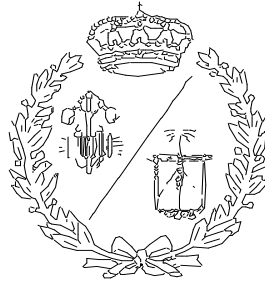


**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN**

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Grado

**DISEÑO Y ANÁLISIS PARAMÉTRICO DE UN
MOTOR DE INDUCCIÓN TRIFÁSICO DE
BAJA TENSIÓN CON SOFTWARE JMAG**

**(Design and Parametric Analysis of a Three-
Phase Low Voltage Induction Motor through
JMAG Software)**

Para acceder al Título de

**GRADUADO EN INGENIERÍA EN
TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES**

Autor: Hugo Mantilla San José

Julio - 2018

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN. ASPECTOS GENERALES	5
2. PLANTEAMIENTO Y OBJETIVOS	28
3. MEMORIA.....	30
4. CONCLUSIONES	113
5. BIBLIOGRAFÍA	116

1. INTRODUCCIÓN. ASPECTOS GENERALES	5
1.1 PRINCIPALES ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS DE LOS MOTORES DE INDUCCIÓN	7
1.1.1 Bobinados eléctricos.....	8
1.1.2 Aislamiento eléctrico.....	9
1.1.3 Núcleos magnéticos del estator y el rotor.....	10
1.1.4 Elementos de transmisión mecánica.....	10
1.1.5 Elementos de conexión eléctrica.....	10
1.1.6 Envolvertes. Sistemas de refrigeración.....	11
1.2 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO. REGÍMENES DE FUNCIONAMIENTO.....	12
1.3 ASPECTOS ENERGÉTICOS. EFICIENCIA EN MOTORES ELÉCTRICOS .	14
1.4 ASPECTOS GENERALES DE DISEÑO DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS ..	16
1.4.1 Condiciones ambientales	16
1.4.2 Condiciones de la alimentación eléctrica.....	16
1.4.3 Condiciones de la carga accionada y generales.....	16
1.4.4 Costes	17
1.4.5 Materiales empleados.....	17
1.4.6 Normativa nacional e internacional	18
1.4.7 Tipos de servicio	18
1.4.8 Tamaño de carcasa	20
1.4.9 Grados de protección: Código IP e IK.....	20
1.5 TÉCNICAS NUMÉRICAS–CAD DE DISEÑO DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS	22
1.5.1 Pre-procesamiento.....	23
1.5.2 Procesamiento	25
1.5.3 Post proceso.....	25
1.5.4 Recursos disponibles.....	25
2. PLANTEAMIENTO Y OBJETIVOS	28
3. MEMORIA	30
3.1 ENTORNO DE COMPUTACIÓN	31
3.1.1 JMAG Designer.....	31
3.1.2 JMAG-VTB y JMAG-Bus.....	32

3.1.3	JMAG RT-Viewer	32
3.1.4	JMAG for CATIA.....	32
3.1.5	JMAG-Express	32
3.2	REQUISITOS GENERALES	34
3.2.1	Descripción general del motor	34
3.2.2	Requerimientos y parámetros básicos.....	35
3.3	DISEÑO DE REFERENCIA	38
3.3.1	Datos geométricos, bobinado y fuente.....	38
3.3.2	Datos materiales	42
3.4	SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DEL MODELO DE REFERENCIA.....	45
3.4.1	Ajustes de simulación	45
3.4.2	Resultados.....	52
3.5	ESTUDIO PARAMÉTRICO DE DIMENSIONES PRINCIPALES	72
3.5.1	Diámetro del entrehierro.....	73
3.5.2	Entrehierro	78
3.5.3	Longitud Axial.....	82
3.6	ELECCIÓN DEL DISEÑO FINAL.....	88
3.6.1	Diámetro del entrehierro y Longitud axial	88
3.6.2	Entrehierro	91
3.6.3	Otros factores.....	92
3.6.4	Resumen.....	96
3.7	DISEÑO FINAL.....	97
3.7.1	Modelo	97
3.7.2	Resultados.....	98
3.7.3	Resumen.....	112
4.	CONCLUSIONES.....	114
5.	BIBLIOGRAFÍA.....	117
5.1.	MONOGRAFÍAS	118
5.2.	PÁGINAS WEB.....	118
5.3.	NORMAS TÉCNICAS.....	118
5.4.	OTROS DOCUMENTOS.....	119

1. INTRODUCCIÓN. ASPECTOS GENERALES

Los motores eléctricos en concreto los motores de inducción de jaula de ardilla se caracterizan por su simplicidad, robustez, fiabilidad y resistencia, son económicos y los costes de mantenimiento son bajos dado el bajo índice de incidencias durante su funcionamiento (fundamentalmente en los elementos de rodadura). Se emplean en todos los sectores (industrial, residencial, servicios, etc.) y en todos los niveles de potencia.

Sin embargo, presentan una serie de particularidades inherentes a su funcionamiento: su velocidad es prácticamente constante desde cero hasta plena carga, su velocidad disminuye al incrementarse la carga accionada, y el par en el arranque es inferior al conseguido en los motores de corriente continua. No obstante, el desarrollo de la electrónica de control, que permite la regulación de la velocidad de un modo muy simple y eficaz, ha supuesto que, todas aquellas aplicaciones que priorizaban la utilización de motores sujetos a tener en su propio comportamiento intrínseco la posibilidad de una regulación de la velocidad, como los motores de corriente continua, hayan sido sustituidos por los motores asíncronos, en particular por los de jaula de ardilla, que se utilizan comúnmente para controlar bombas, ventiladores, compresores y muchas otras aplicaciones industriales.

1.1 PRINCIPALES ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS DE LOS MOTORES DE INDUCCIÓN

Todos los dispositivos de conversión electromagnética de la energía comprenden dos elementos fundamentales: un circuito eléctrico y un circuito magnético.

El circuito eléctrico consiste en los arrollamientos eléctricos que permiten la circulación de corrientes en la máquina, y el circuito magnético los núcleos ferromagnéticos que, dada su elevada permeabilidad, establecen las sendas magnéticas de flujo.

Este tipo de máquinas están integradas, fundamentalmente, por dos estructuras cilíndricas concéntricas: el estator estacionario y el rotor giratorio, situado en su interior, separadas por una corona cilíndrica de aire muy estrecha (o entrehierro) que permite el movimiento del rotor y evita el contacto entre ambos cuerpos, cuyo valor depende de la potencia del motor.

Los principales elementos constructivos de un motor de inducción común se agrupan en:

- Los bobinados eléctricos del estator y el rotor.
- Aislamiento dieléctrico de los devanados.
- Los núcleos magnéticos del rotor y del estator.
- Los elementos de acoplamiento y transmisión mecánica.
- Los elementos de conexión eléctrica del estator.
- Los elementos de protección del material y de las personas y los medios de refrigeración.

1.1.1 Bobinados eléctricos

Los bobinados o devanados constituyen el circuito eléctrico de la máquina, conducen las corrientes eléctricas. El material conductor suele ser cobre, aunque también se emplean aleaciones de cobre, o aluminio en la fabricación de los devanados del rotor tipo jaula de ardilla. En este trabajo se emplearán cobre en el estator y aluminio en el rotor.

El **devanado del estator** de un motor asíncrono normalmente es trifásico; en máquinas de pequeña potencia también puede ser monofásico o bifásico. Se implementa conectando un conjunto de bobinas formadas por espiras conductoras que se insertan en las ranuras practicadas en la circunferencia interior del estator. Son devanados abiertos con dos extremos, un principio y un final, por cada fase.

En general, los tipos de arrollamientos del estator son:

- Arrollamientos de hilo o aleatorios: Consisten en un conjunto de conductores delgados de sección circular de cobre recubiertos por un esmalte (aislante). Dada su limitada capacidad de aislamiento, se emplea en máquinas de baja tensión (hasta 1 kV), y potencias inferiores a los centenares de kilovatios. Los motores que emplean este tipo de devanados suelen poseer ranuras semiabiertas a fin de facilitar el bobinado de la máquina. Éste es el tipo de devanado que se aplicará en este trabajo.
- Arrollamientos preformados (tipo diamante): Se conforman conectando conjuntos de bobinas idénticas para crear el número adecuado de polos y vueltas por fase, cada bobina está formada por un conjunto aislado de vueltas de espiras con forma de pletina de sección rectangular recubierta de aislante. Se conforman antes de ser insertados en las ranuras del estator, de manera que se precisan ranuras abiertas. Este tipo de devanados se emplean en motores con tensiones de operación por encima de 1 kV.

El **devanado del rotor** constituye un circuito cerrado por el que circulan corrientes inducidas por el campo magnético. Atendiendo al tipo de arrollamiento, el rotor puede ser de dos tipos: de jaula de ardilla o en cortocircuito, y de rotor bobinado o con anillos.

- Una jaula de ardilla es un devanado formado por un sistema de barras de cobre, aleación de cobre o aluminio, alojadas en las ranuras practicadas a lo largo de toda la periferia externa del núcleo ferromagnético del rotor unidas entre sí por sus extremos mediante sus respectivos anillos de cortocircuito del mismo material. El tipo de ranura empleada es cerrada o semicerrada, en general las barras conductoras no suelen aislarse del núcleo, se encuentran en contacto directo. El número de fases de este devanado depende de su número de barras y el número de polos que posea el motor. Los anillos de cortocircuito suelen contar con unas aletas que facilitan la evacuación del calor que se genera en la jaula durante el funcionamiento de la máquina. Dada su simplicidad constructiva, da lugar a un tipo de motor muy simple, robusto y económico. Es el tipo de devanado se utilizará en el presente trabajo.
- El rotor bobinado presenta una estructura más compleja y delicada, tiene un devanado trifásico similar al del estator cuyas fases se conectan al exterior a través de un colector de tres anillos y sus correspondientes escobillas con la posible interposición de resistencias o convertidores electrónicos para el control de la fase de arranque. En funcionamiento normal estos tres anillos se encuentran cortocircuitando el devanado a través de las escobillas. Este tipo de motores de inducción requieren mantenimiento periódico y sus dimensiones generales son elevadas.

1.1.2 Aislamiento eléctrico

La función esencial del aislamiento es separar los circuitos eléctricos de diferente tensión entre sí, y de otros elementos metálicos conectados a tierra. No se contemplarán en este trabajo materiales y partes dieléctricas.

1.1.3 Núcleos magnéticos del estator y el rotor

Los núcleos ferromagnéticos constituyen el soporte material del circuito magnético del motor. Canalizan el flujo magnético excitado por los circuitos eléctricos. Para limitar las pérdidas magnéticas, los núcleos se forman apilando chapas magnéticas de acero al silicio de delgado espesor y aisladas entre sí.

1.1.4 Elementos de transmisión mecánica

Los elementos responsables de transmitir la potencia mecánica consisten en:

- Eje de rotación.
- Elementos de rodadura.
- Elementos de enlace con la carga.

1.1.5 Elementos de conexión eléctrica

Los motores eléctricos están provistos de una caja de bornes en la que se encuentran los terminales que permiten enlazar eléctricamente los extremos de los devanados de cada fase con los conductores de la instalación eléctrica exterior. En un motor asíncrono trifásico la caja de bornes tiene tres o seis terminales, correspondientes a los extremos de las tres fases del estator. En este trabajo se configura una conexión en estrella y la caja de bornes tendría tres terminales.

Este trabajo tiene un objetivo de diseño electromagnético de las partes interiores y no se contempla el diseño de la caja de bornes

Los motores de rotor bobinado emplean un conjunto de escobillas-anillos rozantes para conectar el bobinado giratorio. Un **anillo rozante** es un aro conductor que recibe la presión mecánica de una **escobilla** permitiendo, mediante un contacto eléctrico deslizante, el flujo de la corriente eléctrica entre una parte rotativa y otra estacionaria. En los motores de inducción de rotor

bobinado cumplen la función principal de conectar eléctricamente el bobinado del rotor con el equipo eléctrico exterior.

1.1.6 Envolventes. Sistemas de refrigeración

La envolvente o carcasa, protege los componentes internos del motor de agentes externos como daño mecánico, penetración de agua, contaminantes, polvo y agentes químicos. También favorece la disipación térmica, y ejerce la función de sustentación y disposición del conjunto. Otra de sus principales funciones es limitar la exposición de las personas frente a riesgos mecánicos y eléctricos de operación del motor.

En la mayoría de los motores empleados en el sector industrial y comercial, el calor es disipado mediante diversos mecanismos: conducción a través de la envolvente, convección de aire natural o forzada, y radiación. En máquinas de gran potencia se utilizan métodos de refrigeración directa tales como, mezclas de aceites en especial en aplicaciones aeroespaciales, inmersión en un refrigerante en motores herméticos empleados en los compresores de aplicaciones de frío industrial, enfriamiento con hidrógeno, aceite o agua en circulación forzada a través de los conductos de enfriamiento en especial en turbogeneradores.

1.2 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO. REGÍMENES DE FUNCIONAMIENTO

El funcionamiento de un motor está basado en la aplicación de la Ley de inducción electromagnética de Faraday y la Fuerza de Laplace en un conductor.

En virtud del Teorema de Ferraris, al alimentar el devanado trifásico equilibrado del estator, formado por tres fases idénticas desfasadas entre sí 120° en el espacio, con un sistema equilibrado de corrientes perfectamente sinusoidales, se genera una onda de fuerza magnetomotriz (f.m.m.) que produce un campo magnético giratorio con una velocidad de giro conocida como velocidad de sincronismo, impuesta por la frecuencia de la red. En este trabajo la frecuencia es de 50 Hz y la velocidad de sincronismo 1500 rpm.

Cuando existe movimiento relativo entre el campo giratorio y el rotor, es decir, gira a una velocidad distinta a la del campo magnético del estator, las barras están sometidas a la acción de un flujo magnético variable y se inducen fuerzas electromotrices (f.e.m.) en ellas, proporcionales a la tasa de variación de este (Ley de inducción electromagnética de Faraday).

Las barras conductoras se encuentran cortocircuitadas, de tal forma que estas f.e.m.s producen la circulación de corrientes en el rotor que, al interactuar con el campo magnético del estator, originan fuerzas en las barras (Fuerza de Laplace). La resultante de estas fuerzas produce el par que provoca el giro del rotor.

Conforme a la Ley de Lenz, las f.e.m.s inducidas en el rotor son tales que dan lugar a un par que trata de reducir las variaciones de flujo magnético en el devanado del rotor, de manera que el par generado trata de hacer girar al rotor en la misma dirección y a la misma velocidad que el campo magnético rotatorio, sin igualarla nunca, pues no se inducirían corrientes en el sistema de barras del rotor, y en consecuencia no se produciría par en el eje de la máquina (rotor girando a la velocidad de sincronismo).

Se concluye que, en estas máquinas, la velocidad de giro del rotor ha de ser ligeramente distinta a la de sincronismo (de donde deriva su adjetivo de “asíncronas”). La denominación “máquina de inducción”, proviene del hecho de que las corrientes que circulan por el rotor aparecen por inducción electromagnética, no existe contacto eléctrico entre ambos órganos y no es necesario un sistema de excitación externo.

Del principio de operación de las máquinas de inducción o asíncronas, se obtiene que el funcionamiento de la máquina está gobernado por la diferencia entre la velocidad síncrona o velocidad de giro del campo magnético rotatorio y la velocidad de giro del rotor. Esta velocidad relativa es la velocidad de deslizamiento o deslizamiento, que está normalmente expresada en valor por unidad respecto a la velocidad de sincronismo.

1.3 ASPECTOS ENERGÉTICOS. EFICIENCIA EN MOTORES ELÉCTRICOS

El continuo aumento de la demanda energética mundial, el incremento de los costes de la energía eléctrica y las medidas medioambientales llevadas a cabo por diversos organismos mundiales, suscitan la necesidad de emplear motores que favorezcan el ahorro energético, motores más eficientes.

Los motores son la carga eléctrica más importante de los sistemas de potencia. La energía anual producida en España asciende a unos 239 TWh, la fracción de esa energía consumida por el sector industrial supone 42,5% (101,6 TWh), aproximadamente el 65% de esta fracción (67,7 TWh) es consumida por los accionamientos eléctricos entendiéndose por accionamientos eléctricos los motores eléctricos, motores eléctricos con reductor, y motores eléctricos alimentados mediante convertidor de frecuencia o variador de velocidad. Diversos estudios demuestran que el empleo de motores de alta eficiencia supone un potencial de ahorro de 181 billones de kWh (29% de la fracción consumida por este tipo de accionamientos eléctricos) lo que supone un 7% del consumo total de energía de Europa.

El rendimiento se define como el cociente entre la potencia útil o potencia mecánica motriz en el eje (resultante del par que es capaz de desarrollar el motor), y la potencia total o potencia eléctrica activa absorbida de la red que es la que produce la fuerza-electromotriz. Es decir, cuantifica la capacidad del motor de convertir la energía eléctrica en mecánica.

La transmisión de energía del circuito eléctrico al mecánico no es ideal, una fracción de la potencia absorbida no es aprovechada, si no que se transforma y disipa en forma de calor provocando un calentamiento e incremento de la temperatura en el motor. Por este motivo, la potencia útil siempre es algo inferior a la potencia absorbida.

Las pérdidas implican un gasto de energía que no es aprovechada encareciéndose el servicio, y por tanto repercute desfavorablemente en la economía de la explotación. De ahí la importancia de conocer la naturaleza y origen de las pérdidas que experimenta el motor en los distintos estados operativos del este, atendiendo a su naturaleza se pueden agrupar en:

- Pérdidas magnéticas o pérdidas del hierro: Se producen por las variaciones de flujo y pueden subdividirse en pérdidas por histéresis y pérdidas por corrientes parásitas.
- Pérdidas en los devanados de cobre: Ocasionadas por la circulación de corriente por conductores con resistencia eléctrica (pérdidas por efecto Joule).
- Pérdidas adicionales: Se originan en los devanados y núcleos del motor, los fenómenos que las producen consisten en la distribución no uniforme de la corriente en el conductor, presencia de campos armónicos, y a las pulsaciones de flujo a causa de las irregularidades en el entrehierro (ranurado, canales radiales de ventilación).
- Pérdidas mecánicas: Provocadas por el rozamiento en el aire y por la fricción de las partes móviles (eje motor con los cojinetes) y por el consumo de potencia del sistema de refrigeración (pérdidas por ventilación). Ambas son función de la velocidad de rotación del motor.

1.4 ASPECTOS GENERALES DE DISEÑO DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS

La aplicación práctica determina el tipo de motor y sus características constructivas. Las variables operativas pueden clasificarse en: condiciones del entorno, condiciones de la alimentación eléctrica y condiciones de la carga accionada y generales. A continuación, se muestran algunas variables de cada tipo.

1.4.1 Condiciones ambientales

Exigencia general de protección de persona y motor (envolvente), temperatura ambiental (método de refrigeración), altitud, humedad, polvo, contaminantes sólidos, agentes químicos, riesgo explosivo, actividad sísmica, elementos radiactivos, limitación de vibraciones, limitación de ruido y compatibilidad electromagnética.

1.4.2 Condiciones de la alimentación eléctrica

Tipo de fuente eléctrica (red eléctrica o convertidor electrónico), nivel de tensión, frecuencia, calidad de la onda (fluctuaciones de tensión y frecuencia, contenido armónico, desequilibrios, perturbaciones transitorias, etc.), y protección de corrientes elevadas.

1.4.3 Condiciones de la carga accionada y generales

Tipo de carga, clase de servicio, niveles de potencia y par, régimen de velocidad (constante, estable -simple/múltiple-, o variable), nivel de velocidad, exigencias de arranque, inercia del accionamiento, límites de sobrecarga y de embalamiento, contingencias mecánicas (fuerzas axiales, radiales, vibraciones e impactos), dimensiones y montaje, factor de potencia, y eficiencia energética.

Otros factores que influyen de forma importante en el diseño de la máquina y que en consecuencia hay que considerar, se citan a continuación.

1.4.4 Costes

Uno de los objetivos principales es la minimización de los costes. A la hora de determinar los costes se han de considerar diversos factores, como el precio de los materiales activos y el coste de fabricación asociado. El coste de fabricación depende a su vez del tamaño de la máquina, la disponibilidad de los materiales en el mercado, las tecnologías de fabricación, la mano de obra y los costes de la energía necesarios en la producción de la máquina.

Otro de los componentes involucrados son los costes incurridos durante la vida útil del motor. Los costes incurridos a lo largo de la vida útil del motor superan con creces los costes e inversión inicial del motor. Por este motivo la reducción de las pérdidas, a través de un diseño más eficiente o el uso de convertidores electrónicos que alimentan a el motor con una tensión y frecuencia variables, supone un potencial de ahorro considerable.

Para terminar de definir los costes globales se han de considerar los costes de mantenimiento, y los gastos incurridos en la comercialización y distribución de los productos (costes de venta)

1.4.5 Materiales empleados

Fundamentalmente, los materiales empleados en la fabricación de un motor de inducción consisten en las chapas magnéticas de acero que componen los núcleos, en los conductores de cobre y aluminio para los arrollamientos, así como en los materiales aislantes.

El coste de dichos materiales se encuentra en relación directa con sus prestaciones. El desarrollo de nuevos materiales magnéticos y dieléctricos afectan de forma sustancial el diseño de la máquina (su geometría), el funcionamiento de la máquina (rendimiento), y los costes. Por ejemplo, la elección de un material con menores pérdidas en el hierro, y un material aislante con una clase de aislamiento térmico mayor permite aumentar la potencia del motor sin necesidad de incrementar sus dimensiones.

Las propiedades de densidades de flujo $B(T)$ y pérdidas específicas (W/kg) en los materiales magnéticos, densidades de corriente en los conductores J (A/mm^2) , y la rigidez dieléctrica E (V/m) y conductividad térmica en los materiales dieléctricos, también son factores para tener en cuenta en el diseño del motor.

1.4.6 Normativa nacional e internacional

Aspectos tales como el espesor de las chapas, dimensiones de los conductores, materiales, índices de funcionamiento (rendimiento, factor de potencia, par de arranque, corriente en el arranque, par máximo), la temperatura de funcionamiento en función de la clase de aislamiento, dimensiones de las envolventes, altura del eje, métodos de refrigeración, clases de servicio, clases de protección, están especificados en la normativa nacional e internacional (NEMA, IEEE, IEC, EU, etc.) Limitan las alternativas de diseño, pero garantizan una solución ampliamente aceptada y económicamente viable.

El diseño de un motor eléctrico se ha de abordar desde cinco áreas: eléctrica, dieléctrica, magnética, térmica y mecánica. El presente trabajo se centra en el diseño eléctrico y magnético del motor.

1.4.7 Tipos de servicio

El tipo de servicio define el ciclo de carga al que está sometida la máquina, incluidos los periodos de arranque, frenado eléctrico, funcionamiento en vacío y reposo, además de su duración y su secuencia en el tiempo.

A continuación, en base de la clasificación establecida en la norma IEC 60034-1, se dan algunas indicaciones relativas a los tipos de servicio considerados habitualmente como referencia para indicar las características nominales del motor.

- Tipo de servicio continuo S1: se define como el funcionamiento a carga constante de duración suficiente que permite a la máquina alcanzar el equilibrio térmico

- Tipo de servicio de duración limitada S2: se define como el funcionamiento a carga constante por un periodo de tiempo determinado, inferior al necesario para alcanzar el equilibrio térmico, seguido de un tiempo de reposo de duración suficiente para restablecer el equilibrio entre la temperatura de la máquina y la del fluido refrigerante.
- Tipo de servicio periódico S3: se define como la secuencia de ciclos de funcionamiento idénticos, cada uno con un tiempo de funcionamiento a carga constante y un tiempo de reposo.
- Tipo de servicio periódico S4: se define como la secuencia de ciclos de funcionamiento idénticos, cada uno con tiempos de arranque no despreciable, de funcionamiento a carga constante y de reposo.
- Tipo de servicio periódico S5: se define como la secuencia de ciclos de funcionamiento idénticos, cada uno con un tiempo de arranque, un tiempo de funcionamiento a carga constante, un tiempo de frenado eléctrico rápido y un tiempo de reposo.
- Tipo de servicio periódico S6: se define como la secuencia de ciclos de funcionamiento idénticos, cada uno con un tiempo de funcionamiento a carga constante y un tiempo de funcionamiento en vacío. Carece de tiempos de reposo.
- Tipo de servicio periódico S7: se define como la secuencia de ciclos de funcionamiento idénticos, cada uno con un tiempo de arranque, un tiempo de funcionamiento a carga constante y un tiempo de frenado eléctrico.
- Tipo de servicio periódico S8: se define como la secuencia de ciclos de funcionamiento idénticos, cada uno con un tiempo de funcionamiento a carga constante con velocidad de rotación preestablecida, seguido de uno o más tiempos de funcionamiento con otras cargas constantes correspondientes a distintas velocidades de rotación.

- Tipo de servicio no periódico S9: se define como el funcionamiento en el que generalmente la carga y la velocidad varían de forma no periódica en el campo de funcionamiento admisible. Este servicio comprende sobrecargas frecuentemente aplicadas que pueden ser considerablemente superiores a los valores de plena carga.
- Tipo de servicio para cargas distintas constantes S10: se define como el funcionamiento que consiste en un número específico de valores distintos de carga manteniendo cada valor durante un tiempo suficiente que permita a la máquina alcanzar el equilibrio térmico. La carga mínima durante un ciclo de servicio puede ser nula y relativa a una condición de vacío o de estado de reposo.

1.4.8 Tamaño de carcasa

En los motores trifásicos de inducción de baja tensión (hasta 690V y 50Hz) de uso industrial y propósito general la norma IEC establece un código identificador del tamaño de la carcasa, de las dimensiones principales, también dispone de una tabla asociativa de tamaños de carcasas, potencias y número de polos.

Las carcasas de las máquinas ancladas por patas se identifican con un número acompañado de una letra (S, M o L). El número es el valor en milímetros de la altura de eje, y la letra es una indicación de la longitud axial de la máquina (corta, media o larga). Las carcasas de las máquinas montadas por bridas se identifican con la letra F (flange -brida en inglés-) seguida de un número que es el valor (milímetros) del diámetro de la circunferencia de agujeros lisos o roscados de anclaje.

1.4.9 Grados de protección: Código IP e IK

Existen dos clasificaciones normativas de las envolventes. Estas clasificaciones están definidas por la organización “International Electrotechnical Commission” (IEC) y por la asociación norteamericana National Electrical Manufacturers Association (NEMA).

El estándar IEC 60034-5 define las carcasas con un código numérico que consta de dos cifras precedidas por las letras IP (International Protection). La primera cifra hace referencia a la protección del motor frente al acercamiento o el contacto con partes bajo tensión, frente al contacto con partes en movimiento dentro de la envolvente y frente a la penetración de objetos sólidos externos. La segunda cifra indica la protección frente a la penetración del agua en sus diferentes formas de acción.

El código IK (UNE EN 50102) indica la energía de impacto que la envolvente es capaz de resistir, la designación consiste en las letras IK junto un número de dos cifras. En ambas designaciones, cuanto más altas son las cifras, mayor es la protección.

1.5 TÉCNICAS NUMÉRICAS–CAD DE DISEÑO DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS

El uso de herramientas de software que emplean métodos numéricos para el cálculo de campos magnéticos y eléctricos se ha extendido en el ámbito del diseño de máquinas eléctricas por la mejora en la precisión durante el proceso de diseño y análisis de las mismas respecto a los métodos analíticos clásicos. Permite una comprobación sencilla de los cálculos de diseño analíticos, facilita el análisis de problemas más complejos que involucran geometrías complicadas, medios no-lineales etc., agiliza los procesos de optimización, y se reduce la creación de prototipos físicos y ensayos de estos con la consecuente disminución en el tiempo y en los costes invertidos.

Estos métodos consisten en estimar de un modo más preciso la distribución de los campos electromagnéticos en la estructura de la máquina mediante la resolución de las Ecuaciones de Maxwell que rigen su comportamiento. Los principales métodos numéricos empleados en el análisis de los campos, mediante la resolución de las ecuaciones diferenciales parciales son: el método de las diferencias finitas (Finite Difference Method, FMD), el método de los elementos finitos (Finite Element Method, FEM), y el método de los elementos de frontera (Boundary Difference Method, BEM).

El MEF o FEM (por sus siglas en inglés) es el más utilizado, es un método de aproximación de problemas continuos que consiste en la transformación de un cuerpo de naturaleza continua en un modelo discreto aproximado (discretización del modelo). El dominio continuo se descompone en un número finito de regiones con formas simples (elementos), su comportamiento se define mediante un número finito de parámetros asociados a ciertos puntos característicos denominados nodos, que son el punto de unión de cada elemento con sus adyacentes. El comportamiento de cada elemento queda definido a partir del comportamiento de cada nodo mediante las funciones de interpolación o de forma adecuadas. Los valores de la función se aproximan a partir del conocimiento de un número determinado y finito de puntos, la solución

total resulta de la unión de las soluciones aproximadas de la ecuación diferencial en derivadas parciales de cada uno de los elementos.

Los datos que se han de introducir en el MEF son: la geometría de la máquina, las propiedades de los materiales, la excitación aplicada al devanado (fuente de corriente o de tensión), y la carga que debe accionar la máquina.

Los datos resultantes del análisis por elementos finitos son el funcionamiento general de la máquina, como la corriente en una fase del estator, el par en el eje, la velocidad del rotor para una carga mecánica concreta, etc.

En un modelo 2D por MEF, los efectos de borde que comprenden los extremos de los núcleos, cabezas de bobina, anillos de cortocircuito, etc.; se aproximan mediante un circuito equivalente compuesto de resistencias y reactancias. En los modelos 3D tales efectos se incluyen sin necesidad de utilizar un circuito adicional. El empleo de un modelo 2D en lugar de uno 3D, supone un menor tiempo de simulación y, en definitiva, de cálculo. En este trabajo se aplica un modelo 2D.

El análisis mediante MEF se compone de las siguientes etapas de modelado y análisis:

1.5.1 Pre-procesamiento

Etapas de definición y parametrización del modelo

En primer lugar, se define la geometría de los núcleos y arrollamientos del motor que se ha de conocer previamente, así como los materiales, fuente y condiciones de contorno que caracterizan el modelo.

Posteriormente, se asignan a las distintas dimensiones de la estructura unos parámetros, de este modo, los cambios en la geometría (forma y dimensiones), y la influencia que estos ejercen en el comportamiento de la máquina se pueden visualizar fácilmente.

Selección de los materiales de las distintas partes del motor

Los materiales electrotécnicos necesarios para definir el modelo son acero, aluminio, y cobre. En general, los programas de simulación cuentan con una base de datos de materiales, y permiten la incorporación de nuevos materiales. Los datos necesarios para definir el material varían en función de la naturaleza de este, los materiales eléctricos se caracterizan por su resistividad, los materiales magnéticos (las láminas de acero en el caso del motor de inducción) por: la curva de magnetización, punto de saturación, pérdidas máximas, conductividad, densidad, factor de empilado, etc.

Consideración de los efectos de borde mediante circuito externo

El medio físico que rodea al modelo se considera asignando sus simetrías de funcionamiento, el aire envolvente del estator, la conexión eléctrica con el exterior con un circuito eléctrico conectado a una fuente de tensión ideal (en este trabajo), y la velocidad de giro como valor impuesto.

Definición de los dominios del campo electromagnético

- Núcleo del estator: región magnética no conductora. Chapa de acero de grano no orientado.
- Núcleo del rotor: región magnética no conductora. Chapa de acero de grano no orientado.
- Entrehierro: región no conductora, no magnética. Aire (vacío).
- Bobinado del estator: región no magnética conductora, compuesta de conductores ubicados en las ranuras del estator; Cu, valor de número de espiras y dimensiones del conductor
- Barras de la Jaula de Ardilla: región no magnética conductora, con conductores sólidos ubicados en las ranuras del rotor, Cobre

Mallado de los dominios

Es la definición de la discretización geométrica de todo el motor. Se aplican tamaños diferentes en función de la relevancia de funcionamiento de cada parte. Por ejemplo, en el entrehierro y las barras del rotor se aplican los menores tamaños y en el centro de rotación o las partes externas del estator los tamaños son los mayores.

1.5.2 Procesamiento

Construcción y resolución de las ecuaciones del modelo matemático definido en el módulo de pre-proceso. Los datos que se han de facilitar son: error de redondeo, máximas iteraciones, tolerancia de la solución.

El programa realiza las siguientes tareas: adaptación de la malla, aplicación del método numérico, y resolución del problema mediante el “solver” de ecuaciones.

1.5.3 Post proceso

Análisis de los resultados. Solución numérica: Diagramas, mapas de colores. Cálculo de magnitudes, parámetros concentrados, y optimización.

1.5.4 Recursos disponibles

La incorporación de herramientas CAE (Ingeniería asistida por ordenador) se ha extendido en el ámbito del diseño de maquinaria eléctrica debido a las numerosas ventajas que conlleva y que fueron enumeradas anteriormente. Consecuentemente, los programas dedicados al dimensionado y optimización de dispositivos electromagnéticos han experimentado un fuerte desarrollo en los últimos años, cada vez se incorporan más prestaciones y se emplean “solvers” más precisos y potentes que reducen ostensiblemente el tiempo de simulación. A continuación, se describen algunos de los softwares disponibles:

SPEED

SPEED de la compañía CD-adapco, es un programa especializado en el diseño preliminar de motores eléctricos. Ofrece numerosas plantillas para ayudar al usuario a definir la geometría, los devanados, la alimentación y para obtener sus

características de salida como par, velocidad, potencia, corrientes y tensiones de fase.

Se trata de una herramienta sencilla, intuitiva, rápida y eficiente empleada para dimensionar y obtener diseños preliminares de nuevos prototipos, y caracterizar productos nuevos y existentes, analizar sus prestaciones y estudiar la influencia de la modificación de parámetros en el diseño.

Motor-CAD

Motor-CAD desarrollado por Motor Design Ltd. es una herramienta de análisis térmico de motores y generadores eléctricos. Sus algoritmos basados en modelos de parámetros concentrados permiten la obtención de resultados de forma instantánea, y su representación permite entender e interpretar fácilmente los resultados obtenidos permitiendo al diseñador la toma eficiente de decisiones.

FLUX

FLUX es un potente software de Elementos Finitos utilizado para la simulación de fenómenos electromagnéticos y térmicos, tanto en 2D como en 3D. FLUX puede abordar el diseño y el análisis de cualquier dispositivo electromagnético.

Cuenta con numerosas funcionalidades, tales como análisis multiparamétrico, acoplamiento avanzado con circuito eléctrico y acoplamiento cinemático. Es adecuado para los análisis estático, armónico y transitorio.

Amperes y Faraday

La compañía INTEGRATED Engineering Software, ofrece numerosos softwares de simulación 2D y 3D dedicados al análisis electromagnético, térmico y de trayectoria de partículas, integra en un mismo paquete tres métodos de resolución: BEM (Boundary Element Method), FEM (Finite Element Method) y FDTD (Finite Difference Time Domain Method), permitiendo escoger aquel que mejor se adapte a la aplicación concreta que se esté analizando. Cuenta con

numerosas herramientas de optimización como, por ejemplo, análisis paramétricos. Los softwares ofertados por la compañía de aplicación en el diseño de máquinas eléctricas son:

- **Amperes** es un software simulación 3D que provee funciones de visualización para el análisis de sistemas magnéticos, creación automatizada de modelos mediante API (Application Programming Interface), utilidades paramétricas y métodos de resolución BEM y FEM autoadaptables que permiten una optimización rápida de los diseños. Una de las ventajas de contar con métodos de resolución BEM y FEM es la posibilidad de comprobar la validez de las soluciones utilizando dos métodos de análisis completamente distintos.
- **Faraday** es un programa de características similares a Amperes, más adecuado para el diseño de motores asíncronos y transformadores.

2. PLANTEAMIENTO Y OBJETIVOS

Este Trabajo Fin de Grado aborda el conocimiento de la influencia de las dimensiones geométricas principales del motor en sus características operativas bajo el siguiente planteamiento.

En primer lugar, se obtiene un diseño de referencia con dimensiones geométricas radiales y axiales aproximadas, una combinación del número de ranuras de estator y rotor recomendada por expertos, un perfil geométrico de la jaula y la ranura del estator recomendado por la literatura técnica, y una configuración eléctrica de los devanados de las fases. Las dimensiones geométricas principales son los diámetros exterior e interior, la dimensión transversal (axial), y el diámetro y paso de entrehierro. También se escogerán los materiales atendiendo a los datos disponibles y las recomendaciones generales.

A continuación, se calcularán las prestaciones eléctricas, mecánicas y energéticas del modelo de referencia para diferentes velocidades de operación en un régimen permanente operativo. Estas prestaciones son las corrientes de las fases y su factor de potencia, el par electromagnético y las pérdidas de potencia eléctricas y magnéticas en conductores y núcleos.

En segundo lugar, se desarrollarán estudios paramétricos de variación de dimensiones geométricas principales y de cálculo de prestaciones operativas de cada uno de ellos.

Por último, se compararán los resultados individuales y se elegirá un diseño definitivo que se presentará con todas sus prestaciones. Se completa el trabajo con las conclusiones alcanzadas.

El objetivo central de este trabajo es profundizar en el conocimiento del diseño de motores eléctricos industriales comunes de uso ordinario que están presentes en todas las industrias, para comprender la relación general que existe entre el tamaño de la máquina y la prestación operativa que desarrolla.

Los objetivos particulares son el empleo de herramientas profesionales de diseño de motores (JMAG-Express) y de simulación de electromecánica (JMAG-Designer) y la obtención del mejor modelo geométrico para los requisitos pre-establecidos.

3. MEMORIA

3.1 ENTORNO DE COMPUTACIÓN

JMAG provee varias herramientas de simulación dedicadas al diseño y desarrollo de dispositivos electromagnéticos.

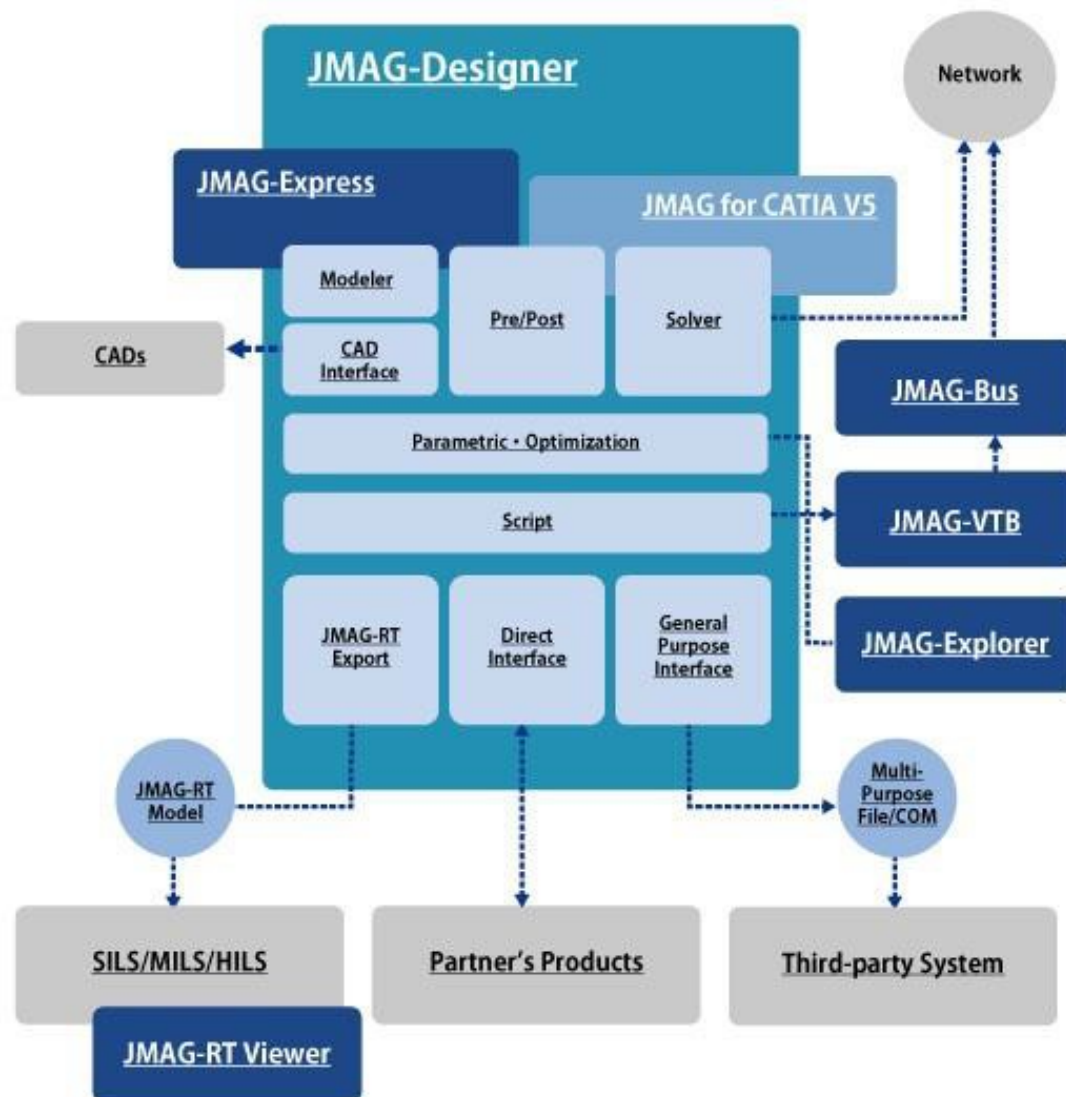


Ilustración 1. Esquema JMAG

3.1.1 JMAG Designer

Es la parte principal del software de simulación y permite el diseño electromagnético, térmico y el análisis estructural.

3.1.2 JMAG-VTB y JMAG-Bus

JMAG-VTB (Virtual Test Bench) es una herramienta de análisis que permite evaluar distintos escenarios previamente definidos. Al seleccionar un escenario de análisis y establecer la geometría del modelo para el análisis especificado, se puede obtener los resultados de la evaluación sin configurar manualmente cada condición de análisis. JMAG-Bus permite el acceso a dicho escenario desde la web.

3.1.3 JMAG RT-Viewer

El visualizador de JMAG-RT es una aplicación para aumentar la usabilidad de los modelos de motor creados con JMAG-RT. Los modelos de motores creados con JMAG-RT pueden utilizarse en simuladores de control como Simulink para reproducir fenómenos que incluyen características no lineales y variaciones de par en motores.

Se pueden crear curvas de par-velocidad y mapas de eficiencia especificando el modo de control del modelo JMAG-RT en el visor JMAG-RT.

3.1.4 JMAG for CATIA

Enlaza el entorno de dibujo CATIA con el de simulación JMAG

3.1.5 JMAG-Express

JMAG-Express es una herramienta para el diseño y análisis de modelos 2D de motores en la fase de diseño preliminar del motor. Incluye dos modos:

- **Quick Mode:** calcula las características básicas del motor de forma rápida y sencilla, pero con una precisión menor a la alcanzada con JMAG-Express Power Mode o JMAG Designer, sin más que indicar al programa los parámetros geométricos, materiales, tipo de devanado y condiciones de accionamiento del modelo.

- **Power Mode:** utiliza el método de elementos finitos para evaluar otros factores adicionales a JMAG-Express Quick Mode como las pérdidas por corrientes parásitas en los núcleos y las pérdidas de hierro por saturación magnética local o corrientes armónicas. También permite realizar estudios de diseño más detallados empleando modelos y resultados de JMAG-Designer.

El flujo de diseño del motor con JMAG-Express es el siguiente, en la fase de diseño conceptual, se utiliza el modo rápido Quick Mode para determinar el diseño aproximado del motor, luego se recurre a Power Mode para la etapa de diseño básico y JMAG-Designer para completar la etapa de diseño detallado.

También existe una herramienta adicional denominada JMAG-Express Public cuenta con el mismo tipo de prestaciones que JMAG-Express Quick Mode y sin coste económico con bastantes limitaciones de diseño.

3.2 REQUISITOS GENERALES

El objetivo físico de este trabajo es un motor de inducción trifásico de cuatro polos. Se intentará crear una representación de la estructura interna del motor, poniendo especial atención en las prestaciones mecánicas y electromagnéticas (Par, Rendimiento, Corriente, Factor de potencia). No es objetivo del trabajo la atención a las prestaciones de temperatura, ruido y vibraciones.

3.2.1 Descripción general del motor

Este trabajo centra su atención en un motor eléctrico industrial convencional diseñado para propósito general y aplicación en un ambiente ordinario, con altitud geodésica inferior a 1000 metros y temperaturas ambientales máximas de 40 grados.

El trabajo no atenderá a aspectos de diseño térmico o de exigencias específicas como sobretensiones, vibraciones o ruidos, u otras propias de un diseño de detalle avanzado.

Estará conectado a la red de alimentación de forma directa donde se considera una fuente de tensión ideal de voltaje y frecuencia invariables. Las características básicas del motor a diseñar están recogidas en la siguiente tabla:

Potencia	10 kW
Número de fases	3
Polos	4
Frecuencia	50 Hz
Tensión asignada de línea	718 V
Velocidad de rotación asignada	1475 rpm
Par asignado	60 Nm

Tabla 1. Características básicas del motor

3.2.2 Requerimientos y parámetros básicos

El software que se va a utilizar en la primera fase para el diseño de referencia del motor es JMAG-Express. Este programa incluido en el paquete profesional de JMAG nos permite obtener un modelo inicial de máquina eléctrica, a partir de unos datos de entrada básicos que condicionan su estructura.

El primer paso dentro del software es definir el tipo de ranuras en el estator y el tipo de barras en el rotor:

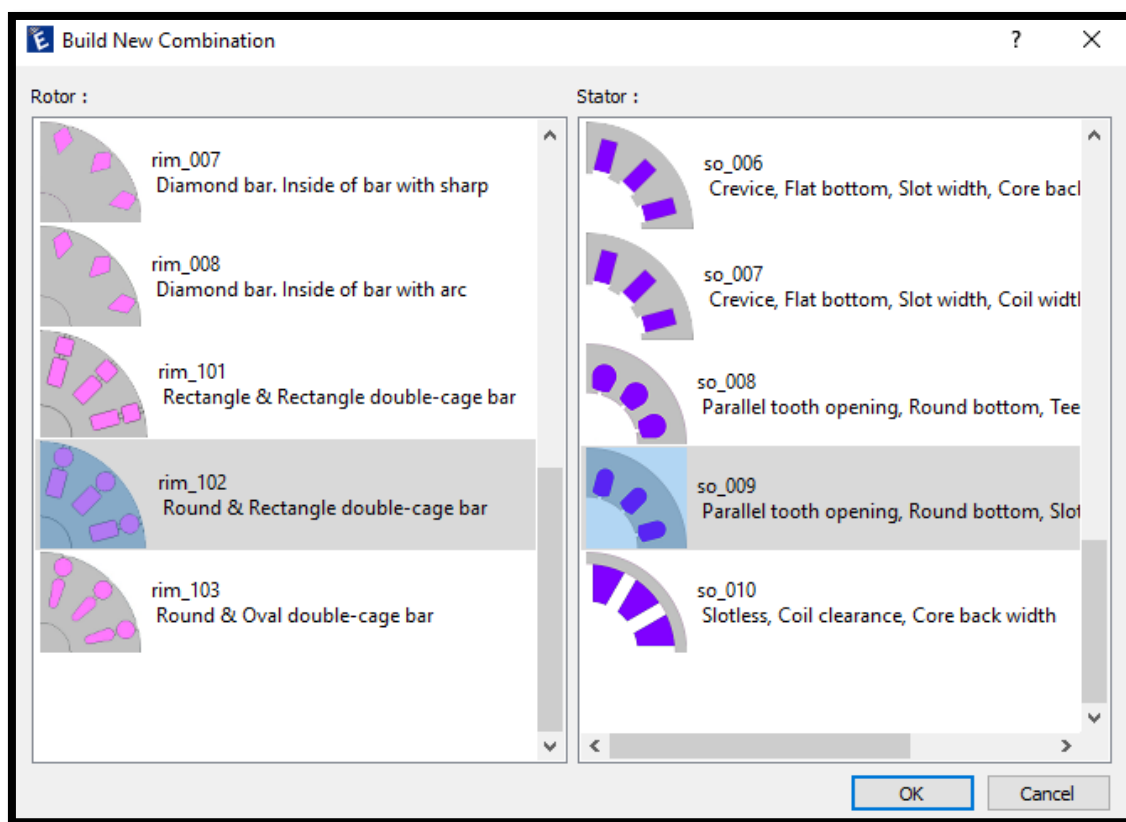


Ilustración 2. Formas de ranuras del estator y barras del rotor

Se utilizará una jaula de doble barra para favorecer el par de arranque, y ranuras semi-cerradas redondeadas en el estator para beneficiar el factor de llenado de estas, ya que los conductores son de sección circular y de esta forma se adaptan mejor a las paredes.

Una vez escogida la forma de las ranuras y las barras, se establecen una serie de objetivos guía en la ventana de requerimientos. Los objetivos principales son:

- Potencia asignada (*Rated Power, kW*)
- Velocidad de rotación asignada (*Rated Revolution Speed, rpm*)

Mode: Quick Mode Evaluation Method: Drive Characteristic

Requirement Dimensions Materials Winding Drive

Targeted Value

☒ Rated Power, kW 10

☐ Maximum Torque, Nm

☒ Rated Revolution Speed, rpm 1475

☐ Maximum Revolution Speed, rpm

Ilustración 3. Requerimientos. Valores objetivo

Los parámetros básicos de nuestra máquina son: Número de polos, Número de ranuras, Número de barras, Tensión de alimentación, Diámetro exterior del estator y Longitud del motor. Este último parámetro se establece inicialmente, a pesar de que en el trabajo se tratará como un parámetro a variar, para observar los cambios en el “output” del motor.

El material elegido para la jaula de ardilla es el aluminio, que tiene un coste menor que el cobre.

Sizing Parameter

☒ Number of Poles

☒ Number of Slots

☒ Number of Bars

☒ Power Supply Voltage(RMS), V

☐ Maximum Current(RMS), A

☒ Maximum Outer Diameter of Motor, mm

☒ Maximum Motor Height, mm

☒ Cage

Creates the recommended geometry.
The dimensions, materials, winding, and drive
condition are updated by the sizing operation.

Apply

Ilustración 4. Requerimientos. Parámetros

Estos parámetros son los que van a guiar al programa a establecer un diseño inicial que aproxime las especificaciones indicadas en el apartado anterior. Se obtendrá el denominado diseño de referencia, sobre el cual se estudiarán las variaciones de geometría.

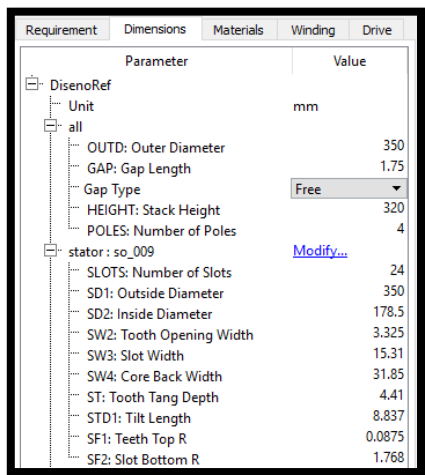
3.3 DISEÑO DE REFERENCIA

El primer modelo estudiado en el trabajo será el llamado diseño de referencia, obtenido introduciendo unos determinados objetivos en el programa JMAG-Express.

El programa utiliza métodos internos de evaluación de funcionamiento de la máquina diseñada y, a partir de unas características básicas, crea un modelo simple que cumpla nuestros datos de entrada.

3.3.1 Datos geométricos, bobinado y fuente

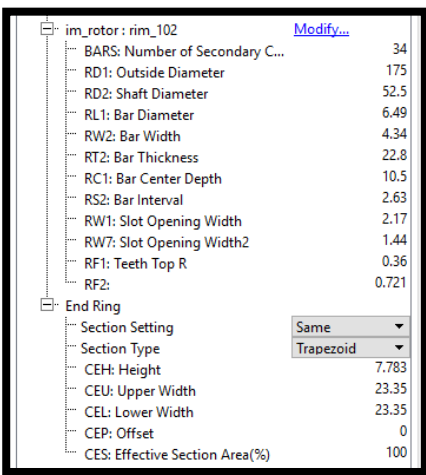
Se dispone de un motor de inducción, trifásico, con cuatro polos magnéticos. La geometría interna del motor se ve resumida en esta ventana:



The screenshot shows the 'Dimensions' tab in the JMAG-Express software. It displays a tree structure on the left with 'DisenoRef' expanded, showing 'all' and 'stator : so_009'. The main table lists parameters and their values.

Parameter	Value
Unit	mm
all	
OUTD: Outer Diameter	350
GAP: Gap Length	1.75
Gap Type	Free
HEIGHT: Stack Height	320
POLES: Number of Poles	4
stator : so_009	
SLOTS: Number of Slots	24
SD1: Outside Diameter	350
SD2: Inside Diameter	178.5
SW2: Tooth Opening Width	3.325
SW3: Slot Width	15.31
SW4: Core Back Width	31.85
ST: Tooth Tang Depth	4.41
STD1: Tilt Length	8.837
SF1: Teeth Top R	0.0875
SF2: Slot Bottom R	1.768

Ilustración 5. Dimensiones. Generales y Estator



The screenshot shows the 'Dimensions' tab in the JMAG-Express software, displaying parameters for the rotor and stator head. The tree structure on the left shows 'im_rotor : rim_102' expanded, showing 'BARS: Number of Secondary C...' and 'End Ring'. The main table lists parameters and their values.

Parameter	Value
im_rotor : rim_102	
BARS: Number of Secondary C...	34
RD1: Outside Diameter	175
RD2: Shaft Diameter	52.5
RL1: Bar Diameter	6.49
RW2: Bar Width	4.34
RT2: Bar Thickness	22.8
RC1: Bar Center Depth	10.5
RS2: Bar Interval	2.63
RW1: Slot Opening Width	2.17
RW7: Slot Opening Width2	1.44
RF1: Teeth Top R	0.36
RF2:	0.721
End Ring	
Section Setting	Same
Section Type	Trapezoid
CEH: Height	7.783
CEU: Upper Width	23.35
CEL: Lower Width	23.35
CEP: Offset	0
CES: Effective Section Area(%)	100

Ilustración 6. Dimensiones. Rotor y Cabezas de bobina

Las dimensiones han sido establecidas por el propio programa, teniendo en cuenta los parámetros que se han impuesto en la pestaña de “Requerimientos”. El software habilita la posibilidad de alterar todas las medidas del esquema fundamental de la máquina en la misma ventana mostrada en la imagen. La ventaja que el programa nos da es la posibilidad de ver los cambios que hagamos en estas medidas en un esquema básico mostrado al lado del menú.

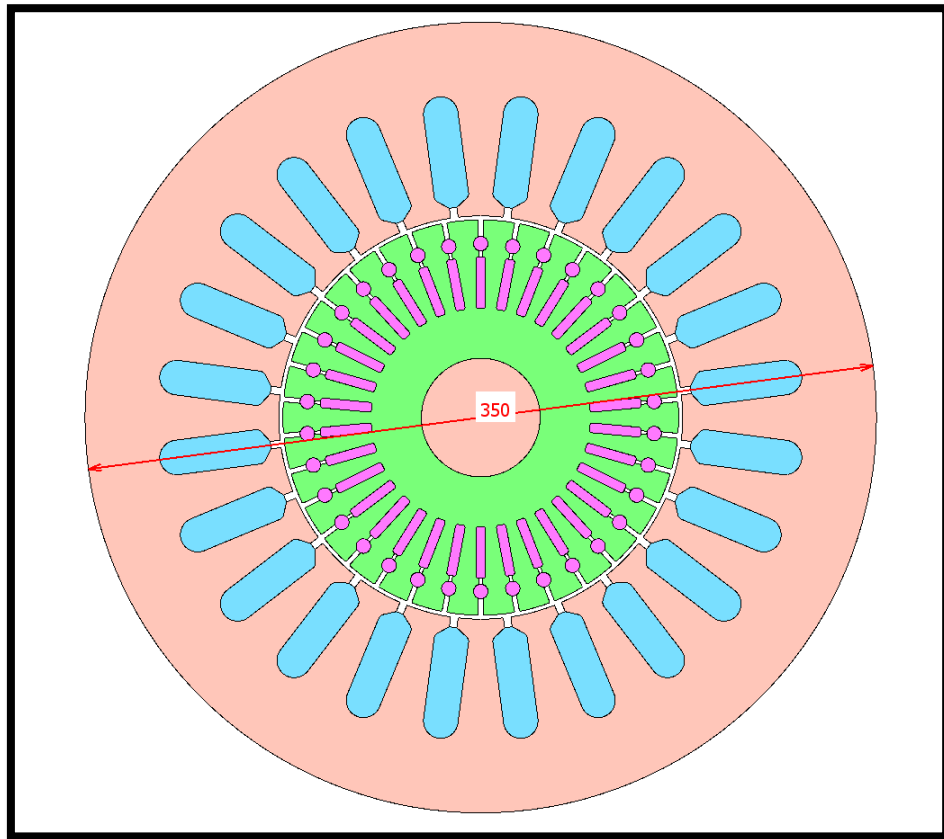


Ilustración 7. Esquema de la sección del motor

Como se puede apreciar en esa imagen, la visualización de cada parámetro geométrico es muy intuitiva y simple. El programa señala con una cota en color rojo la opción sobre la que tengas el ratón en el menú de dimensiones (en la imagen, el diámetro exterior del estator).

En la parte del bobinado y de las barras se establecerá una configuración estator/rotor 24/34, ranuras/barras (como se ha indicado en los parámetros de entrada).

Las bobinas del estator estarán dispuestas en estrella, con los dos pares de polos en serie en cada fase. La configuración se puede observar en la siguiente imagen proporcionada por JMAG Express.

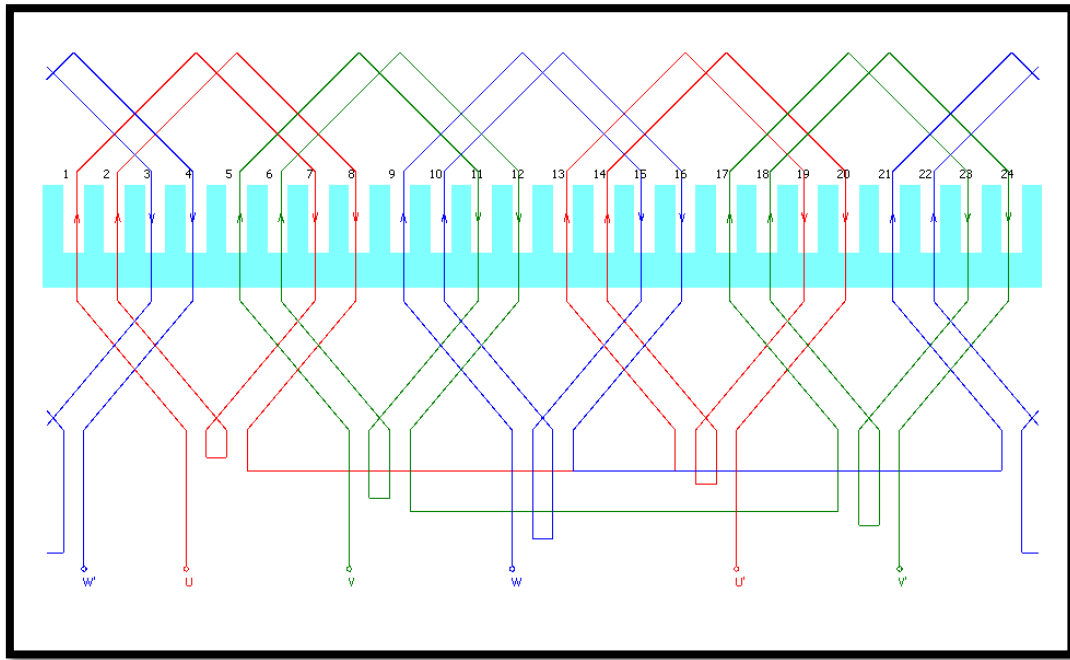


Ilustración 8. Esquema del devanado del estator

Los cables de la misma fase (igual color) se conectan en serie; no hay ninguna rama en paralelo en la misma.

Para el bobinado, se ha escogido por defecto definirlo según la resistencia en cada fase. Las medidas predeterminadas de hilo son:

- Número de vueltas: 40
- Diámetro del conductor: 0.5 mm
- Factor de Llenado: 71%
- Resistencia de fase: 4 Ω

Requirement Dimensions Materials Winding Drive

Connect Method: Star

Parallel No.: 1 Series No.: 4

Coil Property

Input Item: Phase Resistance

Number of Turns: 40

Setting Type: Round Wire Dimension

Wire Diameter: 0.5 mm

Film Thickness: 0 mm

Number of Strands: 1

Insulation Thickness: 0 mm

Slot-Fill Factor: 71 %

Maximum of Slot-Fill Factor: 75 %

Correction Factor: 1

Phase Resistance: 4 Ω

Layers: 1

Winding

Winding Scheme: Automatic

Coil Pitch: 6

Edit Phase: U-phase

Ilustración 9. Configuración del devanado del estator

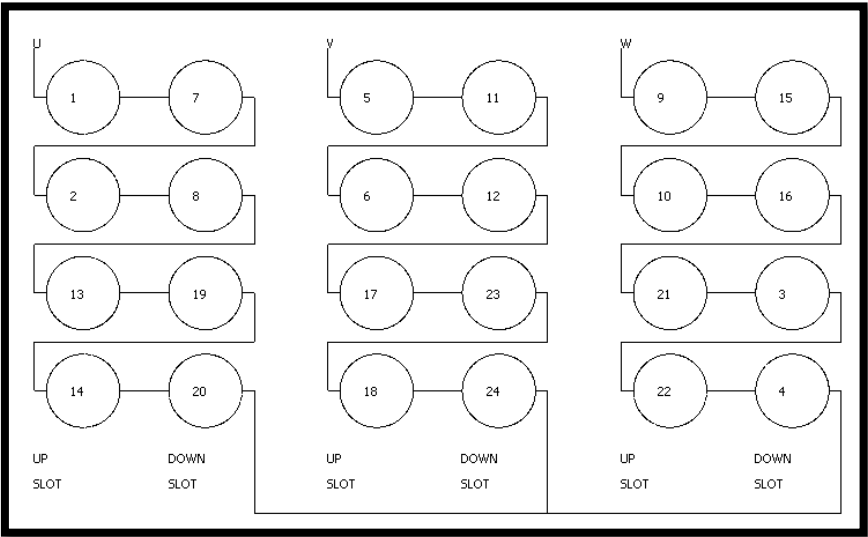


Ilustración 10. Esquema de colocación de las fases

La disposición de los conductores es un factor que permanecerá en todo el trabajo para todas las variantes de modelos. Cabría la posibilidad de establecer ramas en paralelo en las fases para poder colocar mayor número de conductores en cada ranura, si el factor de llenado es bajo, o la sección del conductor quedase demasiado elevada.

Siguiendo las estipulaciones marcadas, la fuente es trifásica ideal equilibrada y mantiene invariable la tensión de alimentación con estos valores de introducción al programa:

- Fuente de tensión trifásica
- Tensión de fase (valor eficaz): 415 V
- Tensión de fase (valor máximo): 587 V
- Frecuencia: 50 Hz

3.3.2 Datos materiales

En este diseño de referencia se utilizará la biblioteca de materiales aportados por el software. Se eligen para las diferentes partes los siguientes:

- Núcleo del Estator: Chapas de Acero (50A1000)
- Bobinas del Estator: Cobre
- Núcleo del Rotor: Chapas de Acero (50A1000)
- Jaula de ardilla del Rotor: Aluminio

Las características físicas de estos materiales son:

Estator y Rotor

El programa nos proporciona la curva de magnetización del Acero 50A1000:

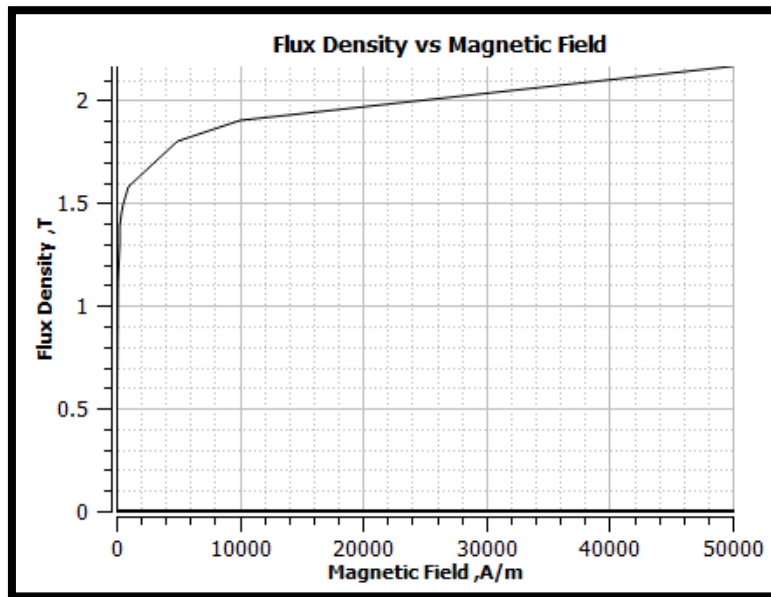


Ilustración 11. Curva de magnetización del Acero

Tiene una densidad de 7850 kg/m^3 . El fabricante proporciona una gráfica de pérdidas a diferentes frecuencias, según la inducción:

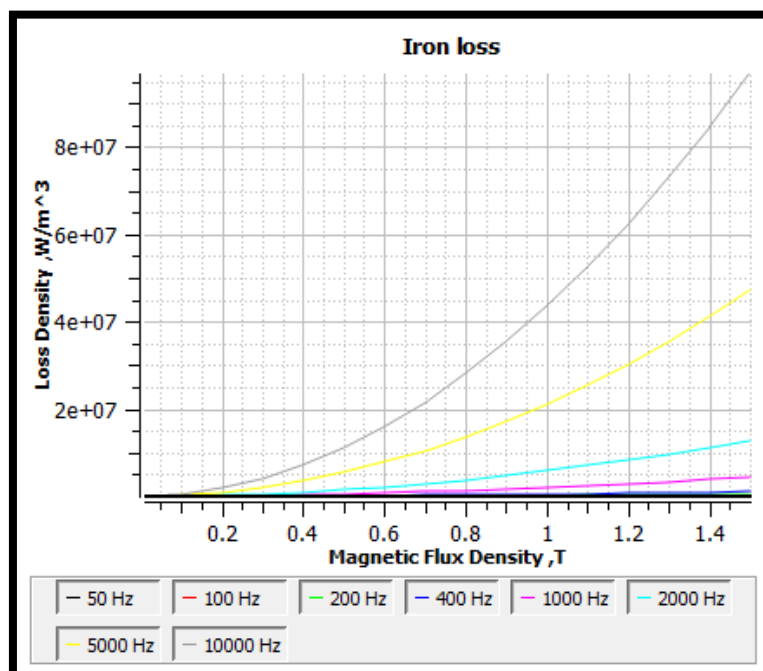


Ilustración 12. Pérdidas en el Acero

Bobinas

El cobre que constituye los conductores de las bobinas tiene:

- Resistividad: $1.673 \cdot 10^{-8} \text{ ohm} \cdot \text{m}$
- Densidad: 8960 kg/m^3
- Calor específico: $380 \text{ J/(kg} \cdot ^\circ\text{C)}$

Barras del rotor

Se utiliza un aluminio de:

- Conductividad eléctrica: $4 \cdot 10^7 \text{ S/m}$
- Densidad: 2699 kg/m^3
- Calor específico: $1007 \text{ J/(kg} \cdot ^\circ\text{C)}$

3.4 SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DEL MODELO DE REFERENCIA

Con JMAG Designer se analizan las características de salida de la máquina con el diseño de referencia como modelo. A partir de este modelo descrito anteriormente, se realiza un análisis magnético transitorio para evaluar todas las magnitudes de interés: Corrientes eléctricas, Potencia y factor de potencia, Pérdidas, Par electromagnético. Se aplica un cálculo de régimen transitorio y se recupera la parte estacionaria. Podemos asegurar que el régimen se alcanza a los 1.2 segundos de simulación. Debido a esto, se utiliza el margen 1,2 a 1,3 segundos para representar el régimen estacionario.

3.4.1 Ajustes de simulación

La vista general del programa JMAG Designer es la siguiente:

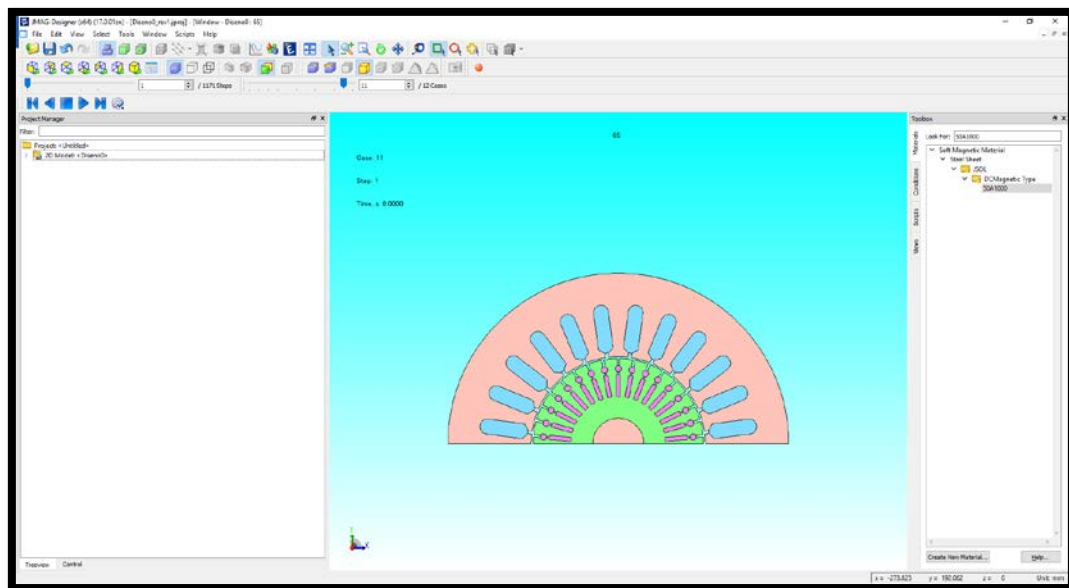


Ilustración 13. Vista general de JMAG Designer

Como se puede observar en la imagen, para ahorrar tiempo de computación se estudiará solo la mitad del modelo, ya que en la máquina se establece una simetría electromagnética de funcionamiento que lo permite.

En esta interfaz se dispone de una vista en árbol de la serie de elementos y estudios que tiene el proyecto ejecutado. Esto permite tener una visión intuitiva de todos los ajustes que podemos variar, sin necesidad de tener que navegar entre pestañas diferentes.

El objetivo ahora es analizar el funcionamiento este modelo de referencia. Para ello se definen:

Partes

Las partes de la máquina: Estator, Rotor, Bobinas, Barras, Eje, Aire

Materiales

Los materiales de cada parte: Acero, Cobre, Aluminio, Aire

Condiciones

Las condiciones del modelo. Hay diferentes tipos de condiciones:

- “*FEM Coil*”, condición electromagnética que se asigna a cada una de las bobinas del estator. Hay que establecer una condición para cada fase y fijar los sentidos positivos de la corriente. Esta condición impone que la densidad de corriente es uniforme en toda el área recta del conductor.
- “*Motion: Rotation*”, condición que asigna rotación a las partes giratorias. La velocidad será constante en cada estudio.
- “*Torque: Nodal Force*”, condición empleada para calcular el par que ejerce el rotor.
- “*Iron Loss Calculation*”, condición necesaria para indicar las partes donde el programa debe calcular las pérdidas de naturaleza magnética (histéresis y corrientes parásitas en ferromagnéticos).

- “*Symmetry Boundary*”, condición que establece a lo largo de las caras donde haya una simetría en el campo magnético producido.
- “*Rotation Periodic Boundary*”, se establece en la cara que pertenece a un modelo con periodicidad en la dirección de rotación.
- “*FEM Conductor*”, condición electromagnética que se asigna a cada una de las barras del rotor agrupadas en un conjunto llamado “*Cage*” o Jaula. Esta condición contempla las pérdidas joule por corrientes parásitas en los conductores, presuponiendo densidades de corriente no uniformes.

El circuito eléctrico global del motor se representa en la figura inferior. Es un sistema eléctrico acoplado (fuente de tensión), constituido por la fuente trifásica, las bobinas y el circuito acoplado de las barras (representado por resistencias y los llamados “*FEM conductors*”). Las bobinas del estator quedan asociadas a las partes geométricas ubicadas en las ocho ranuras de cada fase, y deben registrarse manualmente los valores de resistencia e inductancia de dispersión. Se asignará una resistencia de valor 1 ohmio por fase y, una inductancia de dispersión por fase nula.

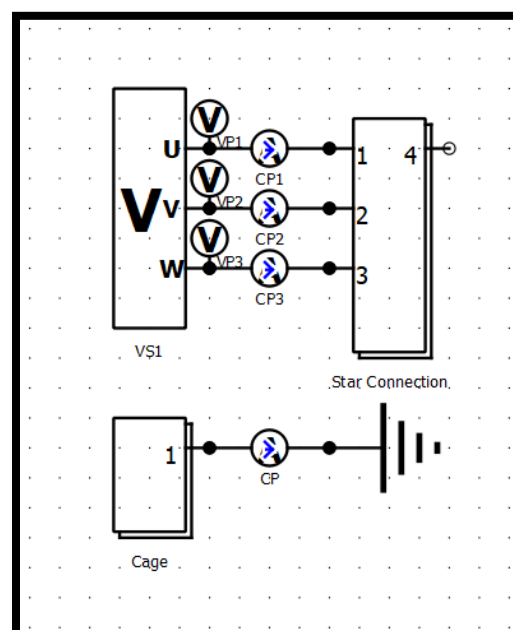


Ilustración 14. Vista general del circuito eléctrico

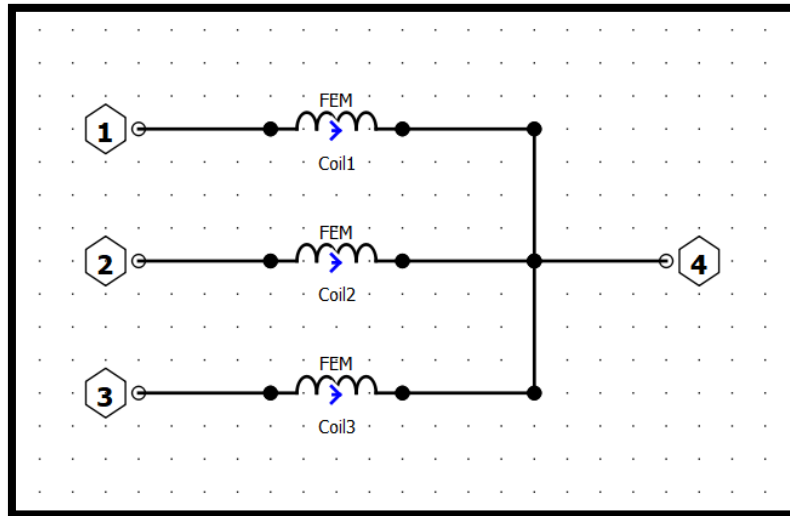


Ilustración 15. Circuito del estator

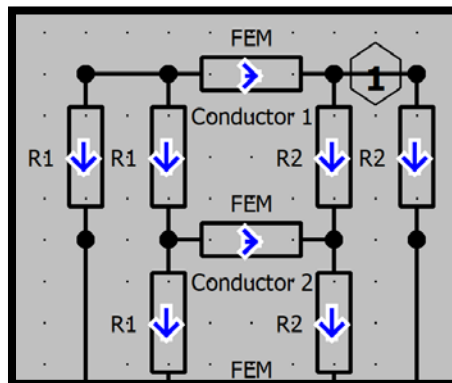


Ilustración 16. Circuito del rotor (parte)

Las flechas de los esquemas indican la dirección de la corriente en cada instante. En la figura se representan unos instantes particulares sin significado especial. En el esquema general, los símbolos A y V son Amperímetros medidores de corriente y Voltímetros medidores de potencial eléctrico (ambos miden cada fase). Las caídas de tensión se deducen por diferencias de potenciales eléctricos respecto a la referencia de potenciales.

Mallado

La malla establecida para estudiar el modelo está diseñada con diferente criterio de tamaño según la parte del motor. Así el entrehierro, las barras del rotor, y los dientes del estator/rotor son de menor tamaño, es decir, mayor detalle. En oposición el árbol de rotación, la periferia del estator, los conductores del estator y el aire envolvente exterior son de mayor tamaño, es decir, menor precisión.

El resultado ha sido una malla de buena calidad de 44.216 elementos (triángulos) y 25.079 nodos. La calidad media de los elementos es de 0.72, siendo 1 la calidad máxima (para los elementos poliédricos regulares) y 0 la calidad mínima (para los elementos tridimensionales de máxima irregularidad o “planos”). La cifra obtenida es mayor que en los estudios ordinarios, esto nos indica que el mallado es intenso y la precisión de los resultados bastante elevada.

Los elementos más pequeños están situados en las zonas de mayor interés, donde el campo magnético o sus variaciones son más altos. Se utilizará también un mallado diferente para la zona del entrehierro, donde se ubica la unión entre rotor (parte móvil de la máquina) y estator (parte fija). En particular la malla del entrehierro es especial, denominada “Slide mesh” porque debe interconectar dos partes con posición relativa cambiante por el movimiento del motor.

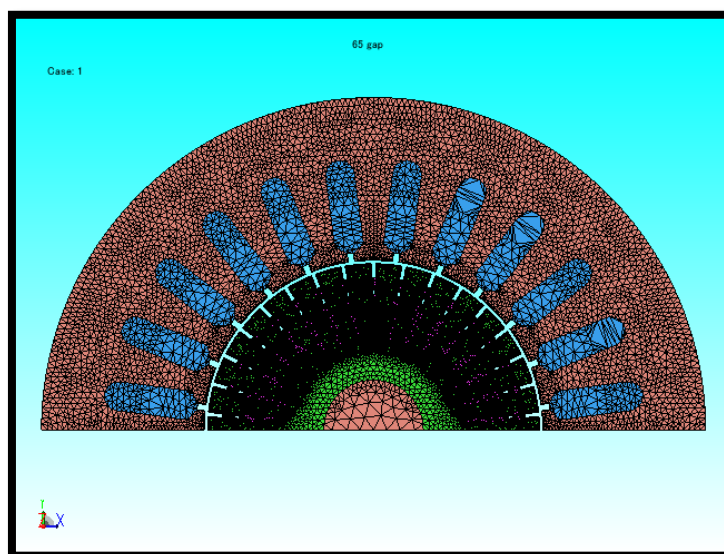


Ilustración 17. Vista general del mallado

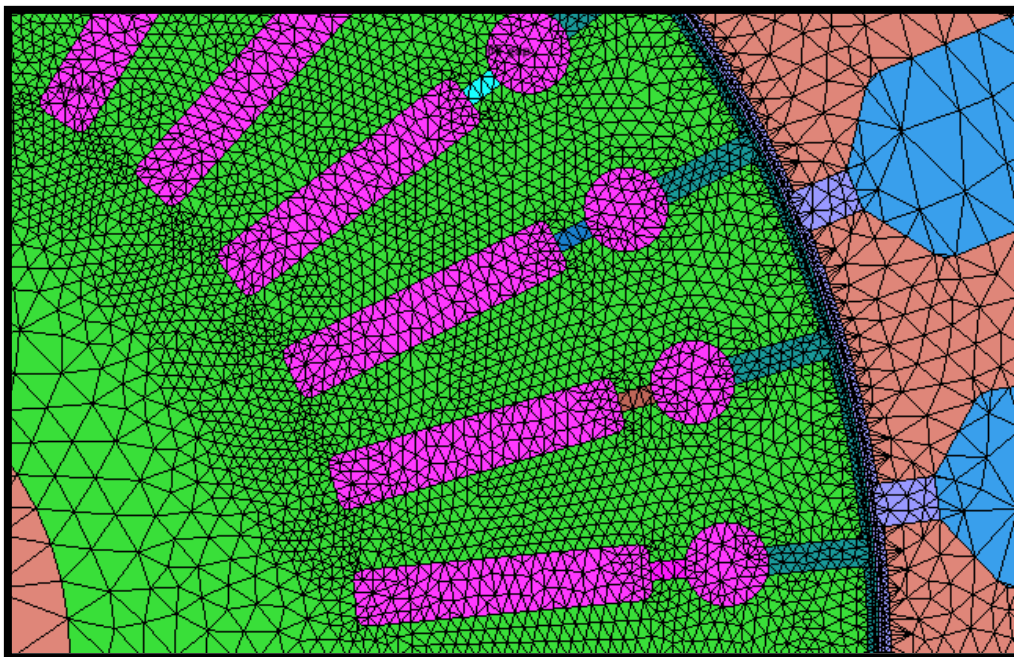


Ilustración 18. Vista en detalle del mallado

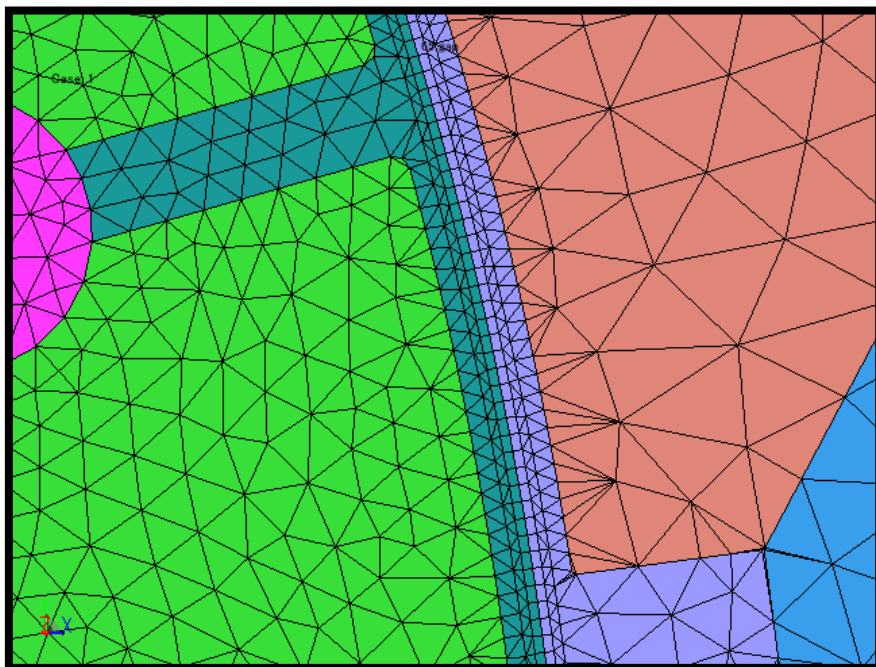


Ilustración 19. Vista en detalle del mallado del entrehierro

En las imágenes se puede observar la variación del tamaño de los elementos, que depende de la zona en la que estén situados. En general, se utiliza un mallado más preciso en el acero, en las barras del rotor y, por encima de todo, en el entrehierro, que es la zona más crítica de la máquina.

Propiedades del estudio

Una vez se establecen todas las configuraciones anteriormente expuestas y detalladas, el siguiente paso es ajustar el tipo de simulación.

Dentro de las propiedades del estudio, principalmente se han de establecer dos:

- Control de paso: Se fija el tiempo de cada paso de la simulación. Para ello se establece que entre el inicio y el final haya un número entero de ondas.

Si conocemos la frecuencia de la fuente (50 Hz), podemos establecer el número de ondas que queremos capturar en la simulación. Se simularán 65 ondas (1,3 segundos). Se considera, y luego quedó comprobado, que con este tiempo el régimen estacionario está alcanzado.

- Conversión al modelo completo: Se establece esta propiedad para que, analizando solo la mitad material, obtengamos los resultados del modelo completo.
- Conversión al circuito completo: Como el programa solo analiza la mitad del circuito serie, es necesario activar esta opción para que hacer corresponder los resultados del modelo geométrico con el circuito real.

Casos

Cuando se tienen definidas las propiedades, se establecen los diferentes casos de estudio. En este modelo de referencia, nuestros diferentes casos serán las distintas velocidades de rotación del rotor de la máquina. Se hará un estudio en régimen transitorio a cada una de ellas y posteriormente se obtendrán los

resultados de régimen estacionario de los valores de salida más importantes a diferentes velocidades.

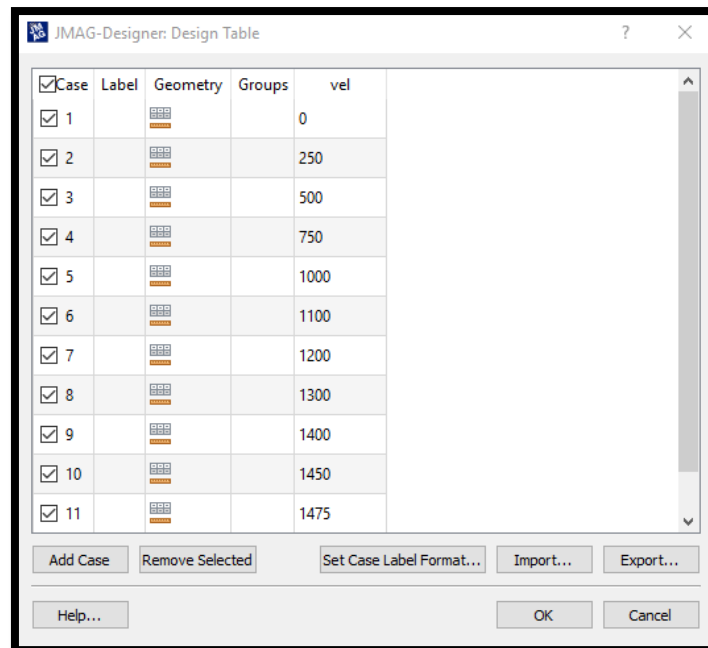


Ilustración 20. Casos a diferentes velocidades de trabajo

Se impondrán doce velocidades diferentes, repartidas entre la velocidad de sincronismo (1500 rpm) y la velocidad del motor en cortocircuito (0 rpm). La distribución de velocidades no es uniforme y concentra valores en las zonas de mayor variación (alrededor del valor máximo de par electromagnético).

Los resultados del caso a la velocidad de sincronismo (1500 rpm), situación ficticia límite, se consideran relativamente imprecisos, y así se tratarán.

3.4.2 Resultados

El tiempo aproximado de computación de cada simulación (caso) fue de 25 minutos. Dentro de todos los resultados entregados por el programa, interesan los citados a continuación:

- Onda de par electromagnético instantáneo
- Pérdidas del cobre y pérdidas del hierro
- Onda de corriente eléctrica instantánea
- Ondas de potencias eléctricas instantáneas en las bobinas del estator

Con los datos esenciales se tratarán matemáticamente y combinarán para obtener los gráficos y valores buscados. Éstos se exponen a continuación

Par mecánico

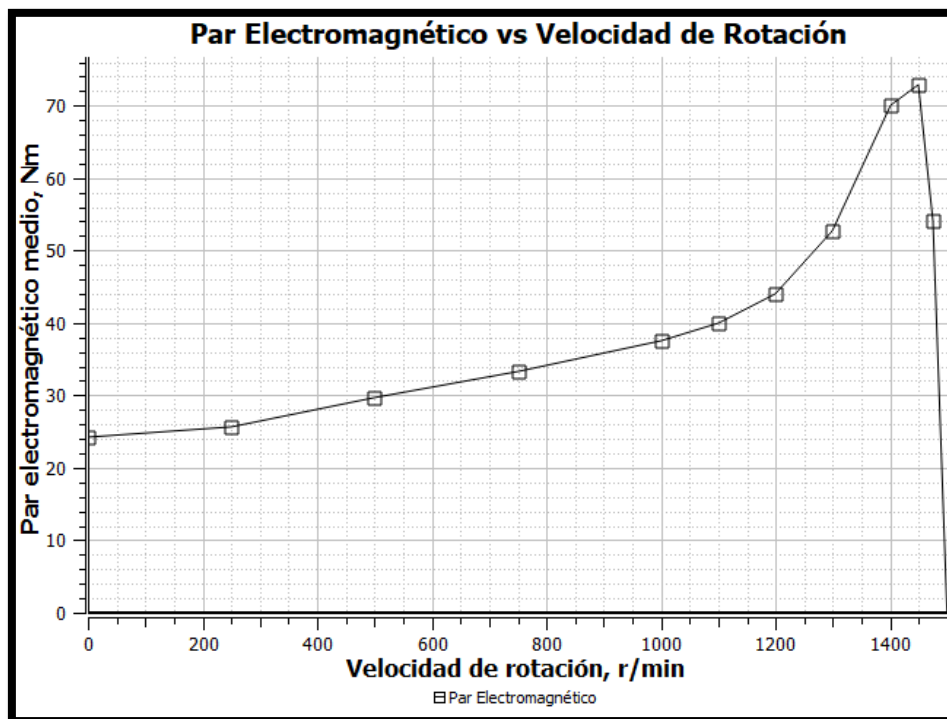


Ilustración 21. Par Electromagnético

El programa entrega el valor medio del par en el margen temporal deseado. El valor medio se calcula en el tramo final de la simulación desde 1.2 segundos a 1.3 segundos (5 ciclos de la frecuencia industrial), y está graficado en la figura. Es necesario destacar que se trata del Par Electromagnético, es decir, par

interno, ya que el programa solo considera las pérdidas Joule antes de calcularlo, dejando para un cálculo posterior las pérdidas en el acero.

En la gráfica se representan todos los puntos obtenidos en las diferentes simulaciones. Se pueden observar los siguientes valores destacados:

- Par en cortocircuito: $24.15 \text{ N} \cdot \text{m}$ (0 rpm)
- Par máximo: $72.97 \text{ N} \cdot \text{m}$ (1450 rpm)
- Par nominal: $54.02 \text{ N} \cdot \text{m}$ (1475 rpm)

Para obtener el par mecánico útil en la salida, se ha de convertir en potencia electromagnética interna y restar las pérdidas en el acero, para luego dividir por la velocidad de trabajo. Así mismo, la potencia entregada por la fuente es la suma de la potencia electromagnética y las pérdidas joule totales

$$P_{Generada} = T_{Elec} \cdot \omega_{trabajo} + P_{Joule}$$

$$T_{Mecánico} = \frac{T_{Elec} \cdot \omega_{trabajo} - P_{Acero}}{\omega_{trabajo}}$$

Sumando los valores en todos los casos propuestos, se obtiene la siguiente gráfica de Par mecánico:

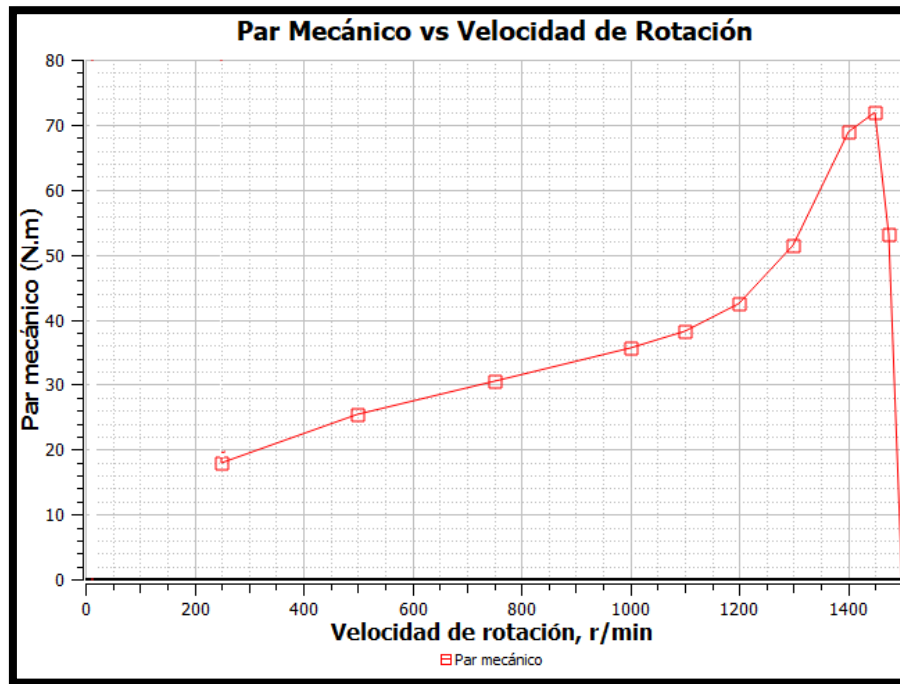


Ilustración 22. Par Mecánico

En la imagen, se presenta una anomalía gráfica en el arranque que es de naturaleza matemática, donde la velocidad es 0 (al calcularlo mediante potencias el valor se eleva a infinito). En bajas velocidades (arranque) se puede aproximar el valor con la prolongación de la curva.

Corrientes eléctricas y Factor de potencia

La información que el programa facilita incluye datos y gráficas sobre la corriente instantánea que circula por cada elemento del circuito de elementos concentrados (bobinas, resistencias, amperímetros...).

Se necesitan obtener los valores eficaces de la corriente de las bobinas del estator. A partir de las corrientes de las tres bobinas se calcula una corriente promedio equilibrada consumida por las tres fases del motor. Se ha comprobado que la diferencia entre fases es muy reducida y el promedio es válido.

A continuación, se muestra el gráfico de corriente que nos proporciona JMAG Designer (en este caso, la corriente de la fase U a velocidad nominal).

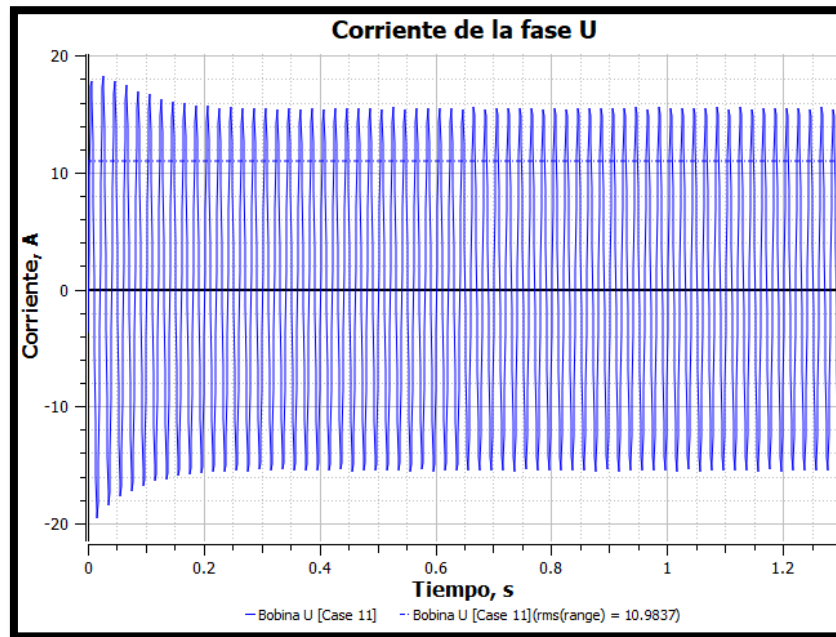


Ilustración 23. Corriente instantánea U

La onda es prácticamente sinusoidal, de frecuencia 50 Hz. Para comprobarlo, se utiliza la herramienta de cálculo de la Transformada de Fourier, seleccionando la frecuencia de 50Hz.

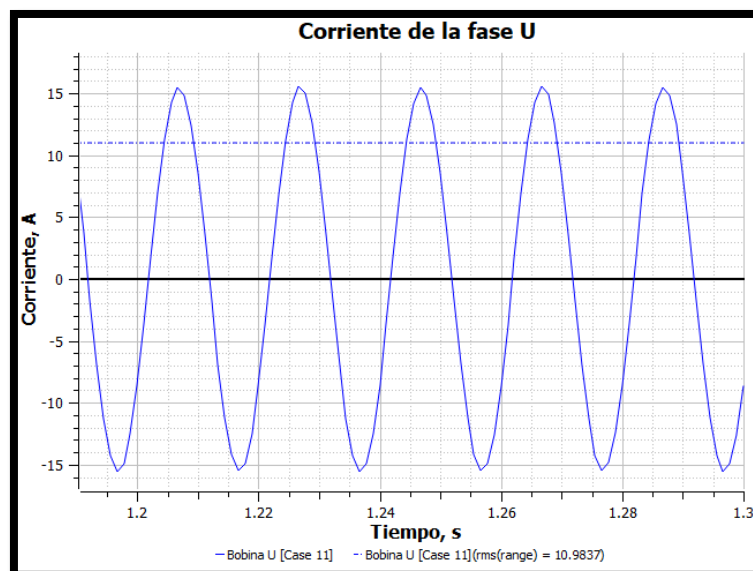


Ilustración 24. Corriente instantánea U (ampliada)

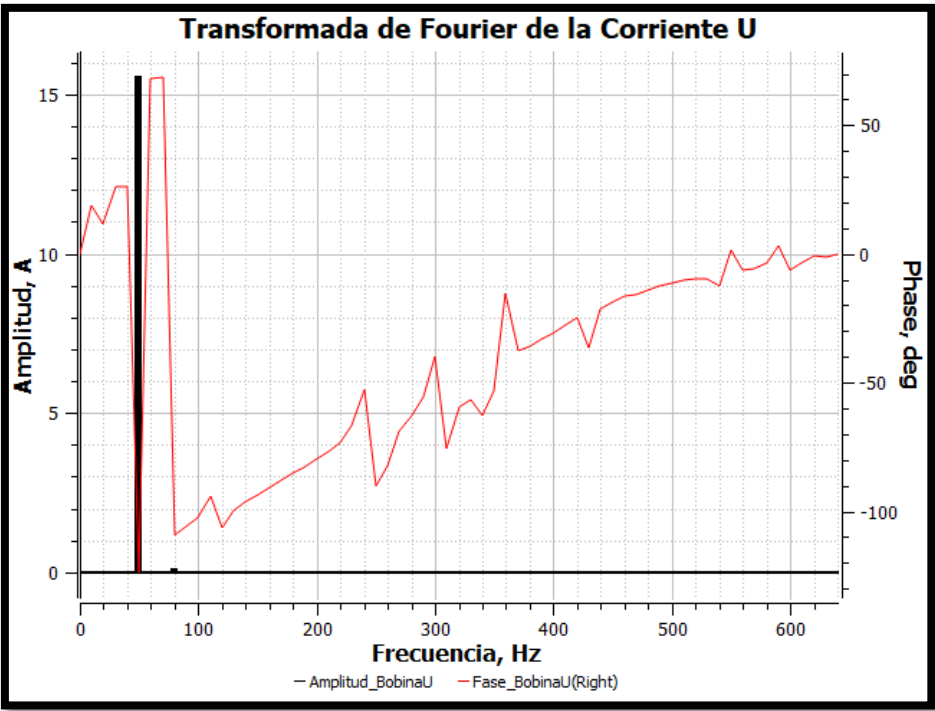


Ilustración 25. TF de la corriente U

Se puede comprobar que la única amplitud significativa tiene una frecuencia de 50 Hz (frecuencia fundamental), al igual que la onda de corriente instantánea obtenida. Los demás armónicos son despreciables con gran aproximación.

Por ello, se puede aceptar su valor eficaz como el valor eficaz de la corriente de la fase U. En la siguiente tabla se muestran los valores de fase de cada corriente, en cada uno de los casos estudiados.

CASO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
U	-56	-56	-55	-55	-54	-54	-52	-50	-42	-34	-34
V	184	184	185	185	186	186	188	190	198	206	206
W	64	64	65	65	66	66	68	70	78	86	86

Tabla 2. Fases de las corrientes

Gracias a la información del ángulo de desfase de la corriente (fase U, por ejemplo) con respecto a la tensión de alimentación (establecida en el eje origen de fases), se puede conocer el factor de potencia del motor a cualquier velocidad de rotación estudiada. Para 1475 rpm (nominal), el factor de potencia será:

$$\cos \varphi_U = \cos 34^\circ = 0.829 (i)$$

Por tanto,

$$\bar{I}_U = 10.98 \text{ A} \angle -34^\circ$$

Si observamos los valores eficaces y desfases de las otras corrientes:

$$\bar{I}_V = 10.98 \text{ A} \angle 206^\circ$$

$$\bar{I}_W = 10.97 \text{ A} \angle 86^\circ$$

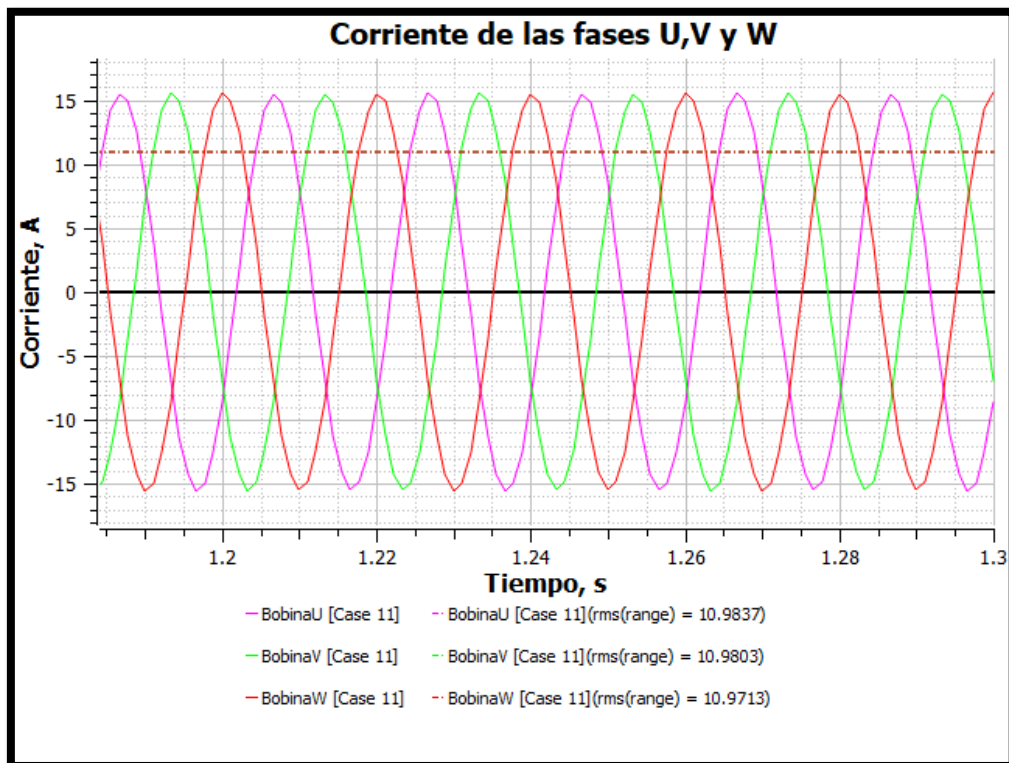


Ilustración 26. Corrientes de las fases U, V y W

Se comprueba que cada corriente está a 120 grados de las otras dos, en secuencia directa. Por lo tanto, podemos admitir que el valor eficaz equivalente (equilibrio trifásico) de la corriente nominal del motor es de:

$$I_{1475} = 10.98 \text{ A}$$

Analizando de la misma forma, la corriente en cortocircuito es:

$$\bar{I}_U = 35.53 \text{ A} \angle -72^\circ$$

$$\bar{I}_V = 35.51 \text{ A} \angle 168^\circ$$

$$\bar{I}_W = 35.68 \text{ A} \angle 48^\circ$$

A continuación, se presenta una tabla con los valores de corriente, desfase (respecto de la tensión) y factor de potencia en cada caso:

Velocidad (rpm)	VALOR RMS (A)	DESFASE (°)	FDP (i)
0	31.10	-56.43	0.5529
250	30.65	-55.86	0.5613
500	30.03	-55.32	0.5690
750	29.16	-54.76	0.5769
1000	28.00	-54.05	0.5871
1100	27.42	-53.50	0.5948
1200	26.67	-52.39	0.6103
1300	25.44	-49.76	0.6460
1400	22.02	-42.28	0.7398
1450	16.51	-34.38	0.8253
1475	10.98	-33.63	0.8326

Tabla 3. Datos de la corriente del motor

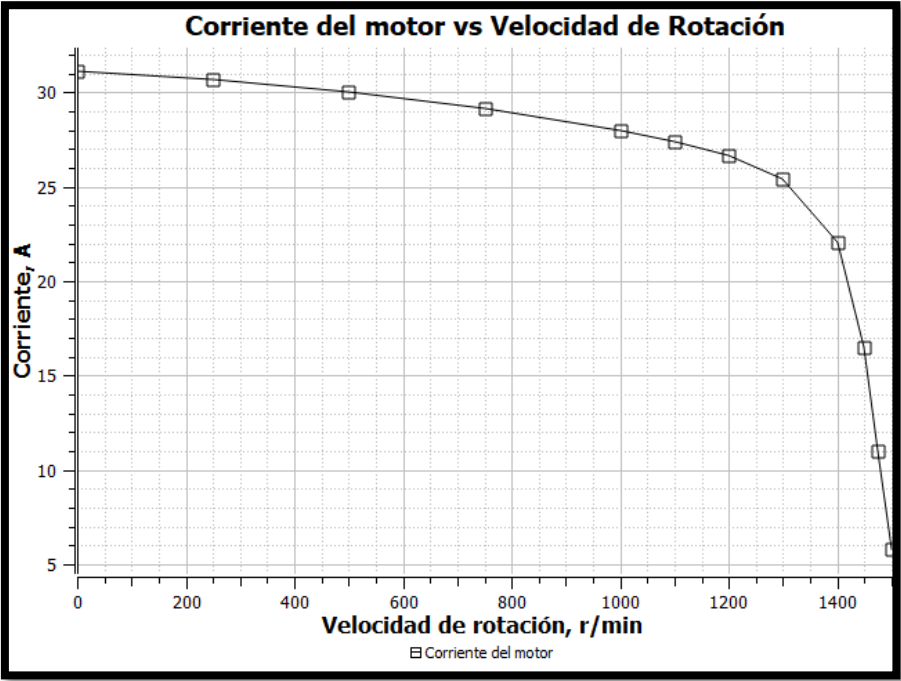


Ilustración 27. Corriente del motor

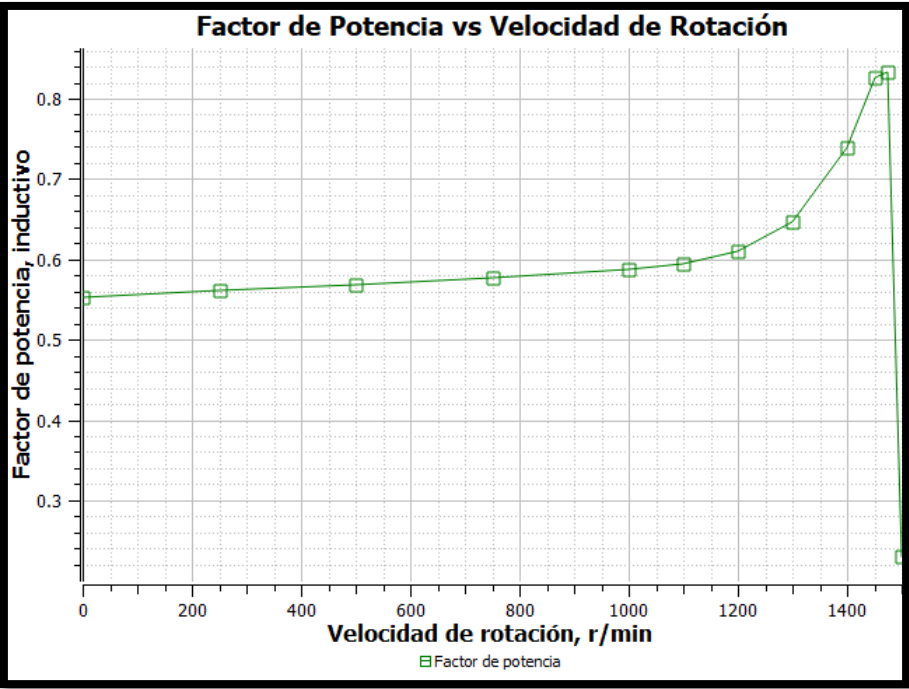


Ilustración 28. Factor de potencia

Potencia

El software calcula la potencia instantánea que consume cada elemento del circuito. Para obtener la potencia activa que caracteriza al motor, es necesario transformar estos datos en función del tiempo a valores medios.

A velocidad nominal, la potencia instantánea de la fase U es la siguiente:

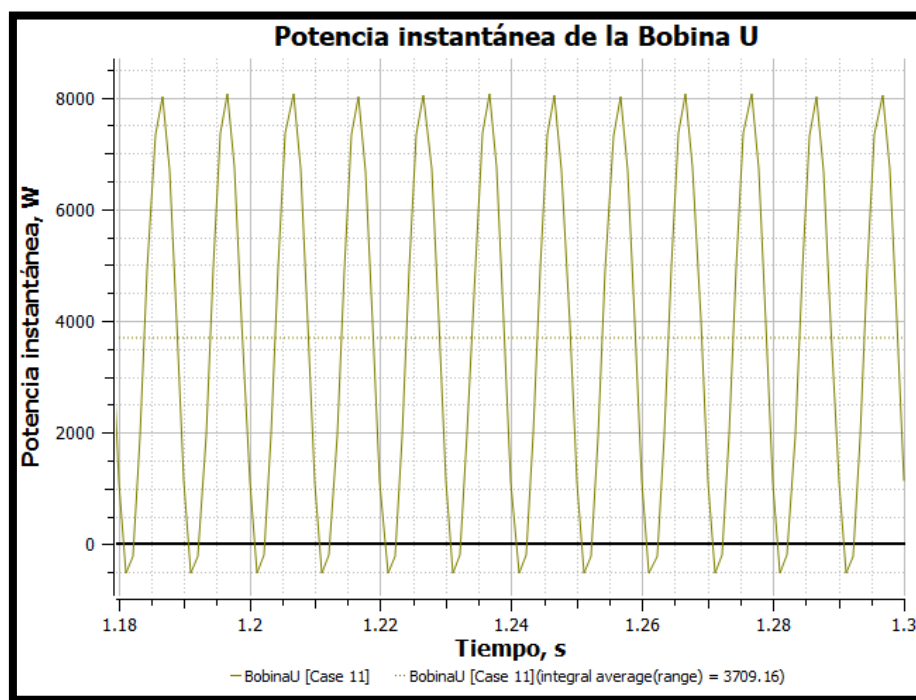


Ilustración 29. Potencia consumida a 1475 rpm

La potencia de la bobina de la fase U a 1475 rpm es una onda casi sinusoidal, de frecuencia 100 Hz (dos veces la de la fuente). El valor de la potencia activa de la fase U es, por tanto:

$$P_U = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = 3709.16 \text{ W}$$

La siguiente tabla recoge la información de la potencia media por periodo de cada fase en cada caso. El periodo escogido desde 1.2 segundos hasta 1.3 segundos de simulación.

Velocidad (rpm)	P.Activa (W) FASE U	P.Activa (W) FASE V	P. Activa (W) FASE W	TOTAL (W)
0	6998	6979	7029	21007
250	6982	6965	6967	20915
500	6935	6918	6919	20772
750	6827	6814	6813	20455
1000	6671	6657	6658	19986
1100	6617	6604	6605	19826
1200	6604	6591	6592	19787
1300	6669	6657	6657	19983
1400	6609	6599	6597	19805
1450	5526	5519	5517	16563
1475	3709	3703	3702	11114

Tabla 4. Potencia consumida a diferentes velocidades

La potencia activa del motor es la suma de las potencias activas de las fases.

$$P = (P_U + P_V + P_W)$$

La siguiente gráfica muestra la información de la potencia activa consumida por el motor, respecto a la velocidad de rotación de la máquina.

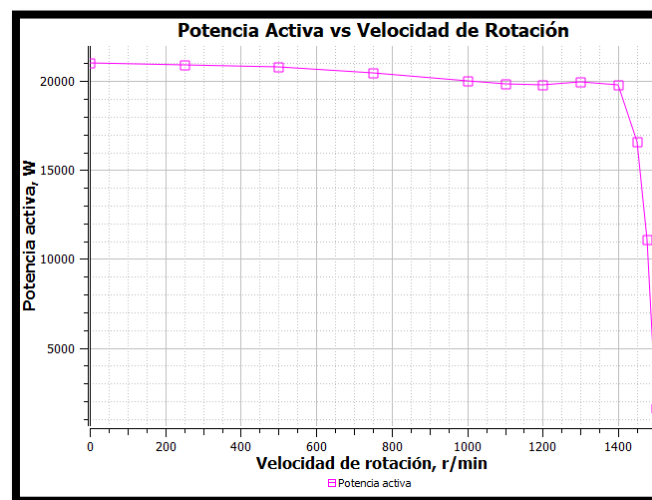


Ilustración 30. Potencia absorbida

La potencia asignada del motor es de 11114 W. Si se establecen las condiciones de potencia máxima, el motor podría llegar a poner en juego 21007 W. No obstante, los motores no se emplean al máximo de sus capacidades para evitar inestabilidad de funcionamiento.

Pérdidas de potencia

Existen dos tipos fundamentales de pérdidas de potencia en un motor de inducción:

- ***Pérdidas eléctricas (Joule).*** Debidas al efecto Joule, estas pérdidas se producen fundamentalmente en las barras del rotor y en los conductores del estator. Son las pérdidas eléctricas. Parte de la energía cinética de los electrones en movimiento que forman la corriente eléctrica, se disipa en forma de calor en las superficies del material.
- ***Pérdidas en el hierro (histéresis y de corrientes parásitas).*** También llamadas pérdidas magnéticas, se sitúan en los materiales sometidos a cambios de magnetización: el acero del rotor y el estator. Al igual que las Joule, se manifiestan en forma de calor expulsado por el material.

Pérdidas eléctricas

Mediante JMAG-Designer podemos analizar la curva de pérdidas en el tiempo en cada caso de velocidad, para cada parte del motor. En las imágenes se muestra un espectro de los valores de densidad de pérdidas Joule en el estator y el rotor, a 1475 rpm.

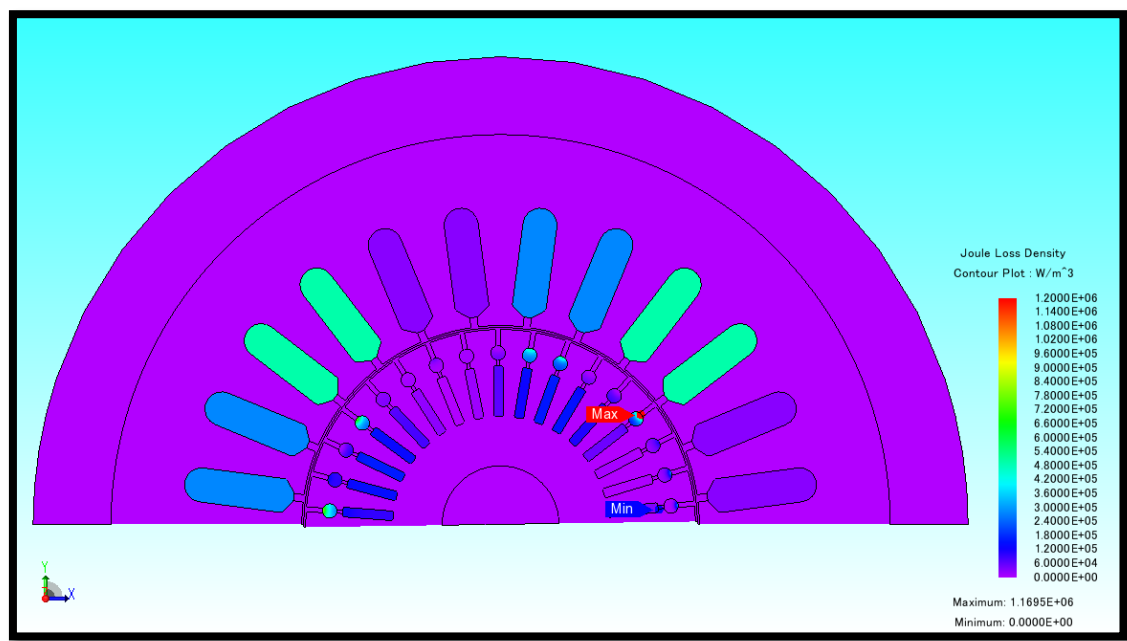


Ilustración 31. Pérdidas eléctricas a 1475 rpm

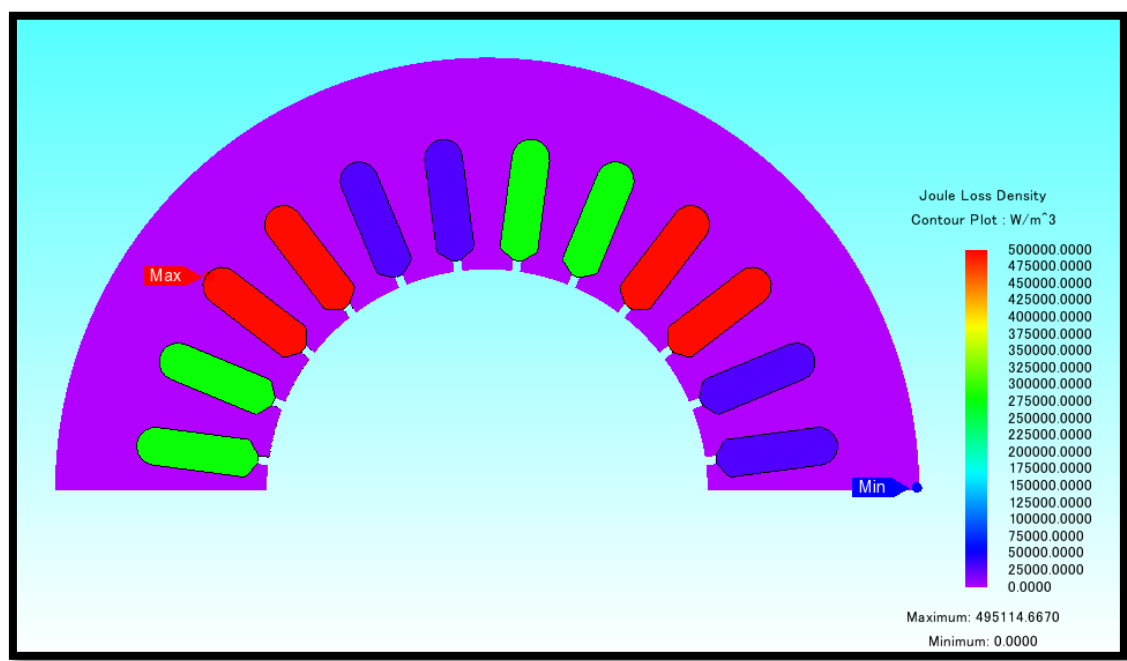


Ilustración 32. Pérdidas eléctricas en el estator (1475)

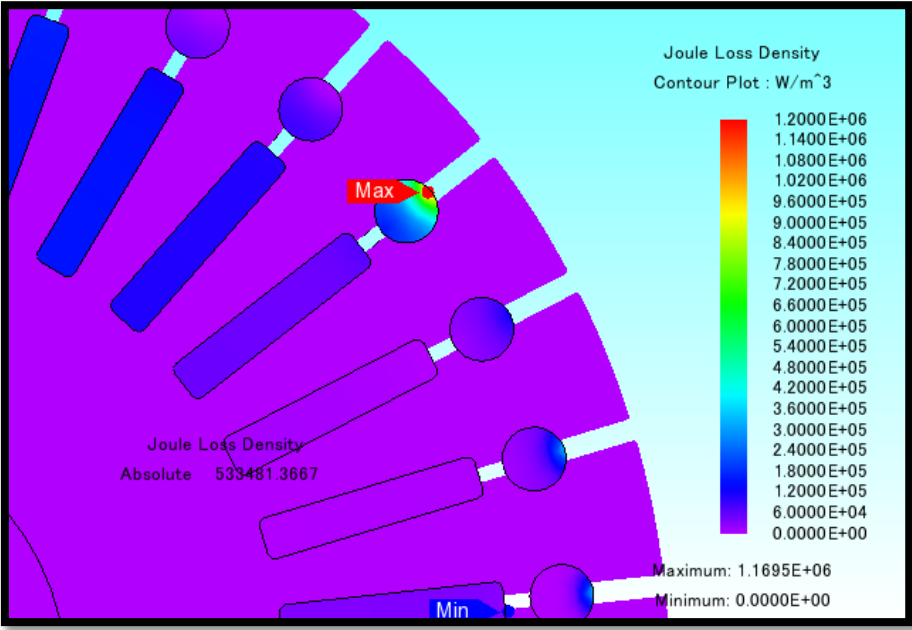


Ilustración 33. Pérdidas eléctricas en el rotor (1475)

Las curvas de pérdidas Joule instantáneas en cada parte de la máquina, se representan en el siguiente gráfico respecto al tiempo de simulación:

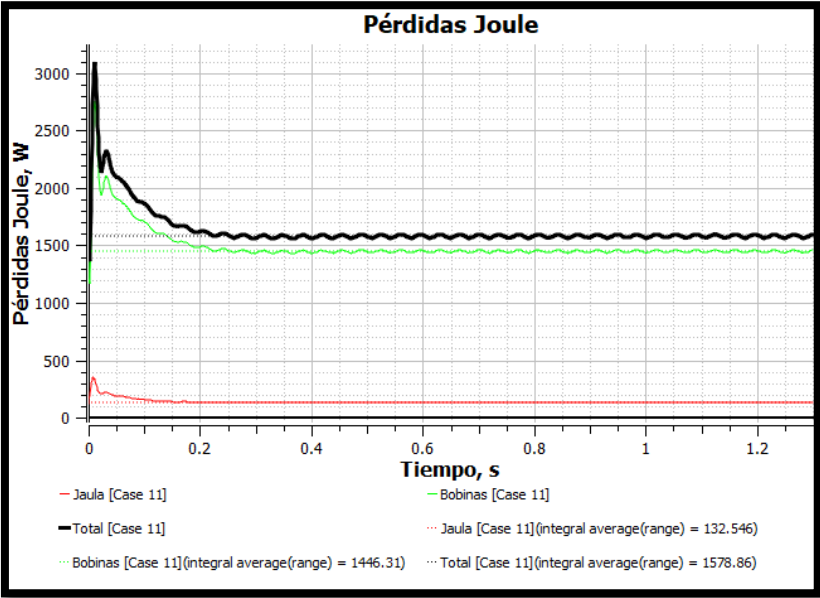


Ilustración 34. Pérdidas eléctricas instantáneas

Las pérdidas eléctricas a diferentes velocidades de rotación en las bobinas y la jaula (las demás partes no presentan pérdidas significativas de este tipo) son mostradas en la siguiente tabla:

Velocidad (rpm)	Bobinas (W)	Jaula (W)	Total (W)
0	11609.08	3899.89	15508.96
250	11273.28	3570.84	14844.12
500	10817.89	3144.99	13962.88
750	10204.83	2574.89	12779.72
1000	9409.94	1877.12	11287.06
1100	9019.02	1581.97	10600.99
1200	8535.13	1295.68	9830.81
1300	7767.60	1018.60	8786.21
1400	5816.26	673.39	6489.65
1450	3269.14	351.04	3620.18
1475	1446.42	132.57	1578.99

Tabla 5. Pérdidas eléctricas a diferentes velocidades

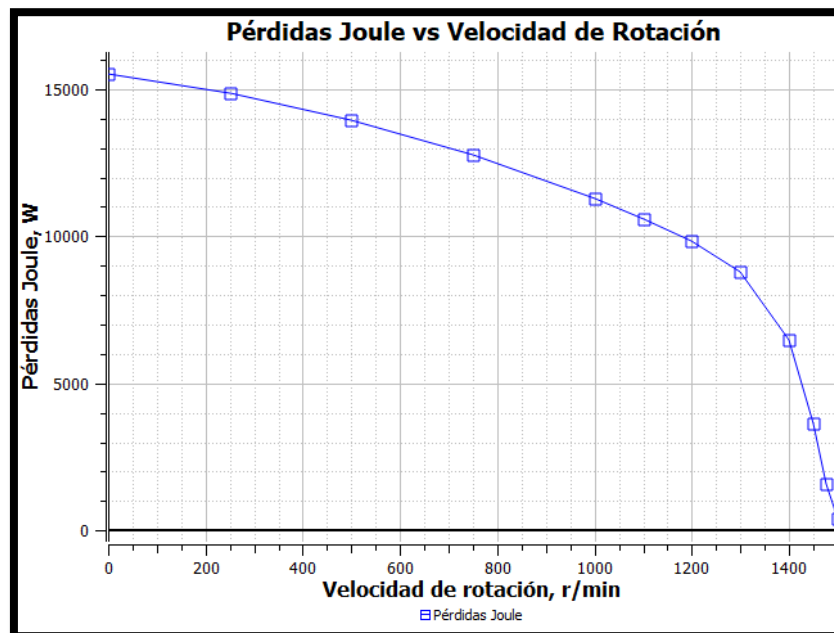


Ilustración 35. Pérdidas eléctricas

Pérdidas en el hierro

Las pérdidas por histéresis y corrientes parásitas (hierro) se reparten por todo el acero, acumulándose sobre todo en la zona próxima a las ranuras y al entrehierro. La siguiente imagen corresponde a la simulación a 1475 rpm.

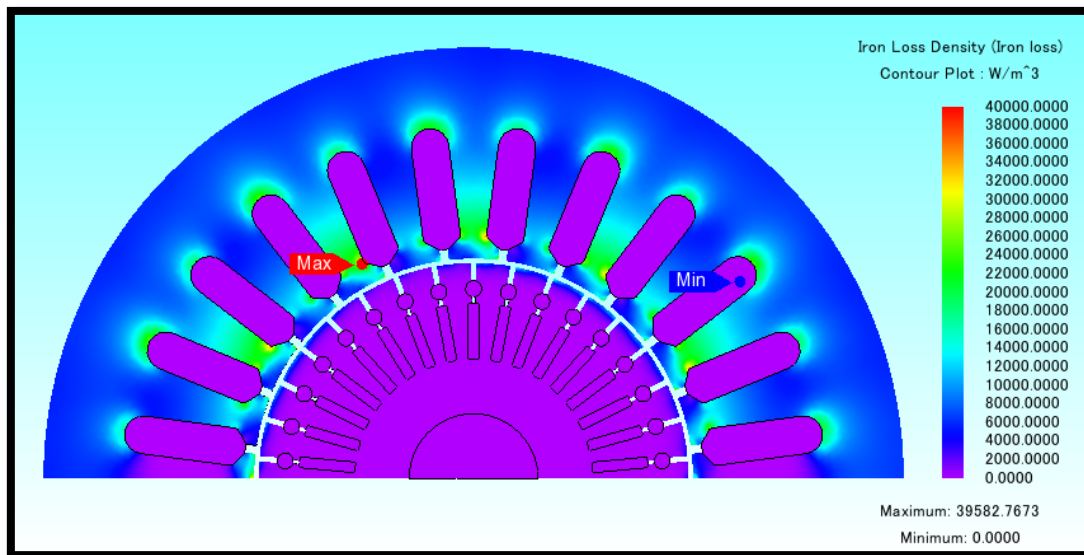


Ilustración 36. Pérdidas del hierro a 1475 rpm

La siguiente imagen es una vista más detallada del entrehierro.

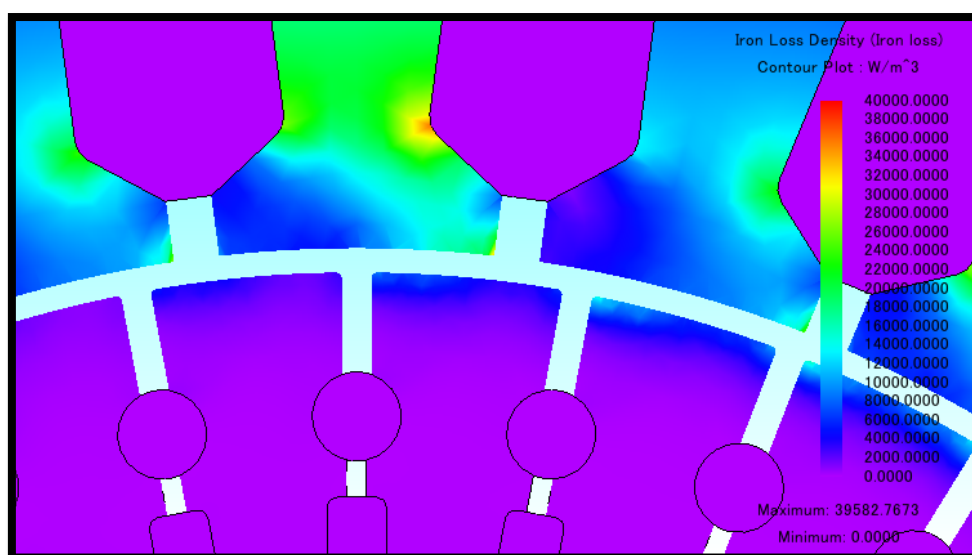


Ilustración 37. Pérdidas en el hierro. Entrehierro (1475)

A la vista de los resultados de las gráficas de contorno, podemos afirmar que las mayores pérdidas tienen lugar en el núcleo magnético del estator, sin olvidar que, en la zona más próxima al entrehierro del rotor, también se concentran de forma significativa. En la tabla se muestran los valores de pérdidas por histéresis a cada velocidad de trabajo.

Velocidad (rpm)	Estator (W)	Rotor (W)	Total (W)
0	166.44	23.98	190.42
250	172.78	32.53	205.31
500	179.48	43.12	222.60
750	177.28	41.81	219.09
1000	173.42	31.28	204.70
1100	169.77	25.53	195.30
1200	165.37	20.73	186.10
1300	158.07	14.84	172.91
1400	146.74	9.61	156.34
1450	144.03	4.83	148.86
1475	149.14	2.02	151.16

Tabla 6. Pérdidas en el hierro a diferentes velocidades

Las pérdidas en el hierro de esta máquina son mucho menores que las pérdidas por efecto Joule (del orden de 10 veces menores, a la velocidad asignada). Cabe destacar que estas pérdidas son mayores a menores velocidades de trabajo (al igual que las eléctricas), pero no siguen una distribución creciente uniforme (se producen saltos).

Eficiencia

Una vez obtenidas la corriente, las potencias activas de los elementos y sus pérdidas, se puede hacer un análisis de la eficiencia del motor. La potencia útil se obtiene a partir de la potencia generada, restándole la potencia perdida.

$$P_{\text{Útil}} = P_{\text{Total}} - P_{\text{Perdida}}$$

Para obtener la potencia útil del motor, basta con restarle las pérdidas en el acero a la potencia electromagnética obtenida a partir del par electromagnético calculado por el programa.

$$P_{\text{Útil}} = T_{\text{Elec}} \cdot \omega_{\text{trabajo}} - P_{\text{Acero}}$$

A continuación, se muestra la Potencia Útil resultante en cada velocidad estudiada:

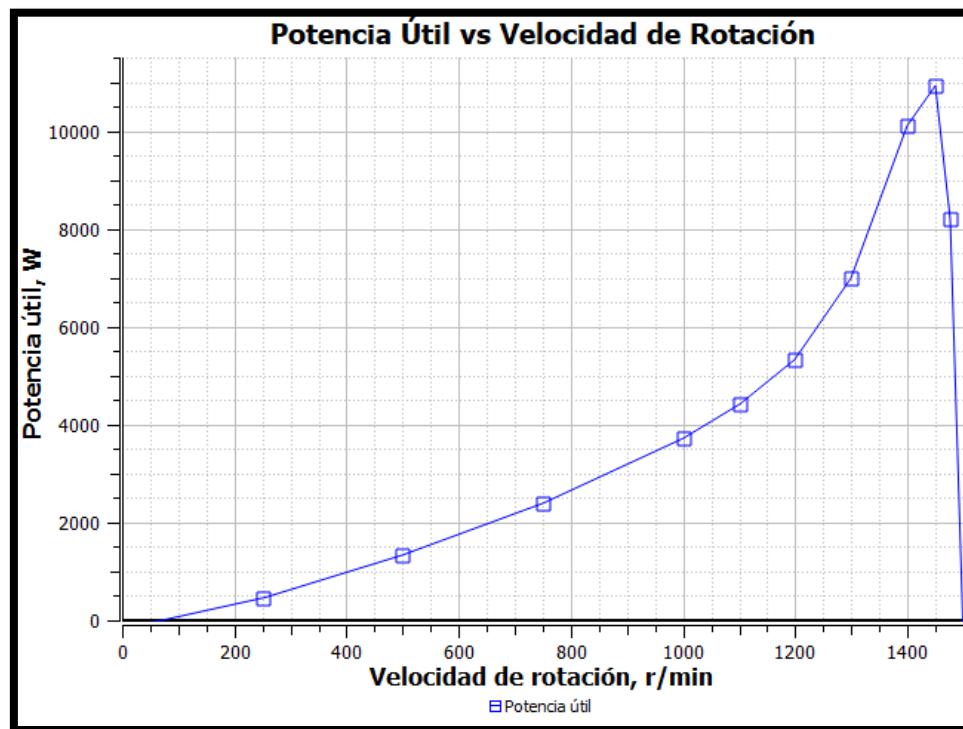


Ilustración 38. Potencia útil

- Potencia útil máxima: 10932 W (1450 rpm)
- Potencia útil nominal: 8192 W (1475 rpm)

El rendimiento o eficiencia en una máquina eléctrica, es la relación que existe entre la potencia útil (calculada anteriormente, a partir de la potencia electromagnética y las pérdidas en el acero) y la potencia absorbida (calculada a partir de la potencia instantánea en las bobinas)

Velocidad (rpm)	Rendimiento
0	0.00
250	2.24
500	6.39
750	11.74
1000	18.64
1100	22.23
1200	26.99
1300	35.00
1400	51.06
1450	66.00
1475	73.71

Tabla 7. Rendimiento a diferentes velocidades

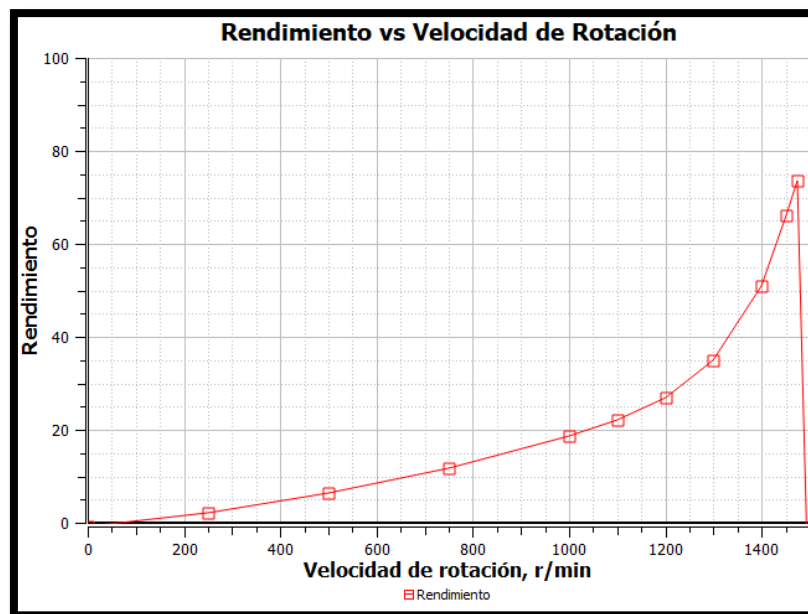


Ilustración 39. Rendimiento

La eficiencia del motor a 1475 rpm es del 74%. Se puede observar que el rendimiento es menor cuanto menor sea la velocidad de rotación de la máquina, siendo nula en el momento de arranque.

También es posible ver que existe una relación estrecha entre los valores del factor de potencia descritos anteriormente, y los valores de la eficiencia. Es una evidencia que resulta porque las pérdidas son mayores a bajas velocidades. A continuación, se presenta una gráfica final del motor:

3.5 ESTUDIO PARAMÉTRICO DE DIMENSIONES PRINCIPALES

En esta parte, el trabajo se centrará en estudiar las variaciones de las magnitudes operativas provocadas por cambios en las dimensiones principales de la máquina. Estas dimensiones se denominan parámetros. Los parámetros son:

- **Diámetro del Entrehierro.** Es el diámetro al que está situada esta región. Se corresponde prácticamente con el diámetro exterior del rotor, y con el interior del estator, ya que la longitud transversal del entrehierro es mucho menor que el diámetro de la máquina. En este trabajo se asigna igual al diámetro exterior del rotor. Esta dimensión de la máquina es también un parámetro fundamental en su funcionamiento.
- **Entrehierro.** Es el espacio entre la superficie exterior del rotor y la superficie interior del estator. En él se produce el intercambio de energía entre el rotor y el estator, mediante la interacción de los campos magnéticos producidos por ellos. Este parámetro del motor tiene una influencia muy destacada sobre el funcionamiento de la máquina.
- **Longitud axial.** Es la profundidad de la sección que se modeliza con JMAG-Designer. Junto con el diámetro del entrehierro, cumple una función básica en la máquina y ambos parámetros se encargan de encajar las dimensiones exteriores del motor en la llamada Ecuación de Relación de aspecto.

Posteriormente, en el apartado de la elección del diseño final, se describirá con detalle el efecto teórico de estos parámetros, pero el objetivo ahora es observar qué cambios se producen en los resultados utilizando JMAG-Designer. Estos estudios se denominan paramétricos debido a que evalúan la influencia de las variaciones de esos parámetros principales.

En los estudios que se van a realizar en el programa, se establecerá una sola velocidad de funcionamiento, 1475 rpm (velocidad nominal).

3.5.1 Diámetro del entrehierro

Para realizar los estudios, se generan tres casos con diferente Diámetro del entrehierro con los siguientes valores:

CASO	1	2	3
Diámetro del Entrehierro (mm)	175.875	190.875	200.875
Diámetro exterior del rotor (mm)	175	190	200

Tabla 8. Casos variando D

Debe tenerse en cuenta que la definición geométrica no incluye la totalidad de las cotas o “parámetros CAD”, de forma que la variación deseada implica seleccionar los parámetros CAD que determinan los cambios del parámetro a estudiar. Además, para mantener el resto de las dimensiones hay que seleccionar también los parámetros CAD oportunos. Para generar los casos, el programa pide seleccionar los “parámetros CAD” y como está acotada la sección de la máquina, los parámetros que entran en juego son:

- Diámetro exterior del rotor.
- Diámetro interior del estator.
- Culata del estator (distancia entre ranura y diámetro exterior del estator).

En el apartado ecuaciones se impondrán las siguientes expresiones y valores:

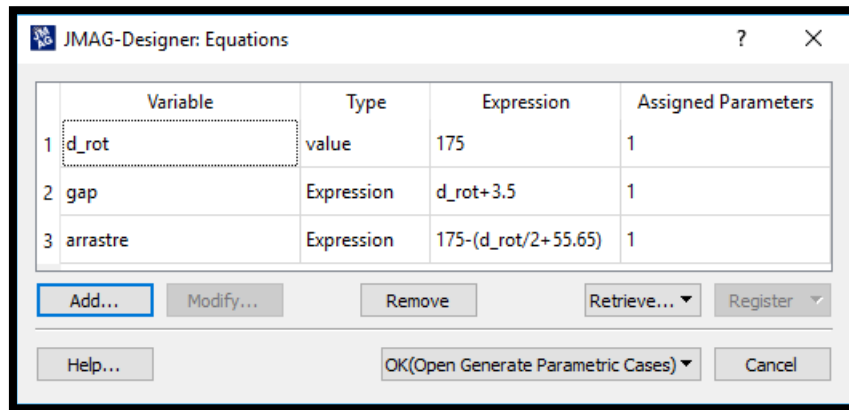


Ilustración 40. Ecuaciones

- El parámetro d_rot es el diámetro exterior del rotor y es el que el programa toma como objetivo para variar.
- La expresión “gap” se encarga de que el diámetro interior del estator se mantenga a 1.75 mm del parámetro que varía, para conservar la medida del entrehierro.
- La expresión arrastre se encarga de que la medida recortada en el estator, al agrandar el rotor, sea la culata, y no la propia ranura.

Los casos producidos en el programa son mostrados en la siguiente imagen:

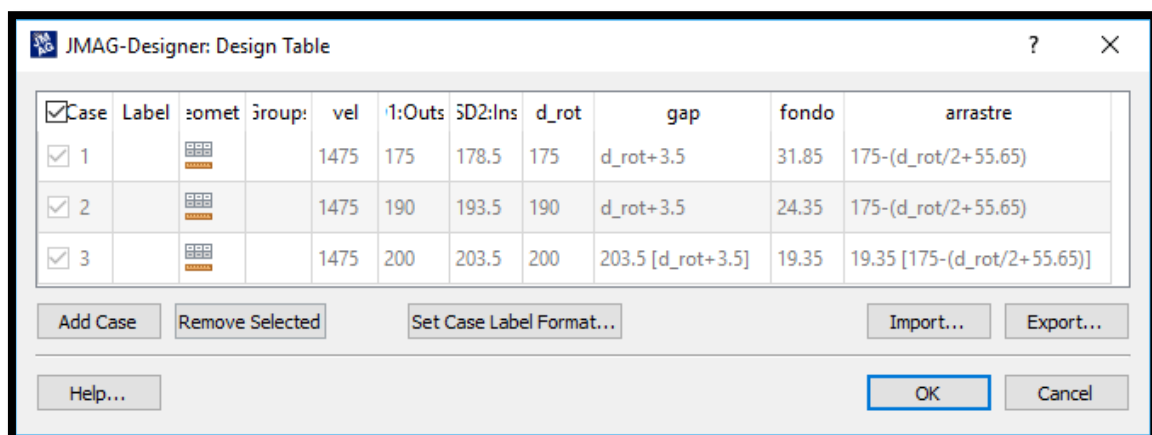


Ilustración 41. Casos producidos

Se conservan todas las configuraciones comentadas en la sección del modelo de referencia; tanto las condiciones como la malla utilizada y el circuito eléctrico impuesto.

A continuación, se comentarán estos resultados y las diferencias entre ellos.

Par electromagnético

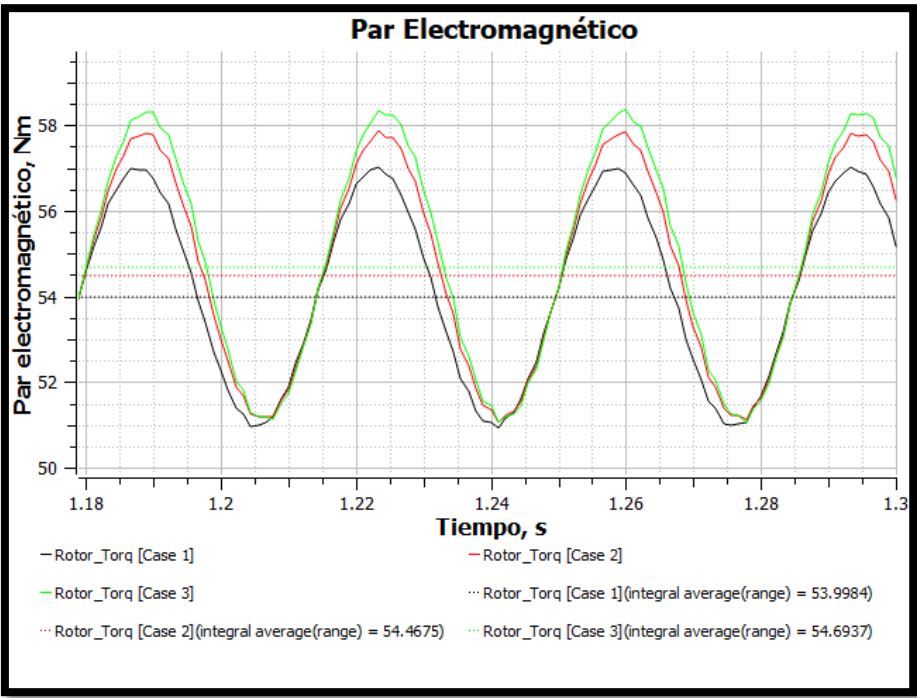


Ilustración 42. Par electromagnético

CASO	1	2	3
Diámetro del Entrehierro (mm)	175.875	190.875	200.875
Par electromagnético (Nm)	54.00	54.47	54.69

Tabla 9. Par electromagnético

La variación del diámetro del entrehierro influye moderadamente en el Par electromagnético producido por la máquina, con una modesta relación de proporcionalidad directa.

Corrientes eléctricas y Factor de potencia

Las corrientes en las bobinas varían de la siguiente forma en relación con el diámetro:

CASO	1	2	3
Diámetro del Entrehierro (mm)	175.875	190.875	200.875
Corriente U (A)	10.98	10.77	10.67
Corriente V (A)	10.98	10.77	10.67
Corriente W (A)	10.98	10.77	10.66

Tabla 10. Corrientes

En amplitud, las corrientes no perciben gran cambio. Hay una diferencia del orden de los 10 mA, valor que no afecta demasiado al funcionamiento. Los valores máximos se verán algo más afectados, pero sin mucha intensidad.

CASO	1	2	3
Diámetro del Entrehierro (mm)	175.875	190.875	200.875
Fase U (°)	-33.69	-32.36	-31.67
Fase V (°)	206.31	207.64	208.33
Fase W (°)	86.31	87.64	88.33
FdP (i)	0.8321	0.8447	0.8511

Tabla 11. Fases y Factor de potencia

En fase, se puede observar también un ligero cambio, que da lugar a un mejor factor de potencia a medida que aumentamos el diámetro.

Potencia y Pérdidas

La potencia total consumida, las pérdidas eléctricas, las pérdidas del hierro, y la potencia útil, varían de la siguiente forma:

CASO	1	2	3
Diámetro del Entrehierro (mm)	175.875	190.875	200.875
Potencia Total (W)	11113	11066	11040
Pérdidas Eléctricas (W)	1580	1527	1501
Pérdidas del Hierro (W)	158	169	182
Potencia Útil (W)	8183	8244	8265

Tabla 12. Potencia

En términos aproximados, el aumento del diámetro hace que la potencia consumida sea similar, y que las pérdidas disminuyan (pérdidas eléctricas) y aumenten (pérdidas del hierro) en diferente proporción. La potencia útil se eleva y, en resumen, junto con la mejora del factor de potencia, hace que la máquina trabaje de manera más eficiente.

CASO	1	2	3
Rendimiento (%)	73.63	74.50	74.87

Tabla 13. Rendimiento

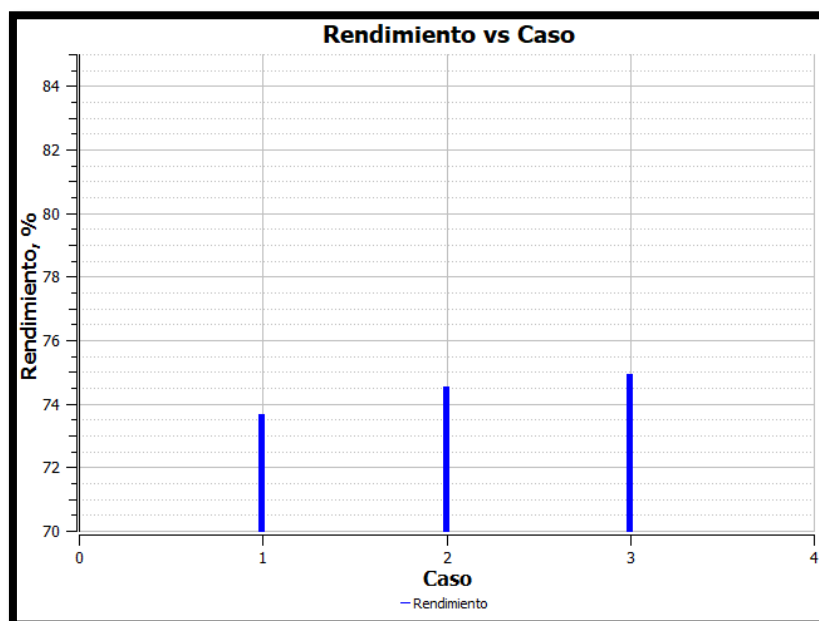


Ilustración 43. Rendimiento

A parte de los cambios reflejados en el análisis electromagnético, el diámetro del entrehierro afecta directamente a la relación de aspecto, que tiene que ver con problemas del tipo térmico (refrigeración), que no son objeto de estudio en este trabajo.

3.5.2 Entrehierro

Este parámetro es clave en el diseño de un motor de inducción. A continuación, se mostrarán los cambios que produce la variación del entrehierro en el diseño estudiado.

Para realizar los estudios, se generan tres casos con diferente Entrehierro con los siguientes valores:

CASO	1	2	3
<i>Entrehierro (mm)</i>	1.75	1	0.5
<i>Diámetro exterior del rotor (mm)</i>	175	176.5	177.5

Tabla 14. Casos variando Entrehierro

El único parámetro CAD que varía es:

- Diámetro exterior del rotor.

Los casos producidos en el programa son mostrados en la siguiente imagen:

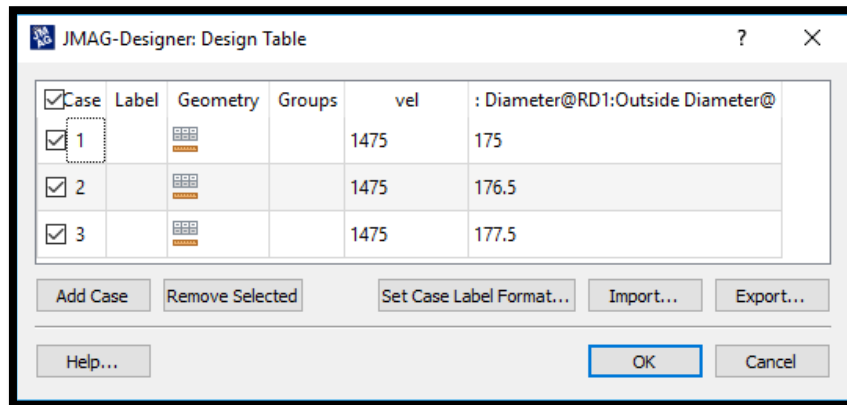


Ilustración 44. Casos producidos

Una vez creados los casos, se realizan las simulaciones y se obtienen resultados para cada medida de anchura del entrehierro. Se conservan todas las configuraciones comentadas en la sección del modelo de referencia; tanto las condiciones como la malla utilizada y el circuito eléctrico impuesto.

A continuación, se comentarán estos resultados y las diferencias entre ellos.

Par electromagnético

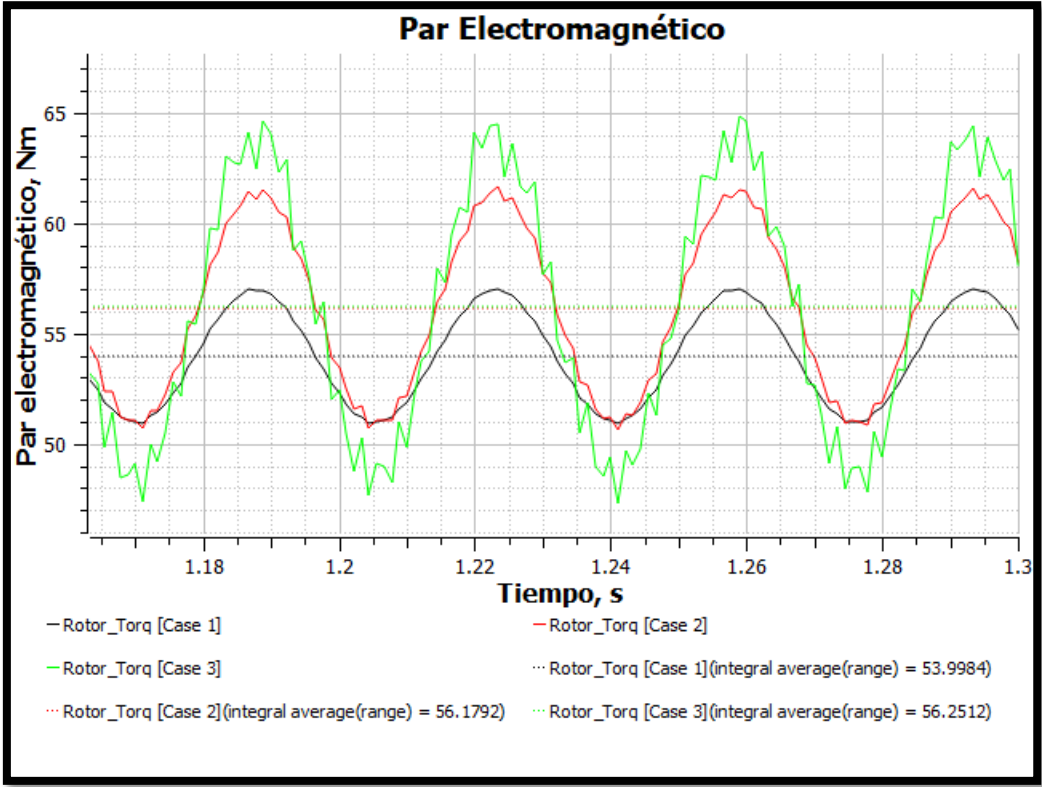


Ilustración 45. Par electromagnético

CASO	1	2	3
Entrehierro (mm)	1.75	1	0.5
Par electromagnético (Nm)	54.00	56.18	56.25

Tabla 15. Par electromagnético.

La variación del entrehierro influye en mayor medida que la de su diámetro. A partir de valores menores que 1 mm en el entrehierro, la gráfica se distorsiona y no se produce demasiada diferencia en el Par medio. Esto es debido a la proximidad de las aperturas de ranura que resultan en un comportamiento muy irregular y distorsionante que supone una limitación en este estudio. Sería necesario unas modificaciones CAD de detalle, fuera del alcance de este trabajo.

Corrientes eléctricas y Factor de potencia

Las corrientes en las bobinas varían de la siguiente forma en relación con el entrehierro:

CASO	1	2	3
Entrehierro (mm)	1.75	1	0.5
Corriente U (A)	10.98	10.03	9.42
Corriente V (A)	10.98	10.03	9.42
Corriente W (A)	10.98	10.02	9.42

Tabla 16. Corrientes

La disminución del entrehierro hace que, a su vez, la corriente de las bobinas del estator disminuya. El efecto es bastante significativo, ya que reducir a 0,5 mm el entrehierro supone una reducción del valor eficaz de la corriente en un 15%.

CASO	1	2	3
Entrehierro (mm)	1.75	1	0.5
Fase U (°)	-33.69	-26.88	-23.00
Fase V (°)	206.31	213.11	216.99
Fase W (°)	86.31	93.11	96.99
FdP (i)	0.8321	0.8919	0.9205

Tabla 17. Fases y Factor de potencia

Sin duda, la principal mejora que produce la reducción del entrehierro es la elevación del factor de potencia. Cuanto menos entrehierro hay, se produce un menor desfase entre la tensión y la corriente de cada fase. Es debido a una menor necesidad de corriente magnetizante.

Potencia y Pérdidas

La potencia total consumida, las pérdidas eléctricas, las pérdidas del hierro, y la potencia útil, varían de la siguiente forma:

CASO	1	2	3
-------------	----------	----------	----------

Entrehierro (mm)	1.75	1	0.5
Potencia Total (W)	11113	10874	10543
Pérdidas Eléctricas (W)	1580	1354	1229
Pérdidas del Hierro(W)	158	163	183
Potencia Útil (W)	8183	8515	8504

Tabla 18. Potencias

Existe una tendencia monótona tanto en la potencia total consumida, como en las pérdidas eléctricas. Ambas disminuyen con la reducción del entrehierro (como era de esperar, dado que lo hace también la corriente), y las pérdidas del hierro aumentan moderadamente. La potencia útil se incrementa.

CASO	1	2	3
Rendimiento (%)	73.63	78.31	80.66

Tabla 19. Rendimiento

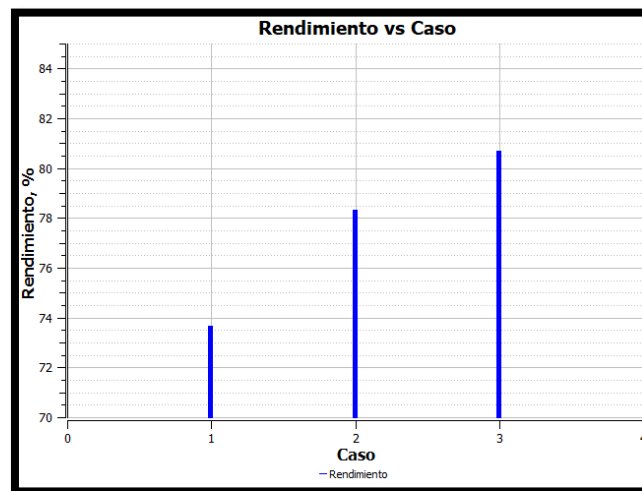


Ilustración 46. Rendimiento

Claramente, la reducción del entrehierro produce en la máquina una mejora de la eficiencia. El entrehierro, por tanto, debe ser lo más estrecho posible, sin llegar a medidas que provoquen problemas mecánicos o de fabricación.

3.5.3 Longitud Axial

Este parámetro está implicado, de manera inversa al Diámetro, en la ecuación de la relación de aspecto del motor.

Se generan tres casos con diferente Longitud axial, utilizando los siguientes valores:

CASO	1	2	3
Longitud Axial (mm)	320	300	280

Tabla 20. Casos variando L

Para generar los casos, el programa pide seleccionar los “parámetros” determinantes que deben variar. Será suficiente con la variación de un único parámetro.

- Longitud del paquete de chapas apiladas

Los casos producidos en el programa son mostrados en la siguiente imagen:

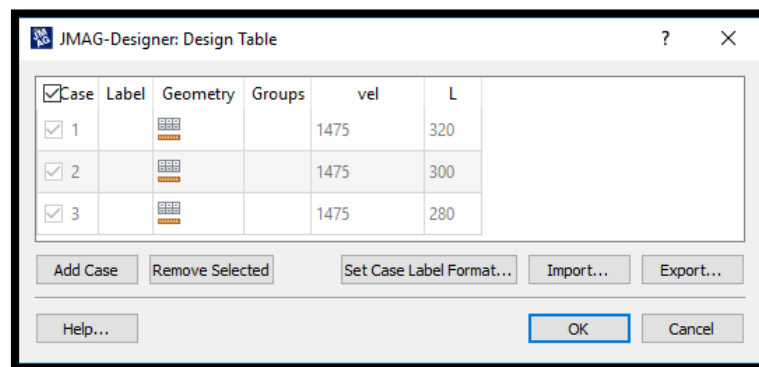


Ilustración 47. Casos producidos

Se conservan todas las configuraciones comentadas en la sección del modelo de referencia; tanto las condiciones como la malla utilizada y el circuito eléctrico impuesto.

A continuación, se comentarán estos resultados y las diferencias entre ellos.

Par electromagnético

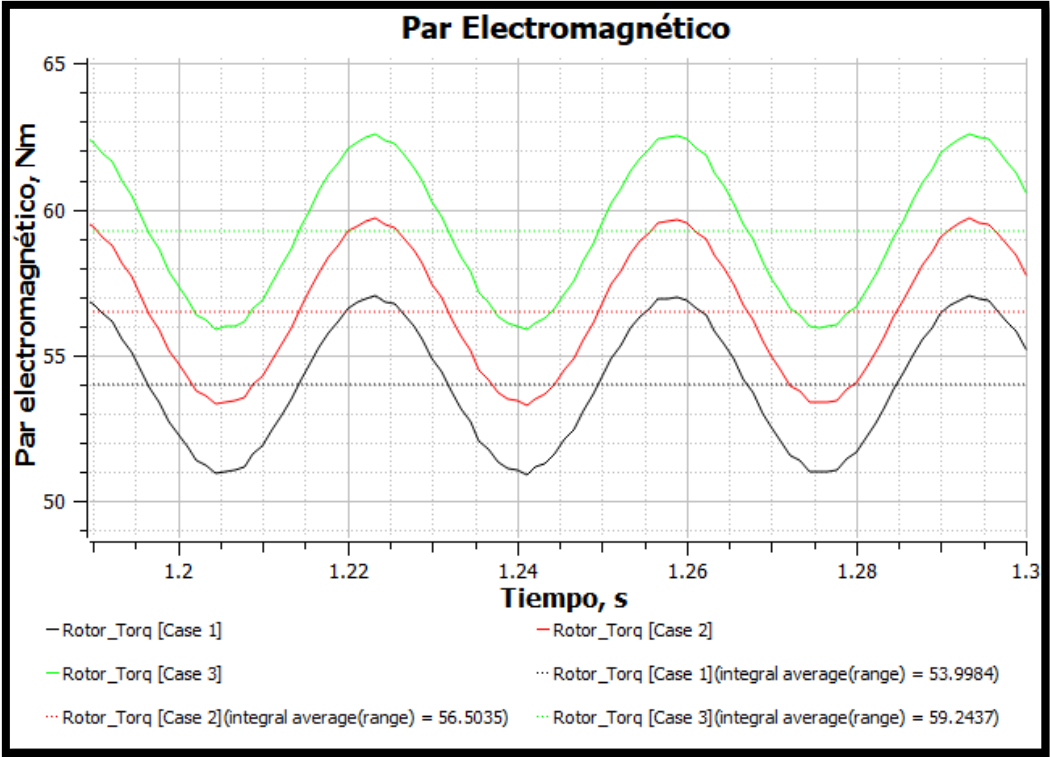


Ilustración 48. Par electromagnético

CASO	1	2	3
Longitud Axial (mm)	320	300	280
Par electromagnético (Nm)	54.00	56.50	59.24

Tabla 21. Par electromagnético

La variación de la longitud del motor influye claramente en el par electromagnético producido. Al disminuir la longitud L 12,5% (de 340 a 280 mm), el par nominal aumenta un 10%.

Corrientes eléctricas y Factor de potencia

Las corrientes en las bobinas varían de la siguiente forma en relación con la longitud axial:

CASO	1	2	3
Longitud Axial (mm)	320	300	280
Corriente U (A)	10.98	11.56	12.21
Corriente V (A)	10.98	11.56	12.21
Corriente W (A)	10.98	11.56	12.21

Tabla 22. Corrientes

La disminución de la longitud hace que la corriente de los conductores del estator aumente. Posteriormente, se comprobará que este aumento producirá mayores pérdidas eléctricas.

CASO	1	2	3
Longitud Axial (mm)	320	300	280
Fase U (°)	-33.69	-33.55	-33.40
Fase V (°)	206.31	206.45	206.60
Fase W (°)	86.31	86.45	86.60
FdP (i)	0.8321	0.8334	0.8349

Tabla 23. Fases y Factor de potencia

Este parámetro tiene una influencia muy escasa en el factor de potencia de la máquina.

Potencia y Pérdidas

La potencia total consumida, las pérdidas eléctricas, las pérdidas del hierro, y la potencia útil, varían de la siguiente forma:

CASO	1	2	3
Longitud Axial (mm)	320	300	280
Potencia Total (W)	11113	11721	12398
Pérdidas Eléctricas (W)	1580	1742	1931

Pérdidas del Hierro (W)**Potencia Útil (W)**

158	164	171
8183	8563	8979

Tabla 24. Potencias

Como era de esperar, las pérdidas eléctricas aumentan con el aumento de la corriente del motor. Las pérdidas del hierro aumentan algo y la potencia total consumida crece de manera proporcional a la reducción de la longitud. La potencia útil se eleva, pero algo menos que la potencia consumida. Esto incidirá en el rendimiento energético

CASO**1****2****3****Rendimiento (%)**

73.63

73.06

72.42

Tabla 25. Rendimiento

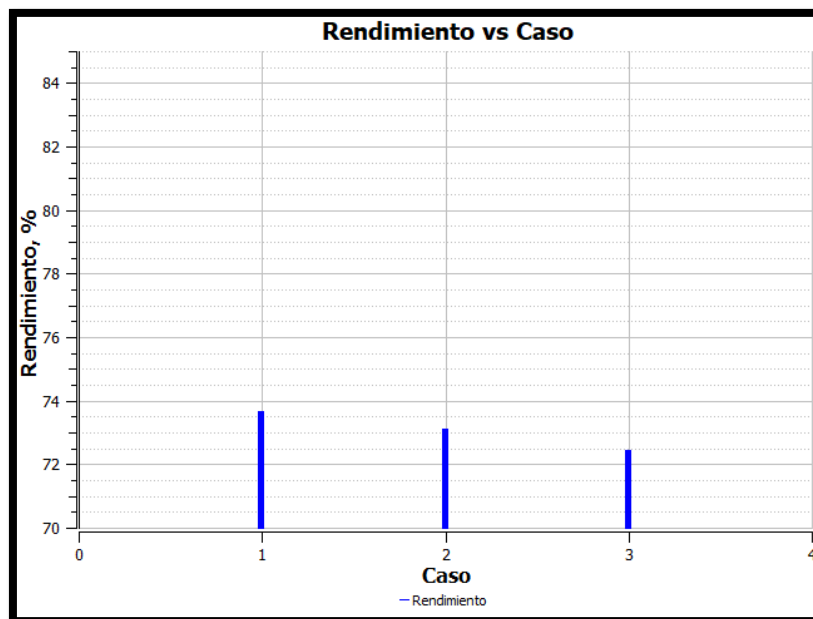


Ilustración 49. Rendimiento

La eficiencia del motor se reduce al disminuir la longitud axial. A pesar de esto, los valores siguen siendo parecidos a los del modelo de referencia y aceptables en términos generales.

Uno de los problemas indirectos de acortar el motor es que, las pérdidas en las cabezas de bobina, no contempladas en este trabajo, que mantienen sus dimensiones, toman mayor relevancia relativa cuando se acorta el motor.

3.6 ELECCIÓN DEL DISEÑO FINAL

Es sabido que el diseño de referencia está altamente influenciado por el programa y, por lo tanto, contiene valores lejos de la realidad de la optimización del motor de inducción.

En este apartado se establece un modelo definitivo siguiendo las recomendaciones de la literatura técnica y la enseñanza obtenida en la primera parte del trabajo. En esa parte previa, se realizó el análisis de los resultados del estudio del diseño de referencia y, posteriormente se estudió la parametrización de las dimensiones principales de la geometría de la máquina. Se intentarán combinar los cambios estudiados por separado, y comprobar que esa combinación muestre en efecto variaciones positivas en la salida.

Se repasarán los conocimientos teóricos generales sobre las máquinas eléctricas, que tratan los aspectos que gobiernan las relaciones básicas del diseño definitivo de la máquina estudiada en el trabajo.

3.6.1 Diámetro del entrehierro y Longitud axial

Ambas medidas forman parte de los parámetros principales que definen un motor de inducción. Se investigarán los conceptos: Relación de aspecto, Coeficiente D^2L y Ecuación general de la potencia aparente

Relación de aspecto. Estandarización

Existe una curva que expresa la relación recomendada entre la longitud efectiva del núcleo magnético y su paso polar (indirectamente con el diámetro). Esta relación no puede ser resultado de una elección arbitraria de las dimensiones principales de la máquina: D y L

$$\lambda = \frac{L}{\pi D/p} = \frac{L}{\tau}$$

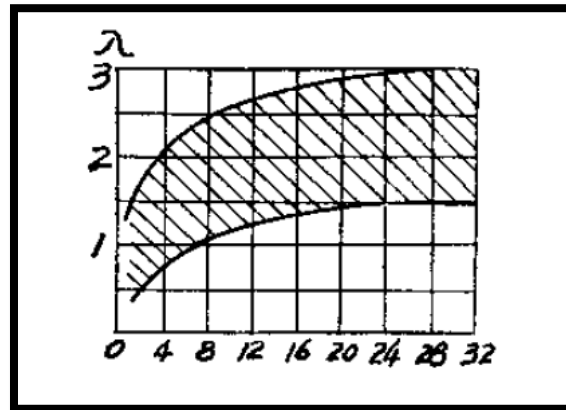


Ilustración 50. Relación recomendada de aspecto

Si la máquina es larga y tubular (grandes valores de relación de aspecto) resulta difícil de refrigerar, mientras que, si la máquina es demasiado corta con relación a su diámetro, la inductancia de dispersión afectará en gran medida al par máximo desarrollado debido a las fugas magnéticas en las cabezas de bobina (muy elevadas). Normalmente la relación de aspecto debe encontrarse entre valores de 1 y 2 para máquinas de 4 polos como se muestra en la gráfica.

Coeficiente D2L y Ecuación general de la potencia

Existe una relación directa entre la potencia de salida del motor de inducción y sus dimensiones principales.

El par producido en una máquina eléctrica es proporcional al producto de la fuerza-magnetomotriz (fmm) por polo y el flujo magnético por polo. Las densidades de estas cantidades están limitadas por el material, y el par puede ser expresado en términos de ambas.

Sabemos que la potencia aparente consumida por un motor trifásico de inducción viene expresada como:

$$Q = 3 \times E_{ph} \times I_{ph}$$

donde:

$$E_{ph} = 4.44 \cdot \Phi \cdot f \times k_w \times T_{ph}$$

k_w : Factor de bobinado (en nuestro caso asumimos un valor común de 0.955)

T_{ph} : vueltas por fase

Resumiendo:

$$Q = 3 \times (4.44 \cdot \Phi \cdot f \times k_w \times T_{ph}) \times I_{ph}$$

Atendiendo a las relaciones de la frecuencia con la velocidad de sincronismo de la máquina, el flujo con la inducción magnética y el área del entrehierro:

$$Q = C_0 \cdot D^2 L \cdot n_s$$

n_s : Velocidad de sincronismo

$C_0 = 1.11 \cdot \pi^2 \cdot k_w \cdot B_{av} \cdot ac \cdot 10^{-3}$: Coeficiente de salida de nuestra máquina

Esta ecuación relaciona la potencia aparente de salida de la máquina con sus dimensiones principales D y L, con su velocidad de sincronismo, y con sus cargas magnética y eléctrica específicas.

La cantidad D^2L tiene unidades de m^3 y se denomina volumen de la máquina.

Como se explicó en el apartado de la relación de aspecto de la máquina, variando la longitud y el diámetro se pueden establecer diferentes cualidades en el funcionamiento:

- Coste mínimo: $1.5 < L/\tau < 2$
- Buena eficiencia: $L/\tau = 1.5$
- Buen diseño (general): $L/\tau = 1$
- Buen factor de potencia: $1 < L/\tau < 1.25$

A pesar de esto, hay que tener en cuenta también el tamaño total del motor. Estos criterios se aplican con la precaución del tamaño de la máquina. A veces no es posible establecer la relación de aspecto deseada debido a que el motor es demasiado pequeño.

A la hora de proponer nuevos diámetros para el entrehierro, la condición fundamental es comprobar que la relación de aspecto de la máquina es correcta.

Aplicando esto a nuestro diseño

$$\lambda = \frac{L}{\pi D/p} = \frac{320}{\pi \cdot 175/4} = 2.33$$

La actual medida del diámetro del rotor es menor de la debida, por lo que se aumentará para que la relación de aspecto sea del orden de 1.5.

$$D = \frac{L}{\pi \lambda /4} = \frac{320}{\pi \cdot 1.5/4} = 271.62 \text{ mm}$$

El diámetro elegido es de **200 mm**, y la longitud del motor se modificará (se cambiará L de 320 a **300 mm**) para reducir la relación de aspecto y no deformar demasiado la sección de este.

$$\lambda = \frac{L}{\pi D/p} = \frac{300}{\pi \cdot 200/4} = 1.9$$

Con esta nueva relación de aspecto, se entraría en el rango recomendado, aunque lo ubica cerca de valores dimensionales con dificultad de refrigeración.

3.6.2 Entrehierro

La longitud del entrehierro contribuye al cambio de diferentes magnitudes dentro de un motor de inducción: Factor de potencia, Pérdidas y ruido de pulsación, y Capacidad de sobrecarga.

La magnitud más importante afectada es el factor de potencia. Cuanto mayor sea la anchura del entrehierro, más amperios se necesitarán para que pase el

flujo magnético a través de él (valor elevado de corriente magnetizante). La corriente magnetizante tiende a establecer el carácter inductivo al circuito, disminuyendo el factor de potencia al aumentar su valor. Para tener un buen factor de potencia, es necesario que el entrehierro sea lo más estrecho posible.

Las razones que pueden limitar por debajo la anchura del entrehierro son puramente mecánicas, ya sea por dificultad de fabricación o riesgos de colisión estator-rotor durante el funcionamiento.

El valor del entrehierro, por tanto, deberá estar comprendido entre 0.25 y 0.80 mm, que son los límites del rango de medidas recomendadas por la bibliografía utilizada.

El valor inicial del entrehierro en el modelo de referencia es de 1,75 mm, una magnitud demasiado elevada. La mejora del motor se producirá disminuyendo esta medida por lo menos hasta los 0,8 mm. Esto se reflejará sobre todo en el factor de potencia y en la eficiencia de la máquina, como se ha podido observar en el estudio paramétrico.

La medida escogida para el entrehierro es **0.8 mm**, ya que cuanto más se reduce este valor, en los resultados del estudio van apareciendo distorsiones provocadas por la estrechez en la que trabajan conjuntamente los campos magnéticos producidos por rotor y estator.

3.6.3 Otros factores

Además de los parámetros geométricos básicos, se describe a continuación la información de la teoría de máquinas eléctricas acerca de otro tipo de factores de dos zonas: Ranuras del estator y Jaula del rotor.

Diseño del estator

La sección del estator está conformada por una serie de ranuras con una geometría determinada. La geometría utilizada en estas ranuras, junto con la estructura del circuito eléctrico (número de fases, número de vueltas, ramas en paralelo, capas, etc.) tiene influencia sobre el funcionamiento del motor.

En un motor de inducción nos encontramos con dos conceptos clave:

- *Carga Magnética específica:*

La carga magnética total puesta en juego se refiere a:

$$\text{Flujo total} = \Phi \cdot p$$

p : Número de polos

La carga magnética específica es:

$$B_{av} = \frac{\text{Flujo total en el entrehierro}}{\text{Área del camino del flujo en el entrehierro}} = \frac{\Phi p}{\pi D L}$$

Los valores normales de carga magnética en una máquina como la nuestra se sitúan entre 0.3 y 0.5 Wb/m².

- *Carga Eléctrica específica:*

La carga eléctrica total puesta en juego se refiere a:

$$\text{Carga eléctrica total} = I_z \cdot Z$$

I_z : Corriente en un conductor

Z : Número de conductores en el estator

La carga eléctrica específica es:

$$ac = \frac{\text{Carga eléctrica total}}{\text{Longitud interna de la armadura}} = \frac{I_z Z}{\pi D}$$

Los valores normales de carga eléctrica en una máquina como la que se estudia se sitúan entre 5000 y 45000 ac/m.

A la vista de los conceptos explicados, el objetivo a resolver son las cargas magnética y eléctrica que se establecerán en el diseño. Se pueden elegir los valores recomendados de 0.4 Wb/m^2 y 20000 ac/m .

Como consecuencia de estos valores, se obtienen los siguientes:

$$\Phi = \frac{\pi D L B_{av}}{p} = \frac{\pi \cdot 0.2 \cdot 0.3 \cdot 0.4}{4} = 0.01885 \text{ Wb}$$

$$I_z Z = \pi D a c = \pi \cdot 0.2 \cdot 20000 = 12566 \text{ A en el estator}$$

Conociendo el flujo por polo deseado, se puede saber el número de vueltas que debe tener cada fase en cada sistema polar.

$$T_{ph} = \frac{E_{ph}}{4.44 \cdot \Phi \cdot f \times k_w} = \frac{415}{4.44 \cdot 0.01885 \cdot 50 \cdot 0.955} = 104 \text{ vueltas}$$

Como existen 2 ranuras para cada fase en cada polo, cuatro ranuras en cada sistema polar, el número de conductores por ranura será 52.

Si tenemos 52 conductores en cada ranura y hay 24 ranuras en total, hay un total de $Z = 1248$ conductores en el estator.

La corriente en cada conductor (valor eficaz) será, por tanto:

$$I_z = \frac{12566}{1248} = 10 \text{ A}$$

Una vez obtenida la corriente que atraviesa los conductores, se puede establecer una sección que resulte en una densidad de corriente apta (alrededor de 4). Por ejemplo, 3,3 obteniendo una medida entera industrial.

$$a_s = \frac{I_s}{\delta_s} = \frac{10}{3.3} \approx 3 \text{ mm}^2$$

Por otro lado, las ranuras del estator deben mantener una proporción entre 3 y 6 en sus dimensiones. En el caso predeterminado por JMAG-Express, las medidas son 68.84 y 15,31 mm, es decir, alrededor de 4.5. El diseño geométrico de las ranuras se puede dejar de esta forma.

Diseño del rotor

En este trabajo se diseña un rotor de jaula de ardilla. Esto significa que está compuesto por barras conductoras de aluminio en las que se induce una f.e.m. a partir del campo magnético giratorio excitado por el estator.

Lo más importante en este apartado es la selección del número de barras. Para esto hay que tener en cuenta el número de ranuras del estator, ya que hay distribuciones prohibidas que dan lugar a un mal funcionamiento.

- El número de barras no debe ser igual al de ranuras ni ser mayor que su producto por 1.25.
- La diferencia entre ellas no debe ser igual al número de polos de la máquina, y tampoco igual a dos, tres o cinco veces éste.
- Los números impares de barras del rotor tampoco son recomendables.

Algunas configuraciones comprobadas para un motor de inducción de 4 polos son las siguientes:

$$S_s/S_r = \frac{24}{34}, \frac{36}{28}, \frac{36}{44}, \frac{36}{45}, \frac{48}{38}, \frac{48}{36}, \frac{48}{40}, \frac{48}{57}$$

El valor de la densidad de corriente en las barras es otro parámetro por calcular, teniendo en cuenta la resistividad y la forma de la sección.

Un diseño que favorezca el arranque deberá tener mayor resistencia para producir mayor par. Este diseño tiene el inconveniente de que las pérdidas en el cobre serán también elevadas. Si, por el contrario, las barras ofrecen baja

resistencia, el motor tendrá buenas condiciones de funcionamiento en régimen estacionario, pero peor comportamiento en arranque

Teniendo en cuenta estos efectos, los valores recomendados para la densidad de corriente en las barras están entre 5 y 6 A/mm².

Para tener una mezcla de buenas condiciones en ambos regímenes (arranque y funcionamiento), se utilizan barras dobles, de secciones diferentes.

3.6.4 Resumen

Después de analizar varios aspectos del motor, se decide actuar solo en el ámbito geométrico fundamental, y variar las medidas: Diámetro del entrehierro, Longitud Axial y Entrehierro. El motivo de esta elección es el aprovechamiento de la información obtenida en el análisis paramétrico del motor a la velocidad nominal. No obstante, también se ha considerado oportuno describir otras posibles mejoras al modelo, argumentándolas de forma teórica.

Finalmente, las medidas fundamentales del diseño definitivo serán:

Diámetro del entrehierro (mm)	Longitud Axial (mm)	Entrehierro (mm)
200	300	0.8

Tabla 26. Medidas fundamentales definitivas

3.7 DISEÑO FINAL

En esta parte final del proyecto, se muestra el resultado final de todo el trabajo, que es la representación y el análisis de un modelo mejorado (el proceso ha sido comentado durante su estudio). Se estudiarán los mismos objetivos que en el modelo de referencia, siguiendo la estructura ya utilizada.

3.7.1 Modelo

Se han realizado los cambios comentados en el apartado anterior (medidas D, L y Entrehierro), resultando la geometría y mallado de estudio de las figuras.

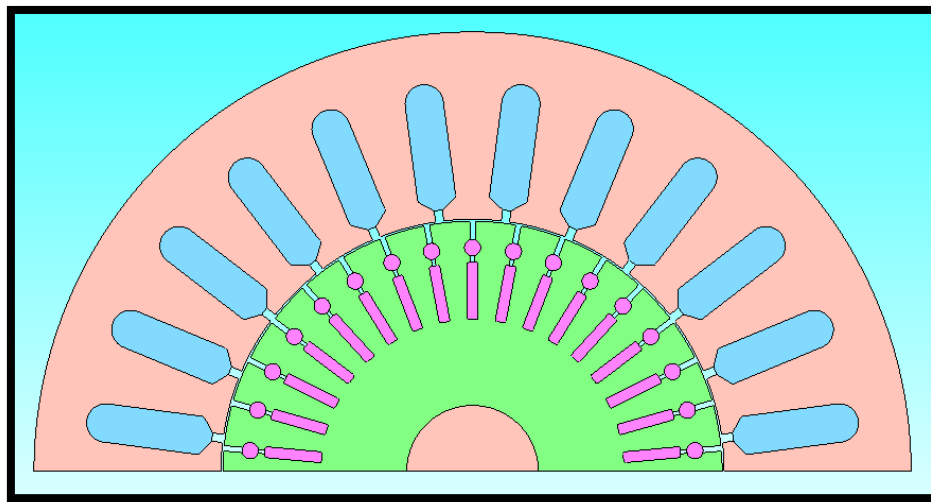


Ilustración 51. Esquema básico de la sección del motor

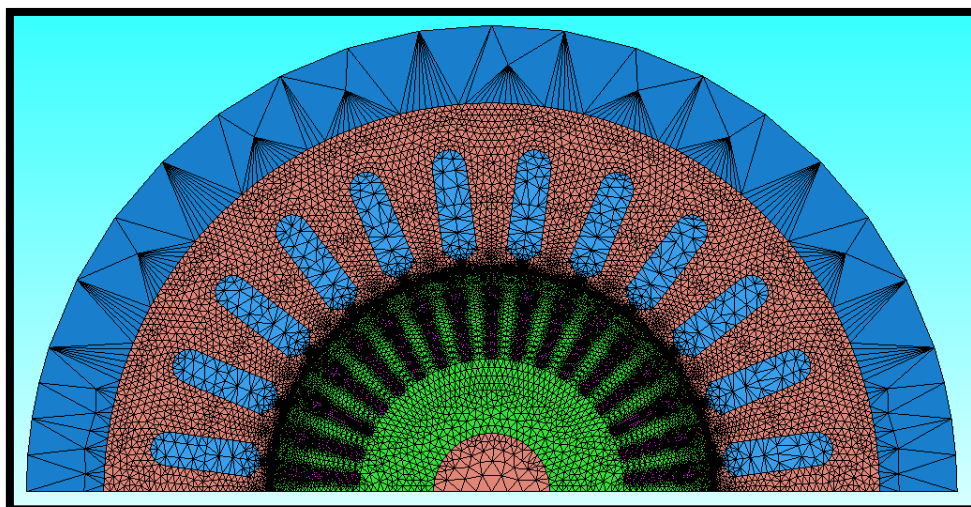
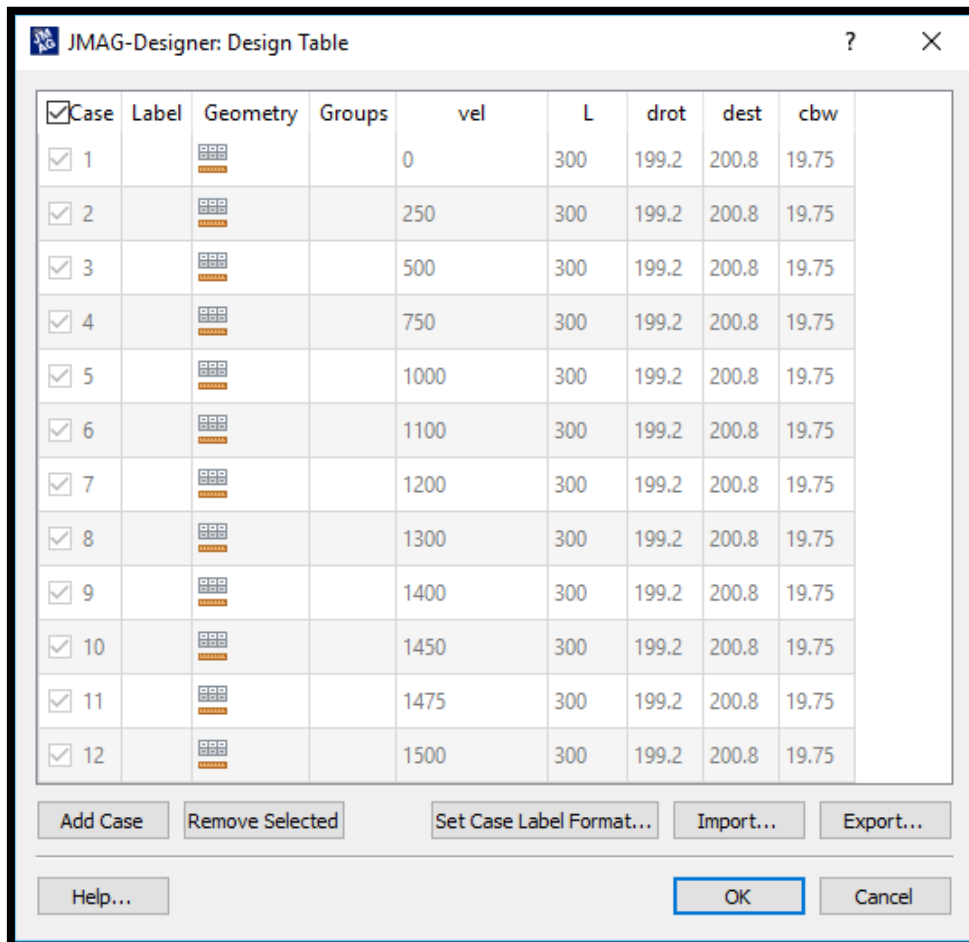


Ilustración 52. Esquema del mallado

Se siguen utilizando el mismo circuito, los mismos materiales, el mismo mallado y las mismas condiciones y propiedades de estudio (consultar sección “Simulación y análisis del modelo de referencia” para más detalle).

El modelo se estudiará a las mismas velocidades que el de referencia:



The screenshot shows the 'JMAG-Designer: Design Table' window. It contains a table with 12 rows, each representing a simulation case. The columns are: Case (with a checkbox), Label, Geometry (with a grid icon), Groups, vel (velocity), L, drot, dest, and cbw. All checkboxes in the 'Case' column are checked. The 'vel' column shows values from 0 to 1500 in increments of 100. The other columns have constant values: L=300, drot=199.2, dest=200.8, and cbw=19.75. Below the table are buttons for 'Add Case', 'Remove Selected', 'Set Case Label Format...', 'Import...', 'Export...', 'Help...', 'OK', and 'Cancel'.

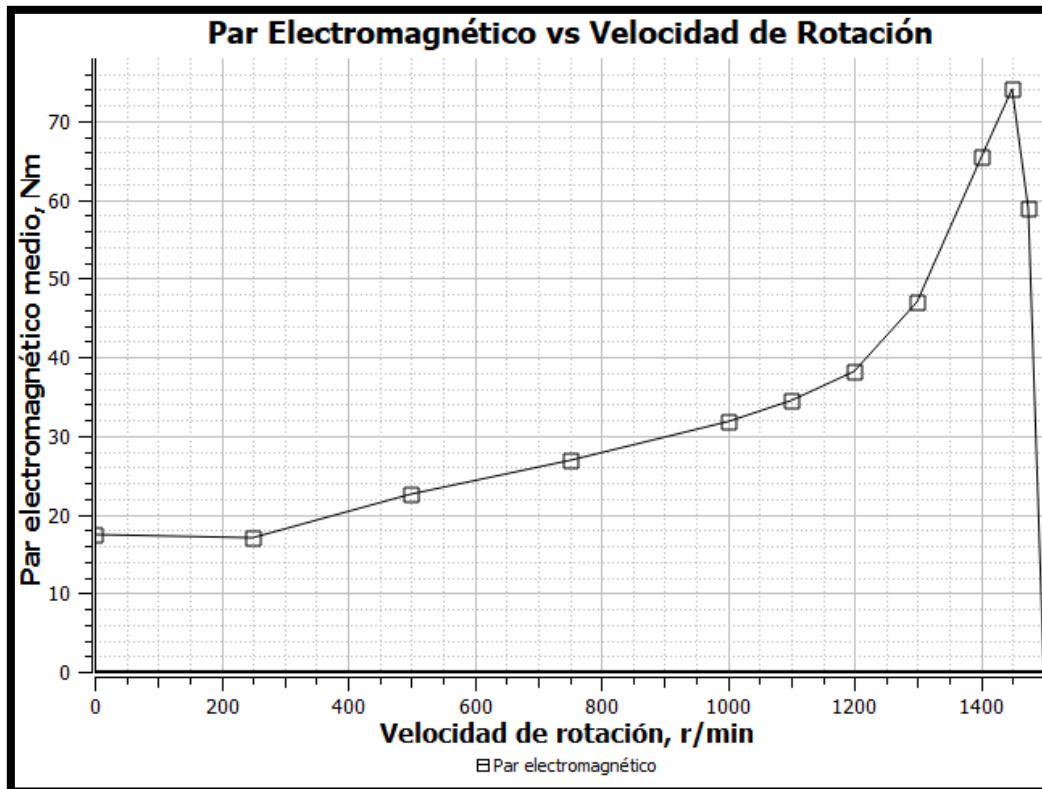
<input checked="" type="checkbox"/> Case	Label	Geometry	Groups	vel	L	drot	dest	cbw
<input checked="" type="checkbox"/> 1				0	300	199.2	200.8	19.75
<input checked="" type="checkbox"/> 2				250	300	199.2	200.8	19.75
<input checked="" type="checkbox"/> 3				500	300	199.2	200.8	19.75
<input checked="" type="checkbox"/> 4				750	300	199.2	200.8	19.75
<input checked="" type="checkbox"/> 5				1000	300	199.2	200.8	19.75
<input checked="" type="checkbox"/> 6				1100	300	199.2	200.8	19.75
<input checked="" type="checkbox"/> 7				1200	300	199.2	200.8	19.75
<input checked="" type="checkbox"/> 8				1300	300	199.2	200.8	19.75
<input checked="" type="checkbox"/> 9				1400	300	199.2	200.8	19.75
<input checked="" type="checkbox"/> 10				1450	300	199.2	200.8	19.75
<input checked="" type="checkbox"/> 11				1475	300	199.2	200.8	19.75
<input checked="" type="checkbox"/> 12				1500	300	199.2	200.8	19.75

Ilustración 53. Casos a diferentes velocidades

3.7.2 Resultados

Dentro de todos los resultados entregados por el programa, interesan los citados a continuación:

- Onda de par electromagnético instantáneo
- Pérdidas: Joule y en el Hierro
- Onda de corriente eléctrica instantánea
- Ondas de potencias eléctricas instantáneas en las bobinas del estator

Par mecánico*Ilustración 54. Par electromagnético*

El valor medio se calcula en el tramo final de la simulación desde 1.2 segundos a 1.3 segundos y está graficado en la figura. Es el Par Electromagnético. En la gráfica se observa que han crecido los pares máximo y nominal y también ha disminuido ligeramente el par de arranque. Se pueden observar los siguientes valores destacados:

- Par en cortocircuito: $17.50 \text{ N} \cdot \text{m}$ (0 rpm)
- Par máximo: $74.14 \text{ N} \cdot \text{m}$ (1450 rpm)
- Par nominal: $58.88 \text{ N} \cdot \text{m}$ (1475 rpm)

Para obtener el par mecánico útil en la salida, se ha de convertir el par en potencia electromagnética y restar las pérdidas en el acero, para luego dividir por la velocidad de trabajo.

$$T_{Mecánico} = \frac{T_{Elec} \cdot \omega_{trabajo} - P_{Acero}}{\omega_{trabajo}}$$

Se obtiene la siguiente gráfica de Par mecánico:

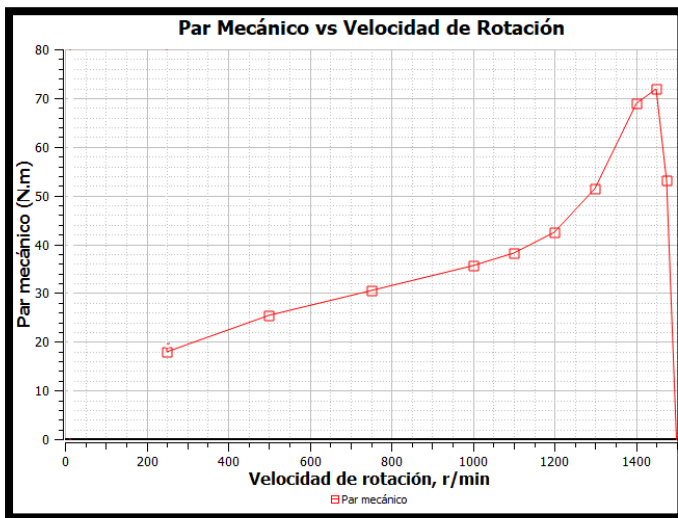


Ilustración 55. Par mecánico referencia

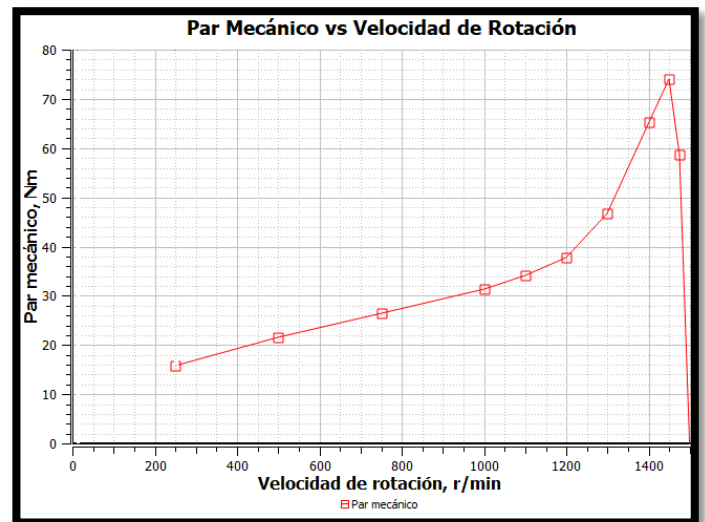


Ilustración 56. Par mecánico definitivo

Presenta la misma anomalía gráfica en el arranque (al calcularlo mediante potencias el valor se eleva a infinito). En bajas velocidades se puede aproximar el valor con la prolongación de la curva.

Comparándolo con el Par mecánico obtenido con el diseño de referencia, comprobamos que se ha ganado potencia mecánica de salida en las velocidades de trabajo del motor, aunque se ha perdido algo de par de arranque. Para mejorar esta desventaja, se debería trabajar en el diseño de la doble jaula del rotor, para que esta cobre un carácter más resistivo durante las bajas velocidades.

Corrientes eléctricas y Factor de potencia

A partir de las corrientes de las tres bobinas se calcula una corriente promedio equilibrada consumida por las tres fases del motor, representativa del motor.

En la siguiente tabla se muestran los valores aproximados de fase de cada corriente, en cada uno de los casos estudiados.

CASO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
U	-59	-58	-58	-57	-56	-56	-54	-52	-43	-32	-24
V	-179	-178	-178	-177	-176	-176	-174	-172	-163	-152	-144
W	61	62	62	63	64	64	66	68	77	88	96

Tabla 27. Corrientes a diferentes velocidades

Para la velocidad de 1475 rpm (asignada), el factor de potencia será:

$$\cos \varphi_U = \cos 24^\circ = 0.9115 \text{ (i)}$$

Por tanto,

$$\bar{I}_U = 10.16 \text{ A} \angle -24^\circ$$

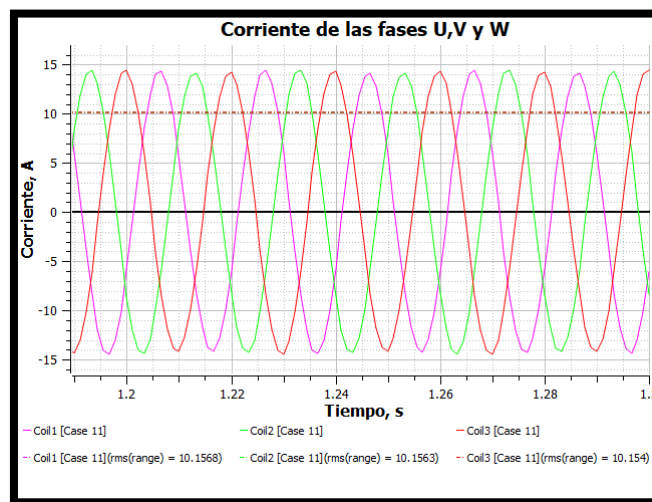


Ilustración 55. Corrientes instantáneas de las fases U, V y W

Se comprueba que cada corriente está a 120 grados de las otras dos, en secuencia directa. Por lo tanto, podemos admitir que el valor eficaz equivalente (equilibrio trifásico) de la corriente nominal del motor es de:

$$I_{1475} = 10.16 \text{ A}$$

Analizando de la misma forma, la corriente en cortocircuito es:

$$\bar{I}_U = 27.86 \text{ A} \angle -59^\circ$$

$$\bar{I}_V = 27.73 \text{ A} \angle 181^\circ$$

$$\bar{I}_W = 28.09 \text{ A} \angle 61^\circ$$

A continuación, se presenta una tabla con los valores de corriente, desfase (respecto de la tensión) y factor de potencia en cada caso:

Velocidad (rpm)	VALOR RMS (A)	DESFASE (°)	FDP (i)
0	27.89	-58.96	0.5156
250	27.56	-58.27	0.5259
500	27.08	-57.66	0.5350
750	26.36	-57.03	0.5442
1000	25.39	-56.17	0.5567
1100	24.90	-55.55	0.5657
1200	24.28	-54.35	0.5829
1300	23.30	-51.54	0.6220
1400	20.56	-43.12	0.7300
1450	15.73	-31.88	0.8492
1475	10.16	-24.29	0.9115

Tabla 28. Corriente a diferentes velocidades

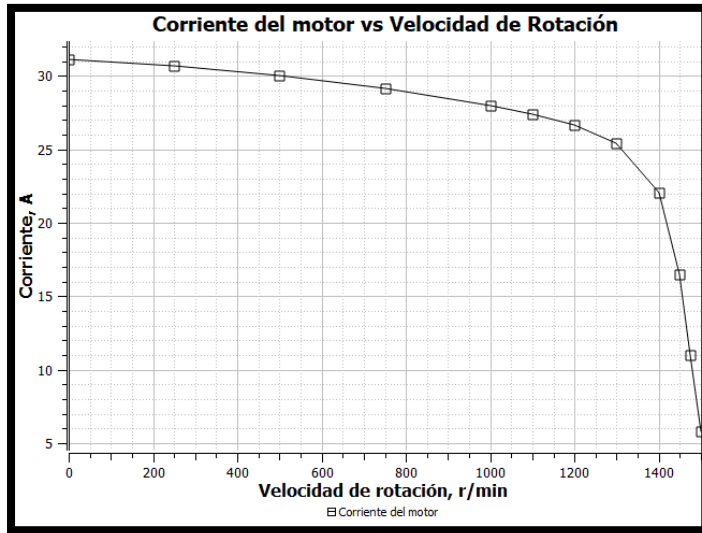


Ilustración 58. Corriente referencia

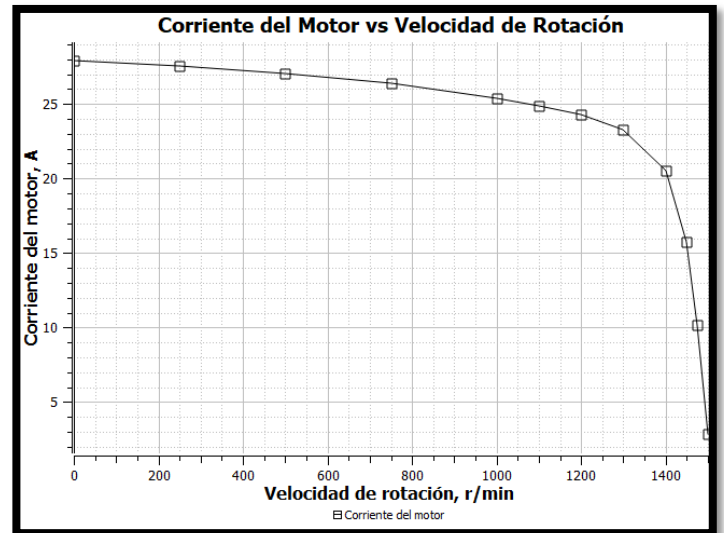


Ilustración 59. Corriente definitiva

La corriente en el motor disminuye considerablemente con los cambios geométricos realizados. El efecto se observa claramente en operación a baja velocidad.

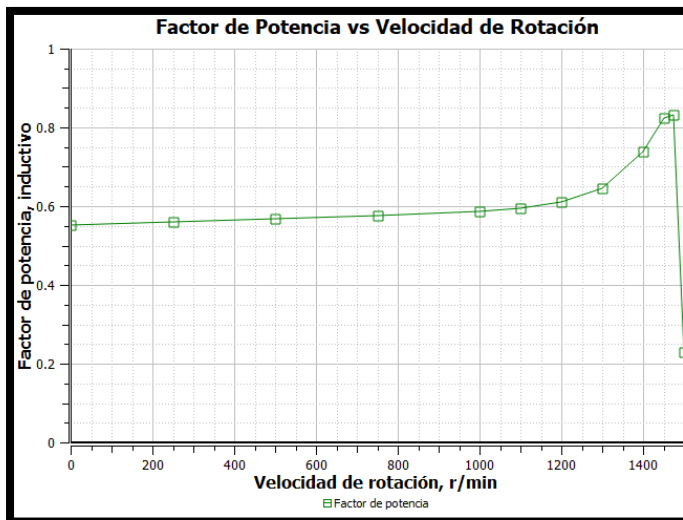


Ilustración 60. Factor de potencia referencia

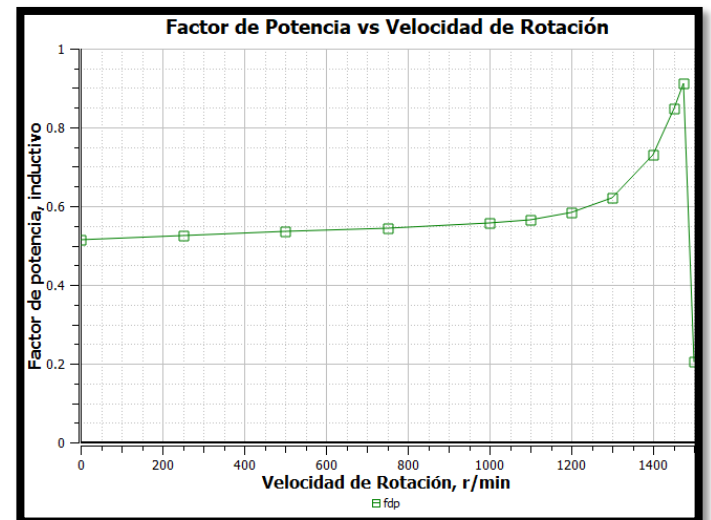


Ilustración 56. Factor de potencia definitivo

La corriente ha disminuido en valor eficaz, y también en desfase con la tensión. Por ello, el factor de potencia mejora bastante a velocidades cercanas a la nominal, como se puede apreciar en las gráficas.

Potencia

A velocidad nominal, la potencia instantánea de la fase U es la siguiente:

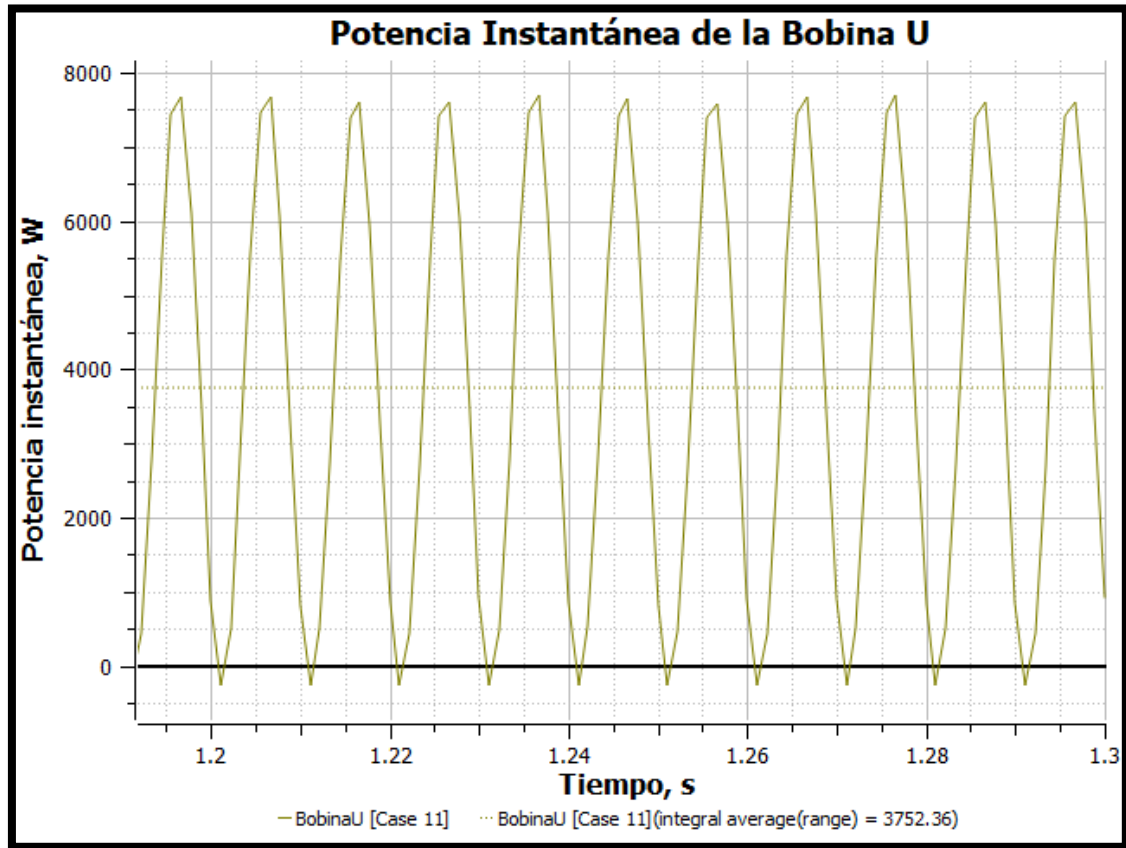


Ilustración 57. Potencia instantánea a 1475 rpm

La potencia de la bobina de la fase U a 1475 rpm es una onda casi sinusoidal, de frecuencia 100 Hz (dos veces la de la fuente). El valor de la potencia activa de la fase U es, por tanto:

$$P_U = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = 3752 \text{ W}$$

La siguiente tabla recoge la información de la potencia media por periodo de cada fase en cada caso.

Velocidad (rpm)	P.Activa (W) FASE U	P.Activa (W) FASE V	P. Activa (W) FASE W	TOTAL (W)
0	5882	5867	5967	17716
250	5876	5873	5877	17627
500	5873	5872	5872	17617
750	5814	5824	5813	17451
1000	5730	5729	5733	17191
1100	5710	5709	5710	17129
1200	5738	5738	5738	17215
1300	5876	5876	5876	17627
1400	6084	6084	6082	18251
1450	5414	5415	5416	16245
1475	3752	3752	3752	11257

Tabla 29. Potencia a diferentes velocidades

La siguiente gráfica muestra la información de la potencia activa consumida por el motor, respecto a la velocidad de rotación de la máquina.

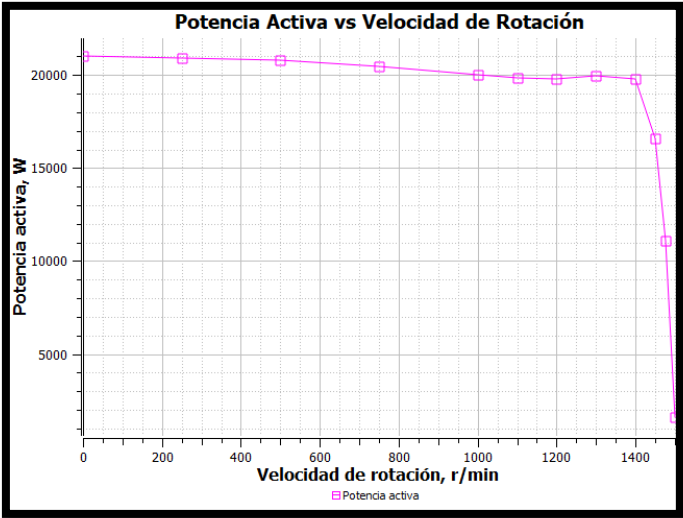


Ilustración 63. Potencia referencia

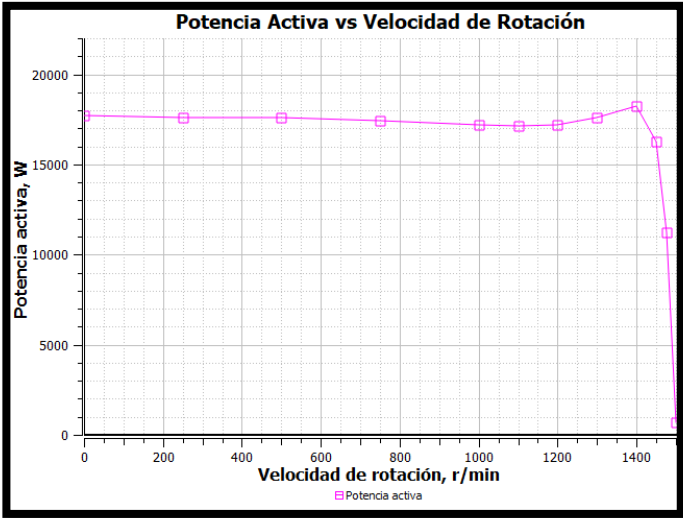


Ilustración 64. Potencia definitiva

La potencia nominal del motor es de 11257 W. Si se establecen las condiciones de potencia máxima, el motor podría llegar a poner en juego 18251 W (1400 rpm). Se observa una mejora de la curva de potencia, ya que se mantiene e incluso mejora la potencia a la velocidad de trabajo, y se reduce en la puesta en marcha (arranque).

Pérdidas de potencia

Pérdidas eléctricas

En las imágenes se muestra un espectro de los valores de densidad de pérdidas Joule en el estator y el rotor, a 1475 rpm.

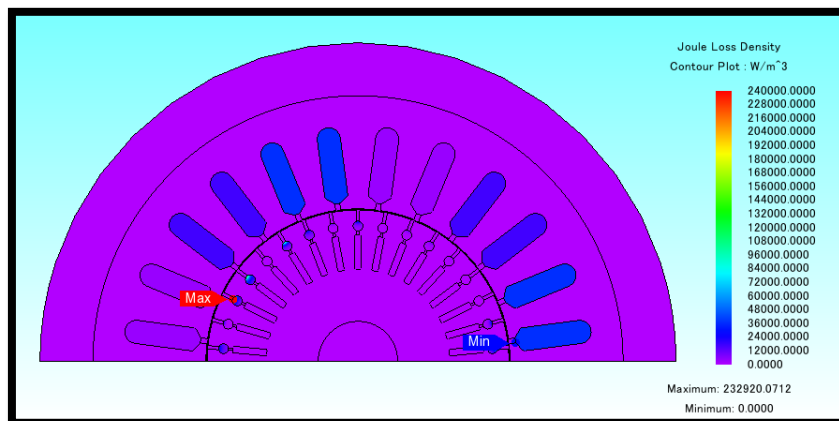


Ilustración 65. Pérdidas eléctricas a 1475 rpm

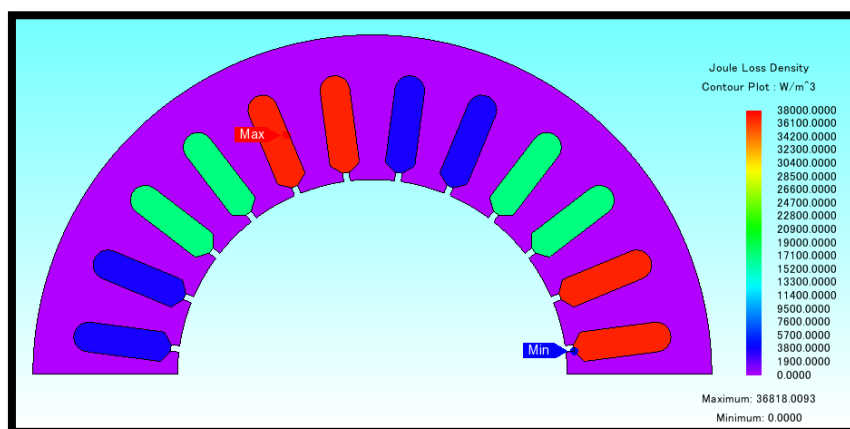


Ilustración 66. Pérdidas eléctricas del estator (1475)

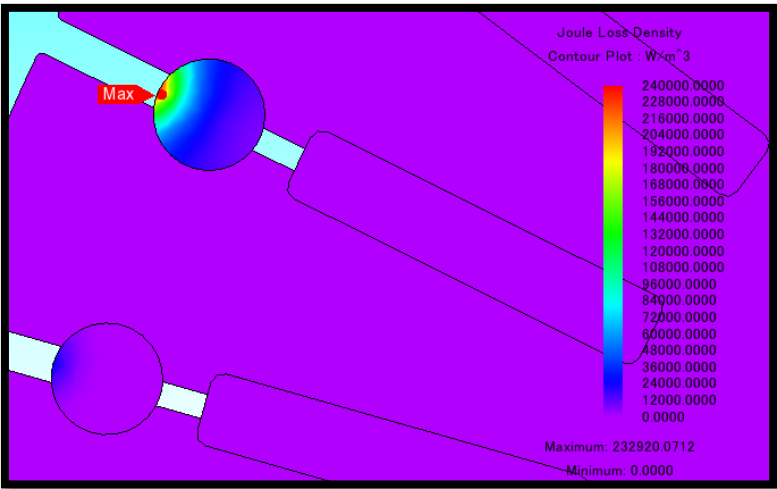


Ilustración 67. Pérdidas eléctricas del rotor (1475)

Las curvas de pérdidas Joule instantáneas en cada parte de la máquina, se representan en el siguiente gráfico respecto al tiempo de simulación:

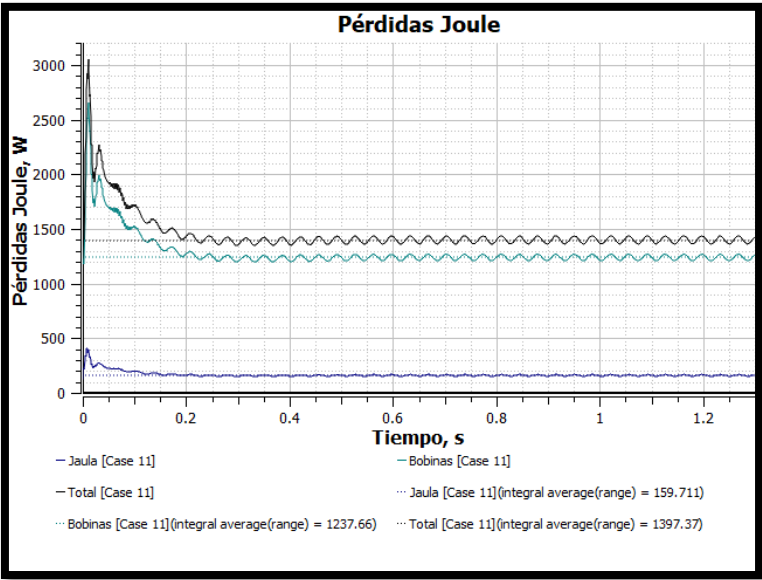


Ilustración 68. Pérdidas eléctricas instantáneas a 1475 rpm

Las pérdidas a diferentes velocidades de rotación en las bobinas y la jaula (las demás partes no presentan pérdidas significativas de este tipo) son mostradas en la siguiente tabla:

Velocidad (rpm)	Bobinas (W)	Jaula (W)	Total (W)
0	9338	3300	12638
250	9115	3061	12176
500	8797	2754	11551
750	8339	2303	10642
1000	7737	1732	9469
1100	7439	1484	8923
1200	7077	1242	8320
1300	6517	1006	7523
1400	5071	707	5778
1450	2969	399	3368
1475	1238	160	1397

Tabla 30. Pérdidas eléctricas a diferentes velocidades

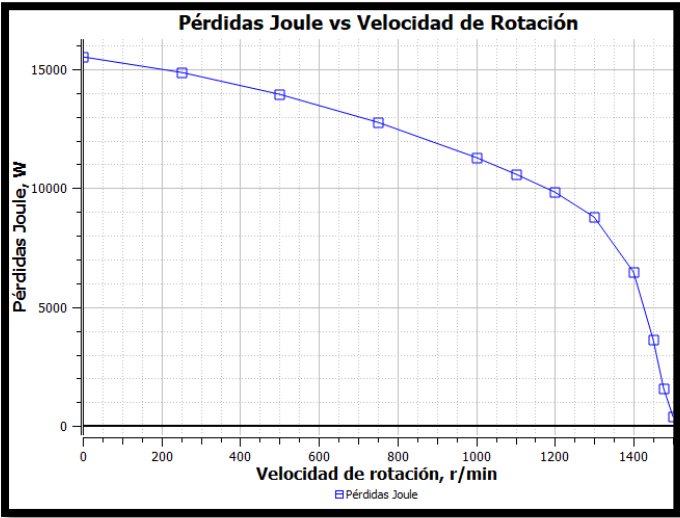


Ilustración 69. Pérdidas eléctricas referencia

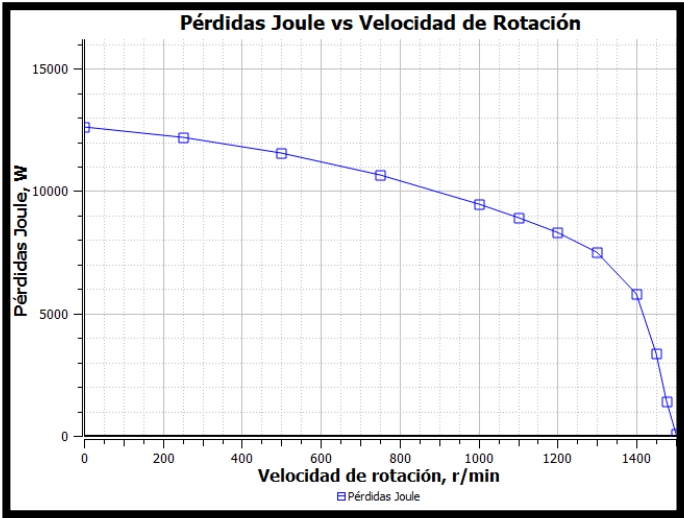


Ilustración 70. Pérdidas eléctricas definitivas

Comparando las pérdidas de los dos diseños, se reducen en el definitivo. Al mantenerse la potencia nominal, esto significará que la eficiencia del motor será

mayor. Un diseño óptimo debe minimizar las pérdidas, a la vez que mantiene o mejora la potencia de salida.

Pérdidas en el hierro

Las pérdidas por histéresis y corrientes parásitas (hierro) se reparten por todo el acero, acumulándose sobre todo en la zona próxima a las ranuras y al entrehierro. La siguiente imagen corresponde a la simulación a 1475 rpm.

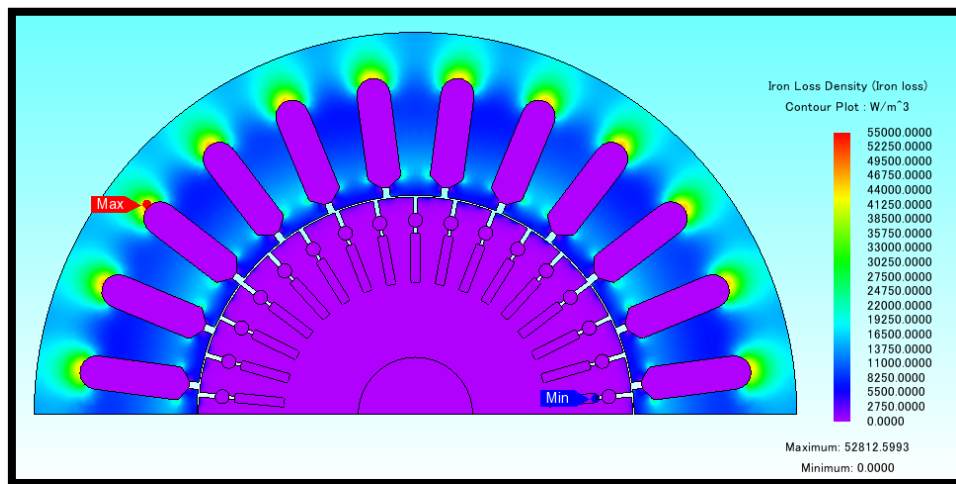


Ilustración 71. Pérdidas del hierro

La siguiente imagen es una vista más detallada del entrehierro.

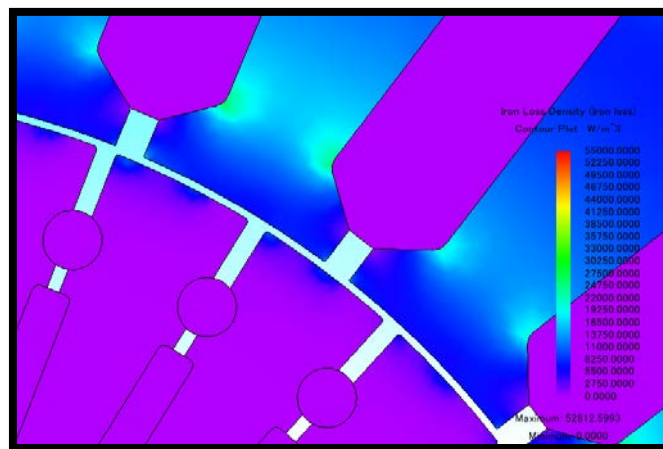


Ilustración 72. Pérdidas del hierro en el entrehierro

En la tabla se muestran los valores de pérdidas por histéresis a cada velocidad de trabajo.

Velocidad (rpm)	Estator (W)	Rotor (W)	Total (W)
0	239	34	273
250	294	61	355
500	353	90	443
750	350	92	442
1000	333	78	411
1100	314	68	381
1200	288	61	349
1300	257	51	308
1400	218	38	257
1450	198	21	220
1475	193	9	202

Tabla 31. Pérdidas del hierro a diferentes velocidades

Esta vez, las pérdidas en el hierro son del orden del 15 % de las pérdidas eléctricas. En las gráficas de contorno, se puede ver que la culata del estator está mucho mejor aprovechada magnéticamente, con mayores valores de densidad de pérdidas en el hierro.

Eficiencia

Para obtener la potencia útil del motor, basta con restarle las pérdidas en el acero a la potencia electromagnética obtenida a raíz del par electromagnético calculado por el programa.

$$P_{\text{Útil}} = T_{\text{Elec}} \cdot \omega_{\text{trabajo}} - P_{\text{Acero}}$$

A continuación, se muestra la Potencia Útil resultante en cada velocidad estudiada:

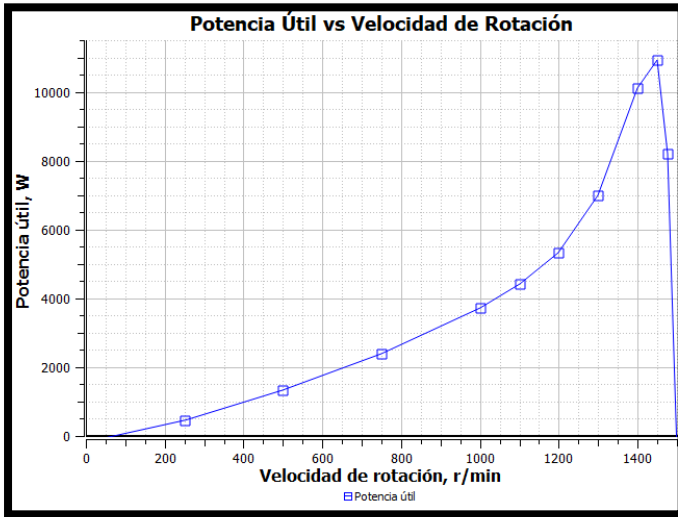


Ilustración 73. Potencia útil referencia

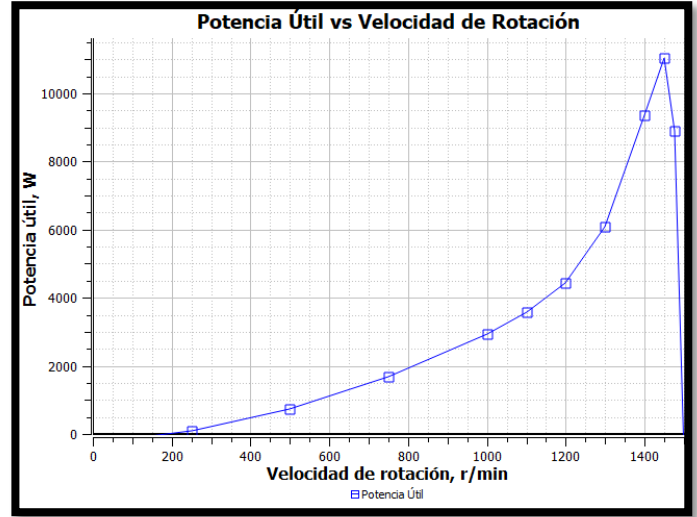


Ilustración 7458. Potencia útil definitiva

- Potencia útil máxima: 11039 W (1450 rpm)
- Potencia útil nominal: 8895 W (1475 rpm)

La potencia útil nominal crece de 8192 W del diseño de referencia, a 8895 W (incremento importante). También aumenta la potencia útil máxima. El rendimiento o eficiencia del nuevo diseño a las diferentes velocidades es:

Velocidad (rpm)	Rendimiento
0	0.00
250	0.53
500	4.16
750	9.60
1000	17.00
1100	20.95
1200	25.81
1300	34.52
1400	51.20
1450	67.95
1475	79.02

Tabla 32. Rendimiento a diferentes velocidades

La eficiencia del motor a 1475 rpm es del 79%. El valor ha aumentado considerablemente desde el 74% (aprox.) del diseño de referencia (algo más del 5%). La mejora de la eficiencia va de la mano de la mejora del factor de potencia, cuyo principal responsable es la reducción del entrehierro, como se pudo observar en el análisis paramétrico.

A continuación, se presenta una gráfica final del motor:

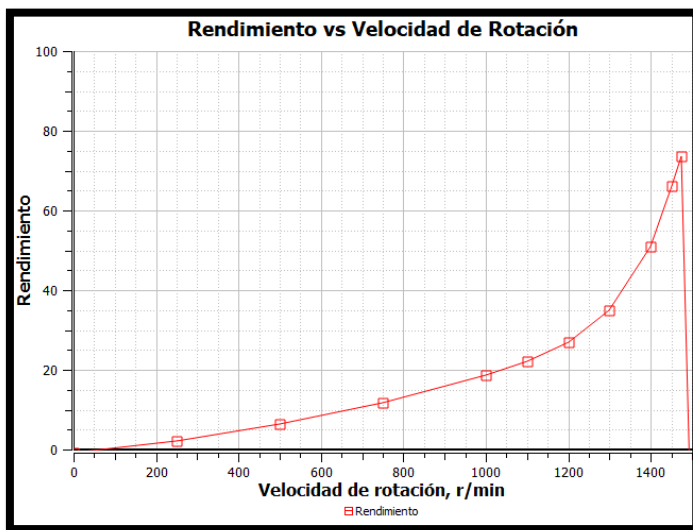


Ilustración 75. Rendimiento referencia

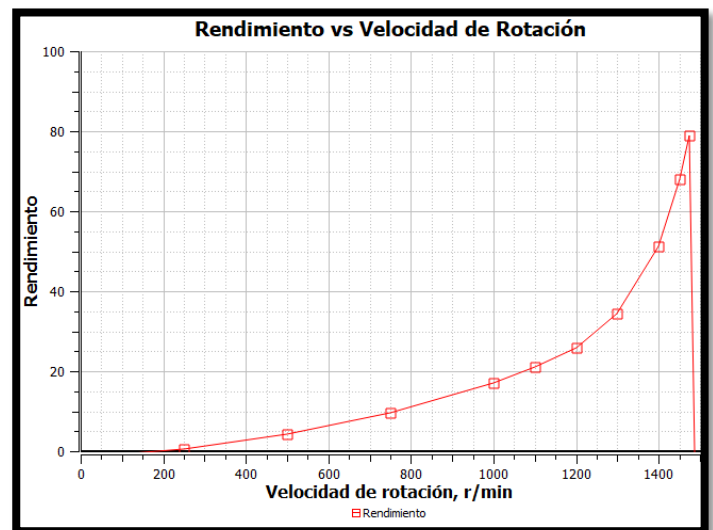


Ilustración 76. Rendimiento definitivo

3.7.3 Resumen

El estudio del modelo definitivo ha demostrado en base a simulaciones, que la teoría de máquinas eléctricas consultada y utilizada se cumple en la práctica. Después de analizar las diferencias entre los dos modelos estudiados, se han determinado las siguientes conclusiones:

- En relación con el Par de salida que produce el motor;
 - El Par de arranque se empobrece con los cambios geométricos. Es necesario entrar dentro del diseño de las barras del rotor (sección, material, etc.)
 - El Par máximo se incrementa con los cambios efectuados.

- El Par asignado se mejora, gracias a un mejor aprovechamiento de la energía.
- En relación con la Corriente y al Factor de potencia del motor;
 - El valor eficaz de la corriente disminuye, con sus consecuentes efectos en pérdidas y potencia.
 - El desfase de la corriente con la tensión disminuye, provocando una clara mejora del factor de potencia.
- En relación con la Potencia del motor;
 - Se consigue disminuir la potencia total consumida a velocidades menores que la nominal.
 - Las Pérdidas Joule disminuyen, mientras que las pérdidas del hierro aumentan. Esto significa que se ha reducido la carga eléctrica del motor, y se ha conseguido aprovechar mejor el material magnético del estator.
- En relación con la eficiencia del motor;
 - Se consigue llegar casi al 80 % de aprovechamiento de la energía, una cifra inferior a los diseños comerciales de este tipo de motores, pero muy aceptable por proximidad para un estudio general como corresponde a este trabajo.

4. CONCLUSIONES

En este Trabajo Fin de Grado se ha realizado un diseño básico de un motor de inducción trifásico mediante un programa informático y se ha completado el diseño con un análisis paramétrico aplicando la técnica numérica Método de los Elementos Finitos para resolver su modelo electromagnético. El resultado final ha sido la determinación de un diseño definitivo, cuyo modelo también ha sido calculado.

Las conclusiones alcanzadas a la finalización del Trabajo han sido de dos tipos: técnicas sobre el diseño y académicas acerca del uso de estos programas.

En relación con las conclusiones técnicas se destacan las siguientes:

- La solución obtenida del programa de diseño previo (diseño de referencia) está lejos de ser una solución óptima y necesita modificaciones de cierta importancia. Sin embargo, es útil para centrar los valores de los principales parámetros. Éstos son Diámetro del entrehierro, Entrehierro y Longitud axial.
- Con los análisis paramétricos se ha profundizado lo suficiente para guiar las modificaciones citadas. Así se observa que, variando los parámetros citados anteriormente, se consiguen apreciar una serie de tendencias que se producen en nuestro modelo:
 - ✓ Al aumentar el diámetro del entrehierro,
 - Se reducen la relación de aspecto, la corriente consumida por el motor y las pérdidas eléctricas.
 - Aumentan el par nominal, el factor de potencia, la potencia puesta en juego, las pérdidas del hierro y el rendimiento.
 - ✓ Al disminuir el entrehierro (parámetro más determinante, en relación con los cambios estudiados),
 - Se reducen la corriente y las pérdidas eléctricas en gran medida.
 - Aumentan el par nominal, el factor de potencia, las pérdidas del hierro y el rendimiento
 - ✓ Al disminuir la longitud axial,
 - Se reduce la relación de aspecto
 - Aumenta el resto de las magnitudes estudiadas: par, corriente, factor de potencia, potencia en juego y rendimiento.

- En el estudio final del llamado “diseño definitivo” se comprueba que los cambios en la geometría fundamental del motor producen un efecto positivo. Finalmente:
 - ✓ El Par de arranque se empobrece con los cambios geométricos.
 - ✓ El Par máximo se incrementa.
 - ✓ El Par asignado se mejora, por un mejor aprovechamiento de la energía.
 - ✓ El valor eficaz de la corriente disminuye, con sus consecuentes efectos en pérdidas y potencia.
 - ✓ El desfase de la corriente con la tensión disminuye, provocando una clara mejora del factor de potencia.
 - ✓ Se consigue disminuir la potencia total consumida a velocidades menores que la asignada.
 - ✓ Las Pérdidas Joule disminuyen, y las pérdidas del hierro aumentan.
 - ✓ Se consigue llegar casi al 80 % de aprovechamiento de la energía.
- En general, se ha conseguido mostrar e ilustrar la dependencia que existe entre los valores de salida (output) del motor de inducción y su configuración geométrica interna.

En relación con las conclusiones académicas se destacan las siguientes:

- El Trabajo Fin de Grado ha exigido bastante esfuerzo de aprendizaje de los dos programas JMAG-Express y JMAG-Designer y de comprensión básica de la teoría del Método de Los Elementos Finitos, de las simetrías electromagnéticas que se forman, de la consecución de la malla de discretización adecuada, de las propiedades del estudio. Al comienzo los resultados eran muy imprecisos y no validables.
- Por otra parte, el Trabajo ha completado el aprendizaje general sobre máquinas eléctricas obtenido durante los estudios y la estancia Erasmus donde he cursado una asignatura dedicada al Diseño de Máquinas Eléctricas.

5. BIBLIOGRAFÍA

5.1. MONOGRAFÍAS

- FRAILE MORA, J. 2008. Máquinas Eléctricas. 6nd. ed. Madrid: Mc.Graw-Hill. ISBN 978-84-4816112-5.
- RODRÍGUEZ POZUETA, M.A 2008. *Máquinas Eléctricas* [en línea] Disponible en:
<http://personales.unican.es/rodrigma/PDFs/asincronas%20caminos.pdf>.
[Consultas mayo 2018].
- BOLDEA, I.; y NASAR, S.A. 2002. *The Induction Machine Handbook*, 2nd. ed. New York: CRC Press. ISBN 978-14-2006668-5.
- DATTA, N.K.; y NASAR, S.A. 2016. *Theory & Practice of Electrical Machine Design*, 1nd. ed. New Delhi: S.K. Kataria and Sons. ISBN 978-93-5014574-6.
- HAMDI, E.S. 1994. *Design of small electrical machines*, 1nd. ed. Chichester: John Wiley and Sons. ISBN 978-04-7195202-2.
- LIPO, T.A. 2017. *Introduction to AC machine design*, 1nd. ed. New Jersey: John Wiley and Sons. ISBN 978-1-119-35216-7.
- CATHEY, J.J. 2001. *Electric machines. Analysis and design applying MATLAB* 1nd. ed. New York: Mc.Graw-Hill. ISBN 0-07-118970-X.
- UPADHYAY, K.G. 2008. *Design of Electrical Machines*, 1nd. ed. New Delhi (India): New Age International. ISBN 978-81-2242282-5

5.2. PÁGINAS WEB

- JMAG Simulation Technology for Electromechanical Design. [Consultas abril-mayo 2018]. Disponible en <https://www.jmag-international.com/>

5.3. NORMAS TÉCNICAS

- Normas UNE.

5.4. OTROS DOCUMENTOS

- WEG, *Motores Eléctricos. Guía de especificación*, [Catálogo].
- HARLEY, R.G.; DUAN, Y. 2009. Georgia Institute of Technology. [Consulta 25 mayo 2018]. Disponible en <http://publish.illinois.edu/grainger-ceme/files/2014/06/CEME1109HarleyGeorgiaTech.pdf>