



# GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS DE INDUSTRIALES

## TRABAJO FIN DE GRADO DISEÑO DE UN GENERADOR SÍNCRONO DE IMANES PERMANENTES PARA UN AEROGENERADOR MARINO

Autor: Paula Barragán Pomar

Director: Juan Antonio Talavera Martín

Madrid

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título  
Diseño de un generador síncrono de imanes permanentes para un aerogenerador marino

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el

curso académico 2020/2021 es de mi autoría, original e inédito y

no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido

tomada de otros documentos está debidamente referenciada.

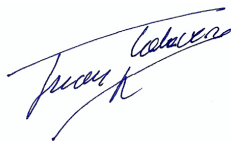


Fdo.: Paula Barragán Pomar

Fecha: 25/ 08/ 2021

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Juan Antonio Talavera Martín

Fecha: 25/ 08/ 2021





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

### ***1º. Declaración de la autoría y acreditación de la misma.***

El autor D. Paula Barragán Pomar

DECLARA ser el titular de los derechos de propiedad intelectual de la obra: Diseño de un generador síncrono de imanes permanentes para un aerogenerador marino, que ésta es una obra original, y que ostenta la condición de autor en el sentido que otorga la Ley de Propiedad Intelectual.

### ***2º. 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.

### ***3º. 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:

- a) 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.
- b) 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.
- c) Comunicarla, por defecto, a través de un archivo institucional abierto, accesible de modo libre y gratuito a través de internet.
- d) Cualquier otra forma de acceso (restringido, embargado, cerrado) deberá solicitarse expresamente y obedecer a causas justificadas.
- e) Asignar por defecto a estos trabajos una licencia Creative Commons.
- f) Asignar por defecto a estos trabajos un HANDLE (URL *persistente*).

### ***4º. Derechos del autor.***

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

- a) Que la Universidad identifique claramente su nombre como autor de la misma.
- b) Comunicar y dar publicidad a la obra en la versión que ceda y en otras posteriores a través de cualquier medio.
- c) Solicitar la retirada de la obra del repositorio por causa justificada.
- d) 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.

### ***5º. Deberes del autor.***

El autor se compromete a:

- 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.
- b) Garantizar que el contenido de las obras no atenta contra los derechos al honor, a la intimidad y a la imagen de terceros.
- c) 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.

**6º. 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 25 de agosto de 2021

**ACEPTA**

Fdo.....



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



# **DISEÑO DE UN GENERADOR SÍNCRONO DE IMANES PERMANENTES PARA UN AEROGENERADOR MARINO**

**Autor: Barragán Pomar, Paula**

Director: Talavera Martín, Juan Antonio.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

## **RESUMEN DEL PROYECTO**

**Palabras clave:** Generador síncrono, eólica marina, PMSG, imanes permanentes, aerogenerador, transmisión directa.

### **1. Introducción**

La energía eólica es la energía renovable más madura y desarrollada. Genera electricidad gracias a la fuerza del viento mediante el aprovechamiento de la energía cinética producida por las corrientes de aire. Se considera una fuente de energía limpia e inagotable y no produce emisiones. En estos últimos años se ha desarrollado una nueva variante, la eólica marina, capaz de producir mayor cantidad de energía al contar con velocidades de viento mayores ya que no hay obstáculos ni barreras como pasa en tierra. Sin embargo, los costes de instalación y mantenimiento son mucho más elevados al tratarse de una tecnología todavía en desarrollo.

El mantenimiento de la energía eólica marina presenta grandes complicaciones por el difícil acceso a los aerogeneradores al estar situados lejos de la costa. Para llevar a cabo las labores de mantenimiento es necesario aparamenta y equipos especializados, resultando en un coste elevado. Esto conlleva a prescindir de la multiplicadora al ser el elemento que más condicionamiento periódico necesita y el que más pérdidas produce.

La decisión de prescindir de este elemento mecánico afecta a muchos aspectos del aerogenerador, pero con mayor repercusión en el generador, ya que, al prescindir de este elemento, ya no gira a velocidades elevadas y se mantiene a la velocidad de giro de las palas. Se ha de aumentar el par nominal para mantener la misma potencia traduciéndose en un aumento del número de pares de polos y con su consecuente aumento de tamaño. Convirtiéndose en el elemento que defina la estructura de la góndola al tener el mayor diámetro.

Debido a la necesidad de aumentar el número de pares de polos se requiere una configuración de máquina que permita inducir una tensión elevada en el estator, intentando ocupar el menor espacio posible. Para cumplir con estas condiciones se escoge, para el desarrollo del proyecto, un generador de imanes permanentes superficiales, cuyo material sea Ne-Fe-B, material más usado en la industria al poseer un campo remanente elevado y gran resistencia a la desmagnetización.

### **2. Definición del proyecto**

Se quiere diseñar un aerogenerador marino de 5 MW capaz de generar 10% de potencia adicional, siendo así, su potencia máxima de 5.5 MW. Se espera que funcione para regímenes de viento entre 5 y 30 m/s. Además de situarse a una distancia de la costa donde las profundidades del suelo marino rondan entre los 30 y 50 metros.

### 3. Descripción de la metodología del proyecto

El proyecto combina aspectos teóricos referentes al diseño de las diferentes configuraciones de los aerogeneradores existentes, y aspectos más prácticos relacionados con la construcción y comportamiento de la máquina eléctrica.

Se ha seguido la siguiente estructura de consecución de objetivos para el desarrollo del proyecto:

1. Estudio de las configuraciones, elementos y tipos de generadores existentes.
2. Obtención de los parámetros de la estructura básica del generador.
3. Simulación del circuito magnético y obtención del campo en el entrehierro.
4. Diseño en detalle de la estructura del rotor.
5. Diseño en detalle de la estructura del estator.
6. Obtención de los parámetros que caracterizan al generador.
7. Comprobación de funcionamiento y rendimiento.
8. Optimización.

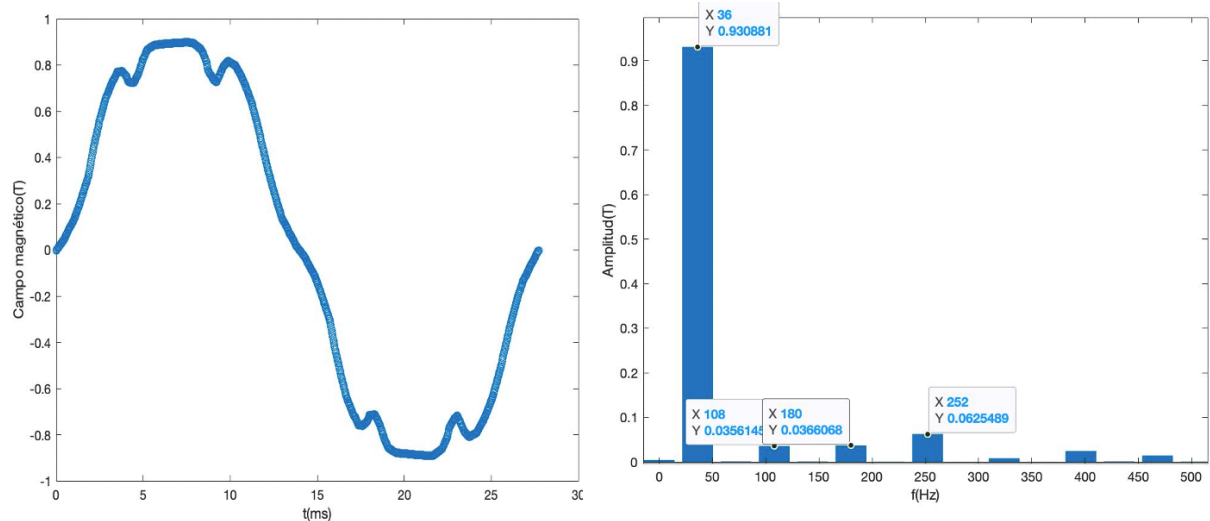
En relación con el punto dos, para realizar el diseño ha sido necesario unos datos de partida que se adjuntan en la Tabla 1:

| Magnitud             | Valor      |
|----------------------|------------|
| Potencia             | 5 MW +10 % |
| Tensión              | 690 V      |
| Velocidad nominal    | 12 rpm     |
| Longitud             | 1.3 m      |
| Diámetro entrehierro | 7 m        |
| Pares de polos       | 180        |
| Cos $\phi$           | 0.9        |

*Tabla 1: Datos preliminares*

También se obtendrán las dimensiones características tanto de las ranuras como de los imanes y los yugos rotórico y estatórico. Así mismo, se calculará la longitud de entrehierro 6 mm, que se toma como el 0.86% del diámetro, siendo este de 7 metros.

La simulación del circuito magnético se realizará mediante dos procedimientos, uno analítico y otro mediante simulación a través del programa FEMM, Finite Element Method Magnetics. Con este último, se obtendrá la distribución del campo en el entrehierro y con la transformada de Fourier, a través de Matlab, se descompondrá la onda en los diferentes armónicos que la forman, ver Ilustración 1, tomando el de primer orden para determinar la tensión inducida.



*Ilustración 1: onda campo magnético y su descomposición en armónicos*

A continuación, el proyecto se centra en el diseño con mayor detalle del rotor, donde se escoge el Acero al Silicio M 310-50 A, de espesor 0.5 mm, ya que la adición de silicio incrementa la resistividad del material reduciendo las Eddy currents y mejorando la magnetización en las curvas B-H de aceros bajos en carbono. En este apartado también se abordará el estudio los diferentes imanes que hay en el mercado donde se seleccionará el Nd-Fe-B N38, y se determinarán sus dimensiones y colocación para intentar reducir el cogging torque. Más adelante se estudiará también la posible desmagnetización de los imanes ante un cortocircuito trifásico franco.

En quinto lugar, se pasará a diseñar con detalle el estator donde se diferencian dos ramas: yugo y ranuras y, por otra parte, los devanados.

Primero se establecerán las dimensiones del yugo y de las ranuras que estarán formados por el mismo Acero al Silicio que el yugo del rotor. Se prevé que, al tener un diámetro de tan grandes dimensiones, habrá que dividir la máquina en módulos más pequeños para su fabricación.

Segundo, referente a los devanados se escogerán de doble capa y se dispondrá de una ranura por fase y por polo,  $q = 1$ . Se emplearán los devanados ondulados ya que permiten reducir la cantidad de cobre.

Por último, se diseñará para que estén conectados en triángulo para reducir el material dentro de las ranuras y se obtendrán para esta configuración el número de paralelos y series por fase.

Una vez diseñado el rotor y el estator se pasa a calcular los parámetros que caracterizan a la máquina diseñada, obteniendo las pérdidas tanto en el cobre como en el hierro y también las mecánicas, y la inductancia síncrona.

El siguiente apartado comprobará si se llegan a cumplir las especificaciones preliminares en condiciones nominales con los parámetros característicos. El resultado obtenido no será satisfactorio siendo necesario realizar cambios para optimizarlo.

Por último, se modificará la geometría de las ranuras y se realizará el proceso de simulación para obtener de nuevo el campo en el entrehierro y conseguir reducir la

inductancia síncrona para que sea capaz de generar la potencia nominal en condiciones nominales.

#### 4. Resultados

Se disminuirá la longitud de las ranuras a 74 mm para obtener una inductancia síncrona menor que permitirá cumplir con las especificaciones iniciales. En la Tabla 2 se detallan los valores nominales obtenidos.

| Magnitud          | Valor    |
|-------------------|----------|
| Potencia Aparente | 6.11 MVA |
| Potencia Activa   | 5.65 MW  |
| Tensión           | 690 V    |
| Intensidad        | 5113.1 A |
| Frecuencia        | 36 Hz    |
| Velocidad angular | 12 rpm   |
| Cos $\phi$        | 0.9256   |

Tabla 2: Placa de características

Como se puede observar el generador presenta un buen factor de potencia de 0.9256, ya que en máquinas de este tipo suele rondar entre los 0,85 y 0,95. Este factor indica la gran cantidad de potencia activa generada en comparación con la potencia aparente nominal. Sin embargo, la máquina no es capaz de magnetizar todas las inductancias por su cuenta y será necesario consumir potencia reactiva de la red.

Además, el rendimiento para la potencia de 5.5 MW se verá incrementado ya que se podrá generar esta potencia a la misma tensión, pero menor intensidad, siendo el nuevo valor del rendimiento de 95.7%.

Finalmente, se calcularán los costes de la máquina donde se distinguirán costes directos e indirectos. Costes como fabricación o mano de obra se estimarán respecto al coste total de los materiales activos, pues el precio de estos es un valor fijo y se obtiene directamente del mercado. Es por ello que la Tabla 3 resume el coste de los materiales activos:

| MATERIAL ACTIVO                | COSTE POR UNIDAD DE MASA | COSTE TOTAL  |
|--------------------------------|--------------------------|--------------|
| Acero al silicio: M 310 – 50 A | 4.5 €/kg                 | 70 256 €     |
| Imanes NdFeB: N 38             | 55 €/kg                  | 159 594.97 € |
| Cobre                          | 7.5 €/kg                 | 100 689.7 €  |
| COSTE TOTAL                    |                          | 330 540.67 € |

Tabla 3: Costes materiales activos

#### 5. Conclusiones

Este proyecto presenta un posible diseño para un generador síncrono de imanes permanentes de flujo radial de transmisión directa para un aerogenerador marino. Se quiere que pueda extraer una potencia nominal de 5MW y que sea capaz de generar un 10 % adicional, resultando en un generador de 5.5 MW.

Los devanados del estator se conectarán en triángulo a pesar de no poder eliminar los armónicos de tercer orden, ya que resulta prioritario reducir la mayor cantidad de cobre posible al ser el devanado de doble capa.

Se obtendrá un primer diseño que será optimizado para conseguir mejorar aspectos como la potencia extraída del viento, que a su vez viene acompañado de un aumento del factor de potencia y del rendimiento. Se reducirá la longitud de las ranuras para reducir la inductancia síncrona, parámetro que condiciona el comportamiento del generador.

Se obtiene como presupuesto final del generador un coste de 725 473.59 € que representa un 16% del coste total de un aerogenerador completo (góndola, palas, torre, cimentaciones, etc.), si se toma el valor más reciente para estimar el coste de unos 800 mil € el MW. De esta manera, el aerogenerador diseñado costaría en torno a 4.52 millones de euros.

## 6. Referencias

- [1] Hermann-Josef Wagner, Jyotirmay Mathur – “Introduction to Wind Energy Systems Basics, Technology and Operation”, (Green Energy and Technology),
- [2] ABB “Technical application papers number 13, Wind power plants”, 2011.
- [3] Madjid Karimirad “Offshore Energy Structure, for Wind power, Wave energy and Hybrid Marine Plataforms”, Srpinge, 2014
- [4] Olimpo Anaya-Lara, John O. Tande, Kjetil Uhlen, Karl Merz “Offshore Wind Energy Technology”, Wiley, 2018.
- [5] Dr. Duane Hanselman, “Brushless Permanent Magnet Motor Design”, 2ª Edición, Magna Physics, Orono, ME, USA, 2003.
- [6] Hui Li, Zhe Chen, Henk Polinder. “Optimization of Multibrid Permanent- Magnet Wind Generator Systems”. IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 24, no. 1. 2009.
- [7] David Meeker, “Finite Element Method Magnetics – User’s Manual”, Version 4.2, 2020
- [8] Maxime Roger Joseph Dubois. “Optimized Permanent Magnet Generator Topologies for Direct-Drive Wind Turbines”. 2004.
- [9] Miguel Ángel Rodríguez Pozueta, “Construcción de las máquinas eléctricas”, Universidad de Cantabria; departamento de ingeniería eléctrica y energética, 2010.
- [10] Ion Boldea, “The Electric Generators Handbook – Variable Speed Generators”, 2<sup>nd</sup> Edition, CRC Press, Taylor and Francis Group, Boca Raton, 2016.



# DESIGN OF A PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS GENERATOR FOR AN OFF-SHORE WIND TURBINE

**Author:** Barragán Pomar, Paula.

**Supervisor:** Talavera Martín, Juan Antonio.

**Collaborating Entity:** ICAI – Universidad Pontificia Comillas.

## ABSTRACT

**Keywords:** Synchronous Generator, off-shore, PMSG, permanent magnet, wind turbine, direct-drive

### 1. Introduction

Wind energy is the most mature and developed renewable energy. It generates electricity thanks to the power of the wind by harnessing the kinetic energy produced by air currents. It is considered a clean and inexhaustible source of energy and produces no emissions. In recent years, a new variant has been developed, offshore wind power, which is capable of producing greater amounts of energy due to higher wind speeds, as there are no obstacles or barriers, as is the case on land. However, the installation and maintenance costs are much higher as the technology is still under development.

The maintenance of offshore wind energy is very complicated due to the difficult access to the wind turbines as they are located far from the coast. To carry out maintenance work, specialized equipment and switchgear are required, resulting in high costs. This leads to the decision to dispense with the gearbox, as it is the element that requires the most periodic conditioning and produces the most losses.

The decision to dispense with this mechanical element affects many aspects of the wind turbine, but with greater repercussions on the generator, since it no longer rotates at high speeds and remains at the speed at which the blades rotate. The nominal torque has to be increased to maintain the same power, resulting in an increase in the number of pairs of poles and a consequent increase in size. This becomes the element that defines the structure of the nacelle as it has the largest diameter.

Due to the need to increase the number of pole pairs, a machine configuration is required that allows a high voltage to be induced in the stator, trying to occupy as little space as possible. To meet these conditions, a surface permanent magnet synchronous generator is chosen for the development of the project, whose material will be Ne-Fe-B, the most widely used material in industry as it has a high remanent field and great resistance to demagnetization.

### 2. Project definition

A 5 MW offshore wind turbine capable of generating 10% additional power is to be designed, with a maximum power output of 5.5 MW. It is expected to operate at wind speeds between 5 and 30 m/s. It should also be located at a distance from the coast where the depths of the sea floor are between 30 and 50 meters.

### 3. Project methodology

The project combines theoretical aspects related to the design of the different configurations of existing wind turbines, and more practical aspects related to the construction and behaviour of the electrical machine.

The following structure has been followed to achieve the objectives for the development of the project:

1. Study of the configurations, elements, and types of existing generators.
2. Obtaining the parameters of the basic structure of the generator.
3. Simulation of the magnetic circuit and obtaining the field in the air gap.
4. Detailed design of the rotor structure.
5. Detailed design of the stator structure.
6. Obtaining the parameters characterizing the generator.
7. Testing of operation and performance.
8. Optimization.

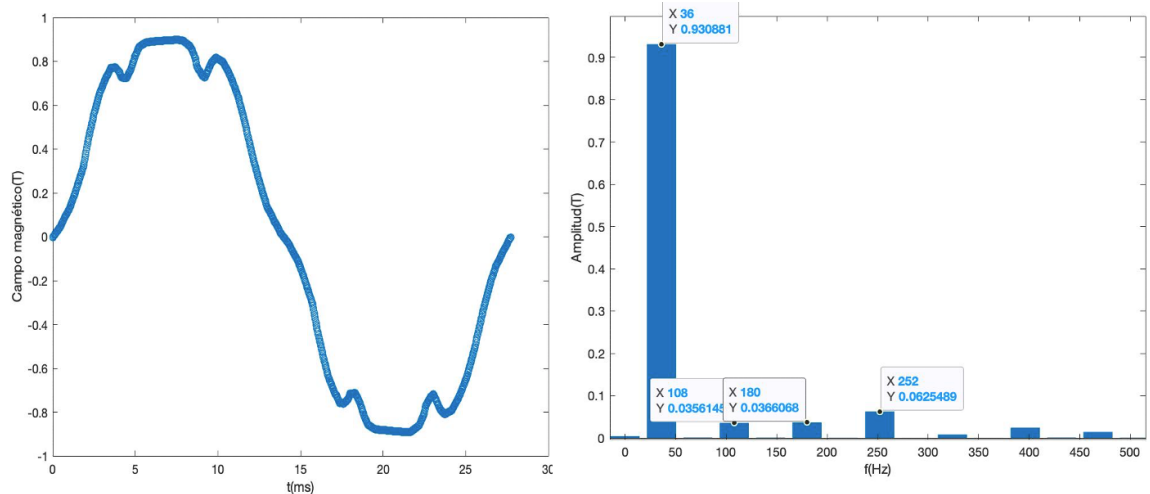
In relation to point two, in order to carry out the design, it has been necessary to obtain the initial parameters, which are shown in the following table:

| <b>Magnitude</b>             | <b>Value</b> |
|------------------------------|--------------|
| <b>Power</b>                 | 5 MW +10 %   |
| <b>Voltage</b>               | 690 V        |
| <b>Nominal Speed</b>         | 12 rpm       |
| <b>Length</b>                | 1.3 m        |
| <b>Air gap Diameter</b>      | 7 m          |
| <b>Pole pairs</b>            | 180          |
| <b>Cos <math>\phi</math></b> | 0.9          |

*Tabla 4: Initial conditions*

The characteristic dimensions of the slots, the magnets and the rotor and stator yokes will also be obtained. Likewise, the air gap length of 6 mm will be calculated, which is taken as 0.86% of the diameter, this being 7 meters.

The simulation of the magnetic circuit will be carried out by means of two procedures, one analytical and the other by means of simulation using the Finite Element Method Magnetics (FEMM) program. With the latter, the distribution of the field in the air gap will be obtained and with the Fourier transformation, through Matlab, the wave will be broken down into the different harmonics that form it, see Illustration 1, taking the first order harmonic to determine the induced voltage.



*Ilustración 2: magnetic field wave and its decomposition into harmonics*

Next, the project focuses on the more detailed design of the rotor, where 0.5 mm thick silicon steel M 310-50 A is chosen, as the addition of silicon increases the resistivity of the material, reducing the Eddy currents and improving the magnetization in the B-H curves of low-carbon steels. In this section, the different magnets available on the market will also be studied, where the Nd-Fe-B N38 will be selected, and their dimensions and placement will be determined in order to try to reduce the cogging torque. Further on, the possible demagnetization of the magnets in the event of a three-phase short-circuit is also studied.

Fifthly, the stator will be designed in detail, where two branches are differentiated: yoke and slots, and on the other hand, the windings.

First, the dimensions of the yoke and slots will be established, which will be made of the same Silicon Steel as the rotor yoke. It is foreseen that, having such a large diameter, the machine will have to be divided into smaller modules for its manufacture.

Secondly, the windings will be double-layered and will have one slot per phase and per pole,  $q = 1$ . Corrugated windings will be used as they allow the amount of copper to be reduced.

Finally, it will be designed to be connected in triangle to reduce the material inside the slots and the number of parallels and series per phase will be obtained for this configuration.

Once the rotor and stator have been designed, the parameters that characterize the designed machine are calculated, obtaining the losses in both copper and iron and also the mechanical losses, and the synchronous inductance.

The following section will check whether the preliminary specifications are met under nominal conditions with the characteristic parameters. The result obtained will not be satisfactory and changes will be necessary to optimize it.

Finally, the geometry of the slots will be modified, and the simulation process will be carried out to obtain the field in the air gap again and to reduce the synchronous inductance so that it is capable of generating the rated power under nominal conditions.

#### 4. Results

The length of the slots will be reduced to 74 mm in order to obtain a lower synchronous inductance and to meet the initial specifications. The following table shows the nominal values obtained after optimization:

| Magnitude        | Value    |
|------------------|----------|
| Apparent Power   | 6.11 MVA |
| Active Power     | 5.65 MW  |
| Voltage          | 690 V    |
| Current          | 5113.1 A |
| Frecuency        | 36 Hz    |
| Mechanical speed | 12 rpm   |
| Cos $\phi$       | 0.9256   |

Tabla 5: Nominal values of optimal design

As can be seen, the generator has a good power factor of 0.9256, which is usually between 0.85 and 0.95 for machines of this type. This factor indicates the large amount of active power generated compared to the nominal apparent power. However, the machine is not capable of magnetizing all the inductances on its own, and reactive power must be drawn from the grid.

In addition, the efficiency for the 5.5 MW power will be increased as this power can be generated at the same voltage, but lower current, the new efficiency value being 95.7%.

Finally, the costs of the machine will be calculated, where direct and indirect costs will be distinguished. Costs such as manufacturing or labour will be estimated with respect to the total cost of the active materials, as the price of these is a fixed value and is obtained directly from the market. Therefore, the following table summarizes the cost of the active materials:

| ACTIVE MATERIAL            | PRICE PER UNIT OF MASS | COSTS        |
|----------------------------|------------------------|--------------|
| Silicon Iron: M 310 – 50 A | 4.5 €/kg               | 70 256 €     |
| NdFeB Magnets: N 38        | 55 €/kg                | 159 594.97 € |
| Copper                     | 7.5 €/kg               | 100 689.7 €  |
| TOTAL COSTS                |                        | 330 540.67 € |

Tabla 6: Costs of active material

#### 5. Conclusions

This project presents a possible design for a direct-drive radial flux permanent magnet synchronous generator for an offshore wind turbine. It is intended to be able to extract a nominal power of 5MW and to be able to generate an additional 10 %, resulting in a 5.5 MW generator.

The stator windings will be connected in a delta connection despite not being able to eliminate third order harmonics, as it is a priority to reduce as much copper as possible as the winding is a double layer winding.

A first design will be obtained which will be optimized to improve aspects such as the power extracted from the wind, which in turn is accompanied by an increase in the power factor and efficiency. The length of the slots will be reduced in order to reduce the synchronous inductance, a parameter that conditions the behaviour of the generator.

The final budget for the generator is 725,473.59 €, which represents 16% of the total cost of a complete wind turbine (nacelle, blades, tower, foundations, etc.), if the most recent value is taken to estimate the cost of around 800,000 € per MW. Thus, the designed wind turbine would cost around €4.52 million.

## 6. References

- [11] Hermann-Josef Wagner, Jyotirmay Mathur – “Introduction to Wind Energy Systems Basics, Technology and Operation”, (Green Energy and Technology),
- [12] ABB “Technical application papers number 13, Wind power plants”, 2011.
- [13] Madjid Karimirad “Offshore Energy Structure, for Wind power, Wave energy and Hybrid Marine Plataforms”, Srpinge, 2014
- [14] Olimpo Anaya-Lara, John O. Tande, Kjetil Uhlen, Karl Merz “Offshore Wind Energy Technology”, Wiley, 2018.
- [15] Dr. Duane Hanselman, “Brushless Permanent Magnet Motor Design”, 2<sup>a</sup> Edición, Magna Physics, Orono, ME, USA, 2003.
- [16] Hui Li, Zhe Chen, Henk Polinder. “Optimization of Multibrid Permanent- Magnet Wind Generator Systems”. IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 24, no. 1. 2009.
- [17] David Meeker, “Finite Element Method Magnetics – User’s Manual”, Version 4.2, 2020
- [18] Maxime Roger Joseph Dubois. “Optimized Permanent Magnet Generator Topologies for Direct-Drive Wind Turbines”. 2004.
- [19] Miguel Ángel Rodríguez Pozueta, “Construcción de las máquinas eléctricas”, Universidad de Cantabria; departamento de ingeniería eléctrica y energética, 2010.
- [20] Ion Boldea, “The Electric Generators Handbook – Variable Speed Generators”, 2<sup>nd</sup> Edition, CRC Press, Taylor and Francis Group, Boca Raton, 2016.

## *Índice de la memoria*

|                                                                       |           |
|-----------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. Introducción.....</b>                                           | <b>1</b>  |
| 1.1 Motivación del proyecto.....                                      | 1         |
| 1.2 Objetivos .....                                                   | 1         |
| <b>2. Estado Del Arte.....</b>                                        | <b>2</b>  |
| 2.1 Energía eólica marina.....                                        | 2         |
| 2.1.1 Introducción .....                                              | 2         |
| 2.1.2 Potencial eólico.....                                           | 6         |
| 2.2 Los Aerogeneradores.....                                          | 7         |
| 2.2.1 Elementos de los aerogenerador.....                             | 7         |
| 2.2.2 Clasificación de los aerogeneradores .....                      | 14        |
| 2.3 Tecnologías de los generadores.....                               | 21        |
| 2.3.1 Tipos de generadores según relación entre estator y rotor.....  | 21        |
| 2.3.2 Tipos de generadores según orientación del flujo .....          | 24        |
| <b>3. Diseño Preliminar del Generador.....</b>                        | <b>27</b> |
| 3.1 Datos de partida.....                                             | 27        |
| 3.2 Parámetros de Diseño .....                                        | 29        |
| 3.3 Proporciones Típicas .....                                        | 30        |
| 3.4 Circuito magnético .....                                          | 32        |
| 3.4.1 Campo magnético en el entrehierro: Esquema de reluctancias..... | 32        |
| 3.4.2 Campo magnético en el entrehierro: Simulación con FEMM .....    | 35        |
| 3.5 Comprobación de saturación.....                                   | 40        |
| <b>4. Diseño del Rotor .....</b>                                      | <b>41</b> |
| 4.1 Yugo del rotor .....                                              | 41        |
| 4.2 Imanes .....                                                      | 43        |
| 4.2.1 Elección de los imanes .....                                    | 44        |
| 4.3 Disposición sesgada de los imanes y cogging torque.....           | 45        |
| <b>5. Diseño del Estator.....</b>                                     | <b>47</b> |
| 5.1 Armadura.....                                                     | 47        |
| 5.1.1 Yugo del Estator .....                                          | 47        |

|                                                                  |           |
|------------------------------------------------------------------|-----------|
| 5.1.2 Ranuras.....                                               | 47        |
| 5.2 Devanados .....                                              | 48        |
| 5.2.1 Configuración de los devanados .....                       | 49        |
| 5.2.2 Tipos de devanados .....                                   | 50        |
| 5.3 Tensión de vacío.....                                        | 52        |
| 5.4 Diseño de los conductores y del Aislamiento .....            | 54        |
| 5.4.1 Sección de los conductores.....                            | 55        |
| 5.4.2 Aislamiento .....                                          | 56        |
| 5.4.3 Dimensión y geometría final de las ranuras .....           | 56        |
| <b>6. Parámetros eléctricos .....</b>                            | <b>58</b> |
| 6.1 Pérdidas en el cobre.....                                    | 59        |
| 6.2 Pérdidas en el hierro .....                                  | 60        |
| 6.3 Pérdidas mecánicas.....                                      | 62        |
| 6.4 Inductancia síncrona.....                                    | 62        |
| 6.4.1 Inductancia magnetizante o mutua.....                      | 63        |
| 6.4.2 Inductancia de dispersión.....                             | 64        |
| <b>7. Desmagnetización de los imanes.....</b>                    | <b>68</b> |
| <b>8. Funcionamiento del generador.....</b>                      | <b>72</b> |
| 8.1 Condiciones nominales.....                                   | 73        |
| 8.2 Rendimiento .....                                            | 74        |
| <b>9. Máquina Síncrona Ejes DQ y Control Vectorial .....</b>     | <b>77</b> |
| 9.1 Ejes dq .....                                                | 78        |
| 9.2 Control Vectorial .....                                      | 80        |
| <b>10. Optimización del Diseño.....</b>                          | <b>83</b> |
| 10.1 Incremento de la potencia activa .....                      | 83        |
| 10.2 Comprobación del funcionamiento del diseño optimizado ..... | 87        |
| <b>11. Estudio económico.....</b>                                | <b>90</b> |
| 11.1 Mediciones .....                                            | 90        |
| 11.2 Presupuesto.....                                            | 91        |
| 11.2.1 Costes Directos.....                                      | 91        |

---

|                                                          |            |
|----------------------------------------------------------|------------|
| 11.2.2 Costes Indirectos .....                           | 94         |
| <b>12. Conclusiones y Trabajos Futuros .....</b>         | <b>95</b>  |
| 12.1 Resultados .....                                    | 95         |
| 12.2 Trabajos Futuros .....                              | 96         |
| <b>13. (ODS) Objetivos de Desarrollo Sostenible.....</b> | <b>99</b>  |
| <b>14. Bibliografía .....</b>                            | <b>101</b> |
| <b>ANEXO I: Cálculos .....</b>                           | <b>104</b> |
| I. Devanado del estator .....                            | 104        |
| II. Cálculo de las Bases .....                           | 106        |
| III. Comportamiento de la máquina .....                  | 107        |
| a. Condiciones deseadas .....                            | 107        |
| b. Condiciones nominales .....                           | 108        |
| c. Optimización .....                                    | 108        |
| <b>ANEXO II: Catálogos.....</b>                          | <b>109</b> |
| I. Devanados .....                                       | 109        |
| II. Imanes .....                                         | 110        |
| III. Material Ferromagnético .....                       | 111        |



## *Índice de figuras*

|                                                                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1: crecimiento esperado de la energía eólica offshore a lo largo de los años. Fuente: Global Wind Energy Council, GWEC .....  | 5  |
| Figura 2: GW instalados necesarios para reducir la temperatura y frenar el cambio climático .....                                    | 6  |
| Figura 3: Elementos de un aerogenerador .....                                                                                        | 8  |
| Figura 4: Fuerzas y velocidades que actúan en una pala. ....                                                                         | 10 |
| Figura 5: dibujo esquemático de un aerogenerador ENERCON, direct drive, [1]. ....                                                    | 11 |
| Figura 6: Tipos de aerogeneradores de eje vertical, [4]. ....                                                                        | 15 |
| Figura 7: a) aerogenerador a barlovento, b) aerogenerador a sotavento.[1] .....                                                      | 16 |
| Figura 8: Relación Tip-Speed ratio y $C_p$ . [1] .....                                                                               | 18 |
| Figura 9: Curva $\lambda - C_p$ para cada tipo de generador. [2] .....                                                               | 19 |
| Figura 10: Curvas de potencia según el tipo de control, regulación del ángulo de paso, regulación por pérdida aerodinámica.[6] ..... | 21 |
| Figura 11: Esquema generador síncrono de imanes permanentes, con electrónica de potencia.[2] .....                                   | 24 |
| Figura 12: configuración generador flujo axial, [8] .....                                                                            | 25 |
| Figura 13: colocación imanes para flujo radial [8] .....                                                                             | 26 |
| Figura 14: Posible estator exterior de un generador de imanes permanentes, [8] .....                                                 | 26 |
| Figura 15: Parámetros de diseño. (elaboración propia) .....                                                                          | 29 |
| Figura 16: Diferentes ondas cuadradas de campos magnéticos según la anchura de los imanes [10]. ....                                 | 31 |
| Figura 17: Circuito equivalente análisis por reluctancias. ....                                                                      | 33 |
| Figura 18: Pieza 3D, realizada en Solid Works, para la simulación del campo magnético creado por imanes permanentes. ....            | 35 |
| Figura 19: Captura propiedades del material ferromagnético. ....                                                                     | 36 |
| Figura 20: Curva BH del material ferromagnético .....                                                                                | 37 |
| Figura 21: Captura propiedades imán .....                                                                                            | 37 |
| Figura 22: Resultado de la simulación con FEMM, distribución del campo magnético....                                                 | 38 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 23: Campo magnético en el entrehierro frente al tiempo.....                                                                                                                                                                                                          | 39 |
| Figura 24: Composición de armónicos de la onda del campo magnético .....                                                                                                                                                                                                    | 39 |
| Figura 25: Designaciones según país o continente de Aceros al Silicio. Fuente: “Advancements in Electric Machines”, [15] .....                                                                                                                                              | 42 |
| Figura 26: Cuadro comparativo de distintos imanes permanentes Fuente: “Advancements in Electric Machines”, [15].....                                                                                                                                                        | 45 |
| Figura 27: Ranuras con devanado (1: la de bobina, 2: aislamiento entre capas): a) una capa, b) de dos capas. [17] .....                                                                                                                                                     | 49 |
| Figura 28:Ejemplo de un bobinado trifásico concéntrico por polos consecuentes, de 4 polos, simple capa, 2 grupos polares por fase con $q=3$ ranuras por polo y por fase, una rama en paralelo y un total de 36 ranuras. (se ha dibujado solo una fase). Fuente: [17]. ..... | 50 |
| Figura 29: Ejemplo devanado trifásico imbricado por polos, 6 polos. De doble capa, 6 grupos polares de dos bobinas cada uno con 36 ranuras, $q=2$ ranuras por polo y por fase, dos ramas en paralelo. Fuente: [17]. .....                                                   | 51 |
| Figura 30: Ejemplo devanado trifásico ondulado por polo, 4 polos, doble capa con 4 grupos polares de 2 bobina. Ranuras totales 24 con 2 ranuras por polo y por fase, y dos en paralelo. Fuente: [17]. .....                                                                 | 52 |
| Figura 31: Nueva disposición ranuras .....                                                                                                                                                                                                                                  | 57 |
| Figura 32: Catálogo Arcelor mital propiedades magnéticas del Acero al Silici 310- 50-5A .....                                                                                                                                                                               | 61 |
| Figura 33: Diferentes posibilidades de geometría de las ranuras. Fuente: [19] .....                                                                                                                                                                                         | 64 |
| Figura 34: Curva de desmagnetización del N38. Fuente: Arnold magnetic technologies .                                                                                                                                                                                        | 68 |
| Figura 35. Esquema máquina síncrona de polos lisos. Fuente: apuntes asignatura máquinas eléctricas ICAI. ....                                                                                                                                                               | 72 |
| Figura 36: Curva del rendimiento respecto a la carga del generador el cual se está diseñando. ....                                                                                                                                                                          | 75 |
| Figura 37: Modelo dinámico de la máquina síncrona de imanes permanentes. Fuente: diapositivas asignatura accionamientos eléctricos. ....                                                                                                                                    | 78 |
| Figura 38: Esquema de control de par de una máquina síncrona de imanes superficiales.                                                                                                                                                                                       | 80 |
| Figura 39: Campo magnético en el entrehierro, optimización de las ranuras .....                                                                                                                                                                                             | 84 |

---

|                                                                                                                     |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 40: Descomposición de los armónicos que forman la onda de campo magnético, optimización de las ranuras. .... | 85  |
| Figura 41: Objetivos de desarrollo sostenible, [11].....                                                            | 100 |

## *Índice de tablas*

|                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1: Datos preliminares.....                                                                  | 9  |
| Tabla 2: Placa de características .....                                                           | 11 |
| Tabla 3: Costes materiales activos.....                                                           | 11 |
| Tabla 4: Initial conditions.....                                                                  | 14 |
| Tabla 5: Nominal values of optimal design.....                                                    | 16 |
| Tabla 6: Costs of active material .....                                                           | 16 |
| Tabla 7: Datos preliminares.....                                                                  | 27 |
| Tabla 8: Parámetros básicos de diseño .....                                                       | 30 |
| Tabla 9: Reluctancias y fmms circuito. ....                                                       | 34 |
| Tabla 10: Resultados campo y flujo en el entrehierro. ....                                        | 34 |
| Tabla 11: Resultados devanados el estator. ....                                                   | 54 |
| Tabla 12 : Bases del generador.....                                                               | 58 |
| Tabla 13: dimensiones de la ranura, estilo (b) Figura 33 .....                                    | 65 |
| Tabla 14: Resultados obtenidos potencia máxima extraíble en condiciones nominales. ....           | 73 |
| Tabla 15: Resultados casos de estudio, $u=1.1$ pu, $w=1.25$ pu, y ambos casos juntos. ....        | 74 |
| Tabla 16: resultados control vectorial $i_d=0$ pu. ....                                           | 81 |
| Tabla 17: resultados control vectorial $i_d = -0.4$ pu.....                                       | 82 |
| Tabla 18: Dimensiones de las ranuras optimizado .....                                             | 84 |
| Tabla 19: Resultados para potencia requerida del funcionamiento del diseño optimizado. ....       | 87 |
| Tabla 20: Resultados en condiciones nominales del diseño optimizado.....                          | 87 |
| Tabla 21: Estrategia de $i_d=0$ mediante control vectorial diseño optimizado .....                | 88 |
| Tabla 22: Control vectorial diseño optimizado. ....                                               | 88 |
| Tabla 23: Densidades materiales .....                                                             | 90 |
| Tabla 24 : Volúmenes calculados de los distintos componentes que conforman el generador.<br>..... | 91 |
| Tabla 25: volúmenes y masas totales por material empleado. ....                                   | 91 |
| Tabla 26: costes material activo .....                                                            | 92 |
| Tabla 27: Costes totales directos .....                                                           | 93 |

---

|                                                               |     |
|---------------------------------------------------------------|-----|
| Tabla 28: Datos de partida.....                               | 104 |
| Tabla 29: Cálculo series, paralelos y vueltas por espira..... | 105 |



# **1. INTRODUCCIÓN**

## ***1.1 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO***

En el presente escrito se quiere diseñar un aerogenerador marino de 5 MW, que sea capaz de generar un 10 % adicional, siendo por ello, su potencia máxima de 5.5 MW. Se espera que funcione para regímenes de viento entre 5 y 30 m/s. Además de situarse a una distancia lejana de la costa donde las profundidades rondan entre 30 hasta 50 m de profundidad.

Atendiendo a las condiciones descritas en el párrafo anterior, se quiere ubicar el aerogenerador frente a las costas del océano atlántico marroquí. Esta ubicación se caracteriza por tener muy buenas condiciones meteorológicas y un buen régimen de viento superando los 10m/s, con una constante de Weibull cercano a las dos unidades que, atendiendo a la norma IEC se corresponde con la clase I. Todo gracias al efecto Venturi natural del Estrecho de Gibraltar.

Lo malo es que al tratarse de una tecnología de cimentación no flotante no se podrá distanciar mucho de la costa ya que el relieve del fondo marítimo es muy pronunciado.

## ***1.2 OBJETIVOS***

- Estudio de los generadores y herramientas de desarrollo.
- Diseño de la estructura básica rotórica y estática.
- Simulación circuitos magnéticos.
- Determinación detallada de los elementos del rotor y del estator.
- Obtención de las curvas características, par, potencia, rendimiento, cortocircuito.
- Mejoras en el diseño.

## **2. ESTADO DEL ARTE**

### **2.1 ENERGÍA EÓLICA MARINA**

#### **2.1.1 INTRODUCCIÓN**

En la actualidad existe una creciente preocupación por el cambio climático y por reducir las emisiones contaminantes que lo causan siendo necesario la búsqueda de nuevos métodos de producción de energía que produzcan menos emisiones, sean limpios y rentables. Es aquí donde surgen las energías renovables, que aprovechan los recursos inagotables del planeta como son el viento, las corrientes de agua o la radiación solar ayudando a reemplazar otras centrales basadas en la combustión de combustibles fósiles como el petróleo o el carbón para la producción de energía.

Dentro de las energías renovables se encuentra la energía eólica, una de las fuentes más madura y desarrollada. Genera electricidad gracias a la fuerza del viento mediante el aprovechamiento de la energía cinética producida por las corrientes de aire. El viento es una manifestación indirecta de la radiación solar que se origina por la diferencia de temperaturas entre las distintas capas de aire que se encuentran más cercanas y alejadas de la superficie terrestre, así como la diferencia de temperaturas entre dos puntos localizados a la misma altura.

Marruecos cuenta con un registro medio de 2900 horas de sol al año, dónde recibe una radiación diaria entre 4,5 y 6,5 kWh/m<sup>2</sup>, de los cuales entre un 1% y 2% se convierte en viento. Esta cifra puede parecer pequeña, pero representa una cantidad enorme de energía a poder explotar, alrededor de 20MWh. A pesar de tratarse de una tecnología intermitente y poco predecible, que hace complicada su explotación, existen numerosos parques eólicos que son prueba de la rentabilidad que este tipo de tecnología presenta, convirtiéndola en una de las que más GW instalados tiene mundialmente.



La energía eólica comenzó instalándose en tierra, pero gracias a los avances tecnológicos desarrollados hasta el momento se puede diferenciar dos modelos de energía eólica: los parques on-shore, aquellos donde los aerogeneradores que conforman el parque están ubicados en tierra firme, y la eólica off-shore, que se distingue de la anterior por encontrar los aerogeneradores instalados en alta mar, donde se pueden distinguir diferentes modalidades de cimentaciones que más adelante se analizarán. A pesar de ser mucho menor el número de aerogeneradores en zonas marinas, estos producen una mayor energía al contar con velocidades de viento mayores ya que no hay obstáculos ni barreras como pasa en tierra, además de ser la velocidad más constante. Entre otras ventajas de este tipo de aerogeneradores cabe destacar la reducción del impacto visual al encontrarlos a largas distancias de la costa y de esta misma forma, el impacto acústico ya no es tan restrictivo. Esto último ha ido mejorando a lo largo de los años pues los fabricantes se preocupan más por la reducción de las vibraciones que causan deterioro y ruido mecánico. Más adelante se comentará cómo la eliminación de la reductora ayuda también a reducir las emisiones sonoras.

Sin embargo, no todo son ventajas, pues se encuentran varios inconvenientes. Algunos de ellos pueden ser los costes de instalación y mantenimiento que, al tratarse de una tecnología todavía en desarrollo, la hacen mucho más cara que su otra variante. También cabe destacar su limitación de instalación, al no poder superar una profundidad específica y distancia a la costa. Su construcción, mantenimiento y diseño también presentan complicaciones pues el entorno marino hace que la torre esté sometida a mayores cargas, el salitre del agua origina una mayor corrosión y el aerogenerador deberá restringir ciertos niveles de velocidad del viento.

Siguiendo con la comparación de las dos vertientes de la energía eólica, aquella instalada en tierra y la localizada en áreas marinas, prestando atención a la potencia que es capaz de generar cada una de estas tecnologías, se puede ver que merece la pena realizar un estudio sobre los aerogeneradores off-shore. Como se ha mencionado antes, la potencia es mayor cuanto mayor sea la velocidad y cuanto mayor sea el área barrida. Los aerogeneradores marinos al encontrarse a una distancia considerable de la costa, aprovechando que tienen

menor impacto visual, se pueden diseñar para unas dimensiones mayores y aprovechar de mejor manera el recurso eólico del emplazamiento. Hoy en día se pueden llegar a encontrar aerogeneradores marinos de hasta 12 MW con longitudes de aspa alrededor de los 97 m (dando lugar a diámetros de rotor de 200 m), obteniéndose de esta manera áreas de barrido de  $31400 \text{ m}^2$  que, en comparación con aquellos instalados en tierra, la potencia varía entre 2 a 5 MW, sólo alcanzando esta última cifra los más nuevos.

Como ya se ha mencionado anteriormente, existe una gran preocupación por llegar a reducir las emisiones causadas por la quema de combustibles fósiles para la obtención de energía, que han impulsado la creación de nuevos objetivos sostenibles en todo el mundo y en especial en Europa. Se ha firmado el Pacto Verde Europeo cuyo objetivo es convertir a Europa en el primer continente climáticamente neutro, reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero y realizando una transición económica, industrial y social. Para ello se ha creado un plan de ruta a largo plazo para 2050 donde se han planteado una serie de estrategias principales, algunas de ellas son:

- Promover edificios energéticamente eficientes.
- Maximizar la inversión, sobre todo en tecnologías renovables para conseguir descarbonizar el sector energético promoviendo la electrificación masiva.
- Conseguir alcanzar una movilidad limpia, conectada y segura de la mano de los vehículos eléctricos, reduciendo los gases de efecto invernadero producido por el transporte.
- Conseguir una economía circular para alcanzar una industria competitiva.
- Desarrollar una infraestructura de red inteligentes interconectadas.

El Pacto Verde Europeo también incluye otros acuerdos firmados para alcanzar los objetivos climáticos y energéticos como es el Acuerdo de París. En él destaca como objetivo principal la reducción de emisiones para 2030 en un 45%, y se espera que se consiga con el apoyo de las energías renovables y en especial la eólica. Para esta misma fecha, 2030, se espera que un tercio de la energía demandada en el Reino Unido se genere gracias a la energía eólica marina. Este país, hasta la fecha, es aquel que cuenta con la mayor potencia procedente de

la eólica marina instalada. En la Figura 1, se muestra cómo se espera que aumente la potencia instalada en las próximas décadas atendiendo a los objetivos establecidos por los acuerdos y pactos vigentes.

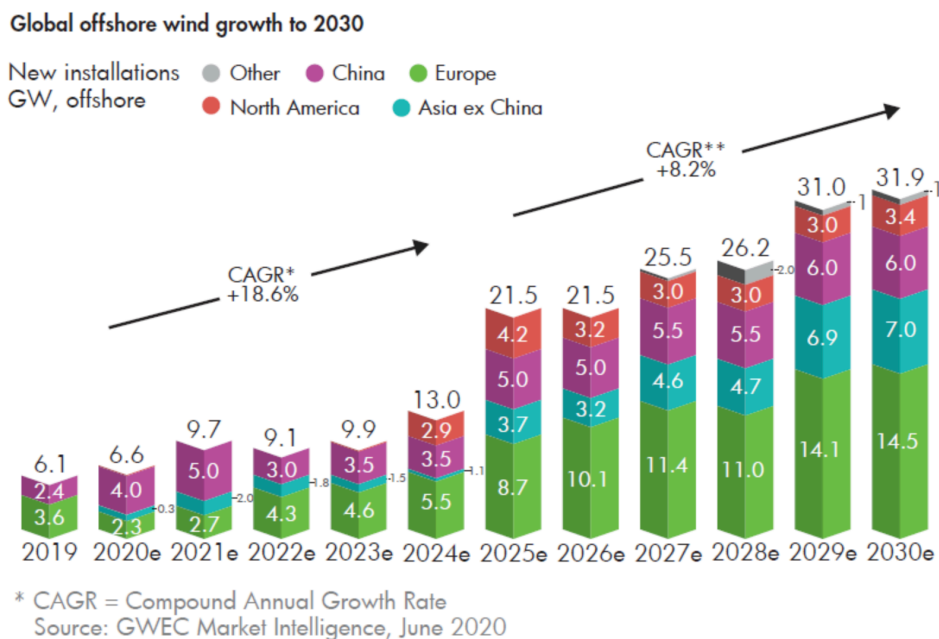


Figura 1: crecimiento esperado de la energía eólica offshore a lo largo de los años. Fuente: Global Wind Energy Council, GWEC

Pero lo que hay que tener en cuenta es que sólo se podrá llegar a cumplir los objetivos para 2030 y años siguientes, si la potencia media instalada supera los 180 GW según se va a explicar continuación con la Figura 2 procedente de un estudio del GWEC, Global Wind Energy Council. La línea en color amarillo muestra la media de instalación entre 2020 y 2030 que es necesario alcanzar para conseguir reducir hasta en 2 grados la temperatura del planeta, contribuyendo a frenar el cambio climático. Este cálculo ha sido realizado por GWEC bajo las expectativas de IRENA, International Renewable Energy Agency, para el futuro, donde espera tener instalada una potencia procedente de la energía eólica que ronde entre los 2500 GW a nivel mundial.

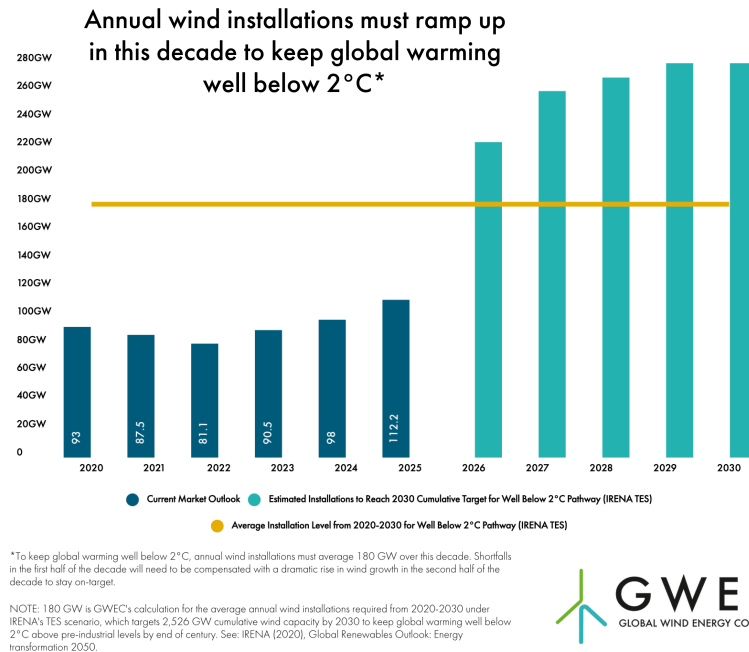


Figura 2: GW instalados necesarios para reducir la temperatura y frenar el cambio climático

## 2.1.2 POTENCIAL EÓLICO

La tecnología basada en el uso de los aerogeneradores produce potencia eléctrica a través de la interacción entre las palas del rotor aerodinámico y el viento, generando sustentación y ejerciendo una fuerza de giro. Para poder llegar a inyectar a la red potencia eléctrica, es necesario transformar la energía cinética del viento en energía mecánica de rotación y esta última, trasladada a través de un eje de rotación, transformarla en energía eléctrica mediante el generador, que utiliza campos magnéticos.

La energía cinética de una masa de viento  $m$  con  $v$  a una velocidad  $v$ , se define como:

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

Teniendo en cuenta la variación de la masa respecto del tiempo, caudal másico  $\dot{m}$ , con densidad del viento  $\rho$ , a travesando una superficie  $A$ .

$$\dot{m} = \rho \cdot v \cdot A$$

De manera que la potencia extraíble es:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3$$

De la ecuación anterior se puede comprobar que, a mayores velocidades de viento, mayor potencia se puede extraer al encontrarse esta la cubo. Pero también aumenta esta al hacerlo el área de barrido como ya se ha comentado con anterioridad. Sabiendo que el área corresponde al de una circunferencia, aumentar el radio al encontrarse al cuadrado hace que se incremente notablemente.

Se ha de tener en cuenta que no toda la potencia del viento se puede llegar a extraer y ser transferida a la pala, tan solo una parte. Según la Ley de Betz [1] como máximo el 59,25% de la potencia cinética propia del viento puede convertirse en potencia mecánica mediante la turbina eólica. A este número se le conoce como el coeficiente o número de Betz. Esta limitación se debe a que el viento en la parte posterior del rotor debe tener una velocidad lo suficientemente alta como para alejarse y permitir más viento a través del plano del rotor.

El término  $C_p$  se puede interpretar como la eficiencia entre la pala del rotor aerodinámico y el viento, o también cómo la relación entre la potencia extraída y aquella que dispone el viento. Queda así definida la potencia extraíble del viento, resumida en la siguiente ecuación:

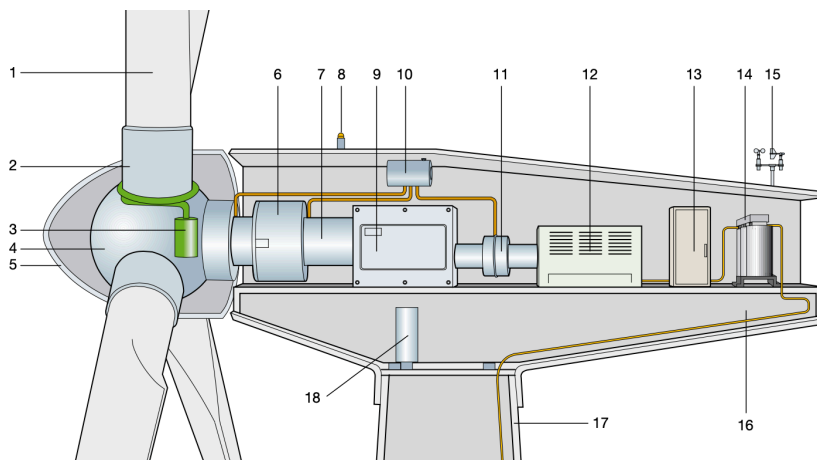
$$P = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot A \cdot v^3$$

## **2.2 LOS AEROGENERADORES**

### **2.2.1 ELEMENTOS DE LOS AEROGENERADOR**

En este trabajo se va a realizar el estudio del generador, máquina capaz de transformar la energía mecánica que llega a través del rotor en energía eléctrica, de un aerogenerador marino. Este elemento es uno de los más importantes ya que sin él no tendría sentido construir este tipo de estructuras. Sin embargo, a pesar de ser esencial, no se puede estudiar

directamente sin conocer los elementos adicionales que conforman un aerogenerador. Este apartado está dedicado al desglose de cada una de las partes de un aerogenerador marino, que no difiere en exceso con aquellos instalados en tierra, a excepción del tipo de cimentación empleado, entre otras variantes.



*Figura 3: Elementos de un aerogenerador*

En la Figura 3 se muestran los elementos que se pueden encontrar en un aerogenerador de eje horizontal:

1. Palas
2. Soporte de las palas
3. Control del ángulo de paso
4. Buje
5. Cono frontal, cubierta
6. Soporte principal
7. Eje principal
8. Luces de señalización
9. Multiplicadora
10. Sistema de refrigeración
11. Sistema de freno mecánico

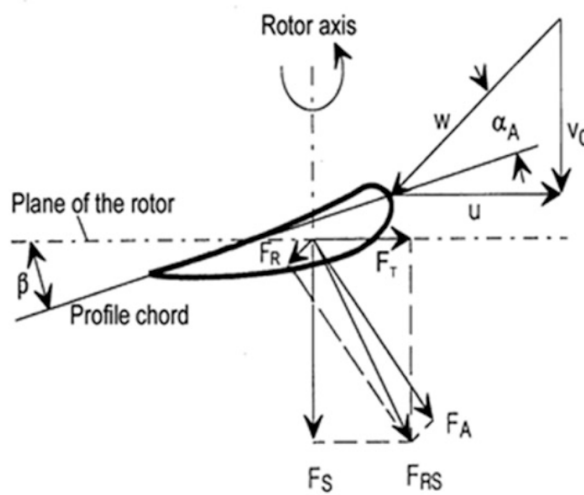
12. Generador
13. Convertidor, protecciones y elementos de conexión
14. Transformador
15. Anemómetro
16. Góndola
17. Torre
18. Sistema de guiñada, sistema de orientación

A continuación, se explicarán en mayor profundidad aquellos elementos que sean de mayor importancia y se comentará algunos aspectos del resto de componentes menos importantes.

- ROTOR AERODINÁMICO: PALAS Y BUJE

Las palas son el elemento en contacto directo con el viento, encargadas de extraer la energía cinética que este posee, convirtiéndola en energía mecánica y transmitiendo esta potencia al buje mediante la rotación. Se han de diseñar con un perfil alar específico, de manera que el extremo tenga baja resistencia aerodinámica y buena sustentación, principio fundamental para su rotación, ver Figura 4.

Los materiales empleados para la fabricación de las palas son ligeros y se refuerzan con plásticos con fibra cuyas propiedades son buenas frente al desgaste. En aerogeneradores cuyas palas son grandes, como es en el caso que se va a estudiar, se utiliza fibra de carbono para reforzar las zonas más críticas.



$\alpha_a$  = ángulo de ataque  
 $\beta$  = Ángulo de inclinación, pitch angle  
 $u$  = velocidad media tangencial  
 $v_0$  = velocidad del viento  
 $w$  = velocidad flujo de aire resultante  
 $F_r$  = Fuerza de arrastre o Drag. (direc.  $w$ )  
 $F_a$  = Fuerza de sustentación o lift.  
 $F_{rs}$  = Fuerza resultante  
 $F_t$  = Componente tangencial  
 $F_s$  = Componente axial

Figura 4: Fuerzas y velocidades que actúan en una pala.

Se define ángulo de ataque como la diferencia angular entre la dirección del flujo de aire resultante y la cuerda máxima de la sección de la pala.

Se define ángulo de sustentación, o ángulo de paso como la diferencia angular entre el plano de rotación del eje de la pala y la cuerda máxima de la sección de la pala.

Buje es el elemento que se encuentra unido a las palas a través de rodamientos. Transmite la potencia extraída del viento al eje principal. Destaca también incluir los elementos de regulación del ángulo de paso. Suele estar fabricado de acero o de fundición.

#### ○ MULTIPLICADORA

Conjunto de engranajes que permiten elevar la velocidad de giro del eje principal, que coincide con la velocidad extraída por el rotor aerodinámico, para aumentar las revoluciones del rotor del generador eléctrico, manteniendo la potencia generada.

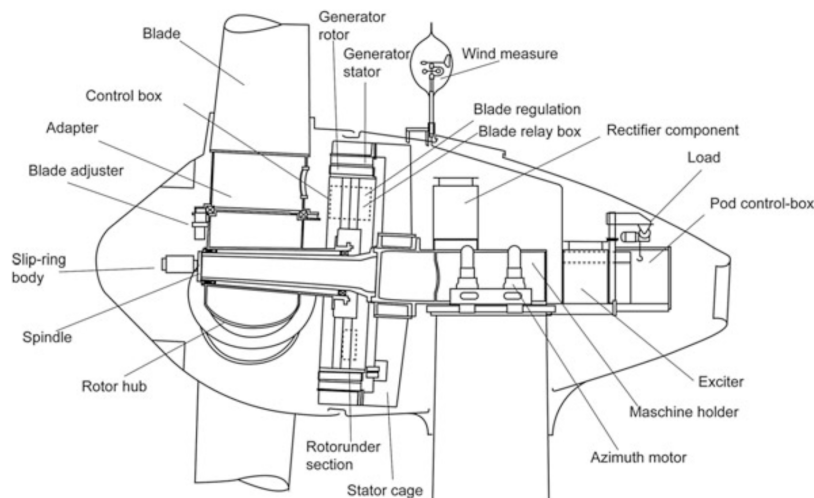
Es uno de los elementos que mayor mantenimiento requiere al ser aquel que más esfuerzos soporta, y más veces rompe. Actualmente, muchos fabricantes prescinden de este elemento mecánico ya que, debido a la localización de los aerogeneradores marinos, los costes de



mantenimiento representan una gran suma al ser necesario el uso de medios de transporte y materiales específicos.

Sin embargo, prescindir de multiplicadora añade complicaciones. Al no contar con este elemento mecánico, el generador ya no gira a velocidades elevadas y se mantiene a la velocidad de giro de las palas. Si se quiere mantener la potencia, se necesita aumentar el par de la máquina siendo necesario, aumentar el número de pares de polos de esta. A mayor número de polos, mayor las dimensiones del generador y a su vez, el tamaño de la góndola y en consecuencia su coste.

Este proyecto se va a centrar en el estudio de un generador en el cual se va a prescindir de multiplicadora, será de transmisión directa, de acuerdo con los avances que hasta la fecha se han logrado.



*Figura 5: dibujo esquemático de un aerogenerador ENERCON, direct drive, [1].*

En la Figura 5 dibujo esquemático de un aerogenerador ENERCON de transmisión directa donde se puede apreciar como el elemento que define la forma de la góndola es el generador, ya que es el componente de mayor diámetro. Eso se debe a tener al aumento del número polos para que pueda funcionar a velocidades menores.

- FRENOS

Elemento adicional en caso de no ser suficiente el freno aerodinámico. Permite bloquear el rotor cuando este se encuentra en mantenimiento o frente a condiciones meteorológicas adversas.

- GENERADOR

Elemento encargado de convertir la energía mecánica en energía eléctrica generando potencia para inyectarla a la red. Está formado por un rotor, elemento rotativo y un estator, elemento fijo. Al ser este el elemento a estudio del proyecto, se dedicarán más adelante los apartados pertinentes para el desarrollo de los distintos tipos de máquinas eléctricas existentes, atendiendo a sus ventajas y desventajas, funcionamiento y configuración.

- TRANSFORMADOR

Puede instalarse tanto en la góndola como en la base de la torre. Se debe tener en cuenta la longitud de los cables para que pueda realizar el movimiento de orientación sin que los cables se enreden, pero que permitan completar tres giros hasta su alineación.

La generación de potencia a la salida del generador se realiza a baja tensión, y se debe convertir a media tensión mediante un transformador con el fin de reducir las pérdidas de transmisión al conectarse a la red.

El transformador de potencia aparente 630 MVA se situará dentro de la góndola y se conectará a la salida del convertidor y permitirá aumentar la tensión desde 690 V a 30 kV mediante la configuración Dyn11.

- SISTEMA DE GUIÑADA

Conjunto de engranajes, actuadores eléctricos y motorreductores que permiten rotar la góndola para que esta se encuentre en posición transversal a la del viento. Es un elemento de la unión entre la góndola y la torre. Se pueden encontrar aerogeneradores pasivos o activos

en cuenta mecanismos de orientación, como se comentará más adelante. Para más información consultar el proyecto de Francisco de Borja Anadón “Mecánica del sistema de orientación de un aerogenerador marino”

- TORRE Y CIMENTACIÓN

Elemento de soporte de la góndola, de forma tubular cónica, siendo mayor el diámetro de la base que el de la parte superior. En instalaciones *off-shore* la altura suele ser 0,8 veces el diámetro del rotor aerodinámico, a diferencia de las *on-shore* que varía entre un 1 y 1,2 veces, [2]. Suelen estar construidas en acero laminado o cemento.

En cuanto a la cimentación, se están desarrollando nuevos métodos entre los que destaca la flotante. Sin embargo, al ser todavía muy reciente es una tecnología muy cara y complicada. Si se quiere conocer más acerca de los esfuerzos soportados y la cimentación consultar el proyecto de Julio Vázquez, “Diseño de cimentaciones para soportar cargas de fatiga en una turbina eólica marítima”.

- SISTEMAS DE CONTROL, CONVERTIDOR, PROTECCIONES

Los sistemas de control se encargan del correcto funcionamiento del aerogenerador, monitorizando los procesos de arranque, y parada, al igual que lo protegen de posibles incidentes, como son las sobretensiones, sobreintensidades y sobrevelocidad. Si se quiere conocer más sobre el tema en cuestión acudir al proyecto de Jorge Villapún, “Operación y regulación avanzada de aerogeneradores en zonas marinas”

Como se comentará más adelante, ahora los aerogeneradores pueden funcionar a velocidad variable añadiendo un nuevo elemento, el convertidor. Con él se pretende funcionar a frecuencias distintas de la nominal permitiendo conseguir numerosas ventajas siendo una de ellas permitir controlar el par. El convertidor es el responsable de la gestión del generador, controlando la tensión, midiendo las corrientes y la velocidad del rotor. Los más comúnmente usados son los back to back en turbinas de baja tensión. Además, se ha demostrado que se puede mejorar hasta un 7% el rendimiento del conjunto del aerogenerador

si este cuenta con un variador de frecuencia. Para conocer más en profundidad, consultar el trabajo de fin de grado, realizado por Jose Luis Fernández, “Diseño del sistema eléctrico de una turbina off-shore”.

- SISTEMA DE REFRIGERACIÓN

Los aerogeneradores necesitan estar refrigerados cuando están funcionando. Existen dos tipos de refrigeración, una en la que el generador esta encapsulado en un conducto y utilizan un ventilador por aire para enfriar. El otro tipo es más especializado ya que son enfriados hidráulicamente y permite obtener generadores más compactos con el inconveniente de necesitar un intercambiador de calor donde poder enfriar el líquido refrigerante.

## **2.2.2 CLASIFICACIÓN DE LOS AEROGENERADORES**

Se pueden encontrar en la actualidad diferentes configuraciones de aerogeneradores atendiendo a características como son: el eje de rotación, el número de palas, velocidad y. tipo de control empleado.

### ***2.2.2.1 Según eje de rotación***

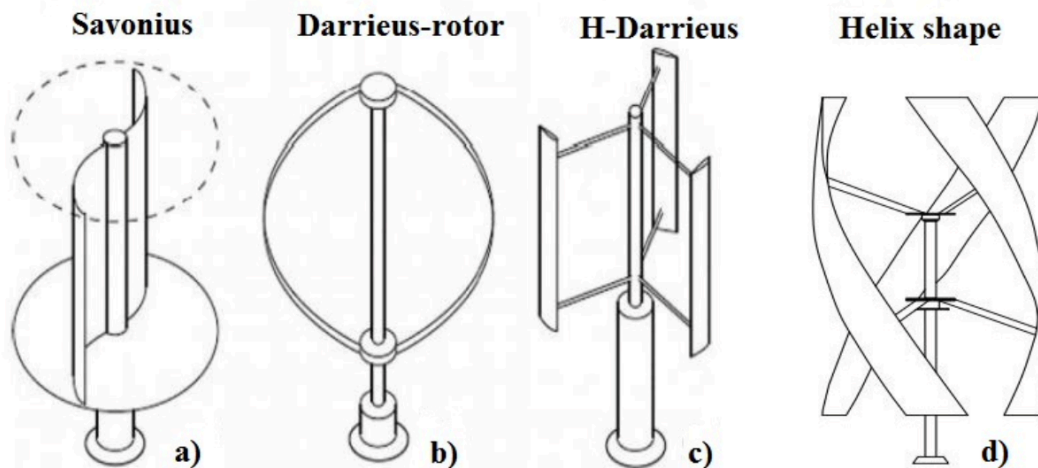
Se pueden distinguir dos grandes familias:

- Turbinas de eje vertical

Este tipo de aerogeneradores es muy complicado de ver hoy en día, pues su tecnología se ha quedado algo obsoleta al no poder agrandar sus dimensiones para poder conseguir un mayor aprovechamiento del viento. Como ya se ha mencionado, a mayor altura, mayor velocidad del viento, que se traduce en una mayor potencia, y dado que este tipo de aerogeneradores se encuentran cercanos a la superficie no llegan a producir mucha potencia.

Existen dos tipos de generadores de eje de rotación vertical, son el Darrieus Figura 6 b) y el Savonius Figura 6a), aunque también se pueden ver combinados. El primero es a su vez conocido como generador de “sustentación” o de lift, mientras que los segundo de

“resistencia” o de drag. Estos últimos tienen menor eficiencia ya que tienen más pérdidas por fricción.



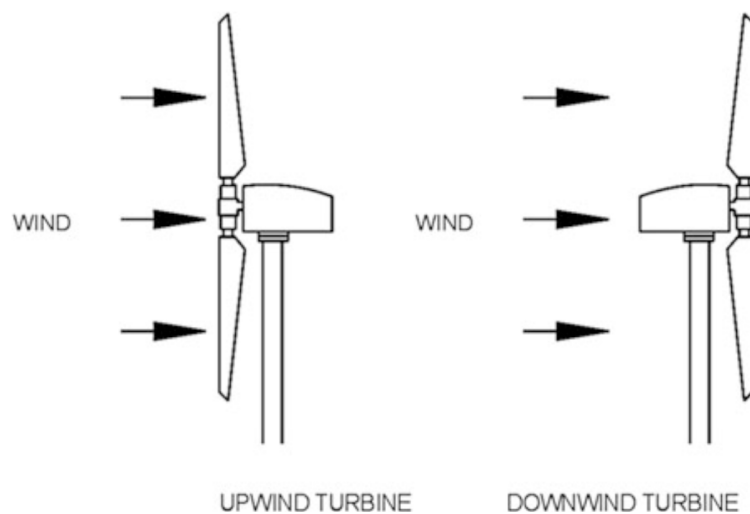
*Figura 6: Tipos de aerogeneradores de eje vertical, [4].*

Este tipo de modelo de generadores presentan algunas ventajas e inconvenientes. Se puede prescindir de torre pues están ubicados en el suelo, donde se encuentra al generador y la multiplicadora. Otro punto que destacar es que no es necesario hacer uso de un sistema de orientación para ubicar la góndola de cara al viento. Sin embargo, existen inconvenientes como el mencionado anteriormente, funcionan a velocidades menores y sobre todo en la parte más cercana al suelo. Este tipo de generadores, además, necesita un pequeño empujón para comenzar a funcionar y cables guía para sustentarlo.

- Turbinas de eje horizontal

Actualmente son más utilizados a diferencia que los de eje vertical, ya que tienen un mayor aprovechamiento del viento y han demostrado que se pueden seguir mejorando, consiguiendo aerogeneradores capaces de producir potencias mayores. Se pueden distinguir dos formatos, a barlovento o a sotavento, que depende de cómo se posicione el rotor respecto a la torre.

Las turbinas horizontales a barlovento, o upwind Figura 7 a), tienen ese nombre ya que el viento lo primero que encuentra es el rotor aerodinámico en lugar de la torre. Este tipo de aerogeneradores necesitan ser orientados, ya sea por una veleta, para tamaños pequeños de pala o por un sistema de orientación como es el control de guiñada. La gran mayoría de turbinas están diseñadas de esta forma ya que tienen mayor eficiencia porque apenas presentan interferencias aerodinámicas con la torre.



*Figura 7: a) aerogenerador a barlovento, b) aerogenerador a sotavento.[1]*

En cambio, las turbinas de eje horizontal a sotavento Figura 7 b) tienen la ventaja de poder prescindir de un mecanismo de orientación de la góndola gracias a su diseño y también pueden optar a incorporar un rotor más flexible que ayuda a resistir los vientos más fuertes. Sin embargo, existen fluctuaciones de la energía eólica debidas a que el rotor atraviesa la sombra del viento de la torre.

La configuración de la turbina entre sotavento o barlovento está íntimamente relacionada con el sistema de orientación, como se ha comentado y por tanto con su mecanismo. Se pueden distinguir dos tipos. Uno activo, donde es necesario el uso de motores para llevar a cabo la acción y colocar la góndola en su posición óptima. Estos se pueden encontrar en las turbinas a barlovento. Por otro lado, están los pasivos que no necesitan el uso de motores ya

que siguen al viento directamente. Se pueden encontrar en las turbinas de sotavento de dimensiones pequeñas.

#### ***2.2.2.2 Según número de palas***

Dentro de los aerogeneradores cuyo eje de rotación es horizontal se pueden encontrar turbinas con números de palas diferentes de tres, que es el más utilizado.

En las turbinas modernas se suele utilizar un número impar de palas, ya que sus propiedades dinámicas son más parecidas a las de un disco y por tanto más estable. Un número par de palas en una estructura rígida podría causar problemas no deseados.

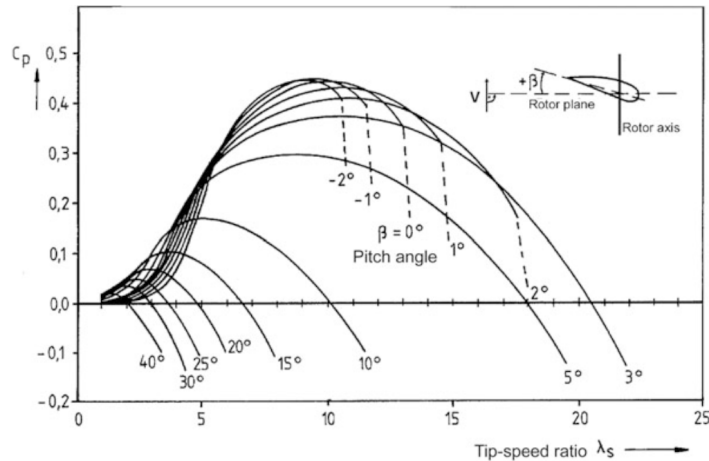
Los diseños bipala presentan ventajas e inconvenientes. Destaca la reducción del coste del aerogenerador como consecuencia de reducir una pala, y a su vez el peso que esta conlleva. Sin embargo, este tipo de turbinas no están tan apreciadas en el mercado eléctrico pues necesitan girar a velocidades mayores para conseguir producir la misma cantidad de energía. Derivado del incremento de velocidad, aumenta el ruido y el impacto visual.

Para definir mejor las características de una pala, se compara el coeficiente de potencia  $C_p$  con el TSR. La velocidad específica, Tip Speed Ratio TRS, o también conocida como  $\lambda$ , según [2] es: “la relación entre la velocidad tangencial en el extremo de la pala y la velocidad del viento a la entrada del tubo de flujo”.

$$\lambda = \frac{v_t}{v_1} = \frac{\Omega * R}{v_1}$$

La Figura 8, muestra que para cada ángulo de sustentación  $\beta$  existe una relación de velocidad de punta  $\lambda$  que corresponde al coeficiente de máxima potencia. Cuando  $\lambda$  es pequeño, la velocidad tangencial también lo es y en consecuencia aumenta el ángulo de ataque  $\alpha$ . Si llega a superar un ángulo crítico el flujo pasa a ser turbulento que conlleva una pérdida de fuerza de sustentación y un aumento de la resistencia hasta llegar a condición de pérdida. En cambio, si  $\lambda$  es grande la fuerza de elevación alcanzará su valor máximo y luego disminuirá, entrando en condición “de fuga”. Esta situación se da cuando las palas giran a

una gran velocidad convirtiéndose en una pared para el viento. En vez del viento cruzar el área de barrido de las palas, este las esquiva y como consecuencia se produce una anulación de la potencia extraída.



*Figura 8: Relación Tip-Speed ratio y  $C_p$ . [1]*

Si se mantiene el ángulo de sustentación  $\beta$  constante se comprueba que hay un único valor de  $\lambda$  donde se puede extraer la máxima potencia posible del viento, siendo este punto el  $C_p$  máximo para cada pala. La curva  $\lambda - C_p$  depende del tipo de generador ya sea por número de palas o disposición del eje de rotación como se puede ver en la Figura 9.



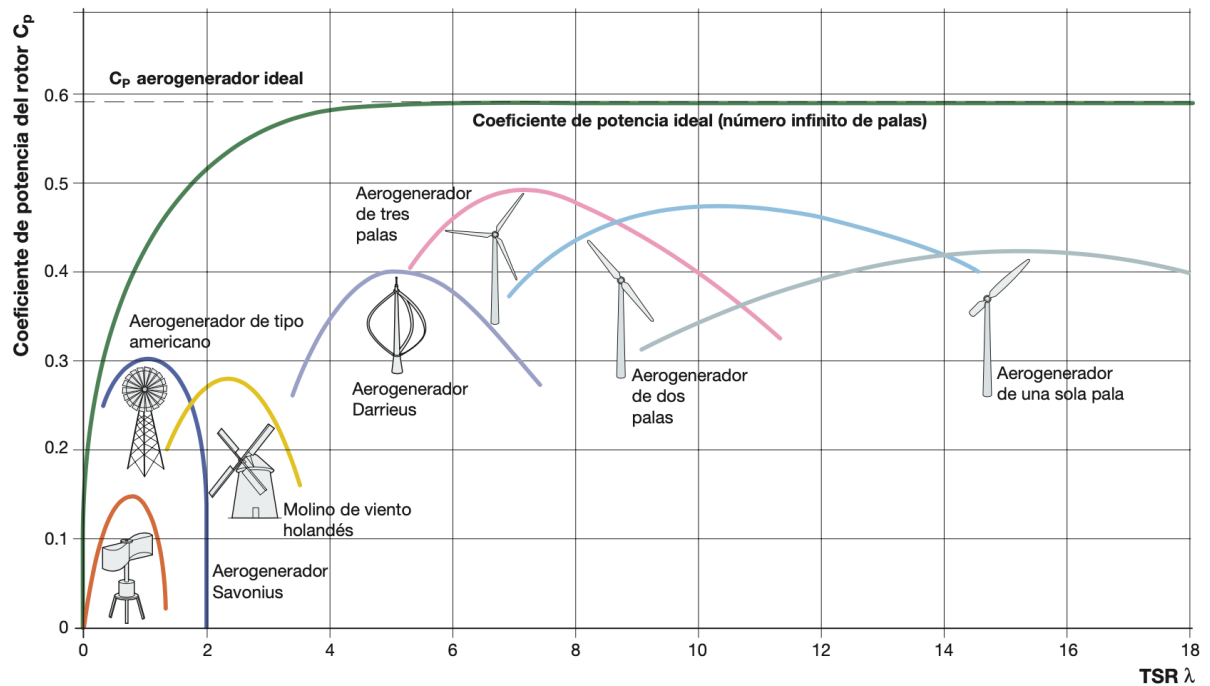


Figura 9: Curva  $\lambda - C_p$  para cada tipo de generador. [2]

### 2.2.2.3 Según velocidad de funcionamiento

Como se ha visto tanto en la Figura 8 como en la Figura 9, el rotor del aerogenerador desarrolla su máxima eficiencia para un valor específico de  $\lambda$  de manera que aquellos que funcionen a velocidad fija, excepto cuando la velocidad del viento se corresponde con esa velocidad de punta, operan de forma subóptima. Para mejorar la captación de energía se puede aumentar la velocidad de rotación de manera proporcional a la velocidad del viento consiguiendo que la relación entre  $\lambda - C_p$  sea siempre la óptima, pasando a ser un aerogenerador de velocidad variable.

Para cumplir este objetivo es necesario la interposición de un convertidor de frecuencia entre el generador y la red permitiendo desacoplar el sistema y funcionar a una frecuencia distinta de 50 Hz. Los aerogeneradores de **velocidad variable** tienen una serie de ventajas:

- Poder mantener la máxima eficiencia aerodinámica para velocidades por debajo de la nominal, modificando la velocidad del rotor.
- La reducción de la velocidad del rotor implica una reducción del ruido.

- Puede controlarse la potencia activa y reactiva para mantener factor de potencia unitario.

Los aerogeneradores de **velocidad fija** tienen una serie de limitaciones, pues giran de forma independiente a la velocidad del viento. Su velocidad depende de la frecuencia de la red, el número de polos eléctricos y en caso de haberla, la relación de la multiplicadora.

#### ***2.2.2.4 Según tipo de control realizado***

Se pueden distinguir diferentes estrategias de control de un aerogenerador según a qué velocidad operan. Estas estrategias [2] existen con el objetivo de maximizar la producción energética manteniendo a los componentes que conforman la turbina eólica, dentro de unos límites de velocidad y carga. A su vez pretenden conseguir inyectar una potencia de calidad aceptable y garantizar la seguridad en su funcionamiento.

Los aerogeneradores de velocidad fija, (fixed-velocity), funcionan con control de entrada en pérdida (Stall control) donde es necesario el diseño del perfil alar para que a altas velocidades se desprenda la capa límite entrando de forma gradual en turbulencia, consiguiendo reducir la sustentación.

En un aerogenerador de velocidad variable dependiendo si la velocidad es inferior o superior a la nominal, los objetivos a optimizar varían. En el primer caso, se quiere maximizar la producción de energía trabajando en el punto óptimo de la pala, utilizando el control de par (Torque control) y cuando la velocidad es superior a la nominal, limitar la potencia para que sea cercana a la nominal, haciendo uso del control de ángulo de paso (Pitch control).

El **control de ángulo de paso** se utiliza en aerogeneradores de mayor tamaño, al ser más caro y complejo para aumentar la potencia de manera notable. En situaciones de vientos con altas velocidades las palas se colocan en bandera (paralelas al viento,  $\beta = 90^\circ$ ) para frenar ofreciendo protección. En la Figura 10 corresponde a la línea negra continua, para velocidades superiores a la nominal.

El **control por pérdida aerodinámica** se basa en el desprendimiento de la corriente incidente al perfil alar al superar el ángulo de ataque un cierto valor cuyas consecuencias son: una reducción de la sustentación, un aumento de la resistencia (fuerza que se opone al giro de las palas) y limitación del par en el eje. En la Figura 10 corresponde a la línea discontinua.

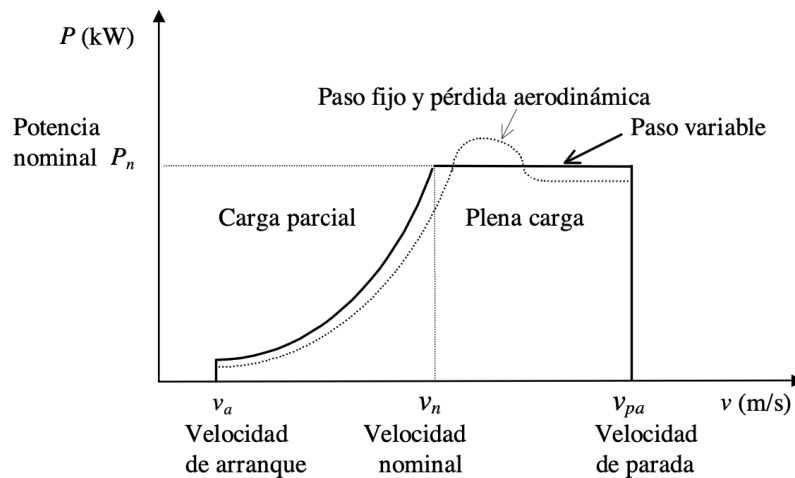


Figura 10: Curvas de potencia según el tipo de control, regulación del ángulo de paso, regulación por pérdida aerodinámica.[6]

## 2.3 TECNOLOGÍAS DE LOS GENERADORES

En este apartado se va a presentar la amplia clasificación de máquinas eléctricas de corriente alterna atendiendo a los criterios según su interacción entre estator y rotor, al igual que la orientación del flujo, donde se distinguen las máquinas de flujo axial y flujo radial.

A continuación, se presenta el análisis de cómo se ha llegado a escoger un generador síncrono de imanes permanentes de flujo radial.

### 2.3.1 TIPOS DE GENERADORES SEGÚN RELACIÓN ENTRE ESTATOR Y ROTOR

Escoger el tipo y diseño del generador correcto es esencial pues influirá en las condiciones de eficiencia, los costes de mantenimiento y funcionamiento, disponibilidad y coste de la energía, [7]. Para escoger un generador en particular es necesario que cumpla una serie de

características como ser ligero, compacto y fácil de instalar. Además, debe ser eficiente en toda la curva de potencia como se ha visto en apartados anteriores, pudiendo funcionar en un amplio abanico de velocidades y pares. Por último, ha de ser fiable y rentable.

### ***2.3.1.1 Máquinas de inducción o asíncronas***

Las máquinas asíncronas, o también llamadas de inducción, reciben este nombre porque el rotor gira a una velocidad distinta que el campo magnético generado, a esta diferencia se le llama deslizamiento y gracias a ello puede llegar a producirse el fenómeno de la inducción.

Se consideran máquinas baratas ya que su precio está concentrado en el cobre de los bobinados. Además, son menos voluminosas que las máquinas síncronas. Sin embargo, no son capaces de generar potencia reactiva haciendo necesaria la utilización de baterías de condensadores. También tienen grandes pérdidas debido a la cantidad de cobre utilizado que hará reducir su rendimiento. Esto afecta negativamente pues no se conseguirá aprovechar toda la potencia extraíble del viento.

Se pueden distinguir dos grandes modelos: jaula de ardilla, caracterizada por tener el rotor en cortocircuito o la máquina asíncrona doblemente alimentada.

### ***2.3.1.2 Máquinas síncronas***

Otra alternativa es hacer uso de las máquinas síncronas donde el rotor gira a la misma velocidad que el campo magnético. Este puede estar generado por fuentes de corriente continua de excitación independiente o por imanes permanentes. Se van a estudiar ambos casos asumiendo que se encuentran aislados de la red mediante electrónica de potencia. De esta manera, consiguen funcionar a velocidad variable y, además, permite un gran control de la reactiva.

Los generadores síncronos con **excitación de rotor bobinado** crean el campo de excitación mediante la circulación de corriente continua por el rotor. Como ya mencionado antes, con estos generadores se puede prescindir de máquina multiplicadora, reduciendo así su coste, su mantenimiento y el ruido que esta produce. Como resultado se obtiene máquinas acopladas directamente a la turbina eólica donde, debido al aumento de número de polos

para mantener la potencia, el rotor girará más lentamente dando lugar a máquinas de mayor tamaño. El aumento de número de polos hace que el paso polar deba ser menor obligando a los polos ganar altura para mantener la sección del conductor. Esto se traduce en un mayor peso de la máquina siendo entonces, más cara.

Los generadores síncronos de **imanes permanentes**, ver Figura 11, son muy similares a los explicados con anterioridad a excepción de que la excitación se realiza mediante imanes muy potentes que sustituyen los devanados del rotor. Como consecuencia, se eliminan los bobinados del rotor y las pérdidas de estos en forma de calor, además de las escobillas y el mantenimiento de estas. Entre otras ventajas, permite construir pasos polares mucho menores. Se pueden llegar a diferenciar tres máquinas según su velocidad de rotación, pero solo se va a entrar en detalle en la opción más interesante, el generador de rotación lenta, el más utilizado para grandes potencias. La máquina va a prescindir de multiplicadora, resultando en una máquina grande y con gran número de polos, haciéndola cara, sobre todo para potencias muy grandes. Es necesario un buen diseño para la colocación de los imanes permanentes que poseen gran densidad de campo para compactar la máquina y conseguir que, a pesar del elevado número de polos, se obtenga un rotor de menores dimensiones. Como resultado, se puede apreciar una reducción del coste aun siendo el precio de los imanes elevados. Otro factor a tener en cuenta será cómo ha de circular el flujo de excitación y como se deben colocar los imanes para conseguir el mayor rendimiento y eliminar posibles efectos no deseados como podría ser el cogging torque.

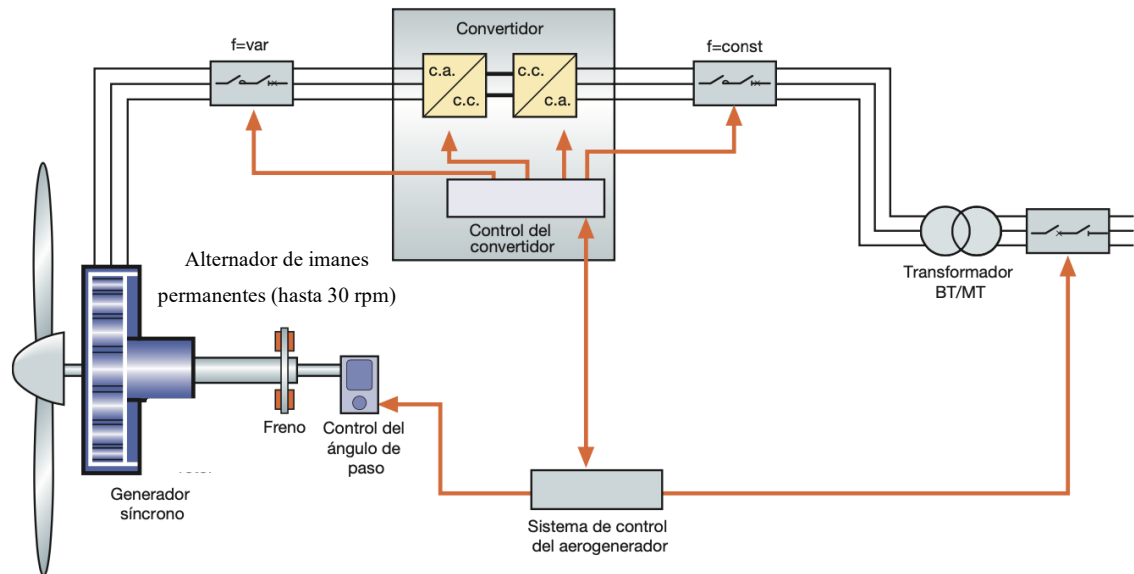


Figura 11: Esquema generador síncrono de imanes permanentes, con electrónica de potencia.[2]

## 2.3.2 TIPOS DE GENERADORES SEGÚN ORIENTACIÓN DEL FLUJO

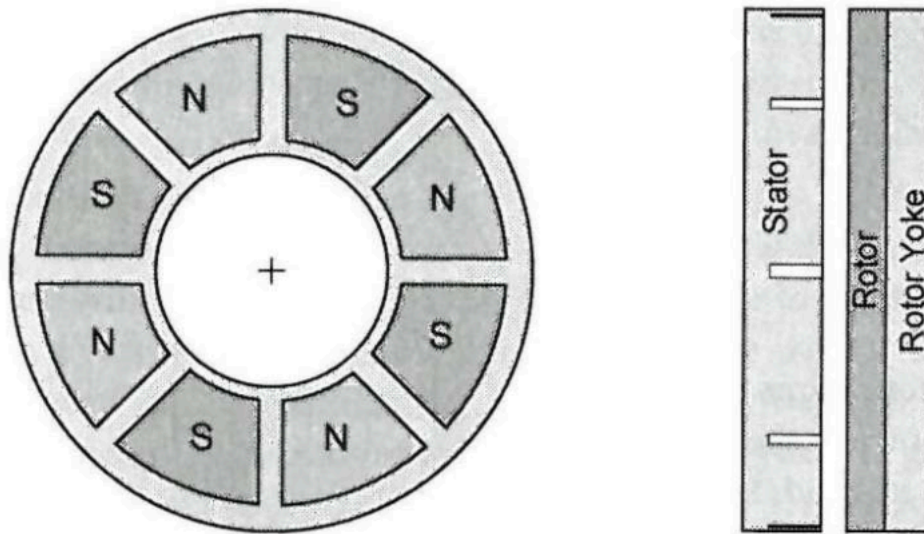
Dentro de las máquinas síncronas de imanes permanentes se pueden distinguir diferentes configuraciones atendiendo a la disposición de los imanes y a la dirección del flujo de excitación.

### 2.3.2.1 Máquinas de flujo axial

El flujo fluye en este tipo de generadores de forma axial, mientras que los devanados están dispuestos de forma radial. Este tipo de generadores no se utilizan frecuentemente debido a que es necesario una compleja construcción sobre todo a la hora de laminar el estator.

Tienen menores pérdidas consiguiendo un mejor rendimiento y con altas densidades de potencia que se recuden según se aumenta el número de polos.

En la Figura 12 se puede ver un generador de flujo axial de cuatro pares de polos, con un solo estator. Hay otras configuraciones que sustituyen el yugo del rotor, (Rotor yoke) por otro estator, haciendo simétrico el generador y mejorando su rendimiento.

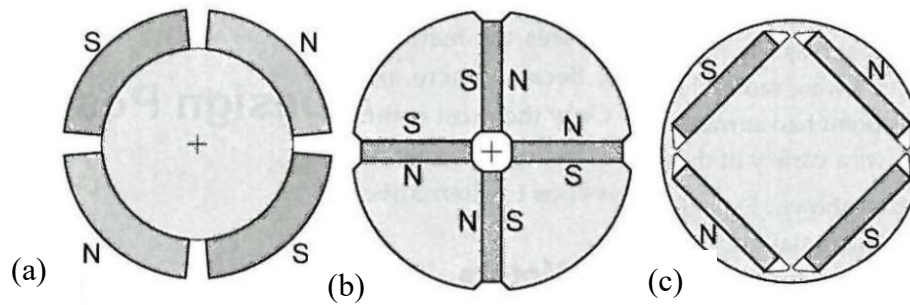


*Figura 12: configuración generador flujo axial, [8]*

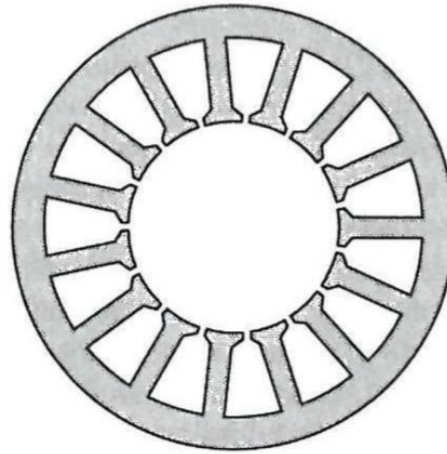
### ***2.3.2.2 Máquinas de flujo radial***

En la mayoría de los motores el flujo atraviesa el entrehierro del rotor al estator de forma radial, donde normalmente el rotor se encuentra en el interior y el estator en el exterior. En la Figura 13 se muestran algunas disposiciones de imanes en el rotor y la Figura 14 una posible configuración del estator. La Figura 13 a) es más utilizada para funcionamiento a bajas revoluciones a diferencia de la Figura 13 c) que es más común en máquinas que operen a altas velocidades. La configuración correspondiente a la Figura 13 b) queda descartada a pesar de favorecer la circulación del flujo en consecuencia del número tan elevado de polos que se espera tener, complicando en exceso el montaje.

En la Figura 14 se presenta una posible configuración del yugo y los dientes del estator, donde en cada ranura irán insertados los devanados del estator.



*Figura 13: colocación imanes para flujo radial [8]*



*Figura 14: Posible estator exterior de un generador de imanes permanentes, [8]*

Se ha escogido este tipo de configuración ya que requieren menor cantidad de material ferromagnético para generar la misma cantidad de flujo que atraviesa el entrehierro.



### 3. DISEÑO PRELIMINAR DEL GENERADOR

#### 3.1 DATOS DE PARTIDA

A lo largo del Capítulo 2 se han analizado los diferentes aspectos en relación con el diseño del generador y se tomaron las siguientes decisiones:

- Se prescinde de multiplicadora, debido a los inconvenientes tanto de mantenimiento como los ruidos producidos, entre otras razones, desembocando en un aumento de los pares de polos y reducción de la velocidad nominal del rotor aerodinámico.
- Se hace uso de electrónica de potencia entre el generador y la red como consecuencia de la reducción de la velocidad. Este elemento reporta como beneficio un aumento del 7% de la potencia extraíble. Donde la tensión máxima del convertidor es 759 V, 1.1 veces la nominal del generador.

La reducción de la velocidad y el uso de un convertidor de potencia permiten desacoplar el generador de la frecuencia de la red, pudiendo operar a menores frecuencias ayudando a reducir los pares de polos. Se quiere diseñar un generador que cumpla los siguientes parámetros y datos preliminares que se recogen en la Tabla 7:

| Magnitud             | Valor      |
|----------------------|------------|
| Potencia             | 5 MW +10 % |
| Tensión              | 690 V      |
| Velocidad nominal    | 12 rpm     |
| Longitud             | 1.3 m      |
| Diámetro entrehierro | 7 m        |
| Pares de polos       | 180        |
| Cos $\phi$           | 0.9        |

*Tabla 7: Datos preliminares*

A continuación, se van a calcular una serie de parámetros base:

- **Frecuencia nominal:** relacionada con la velocidad de rotación eléctrica. Se dispone de 180 pares de polos, y una velocidad de 12 rpm.

$$f = \frac{n_n \cdot p}{60} = \frac{12 \text{ rpm} \cdot 180}{60} = 36 \text{ Hz}$$

- **Intensidad nominal y máxima:** corriente inducida a la tensión nominal cuando se están generando 5 MW con un factor de potencia específico.

$$I_N = \frac{P_N}{\sqrt{3} \cdot U_N \cdot \cos\varphi} = \frac{5 \text{ MW}}{\sqrt{3} \cdot 690 \text{ V} \cdot 0.9} = 4648.6 \text{ A}$$

$$I_{max} = \frac{P_N}{\sqrt{3} \cdot U_N \cdot \cos\varphi} = \frac{5.5 \text{ MW}}{\sqrt{3} \cdot 690 \text{ V} \cdot 0.9} = 5113.41 \text{ A}$$

- **Potencia específica:** Potencia

$$S_N = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_N = \sqrt{3} \cdot 690 \text{ V} \cdot 5113.4 \text{ A} = 6.11 \text{ MVA}$$

- **Par nominal:** par en el eje para generar a 12 rpm la potencia nominal más el 10 %.

$$M_N = \frac{P_N}{2\pi \cdot \frac{f}{p}} = \frac{5.5 \text{ MW}}{2 \cdot \pi \cdot \frac{36 \text{ Hz}}{180}} = 4376.8 \text{ kNm}$$

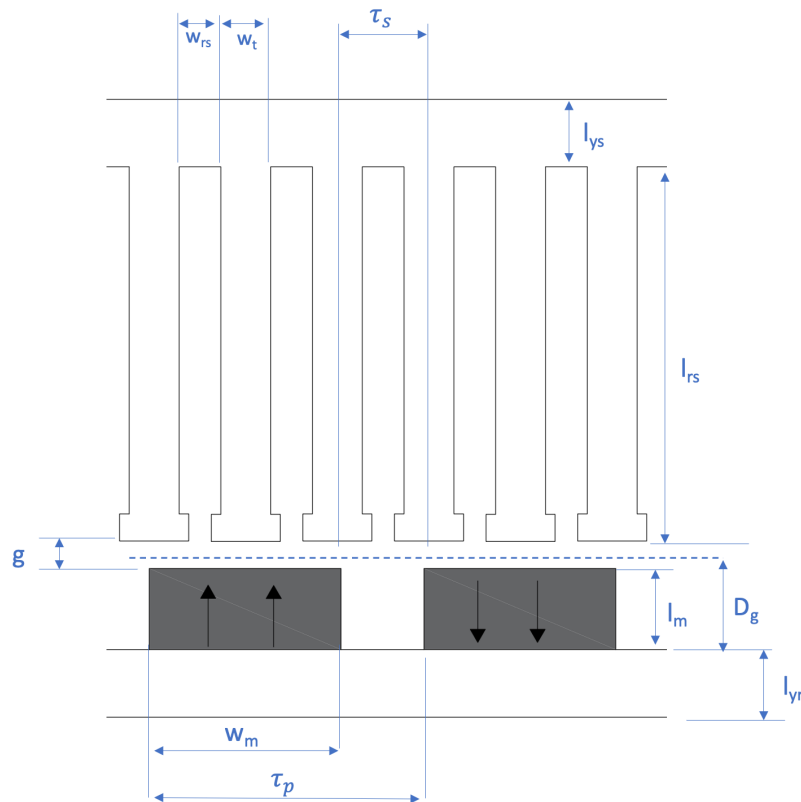
- **Paso polar:** corresponde a la distancia entre dos polos consecutivos. Se calcula como perímetro entre en número de polos totales. Se puede expresar en mm, rad o incluso en ranuras.

$$\tau_p = \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot p} = \frac{\pi \cdot 7}{2 \cdot 180} = 61.0865 \text{ mm}$$

### 3.2 PARÁMETROS DE DISEÑO

En este apartado se van a presentar los parámetros básicos para el diseño del generador donde la obtención de algunos parámetros se detallará en apartados más adelante.

En la Figura 15 se han marcado las dimensiones características más representativas del generador con su símbolo, coincidiendo con un par de polos.



*Figura 15: Parámetros de diseño. (elaboración propia)*

Estas dimensiones están recogidas en la Tabla 8 tanto el valor como con su símbolo y sección en la cual se realiza su desarrollo. Ha de tenerse en cuenta que estos valores corresponden al primer diseño previo a cualquier optimización.

| PARAMETROS                     | SIMBOLO  | VALOR                 | SECCIÓN |
|--------------------------------|----------|-----------------------|---------|
| Diámetro                       | $D_g$    | 7 m                   | 3.1     |
| Longitud                       | $L$      | 1.3 m                 | 3.1     |
| Nº pares polos                 | $p$      | 180                   | 3.1     |
| Paso polar                     | $\tau_p$ | 61.865 mm             | 3.1     |
| Longitud de entrehierro        | $g$      | 6 mm                  | 3.3     |
| Anchura imanes                 | $w_m$    | 42.76 mm              | 3.3     |
| Altura de imanes               | $l_m$    | 18 mm                 |         |
| Altura yugo rotor              | $l_{yr}$ | 18 mm                 |         |
| Altura yugo estator            | $l_{ys}$ | 13 mm                 |         |
| Nº ranuras por polo y fase     | $q$      | 1                     |         |
| paso de ranuras                | $\tau_s$ | 20.3622 mm            |         |
| Altura de ranuras              | $l_{rs}$ | 83 mm                 |         |
| Anchura de ranuras             | $w_{rs}$ | 9.26 mm               | 3.3     |
| Anchura de diente              | $w_t$    | 11.2 mm               |         |
| Ramas en paralelo              | $a$      | 24                    | 5.2     |
| Espiras por fase               | $e_p$    | 15                    | 5.2     |
| Tensión de vacío a 12 rpm      | $E$      | 7.188 V               | 5.2     |
| Intensidad nominal             | $I_n$    | 5113.43 A             |         |
| Densidad de corriente          | $J$      | 3-6 A/mm <sup>2</sup> |         |
| Campo magnético de entrehierro | $B_g$    | 0.8205 T              | 3.4     |

*Tabla 8: Parámetros básicos de diseño*

### 3.3 PROPORCIONES TÍPICAS

Varios de los parámetros de la Tabla 8 están correlacionados, y otros pueden variar en un cierto rango determinado. Según [9], el paso de ranura está relacionado con el ancho de estas, al igual que el ancho del imán con el paso polar.

Un buen valor para el ancho del imán puede rondar en el 70% paso polar  $\tau_p$ , este valor se conoce como  $k_{mag}$  según [15]. Variar este valor nos da diferentes ondas cuadradas del campo  $B_g$  (campo en el entrehierro) como se puede ver en la Figura 16. Mediante las FFT, Fast Fourier Transformation, se puede obtener la descomposición de los armónicos de cada una de las ondas según la disposición de los imanes y sus tamaños.

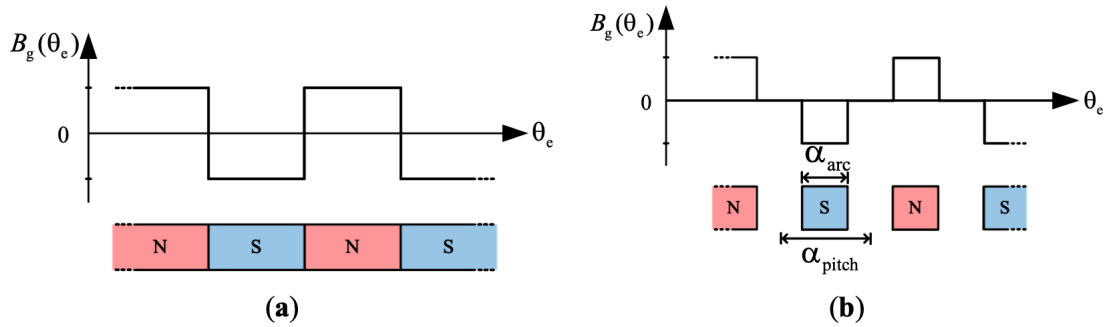


Figura 16: Diferentes ondas cuadradas de campos magnéticos según la anchura de los imanes [10].

$$w_m = 70\% \cdot \tau_p = \frac{70}{100} \cdot 61.0865 = 42.76 \text{ mm}$$

La anchura de las ranuras según [10], se encuentra alrededor del 45% del paso de ranuras. Ya que se fija la anchura del diente al 55% del paso de ranuras.

$$w_{rs} = 45\% \cdot \tau_s = \frac{45}{100} \cdot 20.366 = 9.26 \text{ mm}$$

El entrehierro tiene que ser al menos de 5mm para evitar que por vibraciones estator y rotor choquen. Pero se quiere que sea pequeño para no se quiere que se reduzca el flujo del entrehierro, ni tampoco la tensión inducida en las espiras. El entrehierro se escoge como el 0.86 % del diámetro de entrehierro dando un resultado de 6 mm.

Pero también se debe tener en cuenta una serie de limitaciones:

- La densidad del campo magnético tanto en el yugo del rotor como del estator no debe ser mayor de 1.8 T para reducir la caída de la fuerza magnetomotriz y las pérdidas en el hierro.
- La densidad de corriente (J) en los devanados del estator están limitadas entre 3-6 A/mm<sup>2</sup> y la corriente está limitada entre 40-60 kA/m.

### **3.4 CIRCUITO MAGNÉTICO**

En esta sección se quiere realizar un análisis magnético del sistema de excitación creado por imanes permanentes en el rotor. Se realizará por dos métodos diferentes: primero se estudiará de forma analítica mediante los esquemas de reluctancias del circuito magnético y posteriormente, mediante simulación con procedimiento de elementos finitos. Para esta segunda parte se hará uso del programa de simulación FEMM.

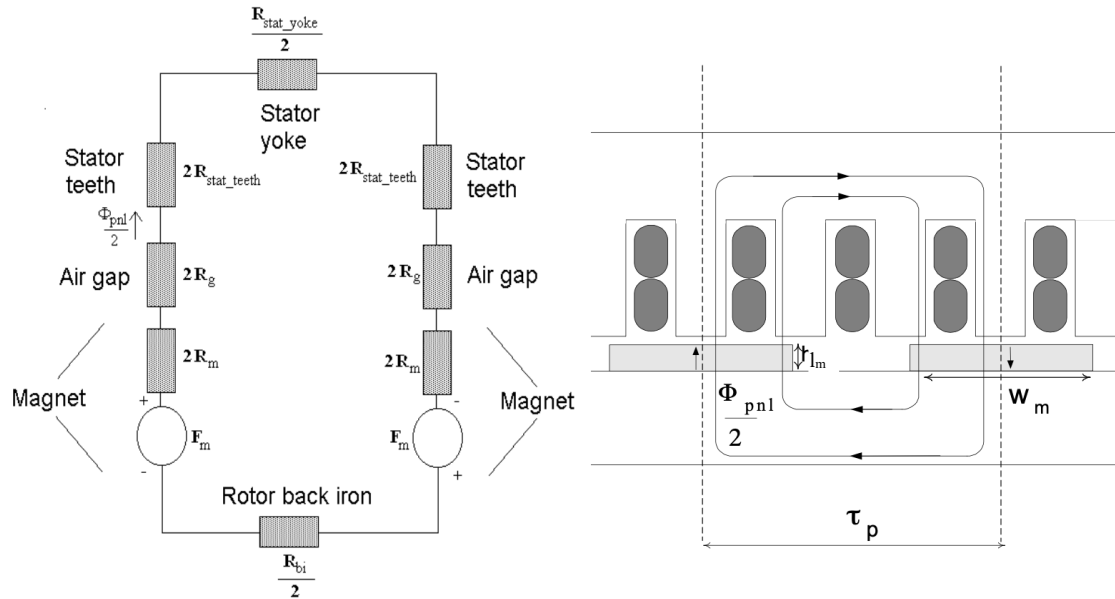
Para estos dos métodos de evaluación se utilizarán unos datos comunes como son las dimensiones especificadas anteriormente, tanto de los imanes como ranuras, así como los yugos rotórico y estatórico. Además, se tomarán como valores típicos 1.05 para la permeabilidad relativa de los imanes, los utilizados son de NdFeB, Neodimio-Hierro-Boro y 1.2 T para el campo remanente,  $B_r$ .

Por último, una vez conocidos los resultados se realizarán una serie de comprobaciones de saturación del material ferromagnético empleado en ambos yugos.

#### **3.4.1 CAMPO MAGNÉTICO EN EL ENTREHIERRO: ESQUEMA DE RELUCTANCIAS**

Para conocer unos valores preliminares del flujo y del campo en el entrehierro se puede optar por una aproximación fácil y realista como es el análisis por un circuito de reluctancias. Lo que se pretende hacer es una similitud a un circuito eléctrico, pero estudiándose en este caso la oposición que presentan las reluctancias al paso del flujo, en lugar de la intensidad por las resistencias. De manera análoga, las tensiones pasan a ser fuerzas magnetomotrices.

El circuito por estudiar se encuentra en la Figura 17 corresponde a un paso polar, de manera que el flujo que atraviesa esta región es la mitad del flujo que atraviesa realmente el entrehierro. Además, se puede observar cómo los imanes se han modelado como una fuerza magnetomotriz en serie con su reluctancia. En relación con la permeabilidad relativa de los imanes se toma como  $\mu_m = 1.05$  y la del material ferromagnético  $\mu_{fe} = 4416$ . Por último, para simplificar los cálculos no se ha tenido en cuenta el flujo de dispersión.



*Figura 17: Circuito equivalente análisis por reluctancias.*

En Tabla 9 se recogen las fórmulas y resultados de las reluctancias y de las fmm. Donde las fórmulas básicas y genéricas son las siguientes, donde luego para cada uno de los parámetros de la tabla se particularizan.

$$\phi = B \cdot L \cdot \tau$$

$$\mathfrak{R} = \frac{l}{\mu \cdot L \cdot \tau}$$

$$\mathfrak{F} = \phi \cdot \mathfrak{R}$$

| PARAMETROS                 | FÓRMULA                                                                                       | VALOR         |
|----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| Reluctancia yugo estator   | $\mathfrak{R}_{ys} = \frac{\tau_p}{\mu_{rfe} \cdot \mu_0 \cdot l_{ys} \cdot L}$               | 564.5103 A/Wb |
| Reluctancia diente estator | $\mathfrak{R}_d = \frac{l_{rs}}{\mu_{rfe} \cdot \mu_0 \cdot ph \cdot q \cdot w_{rs} \cdot L}$ | 414.1556 A/Wb |
| Reluctancia de entrehierro | $\mathfrak{R}_g = \frac{g}{\mu_0 \cdot \tau_p \cdot k_{mag} \cdot L}$                         | 85891.9 A/Wb  |
| Reluctancia del imán       | $\mathfrak{R}_m = \frac{l_m}{\mu_m \cdot \mu_0 \cdot \tau_p \cdot k_{mag} \cdot L}$           | 245406.8 A/Wb |

|                        |                                                                                         |               |
|------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| Reluctancia yugo rotor | $\mathfrak{R}_{yr} = \frac{\tau_p}{2 \cdot \mu_{rfe} \cdot \mu_0 \cdot l_{yr} \cdot L}$ | 235.2126 A/Wb |
| Fuerza Magnetomotriz   | $\mathfrak{F}_m = \frac{B_r \cdot l_m}{\mu_m}$                                          | 16370.0 Wb    |

Tabla 9: Reluctancias y fmms circuito.

Como se puede observar en la Tabla 9, los resultados obtenidos para aquellos elementos que tengan material ferromagnético, su reluctancia es despreciable en comparación con la reluctancia del imán. Esto se debe a la permeabilidad relativa del acero al silicio.

Una vez calculadas las reluctancias, se debe resolver el circuito que se encuentra a la izquierda en la Figura 17, del cual se obtiene la siguiente ecuación para conocer el flujo del entrehierro,  $\phi_g$ :

$$2 \cdot \mathfrak{F}_m = \frac{1}{2} \cdot \phi_g (4 \cdot \mathfrak{R}_m + 4 \cdot \mathfrak{R}_g + 4 \cdot \mathfrak{R}_d + \frac{\mathfrak{R}_{ys}}{2} + \frac{\mathfrak{R}_{yr}}{2})$$

Los valores obtenidos del flujo y el campo en el entrehierro se muestran en la Tabla 10.

| Magnitud                | Valor     |
|-------------------------|-----------|
| Flujo en el entrehierro | 0.0493 Wb |
| Campo en el entrehierro | 0.8808 T  |

Tabla 10: Resultados campo y flujo en el entrehierro.

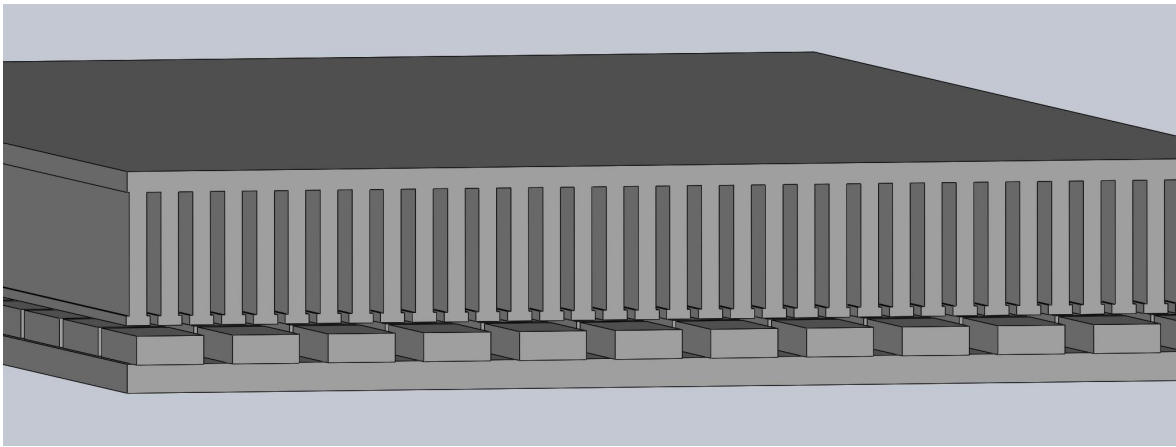
Se quiere conocer el valor de pico del valor de B, [15] obtenido según la siguiente fórmula, donde  $k_{mag}$  representa un coeficiente fijo de valor 0.7 que hace referencia al ancho de los imanes y por tanto a la distribución del campo en el entrehierro.

$$\hat{B}_1 = \frac{4}{\pi} \cdot B_g \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot k_{mag}\right) = \frac{4}{\pi} \cdot 0.8074 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot 0.7\right) = 0.992 \text{ T}$$



### 3.4.2 CAMPO MAGNÉTICO EN EL ENTREHIERRO: SIMULACIÓN CON FEMM

Se quiere realizar el mismo análisis que en el apartado 3.4.1 pero empleando un software para el análisis por elementos finitos llamado FEMM, Finite Element Method Magnetics. Con este programa se pueden resolver problemas en 2D planos y asimétricos de magnetismo y electrostática de baja frecuencia.



*Figura 18: Pieza 3D, realizada en Solid Works, para la simulación del campo magnético creado por imanes permanentes*

Para resolver el problema hace uso de la siguiente ecuación, sacada del manual de usuario del programa, [13]:

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu_{eff} * B} \nabla \times a \right) = -jw\sigma a + \hat{j} - \sigma \nabla V$$

Donde J representa las fuentes de corriente externas, que el caso de estudio es nulo.  $\nabla V$  es un termino adicional de gradiente de tensión, se utiliza en algunos problemas para limitar la corriente transportada, pero al tratarse de un problema en 2D donde no hay paso de corriente, es cero. Por último, w representa la velocidad relativa del sistema siendo esta nula, quedando así la ecuación:

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu_{eff} * B} \nabla \times a \right) = 0$$

Para el diseño 3D de la geometría del generador a estudiar se utilizó Solid Works Figura 18 y más tarde pasarla a formato .DXF convirtiéndose en un diseño 2D y se importó al software de análisis de flujo magnético.

Los materiales utilizados para realizar la simulación fueron los siguientes:

- Acero al silicio M-19 con  $\mu_{fe} = 4416 \cdot \mu_0$ , se puede ver en la Figura 19 y en la Figura 20, la curva BH del material.

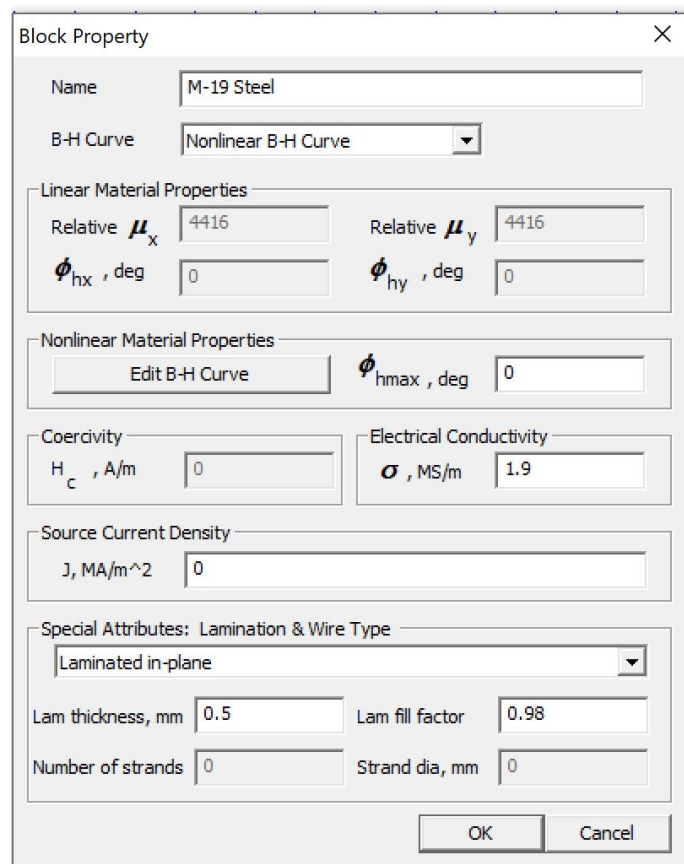
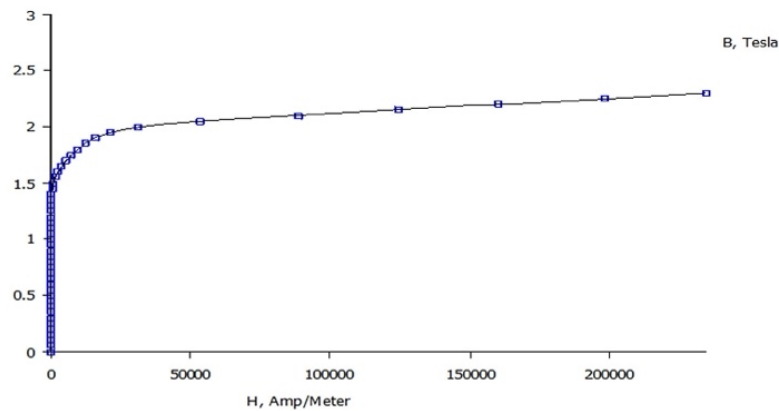


Figura 19: Captura propiedades del material ferromagnético.

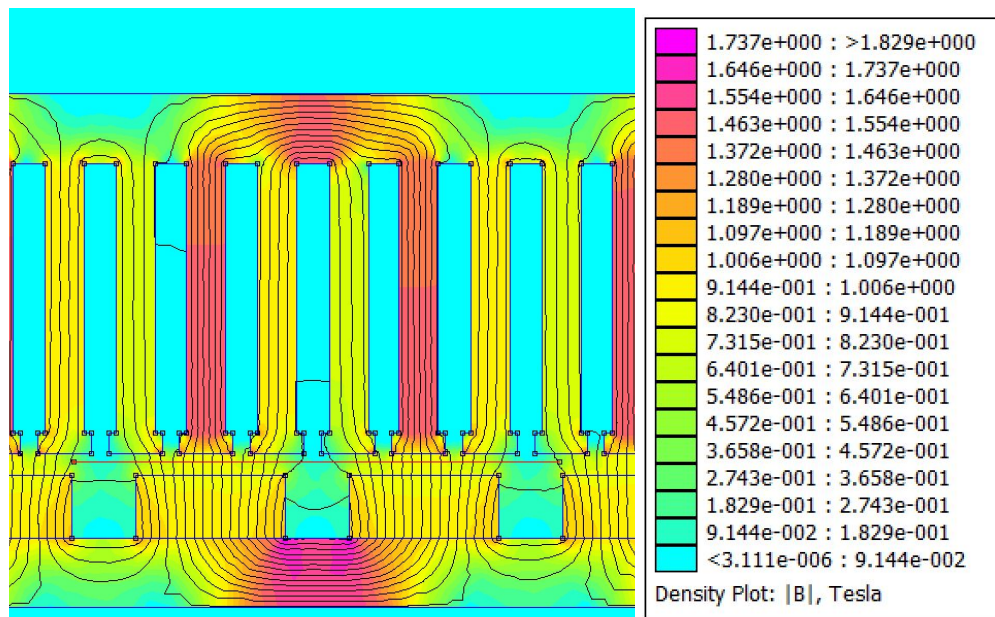


*Figura 20: Curva BH del material ferromagnético*

- Imanes de Nd-Fe-B, N38 con  $\mu = 1.05 \cdot \mu_0$  cómo se puede observar en la Figura 21

*Figura 21: Captura propiedades imán*

En la Figura 22 se muestra la solución de la simulación donde se puede ver la distribución del flujo de campo magnético en las distintas partes que conforman el generador, y las líneas de campo.

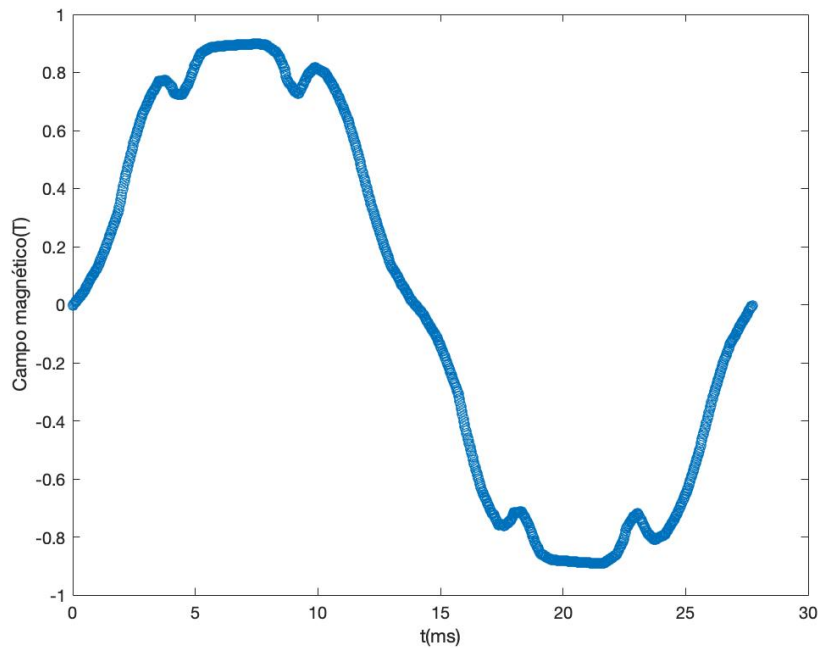


*Figura 22: Resultado de la simulación con FEMM, distribución del campo magnético*

El programa devuelve el campo B respecto del espacio, siendo este un contorno que envuelve a dos polos. Una vez pasados los datos a Excel donde se escogen aquellos que hagan cumplir un periodo completo, se exportan a Matlab.

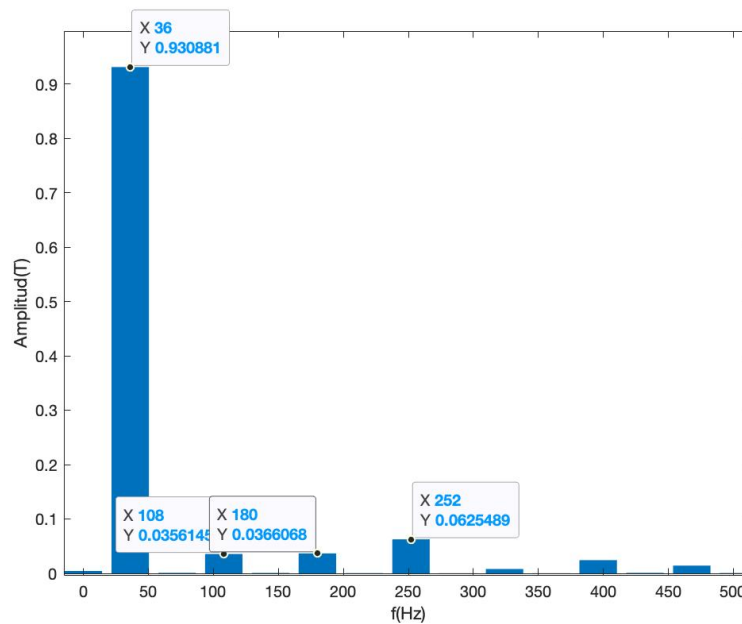
Se quiere conocer los armónicos que conforman la onda, pero primero es necesario pasarla al dominio del tiempo. Para ello se hace uso de un factor que pasa los valores de posición a tiempo. Sabiendo que  $x=v \cdot t$ , se despeja el tiempo y se sustituyen los valores de velocidad lineal y espacio. De los datos nominales se conoce el valor la velocidad de rotación: 12 rpm.

Sin embargo, se quiere la velocidad lineal con la que las espiras ven moverse los imanes. Habrá que pasarla como  $v=w \cdot R$ , siendo R el diámetro del entrehierro, también conocido.



*Figura 23: Campo magnético en el entrehierro frente al tiempo.*

Ya obtenida la onda del campo magnético frente al tiempo Figura 23, se puede descomponer mediante la FFT obteniendo los armónicos que la conforman como se observa en la Figura 24.



*Figura 24: Composición de armónicos de la onda del campo magnético*

Se quiere comparar este último análisis mediante simulación con el realizado anteriormente mediante el modelo de reluctancias. Para ello se van a comprar los valores obtenidos de campo de pico respecto al armónico fundamental.

Se tomará como valor del campo de ahora en adelante el valor de campo de pico del primer armónico de la simulación, que se puede observar en la Figura 24 y coincide con 0.9309 T. Este valor tiene sentido que sea menor que el calculado por el método de reluctancias ya que para facilitar el cálculo se despreció el campo de dispersión.

### 3.5 COMPROBACIÓN DE SATURACIÓN

Una vez acabada la simulación se debe comprobar que los parámetros están dentro de unos límites, como que no superan el B máximo lineal y que no pasan a la zona de saturación. Si el campo es muy elevado el material se satura, se puede ver en la Figura 20, para valores superiores de 1.5 T. Que el campo se encuentre en esta zona implica que las intensidades que circulan por el material ferromagnético son muy elevadas produciendo mayores pérdidas, calentamiento y desgaste reduciendo la vida útil de la máquina. Por ello se va a comprobar que tanto el material que conforma el rotor como el estator no entran en saturación. Las siguientes fórmulas para analizar la saturación de se han obtenido de [14].

Se ha obtenido  $B_g$ , el valor eficaz del campo y coincide con el valor de 0.8205 T.

Se comprueba la saturación del **yugo del estator**:

$$\hat{B}_{ys} = \frac{\hat{B}_1}{\pi} \cdot \frac{\tau_p}{l_{ys}} = \frac{0.9309}{\pi} \cdot \frac{0.06011}{0.015} = 1.2067 \text{ T} < 1.8 \text{ T}$$

Se comprueba la **saturación en los dientes**:

$$\hat{B}_d = B_g \cdot \left(1 + \frac{w_{rs}}{w_d}\right) = 0.8205 \cdot \left(1 + \frac{0.0926}{0.0112}\right) = 1.499 \text{ T} < 1.8 \text{ T}$$

## **4. DISEÑO DEL ROTOR**

En este capítulo se quiere diseñar el rotor, el cual está formado por dos componentes ambos principales: el yugo, común a todas las máquinas y sobre el que se colocan los elementos de excitación. En el caso de estudio pertinente, estos elementos de excitación hacen referencia a los imanes permanentes, que son el segundo elemento por diseñar.

### **4.1 YUGO DEL ROTOR**

El yugo del rotor es un cilindro hueco formado por la unión de láminas de material ferromagnético hasta la longitud axial establecida en los datos preliminares. Es necesario laminar el yugo tanto del rotor y como del estator, este último se analizará más adelante, ya que la variación del campo magnético en un material ferromagnético da lugar a tensiones inducidas en el propio material y, al ser conductor eléctrico, a que circulen corrientes de Foucault o Eddy currents. Estas circulaciones de corrientes hacen que se disipe energía en forma de calor por efecto Joule ( $P = I^2 \cdot R$ ). Como la potencia disipada es proporcional al cuadrado de la intensidad, las pérdidas de Foucault son proporcionadas al cuadrado de la frecuencia.

Los materiales ferromagnéticos también pueden tener pérdidas por histéresis, derivadas de las irreversibilidades de las curvas B-H. Los materiales que tienen histéresis tienen “memoria del material”, esto quiere decir que la energía almacenada en un sentido del recorrido no coincide con la que se devuelve si se recorre en el sentido opuesto. Aparecen más pérdidas a causa de estas irreversibilidades, en forma de calor disipado. La cantidad de calor expulsado depende de las irreversibilidades del ciclo de histéresis siendo este diferente para cada material.

En este apartado se va a escoger el material ferromagnético intentando minimizar las pérdidas tanto de histéresis como las de Foucault.

Según [15], la adición de entre el 0.5% hasta el 3.25% de Silicio al Acero incrementa la resistividad del material reduciendo las Eddy currents y mejorando la magnetización en las curvas B-H de aceros bajos en carbono. Sin embargo, aumenta la dureza de las laminaciones y, en consecuencia, acorta la vida útil del utillaje de estampación.

Este tipo de material ferromagnético, Acero al Silicio, suele clasificarse según las pérdidas específicas admisibles en el núcleo (W/Kg, o W/lb). Por ejemplo, el material de clasificación M-19 está relacionado con las pérdidas máximas que debería tener siendo estas inferiores a 1.9 W/lb (sistema americano) cuando se encuentra sometido a un campo de 1.5 T a la frecuencia de 60 Hz. Además, es de los materiales que menores pérdidas origina en el núcleo y también es el más utilizado en control de movimiento.

A continuación, se muestra una tabla sacada de [15] para las distintas designaciones según europeos, americanos, rusos o japoneses.

| Europe<br>IEC 404-8-4<br>(1986) | U.S.A.<br>AISI | Japan<br>JIS 2552<br>(1986) | Russia<br>GOST 21427<br>0-75 |
|---------------------------------|----------------|-----------------------------|------------------------------|
| 250-35-A5                       | M 15           | 35A250                      | 2413                         |
| 270-35-A5                       | M 19           | 35A270                      | 2412                         |
| 300-35-A5                       | M 22           | 35A300                      | 2411                         |
| 330-35-A5                       | M 36           | —                           | —                            |
| 270-50-A5                       | —              | 50A270                      | —                            |
| 290-50-A5                       | M 15           | 50A290                      | 2413                         |
| 310-50-A5                       | M 19           | 50A310                      | 2412                         |
| 330-50-A5                       | M 27           | —                           | —                            |
| 350-50-A5                       | M 36           | 50A350                      | 2411                         |
| 400-50-A5                       | M 43           | 50A400                      | 2312                         |
| 470-50-A5                       | —              | 50A470                      | 2311                         |
| 530-50-A5                       | M 45           | —                           | 2212                         |
| 600-50-A5                       | —              | 50A600                      | 2112                         |
| 700-50-A5                       | M 47           | 50A700                      | —                            |
| 800-50-A5                       | —              | 50A800                      | 2111                         |
| 350-65-A5                       | M19            | —                           | —                            |
| 400-65-A5                       | M27            | —                           | —                            |
| 470-65-A5                       | M43            | —                           | —                            |
| 530-65-A5                       | —              | —                           | 2312                         |
| 600-65-A5                       | M45            | —                           | 2212                         |
| 700-65-A5                       | —              | —                           | 2211                         |
| 800-65-A5                       | —              | 65A800                      | 2112                         |
| 1000-65-A5                      | —              | 65A1000                     | —                            |

*Figura 25: Designaciones según país o continente de Aceros al Silicio. Fuente: “Advancements in Electric Machines”, [15]*



Como se puede observar en la Figura 25 aparece tres veces la designación M-19 en el sistema americano, al contrario que la designación europea que varía para cada uno de ellos según el grosor de la lámina: 0.35, 0.50 o 0.65 mm.

Como en el apartado 3.4.2 se va a seleccionar el acero al silicio correspondiente a un M-19, y más concretamente el 310-50-A5, al tener las segundas menores pérdidas máximas de entre los M-19 de diferentes grosores. Aunque realmente el factor más decisivo es la necesidad de tener un número entero de láminas, ya que con 0.35mm no se conseguía. Se adjunta en el Anexo I el catálogo de Arcelor Mittal, las pérdidas específicas para cada uno de los distintos tipos de aceros “eléctricos” que se encuentran en la sección propiedades magnéticas.

Por último, el número total de láminas para fabricar ambos yugos, el del estator y el del rotor. El material escogido es el 310-50-A5 que se dispone en láminas de 0.50 mm y siendo la longitud axial L igual a 1.3 m, serán necesarias 2600 láminas.

## **4.2 IMANES**

Los imanes permanentes PM producen flujo magnético en un entrehierro sin la necesidad de una fuente de excitación y sin disipar energía eléctrica. Como cualquier otro material ferromagnético tiene su ciclo de histéresis. A estos imanes se les conoce con el nombre de “materiales magnéticos duros”, que quiere decir que su ciclo es bastante ancho en comparación con otros materiales.

Los imanes como ya mencionado en apartados anteriores se disponen alrededor del yugo del rotor, a lo largo de la superficie exterior. En un principio se cuenta con 360 imanes, coincidiendo con el número de polos totales como es de esperar.

Los imanes como se explicó en el apartado 3.3 tendrán una altura de 18 mm y una anchura de 42.76 mm, quedando por concretar que profundo. Se debe asumir que es poco probable encontrar en el mercado un imán cuya profundidad coincida con la longitud axial del generador, 1.3 m de longitud, que hace necesario optar por imanes de menor tamaño. Para

conseguir la longitud total axial se van a seleccionar 13 imanes de 100mm de longitud optando por una medida normalizada.

En resumen, se necesitarán un total de 4680 imanes cuyas dimensiones serán 42.76 x 18 x 100.mm.

#### 4.2.1 ELECCIÓN DE LOS IMANES

Previo a la selección de los imanes es importante conocer una serie de parámetros y conceptos en orden para la correcta elección de este.

- **Punto de saturación:** se quiere que sea lo más grande posible para que en condiciones normales el imán no sature, nunca pudiendo superar a la saturación del material ferromagnético del yugo.
- **Magnetismo remanente:** A mayor magnetismo remanente mayor la tensión que se induce en las espiras del estator. Este valor, ya visto antes, coincide con el valor mínimo al cual se establece el imán una vez haya alcanzado el punto de saturación.
- **Fuerza coercitiva:** indica el valor de las intensidades externas necesarias para desmagnetizar el imán. Interesa que sea lo mayor posible para que no sea tarea fácil desmagnetizarlo.
- **Temperatura máxima:** No se recomienda alcanzar temperaturas muy elevadas ya que puede provocar vibraciones en los imanes que cambien sus propiedades e incluso llegar a desmagnetizarlos. En consecuencia, se buscan imanes cuya temperatura de Curie sea lo más elevada posible para que en caso de trabajar a altas temperaturas no tenga un efecto negativo sobre los imanes.

En la siguiente Figura 26 se pueden comparar los distintos tipos de imanes permanentes más utilizados según su uso en las diferentes máquinas eléctricas respecto a las características descritas.

|                                                                                                                                                                   | Ferrite   | Alnico | SmCo        | NdFeB        |              |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|--------|-------------|--------------|--------------|
| Property                                                                                                                                                          | Ceramic 8 | Alloy  | Sm2Co17     | Bonded       | Sintered     |
| $B_r$ , T                                                                                                                                                         | 0.4       | 1.25   | 1.0 to 1.1  | 0.55 to 0.70 | 1.25 to 1.35 |
| $H_c$ , kA/m                                                                                                                                                      | 270       | 55     | 600 to 800  | 180 to 450   | 950 to 1040  |
| $iH_c$ , kA/m                                                                                                                                                     | 260       | 55     | 720 to 2000 | 210 to 1100  | 1200 to 1400 |
| $(BH)_{max}$ , kJ/m <sup>3</sup>                                                                                                                                  | 25 to 32  | < 44   | 190 to 240  | 32 to 88     | 290 to 400   |
| $\alpha_B$ , %/ <sup>o</sup> C                                                                                                                                    | -0.20     | -0.02  | -0.03       | -0.105       | -0.11        |
| $\alpha_H$ , %/ <sup>o</sup> C                                                                                                                                    | -0.27     | -0.015 | -0.15       | -0.4         | -0.65        |
| $T_c$ , <sup>o</sup> C                                                                                                                                            | 460       | 890    | 800         | 360          | 330          |
| $\alpha_B$ is the reversible temperature coefficient of $B_r$ .<br>$\alpha_H$ is the reversible temperature coefficient of $H_c$ .<br>$T_c$ is Curie temperature. |           |        |             |              |              |

*Figura 26: Cuadro comparativo de distintos imanes permanentes, [15]*

Se quiere que el campo remanente sea lo mayor posible para que las tensiones inducidas también lo sean, de manera que siguiendo este criterio son interesantes los PM Alcalinos y los NdFeB sinterizados, Neodinio-Hierro-Boro. En segundo lugar, se analiza la fuerza coercitiva,  $H_c$  donde interesa que sea elevada con lo cual se seleccionan los PM de NdFeB. Además, otro valor que apoya la decisión tomada es el producto energético, que de nuevo es mayor que los imanes alcalinos.

### **4.3 DISPOSICIÓN SESGADA DE LOS IMANES Y COGGING TORQUE**

La energía off-shore es una tecnología en desarrollo lo que implica que todavía tiene un alto coste y que es necesario buscar maneras de reducirlo sin llegar a comprometer su funcionamiento. Uno de los costes más significativos es el mantenimiento, que aumenta mucho su valor con respecto a la tecnología gemela en tierra, al necesitar de medios de transportes e instrumentación muy específicos. En el capítulo dos, se concluye que se prescinde de multiplicadora aportando una serie de ventajas, como reducir el mantenimiento ya que es el elemento que más lo requiere, y otra serie de desventajas, como un aumento del número de polos del generador y su consecuente aumento de dimensiones. También, destaca la reducción notoria de la velocidad que, como todo, aporta beneficios y pérdidas. Al reducir la velocidad se puede funcionar a frecuencias menores reduciendo las pérdidas en el hierro. Sin embargo, esta reducción de la frecuencia tiene repercusiones sobre el par, creando un

rizado de este provocado por la atracción magnética entre los imanes y los dientes que se encuentran en el estator al intentar alinearse, [8].

Este rizado de par aparece siempre que el flujo atraviesa una reluctancia variable y se le conoce como cogging torque, o par de torsión, dado que lo que se busca es un par constante que, de un movimiento mecánico suave, las componentes parásitas deben intentar reducirse al máximo.

$$T_{cog} = -\frac{1}{2} \cdot \phi^2 \cdot \frac{dR}{d\theta}$$

Existen diferentes maneras de ayudar a reducir este par no deseado realizando pequeñas modificaciones tanto en el rotor como en el estator:

- Añadir zapatas a los dientes del estator para reducir la variación de la reluctancia, al disminuir la distancia de entrehierro.
- Reducir el ancho de las ranuras dentro de un límite ya que es necesario insertar las bobinas que formarán el devanado.
- Distribuir los imanes para que la reluctancia deje de ser variable y se mantenga igual o lo más parecida posible. Esto se hace distribuyendo los imanes sobre la superficie del imán de manera sesgada, desplazando cada fila de imanes (13 imanes para cumplir la longitud axial) un paso de ranura. De manera que si se tienen 13 imanes y el principio del primero debe estar separada la distancia correspondiente a un  $\tau_s$  con respecto al final del último imán en la longitud axial. La distancia de separación entre un imán y su consecuente es  $\tau_s$  entre 13 imanes igual a 1.6 mm.

## 5. DISEÑO DEL ESTATOR

El estator es el elemento fijo de una máquina eléctrica rotativa en el cual se pueden diferenciar dos partes:

- La armadura hecha de material ferromagnético donde se puede distinguir del yugo y las ranuras.
- El devanado por las distintas bobinas de cobre en las cuales se inducen tensiones e intensidades.

### 5.1 ARMADURA

#### 5.1.1 YUGO DEL ESTATOR

Se utilizará acero al silicio M310-50-A5, o que es o mismo M-19 como en el utilizado en el yugo del rotor. Al igual que este último es necesario laminarlo siendo necesario utilizar 2600 láminas de acero al silicio.

La altura del yugo en un principio se tomó como 13 mm, pero se incrementó a 15 mm para reducir su saturación.

Además, como se trata de generador in-runner, el rotor es interior y el estator exterior, según [18], el estator ha de ser separable por tener un diámetro superior a un metro, con el inconveniente de añadir pérdidas en los módulos en los que se divide.

#### 5.1.2 RANURAS

Según el número de ranuras por fase y por polo se puede distinguir diferentes tipos de devanados que repercuten en el comportamiento eléctrico del generador.

$$q = \frac{\text{número de ranuras por paso polar}}{\text{número de fases}} = \frac{3}{3} = 1$$

- **Devanado concentrado ( $q < 1$ ) con  $q$  fraccionario:** En este tipo de devanados se tiene menos de una ranura por fase y por polo lo que facilita su montaje siendo entre todos los tipos posibles el más sencillo. Sin embargo, tiene altas pérdidas por corrientes parásitas al tratarse de un diseño todavía en proceso de investigación.
- **Devanados distribuidos ( $q > 1$ ):** caracterizado por tener más de una ranura por fase y polo. Este tipo de configuración tiene ventajas como la reducción de los armónicos, al igual que con el rizado de par, donde se consiguen menos vibraciones. Pero por el contrario tienen unas grandes dificultades constructivas haciendo que no se escojan este tipo configuración para la armadura del estator.
- **Devanado concentrado ( $q=1$ ):** se tiene una ranura para cada fase con respecto a cada polo. Esta configuración apenas reduce el contenido de los armónicos en el estator y tampoco reduce el rizado del par, provocando vibraciones. Pero a pesar de ello, destaca su mayor facilidad de montaje frente a otros devanados. En consecuencia, escogerá esta configuración de ranuras para la armadura del estator.

Otro aspecto que tener en cuenta a la hora de diseñar las ranuras, se intentarán añadir zapatas a estas para que ayude a reducir el par de cogging, visto en el apartado 4.3. Además, estos “zapatos” permiten reducir el contenido armónico del entrehierro y obtener valores mayores del primer armónico. Realmente con ranuras cerradas se conseguiría mejorar en gran medida la disminución de armónicos, pero este tipo de ranuras presenta mucha dificultad a la hora de fabricarse e insertar los devanados quedando esta opción queda descartada.

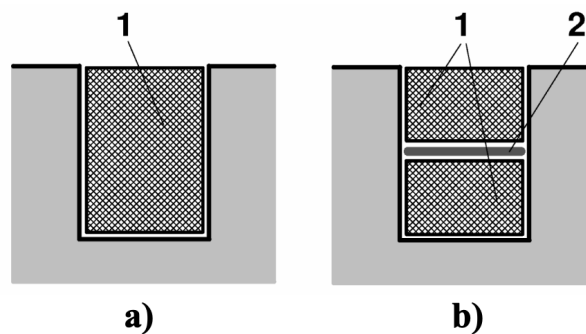
## **5.2 DEVANADOS**

Es este apartado primero se va a realzar un estudio de las alternativas posibles en cuanto a construcción de devanados y una segunda parte de cálculos de la tensión de vacío, número de espiras en serie o en paralelo dependiendo de la configuración y conexión de los terminales de los devanados del estator

### 5.2.1 CONFIGURACIÓN DE LOS DEVANADOS

Los devanados van insertados en las ranuras donde se pueden encontrar de una capa o de dos capas, [17] y [16].

- **Devanado de una capa o de simple capa:** cada ranura posee solo un lado activo de una parte de la bobina. Este tipo de devanado tiene poco acoplamiento de fase mutuo, pero tiene una inductancia de fase mayor. Además, tiene mayores pérdidas en el rotor por tener mayor componente armónica espacial en el estator resultando una tensión inducida menos sinusoidal. En cambio, al tener un solo lado de bobina por ranura su fabricación es mucho más fácil.



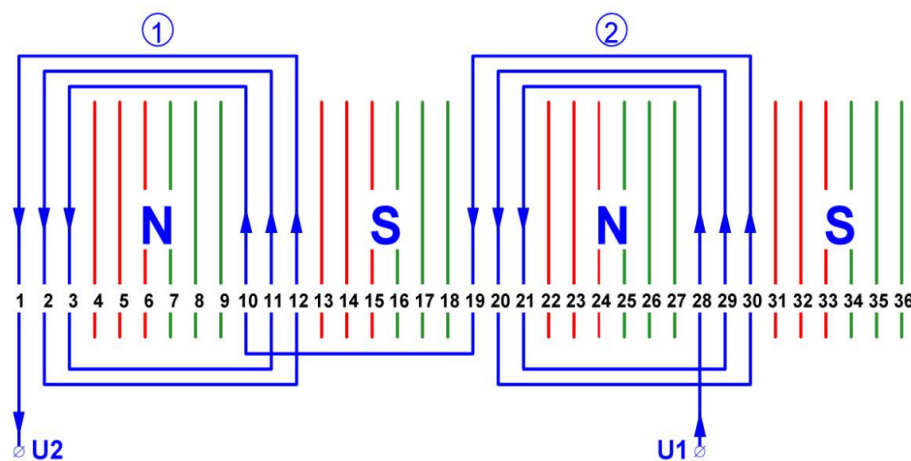
*Figura 27: Ranuras con devanado (1: la de bobina, 2: aislamiento entre capas): a) una capa, b) de dos capas. [17]*

- **Devanado de dos capas o de doble capa:** en cada ranura hay dos lados activos de una parte de la bobina, siendo estas distintas. Están colocados uno encima del otro como se puede ver la Figura 27 separados por un aislante. Con estos devanados se obtiene una inductancia de fase menor pues se tiene menor inductancia de dispersión. A diferencia de los de simple capa, las pérdidas en el rotor son menores ya que se tiene menos componentes de armónicos en el estator dando una tensión de inducido más sinusoidal. Es por esto por lo que son más comunes este tipo de devanados en máquinas eléctricas de corriente alterna.

## 5.2.2 TIPOS DE DEVANADOS

Se hará uso de devanados de doble capa que, como se ha mencionado, ayudan a reducir el contenido armónico.

En los siguientes puntos se distinguirán los diferentes tipos de conexión de los devanados abiertos para corriente alterna. Se van a estudiar los devanados por polos y por polos consecuentes, donde el número de grupos polares por fase es igual al número de polos  $2 \cdot p$  y al número de pares de polos  $p$  respectivamente. El término grupo polar según [17], responde a las bobinas de una misma fase correspondientes a un mismo polo. Esto se entiende mejor en la Figura 28 que muestra un ejemplo de dos grupos polares, diferenciados por los números inscritos en los círculos.



*Figura 28: Ejemplo de un bobinado trifásico concéntrico por polos consecuentes, de 4 polos, simple capa, 2 grupos polares por fase con  $q=3$  ranuras por polo y por fase, una rama en paralelo y un total de 36 ranuras. (se ha dibujado solo una fase). Fuente: [17].*

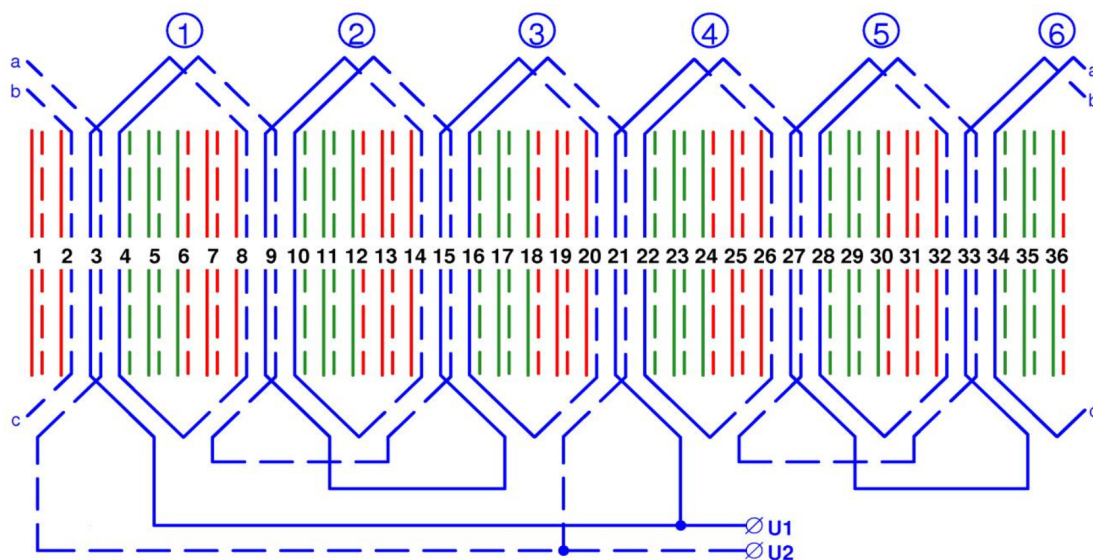
A continuación, se presentan los diferentes formatos de devanados distribuidos para el conexionado de las bobinas en el estator:

**Devanado concéntrico:** las bobinas de un grupo polar son de diferentes tamaños ya que se van depositando en las ranuras desde dentro hacia afuera. En las de polos consecuentes el valor medio de los pasos de bobina es igual al paso polar, para máquinas con ranuras por



polo y por fase mayor que 1. Además, este tipo de configuración siempre se conecta en simple capa, quedando descartado.

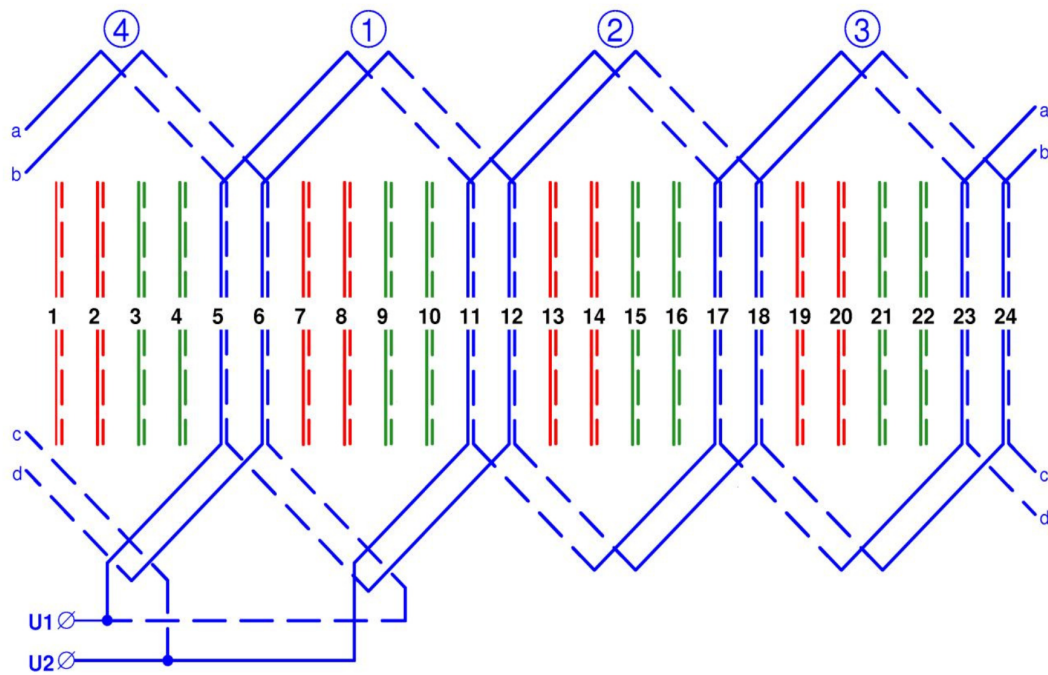
**Devanados imbricados:** las bobinas tienen el mismo tamaño y forma. En este tipo de devanados el grupo polar se consigue conectando las bobinas de una misma fase en serie. Este tipo de devanados puede construirse de simple donde el paso de bobina a de ser un número impar de bobinas o de doble capa. Sin embargo, no se pueden construir por polos consecuentes, solo configuraciones por polos como en la Figura 29 necesitando mayor cantidad de bobinas y por ello de cobre. También queda descartado.



*Figura 29: Ejemplo devanado trifásico imbricado por polos, 6 polos. De doble capa, 6 grupos polares de dos bobinas cada uno con 36 ranuras,  $q=2$  ranuras por polo y por fase, dos ramas en paralelo. Fuente: [17].*

**Devanados ondulados:** Con bobinas de igual tamaño. En este tipo de devanados para conectar las diferentes bobinas de cada polo en necesario avanzar para que final de la primera bobina se una con el comienzo de la siguiente. La disposición de las bobinas de conexionado tiene forma de onda, de ahí su nombre.

Este tipo de devanados se fabrican a dos capas y se ejecutan por polos que, a diferencia de los devanados imbricados, al tener forma de onda, y no dar una vuelta completa entorno a los polos, se hace uso de menor cantidad de cobre favoreciendo reducir el coste de fabricación.



*Figura 30: Ejemplo devanado trifásico ondulado por polo, 4 polos, doble capa con 4 grupos polares de 2 bobina. Ranuras totales 24 con 2 ranuras por polo y por fase, y dos en paralelo. Fuente: [17].*

### 5.3 TENSIÓN DE VACÍO

El valor eficaz de la tensión inducida en cada espira a velocidad nominal, solo teniendo en cuenta el primer armónico, tiene la siguiente expresión [14]:

$$E_1 = \frac{4}{\sqrt{2}} \cdot \tau_p \cdot L \cdot \widehat{B}_1 \cdot f \cdot k_{ws}$$

Donde  $\tau_p$  es el paso polar, L la longitud axial total del generador, B el valor de pico del primer armónico, f la frecuencia a velocidad nominal siendo esta de 36 Hz y por último k que representa el factor corrector debido a la oblicuidad de los imanes.

Para el valor de pico del campo  $\widehat{B}_1$  se tomará el calculado en el apartado 3.4.2, siendo este de 0.93 T.

Factor de oblicuidad, skewing factor kws: corrección que se hace a la suma de tensiones inducidas en el conductor ya que debe ser una suma vectorial y no escalar, [19]:

$$k_{ws} = \frac{\sin\left(\frac{a}{2}\right)}{a/2} = 0,9549$$

Siendo a el ángulo de desfase entre el extremo inicial y final del conductor, que coincide con pi por la relación del paso de ranura y paso polar.

$$a = \frac{\tau_s}{\tau_p} \cdot \pi = \frac{\pi}{3}$$

Una vez conocidos todos los parámetros se puede calcular la tensión de inducido de una sola espira siendo esta, a frecuencia nominal, 36 Hz de:

$$E_1 = 7,188 \text{ V}$$

La tensión máxima permitida la limita el convertidor siendo esta 759 V, acepta un 10% superior a la nominal. Se quiere conectar las tres fases en triángulo de manera que la tensión máxima de vacío coincide con la máxima del convertidor.

Se ha escogido la conexión en triángulo en lugar de en estrella para comprobar si los efectos del tercer armónico, que no desaparecen como en la configuración en estrella, no son tan perjudiciales. Y, por otro lado, con este tipo de conexión la intensidad necesaria se reduce en raíz de tres veces, lo que puede aportar beneficios a la hora de construcción y reducción de material conductor.

Sabiendo que se va a efectuar bobinados de doble capa el número total de espiras simples por fase es igual en número de polos, es decir, dos veces el número de pares de polos, resultando en 360 bobinas simples.

En los anexos se ha realizado el cálculo para la elección final del devanado del estator donde se han obtenido los siguientes resultados.

| MAGNITUD               | VALOR  |
|------------------------|--------|
| Ramas en paralelo      | 24     |
| Bobinas en serie       | 15     |
| Vueltas es cada bobina | 7      |
| Tensión de fase        | 754,73 |
| Tensión en pu          | 1,094  |

*Tabla 11: Resultados devanados el estator.*

En régimen permanente estando en vacío la máquina síncrona de imanes permanentes, la tensión  $E_o$  coincide con el producto de la frecuencia por el flujo. Estando a su vez en condiciones nominales, el flujo de excitación del imán coincide con la tensión en pu siendo este:

$$\lambda_{iman} = \frac{U_{fase}}{U_N} = \frac{754.73}{690} = 1.0939 \text{ pu}$$

## 5.4 DISEÑO DE LOS CONDUCTORES Y DEL AISLAMIENTO

Antes de calcular la sección es necesario calcular la intensidad que atravesará por cada una de las bobinas. Se tomará como criterio de diseño la intensidad máxima permitida que coincide cuando la máquina es capaz de dar un 10% más de la potencia nominal, 5.5 MW.

$$I_{max} = \frac{P_N}{\sqrt{3} \cdot U_N \cdot \cos\varphi} = \frac{5.5 \text{ MW}}{\sqrt{3} \cdot 690 \text{ V} \cdot 0.9} = 5113.41 \text{ A}$$

Al realizar las conexiones en triángulo la intensidad por cada arrollamiento se ve reducida:

$$I_{rama} = \frac{I_{max}}{\sqrt{3}} = 2952.2 \text{ A}$$

La intensidad se reparte a su vez entre los paralelos siendo esta de:

$$I_{esperada} = \frac{I_{rama}}{24} = 123 \text{ A}$$

#### 5.4.1 SECCIÓN DE LOS CONDUCTORES

En orden para establecer la sección de los conductores es imprescindible conocer la densidad de corriente,  $J$ , del material a emplear en la construcción del generador. El más comúnmente utilizado es el cobre, pero se pueden encontrar en algunas ocasiones aluminio.

En este proyecto se estudiará el caso de utilización del cobre. Este material tiene una densidad de corriente que puede oscilar entre 3 y 8 A/mm<sup>2</sup> donde se tomará un valor ni lo suficientemente alto, ni lo suficientemente bajo para conseguir una sección razonable sin llegar a sobredimensionarlo y ni al límite, siendo este 4.05 A/mm<sup>2</sup>

$$S_{cu} = \frac{I_{esperada}}{J_{cu}} = \frac{123 \text{ A}}{4 \text{ A/mm}^2} = 30.75 \text{ mm}^2$$

La sección calculada coincide con el área de ocupación de una sola espira, y en este caso como se calculó en el apartado anterior, se tienen 7 vueltas, o 7 espiras por conductor que es lo mismo. La sección ocupada por una bobina, formada por 7 espiras, es de 215.27 mm<sup>2</sup>.

Además, las ranuras tienen configuración de doble capa habiendo dos bobinas diferenciadas y separadas por una membrana como se puede ver en la Figura 27 b). La sección ocupada por las dos bobinas en cada ranura hace un total de 430.53 mm<sup>2</sup> que es menor que la sección total disponible de la ranura, 768.58 mm<sup>2</sup>, quedando espacio suficiente para introducir los diferentes medios aislantes.

### 5.4.2 AISLAMIENTO

Se han mirado diferentes fabricantes para escoger dimensiones de pletinas esmaltadas normalizadas y con cinta intercalada como aislante. Para cada vuelta se hará uso de pletinas de grosor de 1.8 mm, que con el aislante asciende a un grosor total de 2mm, y de 9mm de ancho. De esta manera se hará uso de dos pletinas de cobre esmaltada por espira.

$$S_{\text{sin aislamiento}} = 1.8 \cdot 9 \cdot 2 \cdot 7 = 226.8 \text{ mm}^2$$

Este valor es superior a los 215.27 necesarios para que circule la intensidad esperada.

$$S_{\text{con aislamiento}} = 2 \cdot 9 \cdot 2 \cdot 7 = 252 \text{ mm}^2$$

Al tener configuración en dos capas la sección ocupada total resulta en 504 mm<sup>2</sup>, que sigue siendo mucho menor que la total de la ranura.

Además, este tipo de aislamiento permite soportar temperaturas de hasta 220 °C, cumpliendo con la protección ya que el cobre no alcanzará tan altas temperaturas.

Por otro lado, el aislamiento de grosor 0.1 mm es capaz de soportar hasta 1000 V, cifra muy superior a la tensión máxima permitida por el convertidor.

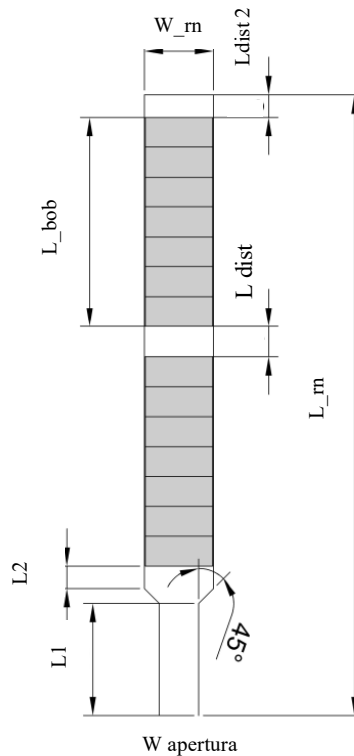
### 5.4.3 DIMENSIÓN Y GEOMETRÍA FINAL DE LAS RANURAS

Con las especificaciones de los apartados anteriores se diseñan las nuevas ranuras. La Figura 31 muestra la disposición final, donde se puede apreciar los dos conductores separados. Más adelante entre ellos se colocará un aislante adicional. Cada conductor está formado por siete espiras como se ha comentado en apartados anteriores y cada una de ellas por dos pletinas de cobre.

Se recogen a continuación los valores de la Figura 31:

- W<sub>rn</sub>: ancho de la ranura, 9.26 mm
- L<sub>rn</sub>: longitud de la ranura, 83 mm

- L bob: longitud de las bobinas formadas por 7 vueltas y cada vuelta por dos pletinas, 28mm
- L1: distancia recta de entrada ranura, 15 mm
- L2: distancia de separación entre canal de entrada y bobina, 4 mm
- L dist: distancia entre las dos bobinas, 4 mm
- L dist: distancia entre la bobina y el yudo del estator, 3mm
- W apertura: ancho de la entrada para las ranuras,  $w_{rn} - 2 \cdot \text{pletina} = 6 \text{ mm}$



*Figura 31: Nueva disposición ranuras*

## 6. PARÁMETROS ELÉCTRICOS

Las dimensiones generales se han definido previamente siendo necesario avanzar y obtener los parámetros eléctricos característicos de la maquina síncrona. Se quiere calcular en este apartado la reactancia síncrona del generador, las resistencias derivadas de las pérdidas en el cobre y en el hierro, al igual que la inductancia mutua como la de dispersión.

Estos parámetros permitirán en apartados venideros conocer el funcionamiento del generador y otros aspectos importantes como son la caída de tensión o el rendimiento.

Es necesario conocer las bases del sistema que han sido calculadas en el Anexo I y son las siguientes:

| Magnitud                  | Símbolo | Valor                   |
|---------------------------|---------|-------------------------|
| Potencia Base             | $S_B$   | 6.11 MVA                |
| Tensión Base              | $U_B$   | 690 V                   |
| Intensidad Base           | $I_B$   | 5113.41 A               |
| Impedancia Base           | $Z_B$   | 0.0779 $\Omega$         |
| Inductancia Base          | $L_B$   | 0.334 mH                |
| Par Base                  | $M_B$   | 4863.09 kNm             |
| Inercia Base              | $I_B$   | 36869906.32 $kg\ m^2/s$ |
| Frecuencia eléctrica base | $w_B$   | 72 $\pi\ rad\ /s$       |

*Tabla 12 : Bases del generador*



## 6.1 PÉRDIDAS EN EL COBRE

Se quiere conocer las pérdidas que hay por efecto Joule y a su vez, se va a modelar la resistencia del cobre.

Como parámetros iniciales se tomarán la conductividad eléctrica del cobre a 20 °C,  $\sigma = 59.6 \cdot 10^6 S/m^{-1}$ , el coeficiente térmico de resistividad del cobre,  $\alpha = 0.0082 \text{ } 1/^{\circ}C$ . También se tomará como parámetro de diseño el factor  $k_{sfill}$  igual a 0.6, que representa el porcentaje de llenado de la ranura para máquinas que presenten diámetros superiores a dos metros. Las fórmulas utilizadas pertenecen a la referencia [14].

Las pérdidas se calculan con siguiente expresión:

$$P_{cu} = \frac{J^2}{\sigma_{cu}} \cdot V_{cu}$$

Donde  $V_{cu}$  representa el volumen de cobre de la máquina síncrona de imanes permanentes

$$V_{cu} = 2 \cdot ph \cdot q \cdot K_{sfill} \cdot w_{rs} \cdot (l_{rs} - l_w) \cdot \left[ L + \frac{l_{c_{uew}}}{2} \right]$$

De la expresión anterior  $ph$  se refiere al número de fases siendo este 3, al tratarse de un sistema trifásico. El parámetro  $l_w$  valor constructivo igual a 5mm. Y por último  $l_{c_{uew}}$  símbolo de la longitud de los conductores en los devanados finales por vuelta que se calcula de la siguiente forma:

$$l_{c_{uew}} = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot \tau_p + 2 \cdot l_{rs}$$

Realizando los cálculos anteriores se obtienen unas pérdidas debidas al cobre:

$$P_{cu_{20^{\circ}C}} = 184630 \text{ W}$$

Por efecto Joule se conoce la resistencia a 20 °C despejando de la ecuación:

$$P_{cu} = 3 \cdot I_B^2 \cdot R_{cu_{20^{\circ}C}}$$

Se tiene el valor de la resistencia del cobre a 20°C, 2.4 mΩ, que difiere de la temperatura de operación siendo necesario aplicar corrección por temperatura.

$$R_{Cu_{80^{\circ}C}} = R_{Cu_{20^{\circ}C}} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T) = 2.8 \text{ m}\Omega \rightarrow r_{Cu} = 0.036 \text{ pu}$$

Por último, las pérdidas totales a 80°C se calculan mediante Joule.

$$P_{Cu_{80^{\circ}C}} = 3 \cdot I_B^2 \cdot R_{Cu_{80^{\circ}C}} = 219890 \text{ W} \rightarrow 3.6 \%$$

## 6.2 PÉRDIDAS EN EL HIERRO

Parte de la energía que se transmite desde el rotor al estator se pierde en forma de calor en el núcleo ferromagnético causado por: las pérdidas de Foucault y las corrientes de histéresis.

Las pérdidas de Foucault o Eddy currents son causadas por la circulación de corrientes parásitas que se inducen en el material ferromagnético y las pérdidas de histéresis se producen por irreversibilidades en la curva B-H del acero al silicio. En el apartado anterior 4.1 se detalla cómo se escogió este material.

La expresión que representa las pérdidas en el material ferromagnético, [14].

$$P_{fe} = k_{add} \cdot \left[ k_{hyststeel} \cdot \left( \frac{f}{50\text{Hz}} \right) + k_{eddysteel} \cdot \left( \frac{f}{50\text{Hz}} \right)^2 \right] \cdot \left[ m_d \cdot \left( \frac{B_{d1}}{1.5T} \right)^2 + m_{ys} \cdot \left( \frac{B_{ys}}{1.5T} \right)^2 \right]$$

Los términos  $m_d$  y  $m_{ys}$  de la expresión representan la masa de los dientes y del yugo estático respectivamente. Se tienen además otros factores como el  $k_{add}$  que tiene en cuenta las pérdidas adicionales por frecuencias de armónicos en fase y el flujo cuando se encuentra en vacío. Destacan a su vez  $k_{hyststeel}$  y  $k_{eddysteel}$ , donde el primero representa las pérdidas por histéresis del material, siendo estas de 3.1 W/kg, ver en la Figura 32, y el segundo las pérdidas por corrientes de Foucault fijadas en 0.5 W/kg. Estos dos últimos valores han sido obtenidos a través de ensayos normalizados a 50 Hz y 1.5 T.

El resto de los valores por introducir permiten realizar las correcciones oportunas de frecuencia ya que el sistema a estudiar funciona en régimen permanente a 36 Hz y tiene un campo magnético de

pico de valor 1.2067 T en el yugo estatórico y de valor 1.7 T en los dientes. Este valor se encuentra por debajo del límite de saturación del campo ya el material ferromagnético satura a 1.8 T.

Las masas se calculan tomando la densidad del acero de  $7650 \text{ kg/m}^3$ , siguiendo las siguientes expresiones:

$$m_d = 2 \cdot P \cdot \rho_{fe} \cdot l_{rs} \cdot (A_p - ph \cdot q \cdot w_{rs} \cdot L)$$

$$m_{ys} = \pi i \cdot (R_{out}^2 - (R_g + l_{rs})^2) \cdot L \cdot \rho_{fe}$$

Espesor 0,50 mm

|                | Densidad convencional<br>(kg/dm <sup>3</sup> ) | Pérdida máx. (W/kg) a 50<br>Hz a 1 T | Pérdida máx. (W/kg) a 50 Hz<br>a 1,5 T | Pérdida máx. (W/kg) a 60 Hz<br>a 1,5 T | Polarización mín. (T) a<br>2500 A/m |
|----------------|------------------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|-------------------------------------|
|                |                                                | Indicativo                           | Garantizado                            | Indicativo                             | Garantizado                         |
| M 230-<br>50 A | 7.60                                           | 1.00                                 | 2.30                                   | 2.95                                   | 1.49                                |
| M 250-<br>50 A |                                                | 1.05                                 | 2.50                                   | 3.21                                   |                                     |
| M 270-<br>50 A |                                                | 1.10                                 | 2.70                                   | 3.47                                   |                                     |
| M 290-<br>50 A |                                                | 1.15                                 | 2.90                                   | 3.71                                   |                                     |
| M 310-<br>50 A | 7.65                                           | 1.25                                 | 3.10                                   | 3.95                                   | 1.50                                |
| M 330-<br>50 A |                                                | 1.35                                 | 3.30                                   | 4.20                                   |                                     |
| M 350-<br>50 A |                                                | 1.50                                 | 3.50                                   | 4.45                                   |                                     |
| M 400-<br>50 A | 7.70                                           | 1.70                                 | 4.00                                   | 5.10                                   | 1.53                                |
| M 470-<br>50 A |                                                | 2.00                                 | 4.70                                   | 5.90                                   | 1.54                                |
| M 530-<br>50 A |                                                | 2.30                                 | 5.30                                   | 6.66                                   | 1.56                                |
| M 600-<br>50 A | 7.75                                           | 2.60                                 | 6.00                                   | 7.53                                   | 1.57                                |
| M 700-<br>50 A | 7.80                                           | 3.00                                 | 7.00                                   | 8.79                                   | 1.60                                |
| M 800-<br>50 A |                                                | 3.60                                 | 8.00                                   | 10.06                                  |                                     |
| M 940-<br>50 A | 7.85                                           | 4.20                                 | 9.40                                   | 11.84                                  | 1.62                                |

Para calcular los valores en W/libra, multiplique los valores expresados en W/kg por 0,4536.

Figura 32: Catálogo Arcelor mital propiedades magnéticas del Acero al Silici 310- 50-5ª

Se obtiene de esta manera las siguientes pérdidas en el hierro:

$$P_{fe} = 78586 \text{ W} \rightarrow p_{fe} = \frac{P_{fe}}{S_B} \cdot 100 = 1.29 \%$$

Interesa conocer el valor de la resistencia en el hierro. Se calcula conocidas las pérdidas y la tensión a la que funciona el generador. Se asume que se encuentra funcionando a tensión nominal de 690 V.

$$R_{fe} = \frac{U^2}{P_{fe}} = \frac{690^2}{78586} = 6.06 \Omega \rightarrow r_{fe} = 77.76 \text{ pu}$$

### **6.3 PÉRDIDAS MECÁNICAS**

Las pérdidas mecánicas son causadas por vibraciones en el eje y por fricción entre las partes móviles. Este tipo de máquina que buscan tener altos rendimientos al generar tanta potencia que se suele estimar que un 0.5% de la potencia nominal generada son pérdidas. De esta manera se obtendrá:

$$P_{mec} = P_N \cdot 0.5\% = 27500 \text{ W}$$

### **6.4 INDUCTANCIA SÍNCRONA**

La inductancia síncrona modela la reacción de inducido de la máquina. Esta se compone de la suma de las distintas inductancias existentes en la máquina, la inductancia magnetizante o mutua, y la inductancia de dispersión respecto de los dientes, las ranuras y los finales de devanado.

Los cálculos que se realizan a continuación para obtener la inductancia síncrona se han utilizado parámetros geométricos y los esquemas de los devanados hasta ahora obtenidos en los apartados anteriores.

### 6.4.1 INDUCTANCIA MAGNETIZANTE O MUTUA

Esta inductancia modela los efectos de autoinducción e inducción mutua que se producen en los conductores del devanado estatórico. Se ha utilizado el desarrollo matemático empleado en [19] para el primer armónico.

$$L_m = \frac{ph \cdot D_g}{\pi \cdot P^2 \cdot g_{eff}} \cdot \mu_0 \cdot L \cdot (k_{ws1} \cdot N_s)^2 = 1.559 \text{ mH}$$

Aparecen términos conocidos y otros nuevos como el  $N_s$  que representa las espiras en serie, que en este caso son 105, que se  $g_{eff}$ , una corrección al entrehierro de la siguiente manera:

$$g_{eff} = g_{tot} \cdot k_{Carter} = 23.8 \text{ mm}$$

A su vez esta corrección necesita de dos elementos nuevos a definir, el  $g_{tot}$  y el  $k_{Carter}$ , que es un factor que corrige a un valor medio el campo magnético en el entrehierro pues no es uniforme.

$$g_{tot} = g + \frac{l_m}{\mu_m} = 23.1 \text{ mm}$$

$$k_{Carter} = \frac{\frac{\tau_p}{ph}}{\left(\frac{\tau_p}{ph}\right) - \gamma \cdot g_{tot}} = 1.0296$$

Este factor es siempre superior a la unidad. Aparece otro elemento, componente nuevo,  $\gamma$  que relación la anchura de la ranura y la longitud de entrehierro total. La expresión matemática se ha sacado de [14].

$$\gamma = \frac{4}{\pi} \cdot \left[ \frac{w_{rs}}{2 \cdot g_{tot}} \cdot \text{atan}\left(\frac{w_{rs}}{2 \cdot g_{tot}}\right) - \log\left(\sqrt{1 + \left(\frac{w_{rs}}{2 \cdot g_{tot}}\right)^2}\right) \right] = 0.0253$$

## 6.4.2 INDUCTANCIA DE DISPERSIÓN

Esta inductancia modela el flujo que se escapa del circuito principal y se dispersa en el aire o en el material ferromagnético. Se puede obtener como la suma de la dispersión que hay en las ranuras, donde un factor decisivo es su geometría o también se encuentra en los finales de los devanados y en los extremos de los dientes.

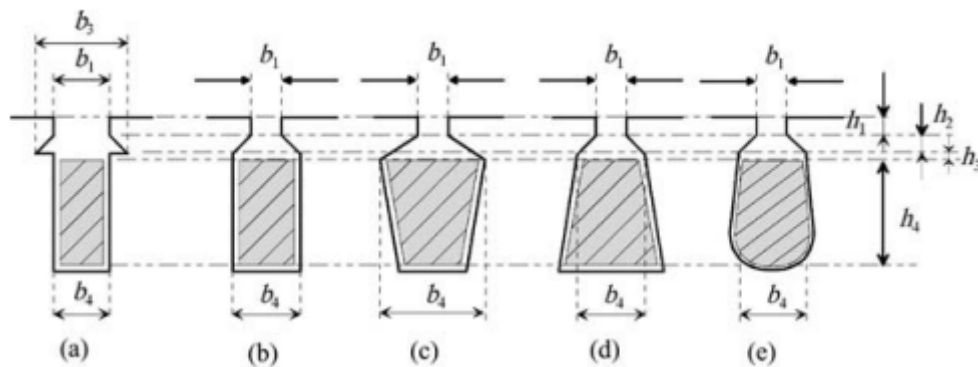
### 6.4.2.1 Inductancia de dispersión en las ranuras

La inductancia de dispersión en las ranuras modela el flujo que se cierra por las ranuras del estator y no llega a cruzar el entrehierro, [19].

$$L_u = 4 \cdot \frac{ph}{rn_{total}} \cdot \mu_0 \cdot L \cdot N_s^2 \cdot \lambda_u = 0.98 \text{ mH}$$

Se distingue un nuevo término, la permeancia de la cabeza del diente que se calcula dependiendo de su geometría e influenciado a su vez por el tipo de configuración escogido, en este caso de doble capa.

$$\lambda_u = k_1 \cdot \frac{h_4 - h'}{3 \cdot b_4} + k_2 \cdot \left( \frac{h_3}{b_4} + \frac{h_1}{b_1} + \frac{h_2}{b_4 - b_1} \cdot \ln \left( \frac{b_4}{b_1} \right) \right) + \frac{h'}{4 \cdot b_4} = 4.905$$



*Figura 33: Diferentes posibilidades de geometría de las ranuras. Fuente: [19]*

Como ya se estableció con anterioridad en el apartado 5.4.3, la ranura a utilizar en el proyecto corresponde en la Figura 33 a la ranura b). En la Tabla 13 se recogen sus dimensiones. H'

hace referencia a la distancia entre los bornes activos de las bobinas al tratarse de una configuración doble capa.

|           |         |
|-----------|---------|
| <b>h1</b> | 15 mm   |
| <b>h2</b> | 2 mm    |
| <b>h3</b> | 4 mm    |
| <b>h4</b> | 60 mm   |
| <b>h'</b> | 4 mm    |
| <b>b1</b> | 6 mm    |
| <b>b4</b> | 9.26 mm |

Tabla 13: dimensiones de la ranura, estilo (b) Figura 33

La permeancia del diente a su vez depende de otros dos factores los cuales introducen otro adicional,  $g_u$ . Este último término vale  $g_u = 0.75$  al ser la máquina de polos lisos y tener  $q=1$ .

$$k1 = \frac{(5 + 3 \cdot g_u)}{8} \quad ; \quad k2 = \frac{1 + g_u}{2}$$

#### 6.4.2.2 Inductancia de dispersión en los dientes

La inductancia de fuga de la punta del diente está determinada por la magnitud del flujo de fuga que fluye en el espacio de aire fuera de la abertura de la ranura, [19].

$$L_d = 4 \cdot \frac{ph}{rn_{total}} \cdot \mu_0 \cdot L \cdot \lambda_d \cdot N_s^2 = 0.1 \text{ mH}$$

La inductancia de fuga de la punta del diente puede determinarse aplicando un factor de permeabilidad.

$$\lambda_d = k_2 \cdot \frac{5 \cdot \left(\frac{g}{b_1}\right)}{5 + 4 \cdot \left(\frac{g}{b_1}\right)} = 0.5$$

#### 6.4.2.3 Inductancia de dispersión de los conductores

La inductancia de dispersión de los conductores se debe a las corrientes que fluyen en los finales de los devanados. La geometría de los conductores es bastante complicada de analizar

ya que todas las fases influyen en el flujo de fuga, pero dado que se considera que los devanados están relativamente alejados de las partes de hierro, las inductancias de los devanados finales no son muy elevadas. Basta con emplear factores de permeancia  $\lambda_{lew}$  y  $\lambda_w$  determinados empíricamente

$$L_w = \frac{4 \cdot ph}{rn_{total}} \cdot q \cdot N_s^2 \cdot \mu_0 \cdot l_w \cdot \lambda_w = 0.011 \text{ mH}$$

$$l_w \cdot \lambda_w = 2 \cdot l_{ew} \cdot \lambda_{lew} + \tau_p \cdot \lambda_w$$

Aquí  $\lambda_{lew}$  y  $\lambda_w$  son permeancias cuyos valores típicos son 0.342 y 0.413 respectivamente. El término  $l_{ew}$  representa la longitud de los conductores que se encuentran en los extremos. No se conoce su valor, pero se estima que ronda entre los 70 u 80 mm, escogiéndose para el cálculo 72mm.

#### ***6.4.2.4 Inductancia de dispersión por sesgado de los polos***

Las máquinas síncronas de imanes permanentes de baja velocidad suelen tener o los polos o las ranuras sesgadas para reducir algunos armónicos que se producen en el entrehierro. El factor de inclinación, skewing factor, pertenece a los factores del devanado y puede tenerse en cuenta como tal en los cálculos siendo  $k_{sq} = 0.9549$ . Este parámetro ya se calculó en un apartado anterior, 5.3.

$$L_{sq} = \sigma_{sq} \cdot L_m = 0.0137 \text{ mH}$$

$$\sigma_{sq} = (1 - k_{sq}^2) = 0.0881$$

Por tanto, si se quiere conocer la inductancia síncrona se han de sumar las inductancias calculadas con anterioridad.:

$$L_s = L_m + L_u + L_d + L_w + L_{sq} = 1.26 \text{ mH}$$

Este valor de la inductancia síncrona representa el de cada fase. Sin embargo, al estar conectados los devanados en triángulo se quiere conocer la estrella equivalente:



$$L_{s-eq} = \frac{L_s}{3} = 0.4209 \text{ mH}$$

La inductancia síncrona del esquema monofásico equivalente en unitarias queda así:

$$l_s = \frac{L_{s-ef}}{L_B} = 1.222 \text{ pu}$$

Es un valor razonable pues los valores típicos de una MS rondan entre 1 y 1.5 pu.

Al tratarse además de un generador de imanes permanentes superficiales de rotor liso, las inductancias mutuas presentan la misma longitud de entrehierro en los ejes d y q consiguiendo así que:

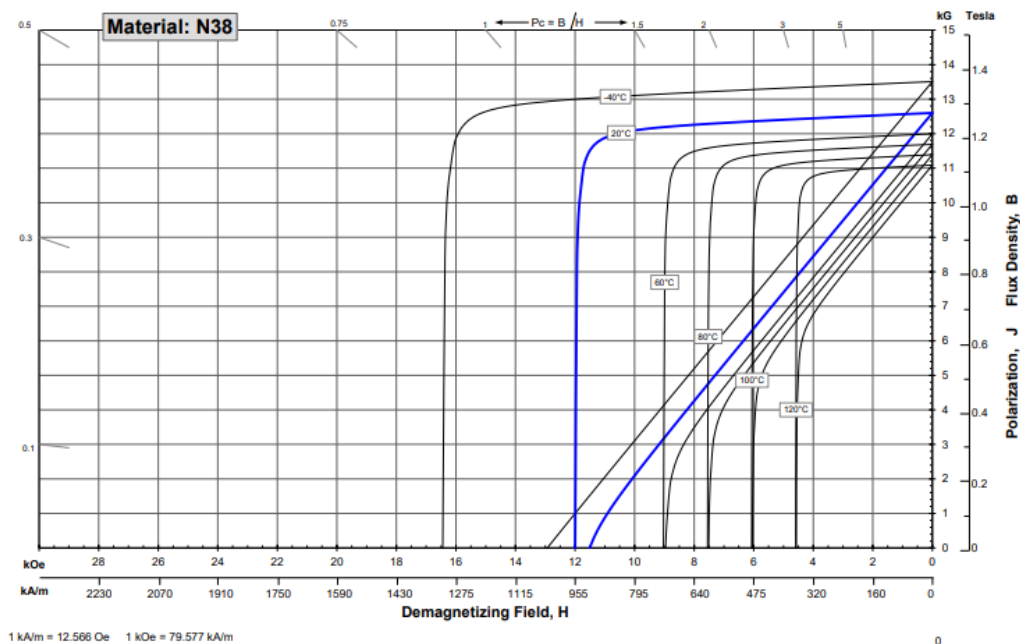
$$L_d = L_q = 1.222 \text{ pu.}$$

## 7. DESMAGNETIZACIÓN DE LOS IMANES

Uno de los mayores inconvenientes de este tipo de máquinas es que existe la posibilidad de desmagnetización de los imanes del rotor. Se puede llegar a dar por diferentes circunstancias como golpes fuertes, vibraciones indeseadas, estar los imanes expuestos a un campo magnético externo en la misma dirección, pero de distinto sentido o funcionar a elevadas temperaturas que hacen más sensibles a quedar desmagnetizados por completo.

Aunque puede llegar a producirse alguno de estos fenómenos, un escenario de los más peligrosos es un cortocircuito. Se va a estudiar el caso más desfavorable que resulta ser un cortocircuito trifásico franco en bornes del generador.

No hará falta realizar un estudio descomponiendo el sistema en los diferentes esquemas de secuencia ya que se trata de una falta equilibrada. Lo que se pretende es obtener el campo magnético inducido para comprobar que es superior al mínimo permitido por el imán.



*Figura 34: Curva de desmagnetización del N38. Fuente: Arnold magnetic technologies.*

La desmagnetización irreversible puede ser un gran problema y se cuándo la densidad de flujo en los imanes es menor que el campo mínimo. El  $B_{min}$  que se obtiene de la

Figura 34 a la temperatura de 100 °C donde comienza el codo, coincidiendo con el valor de 0.5 T, para los imanes N38 seleccionados.

Para garantizar que no se desmagneticen los imanes el estator no se debe generar un valor de pico de densidad de campo superior a:

$$\hat{B}_s < \hat{B}_{\delta 0} - B_{min} = 0.4309 \text{ T}$$

Los devanados del inducido generan un campo máximo en el entrehierro donde el imán depende del valor máximo de la fuerza magnetomotriz del estator  $\hat{v}_s$  y del entrehierro magnético, siendo este:

$$\hat{B}_s = \mu_0 \cdot \frac{\hat{v}_s}{g + \frac{l_m}{\mu_m}}$$

Todos los parámetros son conocidos a excepción de la fuerza magnetomotriz (mmf) que, al tratarse de un generador trifásico diseñado para una ranura por polo y por fase, el valor pico de la mmf generada por el inducido es el valor de pico de la corriente en una ranura, concretamente la intensidad de cortocircuito trifásico.

$$\hat{v}_s = \hat{I}_{aN}$$

Se va a realizar el estudio del periodo subtransitorio en el cual se alcanzan los mayores picos de corriente. Con la siguiente expresión se puede obtener la componente alterna de la corriente en este periodo, [21]:

$$\hat{I}_{aN}'' = \sqrt{2} \cdot \frac{E_0}{X_s''}$$

La  $X_s''$  hace referencia a la reactancia subtransitoria, que es menor que la síncrona ya que no tiene en cuenta las corrientes inducidas al estar diseñado sin devanados amortiguadores. Su valor se puede calcular como:

$$X_s'' = X_\sigma + \frac{1}{\frac{1}{X_a} + \frac{1}{X_e} + \frac{1}{X_m}}$$

Las componentes  $X_a$  y  $X_e$  modelan los efectos de los devanados amortiguadores y como se ha mencionado, la máquina no presenta este tipo de barras en el rotor. Además, la  $X_m$  es la reactancia de reacción de inducido y para realizar un caso de estudio más desfavorable se omitirá este valor, quedando de esta manera la reactancia subtransitoria con un único término, la reactancia de dispersión. Los cálculos se realizarán en pu.

$$x_s \simeq x_\sigma = 0.8070 \text{ pu}$$

Realizando las operaciones anteriores que quedaban pendientes de conocer el valor de la reactancia subtransitoria, se obtienen los siguientes resultados:

$$\hat{v}_s = \hat{i}_{aN}'' = \sqrt{2} \cdot \frac{e_0}{x_s''} \cdot \frac{I_B}{\sqrt{3}} = 5659 \text{ A}$$

$$\hat{B}_s = \mu_0 \cdot \frac{\hat{v}_s}{g + \frac{l_m}{\mu_m}} = 0.3073 \text{ T} < 0.4309 \text{ T}$$

Se concluye que, en caso de cortocircuito trifásico franco, no se llegarán a desmagnetizar los imanes al cumplir la expresión anterior.

Por último, en [20] se defiende que no hay riesgo de desmagnetización en un cortocircuito trifásico en los terminales del generador, con los devanados distribuidos sinusoidalmente, si la relación entre la inductancia de dispersión y la magnetizante cumple la siguiente expresión, donde  $\alpha_m$  es el ángulo de magnetización que vale  $126^\circ$ :

$$\frac{L_{\sigma}}{L_m} > \frac{8 \cdot \sin(0.5 \cdot \alpha_m)}{\pi \cdot \left( 1 - \frac{B_{min} \cdot \left( g + \frac{l_m}{\mu_m} \right)}{B_r \cdot \frac{l_m}{\mu_m}} \right)} \rightarrow 8.278 > 4.18$$

El resultado obtenido es satisfactorio ya que el cociente de la división entre la inductancia de dispersión y la magnetizante cumple la condición al ser mayor que la parte derecha de la expresión.

## 8. FUNCIONAMIENTO DEL GENERADOR

En este apartado se va a realizar el análisis del comportamiento del generador para diferentes puntos de operación. Aquí se comprobará si el estudio se está realizando correctamente.

A continuación, se presenta el esquema eléctrico del generador síncrono de polos lisos en régimen permanente con criterio generador.

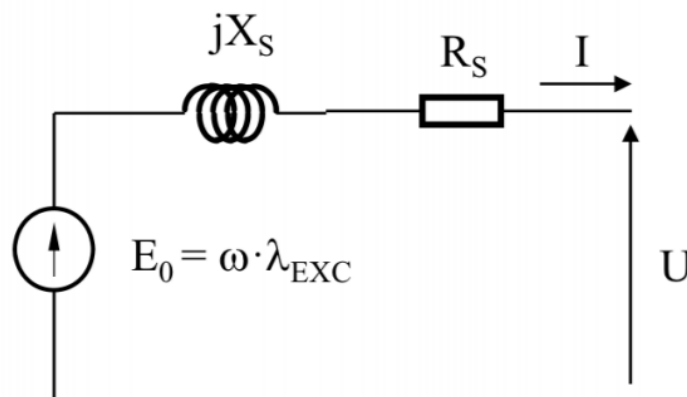


Figura 35. Esquema máquina síncrona de polos lisos. Fuente: apuntes asignatura máquinas eléctricas ICAI.

Se conocen todos los parámetros: el flujo de excitación es el flujo del imán, el cual tiene un valor de 1.0939 pu y es constante.  $R_s$  representa la resistencia del cobre, de valor 0.036 pu y, por último, la reactancia síncrona  $X_s$  formada por el producto de la inductancia síncrona  $L_s$  por la frecuencia eléctrica  $\omega$ , 1.222 pu.

Por otra parte,  $U$  es la tensión del convertidor e  $I$ , la intensidad que el generador entrega al convertidor. El producto de ambas es la potencia aparente y el desfase entre las dos magnitudes determina la potencia activa y reactiva de la máquina.

## 8.1 CONDICIONES NOMINALES

Una máquina trabaja en condiciones nominales cuando se encuentra alimentada a tensión nominal y a frecuencia nominal, entregando intensidad y potencia nominales.

Para estudiar su funcionamiento se hará uso del esquema de la Figura 35 con una pequeña modificación. La resistencia al ser mucho menor que la inductancia (30 veces) se desprecia para realizar los cálculos y simplificarlos.

Se va a imponer como potencia entregada 0.9 pu que coincide con la potencia máxima entregable, los 5.5 MW. Al realizar los cálculos (se encuentran en los anexos) para condiciones nominales, el resultado obtenido expresa que no existe un ángulo de carga que permita entregar esa potencia. Es por ello que, en su lugar, se ha obtenido la potencia tanto reactiva como activa máxima que es capaz de dar el generador en estas condiciones. Los resultados obtenidos se resumen en la siguiente tabla:

| MAGNITUD          | PU       | REALES     |
|-------------------|----------|------------|
| TENSIÓN           | 1        | 690 V      |
| INTENSIDAD        | 1        | 5113 A     |
| POTENCIA ACTIVA   | 0.8476   | 5.18 MW    |
| POTENCIA REACTIVA | -0.53055 | -3.24 MVAR |
| $\delta$          |          | -71.24 °   |
| $\phi$            |          | 32.04°     |

*Tabla 14: Resultados obtenidos potencia máxima extraíble en condiciones nominales.*

Si se analizan los resultados mostrados en la Tabla 14, se puede apreciar cómo la potencia activa generada es superior a 5 MW, pero no es capaz de entregar la máxima que corresponde a 5.5 MW. Además, el ángulo de carga entre  $e_0$  y  $u$  es superior a 60°, valor que se toma como ángulo máximo de carga por seguridad. Se pretende conseguir un ángulo menor pues con ángulos altos se corre el riesgo de llegar a perder sincronismo.

Se han estudiado dos casos adicionales para intentar conseguir una mayor potencia generada y ver si el ángulo de carga a su vez disminuye. A continuación, se muestran los resultados

obtenidos en la Tabla 15 para los casos de aumento de tensión y aumento de la velocidad. Se ha estudiado cada caso por separado y también en conjunto.

|                   | tensión $u=1.1$ pu |            | velocidad $w=1.25$ pu |            | $u=1.1$ pu y $w=1.25$ pu |            |
|-------------------|--------------------|------------|-----------------------|------------|--------------------------|------------|
| MAGNITUD          | PU                 | REALES     | PU                    | REALES     | PU                       | REALES     |
| TENSIÓN           | 1.1                | 759 V      | 1                     | 690 V      | 1.1                      | 759 V      |
| INTENSIDAD        | 1                  | 5113 A     | 1                     | 5113 A     | 1                        | 5113 A     |
| POTENCIA ACTIVA   | 0.8599             | 5.25 MW    | 0.877                 | 5.35 MW    | 0.9097                   | 5.56 MW    |
| POTENCIA REACTIVA | -0.5104            | -3.11 MVAR | -0.479                | -2.92 MVAR | -0.415                   | -2.53 MVAR |
| $\delta$          | -60.84°            |            | -78.68°               |            | -67.49°                  |            |

*Tabla 15: Resultados casos de estudio,  $u=1.1$  pu,  $w=1.25$  pu, y ambos casos juntos.*

La potencia va aumentando progresivamente con cada caso, hasta llegar a producir la potencia máxima cuando la máquina se encuentra funcionando a 1.1 pu y a mayor velocidad de la nominal siendo esta exactamente de 1.25 pu, o que es lo mismo a 15 rpm.

En la última configuración se consigue la potencia deseada. A pesar de ser un ángulo superior a 60 ° se puede considerar aceptable ya que está lejos del ángulo crítico de 90°, reduciendo así en gran medida las posibilidades de pérdida de sincronismo.

## 8.2 RENDIMIENTO

En esta sección se va a calcular el rendimiento del generador en condiciones nominales y a su vez se obtendrá la curva de rendimiento para  $\cos \varphi = 1$ .

Para realizar el cálculo del rendimiento en condiciones iniciales es necesario saber la potencia extraíble, este valor se ha hallado en el apartado anterior. También, se deben conocer las pérdidas tanto mecánicas como las del cobre y las del hierro.

Las pérdidas en el hierro dependen de la tensión a la que se encuentra funcionando la máquina, mientras que las pérdidas en el cobre dependen de la intensidad que circule por los

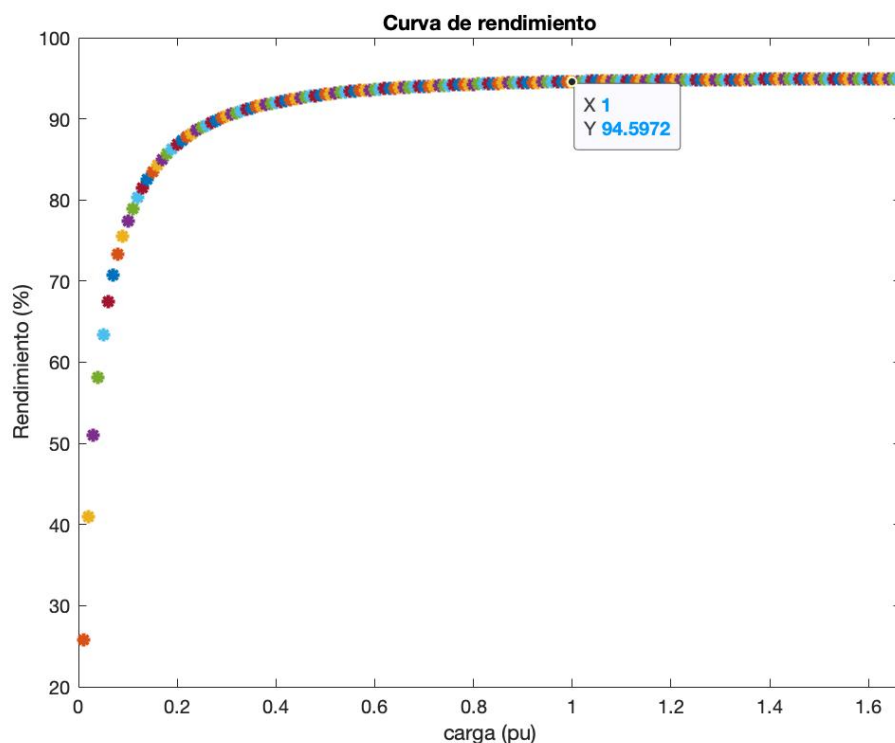


devanados. Sin embargo, las pérdidas mecánicas son constantes en la máquina y tendrán el mismo valor.

$$\eta = \frac{p_n}{p_n + p_{cu} + p_{fe} + p_{mec}} \cdot 100 = 94.1 \%$$

El valor obtenido es razonable ya que las máquinas de gran potencia presentan rendimientos que pueden oscilar entre 93 y 96 %.

Se ha querido calcular la curva de rendimiento del generador donde se ha impuesto una carga resistiva para conseguir factor de potencia igual a la unidad. Para ello se ha fijado la tensión a 1 pu para hacer constantes las pérdidas en el hierro, solo habiendo la posibilidad de modificar las pérdidas en el cobre a través de cambios en la corriente originados por las variaciones de la carga. Se ha establecido un rango de velocidades coincidiendo la máxima con los 20 rpms, aunque el objetivo principal en este apartado es comprobar las pérdidas que presenta e indagar es su funcionamiento.



*Figura 36: Curva del rendimiento respecto a la carga del generador el cual se está diseñando.*

Analizando la Figura 36 se puede apreciar como a bajas cargas se ha obtenido un rendimiento muy pequeño debido a que la potencia generada es ligeramente superior a las pérdidas mecánicas y en el hierro. A medida que la carga aumenta, y alrededor de 0.3 pu el rendimiento supera el 90% del rendimiento y permanece prácticamente constante para cargas superiores.

El rendimiento obtenido a carga nominal si se compara con el obtenido de forma teórica es superior pues en lugar de estar usando  $\cos \varphi = 1$  se uso  $\cos \varphi = 0.9$ .

## **9. MÁQUINA SÍNCRONA EJES DQ Y CONTROL VECTORIAL**

El objetivo de este proyecto es desarrollar un generador síncrono de imanes permanentes. Esta configuración del rotor ha sido escogida ya que permite generar la mayor cantidad de energía sin comprometer el precio o el funcionamiento, convirtiéndola en la tecnología más competitiva hoy en día. Sin embargo, el campo producido por los imanes no es del todo sinusoidal como se vio en el apartado 3.4.2 donde se descompuso la onda en los diferentes armónicos que la forman, tomando el primero como representante.

La manera más potente de representar el campo magnético es utilizar el vector espacial, que toma el máximo módulo y el sentido que apunte a tal punto. Tomando el teorema de Ferraris, se obtiene un campo B total que es una distribución sinusoidal en el entrehierro de amplitud constante que gira a velocidad constante e igual a la frecuencia eléctrica.

El término de vector espacial no es solo aplicable al campo magnético, sino que también es aplicable a la tensión, intensidad y al flujo. Con él se consigue pasar tres magnitudes, al tratarse de un sistema trifásico, a un sistema de dos, módulo y ángulo. Sin embargo, es necesario añadir una nueva ecuación, la homopolar, para que el sistema sea coherente. En este trabajo se tomará un sistema de tres hilos, lo que hace que la componente homopolar sea cero.

Una de las ventajas al adoptar este sistema es que permite realizar una representación gráfica muy sencilla del campo y de las diferentes magnitudes asociadas. Si las tensiones son sinusoidales, además de equilibradas y se encuentran desfasadas 120 grados, el vector espacial describirá una circunferencia.

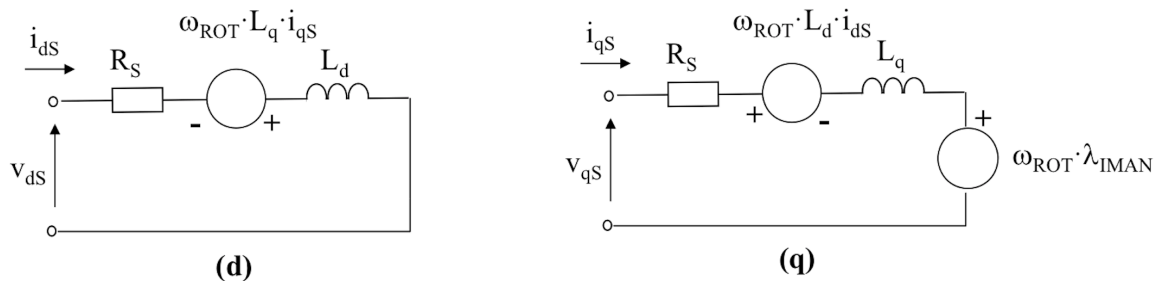
## 9.1 EJES DQ

Existen dos tipos de vectores espaciales, unos fijos al estator, DQ, y otros móviles solidarios al rotor, dq. Para pasar las componentes trifásicas a estos ejes es necesario hacer uso de las matrices de transformación de Clark y Park. Esta primera pasa directamente a ejes fijos, mientras que la segunda permite pasar directamente de trifásica a ejes móviles añadiendo a la matriz de Clark, una matriz de rotación.

$$\begin{pmatrix} f_d \\ f_q \\ f_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 0 \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{pmatrix}$$

Los ejes dq móviles permiten estudiar el sistema con proyecciones constantes en régimen permanente ya que giran con el rotor a su misma velocidad.

Una vez descompuestas las diferentes magnitudes tensión e intensidad es necesario conocer la representación en ejes dq de la máquina síncrona, donde el eje d está orientado en la dirección del flujo, sistema de excitación del rotor y el eje q se encuentra a 90 grados eléctricos del eje d. En la Figura 37 se muestra para cada eje el circuito dinámico de una máquina síncrona de imanes permanentes, en criterio motor.



*Figura 37: Modelo dinámico de la máquina síncrona de imanes permanentes. Fuente: diapositivas asignatura accionamientos eléctricos.*

No es necesario calcular ningún valor adicional, ya que se han obtenido todos los parámetros en apartados anteriores.

$$L_d = L_q = 1.222 \text{ pu}$$

$$r_s = 0.036 \text{ pu}$$

$$\lambda_{iman} = 1.0939 \text{ pu}$$

Este esquema permite, en régimen permanente, estudiar el sistema como si se tratara de un circuito en continua, donde no aparecen transitorios y se obtienen los valores de tensión, intensidad, par y potencia. Las bobinas en régimen permanente no inducen tensión, pero representan el flujo.

$$\lambda_d = L_d \cdot i_d + \lambda_{iman}$$

$$\lambda_q = L_q \cdot i_q$$

Para calcular las tensiones se debe hacer uso de las siguientes expresiones en régimen permanente:

$$v_{ds} = i_d \cdot r_s - \omega \cdot L_q \cdot i_q$$

$$v_{qs} = i_q \cdot r_s + \omega_{rot} \cdot (\lambda_{iman} + L_d \cdot i_d)$$

Además, esta configuración permite a su vez determinar la potencia mediante las fuentes de tensión ya que potencia es tensión por corriente, se obtiene la siguiente expresión:

$$p = \omega \cdot (i_q \cdot \lambda_{iman} + (L_d - L_q) \cdot i_q \cdot i_d)$$

Conocida la potencia, el par se obtiene dividiendo entre la  $\omega_{rotor}$ , la velocidad angular. Este proyecto se ha centrado en el estudio de imanes permanentes superficiales que, como consecuencia, se obtienen inductancias en eje d y en eje q iguales, haciendo cero el par de reluctancia. El par resultante queda de la siguiente manera:

$$m = i_q \cdot \lambda_{iman}$$

## 9.2 CONTROL VECTORIAL

Mediante los ejes dq se puede realizar un control vectorial modificando las intensidades  $i_d$  e  $i_q$  según la estrategia utilizada para conseguir unas condiciones deseadas como maximizar el par o maximizar el rendimiento, entre otras.

En el caso de estudio se trata de imanes superficiales donde la  $L_d$  y la  $L_q$  coinciden no aprovechando el par de reluctancia. Para esta configuración el tipo de control más utilizado es el control de par donde la  $i_d$  de referencia es cero.

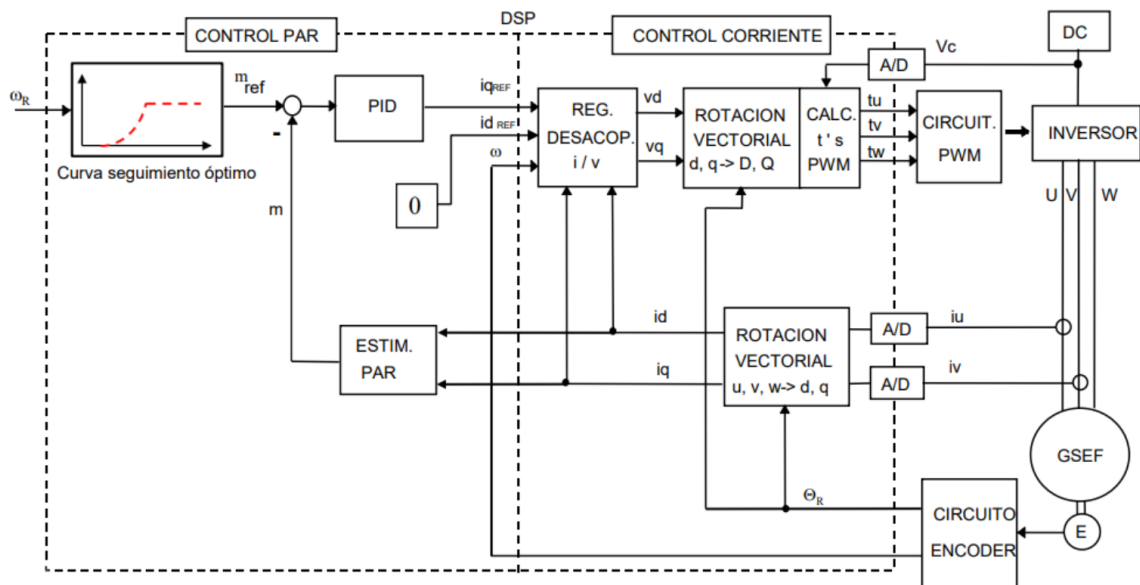


Figura 38: Esquema de control de par de una máquina síncrona de imanes superficiales.

En cambio, si se tuviese un generador de imanes interiores las inductancias serían distintas y se podría aprovechar el par de reluctancia al ser la resta ( $L_d - L_q$ ) negativa en lugar de cero como en pasa en los de imanes superficiales. Este tipo de máquinas cuya resta de inductancias es distinta de cero, admiten el control con una  $i_d$  de valor bajo pero negativo, ya que sino se corre el riesgo de provocar desmagnetización en los imanes.

Para el caso de estudio se ha escogido la estrategia de  $i_d$  igual a cero, ya que no merece la pena invertir en conseguir  $i_d$  negativa al no poder aprovecharla en el par de reluctancia.

A continuación, se resume en una tabla los resultados obtenidos, para que, a velocidad angular nominal, 1 pu, se obtenga potencia nominal igual a 0.9 pu. Para realizar los cálculos se ha fijado primero la potencia deseada, que a  $w=1$  pu coincide con el par, y seguido se han obtenido el resto de los valores para cumplir con dicha potencia.

Se ha tomado criterio motor, de manera que la potencia es negativa al generarse en lugar de consumirse. A su vez, el par y la intensidad en el eje q serán negativas como se puede corroborar con las fórmulas del apartado anterior.

| MAGNITUD        | Condiciones nominales,<br>estrategia $i_d=0$ |            |
|-----------------|----------------------------------------------|------------|
|                 | PU                                           | REALES     |
| $i_d$           | 0                                            | -          |
| $i_q$           | -0.8227                                      | -          |
| intensidad, $i$ | 0.8227                                       | 4206.46 A  |
| $v_d$           | 1.0054                                       | -          |
| $v_q$           | 1.0939                                       | -          |
| tensión, $v$    | 1.486                                        | 1025.2 V   |
| par, $m$        | -0.9                                         | 4376.8 kNm |
| potencia, $p$   | -0.9                                         | 5.5 MW     |
| $w$             | 1                                            | 12 rpms    |

*Tabla 16: resultados control vectorial  $i_d=0$  pu.*

Para condiciones nominales usando estrategia de  $i_d=0$ , no es posible llegar a unos resultados satisfactorios pues la tensión supera la máxima del convertidor, 1.1 veces la tensión nominal y como se aprecia en la Tabla 16 el valor obtenido es de 1.5 pu. En consecuencia, se ha buscado una intensidad  $i_d$  lo más pequeña posible y negativa que permita generar los 5 MW a velocidad nominal y 5.5 MW a  $w=1.25$  MW, resultados en la Tabla 17.

|               | Estrategia con id lo más pequeña posible |            | id lo más pequeña posible, P = 5 MW, w = 1 pu |          |
|---------------|------------------------------------------|------------|-----------------------------------------------|----------|
| MAGNITUD      | PU                                       | REALES     | PU                                            | REALES   |
| id            | -0.39                                    | -          | -0.39                                         | -        |
| iq            | -0.6582                                  | -          | -0.748                                        | -        |
| intensidad, i | 0.7651                                   | 3912.1 A   | 0.8482                                        | 4337.2 A |
| vd            | 0.8043                                   | -          | 0.914                                         | -        |
| vq            | 0.6173                                   | -          | 0.6173                                        | -        |
| tensión, v    | 1.0139                                   | 699.6 V    | 1.1                                           | 759 V    |
| par, m        | -0.72                                    | 3501.4 kNm | -0.8182                                       | 3979 kNm |
| potencia, p   | -0.9                                     | 5.5 MW     | -0.8182                                       | 5 MW     |
| w             | 1.25                                     | 15 rpms    | 1                                             | 15 rpms  |

*Tabla 17: resultados control vectorial id = - 0.4 pu*

Se han obtenido las potencias requeridas, 5MW a la velocidad nominal aumentando la tensión a la máxima permitida por el convertidor, reduciendo la intensidad consiguiendo así reducir las pérdidas en el cobre. Además, la potencia máxima se puede obtener aumentando la velocidad del generador hasta 1.25 pu, con la tensión algo mayor que la tensión nominal e intensidad menor.



## 10. OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO

En este apartado se va a intentar solucionar problemas que han surgido a lo largo del estudio, como el no llegar a potencia nominal cuando la maquina se encuentra en condiciones nominales o no poder usar id igual a cero porque la tensión supera a la máxima permitida por el convertidor.

### 10.1 INCREMENTO DE LA POTENCIA ACTIVA

Es necesario que en condiciones nominales sea capaz de llegar a la potencia nominal, 5.5 MW o 0.9 pu. Se va a analizar la siguiente expresión para conocer que parámetros se van a optimizar.

$$p = \frac{e_0}{x_s} \cdot \sin(\delta) \cdot u$$

Dado que se quiere obtener la potencia en condiciones nominales, la tensión se mantiene a 1pu no pudiendo modificarse. Lo mismo pasa con la  $e_0$  pues esta relacionada con el flujo que se ha diseñado para que sea el mayor posible. De esta manera los únicos parámetros disponibles son la  $x_s$  y el ángulo delta. Aunque, este último se ha visto en el apartado 8.1. que no era capaz de encontrar un valor para generar la potencia nominal.

Para poder llegar a solucionar los problemas arriba mencionados se propone modificar la inductancia de síncrona  $L_s$ , que coincide con las utilizadas en el control vectorial  $L_d$  y  $L_q$ . Esto se consigue modificando la geometría de las ranuras y la cabeza de los dientes, se recogen las nuevas medidas en la Tabla 18, con una dimensión total de 74 mm.

| Magnitud  | valor |
|-----------|-------|
| <b>h1</b> | 6 mm  |
| <b>h2</b> | 2 mm  |
| <b>h3</b> | 4 mm  |
| <b>h4</b> | 60 mm |

|           |         |
|-----------|---------|
| <b>h'</b> | 4 mm    |
| <b>b1</b> | 6 mm    |
| <b>b4</b> | 9.26 mm |

Tabla 18: Dimensiones de las ranuras optimizado

No se ha modificado la anchura ni de los dientes para evitar llegar a saturar en exceso el material ferromagnético. En relación con las cabezas de los dientes se ha intentado modificar lo menos posible ya que como se vio en el capítulo referente a la reducción del cogging torque, una de las medidas preventivas era añadir zapatas a las ranuras para reducir la variación de la reluctancia y que el entrehierro efectivo fuese menor.

Se procede a realizar una simulación con la nueva configuración de las ranuras y se obtienen los siguientes resultados.

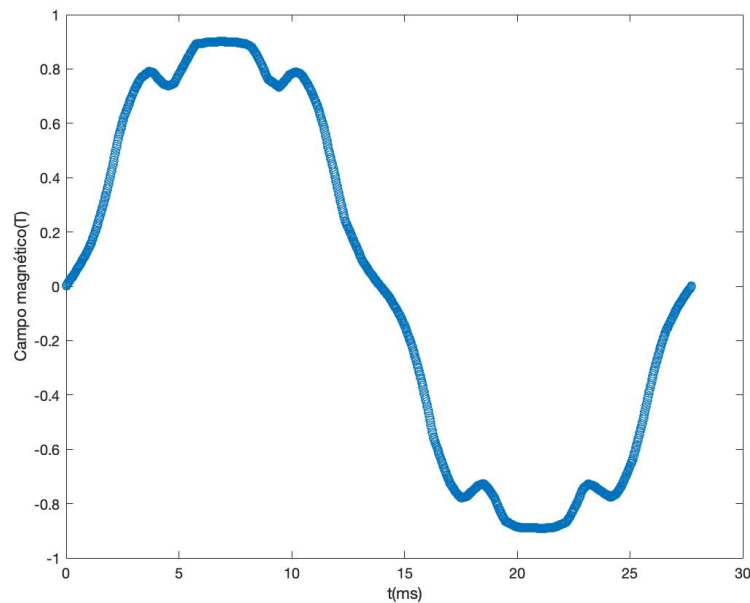


Figura 39: Campo magnético en el entrehierro, optimización de las ranuras

La Figura 39 muestra la distribución del campo en el entrehierro siendo más intenso en la ranura central frente a las de los costados.

En la Figura 40 se aprecian los distintos armónicos, y se puede observar como el de primer orden se ha visto reducido una mínima parte, pero que desencadena cambios en algunos parámetros como la tensión inducida y el flujo del imán que pasa a valer:

$$\lambda_{iman} = \frac{U_{fase}}{U_N} = 1.0931 pu$$

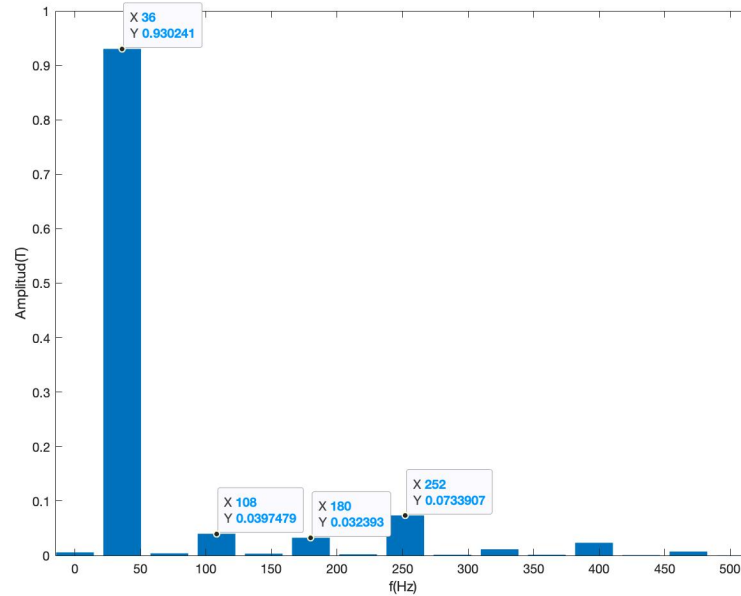


Figura 40: Descomposición de los armónicos que forman la onda de campo magnético, optimización de las ranuras.

Siguiendo el mismo proceso que a lo largo del proyecto, el siguiente paso hace referencia al cálculo de las pérdidas obtenidas tanto en el cobre como en el hierro, obteniendo:

-Pérdidas de cobre:

$$R_{cu80^{\circ}C} = R_{cu20^{\circ}C} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T) = 2.8 m\Omega \rightarrow r_{cu} = 0.0316 pu$$

$$P_{cu80^{\circ}C} = 3 \cdot I_B^2 \cdot R_{cu80^{\circ}C} = 219890 W \rightarrow 3.16 \%$$

-Pérdidas de hierro:

$$P_{fe} = 66986 W \rightarrow p_{fe} = \frac{P_{fe}}{S_B} \cdot 100 = 1.1 \%$$

$$R_{fe} = \frac{U^2}{P_{fe}} = 7.1 \Omega \rightarrow r_{fe} = 91.23 pu$$

Donde el rendimiento también a mejorado desde 94.1% a 95.7%, ya que se puede generar mayor potencia a la misma intensidad y corriente.

La modificación de la geometría de las ranuras repercute en la impedancia de dispersión de las ranuras,  $L_u$ , a través de la permeancia de la ranura que se calcula por medio de las alturas y longitud de los dientes.

$$L_u = 4 \cdot \frac{ph}{rn_{total}} \cdot \mu_0 * L * N_s^2 * \lambda_u = 0.011 \text{ mH}$$

Se distingue un nuevo término, la permeancia de la cabeza del diente que se calcula dependiendo de su geometría e influenciado a su vez por el tipo de configuración escogido, en este caso de doble capa.

$$\lambda_u = k_1 \cdot \frac{h_4 - h'}{3 \cdot b_4} + k_2 \cdot \left( \frac{h_3}{b_4} + \frac{h_1}{b_1} + \frac{h_2}{b_4 - b_1} \cdot \ln \left( \frac{b_4}{b_1} \right) \right) + \frac{h'}{4 \cdot b_4} = 3.555$$

Siendo el resto de las inductancias se quedan igual que las ya calculadas en el apartado pertinente y sumando todas, se obtiene la nueva inductancia síncrona:

$$L_s = L_m + L_u + L_d + L_w + L_{sq} = 1.26 \text{ mH}$$

Este valor de la inductancia síncrona representa el de cada fase. Sin embargo, al estar conectados los devanados en triángulo se quiere conocer la estrella equivalente:

$$L_{s-ef} = \frac{L_s}{3} = 0.3307 \text{ mH}$$

La inductancia síncrona del esquema monofásico equivalente en unitarias queda así:

$$l_s = \frac{L_{s-ef}}{L_B} = 0.9602 \text{ pu}$$

## 10.2 COMPROBACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL DISEÑO OPTIMIZADO

Se procede a comprobar si modificar las ranuras y consigue solucionar el problema de no poder generar la potencia nominal en condiciones nominales y que las condiciones de trabajo son mejores que con el diseño inicial.

Para los cálculos se fija la potencia que se quiere calcular, 0.9 pu y se obtienen el resto de los parámetros: la potencia reactiva, el ángulo de carga y el ángulo del factor de potencia.

| MAGNITUD          | PU     | REALES      |
|-------------------|--------|-------------|
| TENSIÓN           | 1      | 690 V       |
| INTENSIDAD        | 0.9636 | 4927.4 A    |
| POTENCIA ACTIVA   | 0.9    | 5.5 MW      |
| POTENCIA REACTIVA | -0.344 | -2.104 MVAR |
| $\delta$          |        | 52.24 °     |
| $\phi$            |        | 20.94°      |

Tabla 19: Resultados para potencia requerida del funcionamiento del diseño optimizado.

Como resultado en la Tabla 19 se ha obtenido que la máquina es capaz de generar la potencia nominal con un ángulo de carga menor de 60°, impuesto como ángulo límite y da esta potencia a intensidad menor que la nominal. Esto implica que, en condiciones nominales, a intensidad igual a 1 pu la máquina es capaz de dar incluso más potencia siendo esta de:

| MAGNITUD          | PU      | REALES      |
|-------------------|---------|-------------|
| TENSIÓN           | 1       | 690 V       |
| INTENSIDAD        | 1       | 5114.4 A    |
| POTENCIA ACTIVA   | 0.9255  | 5.65 MW     |
| POTENCIA REACTIVA | -0.3786 | -2.313 MVAR |
| $\delta$          |         | 54.39 °     |
| $\phi$            |         | 22.25°      |

Tabla 20: Resultados en condiciones nominales del diseño optimizado

Otro de los problemas existentes con anterioridad era la incapacidad de obtener  $i_d$  igual o lo más cercano a cero posible con el control vectorial, se ha realizado el estudio en condiciones nominales, en la Tabla 21:

| Condiciones nominales, estrategia $i_d=0$ |         |            |
|-------------------------------------------|---------|------------|
| MAGNITUD                                  | PU      | REALES     |
| $i_d$                                     | 0       | -          |
| $i_q$                                     | -0.8234 | -          |
| intensidad, $i$                           | 0.8234  | 4206.46 A  |
| $v_d$                                     | 1.054   | -          |
| $v_q$                                     | 1.0939  | -          |
| tensión, $v$                              | 1.349   | 930.82 V   |
| par, $m$                                  | -0.9    | 4376.8 kNm |
| potencia, $p$                             | -0.9    | 5.5 MW     |
| $w$                                       | 1       | 12 rpms    |

Tabla 21: Estrategia de  $i_d=0$  mediante control vectorial diseño optimizado

Con  $i_d$  igual a cero sigue sin poder utilizarse ya que supera la tensión máxima del convertidor de manera que se busca la mínima tensión de  $i_d=0$ , que haga en condiciones nominales alcanzar dicha tensión. Ese valor es  $i_d = -0.342$  pu, recogidos los demás parámetros en la Tabla 22.

| Tensión máxima convertidor, estrategia $i_d=-0.342$ |         |            |
|-----------------------------------------------------|---------|------------|
| MAGNITUD                                            | PU      | REALES     |
| $i_d$                                               | -0.342  | -          |
| $i_q$                                               | -0.8234 | -          |
| intensidad, $i$                                     | 0.8916  | 4558.9 A   |
| $v_d$                                               | 0.7906  | -          |
| $v_q$                                               | 0.7647  | -          |
| tensión, $v$                                        | 1.1     | 759 V      |
| par, $m$                                            | -0.9    | 4376.8 kNm |
| potencia, $p$                                       | -0.9    | 5.5 MW     |
| $w$                                                 | 1       | 12 rpms    |

Tabla 22: Control vectorial diseño optimizado.

Se concluye que la potencia extraída por el generador cumple con la potencia requerida para el régimen permanente, donde los parámetros se encuentran por debajo de los nominales mientras que la tensión es la máxima permitida por el variador.

## 11. ESTUDIO ECONÓMICO

### 11.1 MEDICIONES

Los precios de los materiales se dan en €/ Kg. Es necesario calcular la masa equivalente del material a utilizar a través del volumen de cada pieza y la densidad del material utilizado.

| Densidad de los materiales            |      |                   |
|---------------------------------------|------|-------------------|
| Acero laminado al silicio M-310-50-5A | 7650 | Kg/m <sup>3</sup> |
| NdFeB N38                             | 8050 | Kg/m <sup>3</sup> |
| Cobre                                 | 8960 | Kg/m <sup>3</sup> |

Tabla 23: Densidades materiales

Primero se van a calcular los volúmenes de los distintos componentes, recogidos en Tabla 24, que se han obtenido a partir de las dimensiones finales que se recogen en el capítulo de optimización.  $w_{cd}$  nuevo parámetro que se refiere a la anchura de la cabeza del diente

| Material Activo    | Cálculo de Volumen                                                                                       | Resultado             |
|--------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| Yugo del estator   | $V_{ys} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_{ext\_s}^2 - D_{int\_s}^2) \cdot L$                                     | 0.5865 m <sup>3</sup> |
| Dientes del estor  | $V_d = (h_4 + h_3) \cdot L \cdot w_d \cdot rn_{total}$                                                   | 0.8841 m <sup>3</sup> |
| Cabeza de diente   | $V_{cd} = \left[ (h1 \cdot w_{cd}) + (w_{cd} + w_d) \cdot \frac{h1}{2} \right] \cdot L \cdot rn_{total}$ | 0.0163 m <sup>3</sup> |
| Yugo del rotor     | $V_{yr} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_{ext\_r}^2 - D_{int\_r}^2) \cdot L$                                     | 0.5701 m <sup>3</sup> |
| Imanes permanentes | $V_m = h_m \cdot w_m \cdot l_m \cdot 13 \cdot 2 \cdot p$                                                 | 0.3605 m <sup>3</sup> |



|          |                                                          |                       |
|----------|----------------------------------------------------------|-----------------------|
| Devanado | $V_{coop} = 2 * p \cdot 3 \cdot (l_{esp} \cdot S_{esp})$ | 1.4984 m <sup>3</sup> |
|----------|----------------------------------------------------------|-----------------------|

Tabla 24 : Volúmenes calculados de los distintos componentes que conforman el generador.

Se calcula la masa total de cada material, acero al silicio, imanes de neodimio y cobre, multiplicando el volumen total de cada material por su respectiva densidad.

| MATERIAL         | VOLUMEN TOTAL         | MASA TOTAL |
|------------------|-----------------------|------------|
| Acero al silicio | 2.041 m <sup>3</sup>  | 15 612 kg  |
| Imanes NdFeB     | 0.3605 m <sup>3</sup> | 2 917 kg   |
| Cobre            | 1.4984 m <sup>3</sup> | 13 425 kg  |

Tabla 25: volúmenes y masas totales por material empleado.

Este tipo de costes engloba los costes desde el comienzo con el proceso de diseño, pasando por los materiales y equipos necesarios, hasta la mano de obra.

## 11.2 PRESUPUESTO

Un generador síncrono de imanes permanentes de 5.5 MW suele costar alrededor de 4.5 millones de euros, rondando los 850 mil euros el MW. Normalmente el generador representa el 12% de precio. En este estudio se ha obtenido alrededor de un 16 % asumiendo que el generador completo cueste 4.5 millones.

Se desglosa a continuación el presupuesto donde se distingue entre costes directos e indirectos, siendo la suma total del proyecto.

|                    |              |
|--------------------|--------------|
| <b>PRESUPUESTO</b> | 725 473.59 € |
|--------------------|--------------|

### 11.2.1 COSTES DIRECTOS

#### 11.2.1.1 Coste ingeniería de diseño

Este coste refleja el estudio por parte del ingeniero, hace referencia a las horas dedicadas a lo largo de estos meses para el diseño del generador. El estudio se condensa en el trabajo

diario de unas 4 horas durante 9 meses, siendo 25 días del mes trabajados, dando como resultado un total de 900 horas totales.

Se toma como sueldo por horas de un ingeniero junior como 30 € la hora.

$$\text{Coste ingeniería de diseño} = 900 \, h \cdot 30 \frac{\text{€}}{h} = 27 \, 000 \, \text{€}$$

### 11.2.1.2 Coste Material constructivo

Coste de los materiales empleados en la fabricación del generador, el cual viene dado por cantidad de masa.

| MATERIAL ACTIVO                | COSTE POR UNIDAD DE MASA | COSTE TOTAL         |
|--------------------------------|--------------------------|---------------------|
| Acero al silicio: M 310 – 50 A | 4.5 €/kg                 | 70 256 €            |
| Imanes NdFeB: N 38             | 55 €/kg                  | 159 594.97 €        |
| Cobre                          | 7.5 €/kg                 | 100 689.7 €         |
| <b>COSTE TOTAL</b>             |                          | <b>330 540.67 €</b> |

Tabla 26: costes material activo

Material que recubre las pletinas de cobre y aísla los contactos activos. Su coste se estima en un 4% del coste total del cobre empleado en los devanados

| MATERIAL PASIVO   | COSTE                | COSTE TOTAL |
|-------------------|----------------------|-------------|
| MATERIAL AISLANTE | 2% coste total cobre | 20 13.8 €   |

### 11.2.1.3 Coste elementos mecánicos

A lo largo del estudio no se ha entrado en detalle en este punto, pero resulta imprescindible para el funcionamiento de la máquina, que se trata de elementos estructurales como el eje, los nervios para unir el eje y el yugo del rotor, además de otros elementos como cojinetes o rodamientos entre otros. Estas piezas mecánicas requieren un alto nivel de acabado y unas tolerancias específicas que, como consecuencia, encarecen su precio. Dado que se desconoce su coste se ha establecido que entorno al 40% del coste total de las partes activas.

|                                  |                                  |                   |
|----------------------------------|----------------------------------|-------------------|
| <b>COSTE ELEMENTOS MECÁNICOS</b> | <b>25% coste MATERIAL ACTIVO</b> | <b>99 162.2 €</b> |
|----------------------------------|----------------------------------|-------------------|

#### **11.2.1.4 Coste Convertidor**

Según los datos aportados en el trabajo “Diseño del sistema eléctrico de una turbina off-shore” realizado por Jose Luis Fernández se obtiene el consiguiente precio del convertidor:

|                          |                 |
|--------------------------|-----------------|
| <b>COSTE CONVERTIDOR</b> | <b>22 500 €</b> |
|--------------------------|-----------------|

#### **11.2.1.5 Coste fabricación**

En este apartado se incluyen los costes de mano de obra de los operarios. De igual manera que los elementos mecánicos, se desconoce el valor exacto, al depender de muchas variantes, como el número total de operarios, la complicación de las tareas, o si es necesario la presencia de un especialista en la materia como es en el caso de la realización de un proceso de unión por soldadura si fuese necesario.

Este coste suele ser más elevado al inicio, hasta que se consiga automatizar o producir a mayor escala. Como el caso a tratar es experimental los costes son superiores y se estiman en un 40% de los materiales activos.

|                              |                                        |                   |
|------------------------------|----------------------------------------|-------------------|
| <b>COSTES DE FABRICACIÓN</b> | <b>25% coste total MATERIAL ACTIVO</b> | <b>99 162.2 €</b> |
|------------------------------|----------------------------------------|-------------------|

En la siguiente tabla se resumen todos los costes directos:

| <b>COSTES</b>               | <b>VALOR</b>        |
|-----------------------------|---------------------|
| <b>Material Activo</b>      | <b>330.540,67 €</b> |
| <b>Material Aislante</b>    | <b>2.013,80 €</b>   |
| <b>Elementos mecánicos</b>  | <b>99.162,20 €</b>  |
| <b>Diseño ingeniería</b>    | <b>27.000,00 €</b>  |
| <b>Coste de fabricación</b> | <b>99.162,20 €</b>  |
| <b>Convertidor</b>          | <b>22.500,00 €</b>  |
| <b>TOTAL</b>                | <b>580.378,87 €</b> |

*Tabla 27: Costes totales directos*

### 11.2.2 COSTES INDIRECTOS

Estos recogen aspectos que no se han tenido en cuenta, pero que son necesarios para llevar a cabo el proyecto, como transporte, electricidad, etc.

|                          |                            |               |
|--------------------------|----------------------------|---------------|
| <b>COSTES INDIRECTOS</b> | 20% de los costes directos | 145 094.872 € |
|--------------------------|----------------------------|---------------|

## **12. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS**

### ***12.1 RESULTADOS***

El diseño y desarrollo de un generador síncrono de imanes permanentes para una turbina eólica acoplado de forma directa al rotor aerodinámico, presenta muchos inconvenientes y complicaciones. Cabe destacar la necesidad de aumentar el par como resultado de la necesidad de poder extraer una potencia específica a pocas revoluciones, derivando en un aumento de las dimensiones del generador cuya culpa recae en el abundante número de pares de polos. El aumento de tamaño muchas veces suele resultar complicado de justificar ya que al realizar nuevos diseños se suele optar por minimizar pesos y costes. Sin embargo, la reducción no solo de los costes de mantenimiento y de la multiplicadora, pero también del material activo al sustituir numerosas bobinas de cobre en el rotor por pequeños imanes permanentes, hacen de este tipo de generadores una opción muy acertada.

El trabajo realizado no solo se centra en aspectos teóricos, sino que combina cuestiones prácticas relacionadas con los aspectos constructivos. Se ha pretendido seleccionar aquellas medidas lo más cercanas posibles a los desarrollos que hay hasta la fecha en la industria, pero en algunos casos la imposibilidad de implantar dichas medidas ha permitido establecer otras alternativas que, aunque no muy empleadas, si satisfactorias.

Se ha realizado un primer diseño el cual no alcanzaba a cumplir las condiciones de operación establecidas, siendo necesario realizar un segundo estudio de optimización. En este segundo estudio, cuyo fin consistía en conseguir extraer la potencia máxima, se ha optado por modificar las dimensiones de los dientes y las ranuras del estator para reducir la inductancia síncrona. Además, se ha conseguido bajar el ángulo de carga a valores por debajo de los 60° pues se encontraba cercano a 90° y corría riesgo de perder sincronismo.

Resulta imprescindible destacar la importancia de la electrónica de potencia en este tipo de aplicaciones ya que permiten controlar a través del control vectorial distintos parámetros de la máquina y obtener los resultados deseados, y simultáneamente poder maximizar el rendimiento, u obtener menores pérdidas en el hierro. Este control permite además estudiar fenómenos transitorios que ocurren en el generador.

Se comprueba que la elección de la conexión de los devanados del estator en triángulo es satisfactoria, al conseguir reducir una gran cantidad de cobre pues en configuración de estrella con doble capa habría sido mucho mayor. Sin embargo, como desventaja con la conexión en triángulo los armónicos de tercer orden no se consiguen eliminar y originan mayores pérdidas en el cobre, pero tampoco serán muy significativas pues la corriente homopolar es mínima a bajas revoluciones [22]. Como la velocidad mecánica nominal del generador es 12 rpms, se pueden asumir las pérdidas ocasionadas por la corriente homopolar prácticamente nulas.

Por último, para la estimación de costes tanto de materiales como el generador en su conjunto se obtiene como presupuesto final del generador un coste de 725 473.59 € que representa un 16% del coste total de un aerogenerador completo (palas, cimentaciones, etc.) si se toma el valor más reciente para estimar el coste, de 800 000 € el MW. De esta manera, el aerogenerador diseñado costaría en torno a 4.52 millones de euros

## ***12.2 TRABAJOS FUTUROS***

Este proyecto se ha centrado en la obtención de un generador que fuese capaz de dar la potencia nominal y que, a su vez, cumpliese una serie de características. Sin embargo, por la extensión del trabajo mismo, la complicación que tiene y su consecuente tiempo invertido no se ha llegado a profundizar en todos los aspectos que resultan imprescindibles para un fabricante de generadores síncronos de imanes permanentes.

A continuación, se presentan algunos desarrollos pendientes a futuro:

Uno de ellos se centraría en realizar más estudios mediante programas de cálculo para obtener mayor exactitud en los resultados ya que gran parte de los cálculos realizados se han llevado a cabo de manera analítica sin tener en cuenta transitorios. Aunque algunos cálculos se hayan realizado mediante análisis de elementos finitos con programas como Matlab o FEMM, siempre se puede escoger otros que sean más completos y realicen cálculos más exactos. Un estudio pendiente es realizar una simulación de cómo se inducen las corrientes en los devanados de cobre del estator, tanto en condiciones normales como en condiciones de cortocircuito trifásico franco, obteniendo las variaciones del campo magnético en ambas situaciones.

Otra posibilidad, es realizar una comparación entre diferentes disposiciones de los imanes en el rotor y estudiar las diferencias respecto al campo, las inductancias, precio, tamaño del generador entre otros aspectos.

En línea con el punto anterior, estudiar las ventajas de un rotor de polos salientes donde las inductancias  $L_d$  y  $L_q$  son distintas. Esto permite aprovechar el par de reluctancia y utilizar estrategias en el control vectorial donde  $i_d$  deja de ser 0, pasando a ser un valor pequeño pero negativo.

En tercer lugar, se ha visto que el generador consume potencia reactiva, esto no es un problema pues está conectado a red, pero se puede barajar la posibilidad de instalar una batería de condensadores para suplir dicha potencia.

Este proyecto no ha estudiado aspectos muy importantes como son la refrigeración o las protecciones. Como se comentó en el apartado de desmagnetización, a elevadas temperaturas los imanes sufren riesgo de perder su imantación al igual que pasa en situaciones con campos magnéticos de sentidos contrarios que pueden estar originados por altas intensidades. Es por ello que es necesario mantener el generador a una temperatura adecuada mediante refrigeración y hacer uso de protecciones como, por ejemplo, de sobre intensidad, para limitar e impedir fallos en el equipo.

Por último, desde un punto de vista más mecánico y con mayor influencia en el área constructiva, analizar los procesos de fabricación de los diferentes componentes al igual que realizar simulaciones o cálculos de vibraciones o de fatiga para analizar el comportamiento de la máquina.



## **13. (ODS) OBJETIVOS DE DESARROLLO**

### **SOSTENIBLE**

Para que un proyecto salga adelante no solo debe resolver un problema, debe a su vez reunir ciertas características para que se pueda implantar. Ha de garantizar un precio razonable, debe dar una solución a un problema y al mismo tiempo que no sea perjudicial ni para las personas ni para el medioambiente.

En numerosas ocasiones un proyecto innovador y con buenas expectativas a futuro no se llega a implantar debido a un exceso es el coste que no se ve compensado con los beneficios esperados a futuro. Es necesario encontrar un balance entre coste y beneficio para que sea rentable el desarrollo del proyecto. Sin embargo, hoy en día otro factor decisivo es el impacto que tiene tanto en el medioambiente como en la sociedad una vez su puesta en funcionamiento ya que debe cumplir unas condiciones relacionadas con los gases contaminantes emitidos, o el impacto visual o acústico entre otros.

El proyecto que se quiere desarrollar en este TFG se compromete con los objetivos de sostenibilidad al tratarse de una energía limpia, no contaminante y que reporta beneficios tanto en el aspecto financiero como en el social. Ayudará al crecimiento económico favoreciendo la creación de empleo cualificado y a su vez a la conversión energética para obtener ciudades y comunidades más sostenibles.

En la Figura 41 se encuentran los 17 objetivo representados. A continuación, se comentarán los ODS que este proyecto pretende satisfacer.



Figura 41: Objetivos de desarrollo sostenible, [11].

ODS 7: Energía asequible y no contaminante. La eólica es una energía sostenible y por tanto ampliamente disponible. Con este proyecto se pretende satisfacer el objetivo 7.1 garantizando acceso mundial a los servicios energéticos asequibles, fiables y modernos comenzando en las costas de África. Del mismo modo se complementa con la persecución del objetivo 7.b ampliando infraestructura en países y continentes en desarrollo. También está relacionado con el 7.2 ya que ayuda a aumentar la proporción de las energías renovables en el conjunto del mix energético.

ODS 8: Trabajo decente y crecimiento económico. El proyecto realizado se puede entender que tenga un impacto secundario en este objetivo, ya que se consigue crecimiento económico con la mejora del acceso a una electricidad segura y limpia.

ODS 9: Industria, innovación e infraestructura. Al igual que el anterior, este objetivo está relacionado con el ODS 7 pues el acceso a la energía está estrechamente ligado con la mejora de las infraestructuras y las innovaciones.

ODS 11: Ciudades y comunidades sostenibles. El proyecto tiene un impacto secundario de la misma forma que el objetivo 8 y 9. La producción energía limpia de manera indirecta ayuda a que las ciudades sean más sostenibles.

## 14. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Hermann-Josef Wagner, Jyotirmay Mathur – “Introduction to Wind Energy Systems Basics, Technology and Operation”, (Green Energy and Technology),
- [2] ABB “Technical application papers number 13, Wind power plants”, 2011.
- [3] Madjid Karimirad “Offshore Energy Structure, for Wind power, Wave energy and Hybrid Marine Plataforms”, Srpinge, 2014
- [4] Francesco Castellani, Davide Astolfi, Mauro Peppoloni, Francesco Natili, Daniele Buttà and Alexander Hirschl, Artículo: “Experimental Vibration Analysis of a Small Scale”, Mayo 2019
- [5] <http://xn--drmstrre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/es/tour/wres/pow/index.htm>
- [6] Lecuona Neumann A., “La energía eólica: Principios básicos y tecnología”, Departamento de Ingeniería, Universidad Carlos III de Madrid, 2002.
- [7] Olimpo Anaya-Lara, John O. Tande, Kjetil Uhlen, Karl Merz “Offshore Wind Energy Technology”, Wiley, 2018.
- [8] Dr. Duane Hanselman, “Brushless Permanent Magnet Motor Design”, 2ª Edición, Magna Physics, Orono, ME, USA, 2003.
- [9] Hui Li, Zhe Chen, Henk Polinder. “Optimization of Multibrid Permanent- Magnet Wind Generator Systems”. IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 24, no. 1. 2009.
- [10] Chun-Yu. Hsiao, Shen-Nian Yeh, Jonh-Chin Hwang. “Design of High Performance Permanent-Magnet Synchronous Wind Generators”. Energies, 2014.
- [11] <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- [12] <https://www.femm.info/wiki/HomePage>
- [13] David Meeker, “Finite Element Method Magnetics – User’s Manual”, Version 4.2, 2020
- [14] Maxime Roger Joseph Dubois. “Optimized Permanent Magnet Generator Topologies for Direct-Drive Wind Turbines”. 2004.

- [15] Jacek.F. Gieras “Advancements in Electric Machines” University of Technology and Life Sciences Bydgoszcz, Poland, 2008.
- [16] A. M. EL-Refaie. “Fractional-Slot Concentrated-Windings Synchronous Permanent Magnet Machines: Opportunities and Challenges”. IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 57, no. 1. 2010.
- [17] Miguel Ángel Rodríguez Pozueta, “Construcción de las máquinas eléctricas”, Universidad de Cantabria; departamento de ingeniería eléctrica y energética, 2010.
- [18] Ion Boldea, “The Electric Generators Handbook – Variable Speed Generators”, 2<sup>nd</sup> Edition, CRC Press, Taylor and Francis Group, Boca Raton, 2016.
- [19] J. Pyrhönen, T. Jokinen, and V. Hrabovcová, “Design of Rotating Electrical Machines”, Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2008.
- [20] Slemon G.R, Xian L "Modeling and design optimization of permanent magnet motors" Electric Machines and Power Systems, vol. 20, 1992.
- [21] Miguel Ángel Rodríguez Pozueta. “Máquinas síncronas: cortocircuitos”. Universidad de Cantabria; departamento de ingeniería eléctrica y energética.
- [22] Felix Rehm, Patrick Breining, Simon Decker, Johannes Kolb, Marc Hiller, “Loss Comparison of Small Delta- and Star-Connected Permanent Magnet Synchronous Machines”, IEEE, Schaffler Technologies AG & Co. KG, Karlsruhe, Germany.



## ANEXO I: CÁLCULOS

### I. DEVANADO DEL ESTATOR

Este apartado está dedicado al cálculo del número de paralelos y series de las bobinas que conforman el devanado del estator.

Como valores de partida y valores máximos se han tomado los siguientes:

|                                  |       |
|----------------------------------|-------|
| Número total de bobinas por fase | 360   |
| U nominal                        | 690   |
| U máx. convertidor               | 759   |
| E inducido                       | 7,188 |

Tabla 28: Datos de partida.

El número de bobinas por fase viene determinado por la configuración escogida de doble capa, que es la más utilizada en la actualidad, y coincide con el doble de pares de polos de la máquina.

La tensión de inducido, E inducido, se calculó en un apartado anterior 5.3, haciendo uso de la ley de Faraday.

La tensión máxima permitida será la máxima aceptada por el inversor siendo esta 1.1 veces la tensión nominal y al estar conectada en estrella será esta la máxima.

| Paralelos | Bobinas en serie | Tensión de fase; U fase | U <sub>max</sub> /U fase | Vueltas por espira      | U fase según nº vueltas | Vueltas totales cobre   |
|-----------|------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 1         | 360              | 2587,64                 | supera U <sub>max</sub>  | supera U <sub>max</sub> | supera U <sub>max</sub> | supera U <sub>max</sub> |
| 2         | 180              | 1293,82                 | supera U <sub>max</sub>  | supera U <sub>max</sub> | supera U <sub>max</sub> | supera U <sub>max</sub> |
| 3         | 120              | 862,55                  | supera U <sub>max</sub>  | supera U <sub>max</sub> | supera U <sub>max</sub> | supera U <sub>max</sub> |
| 4         | 90               | 646,91                  | 1,17                     | 1                       | 646,91                  | 360                     |
| 5         | 72               | 517,53                  | 1,47                     | 1                       | 517,53                  | 360                     |
| 6         | 60               | 431,27                  | 1,76                     | 1                       | 431,27                  | 360                     |

|    |    |        |       |    |        |      |
|----|----|--------|-------|----|--------|------|
| 8  | 45 | 323,46 | 2,35  | 2  | 646,91 | 720  |
| 9  | 40 | 287,52 | 2,64  | 2  | 575,03 | 720  |
| 10 | 36 | 258,76 | 2,93  | 2  | 517,53 | 720  |
| 12 | 30 | 215,64 | 3,52  | 3  | 646,91 | 1080 |
| 15 | 24 | 172,51 | 4,40  | 4  | 690,04 | 1440 |
| 18 | 20 | 143,76 | 5,28  | 5  | 718,79 | 1800 |
| 20 | 18 | 129,38 | 5,87  | 5  | 646,91 | 1800 |
| 24 | 15 | 107,82 | 7,04  | 7  | 754,73 | 2520 |
| 30 | 12 | 86,25  | 8,80  | 8  | 690,04 | 2880 |
| 36 | 10 | 71,88  | 10,56 | 10 | 718,79 | 3600 |
| 40 | 9  | 64,69  | 11,73 | 11 | 711,60 | 3960 |
| 45 | 8  | 57,50  | 13,20 | 13 | 747,54 | 4680 |
| 60 | 6  | 43,13  | 17,60 | 17 | 733,17 | 6120 |
| 72 | 5  | 35,94  | 21,12 | 21 | 754,73 | 7560 |

Tabla 29: Cálculo series, paralelos y vueltas por espira

Se ha establecido el criterio en el cual tanto el número de espiras en serie, el de paralelos como el de vueltas por espira ha de ser un número entero, no solo por sentido lógico, sino que también por temas constructivos.

Para realizar los cálculos primero se determinó el número de paralelos siendo estos un divisor del número total de espiras por fase. A continuación, la tensión de fase siendo esta la de inducido por el número de espiras en serie. Esta tensión calculada se divide entre la máxima y da la cantidad de vueltas que cada espira debe tener para alcanzar la tensión máxima del convertidor.

El último valor calculado de la tabla, vueltas totales de cobre, no es un dato que se suele dar a conocer pero que resulta de vital importancia a la hora de tomar una decisión constructiva ya que, permite conocer, dependiendo del número de vueltas, la cantidad de material conductor a utilizar. Interesa que este valor sea pequeño ya que, si se reduce en el uso de material, el precio y el peso de la máquina final disminuye.

Analizando los valores obtenidos, las primeras posiciones no se tienen en cuenta al superar con creces la tensión máxima permitida. Para el resto de las combinaciones de paralelos y

series, interesa obtener la mayor tensión y mayor número de paralelos pues hacen que la intensidad se vea reducida y en consecuencia la sección del conductor.

De entre todas las configuraciones se ha escogido la de mayor tensión, 754.73 V, pero se encuentran dos configuraciones posibles: 24 paralelos con 15 bobinas en serie o 72 paralelos con bobinas en serie. Se compran la cantidad de numero de vueltas por conductor y se escoge el de menor valor siendo este el de 24 paralelos y 15 bobinas en serie al tener menor número de vueltas por rama y ser una opción más barata que, como ya se ha mencionado, el precio se reduce al usar menor cantidad de material.

## **II. CÁLCULO DE LAS BASES**

Se quiere calcular las magnitudes base para ello se toman los valores nominales de la tensión, potencia, pares de polos y velocidad mecánica entre otros.

- **Tensión base:** 690 V, coincide con la nominal
- **Potencia base:** 5.5 MW, se tomará la máxima posible con un  $\cos \varphi$  de 0.9.
- **Velocidad mecánica base:** relacionada con la frecuencia eléctrica. Se dispone de 180 pares de polos, y una velocidad mecánica de 12 rpm.

$$f_e = \frac{n_n \cdot p}{60} = \frac{12 \text{ rpm} \cdot 180}{60} = 36 \text{ Hz}$$

$$\omega = f \cdot 2\pi = 36 \cdot 2\pi = 72 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

- **Intensidad base:**

$$I_B = \frac{P_N}{\sqrt{3} \cdot U_N \cdot \cos \varphi} = \frac{5.5 \text{ MW}}{\sqrt{3} \cdot 690 \text{ V} \cdot 0.9} = 5113.41 \text{ A}$$

- **Potencia específica base:**

$$S_N = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_N = \sqrt{3} \cdot 690 \text{ V} \cdot 5113.4 \text{ A} = 6.11 \text{ MVA}$$



- **Impedancia base:**

$$Z_B = \frac{U_B^2}{S_B} = \frac{690^2 V}{6.11 MVA} = 0.0779 \Omega$$

- **Inductancia base:**

$$L_B = \frac{Z_B}{2\pi \cdot f_e} = \frac{0.0779 \Omega}{2\pi \cdot 36 Hz} = 0.344 mH$$

- **Par base:**

$$M_B = \frac{S_B}{2\pi \cdot \frac{f}{p}} = \frac{6.11 MVA}{2 \cdot \pi \cdot \frac{36 Hz}{180}} = 4463.07 kNm$$

- **Inercia base:**

$$J_B = \frac{S_B}{\left(2\pi \cdot \frac{f}{p}\right)^2} = \frac{6.11 MVA}{\left(2 \cdot \pi \cdot \frac{36 Hz}{180}\right)^2} = 3869906.3 kgm^2/s$$

### III. COMPORTAMIENTO DE LA MÁQUINA

#### a. CONDICIONES DESEADAS

Este anexo está destinado al cálculo del comportamiento de la máquina en condiciones nominales:

$$e_0 = \omega \cdot \lambda_{iman} = 1.0939 pu \quad x_s = l_s \cdot \omega = 1.222 pu \quad p = 0.9 pu$$

Despejando y sustituyendo los valores se quiere conocer el valor de delta:

$$p = \frac{e_0}{x_s} \cdot \sin(\delta) \cdot u \rightarrow \delta \text{ no existe}$$

Pero para los parámetros obtenidos, la máquina no es capaz de encontrar un ángulo para esa potencia dada.

## b. CONDICIONES NOMINALES

Con las siguientes ecuaciones e imponiendo potencia aparente igual a 1, se resuelve el sistema y se obtiene la potencia activa, reactiva y el ángulo de carga, máximos que es capaz de dar la máquina en condiciones nominales.

$$s = p + q \cdot j = s \angle \varphi$$

$$p = \frac{e_0}{x_s} \cdot \sin(\delta) \cdot u$$

$$q = \frac{u}{x_s} \cdot (e_0 \cdot \cos(\delta) - u)$$

Para el resto de los casos se modifica la tensión a 1.1 pu y la  $\omega$  a 1.25 pu y se vuelven a resolver las ecuaciones anteriores.

$$e_0 = \omega \cdot \lambda_{iman} = 1.3674 \text{ pu} \quad x_s = l_s \cdot \omega = 1.5275 \text{ pu}$$

## c. OPTIMIZACIÓN

Se quiere calcular del comportamiento de la máquina en condiciones nominales, para el diseño optimizado.

$$e_0 = \omega \cdot \lambda_{iman} = 1.0931 \text{ pu} \quad x_s = l_s \cdot \omega = 0.9602 \text{ pu} \quad p = 0.9 \text{ pu}$$

Despejando y sustituyendo los valores se quiere conocer el valor de delta:

$$p = \frac{e_0}{x_s} \cdot \sin(\delta) \cdot u \rightarrow \delta = 52.24^\circ$$

La máquina es capaz de dar la potencia nominal, de manera que se obtienen el resto de los valores:

$$q = \frac{u}{x_s} \cdot (e_0 \cdot \cos(\delta) - u) = -0.344 \text{ pu}$$

$$s = i = p + q \cdot j = s \angle \varphi = 0.9636 \angle 20.94^\circ$$

## ANEXO II: CATÁLOGOS

### *I. DEVANADOS*

- Vicente Torns

#### **CARACTERÍSTICAS**

| <b>CTC</b>                                               | <b>min.</b>    | <b>max.</b>     |
|----------------------------------------------------------|----------------|-----------------|
| <b>PLETINA INDIVIDUAL - SINGLE FLAT WIRE</b>             |                |                 |
| Ancho - <i>Width</i>                                     | <b>4,00 mm</b> | <b>12,50 mm</b> |
| Espesor - <i>Thickness</i>                               | <b>1,10 mm</b> | <b>3,15 mm</b>  |
| Incr. esmalte - <i>Enamel incr.</i>                      | <b>0,08 mm</b> | <b>0,18 mm</b>  |
| <b>CABLE TRASPUESTO - CTC</b>                            |                |                 |
| Nr. de pletinas - <i>Nr. of flat wires</i>               | <b>5</b>       | <b>47</b>       |
| Cinta intercalada - <i>Inter Column layer - 2 layers</i> | <b>0,00 mm</b> | <b>0,30 mm</b>  |
| Altura - <i>Height</i>                                   | <b>7,00 mm</b> | <b>84,00 mm</b> |
| Ancho - <i>Width</i>                                     | <b>7,00 mm</b> | <b>26,00 mm</b> |

Otros aislantes y dimensiones fuera de lo estipulado, por favor consulte.  
*For other insulations and dimensions, please consult.*

## II. IMANES



**N38**

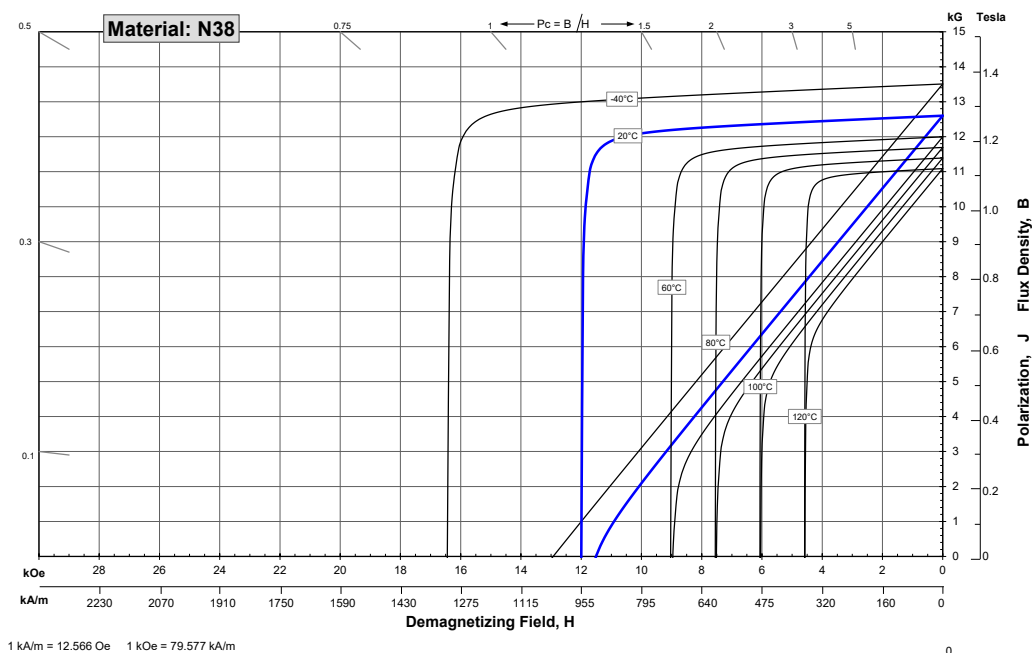
### Sintered Neodymium-Iron-Boron Magnets

These are also referred to as "Neo" or NdFeB magnets. They offer a combination of high magnetic output at moderate cost. Please contact Arnold for additional grade information and recommendations for protective coating. Assemblies using these magnets can also be provided.

| Characteristic                                   | Units             | min.   | nominal | max.   |
|--------------------------------------------------|-------------------|--------|---------|--------|
| <b>Br</b> , Residual Induction                   | Gauss             | 12,200 | 12,600  | 13,000 |
|                                                  | mT                | 1220   | 1260    | 1300   |
| <b>H<sub>CB</sub></b> , Coercivity               | Oersteds          | 10,800 | 11,600  | 12,400 |
|                                                  | kA/m              | 860    | 923     | 987    |
| <b>H<sub>CJ</sub></b> , Intrinsic Coercivity     | Oersteds          | 12,000 |         |        |
|                                                  | kA/m              | 955    |         |        |
| <b>BH<sub>max</sub></b> , Maximum Energy Product | MGOe              | 36     | 39      | 41     |
|                                                  | kJ/m <sup>3</sup> | 286    | 306     | 326    |

| Characteristic                                     | Units                          | C //              | C ⊥          |
|----------------------------------------------------|--------------------------------|-------------------|--------------|
| <b>Thermal Properties</b>                          |                                |                   |              |
| Reversible Temperature Coefficients <sup>(1)</sup> |                                |                   |              |
| of Induction, α(Br)                                | %/°C                           |                   | -0.12        |
| of Coercivity, α(H <sub>CJ</sub> )                 | %/°C                           |                   | -0.62        |
| Coefficient of Thermal Expansion <sup>(2)</sup>    | ΔL/L per °C x 10 <sup>-6</sup> | 7                 | -1           |
| Thermal Conductivity                               | kcal/mh°C                      | 5.3               | 5.8          |
| Specific Heat <sup>(3)</sup>                       | cal/g°C                        |                   | 0.11         |
| Curie Temperature, T <sub>c</sub>                  | °C                             |                   | 310          |
| <b>Other Properties</b>                            | Flexural Strength              | psi               | 41,300       |
|                                                    |                                | MPa               | 285          |
|                                                    | Density                        | g/cm <sup>3</sup> | 7.6          |
|                                                    | Hardness, Vickers              | Hv                | 620          |
| Electrical Resistivity, ρ                          | μΩ • cm                        |                   | 150 // 130 ⊥ |

Notes:  
(1) Coefficients measured between 20 and 80 °C  
(2) Between 20 and 200 °C. Values are typical and can vary.  
(3) Between 20 and 140 °C



**Notes** The material data and demagnetization curves shown above represent typical properties that may vary due to product shape and size.  
**Demagnetization curves show nominal Br and minimum H<sub>CJ</sub>.**  
Magnets can be supplied thermally stabilized or magnetically calibrated to customer specifications.  
Additional grades are available. Please contact the factory for information.

### III. MATERIAL FERROMAGNÉTICO

- ARCELOR MITAL

Se va a escoger el Acero al Silicio 310-50 A de grosor 0.5 mm.

**D20**

## Dimensiones

Espesor 0,50 mm

|                                                                                                                                                 | Notas | Bordes brutos |            | Bordes cizallados |            | Fleje      |            | Chapas de 400 a 2500 mm |            |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|---------------|------------|-------------------|------------|------------|------------|-------------------------|------------|
|                                                                                                                                                 |       | Ancho mín.    | Ancho máx. | Ancho mín.        | Ancho máx. | Ancho mín. | Ancho máx. | Ancho mín.              | Ancho máx. |
| M 230-50 A                                                                                                                                      | 3     | -             | -          | 600               | 1000       | 20         | 600        | 400                     | 1100       |
| M 250-50 A                                                                                                                                      | 3     |               |            |                   | 1200       |            |            |                         |            |
| M 270-50 A                                                                                                                                      | 2 & 3 | 1030          | 1250       |                   | 1220       |            |            |                         |            |
| M 290-50 A                                                                                                                                      | 2 & 3 |               |            |                   |            |            |            |                         |            |
| M 310-50 A                                                                                                                                      | 2 & 3 |               |            |                   |            |            |            |                         |            |
| M 330-50 A                                                                                                                                      | 2 & 3 |               |            |                   |            |            |            |                         |            |
| M 350-50 A                                                                                                                                      | 2 & 3 |               |            |                   |            |            |            |                         |            |
| M 400-50 A                                                                                                                                      | 2 & 3 |               |            |                   |            |            |            |                         |            |
| M 470-50 A                                                                                                                                      | 2 & 3 |               |            |                   |            |            |            |                         |            |
| M 530-50 A                                                                                                                                      | 2 & 3 |               |            |                   |            |            |            |                         |            |
| M 600-50 A                                                                                                                                      | 2 & 3 |               |            |                   |            |            |            |                         |            |
| M 700-50 A                                                                                                                                      | 2 & 3 |               |            |                   |            |            |            |                         |            |
| M 800-50 A                                                                                                                                      | 2 & 3 |               |            |                   |            |            |            |                         |            |
| M 940-50 A                                                                                                                                      | 2 & 3 |               |            |                   |            |            |            |                         |            |
| 2 & 3. Bordes cizallados: ancho máx. 1250 previo acuerdo; Fleje: anchos 20 - 44 mm previo acuerdo<br>3. Fleje: anchos 20 - 44 mm previo acuerdo |       |               |            |                   |            |            |            |                         |            |

**D20**

## Propiedades magnéticas

Espesor 0,50 mm

|                | Densidad convencional<br>(kg/dm <sup>3</sup> ) | Pérdida máx. (W/kg) a 50<br>Hz a 1 T | Pérdida máx. (W/kg) a 50 Hz<br>a 1,5 T | Pérdida máx. (W/kg) a 60 Hz<br>a 1,5 T | Polarización mín. (T) a<br>2500 A/m |
|----------------|------------------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|-------------------------------------|
|                |                                                | Indicativo                           | Garantizado                            | Indicativo                             | Garantizado                         |
| M 230-<br>50 A | 7.60                                           | 1.00                                 | 2.30                                   | 2.95                                   | 1.49                                |
| M 250-<br>50 A |                                                | 1.05                                 | 2.50                                   | 3.21                                   |                                     |
| M 270-<br>50 A |                                                | 1.10                                 | 2.70                                   | 3.47                                   |                                     |
| M 290-<br>50 A |                                                | 1.15                                 | 2.90                                   | 3.71                                   |                                     |
| M 310-<br>50 A | 7.65                                           | 1.25                                 | 3.10                                   | 3.95                                   | 1.50                                |
| M 330-<br>50 A |                                                | 1.35                                 | 3.30                                   | 4.20                                   |                                     |
| M 350-<br>50 A |                                                | 1.50                                 | 3.50                                   | 4.45                                   |                                     |
| M 400-<br>50 A | 7.70                                           | 1.70                                 | 4.00                                   | 5.10                                   | 1.53                                |
| M 470-<br>50 A |                                                | 2.00                                 | 4.70                                   | 5.90                                   | 1.54                                |
| M 530-<br>50 A |                                                | 2.30                                 | 5.30                                   | 6.66                                   | 1.56                                |
| M 600-<br>50 A | 7.75                                           | 2.60                                 | 6.00                                   | 7.53                                   | 1.57                                |
| M 700-<br>50 A | 7.80                                           | 3.00                                 | 7.00                                   | 8.79                                   | 1.60                                |
| M 800-<br>50 A |                                                | 3.60                                 | 8.00                                   | 10.06                                  |                                     |
| M 940-<br>50 A | 7.85                                           | 4.20                                 | 9.40                                   | 11.84                                  | 1.62                                |

Para calcular los valores en W/libra, multiplique los valores expresados en W/kg por 0,4536.

|                                                                                              | Polarización mín. (T) a 5000<br>A/m | Polarización mín. (T) a 10000<br>A/m | Anisotropía de pérdida máx.<br>(+/- %) | Número mín. de<br>plegados | Factor de apilamiento mín.<br>(mm) |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------|------------------------------------|
|                                                                                              | Garantizado                         | Garantizado                          | Garantizado                            | Garantizado                | Garantizado                        |
| M 230-50<br>A                                                                                | 1.60                                | 1.70                                 | 17                                     | 2                          | 0.96                               |
| M 250-50<br>A                                                                                |                                     |                                      |                                        |                            |                                    |
| M 270-50<br>A                                                                                |                                     |                                      |                                        |                            |                                    |
| M 290-50<br>A                                                                                |                                     |                                      |                                        |                            |                                    |
| M 310-50<br>A                                                                                |                                     |                                      |                                        |                            |                                    |
| M 330-50<br>A                                                                                | 1.63                                | 1.73                                 | 14                                     | 3                          |                                    |
| M 350-50<br>A                                                                                |                                     |                                      |                                        |                            |                                    |
| M 400-50<br>A                                                                                |                                     |                                      | 1.64                                   | 1.74                       |                                    |
| M 470-50<br>A                                                                                |                                     |                                      |                                        |                            |                                    |
| M 530-50<br>A                                                                                |                                     |                                      |                                        |                            |                                    |
| M 600-50<br>A                                                                                |                                     |                                      |                                        |                            |                                    |
| M 700-50<br>A                                                                                |                                     |                                      |                                        |                            |                                    |
| M 800-50<br>A                                                                                |                                     |                                      |                                        |                            |                                    |
| M 940-50<br>A                                                                                |                                     |                                      |                                        |                            |                                    |
|                                                                                              | 1.65                                | 1.75                                 | 10                                     | 10                         |                                    |
|                                                                                              | 1.66                                | 1.76                                 |                                        |                            |                                    |
|                                                                                              | 1.69                                | 1.77                                 |                                        |                            |                                    |
|                                                                                              | 1.70                                | 1.78                                 |                                        |                            |                                    |
|                                                                                              | 1.72                                | 1.81                                 |                                        |                            |                                    |
| Para calcular los valores en W/libra, multiplique los valores expresados en W/kg por 0,4536. |                                     |                                      |                                        |                            |                                    |

**D20**

## Características mecánicas

Espesor 0,50 mm

|                   | Sentido | R <sub>e</sub> (MPa) | R <sub>m</sub> (MPa) | A <sub>80</sub> (%) | HV        | R <sub>e</sub> /R <sub>m</sub> |
|-------------------|---------|----------------------|----------------------|---------------------|-----------|--------------------------------|
| M 230-50 A        | T       | 425 - 475            | 550 - 600            | 12 - 22             | 210 - 240 | 0.75 - 0.80                    |
| M 250-50 A        | T       | 425 - 475            | 550 - 600            | 12 - 22             | 210 - 240 | 0.75 - 0.80                    |
| M 270-50 A        | T       | 420 - 470            | 540 - 590            | 15 - 25             | 200 - 230 | 0.75 - 0.80                    |
| M 290-50 A        | T       | 420 - 470            | 540 - 590            | 15 - 25             | 200 - 230 | 0.73 - 0.78                    |
| <b>M 310-50 A</b> | T       | 400 - 450            | 530 - 580            | 20 - 30             | 200 - 230 | 0.73 - 0.78                    |
| M 330-50 A        | T       | 365 - 415            | 510 - 560            | 20 - 30             | 180 - 210 | 0.72 - 0.77                    |
| M 350-50 A        | T       | 365 - 415            | 500 - 560            | 20 - 30             | 180 - 210 | 0.72 - 0.77                    |
| M 400-50 A        | T       | 340 - 390            | 480 - 530            | 25 - 35             | 170 - 200 | 0.69 - 0.74                    |
| M 470-50 A        | T       | 270 - 320            | 410 - 460            | 28 - 38             | 140 - 170 | 0.62 - 0.67                    |
| M 530-50 A        | T       | 270 - 320            | 410 - 460            | 28 - 38             | 140 - 170 | 0.62 - 0.67                    |
| M 600-50 A        | T       | 260 - 310            | 390 - 440            | 30 - 40             | 120 - 150 | 0.64 - 0.69                    |
| M 700-50 A        | T       | 260 - 310            | 390 - 440            | 30 - 40             | 120 - 150 | 0.64 - 0.69                    |
| M 800-50 A        | T       | 290 - 350            | 420 - 460            | 27 - 37             | 120 - 150 | 0.69 - 0.74                    |
| M 940-50 A        | T       | 290 - 350            | 420 - 460            | 27 - 37             | 120 - 150 | 0.69 - 0.74                    |



