



**POLITÉCNICA**



**INDUSTRIALES**  
ETSII | UPM

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

# **DISEÑO ELECTROMAGNÉTICO DE UN GENERADOR ELÉCTRICO PARA TURBINA EÓLICA DE 100 kW**

**Autora:** Montaña Castillo García

**Tutor:** Francisco Blázquez García

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

Madrid, 2017





## **AGRADECIMIENTOS**

A mis padres, Montaña y Juan Carlos, por su amor y entrega. Sois mi referente, gracias por ser mis mayores consejeros y por enseñarme a seguir nadando.

A Juan, eres el mejor hermano que se puede tener.

A mis amigas, que me han acompañado y ayudado en todo momento en este largo camino. En especial a Teresa y María, no sé qué haría sin vosotras, gracias por ser como sois y sacar siempre lo mejor de mí.

A mi familia, por quererme y apoyarme incondicionalmente, aunque estemos en la distancia siempre os llevo cerca.

A mi tutor, Francisco, por darme la oportunidad de realizar este trabajo y por toda tu paciencia, comprensión y dedicación.

## AGRADECIMIENTOS

## RESUMEN

El desarrollo de la energía eólica aparece motivado por dos causas; en los años 70 con la crisis del petróleo, como búsqueda de alternativas que permitiesen mantener el alto consumo energético de la población y de unos años a esta parte como respuesta a la necesidad de frenar el cambio climático y de generar electricidad sin emitir gases de efecto invernadero, como el CO<sub>2</sub>, a la atmósfera.

En la actualidad ha adquirido la suficiente madurez tecnológica como para ser competitiva en el mercado eléctrico frente a los métodos convencionales de generación, dados su reducción de costes debido a la construcción de turbinas cada vez más potentes y ligeras, el aumento de la eficiencia de la cadena de suministro y el ahorro de costes al fabricarse en parques eólicos cada vez de mayor escala. Por estos motivos y por la ya mencionada necesidad de combatir el calentamiento global ha experimentado un impulso en su investigación e implantación que le hacen tener en el presente un crecimiento anual del 12% y una potencia mundial instalada de 486.749 MW a fecha de 2016. Y así ha conseguido ganarse un hueco en los primeros puestos de generación en el mix energético en países como Dinamarca, Alemania o España.

Esto también es posible gracias a que grandes empresas y compañías como General Electric, Siemens, Gamesa o ABB abogan por seguir investigando, mejorando e invirtiendo en los generadores, llegando a construir algunos de varios MW.

Para llegar a este punto, esta energía renovable ha evolucionado desde los primeros generadores comerciales de inducción asíncronos con rotores de jaula de ardilla y numerosos elementos auxiliares para su puesta en marcha y operación, pasando por los generadores síncronos que necesitaban de escobillas para alimentar la excitación en continua del rotor y de una caja multiplicadora de engranajes, ambos elementos con una gran necesidad de mantenimiento.

Estas desventajas que además repercutían en el coste, peso y rendimiento del generador, se han logrado suplir con la aparición de las máquinas síncronas de imanes permanentes, que sustituyen la excitación del rotor por unos imanes permanentes que imponen una inducción constante e invariable en el entrehierro sin necesidad de colectores. Por otra parte el paso polar se puede reducir, lo que permite la creación de máquinas de mayor número de polos para diámetros más compactos y con ello la conexión directa sin caja de engranajes entre las palas y el rotor del generador.

Con el fin de estudiar parte de esta tecnología, en el presente Trabajo Fin de Grado se diseñará desde cero un generador síncrono de imanes permanentes para turbina eólica de 100kW desde el punto de vista electromagnético que no precise de caja multiplicadora, con lo que su rotor girará a la velocidad de las palas, a 30 revoluciones por minuto. La potencia elegida corresponde a la de máquinas que permitan el autoconsumo de centros como bodegas, canteras, granjas, centros comerciales o electrolinerías con la mejora de la eficiencia del sistema, al reducirse pérdidas por transporte y distribución. También este tipo de aerogeneradores de menor potencia mejoran la calidad del suministro eléctrico en la red de distribución al proveer de "estabilidad" a la misma, cuando se trate de redes de distribución débiles o finales de línea.

## RESUMEN

Como otro aspecto importante es poder comparar cuantitativamente si el efecto de la caja de engranajes tiene realmente un efecto perjudicial sobre el coste, peso y rendimiento del conjunto caja-generador, se diseña otro generador que necesita una caja multiplicadora 1:4 para funcionar, por lo que la velocidad del rotor será de 120 revoluciones por minuto, esto disminuirá el número de polos necesarios y con ello el diámetro, volumen y coste de lo que es el generador en sí, pero habrá que extraer conclusiones globales de la agrupación caja-generador.

Una vez que se eligen las especificaciones de la aplicación, que serán:

- Modelo sin multiplicadora: 100kW, 30 r.p.m. , 10 Hz, 168 V y por tanto 20 pares de polos
- Modelo con multiplicadora: 100kW, 120 r.p.m., 10 Hz, 168 V y por tanto 5 pares de polos

Puede procederse al diseño electromagnético de los modelos, que consta de dos partes, un primer estudio analítico que consigue un dimensionamiento básico de la aplicación con poca potencia de cálculo y un segundo basado en el método de cálculo de elementos finitos (FEM) en el que un software trata con precisión problemas magnéticos y eléctricos, analizando problemas no lineales de saturación y pérdidas en el hierro.

El método analítico necesita una serie de estimaciones iniciales a cuenta del diseñador como el valor de la inducción en el entrehierro. Se dimensionan los imanes y el entrehierro para tener este nivel de inducción y se establecen unas dimensiones de diámetro, longitud del paquete y carga lineal a partir de los cuales se inicia un proceso iterativo de sucesivos ajustes de inducción hasta conseguir el nivel de deseado obteniendo un primer dimensionamiento de la máquina. Estableciendo que inducción se quiere en los dientes del estator y en las culatas del núcleo, se obtienen las geometrías más precisas de rotor y estator.

El siguiente paso es crear la geometría a partir de los datos anteriores en el software (FEM), elegir los materiales a utilizar introduciendo sus propiedades en el programa, e imponer las condiciones de contorno para que la simulación funcione correctamente (mallado, simetrías, límites...). Y se procede a realizar las simulaciones y los diferentes ensayos, tanto el de funcionamiento en vacío, como el de carga, obteniéndose para cada uno de ellos, par, tensión, enlaces de flujos y corrientes de las 3 fases. También se prueba la respuesta del sistema ante diferentes formas de ranura y como afecta esta al rizado de par y a su valor medio. Seguidamente se obtienen las pérdidas tanto en el núcleo como en los devanados lo que permitirá calcular el rendimiento. Y por último se sacan los costes haciendo una estimación de volumen de los materiales y su precio por kilogramo.

Los resultados muestran que el modelo sin multiplicadora tiene mejor rendimiento, que el aumento del volumen para crear una máquina con un mayor número de polos propicia un aumento no solo del peso si no también del coste en materiales, aunque si se compara con los años que se espera la máquina esté en operación ese sobre coste compensa el mantenimiento y paradas por avería de la multiplicadora. Para finalizar el incremento de peso en este caso, contrarresta prácticamente el peso de eliminar la multiplicadora.

**Palabras clave:** generador eólico, imanes permanentes, multiplicadora, 100kW, simulación, FEM

**Códigos Unesco:** 330606, 332203

# ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS.....	1
RESUMEN .....	3
ÍNDICE.....	5
1. Introducción .....	7
1.1. Motivación.....	7
1.2. Objetivos .....	8
1.3. Tecnología eólica .....	9
Tipos .....	9
Partes.....	9
Energía eólica Onshore vs. Offshore .....	10
1.4. Estado del arte.....	11
Implantación.....	14
2. Máquinas síncronas de imanes permanentes.....	15
2.1. Imanes permanentes.....	15
2.2. Ventajas e Inconvenientes .....	18
2.3. Clasificación de máquinas síncronas de imanes permanentes .....	18
2.3.1. Máquinas de flujo radial.....	18
Rotor interno .....	18
Rotor externo .....	19
2.3.2. Máquinas de flujo axial .....	20
3. Diseño del generador síncrono de imanes permanentes sin multiplicadora .....	21
3.1. Dimensionamiento básico .....	21
3.1.1. Determinar las especificaciones de la aplicación .....	21
3.1.2. Ecuación básica.....	22
3.1.3. Elección de las dimensiones del imán .....	24
3.1.4. Cálculo del devanado .....	24
3.1.5. Dimensionamiento del estator.....	26
3.1.6. Dimensionamiento del rotor .....	29
3.1.7. Dimensiones estimadas finales .....	30
3.1.8. Tabla comparativa.....	31
3.2. Método de elementos finitos.....	33
3.2.1. Introducción .....	33
3.2.2. Geometría.....	34



## ÍNDICE

3.2.3.	Selección de materiales.....	35
3.2.4.	Definición de límites, mallado y alimentación .....	36
3.2.5.	Diseño inicial con ranura abierta.....	37
3.2.6.	Diseño con ranura modificada .....	38
3.2.7.	Par a diferentes intensidades de carga .....	42
3.2.8.	Ensayo de vacío .....	43
3.2.9.	Cálculo de pérdidas para cada intensidad de carga .....	45
3.2.10.	Rendimiento .....	47
3.2.11.	Coste de la máquina .....	47
4.	Diseño del generador síncrono de imanes permanentes con multiplicadora .....	49
4.1.	Dimensionamiento básico .....	49
4.1.1.	Determinar especificaciones de la aplicación .....	49
4.1.2.	Método analítico .....	49
4.2.	Método de elementos finitos.....	51
4.2.1.	Geometría, materiales, límites, mallado y alimentación .....	51
4.2.2.	Par.....	53
4.2.3.	Par a diferentes cargas .....	57
4.2.4.	Pérdidas.....	57
4.2.5.	Caja multiplicadora.....	58
4.2.6.	Rendimiento .....	59
4.2.7.	Coste .....	60
5.	Comparativa de ambos modelos.....	61
6.	Conclusiones.....	63
7.	Líneas futuras .....	65
8.	Impacto social, ambiental y económico .....	67
9.	Preparación temporal.....	69
9.1.	Planificación temporal.....	69
9.2.	EDP .....	71
9.3.	Diagrama de Gant.....	71
10.	Presupuesto.....	73
11.	Bibliografía.....	75
12.	Índice de figuras .....	77
13.	Índice de tablas .....	79

# 1. Introducción

## 1.1. Motivación

En un mundo en el que la actividad económica e industrial crece sin frenos, el agotamiento de los combustibles fósiles, (fuente fundamental de energía en el mundo), será una realidad en un futuro no muy lejano, como vienen vaticinando diversos estudios y teorías. Según las estadísticas del gobierno de Los Estados Unidos el consumo global de electricidad, en 2003 fue de 14.781 TWh, en 2010 de 20.000 TWh y cuyo pronóstico para 2030 es de 30.116 TWh. Frente a estos datos de consumo, la prevención del cambio climático es considerada una de las más importantes metas de la política energética en el futuro, ya que las emisiones de CO<sub>2</sub> deberán ser menores de lo que lo son hoy en día si queremos frenar sus efectos, tales como elevación del nivel del mar, o fenómenos atmosféricos extremos. Ante estos síntomas cómo poder mantener el modelo de consumo energético actual parece un gran reto.

Esto parece imposible sin el uso óptimo de los recursos naturales renovables en la producción de energía. Ya desde los años 70 se intenta buscar solución con su desarrollo y estudio. Una de las que más auge e implantación ha experimentado es la energía eólica, sobre todo desde principio de siglo XXI, siendo la segunda fuente de energía renovable más utilizada después de la hidráulica, generando de media en todo el mundo 51.477MW, con una potencia instalada de 486.749 MW y con una tasa de crecimiento anual del 12%. Se estima que en España en 2015 la generación eólica evitó la emisión de más de 25 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> (el equivalente a plantar 2 millones de árboles) y evitó importaciones de combustibles fósiles por valor de 1.932 millones de euros. Hoy día supe un 20% de la energía demandada del país con 23.000 MW instalados. En España un 40% de los gases de efecto invernadero (principalmente CO<sub>2</sub>), son expulsados por la industria y la generación, consecuencia del uso de carbón para generar electricidad. El sector eólico español es un clúster industrial, que incluye desde las producciones de las piezas que forman estas máquinas, hasta los grandes programas informáticos que controlan los parques, una cadena de valor que supone el 0,25% del PIB español, repartida por 15 comunidades autónomas y 43 provincias.

La madurez tecnológica de la eólica significa que, el diferencial de su coste económico respecto a las tecnologías convencionales es pequeño. Las grandes empresas están enfocadas en el diseño y construcción de máquinas cada vez más grandes dedicadas a la comercialización de la electricidad. Marcas como ABB, Siemens, Gamesa o Windpower, han conseguido obtener equipos capaces de generar varios megavatios, todo un logro en este tipo de tecnología. Además estos aerogeneradores de mayor potencia unitaria permiten optimizar el impacto sobre el terreno.

En el presente proyecto se presenta el diseño, mejora y obtención de características óptimas de un generador eólico de imanes permanentes de 100 kW sin multiplicadora, enfocándolo a la economización de máquinas de menor tamaño que podrían dedicarse para autogeneración y autoconsumo. Además, se establece la comparación con otro modelo de igual potencia pero con caja de engranajes para verificar qué tecnología es más ventajosa.

## 1.2. Objetivos

El objetivo principal de este Trabajo Fin de Grado será diseñar un generador síncrono de imanes permanentes de 100 kW sin caja multiplicadora, un llamado direct drive, que se situará en el interior de una góndola de un aerogenerador.

La eliminación de la caja de engranajes, será el elemento diferencial competitivo en contraposición a otros que se han encontrado en el mercado, y cuya finalidad será la de mejorar su rendimiento, conseguir un modelo más compacto, que necesite menos mantenimiento y produzca menos ruidos y vibraciones gracias a la eliminación del elemento mecánico.

Se diseñará un segundo generador con reductora, para poder comprobar si las mejoras que se proponían son apreciables, manteniendo algunas características proporcionales a las del primero como relación alto/ancho de diente o inducción máxima en el diente. Comparando finalmente entre ellos rendimientos y pérdidas, peso y coste, es lo que se denominará objetivo secundario del proyecto.

Aparte de estos dos objetivos se puede definir un tercer objetivo implícito, que es el aprendizaje por parte del alumno de la metodología de diseño de máquinas síncronas de imanes permanentes.

Para conseguir alcanzar estos objetivos, se han realizado otras tareas indirectas y se ha profundizado en muchos otros campos, que se enumeran a continuación.

- Se ha ahondado en el conocimiento de las máquinas de imanes permanentes en sus morfologías, materiales y parámetros. Y en concreto en los generadores síncronos.
- Se ha estudiado de la evolución de la energía eólica y del resto de tecnologías que la forman, aparte del generador eléctrico, para poder enmarcar el trabajo en su contexto.
- Análisis del procedimiento de diseño de una máquina eléctrica, tanto conocimiento de ecuaciones como puesta en práctica de los procesos de iteración hasta encontrar las dimensiones y parámetros adecuados por el método analítico.
- Iniciación y profundización en el manejo de programas de elementos finitos (FEM), a nivel de interfaz y a nivel de cálculos internos.
- Estudio y simulación en software FEM de un transformador del departamento de máquinas eléctricas de la ETSII-UPM.
- Capacidad de optimización de elementos del modelo.
- Verificación de resultados obtenidos y comparación de distintos métodos de cálculo.
- Comparación de modelos.
- Estudio de planificación temporal y presupuesto en proyectos de ingeniería.

### 1.3. Tecnología eólica

Los aerogeneradores son máquinas eléctricas que convierten la energía cinética del viento en energía mecánica y a través de una turbina eólica en energía eléctrica.

#### Tipos

Existen dos tipos de aerogeneradores:

- Los de eje vertical, no necesitan mecanismo de orientación y el generador eléctrico puede ir en el suelo. Su producción energética es baja y necesita ser motorizado para su puesta en marcha. Ejemplos de este tipo podrían ser los generadores Savonius, Giromill y Darrieus.

- Los de eje horizontal, son los más usados, y pueden cubrir un rango desde pequeñas potencias hasta grandes parques eólicos. En este trabajo se desarrollará un generador de eje horizontal.

#### Partes

Los molinos eólicos son complejas construcciones que están formados por una gran variedad de componentes que se describen a continuación:

- Cimentación, es subterránea y de hormigón armado, capaz de soportar las cargas del viento.
- La torre, elemento estructural que soporta todo el peso del aerogenerador y eleva las palas de la turbina, es hueca por dentro para permitir el acceso a la góndola.

- El rotor, se encuentra unido al eje principal para la transmisión del giro, y se puede dividir en 3 partes diferenciadas:

- Nariz, es un elemento aerodinámico que se sitúa en frente de la dirección de viento sobresaliendo de la zona de unión entre las palas y el buje. Su misión consiste en redireccionar el viento de la parte frontal del rotor a los respiraderos de la góndola y a la vez evitar turbulencias en la parte frontal del rotor.
- Bujes, es la pieza de unión entre las palas y el eje principal, y por lo tanto el transmisor de la fuerza del viento al interior de la góndola. Dentro del buje puede haber ciertos elementos mecánicos que permiten variar el ángulo de incidencia (o pitch) de las palas.
- Palas o aspas, generalmente tres, de poliéster con refuerzo de fibras de vidrio, de longitud de hasta 100 metros.

- La góndola, puede girar en torno a la torre para poner a la turbina encarada al viento. Dentro de ella se encuentra la caja multiplicadora, el eje principal, el generador, los frenos y los mecanismos de giro de la góndola. En su parte exterior lleva instalado un anemómetro y una veleta conectados a los sistemas de control de aerogenerador, y unos respiraderos para garantizar la refrigeración del motor. Se construyen en acero forjado y placas de fibra de vidrio.

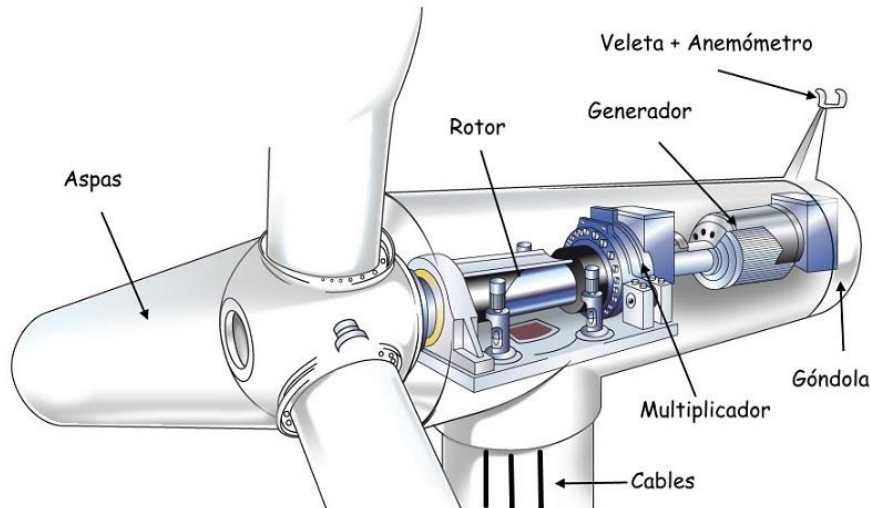


Figura 1. Representación de los elementos del interior de una góndola. Fuente: [www.renovablesverdes.com](http://www.renovablesverdes.com)

- Multiplicadora, es una caja de engranajes que convierte la baja velocidad de giro y alto par del eje principal en una velocidad de giro adecuada para el funcionamiento del generador. Uno de los objetivos de este trabajo es estudiar si la eliminación de la multiplicadora es beneficiosa tanto para el coste como para el funcionamiento de esta tecnología.
- Generador, convierte la energía mecánica producida por el rotor en energía eléctrica. Este trabajo basará todos sus esfuerzos en diseñar este elemento para una potencia de 100kW, centrándose en la tecnología síncrona de imanes permanentes multipolo.
- Sistema de frenado, es un sistema de seguridad que cuenta con discos que ayudan en situaciones de emergencia o de mantenimiento.
- Sistema de control, posee un microprocesador que se encarga de controlar y regular sus variables de puesta en marcha, funcionamiento y parada. Éste lleva toda esta información y datos a la central de control de la instalación.
- Sistemas de conexión, incorporan en la base de la torre, un armario con todos los componentes eléctricos (interruptores automáticos, transformadores de intensidad, protectores de sobre tensión, etc.) que facilitan el transporte de la energía eléctrica generada hasta la conexión de red o puntos de consumo.

### Energía eólica Onshore vs. Offshore

Para que la producción de energía eléctrica mediante molinos eólicos sea productiva o rentable, se construyen agrupados en parques eólicos. Pueden ser tanto instalaciones marinas (offshore) que ofrecen un mejor aprovechamiento del aire, mayores áreas para instalar más potencia y menor impacto visual, como instalaciones terrestres (onshore) que son menos costosas, más fáciles de construir y más accesibles que las anteriores.

## 1.4. Estado del arte

El Sol radia 174.423.000.000.000 kWh a la Tierra, y aproximadamente el 1,5% de esa energía que se recibe del Sol se transforma en energía eólica. Un estudio americano mostró que esta energía sería suficiente para cubrir la demanda energética del planeta.

Ya en la antigüedad y sin estos datos, el ser humano se dio cuenta de que era posible el uso de la energía del viento. Desde el principio de los tiempos, los hombres utilizaron el viento como propulsión en los primeros barcos veleros en el antiguo Egipto en el 3000 a.c. Posteriormente aparecieron los molinos de viento, que se usaban para moler cereales o bombear agua, y datan del siglo VII. Se localizaron en Sistán, en la actual Afganistán (antigua Persia), y no llegaron a Europa hasta el siglo XII en Francia e Inglaterra.

Con la invención de la máquina de vapor durante la Revolución Industrial, los molinos tal y como se conocían por aquel entonces dejaron de ser utilizados. El siguiente paso en la historia de la energía eólica se produjo con la llegada de la electricidad; a finales del siglo XIX los primeros aerogeneradores se basaron en la forma y el funcionamiento de los antiguos molinos de viento.

En 1802 Lord Kelvin tuvo la idea de acoplar un generador eléctrico a una máquina que aprovechara el viento. Fue el antecedente del aerogenerador, que no se pudo crear hasta que se inventó la dinamo.

Charles F. Brush en el verano de 1887-88 construyó una máquina considerada actualmente como el primer aerogenerador de electricidad. Las dimensiones eran para aquella época enormes: diámetro de rotor de 17m y 144 hojas de rotor de madera de cedro. Estuvo en funcionamiento durante 20 años, durante los cuales alimentó una batería colocada en su sótano. A pesar de las dimensiones del rotor, la potencia del aerogenerador era solamente de 12kW.

Dos años después, Dinamarca inició un programa para investigar esta energía y al poco tiempo Poul la Cour, meteorólogo danés, puso en marcha la primera máquina diseñada específicamente para generar electricidad a partir de la energía eólica. Sus primeros aerogeneradores comerciales se instalaron después de la primera guerra mundial, como consecuencia de la escasez de combustibles. Fundó la primera academia de energía eólica, de donde salieron los primeros ingenieros especializados.

Durante los siguientes años, numerosos físicos e ingenieros de todo el mundo siguieron contribuyendo al desarrollo lento, pero continuo de este tipo de máquinas. A continuación se nombra a algunos de ellos.

Albert Betz, físico alemán, formuló la ley Betz, que establecía el máximo valor que se puede aprovechar de la energía cinética del viento (59,3%). Su teoría sobre la formación de las alas todavía sirve de fundamento para la construcción de aerogeneradores.

Palmer Cosslett Putnam, ingeniero americano, desarrolló en 1941 el aerogenerador Smith Putnam, de 1,25MW. Éste aerogenerador trabajó hasta 1945 sin interrupciones, hasta que un fallo en el material hizo que dejase de funcionar, lo que pone de manifiesto que en aquella época no existían materiales en el mercado aptos para este objetivo.

## Introducción

Ulrich W Hüttner , ingeniero alemán, diseñó el aerogenerador StGW-34 en el año 1957 se considera la primera piedra de la tecnología eólica moderna.

El mismo año (1957) en Dinamarca Johannes Juul, ingeniero danés, discípulo de Poul la Cour, construyó el primer aerogenerador para corriente alterna de 200 kW.

Pero no fue hasta el comienzo de los años 70 con la crisis del petróleo cuando se consiguió llegar a un cambio en la manera de pensar de las políticas energéticas. Se creó tal interés en las energías renovables que se empezaron programas de investigación y dotación con subvenciones. Se buscaron nuevos caminos para explotar los recursos de la Tierra tanto ecológica, como económicamente rentables, y es que los aerogeneradores de aquella época eran demasiado caros, y el elevado precio de la energía que se obtenía a través de los mismos era un argumento para estar en contra de su construcción.

Para la normalización de las instalaciones, crear nuevos métodos de seguridad y conseguir un rendimiento económico de las instalaciones, se crearon institutos, como el Instituto Alemán de la Energía Eólica (DEWI) o el Instituto de Investigación Danés (Risø).

A finales de los 70 aparecieron los primeros aerogeneradores comerciales, que en 1980 llegaron a generar 55 kW. Con la reducción de los costes en la producción, la energía eólica comenzó a extenderse, sobre todo a partir de los movimientos contra la energía nuclear, y en los 90 se produjeron los avances que la hicieron una alternativa a las fuentes tradicionales.

También fue un factor a favor que estuviese apoyada por organizaciones ecológicas que la consideraban una energía económica, incluso si se incluían los costes externos de generación de energía como, por ejemplo, los daños del medio ambiente.

En 2001 se creó en Dinamarca la Asociación Mundial de Energía Eólica (World Wind Energy Association), con sede en Bonn (Alemania) y fue concebida como una organización internacional para la promoción mundial de esta fuente de energía. Cuenta actualmente con unos 500 miembros en más de cien países.

Durante el siglo XXI, los avances en tecnología eólica se han centrado en la sofisticación de los aerogeneradores para hacerlos más adaptables a diferentes condiciones meteorológicas y aumentar su productividad. También se han tenido en cuenta aspectos de diseño para facilitar su montaje y hacerlos más accesibles para su mantenimiento.

Uno de los aspectos en los que se está trabajando para aumentar la potencia de los aerogeneradores es la magnitud de las palas. Una de las propuestas más recientes es la presentada por investigadores de la Universidad de Virginia y el Laboratorio Nacional Sandia, en Estados Unidos, que están trabajando en una pala de 200 metros de largo que podría hacer posible la creación de turbinas de 50 MW, lo que supondría un aumento sustancial en comparación con la potencia actual que se sitúa aproximadamente en 8 MW en palas de hasta 84 metros de largo.

La ampliación del tamaño de las palas tiene un motivo claramente económico, ya que cuanto más diámetro tiene el rotor más energía puede generar un aerogenerador, es decir, cuanto más largas sean las palas más se reducirá el coste de la electricidad.

Transportar palas y construir torres tan altas, supone un problema logístico, por eso ya hay empresas que dedican sus esfuerzos a innovar en este ámbito para poder construir torres de hasta 400 metros.

Otro gran reto por el que se están intentando hacer mejoras es el aprovechamiento de vientos de velocidad más reducida, en zonas donde actualmente las condiciones no son óptimas para el auge de la eólica. Para lograr esto, por ejemplo, Siemens está desarrollando unas palas de peso reducido, y optimizando un tren de potencia para obtener máxima energía con vientos poco favorables.

Una de las últimas tendencias es que las turbinas eólicas se despojen de sus engranajes, al reemplazar el generador de alta velocidad convencional por uno de baja velocidad que elimina la necesidad de una multiplicadora. Empresas punteras en el sector como Siemens o General Electric apuestan por los generadores de accionamiento directo, intentando así impulsar la fiabilidad y reducir el coste de la energía eólica.

Estos modelos se basaron en un nuevo diseño que reduce el peso del generador del sistema. En las turbinas eólicas convencionales, la multiplicadora aumenta la velocidad del rotor movido por el viento varios cientos de veces, lo que reduce radicalmente el tamaño del generador requerido. Los generadores de transmisión directa funcionan a la misma velocidad que las palas de la turbina y por lo tanto tienen que ser mucho más grandes. Sin embargo, Siemens afirma que la góndola de la turbina entera pesa sólo 73 toneladas métricas, lo que equivale a 12 toneladas menos que sus turbinas de menor potencia basadas en las multiplicadoras de 2,3 megavatios.

Otra gran parte de la reducción de peso proviene de la utilización de imanes permanentes en el rotor de los generadores. Los generadores de turbina convencionales usan electroimanes (bobinas de cobre alimentadas con electricidad generada por el propio generador). Estudios afirman que un segmento de 15 milímetros de espesor de imanes permanentes puede generar el mismo campo magnético que una sección de 10 a 15 centímetros de bobinas de cobre.

Además, numerosos estudios concluyeron que la mayoría de las multiplicadoras de las turbinas eólicas fallarían antes de sus 20 años de vida diseñados; por ejemplo las cajas de cambios de 30 turbinas Vestas Wind Systems, que forman parte del parque eólico marino Kentish Flats del Reino Unido, tuvieron que ser sustituidas después de sólo dos años de funcionamiento. Por ello que se espera un aumento de la fiabilidad mediante el sistema de accionamiento directo, que tiene aproximadamente la mitad de piezas que una turbina convencional, aunque los sistemas de transmisión directa introducen un problema potencial, por la preocupación permanente sobre la futura disponibilidad de los metales tierras raras que se usan para hacer los imanes.

Por último y por mostrar qué caminos tomarán las investigaciones en la eólica, TECNALIA ha liderado un consorcio europeo para el desarrollo de un novedoso generador de 10 MW, ligero y fiable, basado en materiales superconductores.

Este nuevo generador presenta una reducción del 26% en peso frente a un generador de imanes permanentes, lo que se traduce en una reducción de hasta 1 millón de euros en el coste de una turbina eólica de 10 MW. Compañías europeas de reconocido prestigio, como GAMESA, Siemens, GE o INGLETEAM, han mostrado un alto interés por este desarrollo.

Las bobinas superconductoras y el sistema de enfriamiento necesario para producir las bajas temperaturas requeridas (-253 °C) han sido los principales retos para el desarrollo de estos



## Introducción

generadores. A fin de validar el concepto se ha construido un prototipo de menor tamaño pero en el que los elementos más innovadores tienen el mismo tamaño y operan en condiciones similares que en el generador de 10 MW.

Como se puede ver el desarrollo de la eólica es imparable y cada vez más países se suman a ella, por lo que tiene todos los componentes para tener el futuro asegurado, en parte respaldado por los problemas medioambientales, y la ya mencionada necesidad de reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>.

## Implantación

La energía eólica instalada en el mundo creció un 12,4% en 2016, hasta situarse en 486.749 MW, según datos del Global Wind Energy Council (GWEC), donde China, Estados Unidos, Alemania, India y España son los primeros productores mundiales.

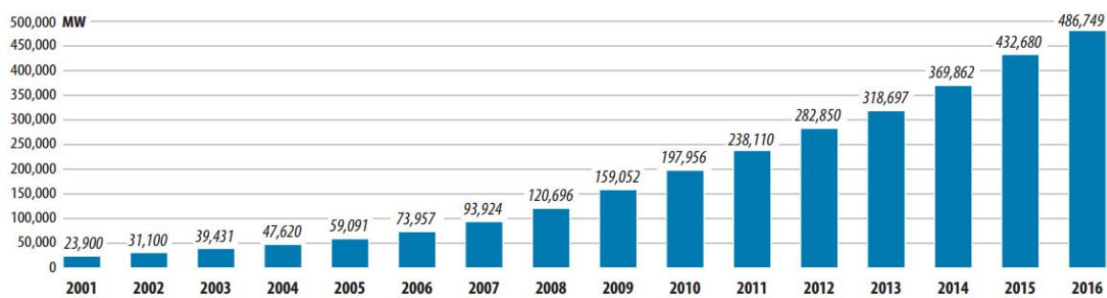


Figura 2. Potencia eólica instalada acumulada en el mundo. 2001-2016. Fuente: GWEC

En lo que respecta a Europa en apenas una década, la eólica ha avanzado cinco puestos en el mix energético del continente europeo.

## EVOLUCIÓN DE LA ENERGÍA EÓLICA

(Europa)



Figura 3. Evolución de la energía eólica en Europa. Fuente: WindEurope (2016)

España generó el 6 de febrero de 2017 más eólica que ningún otro país europeo, alcanzó los 311 GWh y cubrió con esta energía el 50% de la demanda. El 22 de febrero 2017, Dinamarca cubrió el 95,8% de su demanda eléctrica de ese día con energía eólica.

## 2. Máquinas síncronas de imanes permanentes

El término máquina síncrona de imanes permanentes (PMSM) describe todos los dispositivos de conversión de energía electromagnética en los cuales la excitación magnética, generalmente ubicada en el rotor, es sustituida por uno o varios imanes permanentes, manteniéndose el estator igual que en una máquina alterna multifase. Dicha excitación proporciona un campo fijo que no puede ser regulado, a diferencia de lo que ocurría con las máquinas síncronas tradicionales que disponían de una excitación alimentada en corriente continua y con la que se podía regular la reactiva que cedía o absorbía la máquina. En el caso de las PMSM se deja la regulación de reactiva al convertidor de conexión a red.

### 2.1. Imanes permanentes

Muchas han sido las tecnologías que han posibilitado el desarrollo de las máquinas de imanes permanentes como la electrónica de potencia o los programas de elementos finitos, pero sin duda la industria del imán ha permitido sustancialmente el éxito del desarrollo de dichas máquinas.

Un imán permanente se define como un material que puede ser magnetizado y que es capaz de mantener un campo magnético de forma persistente, a diferencia de los imanes temporales que generan un campo magnético sólo mientras está activa la fuerza o energía externa que lo genera.

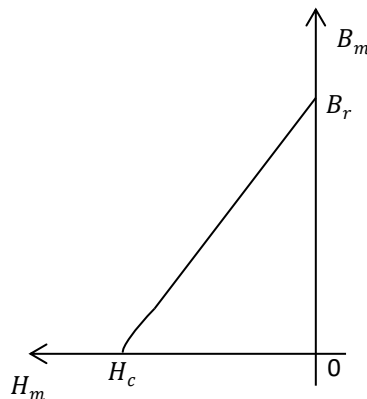


Figura 3. Curva característica BH de un imán

Es importante estudiar la curva característica de un imán, para comprender su funcionamiento. La curva B-H del segundo cuadrante mostrada en la figura 3, representa la variación de la inducción del imán en función de la excitación magnética  $H_m$  (amperios-vueltas) desmagnetizante.

La inducción remanente,  $B_r$ , es la inducción que posee el imán permanente cuando se encuentra en un circuito cerrado de reluctancia nula.

La fuerza coercitiva,  $H_c$ , es el valor de  $N \cdot I$  necesario para anular totalmente la inducción del imán

Las zonas de aire (entrehierro y ranuras) de un circuito magnético provoca que dentro del imán aparezca un campo desmagnetizante, por lo que optimizar el flujo de campo magnético, que depende del circuito magnético que en este caso forman los materiales y su geometría, determinará

## Máquinas síncronas de imanes permanentes

que el campo magnético del imán se aproveche en mayor o menor medida. Este efecto desmagnetizante hace que el punto de trabajo del imán ya no sea el punto  $B_r$  de su magnetización original, sino un punto de menor inducción situado sobre la curva B-H ( $B_m, H_m$ ).

El objetivo por tanto es que cuando se esté diseñando se obtenga el punto de operación del imán determinado por la intersección de la curva de carga con la curva de magnetización del imán.

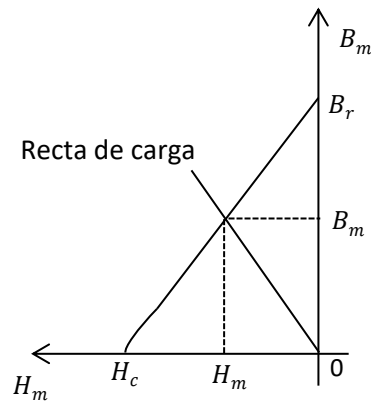


Figura 4. Punto de operación del imán

Además de la inducción remanente y de la fuerza coercitiva, otras propiedades que se pueden definir en un imán permanente son:

- Densidad de energía, viene caracterizada por el producto del máximo de la inducción, por el máximo del campo magnético ( $BH_{max}$ ), cuanto mayor es, más poderoso es el imán.
- Temperatura máxima, es la temperatura máxima a la que se debe operar el imán. Después de que la temperatura caiga por debajo de este valor, seguirá comportándose como lo hacía antes de alcanzar esa temperatura.
- Temperatura de Curie, es la temperatura a la cual el imán se desmagnetizará. Después de que la temperatura caiga por debajo de este valor, no se comportará como lo hacía antes de alcanzar esa temperatura.

Típicamente los imanes permanentes se clasifican en cuatro categorías.

- Imanes de neodimio hierro boro, NdFeB, este tipo de imán está compuesto por material magnético de tierras raras y tiene una gran fuerza coercitiva. Sin embargo, los imanes NdFeB tienen baja resistencia mecánica, tienden a ser frágiles y tienen poca resistencia a la corrosión si no se recubren.
- Imanes de samario cobalto, SmCo, son fuertes y difíciles de desmagnetizar. También son altamente resistentes a la oxidación y resistentes a la temperatura, soportando temperaturas de hasta 300 grados Celsius.

- Imanes de alnico, aluminio, níquel y cobalto. Aunque presentan una buena resistencia a la temperatura, se pueden desmagnetizar fácilmente pues su fuerza coercitiva es baja.
- Imanes de ferrita, están compuestos por óxido de hierro sinterizado y bario o carbonato de estroncio, son económicos y de fácil producción, ya sea por sinterización o prensado. Sin embargo, debido a que estos imanes tienden a ser frágiles, requieren molienda usando una rueda de diamante. Son uno de los tipos de imán más comúnmente utilizados, y son fuertes y no es fácil de desmagnetizar.

En la figura 5 se muestran las curvas BH de los materiales mencionados.

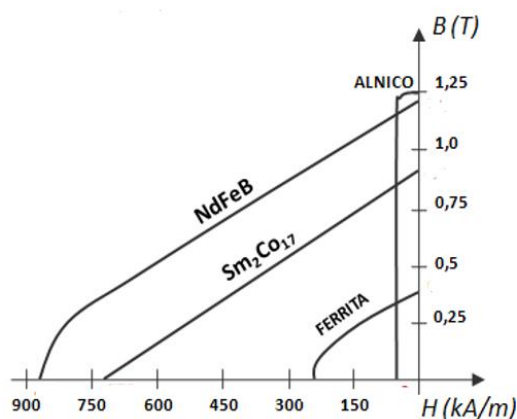


Figura 5. Curvas características BH de diferentes imanes permanentes. Fuente: Apuntes máquinas eléctricas II, ETSII-UPM.

Las propiedades de los distintos tipos de imanes se muestran en la tabla 1.

Material	$B_r$ (T)	$H_c$ (kA/m)	BHmax (kJ/m <sup>3</sup> )	Tmax (°C)	Tcurie (°C)
<b>NdFeB</b>	1-1,4	750-2000	220-440	120	310
<b>SmCo</b>	0,8-1,1	450-1300	150-240	250	750
<b>Alnico</b>	0,6-1,4	275	10-88	470	860
<b>Ferrita</b>	0,2-0,4	100-300	10-40	250	460

Tabla 1. Propiedades de los distintos imanes permanentes.

Por sus propiedades se utilizarán imanes de Neodimio, en concreto el N33H de la compañía ArnoldMagnetic.

Grado	Br(T)	Hc (kA/m)	BHmax(kJ/m <sup>3</sup> )	Tmax(°C)
N33H	1,175	838	267	120

Tabla 2. Propiedades del imán seleccionado para los generadores. Fuente: [www.arnoldmagnetics.com](http://www.arnoldmagnetics.com)

## 2.2. Ventajas e Inconvenientes

El auge de las máquinas de imanes permanentes se produce gracias a las múltiples ventajas que presentan respecto a las máquinas síncronas con excitación regulable en el rotor:

- La alta densidad de energía de los imanes permanentes propician máquinas más compactas que admiten la reducción del paso polar, y con ello se eliminan las pérdidas de excitación que aparecían en los devanados del rotor.
- Posibilidad de creación de máquinas de gran número de polos con diámetros reducidos, lo que permite su uso en aplicaciones de baja velocidad, eliminando la caja multiplicadora.
- Menor mantenimiento, ruido y vibraciones consecuencia de la eliminación del elemento mecánico.
- Al no necesitar excitar el rotor de manera externa se eliminan las escobillas y colectores disminuyendo aún más el mantenimiento necesario del conjunto
- Mayor rendimiento y eficiencia

Aparecen también una serie de inconvenientes derivados de la utilización de imanes:

- Alto coste de los imanes permanentes de tierras raras
- Dificultad de colocación de los imanes por interacción entre ellos en el proceso de ensamblado de la máquina
- Problemas de desmagnetización de los imanes si se sobrepasan las temperaturas máximas de funcionamiento

## 2.3. Clasificación de máquinas síncronas de imanes permanentes

### 2.3.1. Máquinas de flujo radial

En la mayoría de las máquinas rotativas de imanes permanentes, las líneas de campo cruzan del rotor al estator en la dirección radial y los devanados están orientados a lo largo de la dirección axial. Estas se pueden clasificar a su vez según la disposición relativa: rotor-estator.

#### **Rotor interno**

Los rotores de este tipo pueden tener los imanes dispuestos en su superficie o interiormente.

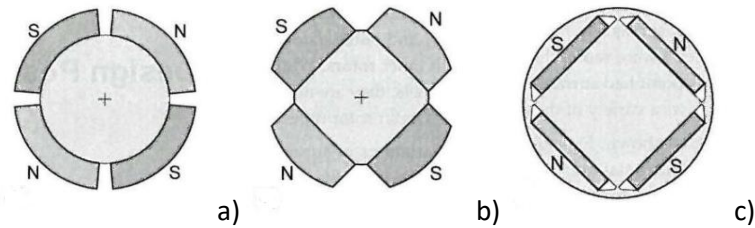


Figura 6. Configuraciones de máquinas de imanes permanentes de flujo radial con rotor interno.

- Imanes montados en la superficie del rotor, figura 3.a, 3.b.

Esta configuración se asemeja a una máquina síncrona de rotor liso pues como la permeabilidad de los imanes (1,02-1,2) es próxima a la del aire se considera la misma inductancia magnetizante en todo el entrehierro ( $L_q=L_d$ ). Al ser grande el entrehierro, por el espacio que ocupan los imanes, se necesitan imanes de alta energía como los de neodimio, de los que se hablará más adelante. Los imanes deben ir pegados con potentes adhesivos y su curvatura dificulta el proceso de creación, por eso aunque la configuración más común para trabajar es la a), aparece el montaje tipo b), pues los imanes son más fáciles de fabricar y de montar al tener un lado plano.

- Imanes en el interior del rotor, figura 3.c.

Si los imanes van en el interior del rotor, el entrehierro aunque físicamente queda uniforme, el flujo tendrá un paso más favorable entre los imanes en la dirección  $q$ , por lo que la inductancia en el eje  $d$  será menor que en el eje  $q$  ( $L_d < L_q$ ), creando una componente de reluctancia del par, asemejándose a una máquina síncrona de polos salientes. El montaje de los imanes es más sencillo al ir insertados, su fabricación también se ve facilitada por su forma de bloque rectangular. Por otro lado al ser bajo el entrehierro no se necesitan imanes de alta energía pudiendo usar imanes de Ferrita que tiene un precio de 20 a 30 veces menor que los de neodimio. En conjunto son máquinas de mayor volumen y por tanto aptas para pocos polos, aplicaciones de alta velocidad.

Los estatores para motores de rotor interno aparecen en dos formas generales. Básicamente, el estator puede ser ranurado abierto o cerrado.

### Rotor externo

Aunque es mucho más beneficioso el uso de rotores internos, entre otras cosas porque permiten con facilidad la eliminación de calor producido en los devanados del estator. Nuevos modelos experimentales intentan incorporar en las ruedas de los coches el motor de tracción del vehículo y para ello esta es la configuración adecuada. Para un radio externo dado, un motor de rotor externo tiene un radio de espacio de aire mucho más grande que el de un motor de rotor interno. Como resultado, se puede lograr un par más alto, siempre que las pérdidas óhmicas puedan disiparse los devanados del estator.

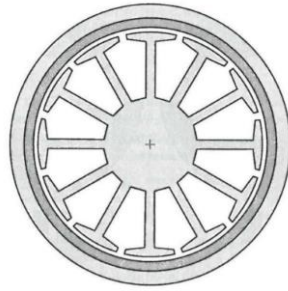


Figura 7. Configuración de máquina de imanes permanentes de flujo radial con rotor externo.

### 2.3.2. Máquinas de flujo axial

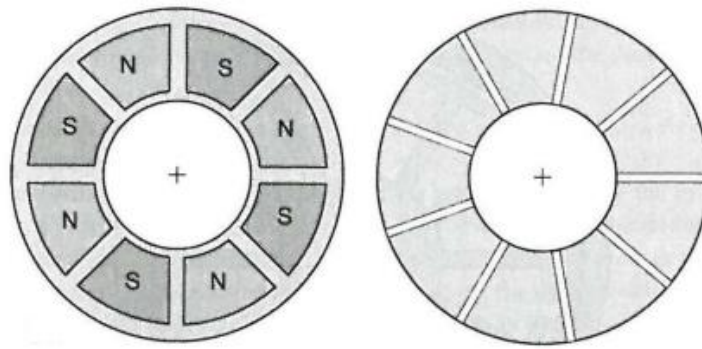


Figura 8. Configuración de máquina de imanes permanentes de flujo axial.

El movimiento de rotación puede obtenerse intercambiando la orientación de los devanados y el campo magnético. En los motores de flujo axial, las líneas de campo fluyen en la dirección axial, y los devanados están orientados a lo largo de la dirección radial, como se muestra en la Figura 8. El par, esta configuración muestra una fuerza axial muy alta porque los imanes del rotor intentan cerrar el entrehierro.

El motor axial no ha tenido un uso generalizado, la razón principal es que al fluir el campo en dirección axial el estator tiene que estar laminado circunferencialmente aumentando tiempo y costes de fabricación.

Una vez estudiadas los distintos tipos de disposiciones de máquinas de imanes permanentes y los distintos materiales de los que pueden estar hechos los imanes se procede a seleccionar la tecnología más adecuada para la aplicación de este Trabajo Fin de Grado.

Se diseñará una máquina síncrona de imanes permanentes, de flujo radial, rotor interno e imanes exteriores curvos montados sobre su superficie. Los imanes utilizados serán de Neodimio, como se indicó en la sección 2.2 *Imanes*, por su mayor densidad de energía y fuerza coercitiva, que permitirán tener la inducción necesaria para que el generador funcione correctamente.

### 3. Diseño del generador síncrono de imanes permanentes sin multiplicadora

En este apartado se realiza el diseño del generador eólico síncrono de imanes permanentes, sin caja multiplicadora aplicando la siguiente metodología:

- Métodos analíticos: se obtiene un primer dimensionamiento básico a partir de las especificaciones previamente elegidas de la aplicación, utilizando un método analítico con un sencillo algoritmo de iteración para obtener las dimensiones y parámetros iniciales necesarios, a partir de los cuales se desarrolla más minuciosamente el modelo.

- Métodos numéricos: se obtienen cálculos numéricos más exactos y precisos, con un programa de elementos finitos que permitirán analizar problemas eléctricos, magnéticos, saturaciones y pérdidas.

Se considera como óptimo compaginar las herramientas numéricas y analíticas, con el objetivo de minimizar la duración del proceso de diseño, asegurando a la vez una buena precisión de cálculo.

#### 3.1. Dimensionamiento básico

##### 3.1.1. Determinar las especificaciones de la aplicación

Una serie de especificaciones mecánicas como eléctricas son necesarias para el diseño inicial:

- Potencia, será de 100kW, pues el modelo irá enfocado a un sistema de autoconsumo que pueda mejorar la eficiencia del sistema, al reducirse pérdidas por transporte y distribución. También este tipo de aerogeneradores de menor potencia mejoran la calidad del suministro eléctrico en la red de distribución al proveer de estabilidad a la misma, cuando se trate de redes de distribución débiles o finales de línea.

- Velocidad de rotación del rotor, las palas pueden girar a una velocidad de entre 15 y 40 revoluciones por minuto, y dependen de un límite físico que es la velocidad máxima de la punta de las palas. Esta velocidad máxima es constante con todos los rotores de aerogeneradores, pero lo que hace variar las revoluciones de giro es la longitud de las palas. Un incremento de la longitud de las palas implica un incremento de la velocidad radial con la misma revolución. Para la potencia de 100 kW un diámetro de rotor apropiado sería de 37 m, lo que equivaldría a una velocidad de giro nominal de aproximadamente 30 rpm, para una velocidad específica  $\lambda$  que para turbinas de eje horizontal es de unos 6,5 a 8 (dado por el fabricante). Y para una velocidad de viento de 9 m/s.

$$N = \frac{\lambda_d \cdot 60 \cdot v_m}{\pi \cdot D_{rotor}} \simeq 30 \text{ r.p.m.} \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{\text{Velocidad de la pala}}{\text{Velocidad del viento}} \quad (2)$$



## Diseño del generador síncrono de imanes permanentes sin multiplicadora

- Tensión nominal, valores tipo de tensión para generadores de potencia de 100 kW, están comprendidos entre los 140 y 200 v, se elige para este caso una tensión de 168 v.

- Frecuencia, dado que se quiere conectar el generador directamente con las palas del rotor, sin multiplicadora de por medio, la frecuencia debe ser lo menor posible que permiten los convertidores situados a la salida del generador, para no penalizar en el tamaño de este al necesitarse un mayor número de polos, un valor apropiado para este tipo de aplicación es de 10 Hz.

- Pares de polos, se calculan a partir de la frecuencia y velocidad de giro.

$$p = \frac{f}{n_s} \cdot 60 = 20 \text{ pares de polos (3)}$$

Los datos anteriores, que serán la base de todo el diseño, se recogen en la siguiente tabla.

Parámetros principales		
Especificación	Símbolo	Valor
Potencia	$P_m$	100 kW
Velocidad de rotación rotor	$n_s$	30 rpm
Tensión de fase	$U_f$	168 V
Frecuencia	$f$	10 Hz
Pares de polos	$p$	20

Tabla 3. Especificaciones básicas del generador síncrono de imanes permanentes sin multiplicadora de 100kW.

### 3.1.2. Ecuación básica

Una vez que se eligen las especificaciones necesarias, el siguiente paso para el diseño del generador síncrono de imanes permanentes es calcular el par electromagnético con la ecuación básica. Se puede ver que se aproxima el par mecánico al eléctrico al despreciar las pérdidas por rozamiento.

$$T_m = \frac{P_m}{\Omega_s} = 31831 \text{ Nm (4)}$$

$$T_m \cong T_i = 3 \cdot \frac{\frac{2\pi}{\sqrt{2}} f \cdot N \cdot \xi \cdot \hat{\phi} \cdot I}{\frac{2\pi \cdot f}{p}} = 3 \cdot p \cdot \xi \cdot N \cdot I \cdot \frac{\hat{\phi}}{\sqrt{2}} \text{ (5)}$$

Se definen también los parámetros:

- Inducción en el entrehierro,  $B_\delta$ : valor eficaz de la onda de inducción creada por el imán permanente en la línea media del entrehierro.
- Flujo,  $\hat{\phi}$ :

$$\hat{\phi} = \iint \sqrt{2} \cdot B_\delta \cdot \text{sen} \alpha \cdot dS = L \cdot \sqrt{2} \cdot B_\delta \cdot \int \text{sen} \alpha \cdot dl \text{ (6)}$$

$$\hat{\phi} = L \cdot \sqrt{2} \cdot B_\delta \cdot \int_0^\pi \sin \alpha \cdot \frac{D}{2} \cdot \frac{1}{p} \cdot d\alpha = L \cdot \frac{D}{p} \cdot \sqrt{2} \cdot B_\delta \text{ (7)}$$

- Carga lineal, A: que es un parámetro de ajuste que usaremos en las sucesivas iteraciones, supondremos uno en la primera aproximación y una vez que el generador esté diseñado se calcula A y si no coincide con el supuesto se toma el nuevo valor y se recalcula desde el principio.

$$A = \frac{N \cdot I_c}{\pi \cdot D} = \frac{3 \cdot N_s \cdot 2 \cdot I}{\pi \cdot D} = \frac{6 \cdot N_s \cdot I}{\pi \cdot D} \quad (8)$$

- El número de ranuras por polo y fase, q.

Sustituyendo en la ecuación (2) obtenemos:

$$T_m = \frac{\pi}{2} \cdot D^2 \cdot L \cdot \xi \cdot B_\delta \cdot A \quad (9)$$

Donde D es el diámetro a nivel de entrehierro y L la longitud del paquete magnético.

A partir de la especificación  $T_m$  y del nivel de utilización de los materiales, que viene caracterizado por " $A \cdot B_\delta$ " queda definido el tamaño de la máquina  $D^2 \cdot L$  a nivel de entrehierro.

$$D^2 \cdot L = T_m \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \frac{1}{\xi \cdot A \cdot B_\delta} \quad (10)$$

Para la separación de D-L existen dos posibilidades:

- Que el diseño este sujeto a algún tipo de restricción dimensional que fije uno de los dos, y en las siguientes iteraciones servirá de parámetro de ajuste junto con A
- Suponer que ambos son iguales, D=L, porque da diseños compactos, se fija uno de ellos y se varía el otro junto con A.

En ambos modelos que se van a diseñar se ha preferido el primer modo.

Una de las ventajas en el diseño de las máquinas de imanes permanentes es que al elegir el imán la inducción en el entrehierro,  $B_\delta$ , queda determinada.

Llegados a este punto y para poder comenzar con el proceso de iteración, se debe elegir un valor de q, ranuras por polo y fase. Para este caso q=1 y paso diametral de la bobina, es adecuado para todas las iteraciones. Además con la ayuda de la siguiente tabla quedará determinado el factor de devanado,  $\xi = 1$ .

Armónico	q (ranuras por polo y fase)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1.000	0.9659	0.9598	0.9577	0.9567	0.9561	0.9558	0.9556	0.9555	0.9554
3	1.000	0.7071	0.6667	0.6533	0.6472	0.6440	0.6420	0.6407	0.6399	0.6392
5	1.000	0.2588	0.2176	0.2053	0.2000	0.1972	0.1955	0.1944	0.1937	0.1932
7	1.000	-0.2588	-0.1774	-0.1576	-0.1494	-0.1453	-0.1429	-0.1413	-0.1403	-0.1395
9	1.000	-0.7071	-0.3333	-0.2706	-0.2472	-0.2357	-0.2291	-0.2250	-0.2222	-0.2203
11	1.000	-0.9659	-0.1774	-0.1261	-0.1095	-0.1017	-0.0974	-0.0948	-0.0930	-0.0918
13	1.000	-0.9659	0.2176	0.1261	0.1022	0.0919	0.0864	0.0831	0.0810	0.0795
15	1.000	-0.7071	0.6667	0.2706	0.2000	0.1725	0.1586	0.1503	0.1450	0.1414
17	1.000	-0.2588	0.9598	0.1576	0.1022	0.0837	0.0748	0.0697	0.0665	0.0643
19	1.000	0.2588	0.9598	-0.2053	-0.1095	-0.0837	-0.0722	-0.0660	-0.0622	-0.0596
21	1.000	0.7071	0.6667	-0.6533	-0.2472	-0.1725	-0.1429	-0.1274	-0.1182	-0.1122
23	1.000	0.9659	0.2176	-0.9577	-0.1494	-0.0919	-0.0722	-0.0626	-0.0571	-0.0536

Tabla 4. Valores de los factores de distribución de devanados trifásico.

### 3.1.3. Elección de las dimensiones del imán

Como ya se mencionó en el apartado sobre máquinas síncronas de imanes permanentes, se ha elegido imanes de neodimio NdFeB. Es necesaria otra serie de suposiciones iniciales respecto a las dimensiones de estos e ir variándolas hasta obtener en el entrehierro un valor de inducción a elección del diseñador, en particular  $B_{\delta}=0,76$ .

Se indica también el valor del entrehierro que será importante en el diseño al ser parte del circuito magnético, cuanto más pequeño sea mayor intensidad de campo, aunque por criterios mecánicos se suele escoger el uno tal que se cumpla la siguiente relación.

$$l_g = 0,5 - 1\% D \quad (11)$$

Dimensionamiento Imanes		
Especificación	Símbolo	Valor
Entrehierro	$l_g$	2,4 mm
Recubrimiento polar	$S_m/S_g$	0,76
Altura Imán	$l_m$	19 mm
Coeficiente de dispersión	$K_{\sigma}$	1
Coeficiente de Carter	$K_c$	1
Inducción remanente imán	$B_r$	1,1 T
Campo magnético coercitivo imán	$H_c$	838 kA/m

Tabla 5. Dimensiones de los imanes permanentes del generador sin multiplicadora.

Ahora es posible calcular la permeabilidad relativa de los imanes y la inducción real en el entrehierro. Se comprueba que el valor real de la inducción es igual al deseado  $B_{o\delta} = B_{\delta}$ .

$$\mu_r = \frac{B_r}{\mu_0 \cdot H_c} = 1,04 \quad (12)$$

$$B_{o\delta} = \frac{\frac{S_m}{S_g} K_{\sigma}}{1 + \mu_r \frac{S_m}{S_g} K_c \frac{l_g}{l_m}} \cdot B_r = 0,76 \quad (13)$$

### 3.1.4. Cálculo del devanado

Se definen nuevos parámetros necesarios para el diseño del devanado como el número de ranuras,  $Q$ , referentes al estator de la máquina, que será un número entero.

$$Q = q \cdot 2p \cdot 3 = 120 \text{ ranuras} \quad (14)$$

Respecto al tipo de devanado, los más habituales suelen ser:

- El de simple capa, con un lado de bobina por ranura.
- El de doble capa, con dos de las bobinas por ranura: se emplean principalmente para poder construir bobinados simétricos polifásicos con acortamientos de paso.

Se empleará este segundo tipo por su mayor versatilidad.

Con todos los datos presentados hasta ahora se puede calcular la primera estimación de D y L, y con ello el flujo.

$$\phi_{polo} = \frac{\pi \cdot D}{2p} \cdot L \cdot B_{\delta} \quad (15)$$

Y junto con la tensión interna de diseño que aproximamos a la tensión de fase, se calcula el número de espiras a diferentes niveles:

- Número de espiras por polo y fase

$$n_{spf} = \frac{N}{p} = \frac{U_{fase}}{4,44 \cdot p \cdot f \cdot \xi \cdot \sqrt{2} \cdot \phi_{polo}} \quad (16)$$

- Número de espiras fase

$$N_s = n_{spf} \cdot p \quad (17)$$

- Número de bobinas

$$B = \frac{Q \cdot capa}{2} \quad (18)$$

- Números de espira por bobinas

$$n_{sbob} = \frac{N_s}{B} \cdot 3 \quad (19)$$

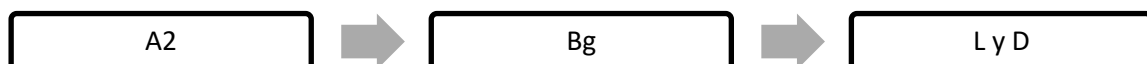
Se elige un número entero de  $n_{spf}$ , se recalcula N y  $\phi_{polo}$  produciéndose así un primer ajuste a nivel de inducción.

A continuación se comprueba la carga lineal, para ello se calcula la intensidad, en valor eficaz, a partir de  $P_m$ , U,  $\cos\varphi$ ,  $\eta$ .

$$I = \frac{P_m}{\eta \cdot \cos\varphi \cdot 3 \cdot U_{fase}} \quad (20)$$

Con las aproximaciones  $\eta = \cos\varphi = 1$  y se recalcula A (a la que llamaremos dos para distinguirla de la A1 supuesta)

Se comprueba que A2 coincida con A1. Si no es así, se repite el proceso desde el principio:



Partiendo de unos valores estimados que se consideraron que podían ser aproximados a los que se obtendrían al final y tras una serie de iteraciones, los resultados alcanzados de los parámetros analizados en este punto son los que se muestran en la siguiente tabla.

Dimensionamiento devanado		
Especificación	Símbolo	Valor
Carga lineal	$A$	41339 A·m
Diámetro a nivel de entrehierro	$D$	1,100 m
Nivel uso materiales	$AB\xi$	31417,6
Longitud paquete	$L$	0,533 m
Número de ranuras	$Q$	120 ranuras
Número de ranuras por polo	$Q/polo$	3 ranuras
Número de ranuras por polo y fase	$q$	1 ranuras
Capas	$capa$	2
Número de bobinas	$B$	120 Bobinas
Número de espiras por polo y fase	$n_{spf}$	6 espiras/polo/fase
Número de espiras por ranura	$N_c$	6 conductores/ranura
Número de espiras por bobina	$n_{sbob}$	3 espiras/bobina
Número de espiras por fase	$N_s$	120 espiras/fase
Flujo en el entrehierro	$\Phi_{o\delta}$	0,03153 Wb
Inducción en el entrehierro	$B_{o\delta}$	0,76049 T
Intensidad	$I$	198,41 A

Tabla 6. Recopilación de los valores del dimensionamiento de los devanados del generador sin multiplicadora.

### 3.1.5. Dimensionamiento del estator

Como ya se mencionó anteriormente, en este generador el estator es exterior y el rotor se encontrará en su interior.

A continuación se obtienen los parámetros necesarios para tener una aproximación de las dimensiones iniciales del estator. Para la determinación del diámetro interno se sumará al diámetro a nivel de entrehierro la longitud del mismo.

$$D_{is} = D + l_g \quad (21)$$

Para calcular el paso de la ranura, que permitirá desglosar el ancho de ranura y el ancho de diente, primero es necesario calcular el paso del polo.

$$\tau_p = \frac{\pi \cdot D_{is}}{2 \cdot p} \quad (22)$$

$$\tau_r = \frac{\tau_p}{Q/polo} = w_r + w_d \quad (23)$$

Se tiene que suponer una inducción que dependerá de la chapa utilizada, en este caso  $B_{\max\_diente} = 1.5 \text{ T}$  y con ello obtenemos el ancho de diente.

$$w_d = \frac{\phi_{o,\delta}}{B_{\max\_diente} \cdot \tau_p \cdot L} \quad (24)$$

Se aplica la conservación de flujo, pues debe ser el mismo el que hay a nivel de entrehierro que el que se transmite a través de los dientes de la chapa del estator. No se considerará en este primer dimensionamiento el pie de diente, dejándose su ajuste para el posterior análisis numérico.

$$B_\delta \cdot \frac{\pi \cdot D}{2p} \cdot L = B_d \cdot \frac{Q}{2p} \cdot w_d \cdot L \quad (25)$$

La densidad de corriente, se deja a criterio del diseñador y se pondrá un valor de  $\delta = 3 \text{ A/mm}^2$  aunque, usando un valor mayor el conductor resultaría más pequeño, con el consiguiente ahorro de dinero y más facilidad para el dimensionamiento de la ranura, no se quiere que se produzcan fallos en el devanado por sobrecarga ni excesivo calentamiento. Con ello se calcula la sección del conductor.

$$a_c = \frac{I}{\delta} = 66,14 \text{ mm}^2 \quad (26)$$

Utilizando el estándar AWG, se escoge el hilo normalizado de sección inmediatamente superior al valor obtenido, que será el número de AWG 000. A partir de ahora se trabaja con este valor

Número AWG	Diámetro (mm)	Sección(mm <sup>2</sup> )	Resistencia(O/km)	Capacidad (A)
0000	11.86	107.2	0.158	319
000	10.40	85.3	0.197	240
00	9.226	67.43	0.252	200
0	8.252	53.48	0.317	150
1	7.348	42.41	1.4	120

Tabla 7. Secciones normalizadas de conductor según American Wire Gauge AWG. Fuente: Electrónica fácil

Se establece un factor de relleno  $F_r = 0,52$ , que tiene en cuenta el espacio entre conductores, el aislamiento y la abertura de ranura. Con estos datos se saca el área de la ranura de donde también se podrá despejar la altura de la misma.

$$A_r = \frac{N_c \cdot a_c}{F_r} = w_r \cdot h_r \quad (27)$$

La inducción en la culata se establece en  $B_{sy} = 0,7 \text{ T}$ . Se impone de nuevo la conservación de flujo, esta vez entre el flujo del entrehierro y de la culata y se tendrá de ello la altura de la culata,  $h_{sy}$ .

$$B_\delta \cdot \frac{\pi \cdot D}{2p} \cdot L \cdot \frac{1}{2} = B_{sy} \cdot h_{sy} \cdot L \quad (28)$$

Por último el diámetro de chapa de estator  $D_e$  será la suma del diámetro interno, dos veces la altura de la ranura y dos veces el ancho de la culata.

$$D_e = D_{is} + 2 \cdot h_r + 2 \cdot h_{sy} \quad (29)$$

## Diseño del generador síncrono de imanes permanentes sin multiplicadora

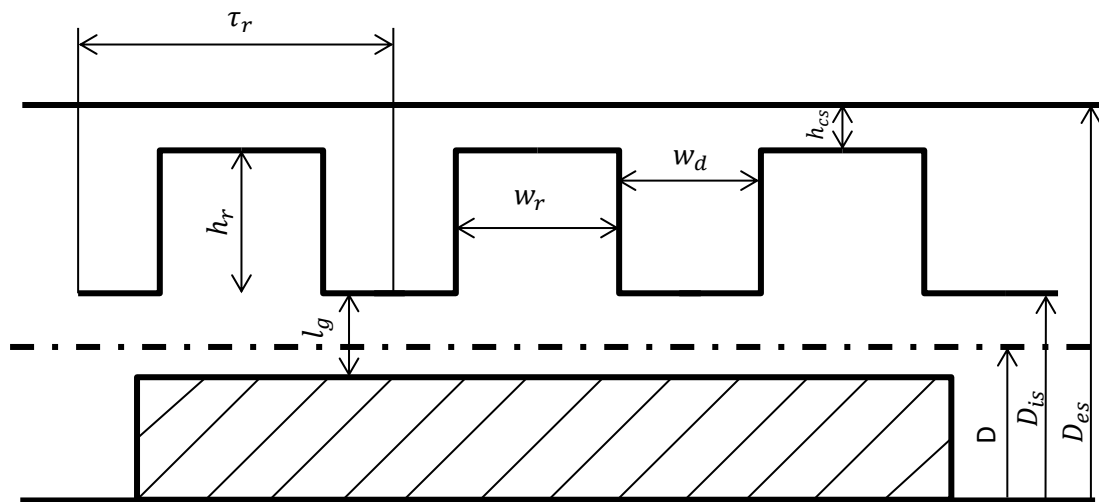


Figura 9. Representación esquemática de los parámetros considerados en el dimensionamiento del estator del generador. Fuente: elaboración propia.

Los valores de las expresiones anteriores se recogen en la siguiente tabla.

Dimensionamiento estator		
Especificación	Símbolo	Valor
Diámetro interior	$D_{is}$	1,1024 m
Paso polar	$\tau_p$	0,08658 m
Ranuras por polo	$Q/polo$	3 ranuras
Paso de ranura	$\tau_r$	28,9 mm
Inducción máxima en el diente	$B_{max\_diente}$	1,5 T
Ancho de diente	$w_d$	13,1 mm
Ancho de ranura	$w_r$	15,7 mm
Densidad de corriente	$\delta$	3 A/mm <sup>2</sup>
Área del conductor	$a_c$	66,14 mm <sup>2</sup>
Factor de relleno	$F_r$	0,52
Área de la ranura	$A_r$	763,13 mm <sup>2</sup>
Altura de la ranura	$h_r$	48,5 mm
Inducción máxima en la culata	$B_{max\_culata}$	0,7 T
Ancho de la culata	$h_{cs}$	0,04 m
Diámetro exterior	$D_{es}$	1,28 m

Tabla 8. Recopilación de los resultados obtenidos para dimensionar el estator del generador sin multiplicadora.

### 3.1.6. Dimensionamiento del rotor

Se debe elegir cuál será la saturación máxima en la culata del rotor, que se tomará de  $B_{\max\_cul} = 0,7 T$ .

Si al diámetro a nivel del entrehierro se le resta el entrehierro nos quedará el diámetro exterior del rotor que incluye la altura de los imanes.

$$D_{er} = D - l_g \quad (30)$$

Restando dos veces la altura del imán se tiene el diámetro al inicio de la culata.

$$D_{ir} = D_{er} - 2 \cdot l_m \quad (31)$$

Con el nivel de flujo calculado anteriormente y la inducción máxima que se quiere en la culata se obtiene el espesor que debe tener.

$$h_{cr} = \frac{\phi_{polo}}{2 \cdot B_{\max\_cul} \cdot L} \quad (32)$$

Por último el diámetro de material paramagnético ( )

$$D_{paramag} = D_{ir} - 2 \cdot h_{cr} \quad (33)$$

En la figura 10 se muestra una representación de los parámetros mencionados en esta sección y en la tabla 9 los valores de los mismos.

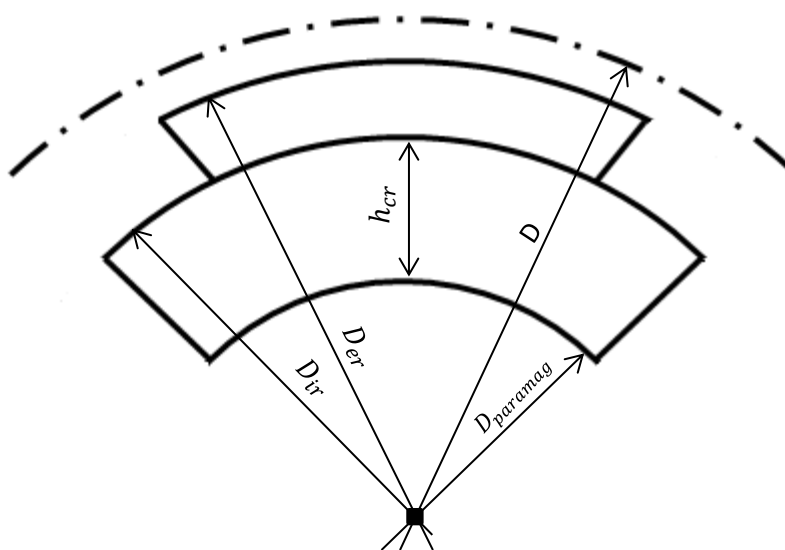


Figura 10. Representación esquemática de los parámetros considerados en el diseño del rotor.  
Fuente: elaboración propia



Dimensionamiento rotor		
Especificación	Símbolo	Valor
Diámetro exterior	$D_{er}$	1,0976 m
Diámetro interior	$D_{ir}$	1,0596 m
Inducción máxima en el rotor	$B_{max\_cul}$	0,7 T
Espesor de culata	$h_{cr}$	0,042 m
Diámetro de paramagnético	$D_{paramag}$	0,975 m

Tabla 9. Dimensiones del rotor del generador sin multiplicadora.

### 3.1.7. Dimensiones estimadas finales

Para tener una visión global de los resultados obtenidos, se recopilan los parámetros conseguidos con el proceso de iteración que se consideran más importantes en la siguiente tabla resumen. Además servirá de base para iniciar el método de cálculo de elementos finitos.

Tabla resumen		
Especificación	Símbolo	Valor
Potencia	P	100 kW
Velocidad	$N_s$	30 rpm
Tensión fase	$U_{ef}$	168V (por fase)
Frecuencia	f	10 Hz
Par	$T_m$	31831 Nm
Inducción a nivel de entrehierro	$B_\delta$	0,76 T
Diámetro a nivel de entrehierro	$D$	1,1 m
Longitud del paquete	$L$	0,533 m
Espesor del entrehierro	$l_g$	2,4 mm
Flujo en el entrehierro	$\phi_{o\delta}$	0,0315 Wb
Diámetro exterior del rotor	$D_{er}$	1,0976 m
Diámetro interior del rotor	$D_{ir}$	1,0596 m
Número de ranuras totales	$Q$	120 ranuras
Número de espiras por fase	$n_s$	120 espiras/fase
Intensidad	$I_{ef}$	198,41 A
Diámetro interior del estator	$D_{is}$	1,1024 m
Diámetro exterior del estator	$D_{es}$	1,28 m
Ancho de diente	$w_d$	13,1 mm
Ancho de ranura	$w_d$	15,7 mm
Área del conductor	$a_c$	66,14 mm <sup>2</sup>
Número de conductores en ranura	$n_c$	6 conductores
Altura de la ranura	$h_r$	48,5 mm

Tabla 10. Características generales del generador sin multiplicadora, obtenidas con el método analítico.

### 3.1.8. Tabla comparativa

Como una de las finalidades de este proyecto es diseñar y comparar dos modelos, uno sin multiplicadora de velocidad y otro con ella, además del proceso iterativo realizado en los anteriores apartados (desde el 3.1.2. Ecuación básica a 3.1.6. Dimensionamiento del rotor), se llevan a cabo estudios similares variando algunos datos para comparar las distintas posibilidades y poder seleccionar los más adecuados. Para ello se tienen en cuenta los siguientes parámetros.

- La frecuencia, se probarán valores de 10, 15 y 20 Hz, que son los más bajos que permiten los convertidores que actualmente hay en el mercado, y es que cuanto menor valor tenga, menor número de polos y menor tamaño de la máquina. Se incluye además el caso de 50 Hz a modo de ejemplo.

- La velocidad de rotación, se considerarán rotaciones de 30 r.p.m. de los modelos sin multiplicadora, y 120 r.p.m. para los que tengan sistemas 1:4. De nuevo se incluye un valor extra en este caso de un modelo con multiplicadora 1:25 similar a uno que se encuentra en el mercado.

- Dimensiones de la máquina, al ser máquinas multipolares de imanes permanentes, permiten crear modelos más compactos, pero habrá que buscar el tamaño más adecuado.

Los valores obtenidos se recogen en la siguiente tabla, siendo los casos 1, 2, 3, 4, 5 y 6 los correspondientes a generadores sin necesidad de multiplicadora, los casos 7 y 8 con multiplicadora, y el 9 y el 10 casos extra a modo de ejemplo.

COMPARATIVA										
CASOS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>P (kW)</b>	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
<b>N<sub>s</sub> (rpm)</b>	30	30	30	30	30	30	120	120	750	30
<b>F (Hz)</b>	15	15	15	20	10	10	10	10	50	50
<b>A (<math>\frac{A \cdot v}{m}</math>)</b>	31831	20013	28647	23149	42547	41339	54567	58298	46685	11368
<b>D (m)</b>	1,2	1,2	1	1,1	0,855	1,1	0,5	0,39	0,3	1,4
<b>L (m)</b>	0,582	0,925	0,931	0,952	0,857	0,533	0,489	0,752	0,254	1,2
<b>B<sub>δ</sub> (T)</b>	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76
<b>Lg (mm)</b>	2,53	2,9	2,53	2,4	2,53	2,53	1,9	2,27	1,5	3,6
<b>rec.polar</b>	0,76	0,76	0,76	0,75	0,76	0,76	0,75	0,76	0,75	0,8
<b>lm(mm)</b>	20	23	20	22	20	20	18	18	15	15
<b>p</b>	30	30	30	40	20	20	5	5	4	100
<b>Q</b>	180	180	180	240	120	120	30	30	24	600
<b>n<sub>spf</sub></b>	8	6	6	4	4	6	12	12	22	1
<b>δ (<math>\frac{A}{mm^2}</math>)</b>	3,67	3,67	3,67	3,67	3	3	3	3	3	3
<b>wr (mm)</b>	13,8	13,8	11,5	9,5	14,8	19	34,6	27,1	26	4,8
<b>hr (mm)</b>	29,2	22,5	26,3	21,2	47,7	46,4	61,1	65,1	52,2	12,8
<b>hr/wr</b>	2,1	1,6	2,2	2,2	3,2	2,4	1,7	2,4	2,0	2,6
<b>Φ (Wb)</b>	0,025	0,0398	0,0333	0,0281	0,0394	0,0315	0,0525	0,063	0,0204	0,0108

Tabla 11. Comparativa de los diferentes modelos de generadores estudiados.

## Diseño del generador síncrono de imanes permanentes sin multiplicadora

Se pueden sacar varias conclusiones a la vista de los resultados.

- Generar a frecuencias de 15 o 20 Hz y a bajas velocidades (casos 1, 2, 3 y 4):
  - implica la necesidad de máquinas de mayor volumen respecto a las de 10 Hz con el respectivo encarecimiento de material.
  - elevado número de polos magnéticos necesarios y por tanto mayor coste debido al alto precio de los imanes de tierras raras.
  - elevado número de ranuras a igualdad de diámetros lo que dificulta por un lado la geometría de la chapa estatórica con su correspondiente encarecimiento en el proceso de fabricación y por otro ranuras muy finas para la cantidad de conductores que van alojados en ellas.
  - al intentar disminuir la longitud (casos 1 y 2) aumenta considerablemente la carga lineal y el número de espiras necesario lo que empeora la situación, además del aumento del coste del cobre.
  
- Una vez elegida la frecuencia de 10 Hz entre los casos 5 y 6 el modelo elegido es el 6:
  - la tecnología de imanes permanentes permite hacer modelos compactos y de reducido paso polar en máquinas multipolares
  - la relación  $hr/wr$  es más coherente
  
- Para velocidades de 120 revoluciones por minuto se escoge el modelo 8:
  - aunque a todos los efectos el modelo 7 parece más beneficioso, por su menor volumen, menor tamaño de los imanes, hay que tener en cuenta que en los dos generadores que se quieren comparar la relación entre el alto y ancho de ranura debe ser la misma para ambos
    - un modelo más alargado es beneficioso en este caso por aparición y aumento de la fuerza G a velocidades de rotación más elevadas
  
- Uno de 750 revoluciones por minuto y 50 hz aunque parece tener geoméricamente características ventajosas, a tan altas velocidades se podrían alcanzar temperaturas elevadas que hiciesen peligrar las propiedades magnéticas de los imanes.
  
- Diseñar un direct drive de 50 Hz es inviable por su tamaño, número y tamaño de ranuras, y dimensión de los imanes.

## 3.2. Método de elementos finitos

### 3.2.1. Introducción

Una vez obtenido el dimensionamiento inicial de la máquina se procede a utilizar un Método de Elementos Finitos (FEM), que es un método numérico general informatizado, que mediante un software permitirá aproximar las soluciones de ecuaciones diferenciales parciales muy complejas asociadas a un problema físico, en este caso electromagnético. Se aplica a geometrías complicadas y predecirá la reacción del generador en una serie de condiciones reales, ayudando a optimizar su geometría y mostrando si funcionará de la forma en que fue diseñado a nivel electromagnético.

El software que se utilizará, descompone la sección transversal (en 2 dimensiones) del generador en un número finito de elementos que pueden tener diferentes formas, triangular, cuadrangular... y que estarán conectados entre sí por nodos, y al conjunto de todos estos elementos se les denomina malla.

El dividir la geometría en pequeñas porciones en cuyo interior se aplicarán las ecuaciones matemáticas que rigen el comportamiento físico del modelo, permitirá al ordenador realizar los cálculos con mayor eficiencia, aunque no se resolverán de una manera exacta. La precisión de los elementos finitos depende de la cantidad de nodos y del tamaño de los elementos, a menor valor de los anteriores parámetros mayor precisión en el análisis de los resultados.

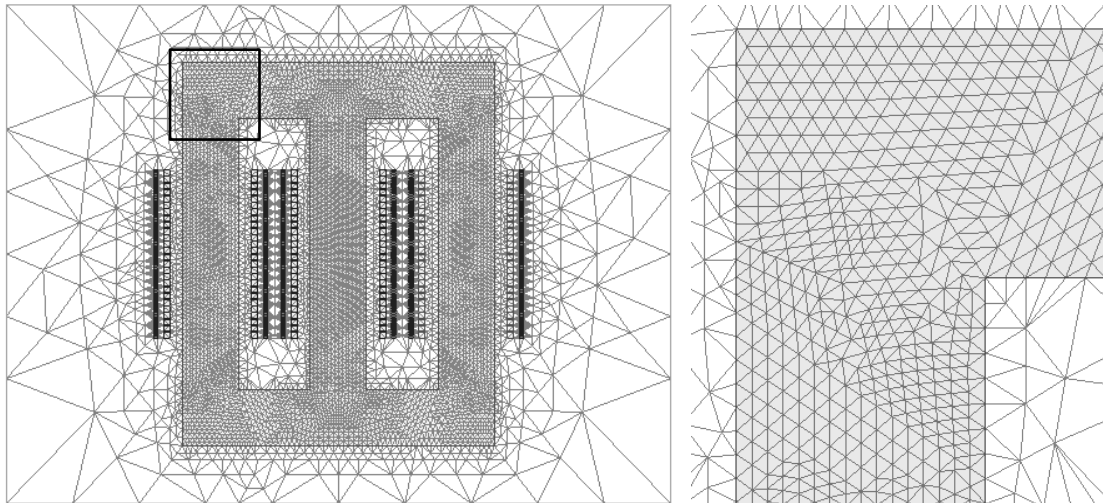


Figura 11. División nodal de un transformador del laboratorio de máquinas eléctricas de la ETSII-UPM, simulado en el software de elementos finitos. Fuente: elaboración propia.

Aun así es importante remarcar que aparte del diseño electromagnético que es el que se abarca en este trabajo y para el que tiene cabida el software FEM que se utiliza para el análisis del mismo, hay muchos otros problemas en el diseño del generador, como la transferencia de calor o el diseño mecánico que no se abordarán por acortar el presente TFG.

### 3.2.2. Geometría

Con los datos de la tablas del apartado 3.1, lo primero a lo que se procederá es a la creación de la geometría de la máquina en la interfaz del software.

Se generan las diferentes partes en el siguiente orden: estator, rotor, imanes y devanado.

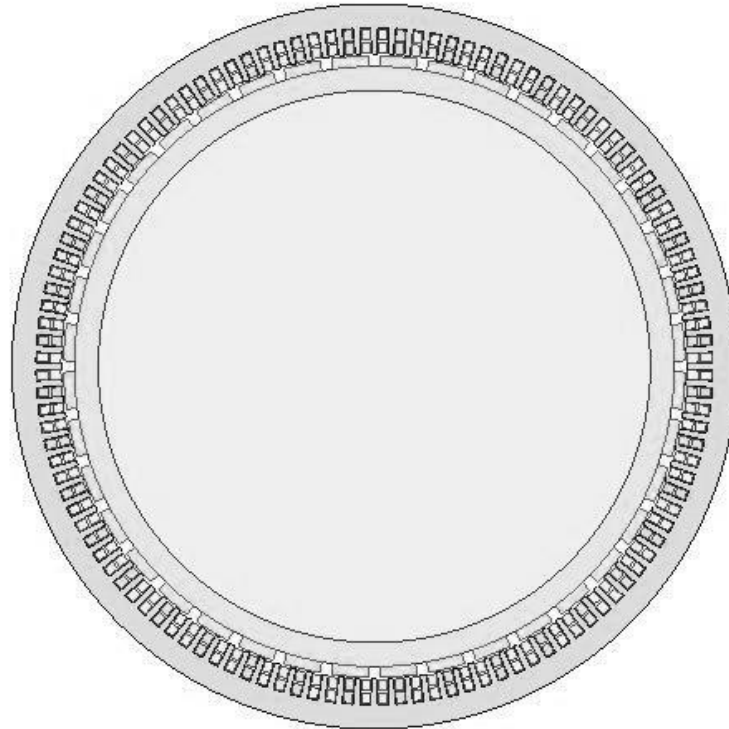


Figura 12. Sección transversal del generador sin multiplicadora. Fuente: elaboración propia

Gracias a la topología del generador, para simplificar el problema y sobre todo, para reducir tiempos de simulación se trabajará con una porción del mismo de  $18^\circ$  que contiene un par de polos. Esto es posible gracias a que la simetría de la geometría del generador lo permite, pues tiene 120 ranuras y 20 pares de polos, y un número de ranuras por polo y fase  $q=1$ ,  $\frac{360^\circ}{20 \text{ pares de polos}} = 18^\circ$ .

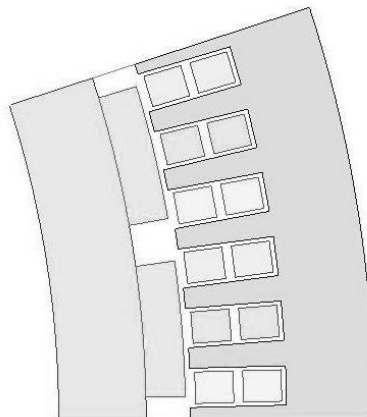


Figura 13. Sección transversal del generador sin multiplicadora de la porción de  $18^\circ$  que incluye un par de polos. Fuente: elaboración propia.

### 3.2.3. Selección de materiales

El siguiente paso que se sigue es el de selección de los materiales, cuyas características también se incluirán en el programa, para la posterior simulación. Es un apartado clave, pues repercutirán en el coste final de la máquina, y esto marcará una de las diferencias competitivas en el mercado. Se distinguen 3 tipos de materiales para los diferentes elementos.

- Imanes, como ya se habló en la sección 2.2. *Imanes* donde se puede encontrar más información sobre sus propiedades y características, la mejor opción es la de los imanes de neodimio, N33H.

- Hierro del estator y rotor, se usará un acero con denominación M19-29G, de grano no orientado y de bajo carbono aleado con bajo porcentaje de silicio que reduce las pérdidas por corrientes inducidas. Sus propiedades son las siguientes.

M19_29G		
Especificación	Símbolo	Valor
Conductividad	$\Sigma$	1960000 (S/m)
Densidad	$\rho_{M19}$	7872 kg/m <sup>3</sup>

Tabla 12. Propiedades del acero M19\_29G.

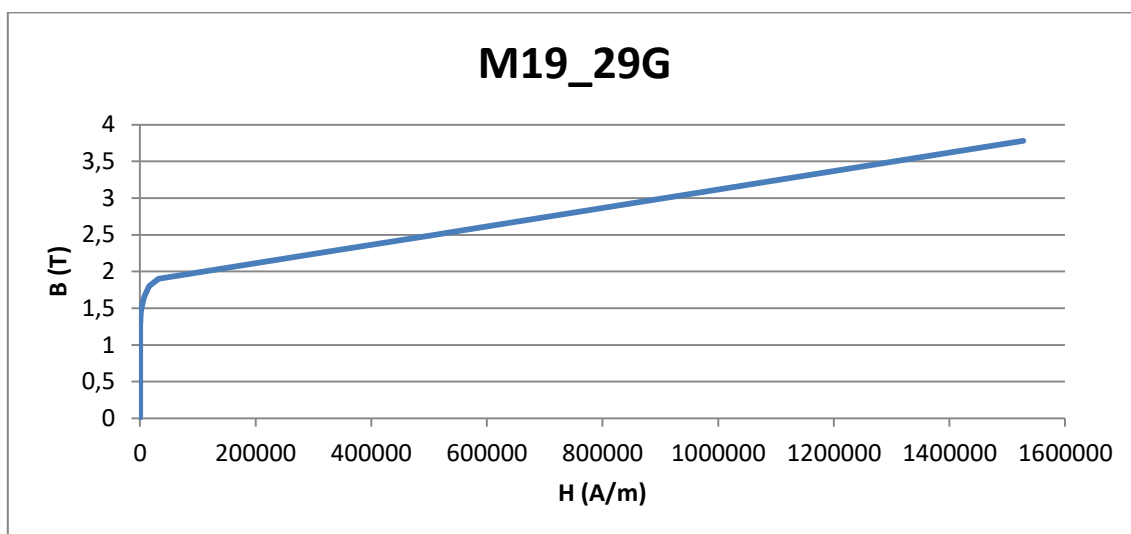


Figura 14. Curva característica BH del acero M19\_29G.

- Devanados, serán de cobre por tener una conductividad eléctrica más alta que la mayoría de los metales. Es una opción más barata si se compara con la plata, y más segura en comparación con el aluminio.

Cobre		
Especificación	Símbolo	Valor
Conductividad	$\Sigma_{Cu}$	58 m/Ω·mm <sup>2</sup>
Densidad	$\rho_{Cu}$	8910 kg/m <sup>3</sup>

Tabla 13. Propiedades del cobre.

### 3.2.4. Definición de límites, mallado y alimentación

Una vez se tiene la geometría definida y las propiedades de los materiales incluidos en el software, se establecen los límites referentes a potenciales y flujos que se corresponden con la geometría de la sección a estudiar mencionada antes. Asignando un límite denominado 'maestro' coincidente con el segmento inferior de la porción y asignando otro límite llamado 'esclavo' al segmento a 18º del anterior. A este último se le atribuye la condición de que su inducción tiene que ser igual que la del límite maestro  $B_s = B_m$  pues se trabaja con un par de polos. Se incluye otro límite a 150mm de la culata del estator donde el flujo debe ser 0. También se definen una serie de mallados, aparte del que aplica el programa en cada elemento, forzando así una malla más fina en las zonas de saturación del rotor y en concreto alrededor de los imanes y cerca del entrehierro.

Respecto a las condiciones de simulación se hará siempre alimentando con un sistema trifásico de intensidades (A+B-C+) en el estator y el valor de la corriente en cada momento representará el nivel de carga del generador. La velocidad de rotación en el rotor es siempre constante e igual a la nominal de 30 revoluciones por minuto. El tiempo de representación es de 100 ms.

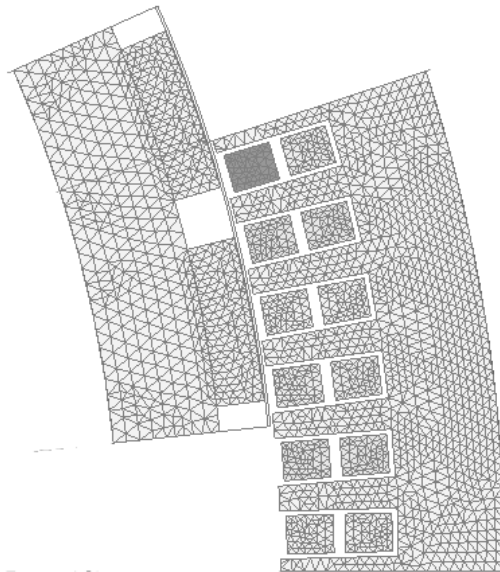


Figura 15. Mallado de los diferentes componentes del generador sin multiplicadora.

### 3.2.5. Diseño inicial con ranura abierta

Al tener todos los elementos necesarios que facilitarán la ejecución y simulación del generador introducidos en el software, el primer paso que se da, es hacer un estudio paramétrico en carga para calcular con qué ángulo se consigue el mayor par, es sabido que el par de una máquina síncrona depende del ángulo entre los campos del estator y rotor. Así aunque luego se le apliquen diferentes cargas, se quiere funcionar con la premisa de que la máquina siempre trabajará en condiciones de par máximo con la mínima corriente. Para ello en la intensidad se introduce una variable, *Thet*, que tomará valores entre 0 y 90 en intervalos de 22,5°. Para simular como un generador también se añade el  $\pi$  que representa el desfase de 180° respecto a la simulación de un motor.

$$I_a = I_{ef} \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega_{rad} \cdot t + \pi + Thet)$$

$$I_b = I_{ef} \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega_{rad} \cdot t + \pi + Thet + \frac{2 \cdot \pi}{3})$$

$$I_c = I_{ef} \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega_{rad} \cdot t + \pi + Thet - \frac{2 \cdot \pi}{3})$$

$$\omega_{rad} = \frac{360 \cdot n_s \cdot p}{60} \cdot \frac{\pi}{180}$$

El tiempo es una variable interna del sistema del software. El resto de variables tienen los siguientes valores.

Datos simulación		
Especificación	Símbolo	Valor
Intensidad	$I_{ef}$	198 A
Velocidad angular	$\omega_{rad}$	62,83 rad
Tiempo	$t$	[0-100] ms

Tabla 14. Datos para la simulación con alimentación en corriente del generador sin multiplicadora.

El programa permite representar las gráficas de par respecto a tiempo dependiendo del ángulo y también obtiene los valores pico-pico del par y el medio. Los resultados obtenidos son los que se muestra a continuación.

Variación par con ángulo de carga					
Ángulo Thet	0	22,5	45	66,5	90
Par Medio (kNm)	-0,603	-11,256	-20,00	-25,435	-26,785
Par Pico-Pico (kNm)	10,760	10,993	11,371	11,900	12,403

Tabla 15. Resultado de la simulación con distintos ángulos de desfase en la corriente del generador sin multiplicadora.

A la vista de los resultados se concluye que el mayor par (26,785 kNm) se consigue con  $thet=90^\circ$  y será con el valor de desfase con el que se simulará en los siguientes apartados. Dicho par está muy por debajo del par que se calculó en la ecuación (4) y es porque aún no se le ha dado la forma



adecuada a la ranura, lo que produce la saturación local del circuito magnético. Que será el siguiente paso. También se intentará mejorar el gran rizado de par que aparece.

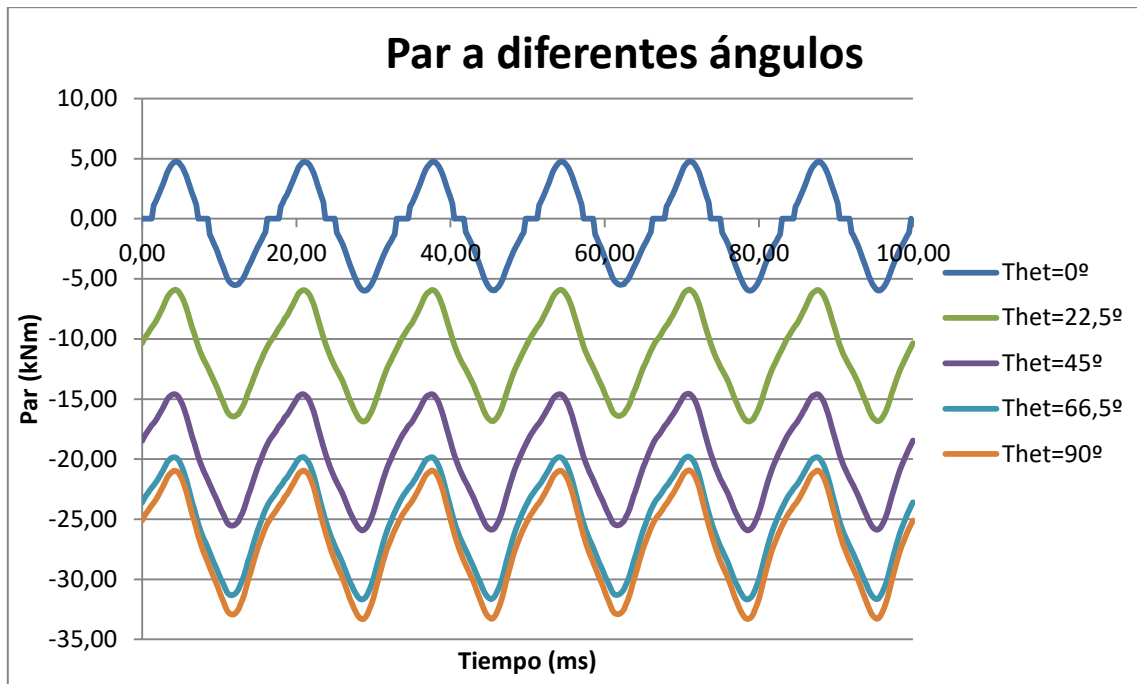


Figura 16. Gráfica de resultados de par a diferentes ángulos de desfase de la corriente del generador sin multiplicadora.

### 3.2.6. Diseño con ranura modificada

Para solucionar los problemas mencionados en el apartado anterior, disminución del valor de par estimado y rizado del mismo, se modifica la ranura añadiéndole el pie al diente, ensanchando el diente y redondeando la parte superior de la ranura, para que las líneas del flujo concatenen mejor. Dos cosas ocurren al realizar estas operaciones: la primera es la disminución del área de la ranura, por lo que hay que alargar esta para que los conductores quepan; la segunda, el valor de la inducción en el diente disminuye, en este caso de  $B_{\max\_diente} = 1,5$  a  $1,25$ .

Las dimensiones de la ranura modificada se muestran en la Tabla 16.

Dimensiones ranura modificada		
Especificación	Símbolo	Valor
Ancho diente	$w_d$	15,9 mm
Ancho ranura	$w_r$	13 mm
Área ranura	$A_r$	$777 \text{ mm}^2$
Altura ranura	$h_r$	52 mm
Radio superior ranura	$r_r$	8 mm
Separación entre pie de diente	$s_p$	3 mm
Ancho pie de diente	$w_p$	3 mm

Tabla 16. Dimensiones de la ranura con pie de diente, para el generador sin multiplicadora.

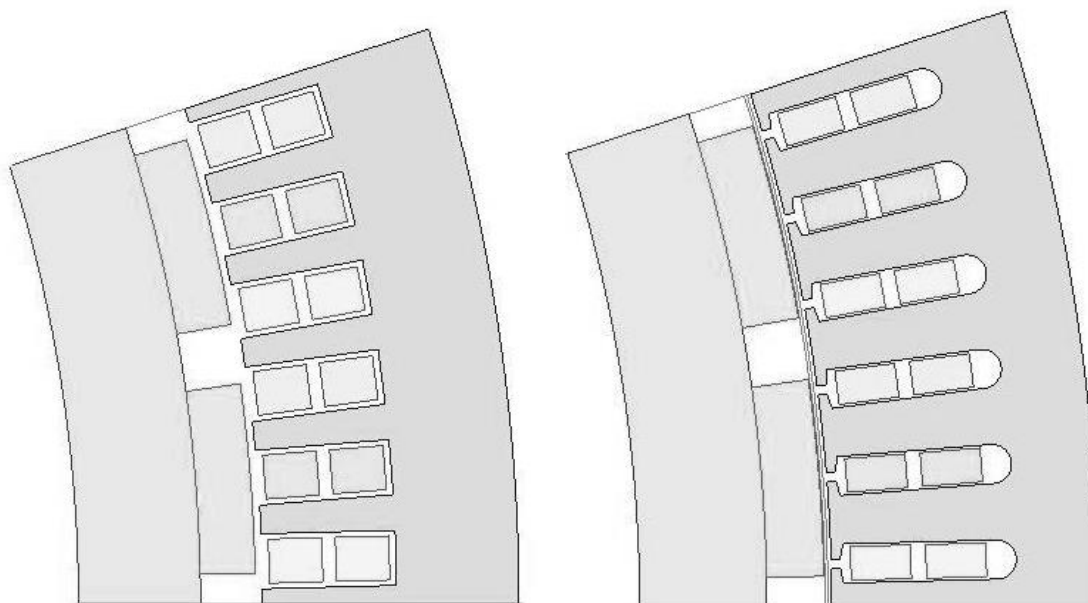


Figura 17. Comparación de los dientes del generador sin multiplicadora tras añadir el pie de diente.

Comparando los resultados del nuevo modelo con el anterior, podemos ver como han mejorado significativamente, aumentando el par un 17,46% respecto al del original y reduciendo el rizado un 69,66%, situándose en un  $\pm 6\%$  del par medio. Igualmente vemos que el cálculo realizado en el análisis numérico es muy próximo al que finalmente obtenemos después del ajuste.

Disminución de rizado de par			
Tipo	Par diente modificado	Par diente original	Par estimado
Par medio (kNm)	-31,462	-26,785	-31,8
Pico-Pico(kNm)	3,886	12,403	0

Tabla 17. Comparación de pares medios con diferente diente y desfase de  $90^\circ$  del generador sin multiplicadora.

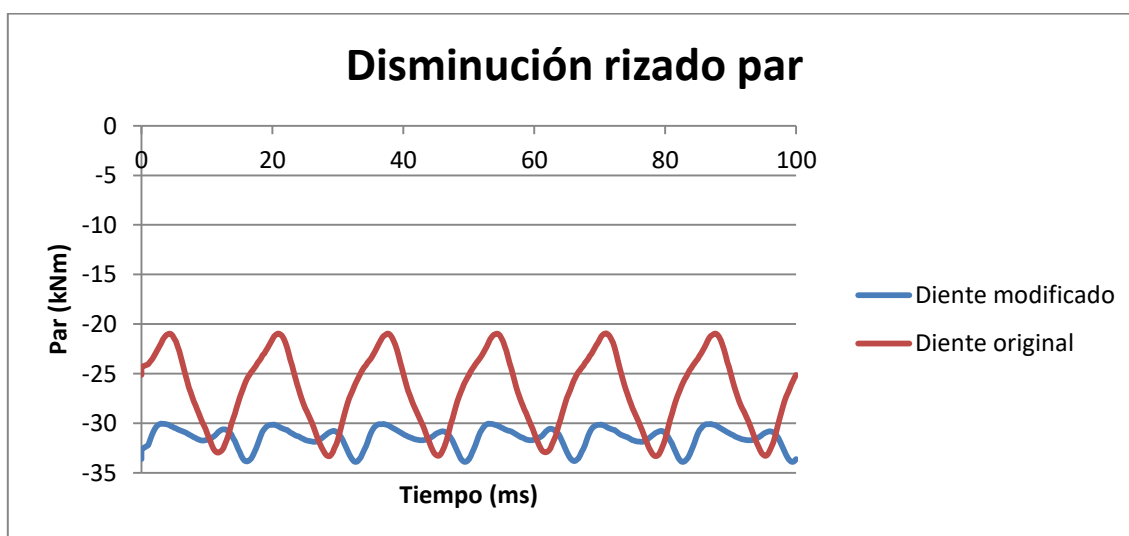


Figura 18. Gráfica comparativa del aumento del par y disminución del rizado con diferente diente y desfase de  $\theta=90^\circ$ .

Al ser este el modelo final en condiciones nominales, se muestran los resultados de tensiones inducidas, intensidades y enlaces de flujo. Destacar la proximidad del valor de tensión que se eligió para el diseño con el finalmente obtenido.

Tensión inducida dientes modificados				
Fase	Fase A	Fase B	Fase C	Estimado
Tensión eficaz (V)	170,49	171,43	170,82	168

Tabla 18. Valores de tensión eficaz de la simulación en carga con dientes modificados y desfase de  $\theta = 90^\circ$  del generador sin multiplicadora.

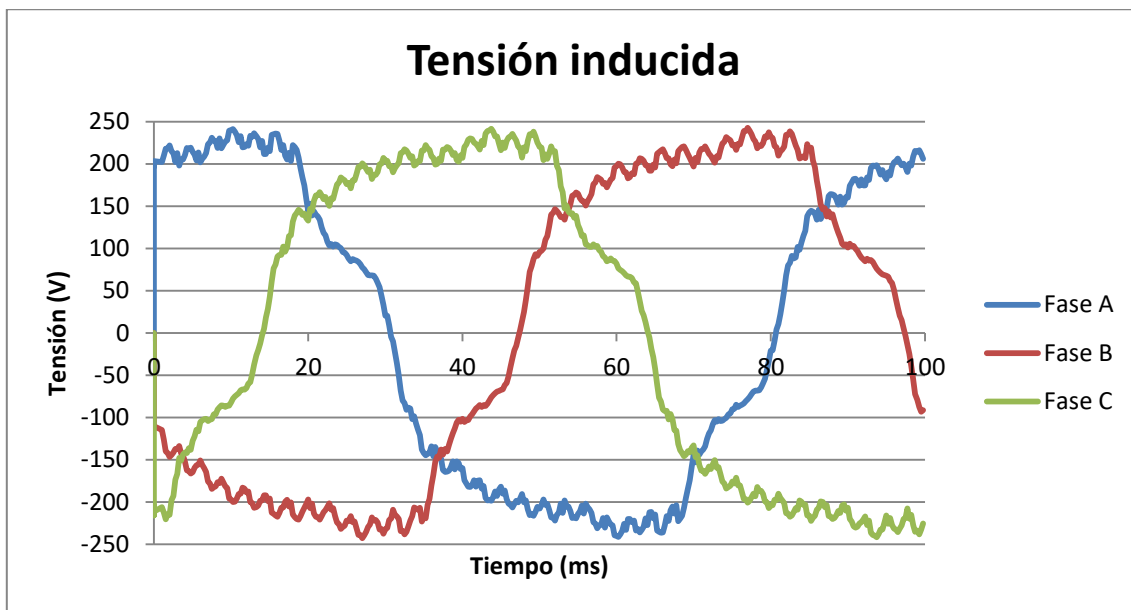


Figura 19. Gráfica de la tensión inducida en carga con diente modificado y desfase de  $\theta = 90^\circ$ .

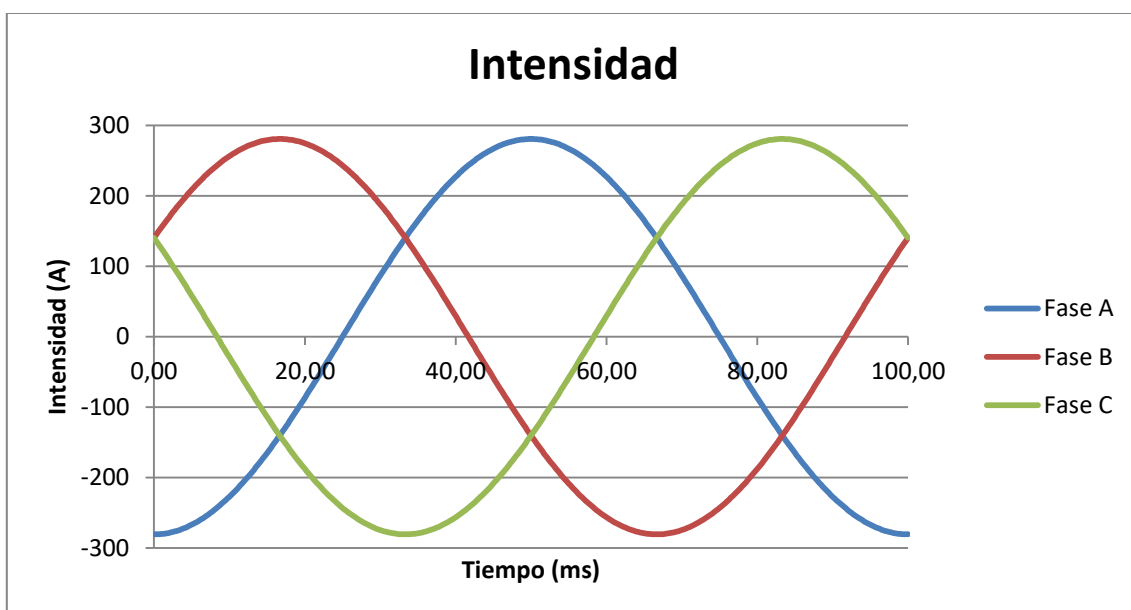


Figura 20. Gráfica de la intensidad en carga con diente modificado y desfase de  $\theta = 90^\circ$ .

La intensidad tendrá el valor eficaz de 198 A. Al ser las corrientes un parámetro impuesto en la simulación como se vio en las expresiones (34), no hay variaciones con respecto al valor esperado. Su desfase corresponderá con el de simulación como generador ( $\pi$  o  $180^\circ$ ) y la consigna de obtención de par máximo  $\text{Thet} = \pi/2$  o  $90^\circ$ .

Los enlaces de flujo que concatenan a los conductores de las 3 diferentes fases son los que se muestran a continuación. Tienen un valor máximo de 4,1 Wb.

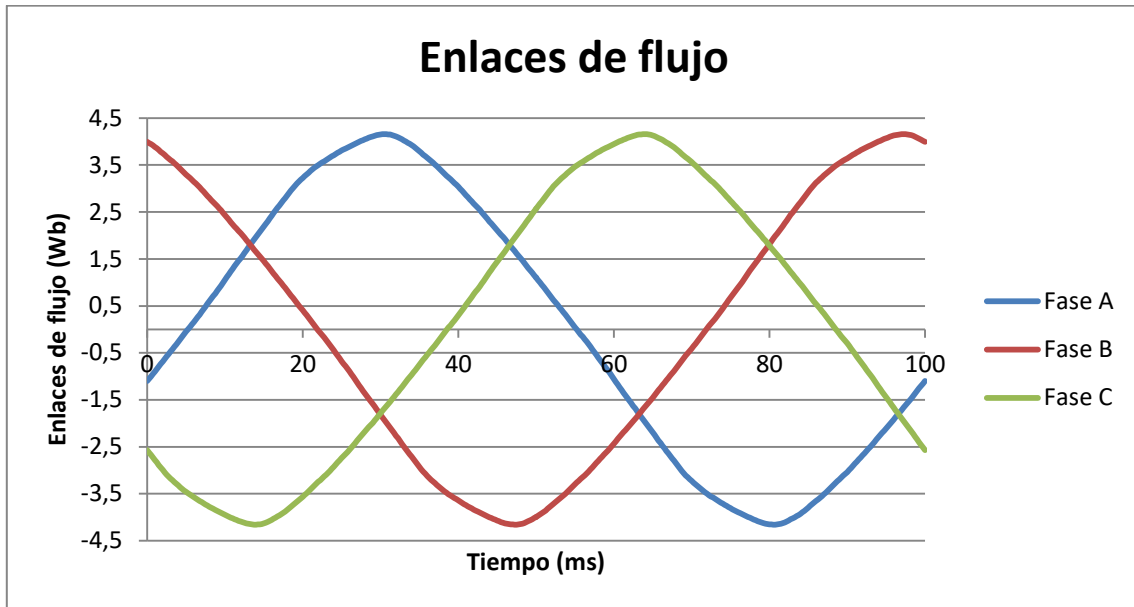


Figura 21. Gráfica de los enlaces de flujo en carga con diente modificado y desfase  $\text{Thet} = 90^\circ$ .

Por último se calcula la inducción en la línea del entrehierro a lo largo de un polo. El valor medio es de  $B_\delta = 0,75$ , marcado en granate en la figura 22, frente al  $B_\delta = 0,76$  teórico.

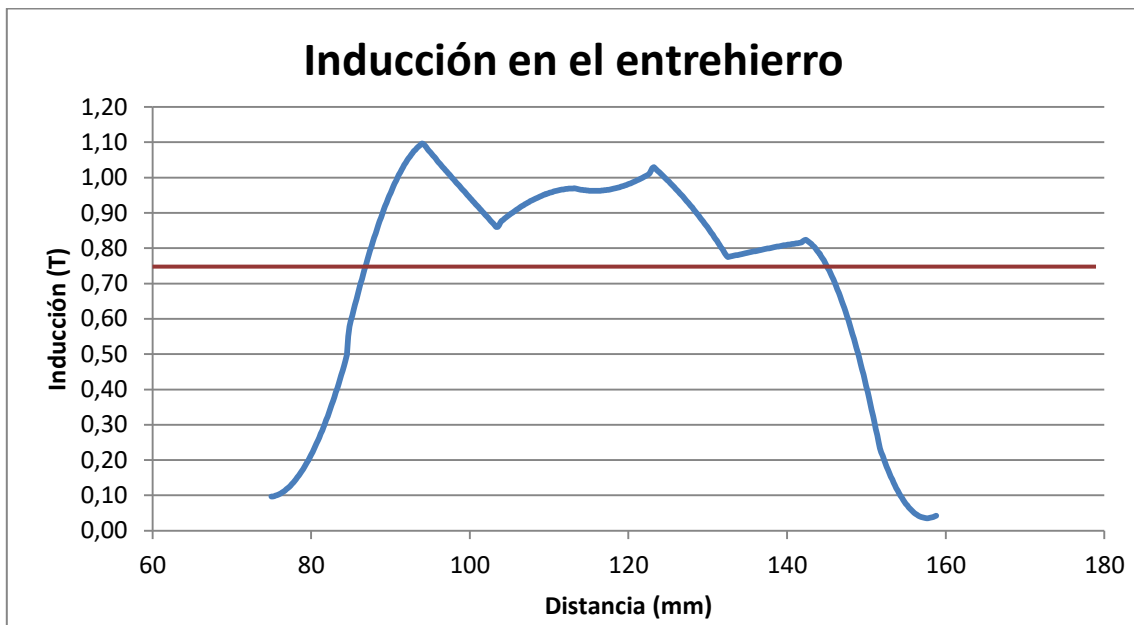


Figura 22. Gráfica de la inducción a nivel de entrehierro en carga con diente modificado y desfase  $\text{Thet} = 90^\circ$ .

### 3.2.7. Par a diferentes intensidades de carga

Una vez definido el modelo se realiza un estudio paramétrico para analizar cómo se comporta ante diferentes valores de carga. Para realizar estas simulaciones variamos el valor eficaz de la corriente de alimentación. Se recuerda que se obtuvo cual era el ángulo de desfase de la intensidad para el cual era mayor el par en el generador, para trabajar con la premisa de que independientemente cual sea la carga se obtuviese el par máximo, de ahí el  $\frac{\pi}{2}$  de las siguientes expresiones. Para ello se toman valores de la  $I_{ef}$  entre 0 y 198 A en intervalos de 49,5 A, (0, 25, 50, 75 y 100% de la carga asignada), se obtiene el par medio para cada uno y se representan.

$$I_a = I_{ef} \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega_{rad} \cdot t + \pi + \frac{\pi}{2})$$

$$I_b = I_{ef} \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega_{rad} \cdot t + \pi + \frac{\pi}{2} + \frac{2 \cdot \pi}{3}) \quad (35)$$

$$I_c = I_{ef} \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega_{rad} \cdot t + \pi + \frac{\pi}{2} - \frac{2 \cdot \pi}{3})$$

Par a diferentes valores de carga					
Intensidad eficaz (A)	0	49,5	99	148,5	198
Par (kNm)	-0,010	-7,91	-15,79	-23,62	-31,4

Tabla 19. Valores de par medio con diferente carga con diente modificado y desfase  $\theta = 90^\circ$ .

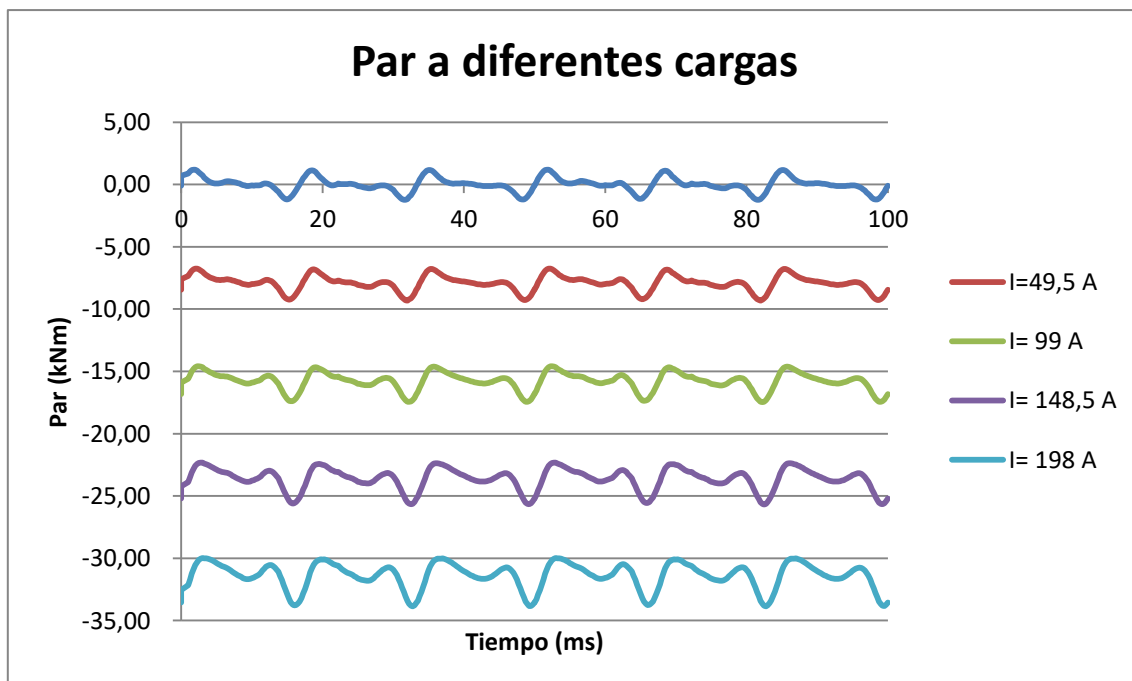


Figura 23. Gráfica de par con diferente estado de carga diente modificado y desfase  $\theta = 90^\circ$ .

Conocer el par a distinta carga también será útil para calcular el apartado 3.2.10 Rendimiento.

### 3.2.8. Ensayo de vacío

El ensayo de vacío es aquel que se lleva a cabo a velocidad nominal y con el circuito del devanado estático abierto. Efectivamente el par de la Figura 24 a  $I=0$  corresponde con el par residual en vacío relacionado con lo que en la literatura se denomina par de cogging.

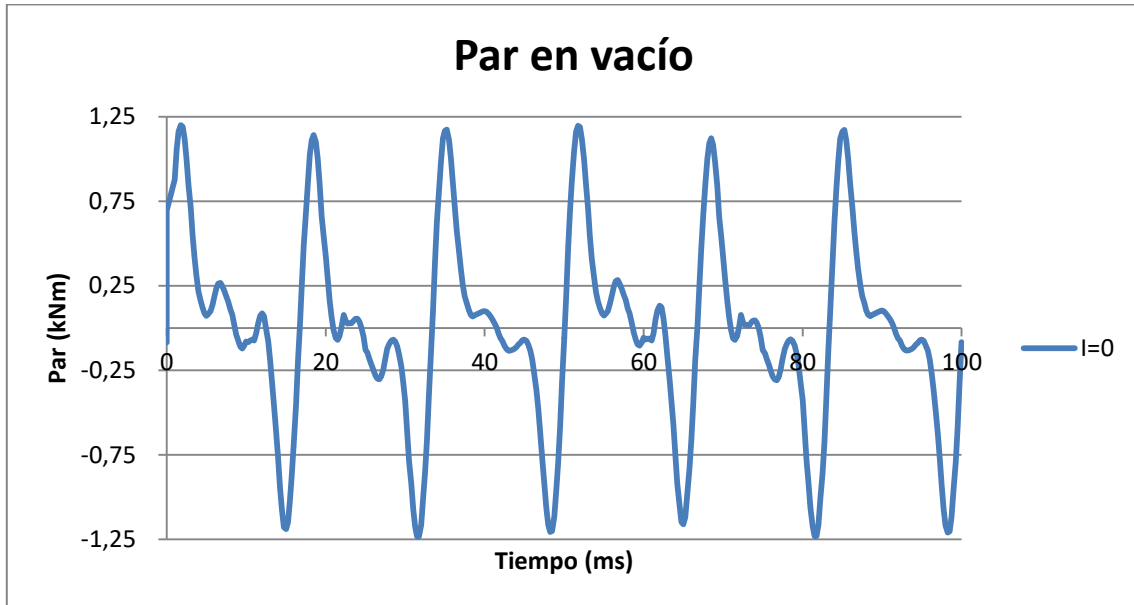


Figura 24. Par en vacío con diente modificado.

El valor medio de la inducción en vacío a lo largo de la línea del entrehierro es de  $B_{\delta} = 0,74$ , representado en granate en la Figura 25 en granate, frente al 0,76 estimado.

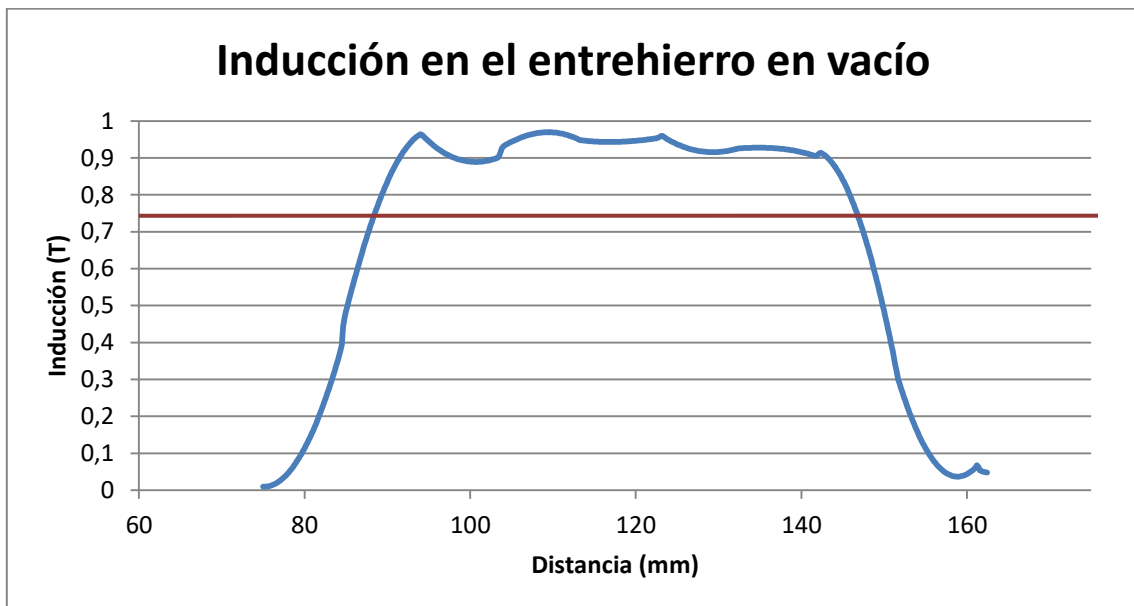


Figura 25. Inducción en el entrehierro en vacío a lo largo de un polo con diente modificado.

También se muestra la tensión en vacío.

Tensión inducida en vacío			
Fase	Fase A	Fase B	Fase C
Tensión eficaz (V)	155,46	157	156,27

Tabla 20. Valores eficaces de la tensión en vacío con diente modificado.

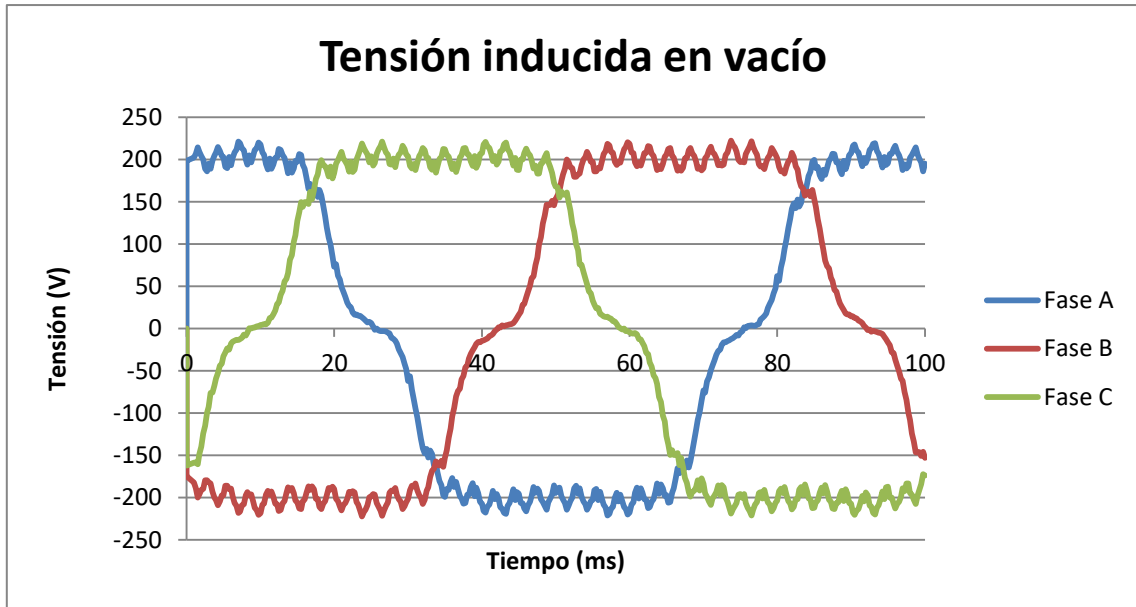


Figura 26. Gráfica de la tensión en vacío con diente modificado

Por último los enlaces de flujo con un valor máximo de 3,8 Wb.

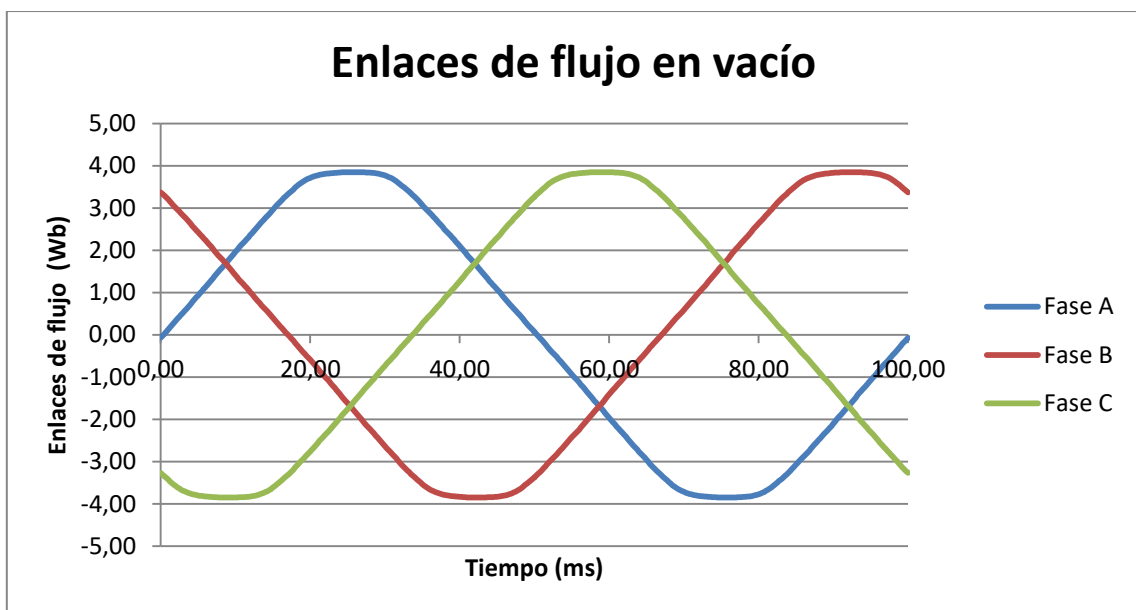


Figura 27. Enlaces de flujo en vacío con diente modificado.

### 3.2.9. Cálculo de pérdidas para cada intensidad de carga

El estudio se centrará en dos tipos de pérdidas, las que se producen en el hierro y las del cobre, no teniendo en cuentas las mecánicas por quedar fuera del alcance del proyecto.

Respecto a las pérdidas en el hierro existen dos tipos que se medirán:

- Pérdidas por histéresis, es la resistencia ofrecida por un material para ser magnetizado, o la energía gastada para magnetizar y desmagnetizar el núcleo de hierro. Cuanto mayores, mayor es el calor generado dentro del núcleo cuando se energiza el motor.

- Pérdidas por corrientes de Foucault, cuando circulan corrientes inducidas en un núcleo de hierro por la variación del flujo magnético, estas crean campos magnéticos que se oponen al efecto del campo magnético aplicado, cuanto más finas sean las laminaciones, menores serán las pérdidas por corrientes parásitas.

Las pérdidas en el hierro para acero eléctrico se calculan con la siguiente expresión.

$$p = K_h B_{max}^2 f + K_c (B_{max} f)^2 + K_e (B_{max} f)^{1.5} \quad (36)$$

Donde:

- $K_h$ , es el coeficiente de histéresis
- $K_c$ , es el coeficiente clásico de corrientes de Foucault
- $K_e$ , es el coeficiente anormal de exceso de corriente de Foucault
- $B_{max}$ , es la amplitud máxima de la inducción
- $f$ , es la frecuencia

Al introducir los materiales a utilizar y sus características en el software, estos valores se calculan automáticamente, al igual que el valor de las pérdidas y sus gráficas.

Las otras pérdidas que se tienen en cuenta son las que se producen en el cobre del devanado del estator por el calentamiento debido a la resistencia de los conductores de este al paso de la corriente, responden a la fórmula (37). Se recuerda que la conductividad típica de un cable de cobre es de  $\sum_{Cu} = 58 \text{ m}/\Omega \cdot \text{mm}^2$ , por lo que su resistencia será  $R_{Cu} = 0.0171 \text{ Ohm} \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ .

$$P_{cu} = 3 \cdot R \cdot I^2 \quad (37)$$

Como se observa en los resultados obtenidos y como era de esperar, las pérdidas en el hierro apenas dependen de la carga de la máquina pues la frecuencia es constante y al ser la amplitud de la inducción también prácticamente constante por venir determinada por los imanes y la geometría que es invariable.

Sin embargo las del cobre aumentan exponencialmente con el grado de carga.



Pérdidas corrientes de carga					
Intensidad eficaz (A)	0	49.5	99	148.5	198
Pérdida media hierro (W)	434,43	448,61	467,75	487,49	508,27
Pérdida cobre (W)	0	217,12	868,5	1954	3474

Tabla 21. Valores de las pérdidas en el generador sin multiplicadora

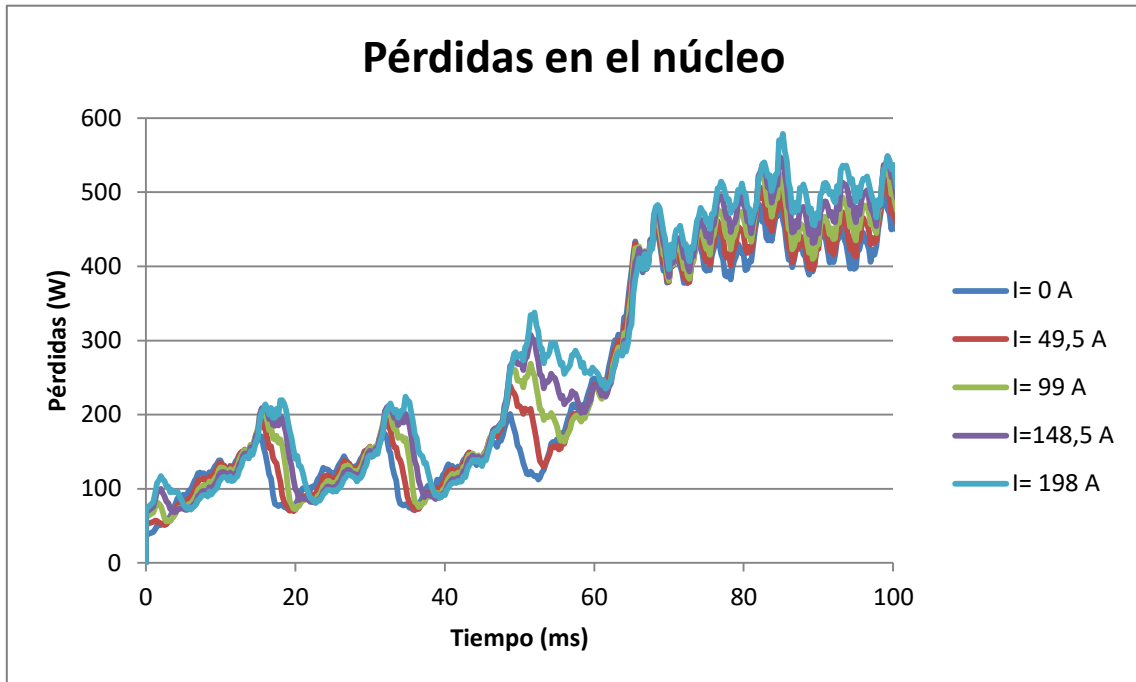


Figura 28. Gráfica de las pérdidas en el núcleo del generador sin multiplicadora.



Figura 29. Gráfica de las pérdidas en los devanados del generador sin multiplicadora.

### 3.2.10. Rendimiento

El rendimiento se calculará para cada corriente de carga propuesta anteriormente. Al ser las pérdidas en la chapa muy parecidas, al ir aumentando dicha carga progresivamente, el rendimiento disminuirá y dependerá mayoritariamente de las pérdidas en los conductores.

$$\eta = \frac{P_{\text{útil}}}{P_{\text{útil}} + P_{\text{pérdidas}}} \quad (38)$$

$$P_{\text{pérdidas}} = P_{Fe} + P_{Cu} \quad (39)$$

La potencia de carga se calculará en función del par y de la velocidad de sincronismo del campo.

Rendimiento					
Intensidad (A)	Pérdidas Fe (W)	Pérdidas Cu (W)	Par (kNm)	Potencia (W)	Rendimiento (%)
0	434,43	0	0,01	0,031	6,7
49,5	448,61	217,12	7,91	24,84	97,3
99	467,75	868,5	15,79	49,60	97,3
148,5	487,49	1954	23,62	74,20	96,8
198	508,27	3474	31,4	98,64	96,1

Tabla 22. Rendimiento del generador sin multiplicadora en distintas situaciones de carga.

### 3.2.11. Coste de la máquina

El coste de la máquina se calcula haciendo una estimación del volumen de la misma y multiplicándolo por el precio de los materiales en el mercado.

El precio de las tierras raras y en particular de los imanes permanentes NdFeB sufre muchas fluctuaciones debido al aumento de demanda provocado por las múltiples aplicaciones industriales en las que se está comenzando a utilizar, entre ellos la eólica. Según el portal *Asian Metal*<sup>1</sup> de información sobre la industria de los metales en todo el mundo, el precio de los imanes NdFeB varió a lo largo del 2017 de 52€/kg a los 78€/kg. Haciendo un promedio el valor del kilogramo de imán es de 65€. Se ve que el peso del generador recae en el imán.

El precio del cobre está extraído a fecha de octubre del 2017.

<sup>1</sup> www.asianmetal.com

Diseño del generador síncrono de imanes permanentes sin multiplicadora

<b>Coste de la máquina</b>					
<b>Material</b>	<b>Volumen (<math>m^3</math>)</b>	<b>Densidad (<math>kg/m^3</math>)</b>	<b>Masa (kg)</b>	<b>Precio material (€/kg)</b>	<b>Subtotal (€)</b>
Imanes	0,02607	7523	196,17	65	12751
Acero	0,19262	7872	1463,92	1,1	1667
Cobre	0,03607	8910	321,41	7,1	2282
<b>Total</b>					<b>16.700 €</b>

Tabla 23. Coste del generador sin multiplicadora en función de los materiales.

## 4. Diseño del generador síncrono de imanes permanentes con multiplicadora

A continuación se sigue el mismo procedimiento que en el apartado 3 pero en este caso para el diseño de un generador de imanes permanentes de mayor velocidad de giro del rotor de la máquina, que requiere de una multiplicadora de velocidad entre las palas y el rotor 1:4. El objetivo es comparar si hay diferencias cuantitativas entre ambos modelos e intentar extraer resultados que justifiquen si la tecnología sin multiplicadora es más o menos beneficiosa que la que sí la tiene.

### 4.1. Dimensionamiento básico

#### 4.1.1. Determinar especificaciones de la aplicación

Se trabaja con la misma potencia, tensión de fase y frecuencia y se varía la velocidad de rotación del rotor que lo hará a 120 revoluciones por minuto. Por lo que la máquina constará de 5 pares de polos.

Parámetros principales		
Especificación	Símbolo	Valor
Potencia	$P_m$	100 kW
Velocidad de rotación rotor	$N_s$	120 rpm
Tensión de fase	$U_f$	168 V
Frecuencia	$f$	10Hz
Pares de polos	$p$	5

Tabla 24. Especificaciones básicas del generador síncrono de imanes permanentes con caja multiplicadora de 100kW.

#### 4.1.2. Método analítico

Siguiendo la misma metodología utilizada de los apartados 3.1.3. *Elección de las dimensiones del imán* al 3.1.6. *Dimensionamiento del rotor*, se establece un proceso iterativo partiendo de las especificaciones generales, dos valores aproximados, el diámetro a nivel del entrehierro y la longitud del paquete magnético y un valor estimado de la carga lineal A, hasta conseguir que los valores calculados coincidan con los de la última iteración.

Varios parámetros que dependían del criterio del diseñador se han cambiado y es que el valor de la inducción en el diente que se impuso de  $B_{\max\_diente}=1,5$  T tras las modificaciones llevadas a cabo en el software que significaron cambios de geometría entre otras cosas, se vio disminuida a 1,25 T y será ese el valor que se incluirá. El ancho y alto de la ranura también han sido calculados para que tengan la misma relación de proporcionalidad que el anterior modelo.

Dimensionamiento Imanes		
Especificación	Símbolo	Valor
Entrehierro	$l_g$	2,27 mm
Recubrimiento polar	$S_m/S_g$	0,76
Altura Imán	$l_m$	18 mm
Coefficiente de dispersión	$K_\sigma$	1
Inducción remanente imán	$B_r$	1,1T
Campo magnético coercitivo imán	$H_c$	838 kA/m
Dimensionamiento devanado		
Especificación	Símbolo	Valor
Carga lineal	$A$	58298,5 A·m
Diámetro a nivel de entrehierro	$D$	0.39 m
Nivel uso materiales	$AB\xi$	44306,86
Longitud paquete	$L$	0,752 m
Número de ranuras	$Q$	30 ranuras
Número de ranuras por polo	$Q/polo$	3 ranuras
Número de ranuras por polo y fase	$q$	1 ranuras
Capas	$capa$	2
Número de bobinas	$B$	30 Bobinas
Número de espiras por polo y fase	$n_{spf}$	12 espiras/polo/fase
Número de espiras por fase	$N_s$	120 espiras/fase
Flujo en el entrehierro	$\Phi_{o\delta}$	0,06306 Wb
Inducción en el entrehierro	$B_{o\delta}$	0,76049 T
Intensidad	$I$	198,41 A
Par	$T_m$	7957 Nm
Dimensionamiento estator		
Especificación	Símbolo	Valor
Diámetro interior	$D_{is}$	0,39227 m
Paso polar	$\tau_p$	0,123235 m
Paso de ranura	$\tau_r$	41,1 mm
Inducción máxima en el diente	$B_{max\_diente}$	1,25 T
Ancho de diente	$w_d$	22,5 mm
Ancho de ranura	$w_r$	18,5 mm
Densidad de corriente	$\delta$	3 A/mm <sup>2</sup>
Área del conductor	$a_c$	67,43 mm <sup>2</sup>
Numero de espiras en una bobina	$n_{sbob}$	6 espiras
Número conductores en una ranura	$N_c$	12 conductores
Factor de relleno	$F_r$	0,52
Área de la ranura	$A_r$	1587,3 mm <sup>2</sup>
Altura de la ranura	$h_r$	85,6 mm
Inducción máxima en la culata	$B_{max\_culata}$	0,7 T
Ancho de la culata	$h_{cs}$	0,06 m
Diámetro exterior	$D_{es}$	0,68 m

Dimensionamiento rotor		
Especificación	Símbolo	Valor
Diámetro exterior	$D_{er}$	0,38773 m
Diámetro interior	$D_{ir}$	0,35173 m
Inducción máxima en el rotor	$B_{max\_cul}$	0,7 T
Espesor de culata	$h_{cr}$	0,06 m
Diámetro de paramagnético	$D_{paramag}$	0,232 m

Tabla 25. Características generales del generador con caja multiplicadora, obtenidas con el método analítico.

## 4.2. Método de elementos finitos

### 4.2.1. Geometría, materiales, límites, mallado y alimentación

El siguiente paso es introducir los valores de los resultados del método analítico en el software FEM, para ello se siguen las mismas etapas que en el apartado 3.2 *Método de elementos finitos*. Se genera en primer lugar la geometría de la máquina.

La simetría que el generador posee permite aislar una porción del mismo, pues tiene 5 pares de polos y 30 ranuras. Se pueden simular  $\frac{360^\circ}{5 \text{ pares de polos}} = 72^\circ$ , que abarca un par de polos, para que esto fuese posible habría que incluir la condición de inducción límite ‘maestro-esclavo’  $B_s = B_m$ . Como en el modelo sin multiplicadora se simuló un par de polos, por validar con otras posibilidades de simulación y a la vez, reducir el tiempo de cálculo, se segmentará la geometría en  $\frac{360^\circ}{10 \text{ polos}} = 36^\circ$  que incluye un único polo y se aplica la condición de inducción límite  $B_s = -B_m$ .

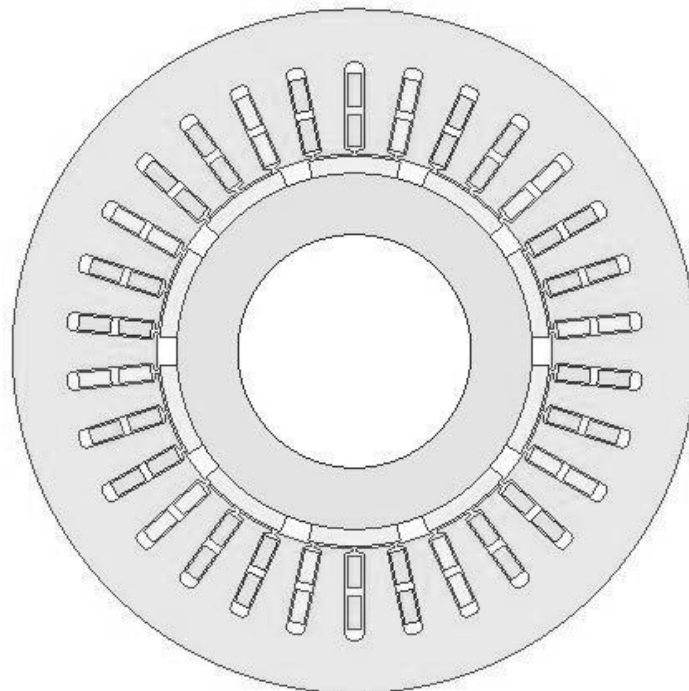


Figura 30. Sección transversal del generador con caja multiplicadora. Fuente: elaboración propia.

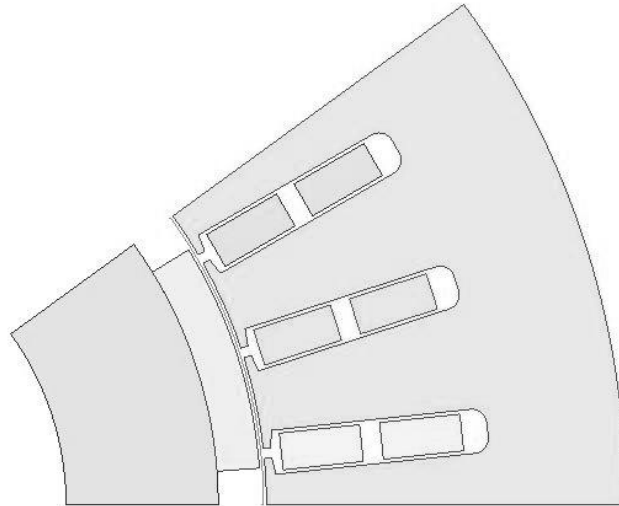


Figura 31. Sección transversal del generador con caja multiplicadora de la porción de 36° que incluye un único polo.  
Fuente: elaboración propia.

Con el objetivo de agilizar el proceso de simulación se incorpora desde un principio el pie de diente, pues como se comprobó en el apartado 3.2.5. *Diseño inicial con ranura abierta*, el no incluirlo hace que aparezcan pares más bajos con gran rizado. Según los resultados que se obtengan de la primera simulación se procederá al reajuste de dimensiones de diente y pie de diente hasta que se alcancen valores adecuados de par.

Dimensiones ranura modificada		
Especificación	Símbolo	Valor
Ancho diente	$w_d$	23,6 mm
Ancho ranura	$w_r$	17,4 mm
Área ranura	$A_r$	1634 mm <sup>2</sup>
Altura ranura	$h_r$	86 mm
Radio superior ranura	$r_r$	9,35 mm
Separación entre pie de diente	$s_p$	1 mm
Ancho pie de diente	$w_p$	2,5 mm

Tabla 26. Dimensiones finales de la ranura con el pie de diente del generador con multiplicadora.

Posteriormente se incluyen los materiales, que son los mismos que los que se utilizaron en el modelo sin caja multiplicadora 3.2.3. *Selección de materiales*, para poder comparar posteriormente el precio de ambos.

- Imanes de Neodimio NdFeB30, de alta densidad de energía.
- Conductores de cobre.
- Chapa magnética de grano no orientado de bajo contenido en carbono y silicio para el estator y el rotor M19\_29G.

A continuación se definen los mallados en cada elemento del generador, para conseguir mayor precisión en el cálculo. Y también se define la alimentación en el estator, que dependiendo del valor de la intensidad en cada momento simulará la carga que se conecta al generador, se realiza con un sistema trifásico de corrientes (A+B-C+). La velocidad de giro del rotor de 120 revoluciones por minuto y el tiempo de simulación de 100ms.

#### 4.2.2. Par

Para calcular cuando se da el par máximo en condiciones nominales, se lleva a cabo un estudio paramétrico en carga con distintos ángulos de desfase de la intensidad (Thet), con su corriente nominal  $I_{ef} = 198 A$ . La variable Thet tomará valores entre 0 y 90 en intervalos de 22,5°. Para simular como un generador también se añade el  $\pi$  que representa el desfase de 180° respecto a la simulación de un motor.

$$\begin{aligned}
 I_a &= I_{ef} \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega_{rad} \cdot t + \pi + Thet) \\
 I_b &= I_{ef} \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega_{rad} \cdot t + \pi + Thet + \frac{2\pi}{3}) \\
 I_c &= I_{ef} \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega_{rad} \cdot t + \pi + Thet - \frac{2\pi}{3})
 \end{aligned}
 \tag{40}$$

$$\omega_{rad} = \frac{360 \cdot n_s \cdot p}{60} \cdot \frac{\pi}{180} = 62,83 \text{ rad}$$

Variación del par con el ángulo					
Ángulo Thet	0	22,5	45	66,5	90
Par Medio (kNm)	-0,57	-3,29	-5,53	-7,11	-7,66
Par Pico-Pico (kNm)	2,766835	2,68	2,33	1,43	0,56

Tabla 27. Resultado de la simulación con distintos ángulos de desfase en la corriente del generador con multiplicadora.

Como muestran los resultados, el mayor par 7660 Nm se consigue para Thet=90°, que será con el valor que se simulará a partir de ahora. La geometría del modelo se ha optimizado para que en estas condiciones el rizado de par sea lo mínimo posible, de tal modo que su valor varía un  $\pm 3,26\%$  respecto del nominal. Aun así este par está 300 Nm por debajo de los 7957 Nm que se esperaba alcanzar, según el cálculo analítico. Esto se debe a que, sin poder aumentar el tamaño de los imanes que condicionan la inducción en el entrehierro (pues la escasa longitud del entrehierro lo impide), y solo variando las dimensiones de las ranuras del estator para intentar que las líneas de flujo concatenen lo mejor posible, es el mayor valor medio de par que se consigue sin penalizar mucho el rizado.



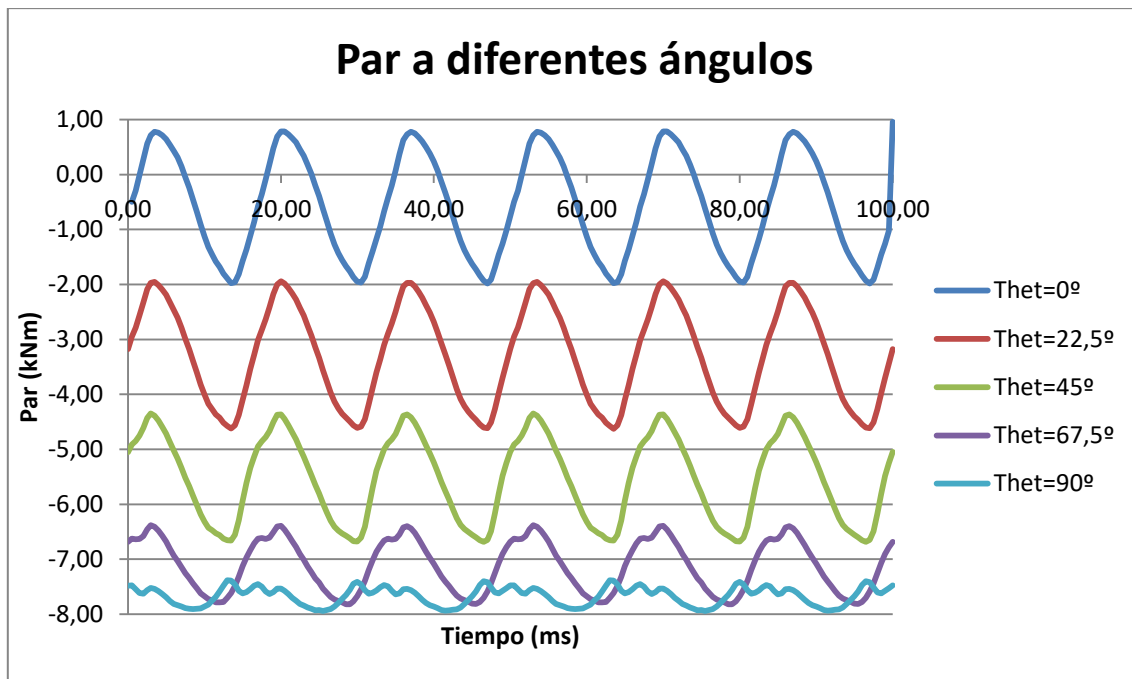


Figura 32. Gráfica de resultados de par a diferentes ángulos de desfase de la corriente del generador con multiplicadora.

Al ser considerado el caso nominal el alimentado a plena carga, con intensidad eficaz y con ángulo de desfase  $\text{Thet}=90^\circ$ , se obtienen y representan el resto de variables.

Tensión inducida				
Fase	Fase A	Fase B	Fase C	Estimado
Tensión eficaz (V)	190	190	190	168

Tabla 28. Valores eficaces de tensiones en carga del generador con multiplicadora.

Se observa una diferencia de 20 V respecto al valor esperado, lo que supone un error en torno al 13%. Este error podría explicarse por el cambio de geometría del imán con respecto al caso de estudio inicial, de menor curvatura, pero consideramos que es lo suficientemente pequeño como para no modificar el diseño.

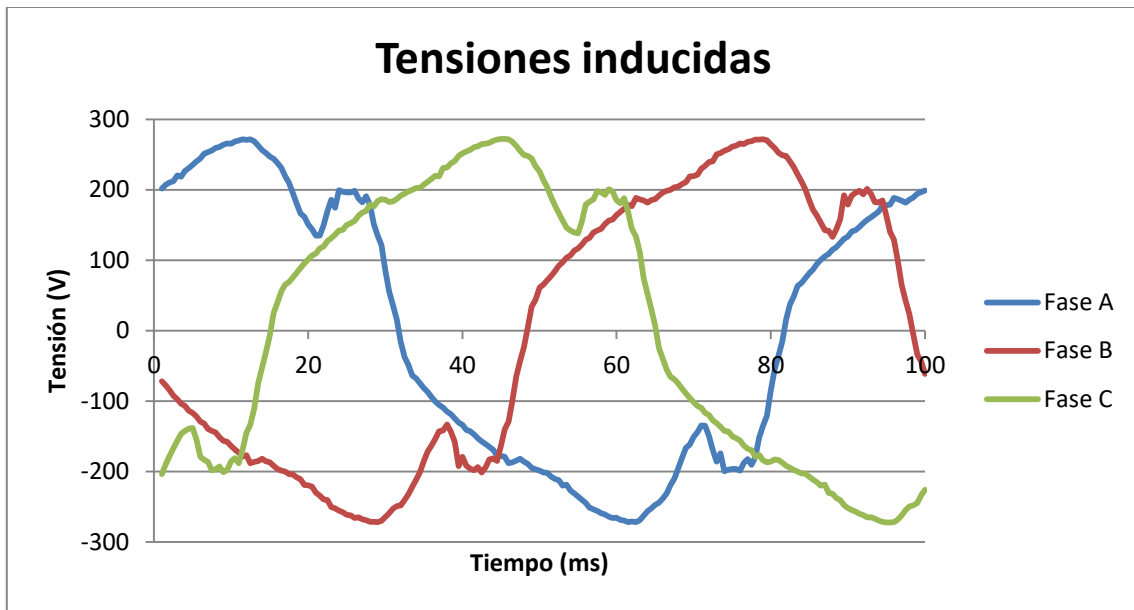


Figura 33. Gráfica de la tensión inducida en carga con desfase de  $\theta = 90^\circ$  en la alimentación.

Las corrientes corresponden a las de la expresión (40) con  $\theta = 90^\circ$  e intensidad eficaz 198 A.

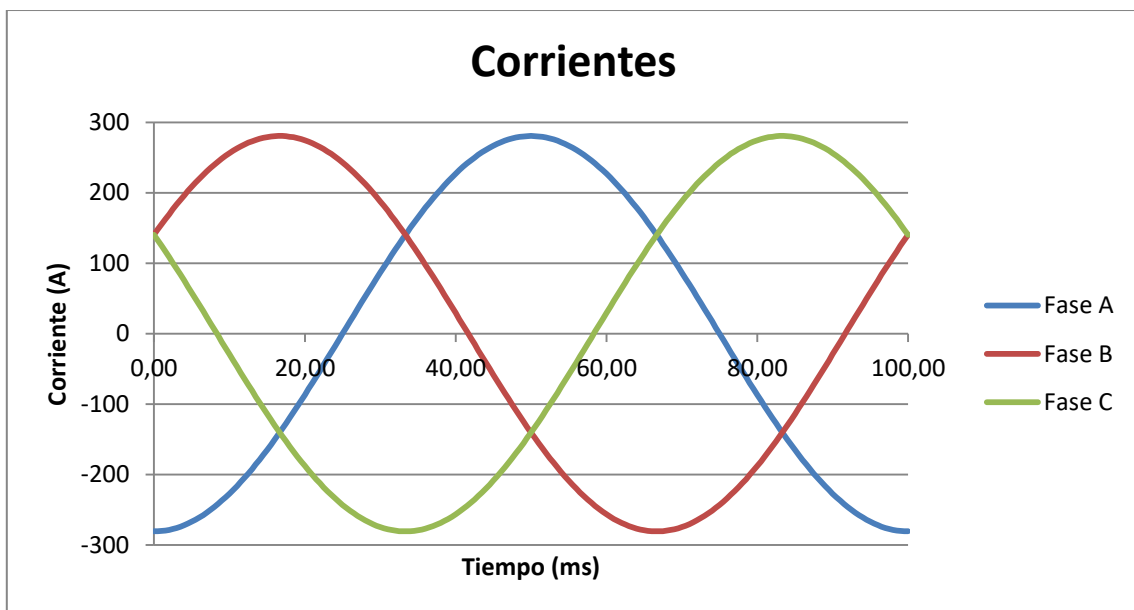


Figura 34. . Gráfica de la intensidad en carga con desfase de  $\theta = 90^\circ$ .

También se muestran los enlaces de flujo, que tienen un máximo de 4,2 Wb.

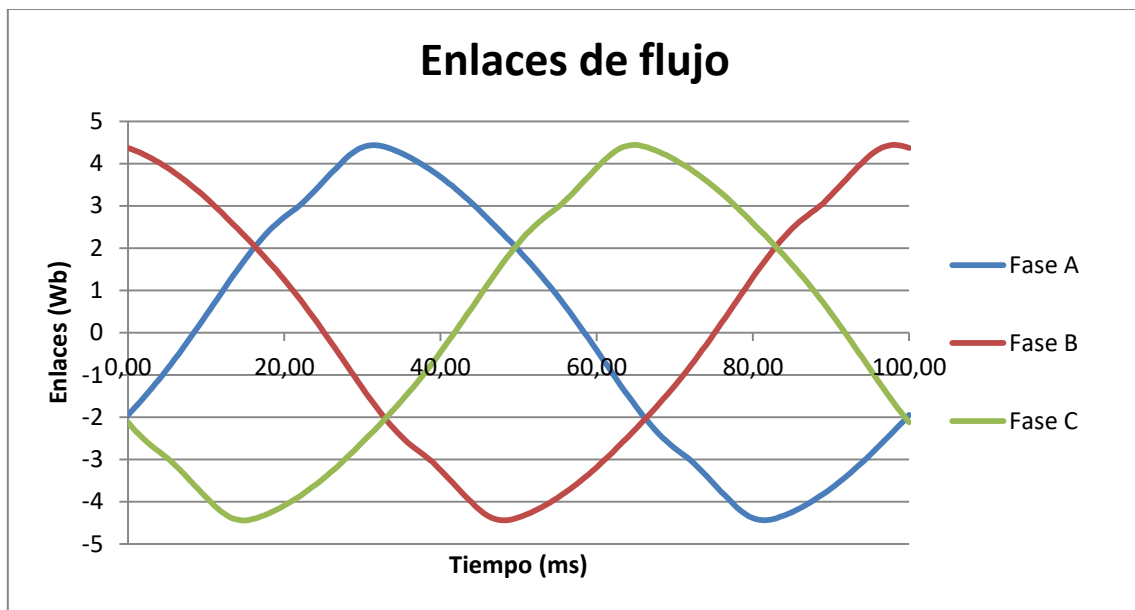


Figura 35. Gráfica de los enlaces de flujo en carga con desfase  $\theta = 90^\circ$ .

La inducción media a lo largo de un polo en la línea del entrehierro es de  $B_\delta = 0,76$  que corresponde exactamente con el valor con el que fue diseñado.

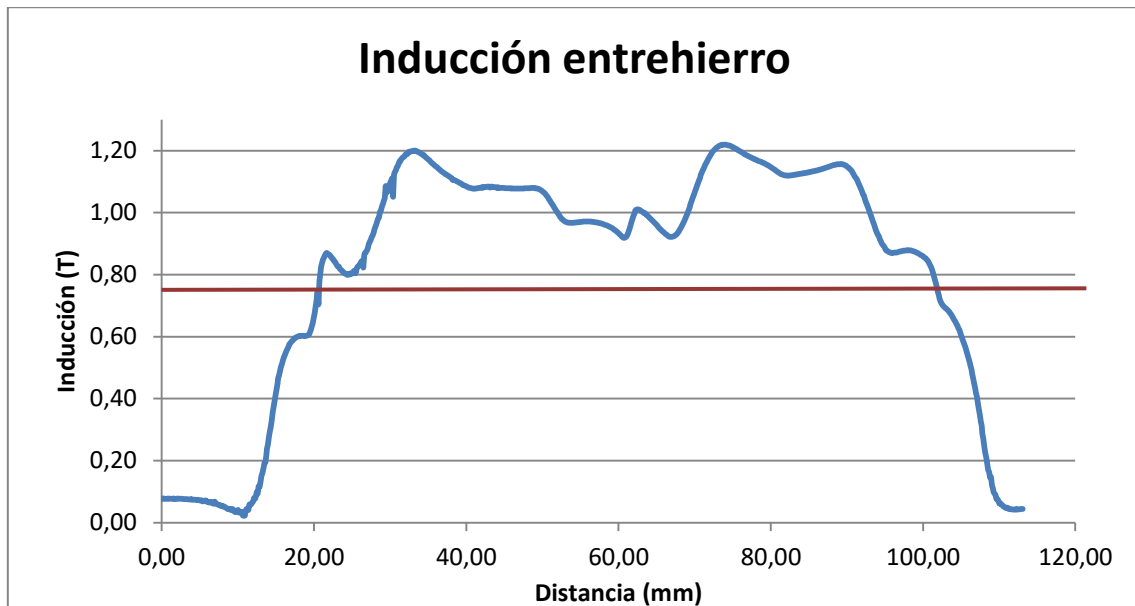


Figura 36. Gráfica de la inducción en el entrehierro en carga.

### 4.2.3. Par a diferentes cargas

Una vez que se puede trabajar con la premisa de par máximo para una determinada intensidad, se simula cómo se comporta ante diferentes estados de carga, representado con diferentes valores de intensidad.

Par a diferentes valores de carga					
Intensidad eficaz (A)	0	49,5	99	148,5	198
Par (kNm)	-0,005	-1,92	-3,84	-5,75	-7,66

Tabla 29. Valores de par medio con diferente carga y desfase  $\theta = 90^\circ$ .

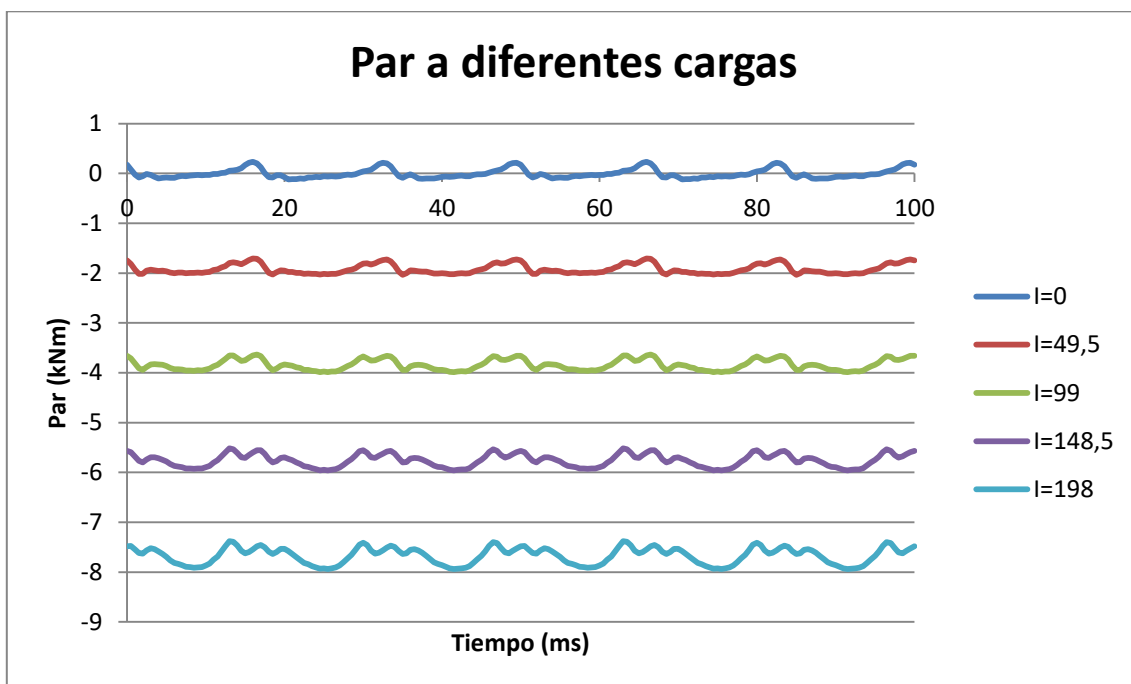


Figura 37. Gráfica de par con diferente estado de carga y desfase  $\theta = 90^\circ$ .

### 4.2.4. Pérdidas

Las pérdidas se calculan en el software de la manera que ya se mencionó en el apartado 3.2.9. *Pérdidas.*

Pérdidas corrientes de carga					
Intensidad eficaz (A)	0	49.5	99	148.5	198
Pérdida media hierro (W)	280,19	301,45	330,45	365,71	404,5
Pérdida cobre (W)	0	142,68	570,73	1284,15	2292,4

Tabla 30. Valores de las pérdidas en el generador con multiplicadora

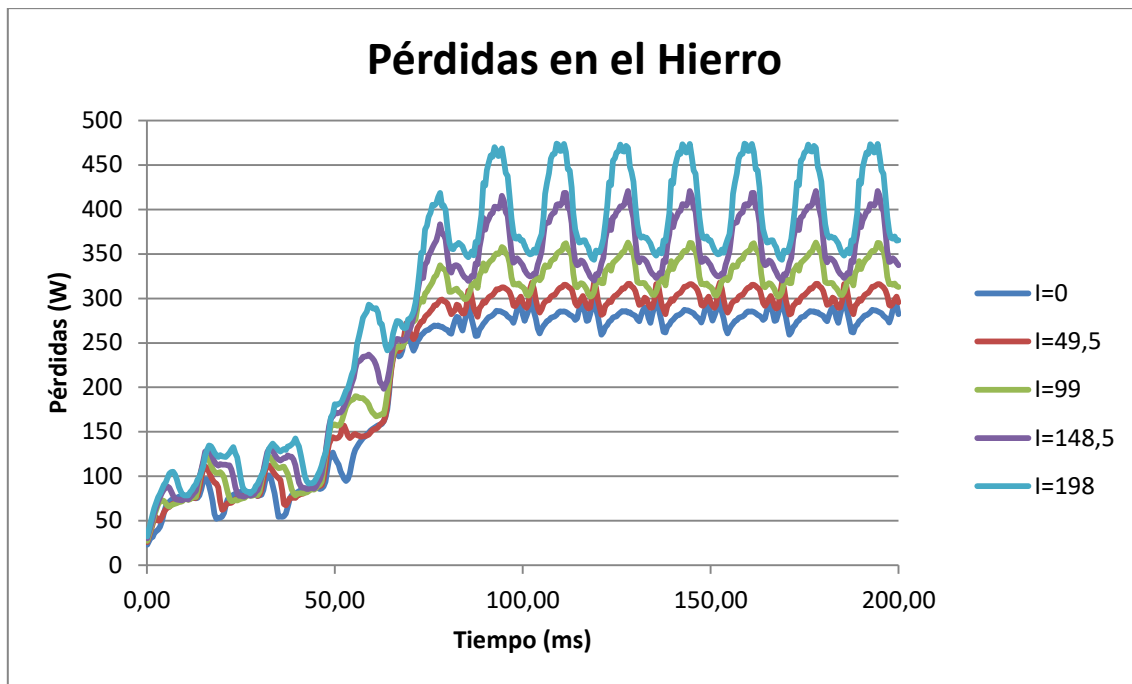


Figura 38. Gráfica de las pérdidas en el núcleo del generador con multiplicadora.

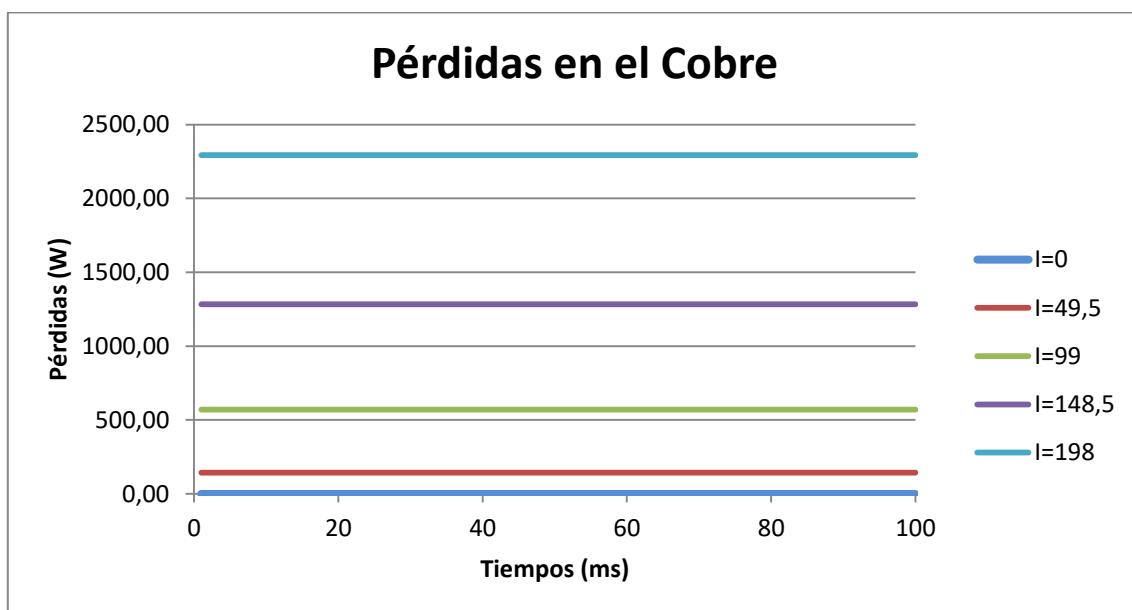


Figura 39. Gráfica de las pérdidas en los devanados del generador con multiplicadora

#### 4.2.5. Caja multiplicadora

El sistema mecánico de transmisión o tren de potencia lo constituyen todos los elementos y componentes de la turbina que transmiten por mecánico al eje de giro. El sistema mecánico de la transmisión en un aerogenerador de eje horizontal lo componen al menos el rotor eólico y el generador eléctrico. Como ya se ha mencionado en el caso del generador de velocidad de 120 revoluciones por minuto es necesario incluir una caja multiplicadora.

Para estimar costes, rendimientos y peso en este trabajo, y así poder comparar ambos modelos diseñados, se va a suponer que usa una multiplicadora, de la compañía Hansen Gear, como la que utiliza el generador de la compañía Vestas V20 de 100kW de potencia. Se ha encontrado en el portal Spares in Motion<sup>2</sup> una por 3500€.

El rendimiento es del 95-98%. Se trabajará con el valor de 95% por ser el más desfavorable.

El peso se estima en 150 kg.



Figura 40. Multiplicadora de la marca Hansen Gear, para turbina Vestas V20.

#### 4.2.6. Rendimiento

El rendimiento del generador se calcula con las expresiones (38) y (39). Además se tendrá también en cuenta el rendimiento de la caja multiplicadora de velocidad.

Rendimiento del generador					
Intensidad (A)	Pérdidas Fe (W)	Pérdidas Cu (W)	Par (kNm)	Potencia (W)	Rendimiento generador (%)
0	280,19	0	5,13	64,46	18,70
49,5	301,45	142,68	1920,74	24136,73	98,19
99	330,45	570,73	3840,81	48265,04	98,16
148,5	365,71	1284,1	5758,14	72358,92	97,77
198	404,5	2292,4	7670	96384,06	97,27

Tabla 31. Rendimiento del generador con multiplicadora en distintas situaciones de carga.

Rendimiento del conjunto			
Carga (A)	Rendimiento generador (%)	Rendimiento multiplicadora (%)	Rendimiento total (%)
0	18,70	95	17,78
49,5	98,19	95	93,28
99	98,16	95	93,25
148,5	97,77	95	92,88
198	97,27	95	92,4

Tabla 32. Rendimiento del conjunto generador más caja multiplicadora

<sup>2</sup> www.sparesinmotion.com

#### 4.2.7. Coste

El coste del generador en base al volumen de material que ocupan cada uno de sus elementos se muestra en la Tabla 33, incluyéndose también el precio de la multiplicadora.

<b>Coste de la máquina</b>					
<b>Material</b>	<b>Volumen (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Densidad (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Masa (kg)</b>	<b>Precio material (€/kg)</b>	<b>Subtotal (€)</b>
Imanes	0,0113	7523	85,12	65	5533
Acero	0,188	7872	1479,4	1,1	1627,9
Cobre	0,0214	8910	191,16	7,1	1357,2
Multiplicadora	-	-	150	23,33	3500
<b>Total</b>					<b>12.018 €</b>

*Tabla 33. Coste del generador con multiplicadora en función de los materiales.*

## 5. Comparativa de ambos modelos

Las diferencias más significativas entre ambas máquinas se pueden agrupar en 4 categorías fundamentales, rizado de par, rendimiento, peso y coste.

### Rizado de Par

Los distintos valores de par que aparecen debidos a las distintas velocidades a las que funciona cada uno de los generadores, hace que se hayan tomado diferentes criterios de validez de resultados a la hora de la simulación.

Debido al alto par esperado del generador sin multiplicadora de 31830 Nm según el cálculo con el método analítico, del que finalmente se consiguió un valor de 31462Nm por FEM, el rizado de par es del  $\pm 6\%$ .

Sin embargo en el segundo modelo, el par estimado analíticamente es de 7950 Nm y el obtenido de 7660 Nm pero con un rizado de par de tan solo el  $\pm 3,65\%$ .

Aunque en ambos no se ha conseguido el par analítico, la reducción de par en el primero es de 370 Nm (un 1,2%) y en el segundo 300 Nm (un 3,8%).

Relacionando los datos de rizado de par y de disminución de par se puede concluir que en el primero por su alto par ha precedido tener mayor valor medio y más rizado, y en el segundo menor valor medio y por ello menor rizado. Y es por lo que en la simulación de la direct drive se tenían valores más próximos a los estimados.

### Rendimiento

En la tabla 34, se muestran los rendimientos de ambas máquinas, y del conjunto generador-multiplicadora. A la vista de los resultados aunque el segundo generador tiene mejor rendimiento, la caja de engranajes hace perder posiciones a esta tecnología frente a la direct drive. Además otro inconveniente que a priori no se puede cuantificar son las paradas que se tengan que realizar para su mantenimiento o las paradas no programadas por fallos que se produzcan en ellos.

Comparativa de rendimientos			
Carga (A)	Generador sin multiplicadora (%)	Generador con multiplicadora (%)	Conjunto generador más multiplicadora (%)
0	6,7	18,70	17,78
49,5	97,3	98,19	93,28
99	97,3	98,16	93,25
148,5	96,8	97,77	92,88
198	96,1	97,27	92,4

Tabla 34. Comparativa de rendimiento.



### Peso

Otra variable a tener en cuenta es el peso, ya que todo el dispositivo irá montado en lo alto de una torre que deberá soportar el peso del conjunto.

Se observa que la diferencia de pesos entre el modelo sin multiplicadora y el conjunto generador más multiplicadora, es de 76kg, y no es muy significativa respecto a los valores globales, del orden de las 2 toneladas.

Comparativa de pesos		
Generador sin multiplicadora (kg)	Generador con multiplicadora (kg)	Conjunto generador con multiplicadora (kg)
1.982	1.756	1.906

Tabla 35. Comparativa de peso.

### Coste

El menor tamaño y por consiguiente menor volumen, del generador de mayor velocidad, repercute notablemente en la disminución de su precio, respecto del generador de menor velocidad, que tiene un mayor número de polos y necesita más del doble de kilogramos de imán, que es el elemento que marca la diferencia de precio por su alto coste.

Así resulta que el generador direct drive es 4680€, más caro que el conjunto generador más multiplicadora.

Comparativa de costes		
Generador sin multiplicadora (€)	Generador con multiplicadora (€)	Conjunto generador con multiplicadora (€)
16.700	8.519	12.018

Tabla 36. Comparativa de costes.

## 6. Conclusiones

Como se vio en el apartado *1.4 Estado del arte*, la energía eólica ha ido evolucionando y creciendo en el último siglo y parece ser que lo seguirá haciendo en los años venideros. La comparación de los dos modelos diseñados y estudiados en el presente trabajo muestra dicha evolución, con una de las últimas tendencias que es crear generadores sin multiplicadora.

La tecnología de imanes permanentes permitió eliminar los anillos necesarios en la excitatriz de las máquinas de inducción en alterna para controlar el flujo, proveyendo un flujo constante impuesto por los imanes. También posibilitó la creación de máquinas de mayor número de polos en volúmenes más compactos, permitiendo pues su utilización en aplicaciones de baja velocidad y con ello la eliminación de las cajas de engranajes que adecuaban la velocidad a la aplicación, con la consecuente disminución de ruido y vibraciones, y menos mantenimiento.

Los resultados de este Trabajo Fin de Grado permiten ratificar las afirmaciones del párrafo anterior. Pues como se comprobó en la sección *5. Comparativa de ambos modelos*, el rendimiento es mayor para la tecnología direct drive aumentando en un 4% frente al generador con la multiplicadora.

Para ello, aunque al prescindir de la multiplicadora se reducen 150 kg, el aumento del volumen del generador para conseguir una máquina de mayor número de polos hace que aumente el volumen de material necesario, y con ello su peso y coste.

El aumento de peso es de un 3,8%, correspondiente a 76 kg, que para los valores tratados puede considerarse trivial.

Sin embargo el aumento de coste es muy significativo llegando a ser del 38,9%. Aunque si se tiene en cuenta que la vida útil de un generador es de unos 20 años, ese sobrecoste anual de 234 € compensa los gastos de mantenimiento y sus correspondientes paradas, y las paradas no programadas por averías de la multiplicadora.

Respecto al diseño electromagnético se ha comprobado la repercusión de la forma de la ranura por su influencia en el valor de par medio y su rizado. Encontrar el valor más adecuado en el software FEM es la tarea más delicada del proceso y en la que se deberá de prestar más atención.

Cabe destacar la importancia que toma el diseñador en el proceso, y su conocimiento de la interfaz y funcionamiento interno del software que a veces no es muy intuitivo.

Conclusiones

## 7. Líneas futuras

El objetivo principal de este proyecto era crear el diseño de un generador síncrono de imanes permanentes de 100 kW que no precisase de caja multiplicadora. El objetivo secundario era el comparar los resultados de dicho generador con otra máquina de similares características pero que se tuviese que valer de una caja de cambios para funcionar.

Los procesos de generación de modelos nuevos, son largos y buscan las características óptimas de funcionamiento. En el presente proyecto se ha llevado a cabo un diseño inicial con unas propiedades iniciales que han sido suficientes para el fin del proyecto que era aprender el proceso de creación y optimización, en el tiempo de dedicación del que se disponía, unas 360 h de trabajo correspondientes a los 12 ECTS.

Para proyectos venideros relacionados con el actual se pueden sugerir una serie de líneas futuras para la mejora del mismo. Algunas de ellas son:

- Además de los dos ensayos llevados a cabo, el de vacío y el de carga se pueden realizar otros ensayos propios de máquinas eléctricas, como el de cortocircuito o el de caracterización de inductancia.
- Estudio de la distribución y segmentación de los imanes sobre la superficie del rotor, para reducir aún más el rizado de par.
- Estudio térmico, ya que los imanes permanentes empiezan a ver mermadas sus propiedades magnéticas a partir de cierta temperatura.
- Estudio de varios tipos de ranuras en el modelo con multiplicadora para solucionar los problemas con el par.
- Implantación del diseño en otro tipo de software o de programa por ejemplo, crear el modelo en Simulink y estudiar las velocidades del viento para las cuales es recomendable la conexión y desconexión del generador y a partir de las que es eficiente producir energía.
- Cálculo del resto de elementos del aerogenerador, tales como altura de la torre, mayor precisión en la longitud de las palas, convertidor o multiplicadora.
- Estudio de ubicación del mismo, zonas con las velocidades de viento adecuadas y que necesiten demanda de generadores de media potencia.
- Estudio del reciclado de los componentes que forman el aerogenerador, para seguir en la línea sostenible y que el producto tenga un ciclo cerrado de vida.



## 8. Impacto social, ambiental y económico

En la actualidad la responsabilidad social y profesional de la práctica de la ingeniería, así como sus aspectos ambientales legales o éticos, están tomando cada vez más relevancia en el desarrollo de los proyectos de ingeniería, convirtiéndose en parte importante a la hora de tomar decisiones relativas al planteamiento y ejecución de los mismos.

Y es que los ingenieros tienen la responsabilidad como trabajadores técnicos y como concededores y desarrolladores de los procesos industriales de avanzar hacia un modelo sostenible de producción, de tal manera que el cambio climático, fruto de una actividad humana sin límites, se vea no ya eliminado, pues los últimos estudios muestran que el aumento de temperatura que ha tenido lugar hasta ahora es irreversible, pero sí intentar que no vaya a más. En paralelo con los problemas ambientales y vinculados a ellos aparece una obligación con la sociedad que tendrá que sufrir las consecuencias del cambio climático como desertización, acidificación de los océanos, aumentos de temperatura que incidirán en las cosechas, problemas de salud y sequías. Además con la sociedad también está el compromiso intrínseco de mejorar continuamente su calidad de vida.

Es por ello que en lo social, ambiental y académico se valora positivamente el papel de la energía eólica como contribuyente neto al logro del desarrollo sostenible, ya que es una tecnología que fomenta el consumo y producción de energía sostenible, y dentro del marco económico impulsa la transición hacia una economía menos dependiente de los combustibles fósiles.

Así abogar por el desarrollo de los aerogeneradores en términos medioambientales se traduce en una reducción de la huella de carbono en la generación de electricidad lo que implica la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera.

Asimismo su consecución en parques eólicos aporta un valor como infraestructura, que impulsa el crecimiento económico de la zona y en definitiva del país. Tanto es así que es España la eólica directa e indirectamente representa el 0,25% del PIB del país.

Centrándose en las repercusiones que tendrá en particular este proyecto, la principal es adquirir conocimientos sobre diseño y funcionamiento de máquinas eléctricas que se puedan aplicar en un futuro para crear cada vez equipos más eficientes y para la operación, mantenimiento y control de los equipos ya existentes.

A nivel social, cuanto mayor madurez tecnológica adquiera esta forma de generación, más competitiva será en el mercado y con ello menor precio de la electricidad.

A nivel ambiental, ambos modelos de generador tanto el que no requiere multiplicadora como el que sí, son beneficiosos pues pueden usarse para autoconsumo en multitud de industrias, fomentando así las energías renovables a pequeña escala.

Y por último a nivel económico conseguir eliminar la multiplicadora hace que el generador requiera menos mantenimiento, aumentando la fiabilidad, durabilidad, y ahorrando costes, al comprador. Que además puede adquirir el equipo a un precio relativamente asequible.

En definitiva fomenta el desarrollo socioeconómico respetando el medio ambiente



## 9. Preparación temporal

El presente trabajo se inició en Enero 2017 y se finalizó en Noviembre del mismo año. Se han empleado un total de 360 horas en la realización del trabajo, próximas a los correspondientes 12 créditos ECTS asignados, repartidas en los 11 meses que ha durado el desarrollo del mismo, aunque no en todas las etapas ha habido el mismo grado de dedicación, así se distinguen periodos de menor actividad, como la época correspondiente a los exámenes de Junio y el verano.

### 9.1. Planificación temporal

Se puede dividir en 5 fases su ejecución:

- Trabajo previo, 70 horas, recoge las tareas primarias necesarias para entrar en el contexto del proyecto y la situación en la que se encuentra la tecnología que se va a desarrollar.
  - Estudio previo del caso
  - Búsqueda de información
    - Tecnología eólica
    - Estado del arte
    - Máquinas de imanes permanentes
    - Datos de materiales
  - Aprendizaje de uso del programa de elementos finitos
    - Tutorial
    - Simulación transformador laboratorio
  
- Métodos analíticos, 40 horas, familiarización con las ecuaciones teóricas, parámetros utilizados y proceso de búsqueda de valores acordes con el fin.
  - Búsqueda de valores óptimos
  - Proceso iterativo
  - Comparación de modelos según parámetros
  - Elección de modelos
  
- Métodos numéricos, 120 horas, implementación en el software de los resultados analíticos tanto del modelo con y sin multiplicadora. Comprensión de resultados.
  - Modelo sin multiplicadora
    - Creación de geometría
    - Implementación de condiciones de simulación
    - Análisis y simulación del modelo
    - Obtención de gráficas y análisis de resultados
  - Modelo con multiplicadora
    - Creación de geometría



## Preparación temporal

- Implementación
- Análisis y simulación del modelo
- Obtención de gráficas y resultados
- Comparación de modelos
  - Rendimientos
  - Costes
- Redacción de la memoria ,130 horas.
  - Redacción del documento inicial
  - Revisión y corrección

En la siguiente tabla se muestra el periodo de tiempo en el que se ha llevado a cabo cada una de las tareas descritas anteriormente.

Nombre de la tarea	Inicio	Fin	Duración
<b>Trabajo Previo</b>	25/01/2017	31/03/2016	66 días
<b>Estudio previo del caso</b>	25/01/2017	25/01/2017	1 día
<b>Búsqueda de información</b>	15/03/2017	31/03/2017	15 días
<b>Aprendizaje uso software</b>	26/01/2017	31/03/2017	65 días
<b>Tutorial</b>	26/01/2017	4/02/2017	10 días
<b>Simulación transformador</b>	16/02/2017	31/03/2017	42 días
<b>Métodos analíticos</b>	1/04/2017	20/04/2017	20 días
<b>Búsqueda de valores óptimos</b>	1/04/2017	7/04/2017	7 días
<b>Proceso iterativo</b>	3/04/2017	17/04/2017	15 días
<b>Comparación</b>	18/04/2017	20/04/2017	3 días
<b>Elección de modelos</b>	20/04/2017	20/04/2017	1 día
<b>Métodos numéricos</b>	21/04/2017	1/11/2017	194 días
<b>Modelo sin multiplicadora</b>	21/04/2017	16/10/2017	178 días
<b>Creación de geometría</b>	21/04/2017	30/04/2017	9 días
<b>Condiciones simulación</b>	1/05/2017	15/05/2017	15 días
<b>Análisis del modelo</b>	16/05/2017	25/09/2017	132 días
<b>Gráficas y resultados</b>	26/09/2017	16/10/2017	20 días
<b>Modelo con multiplicadora</b>	17/10/2017	27/10/2017	11 días
<b>Comparación de modelos</b>	28/10/2017	1/11/2017	4 días
<b>Rendimientos</b>	28/10/2017	29/10/2017	2 días
<b>Costes</b>	30/10/2017	1/11/2017	2 días
<b>Redacción de la memoria</b>	1/07/2017	8/11/2017	69 días
<b>Revisión del documento</b>	5/11/2017	8/11/2017	4 días

Tabla 37. Planificación temporal del trabajo fin de grado.

## 9.2. EDP

Es conveniente añadir una estructura de descomposición del producto o EDP, que muestra de forma jerárquica las componentes principales que forman el entregable de este proyecto. Ayuda a dar una visión de todas y cada una de las actividades necesarias para la realización del trabajo.

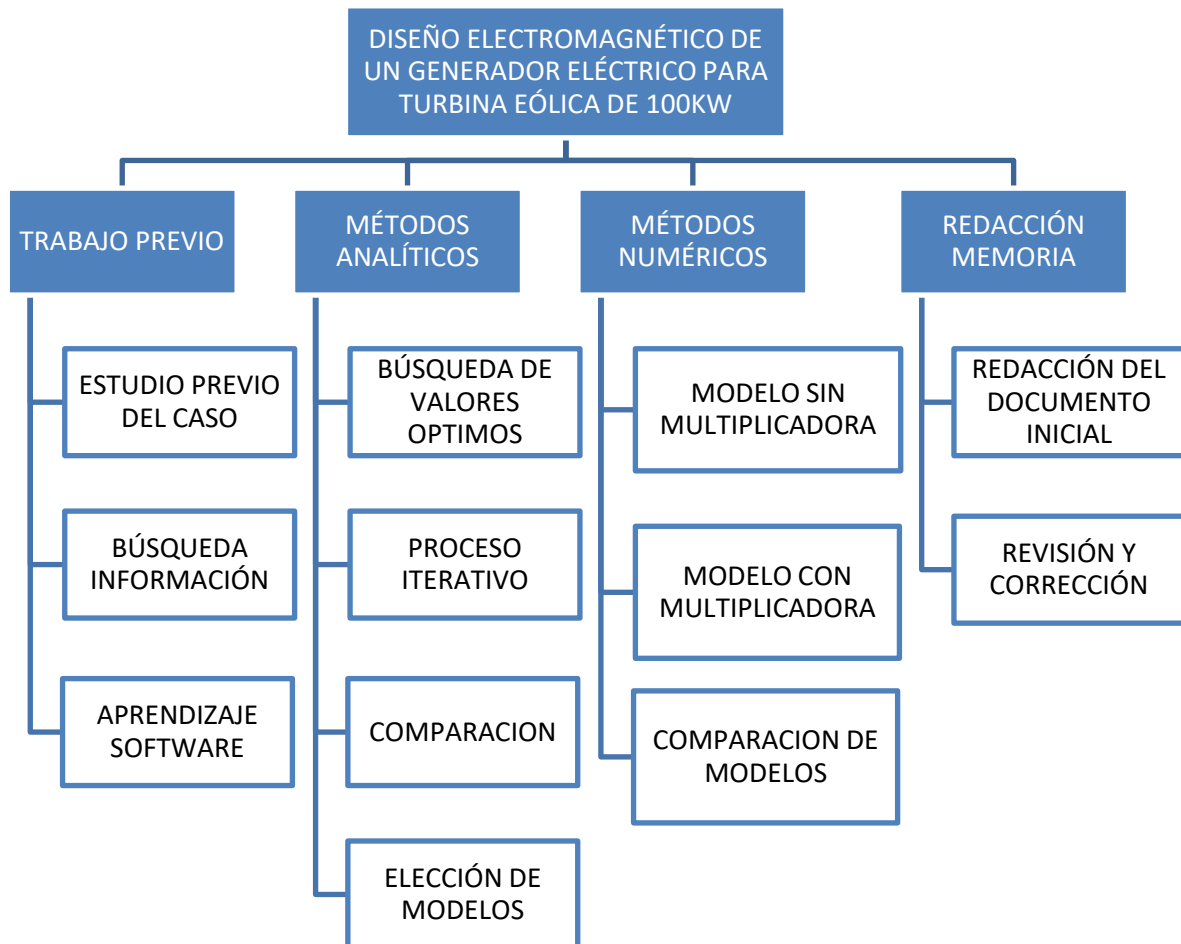


Figura 41. EDP.

## 9.3. Diagrama de Gant

En el diagrama de Gant de la figura 42 se muestra las tareas especificadas en la tabla 37, y se observa como es mayoritariamente un proceso secuencial en el que para empezar una tarea es necesario haber terminado la anterior, a excepción de la búsqueda de información que se puede compaginar con otras labores.

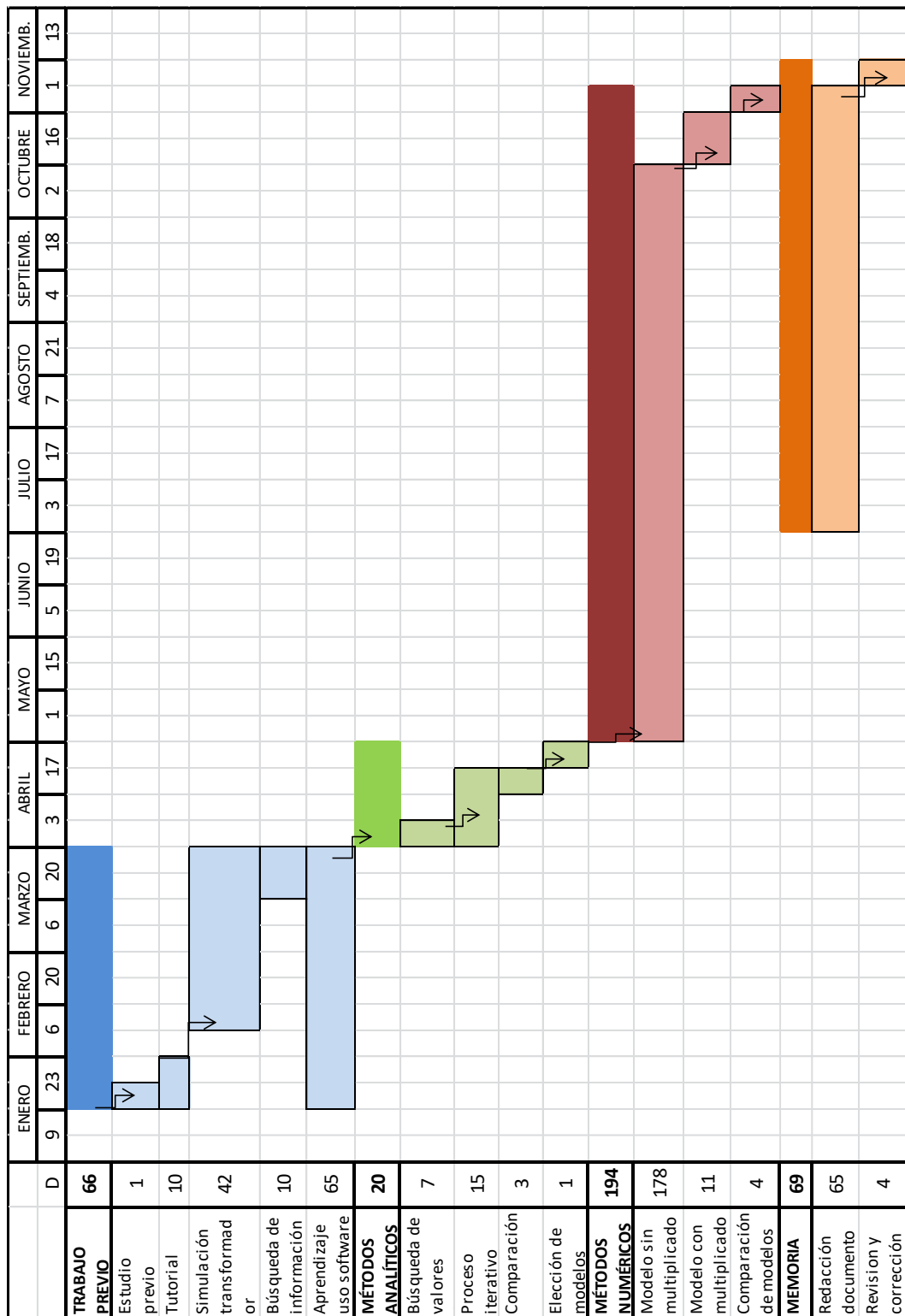


Figura 42. Diagrama de Gant

## 10. Presupuesto

El presupuesto de ejecución del proyecto incluye las siguientes partidas: personal, material físico y programas utilizados. El importe total es de 7284,99€ tal y como se detalla a continuación.

Concepto	Unidades	Precio Unitario	Importe
<b>Personal</b>			
<b>Horas dedicadas por el alumno</b>	360	15 €/h	5400 €
<b>Horas dedicadas por el tutor</b>	30	45 €/h	1350 €
<b>Programas informáticos</b>			
<b>Paquete Microsoft Office</b>	1	74,99 €	74,99 €
<b>Software FEM</b>	1	Libre	0
<b>Material físico</b>			
<b>Ordenador</b>	1	1000 €	1000€
<b>Total</b>			<b>7.824,99€</b>

Tabla 38. Presupuesto de trabajo fin de grado.



## 11. Bibliografía

[1] **Boldea, Ion. 2015.** *Synchronous Generators.* 2015.

[2] **Carrasco, Paloma Zahonero.** *Generador de Flujo Radial de Imanes Permanentes.*

[3] **Gómez, María Auxiliadora Simón. 2017.** *Diseño de un Motor de Flujo Axial de Imanes Permanentes.* 2017.

[4] **Hanselman, Dr. Duane. 2006.** *Permanent Magnet Motor Design.* 2006.

[5] **J.L. Rodríguez Amenedo, J.C. Burgos Díaz, S. Arnalte Gómez. 2003.** *Sistemas Eólicos de Producción de Energía Eléctrica.* 2003.

[6] **2014.** *Manual Software Elementos Finitos.* 2014.

[7] **Miller, T. J. E. 1989.** *Brushless Permanent-Magnet and Reluctance Motor Drives.*



## 12. Índice de figuras

<i>Figura 1. Representación de los elementos del interior de una góndola. Fuente: <a href="http://www.renovablesverdes.com">www.renovablesverdes.com</a></i>	10
<i>Figura 2. Potencia eólica instalada acumulada en el mundo. 2001-2016. Fuente: GWEC</i>	14
<i>Figura 3. Curva característica BH de un imán</i>	15
<i>Figura 4. Punto de operación del imán</i>	16
<i>Figura 5. Curvas características BH de diferentes imanes permanentes. Fuente: Apuntes máquinas eléctricas II, ETSII-UPM.</i>	17
<i>Figura 6. Configuraciones de máquinas de imanes permanentes de flujo radial con rotor interno. ....</i>	19
<i>Figura 7. Configuración de máquina de imanes permanentes de flujo radial con rotor externo. ....</i>	20
<i>Figura 8. Configuración de máquina de imanes permanentes de flujo axial. ....</i>	20
<i>Figura 9. Representación esquemática de los parámetros considerados en el dimensionamiento del estator del generador. Fuente: elaboración propia.</i>	28
<i>Figura 10. Representación esquemática de los parámetros considerados en el diseño del rotor. Fuente: elaboración propia</i>	29
<i>Figura 11. División nodal de un transformador del laboratorio de máquinas eléctricas de la ETSII-UPM, simulado en el software de elementos finitos. Fuente: elaboración propia.</i>	33
<i>Figura 12. Sección transversal del generador sin multiplicadora. Fuente: elaboración propia</i>	34
<i>Figura 13. Sección transversal del generador sin multiplicadora de la porción de 18º que incluye un par de polos. Fuente: elaboración propia.</i>	34
<i>Figura 14. Curva característica BH del acero M19_29G.</i>	35
<i>Figura 15. Mallado de los diferentes componentes del generador sin multiplicadora.</i>	36
<i>Figura 16. Gráfica de resultados de par a diferentes ángulos de desfase de la corriente del generador sin multiplicadora.</i>	38
<i>Figura 17. Comparación de los dientes del generador sin multiplicadora tras añadir el pie de diente.</i>	39
<i>Figura 18. Gráfica comparativa del aumento del par y disminución del rizado con diferente diente y desfase de <math>\theta = 90^\circ</math>.</i>	39
<i>Figura 19. Gráfica de la tensión inducida en carga con diente modificado y desfase de <math>\theta = 90^\circ</math>.</i>	40
<i>Figura 20. Gráfica de la intensidad en carga con diente modificado y desfase de <math>\theta = 90^\circ</math>.</i>	40
<i>Figura 21. Gráfica de los enlaces de flujo en carga con diente modificado y desfase <math>\theta = 90^\circ</math>.</i>	41
<i>Figura 22. Gráfica de la inducción a nivel de entrehierro en carga con diente modificado y desfase <math>\theta = 90^\circ</math>.</i>	41
<i>Figura 23. Gráfica de par con diferente estado de carga diente modificado y desfase <math>\theta = 90^\circ</math>.</i>	42
<i>Figura 24. Par en vacío con diente modificado.</i>	43
<i>Figura 25. Inducción en el entrehierro en vacío a lo largo de un polo con diente modificado.</i>	43
<i>Figura 26. Gráfica de la tensión en vacío con diente modificado</i>	44
<i>Figura 27. Enlaces de flujo en vacío con diente modificado.</i>	44
<i>Figura 28. Gráfica de las pérdidas en el núcleo del generador sin multiplicadora.</i>	46
<i>Figura 29. Gráfica de las pérdidas en los devanados del generador sin multiplicadora.</i>	46
<i>Figura 30. Sección transversal del generador con caja multiplicadora. Fuente: elaboración propia.</i>	51
<i>Figura 31. Sección transversal del generador con caja multiplicadora de la porción de 36º que incluye un único polo. Fuente: elaboración propia.</i>	52



## Índice de figuras

<i>Figura 32. Gráfica de resultados de par a diferentes ángulos de desfase de la corriente del generador con multiplicadora.</i> .....	54
<i>Figura 33. Gráfica de la tensión inducida en carga con desfase de <math>\theta = 90^\circ</math> en la alimentación.</i> .....	55
<i>Figura 34. . Gráfica de la intensidad en carga con desfase de <math>\theta = 90^\circ</math>.</i> .....	55
<i>Figura 35. Gráfica de los enlaces de flujo en carga con desfase <math>\theta = 90^\circ</math>.</i> .....	56
<i>Figura 36. Gráfica de la inducción en el entrehierro en carga.</i> .....	56
<i>Figura 37. Gráfica de par con diferente estado de carga y desfase <math>\theta = 90^\circ</math>.</i> .....	57
<i>Figura 38. Gráfica de las pérdidas en el núcleo del generador con multiplicadora.</i> .....	58
<i>Figura 39. Gráfica de las pérdidas en los devanados del generador con multiplicadora.</i> .....	58
<i>Figura 40. Multiplicadora de la marca Hansen Gear, para turbina Vestas V20.</i> .....	59
<i>Figura 41. EDP.</i> .....	71
<i>Figura 42. Diagrama de Gant</i> .....	72

## 13. Índice de tablas

<i>Tabla 1. Propiedades de los distintos imanes permanentes.</i> .....	17
<i>Tabla 2. Propiedades del imán seleccionado para los generadores. Fuente: <a href="http://www.arnoldmagnetics.com">www.arnoldmagnetics.com</a></i> .....	17
<i>Tabla 3. Especificaciones básicas del generador síncrono de imanes permanentes sin multiplicadora de 100kW.</i> .....	22
<i>Tabla 4. Valores de los factores de distribución de devanados trifásico.</i> .....	23
<i>Tabla 5. Dimensiones de los imanes permanentes del generador sin multiplicadora.</i> .....	24
<i>Tabla 6. Recopilación de los valores del dimensionamiento de los devanados del generador sin multiplicadora.</i> .....	26
<i>Tabla 7. Secciones normalizadas de conductor según American Wire Gauge AWG. Fuente: Electrónica fácil</i> .....	27
<i>Tabla 8. Recopilación de los resultados obtenidos para dimensionar el estator del generador sin multiplicadora.</i> .....	28
<i>Tabla 9. Dimensiones del rotor del generador sin multiplicadora.</i> .....	30
<i>Tabla 10. Características generales del generador sin multiplicadora, obtenidas con el método analítico.</i> .....	30
<i>Tabla 11. Comparativa de los diferentes modelos de generadores estudiados.</i> .....	31
<i>Tabla 12. Propiedades del acero M19_29G.</i> .....	35
<i>Tabla 13. Propiedades del cobre.</i> .....	35
<i>Tabla 14. Datos para la simulación con alimentación en corriente del generador sin multiplicadora.</i> 37	
<i>Tabla 15. Resultado de la simulación con distintos ángulos de desfase en la corriente del generador sin multiplicadora.</i> .....	37
<i>Tabla 16. Dimensiones de la ranura con pie de diente, para el generador sin multiplicadora.</i> .....	38
<i>Tabla 17. Comparación de pares medios con diferente diente y desfase de 90º del generador sin multiplicadora.</i> .....	39
<i>Tabla 18. Valores de tensión eficaz de la simulación en carga con dientes modificados y desfase de <math>\theta=90^\circ</math> del generador sin multiplicadora.</i> .....	40
<i>Tabla 19. Valores de par medio con diferente carga con diente modificado y desfase <math>\theta=90^\circ</math>.</i> .....	42
<i>Tabla 20. Valores eficaces de la tensión en vacío con diente modificado.</i> .....	44
<i>Tabla 21. Valores de las pérdidas en el generador sin multiplicadora</i> .....	46
<i>Tabla 22. Rendimiento del generador sin multiplicadora en distintas situaciones de carga.</i> .....	47
<i>Tabla 23. Coste del generador sin multiplicadora en función de los materiales.</i> .....	48
<i>Tabla 24. Especificaciones básicas del generador síncrono de imanes permanentes con caja multiplicadora de 100kW.</i> .....	49
<i>Tabla 25. Características generales del generador con caja multiplicadora, obtenidas con el método analítico.</i> .....	51
<i>Tabla 26. Dimensiones finales de la ranura con el pie de diente del generador con multiplicadora.</i> ...	52
<i>Tabla 27. Resultado de la simulación con distintos ángulos de desfase en la corriente del generador con multiplicadora.</i> .....	53
<i>Tabla 28. Valores eficaces de tensiones en carga del generador con multiplicadora.</i> .....	54
<i>Tabla 29. Valores de par medio con diferente carga y desfase <math>\theta=90^\circ</math>.</i> .....	57
<i>Tabla 30. Valores de las pérdidas en el generador con multiplicadora</i> .....	57

## Índice de tablas

<i>Tabla 31. Rendimiento del generador con multiplicadora en distintas situaciones de carga.....</i>	59
<i>Tabla 32. Rendimiento del conjunto generador más caja multiplicadora .....</i>	59
<i>Tabla 33. Coste del generador con multiplicadora en función de los materiales.....</i>	60
<i>Tabla 34. Comparativa de rendimiento.....</i>	61
<i>Tabla 35. Comparativa de peso.....</i>	62
<i>Tabla 36. Comparativa de costes.....</i>	62
<i>Tabla 37. Planificación temporal del trabajo fin de grado.....</i>	70
<i>Tabla 38. Presupuesto de trabajo fin de grado.....</i>	73