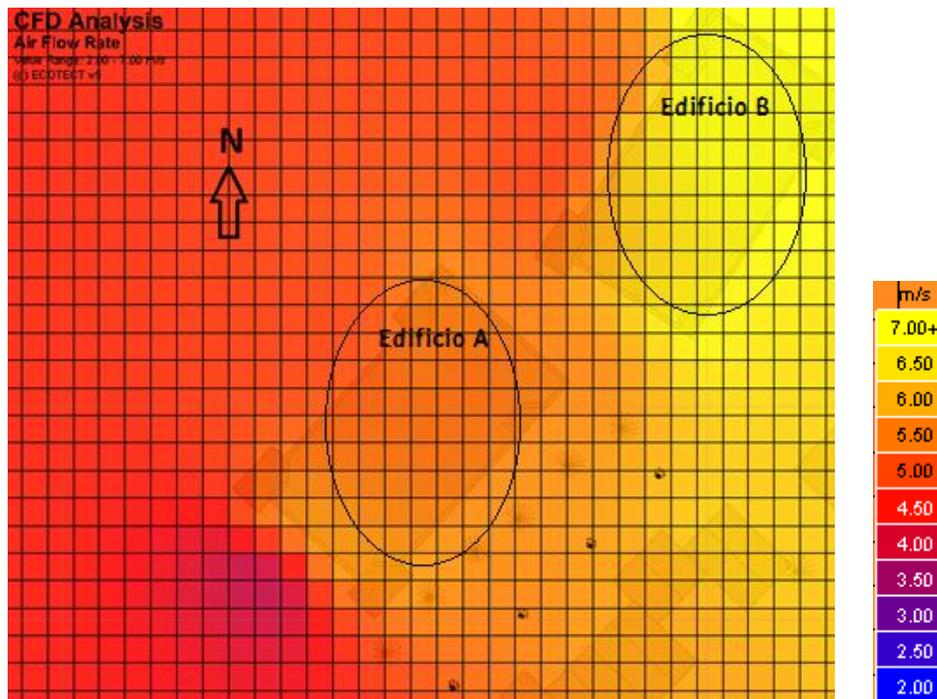


Figura 35 : Estudio de viento a 11m de altura

Dichos edificios tienen una altura de 8,82 m contando los 0,45 m de los parapetos del techo. La base de la turbina eólica descansa a una altura de 8,37 m del suelo. Sumado la altura de la turbina, se ha decidido realizar el estudio de viento a 11 metros de altura respecto del suelo para ilustrar con bastante precisión el posicionamiento ideal de la turbina.

En la Figura 36 se puede apreciar la posición más favorable se encuentra en el edificio por su mayor potencial de viento. La superficie superior de este edificio alcanza con vientos superiores a 7 m/s.

A continuación se muestra con mayor precisión y visibilidad la posición con mayor potencial donde se instalará definitivamente la turbina en el edificio B.

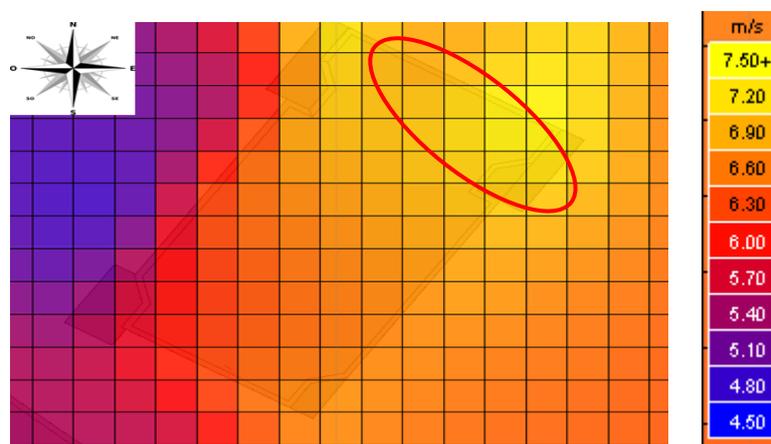


Figura 36 : Detalle de máximo potencial de viento

II. Industrialización

De cara a la industrialización de la turbina, es necesario de estandarizar decisiones técnicas, reducir los costes de fabricación y conocer las materias primas necesarias de antemano, una clasificación claramente distribuida es indispensable.

Como se ha visto anteriormente, se ha procedido a una división en subsistemas para simplificar el estudio. Esta división se representa por una clasificación en forma de árbol que es el marco esencial del informe de fabricación (Anexo II). Dicho informe permite hacer un balance de materias primas, piezas y mano de obra necesarios para construir una turbina eólica; permitiendo agilizar las compras y los costos relacionados.

Por otra parte, en cada nivel de la de esta clasificación, se encuentra la acción asociada que conlleva y con la que se puede organizar más claramente el trabajo.

- **La acción “Compra”:** Como su propio nombre indica, incluye todas las compras de materiales, elementos de construcción y equipos, realizadas directamente en el mercado. En el caso de las materias primas está condicionada a la compra de una

determinada cantidad (al metro, a la barra unitaria, etc.) de ahí la importancia de hacer un balance de las necesidades.

A las acciones de compra se les añade, en la clasificación, las cantidades necesarias, proveedores y referencias de productos.

- **La acción “Corte”:** representa todos los elementos implementados a partir de materias primas que se han de trabajar en un taller. Ejemplo: viga de madera bruta, que se corta a la medida.

Cada acción está asociada con una orden de fabricación, con un plan y/o un procedimiento que describe el trabajo a realizar.

- **La acción de “Mecanizado”:** Se trata de todas las partes necesarias para la construcción de la turbina que no pueden ser compradas en el mercado, por lo tanto deben ser subcontratadas a empresas de fabricación. Ejemplo: el alojamiento del cojinete ha de ser fabricado por una entidad subcontratada.

En esta acción se adjuntan especificaciones, con un plan y un resumen de los requisitos previstos (materiales, control de calidad, gama de fabricación...)

- **La acción “Montaje”:** Representa las fases de montaje de los diversos subsistemas. Ejemplo: el montaje del chasis superior.

A cada fase del montaje está asociada una clasificación propia al subsistema referido con un procedimiento de montaje, si es necesario.

PARTE II: IMPACTO AMBIENTAL

Este proyecto surge debido a la fuerte iniciativa tomada por la startup francesa Unéole de impulsar la denominada Tercera Revolución Industrial. La búsqueda del progreso y desarrollo de las nuevas tecnologías acompañada de la buena gestión de los recursos naturales. Es decir, un desarrollo sostenible a todos los niveles.

No se busca únicamente la concienciación de que esta máxima es primordial, sino el apoyo y cooperación de las diversas entidades relacionadas, en este caso, con el campo de la generación eléctrica para alcanzar objetivos comunes.

La idea ha sido secundada por numerosas empresas energéticas internacionales de gran influencia como Eiffage Energie, quien pretende subvencionar el proyecto y aplicarlo a sus proyectos, concretamente a la que se denominaría la Eco-Box. La Eco-Box consiste en una caja de obra transportable utilizada por Eiffage Energie para cargar con la maquinaria necesaria y las tomas de corriente oportunas a las obras aisladas. Dicha Eco-Box funcionaría como un sistema híbrido, con una turbina eólica sobre la estructura que acumularía la energía en unas baterías y con un alternador en el interior.

El estudio desarrollado en este proyecto está enfocado a numerosas aplicaciones debido a su simplicidad en la instalación, coste reducido y rentabilidad. La principal y para la que está pensada es para la implantación sobre el techo de los edificios en cualquier zona urbana.

PARTE III: ANEJOS

Anejo I. Catálogos

I. Catálogo Imanes de Nedominio

Technical specifications

Weight	5,233 g / Stück
Volume	689 mm ³
Total width B	4,5 mm
Total height H	3 mm
Total length L	51 mm
Direction of magnetization	axial
Coating	Nickel (Ni-Cu-Ni)
Maximum temperature	80 °C
Magnetization grade	N40
Tolerance	± 0,1 mm
Material	Neodym



Quantity	Unit price
From 20	€0.55 *
From 60	€0.47 *
From 140	€0.44 *
From 300	€0.39 *
From 600	request a quote!

Technical specifications for magnetization grade N40

Material	Remanence		Coercivity				Energy product		Maximum temperature
	Br		bHc	iHc		(BxH)max			
	kG	T	kOe	kA/m	kOe	kA/m	MGOe	kJ/m ₃	°C
N40	12.6-12.9	1.26-1.29	10.5-12.0	860-955	≥ 12	≥ 955	38-40	303-318	≤ 80

II. Catálogo Cobre

Fils nus

Fil de cuivre (Fils nus) d'un diamètre de 2.24 mm dont la résistance est de 0.004 Ω /mètre. Ce type de bobine permet d'avoir une longueur de fil de 26 mètres et un poids de 900g.

Disponibilité : **En stock**

Ø du fil dénudé : **2.24 mm**

Résistance : **0.004 Ω /m**

Longueur : **26 m**

Poids : **900g**

60,00 €

50,00 € HT

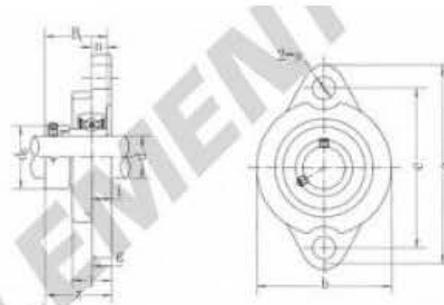
 Ajouter

Ø du fil dénudé (en mm)	Résistance (en Ω / m)	Longueur (en m)	Poids (en g)	Prix TTC
2.24 mm	0.004 Ω / m	3 m	100 g	20,00 €
2.24 mm	0.004 Ω / m	9 m	300 g	30,00 €
2.24 mm	0.004 Ω / m	26 m	900 g	60,00 €

III. Catálogo Cojinetes



[Click to view the big picture](#)



[Click to view the big picture](#)

[Request a quote](#)

[Silver Series Series](#)

Unit NO.	Dimensions mm in.										Z	B1	n	d5	Bearing No.	Weight(g)	Bolt Size mm	Housing No.
	d	a	e	i	g	l	s	b										
UFL001	12	63	48	5.5	5.5	11.5	7	38	19	17.5	4	19	U001	70	M6	FL001		

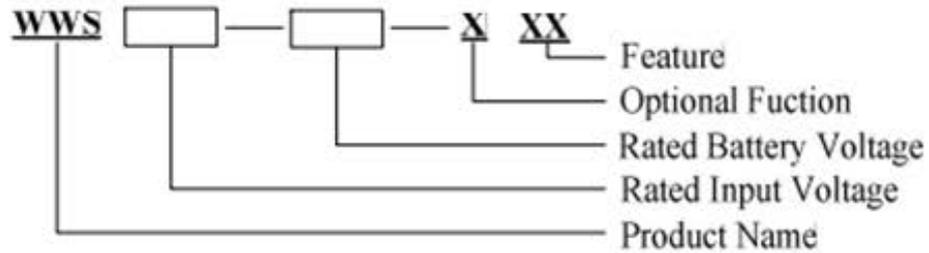
Info produit

- Catégorie: **Palier inox**
- Qualité: **Générique**
- Marque: **Générique**
- Fixation: **2**
- Type serrage: **Bague de blocage excentrique**
- Taille de l'arbre: **12 mm**
- Entraxe de fixation: **48 mm**
- Poids: **0.083 kg**
- N° EA V13: **3663952156521**

Produit	▼ Marque ▲	Dimensions	▼ Prix ▲
Palier inox UCF210-INOX Acier inoxydable		50 mm	119.95 € T.T.C.
Palier inox UFL004-INOX Acier inoxydable		20 mm	35.90 € T.T.C.
Palier inox UFL001-INOX Acier inoxydable		12 mm	29.95 € T.T.C.
Palier inox UCP205-INOX Acier inoxydable		25 mm	39.95 € T.T.C.

IV. Catálogo Rectificador

Model Specification



Product Name		Rated Input Power		Rated Battery Voltage		Optional Function		Feature	
WWS	Wind solar hybrid controller	06	0.6 kW	24	24V	N	Normal	00	Normal
		10	1kW	48	48V	L	Low Voltage Charge	01	RS232
		20	2kW	96	96V	D	Buck oltage Charge	02	RS485
		30	3kW	120	120V	B	Economic	04	Solar Dumpload Separately
		50	5kW	220	220V	S	Micro-current Charge	10	Wind Turbine Single Phase DC
		100	10kW	240	240V			11	RS232 Wind Turbine Single Phase DC, RS232
		200	20kW					12	RS485 Wind Turbine Single Phase DC, RS232
								XX	Other

Remark: Micro-current Charge Function is only available for system no more than 3kW Power running with Battery Banks no more than 48V.

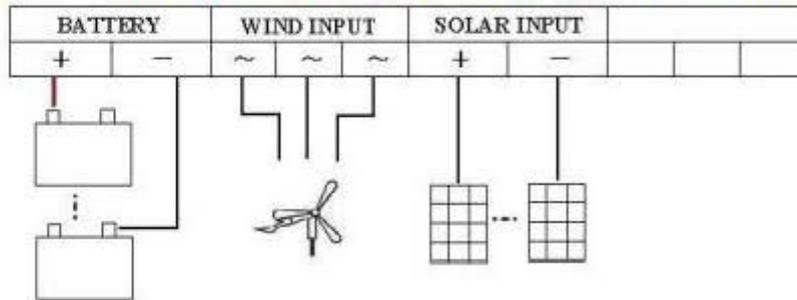
E.G.: WWS20-48-L01 Rated Output Power: 2kW

Rated Battery Voltage: 48V

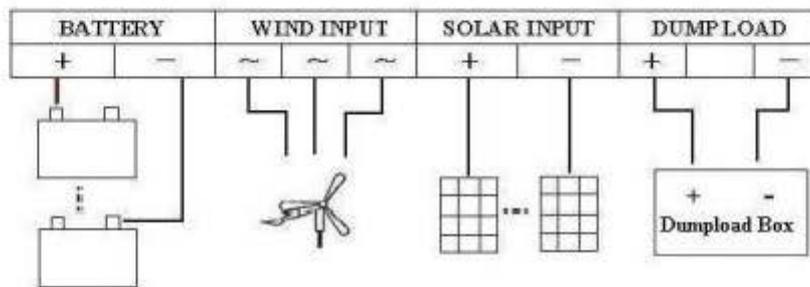
With Low Voltage Charge and RS232 communication function

Installation Flow

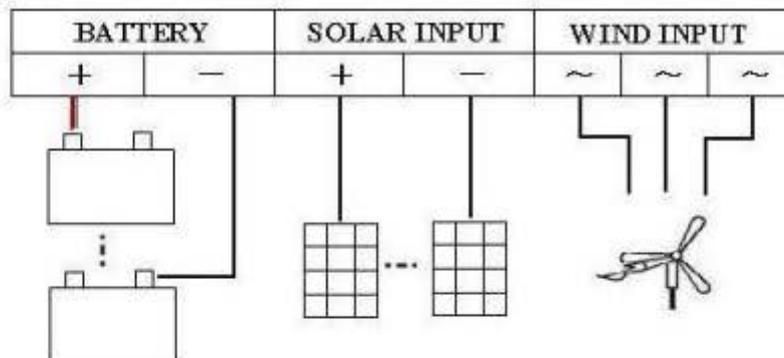
Remark: Users should connect according to the following corresponding connection:



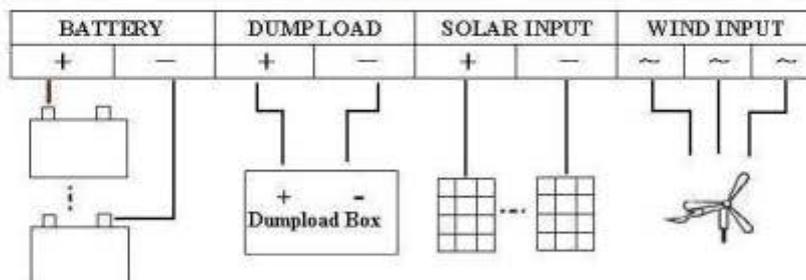
PIC A



PIC B



PIC C



Technical Data

Parameters		WWS06-48-B	WWS10-48-B	WWS10	
Rated Battery Voltage (V) (V_B)		48		24	48
Rated Wind Power (kW) P_W		0.6	1	1	1
Dimensions (L ×W ×H) (mm)		205×150×82		424×423×170	
Low Voltage Charge Function	Admittance Value (Factory Default)	5/60	/	10/15	10/60
	Wind Turbine Start Charge Voltage (Factory Default) (V)	8	/	4	8
	Dimensions (L ×W ×H) (mm)	220×150×82	/	423×305×170	

V. Catálogo Rodamientos

Roulement à billes

2204-E-2RS1-TN9-SKF

Prix: 45.40 € T.T.C.



Roulement à billes - 2204-E-2RS1-TN9-SKF

- Catégorie: **Roulement à billes**
- Diamètre intérieur: **20.00 mm**
- Poids: **0.144 kg**
- Qualité: **Haut de gamme**
- Diamètre extérieur: **47.00 mm**
- N° EAN13: **3663952217321**
- Marque: **SKF**
- Epaisseur: **18.00 mm**



Roulement conique

30204

Prix: 3.29 € T.T.C.



Roulement conique - 30204

- Catégorie: **Roulement conique**
- Diamètre intérieur: **20.00 mm**
- Poids: **0.125 kg**
- Qualité: **Générique**
- Diamètre extérieur: **47.00 mm**
- N° EAN13: **3663952084947**
- Marque: **Générique**
- Epaisseur: **15.00 mm**



Roulement conique
32004

Prix: 8.95 € T.T.C.



- Catégorie: **Roulement conique**
- Diamètre intérieur: **20.00 mm**
- Poids: **0.093 kg**

- Qualité: **Générique**
- Diamètre extérieur: **42.00 mm**
- N° EAN13: **3663952001647**

- Marque: **Générique**
- Epaisseur: **15.00 mm**

Anejo II. Clasificación

CLASIFICACIÓN				ACCIÓN ASOCIADA	
Turbina completa					
└─	1	Anclaje		Montaje	
	└─	8	Bloques de hormigón	Montaje	
		└─	1	Losa Vibromat 400x400	Compra
		└─	1	Armadura metálica	Compra
		└─	1	Barras estiramiento M24 x 250	Corte
			└─	250mm Barra estira M24	Compra
		└─	1	Bloque de hormigón ligado	Corte
			└─	12 kg cemento	Compra
			└─	30 kg arena	Compra
			└─	42 kg gravilla	Compra
			└─	6 L agua	
	└─	16	Soporte contrachapado	Corte	
			└─	400mm Contrachapado náutico 1200x1200x10	Compra
	└─	8	Viga 1200	Corte	
			└─	1200m Viga abeto 80x80x2400	Compra
	└─	4	Viga 600mm	Corte	
			└─	600mm Viga abeto 80x80x2400	Compra
	└─	8	Arandela M24	Compra	
	└─	8	Tuerca M24	Compra	

	10 0	Tirafondo madera		Compra
	1	Cuerpo de sujeción inferior		
	2	Cara lateral soldada		Mecanizado
	4	Traviesa		Corte
			2000 mm Tubo cuadrado 30x30	Compra
	4	Escuadra de anclaje 40		Corte
			40mm Codo metálico 120x120x10	Compra
	4	Escuadra de fijación 30		
			30mm Codo metálico 120x120x10	Compra
	1	Placa de soporte del generador		Corte
			Placa de contraplacado	
	1	Cárter alto		Mecanizado
	1	Acoplamiento del cuerpo inferior		Montaje
	1	Unión de los rodamientos inferiores		Montaje
			1 Eje de tracción	Mecanizado
			1 Rodamiento XXX	Compra
			1 Rodamiento YYY	Compra
			1 Cárter rodamiento inferior	Mecanizado
			1 Cubierta superior	Mecanizado
			1 Arandela hermética	Compra
	1	Acoplamiento adaptable		Compra

└──	1	Generador	Compra
└──	1	Rotor	Montaje
└──	2	Palas	Montaje
└──	4	Elementos de pala	Mecanizado
└──	12	Clavijas	Compra
└──	400 g	Cola compuesta	Compra
└──	6	Plaqueta de fijación	Mecanizado
└──	2	Platos	Mecanizado
└──	400 g	Cola compuesta	Compra
└──	16	Clavijas	Compra
└──	1	Acoplamiento cuerpo superior	Montaje
└──	1	Unión rodamiento alto	Montaje
└──	1	Cárter rodamiento alto	Mecanizado
└──	1	Rodamiento SKF 2204 E-2RS1TN9	Compra
└──	3	Tornillo M8 CHC 14	Compra
└──	2	Arandela M8 estrecha	Compra
└──	1	Arandela M8 ancha	Compra
└──	1	Eje superior regulable	Mecanizado
└──	2	Brida de sujeción	Mecanizado
└──	3	Tuerca mellada SKF KM5	Compra
└──	2	Arandela de freno SKF MB5	Compra
└──	4	Tuerca	Compra

	1	Cuerpo superior			Montaje
	4	Viga vertical			Corte
			3000m	Perfil ALU 40x80	Compra
			m		
	1	Viga horizontal larga			Corte
			3000m	Perfil ALU 40x80	Compra
			m		
	2	Viga horizontal larga			Corte
			1500m	Perfil ALU 40x80	Compra
			m		
	8	Escuadra de fijación 80			Corte
			80mm	Codo metálico ALU 120x120x10	Compra
	4	Escuadra de fijación 40			Corte
			40mm	Codo metálico ALU 120x120x10	Compra
	4	Escuadra de fijación 80			Corte
			80mm	Codo metálico ALU 120x120x10	Compra
	1	Placa tensora			Corte
			500mm	Placa ALU 160x10	Compra
	2	Fijación tensora			Corte
			120mm	Placa ALU 160x10	Compra
	1	Electrónica de potencia			Montaje
	1	Regulador MPPT			Compra
	1	Inversor			Compra
	1	Cable conexión trifásico + tierra			Corte
			30m	Tubo 50m cable conexión trifásico + tierra	Compra

Anejo III. Resumen de los resultados del generador

En las tablas siguientes se recogen todos los resultados obtenidos:

Dimensiones principales del generador		
Pn	Potencia mecánica nominal	1500 W
N	Velocidad nominal	350 rpm
Un	Tensión nominal	48 V
η	Rendimiento nominal	0,4
Cn	Par nominal	40,93 Nm
Sn	Potencia aparente nominal	1260 VA
In	Intensidad nominal	15,70 A
cos φ	Factor de potencia	1
f	Frecuencia del generador	50 Hz
P	Número de pares de polos	9 pares de polos
m	Número de fases	3 fases
C	Factor de utilización	0,2
Da	Diámetro de entrehierro	0,090 m
Lf	Longitud de hierro	0,091 m
τ_p	Paso polar	0,0157 m
em	Entrehierro mecánico	0,0045 m
ef	Entrehierro de la greca	0,002 m
e	Entrehierro	0,00245 m
v	Velocidad periférica	1,65 m/s
V	Tensión simple	44,44 V
Eo	Tensión simple de vacío en el entrehierro	53,32 V

Bobinado del estator		
τ_s	Paso entre los dientes	0,005236 m
Q_s	Número de ranuras	54 ranuras
q	Número de ranuras por polo y por fase	1 ranura por polo y por fase
k_s	Coefficiente de bobinado	1
k_z	Coefficiente de distribución	1
k_r	Coefficiente de acortamiento	1
c	Paso acortado	3
n_s	Número de espiras	171
E_c	Tensión simple en el entrehierro	27,71 V
φ	Flujo magnético de un polo	0,000728
n_c	Número de conductores por ranura	19 conductores / ranura
a	Número de circuitos paralelos	1 circuito
δ	Densidad de corriente	4,66A / mm ²
S_{cuN}	Sección de los conductores	3,369 mm ²
L_{cuN}	Ancho de cobre	2,24 mm
H_{cuN}	Altura de cobre	1,6 mm
l_e	Anchura de la ranura	4,54 mm
h_e	Altura de la ranura	40,27 mm
h_{bob}	Altura de una bobina aislada	19,675 mm
τ_{ent}	Paso entero (número de ranuras por polo)	3 ranuras / polo
I_{papel}	Aislamiento del papel	0,33 mm

Imasse	Aislamiento de la masa	0,24 mm
Ifinition	Espesor de acabado	0,88 mm
Iverniss	Espesor de barniz	0,22 mm
je	Área de las ranuras	0,3 mm

Campos magnéticos y diámetros del estator y el rotor		
kc	Coefficiente de Carter	1,14
Br	Inducción remanente del imán	1,3 T
Beo	Inducción de entrehierro de vacío	1,54 T
Bar	Inducción remanente ficticia del imán	1,3 T
Lur	Longitud útil del rotor	0,091 m
Lus	Longitud útil del estator	0,08554 m
Le	Longitud equivalente	0,091 m
Lys	Longitud de flujo de estator	0,031515 m
Lyr	Longitud de flujo de rotor	0,008648 m
Dr	Diámetro exterior del rotor	0,0791 m
Dr int	Diámetro interior del rotor	0,02 m
kfe	Coefficiente de expansión	0,94
hys	Altura de la armadura del estator	0,01003 m
hyr	Altura de la armadura del rotor	0,02955 m
Bcs	Inducción máxima en la culata del estator	0,42426 T
Bcr	Inducción máxima en la armadura del rotor	0,13536 T
Dp	Diámetro en lo alto del diente de estator	0,17054 m
Dm	Diámetro en el medio del diente de estator	0,13027 m

Dal	Diámetro en el bajo del diente de estator	0,090 m
Tosp	Paso entre dientes en el alto	9,922 mm
Tosm	Paso entre dientes en el medio	7,579 mm
Tost	Paso entre dientes en el bajo	5,236 mm
bp	Anchura del diente en el alto	6,945 mm
bm	Anchura del diente en el medio	5,305 mm
bt	Anchura del diente en el bajo	3,665 mm
Bp	Inducción en el alto del diente	0,561 t
Bm	Inducción en el medio del diente	0,735 t
Bt	Inducción en el bajo del diente	1,064 t
Be	Inducción del entrehierro	0,7 T
ATE	Consumo de Amperios·revolución en el entrehierro	9900,531 A.tr
Hp	Campo magnético en el alto del diente	150,54 A / m
Hm	Campo magnético en el medio del diente	198,18 A / m
Ht	Campo magnético en el bajo del diente	333,94 A / m
Hcs	Campo magnético en la culata del estator	116,67 A / m
Hcr	Campo magnético en la armadura del rotor	32,225 A / m
Hdmoy	Campo magnético en el hierro	212,87 A / m
ATFS	Consumo de Amperios·revolución en los dientes	8,572 A.tr
ATFC	Consumo de Amperios·revolución en la culata	3,677 A.tr
ATFA	Consumo de Amperios·revolución en la armadura	0,3219 A.tr
ΣATF	Consumo total de amperios·revolución	21,143 A.tr

Impedancias del generador		
Xs	Impedancia de dispersión del estator	2,012 Ω
Xe	Impedancia de de dispersión de ranura	1,959 Ω
Xtb	Impedancia de dispersión cabezas de bobinado	0,0112 Ω
Xtd	Impedancia de dispersión cabezas de dientes	0,0415 Ω
λ_e	Coefficiente de permeabilidad de ranura	8,928
λ_{tb}	Coefficiente de permeabilidad de cabezas de bobinado	5,47 x 10 ⁻⁹
λ_{td}	Coefficiente de permeabilidad de cabezas de dientes	0,1889
K1	Primer coeficiente de reducción	1
K2	Segundo coeficiente de reducción	1
x	Desbordamiento en el fondo de la ranura	0 mm
h	Constante	7,702 mm
cm	Paso total de la bobina	15,708 mm
AB	Constante	11 mm
lsmoy	Constante	91 mm
Xd	Reactancia síncrona	2,1802 Ω
Xad	Reactancia de magnetización	0,1684 Ω
λ_{ad}	Permeabilidad al magnetización	0,7676
Rm	Resistencia equivalente de los imanes	89109439,78 Ω
Rs	Resistencia del estator	0,226 Ω

Dimensiones y número de imanes		
Dext imán	Diámetro exterior del imán	0,0891 m

Dint imán	Diámetro interior del imán	0,0791 m
ap	Ancho del imán	0,0045 m
ha	Altura del imán	0,003 m
lg imán	Longitud del imán	0,051 m
n imanes	Número de imanes	36 imanes
Nb imanes / polo	Número de imanes por polo	2 imanes / polos
ρ_m	Resistividad del imán	0,0000015 $\Omega \cdot m$

Corriente de cortocircuito y longitud de la espira		
Icc	Corriente de cortocircuito	24,32 A
Ltc	Longitud total de los conductores	38,646 m
Lspm	Longitud media de la espira	0,226 m
As	Carga líneal de corriente	56959,17 A / m
α	Índice de rizado de la corriente de pico a pico	0,05
To	Constante de tiempo en el eje q del generador	0,0306 s
Tl	Constante de tiempo del eje d del generador	$7,1862 \times 10^{-11}$ s

Pérdidas del generador		
Pj	Pérdidas por efecto Joule	167,38 W
Pfer	Pérdidas de hierro	71,58 W
Pmeca	Pérdidas mecánicas	0,2228 W

Paim	Pérdidas por efecto Joule en los imanes	0,108 W
Psup	Pérdidas adicionales	7,5 W
Σ pertes	Pérdidas totales	246,79 W
Pfd	Pérdidas de hierro en los dientes	32,64 W
Pfcs	Pérdidas de hierro en la culata	38,94 W
Xmd	Masa de los dientes	7,747 kg
Xmc	Masa de la culata	3,82 kg

PARTE IV: REFERENCIAS

- [JAVI02] Sanz Feito, Javier, “Máquinas eléctricas”, 2002
- [JEAN13] Fanchon, Jean Louis, « Le guide des sciences industrielles et technologiques », 2013
- [PIER15] Bourahla, Pierre-Alexandre; Caffiers, Ophélie; Caron, Oliver; Cretté, Marie; Golhen, Camille; Pinon, Anne-Claire; « Étude de l’installation d’une éolienne urbaine – contraintes et solutions techniques », 2015
- [SYLV14] Dessin, Sylvain ; Merlo, Clément; Poulain, Ludivine; Vignes, Lancelot; Derely, Jacques ; Matthieu, Lemailloux ; « Réalisation d’un prototype d’éolienne urbaine à axe verticale », 2014
- [TECH] Techniques de l’ingénieur – L’expertise technique et scientifique de référence, www.techniques-ingenieur.fr

PARTE V: PRESUPUESTO

Presupuesto del Generador

A continuación se pretende establecer un estudio del coste aproximado que supone la fabricación del prototipo de generador de la turbina.

Se ha desarrollado un archivo Excel asociado que realiza los cálculos del diseño que además del dimensionamiento efectúa una aproximación de los precios. Por lo tanto, cambiando los valores de entrada que se deseen se puede saber si el coste resultante es rentable para la empresa Unéole en comparación a las ventajas que presenta.

- Materiales:

El coste de la materia prima asciende a 213,4€.

A continuación se muestra un desglose de los materiales empleados, así como de su coste final.

➤ Acero al silicio

Tanto el estator como el rotor están hechos de acero al silicio laminado. Tomando el valor de su densidad de $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$ y suponiendo un coste de 3€/kg, el coste total se muestra en la tabla siguiente:

	<i>Rotor</i>	<i>Estator</i>
<i>Masa</i>	3,5 kg	6 kg
<i>Coste</i>	10,5 €	18 €

➤ Acero convencional

La carcasa, el eje y los nervios están compuestos de acero convencional, ya que no son necesarias propiedades tan altamente desarrolladas como las del acero de silicio y es mucho más económico: 1€/kg.

	<i>Eje</i>	<i>Nervios</i>	<i>Carcasa</i>
<i>Masa</i>	3 kg	2 kg	7 kg
<i>Coste</i>	3 €	2 €	7 €

➤ Cobre

La longitud total que se obtiene de Los devanados del estator es de unos 39 metros. Según los datos del proveedor FILS NUS, el coste total asciende a 90€.

➤ Imanes

El coste total de los imanes de neodimio se calcula en función de la cantidad que sea necesaria. En este caso, siendo un total de 36 imanes, el coste total aproximado según el proveedor es de 20€.

➤ Cojinetes

Los cojinetes son piezas de necesaria calidad, ya que siguen el giro del eje y es su conexión directa con el resto de la estructura. El precio aproximado es de 30€.

➤ Ventilador

Se trata de un ventilador de plástico simple que funcionará accionado por el giro del generador. El coste es de 5€.

➤ Materiales auxiliares

Además de los materiales principales aquí detallados, serán necesarios muchos otros de soporte o ayuda como tornillos, tuercas, plásticos, etc. Se suponen de un 15% de los materiales principales detallados anteriormente (185,5€). Lo que resulta de un total de 28,8€.

• Costes adicionales

Por otra parte, los servicios adicionales necesarios ascienden a 580€. Como se muestra a continuación.

➤ Operarios

La mano de obra de los operarios se estima, según la información recogida por varias empresas, en torno a los 400€.

➤ Diseño

Para un correcto montaje de los elementos que componen el generador, es necesario un diseño del producto despiezado de cara al ensamblaje final. El coste, al no tratarse de un gran número de piezas, ni una gran complejidad, no será muy elevado; aproximadamente 180€.

A continuación se presenta una tabla que recoge los precios estimados resultantes:

Coste total	794,3 €
<i>Acero convencional</i>	12 €
<i>Acero de silicio laminado</i>	28,5 €
<i>Imanes</i>	20 €
<i>Cobre</i>	90 €
<i>Cojinetes</i>	30 €
<i>Ventilador</i>	5 €
<i>Materiales auxiliares</i>	28,8 €
<i>Operarios</i>	400 €
<i>Diseño</i>	180 €

El coste total de fabricación del generador se estima en 794,3 €. Este precio es muy conveniente debido a las características que ofrece y a la calidad de los materiales asociados. Satisfaciendo las características técnicas de la turbina eólica y teniendo en cuenta los precios de los generadores ya fabricados, un coste de 800 € por un generador a medida es claramente viable y rentable.