

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Grado

**DISEÑO GEOMÉTRICO Y
ELECTROMAGNÉTICO DE UN MODELO DE
MOTOR DE INDUCCIÓN EN JMAG-Express**

(Geometric and electromagnetic design of an
induction motor model in JMAG-Express)

Para acceder al Título de

**GRADUADO EN INGENIERÍA EN
TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES**

Autora: Carolina Tristán Teja

Enero - 2017

ÍNDICE GENERAL

DOCUMENTO 1: MEMORIA	3
DOCUMENTO 2: ANEXOS.....	87
DOCUMENTO 3: PLANOS	330
DOCUMENTO 4: PLIEGO DE CONDICIONES	337
DOCUMENTO 5: PRESUPUESTO.....	346

DOCUMENTO 1: MEMORIA

ÍNDICE

1	OBJETO	6
2	ALCANCE	6
3	ANTECEDENTES	9
3.1	ASPECTOS GENERALES DE LOS MOTORES DE INDUCCIÓN	9
3.1.1	PRINCIPALES ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS DE LOS MOTORES DE INDUCCIÓN	10
3.1.2	PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO. REGÍMENES DE FUNCIONAMIENTO	18
3.1.3	CURVA PAR – VELOCIDAD	21
3.1.4	CIRCUITO EQUIVALENTE	25
3.1.5	ARRANQUE DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN	29
3.1.6	EFICIENCIA EN LOS MOTORES ELÉCTRICOS	35
3.1.7	PÉRDIDAS EN UNA MÁQUINA ELÉCTRICA. DEFINICIÓN DEL RENDIMIENTO	36
3.2	ASPECTOS GENERALES DE DISEÑO DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS	37
3.2.1	ESTANDARIZACIÓN Y CLASIFICACIÓN DEL MOTOR ASÍNCRONO	39
3.3	TÉCNICAS MEF – CAD EN EL DISEÑO DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS	44
3.3.1	RECURSOS DISPONIBLES	47
3.3.2	ENTORNO JMAG	49
3.3.3	JMAG-Express	50
4	NORMAS Y REFERENCIAS	51
4.1	DISPOSICIONES LEGALES Y NORMAS APLICADAS	51
4.2	BIBLIOGRAFÍA	52
4.2.1	LIBROS DE CONSULTA	52
4.2.2	PÁGINAS WEB	52
4.2.3	OTROS DOCUMENTOS	53
4.3	PROGRAMAS DE CÁLCULO	53
5	DEFINICIONES Y ABREVIATURAS	54
5.1	LISTA DE SÍMBOLOS	54
5.2	LISTA DE ABREVIATURAS	61
6	REQUISITOS DE DISEÑO	62
7	ANÁLISIS DE SOLUCIONES	64

7.1	ALTERNATIVAS DE DISEÑO	64
7.1.1	METODOLOGÍA DE DISEÑO. ALTERNATIVAS DE DISEÑO PLANTEADAS.....	64
7.1.2	ALTERNATIVAS DE DISEÑO MÁS ADECUADAS	66
7.2	CONCLUSIONES. SOLUCIÓN ADOPTADA.....	74
8	RESULTADOS FINALES.....	75
8.1	CARACTERÍSTICAS OPERATIVAS	75
8.1.1	CARACTERÍSTICAS ASIGNADAS.....	75
8.1.2	CARACTERÍSTICAS EN EL ARRANQUE Y PAR MÁXIMO	76
8.1.3	CURVAS CARACTERÍSTICAS	77
8.2	CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS.....	80
8.2.1	DIMENSIONES GENERALES DEL MOTOR	80
8.2.1	DIMENSIONES DEL NÚCLEO DEL ESTATOR	80
8.2.2	DEVANADO DEL ESTATOR	81
8.2.3	DIMENSIONES DEL NÚCLEO Y JAULA DEL ROTOR.....	82
8.2.4	DIMENSIONES DE LOS ANILLOS DE CORTOCIRCUITO DE LA JAULA DEL ROTOR.....	82
8.3	CARACTERÍSTICAS DE MASA VOLUMEN E INERCIA	83
8.4	CONCLUSIONES TECNOLÓGICAS Y ACADÉMICAS.....	84
8.4.1	EVALUACIÓN DEL PROGRAMA JMAG-Express Public	84
8.4.2	CONCLUSIONES ACADÉMICAS	86

1 OBJETO

El objetivo principal del proyecto consiste en el diseño geométrico y electromagnético de un modelo de motor de inducción de jaula de ardilla con las siguientes características: Trifásico de cuatro polos, potencia asignada de 3550 kW, tensión asignada de 4000 V y frecuencia de 50 Hz, mediante el software de diseño de máquinas eléctricas rotativas JMAG-Express Public.

El grupo GAIME (Grupo de Accionamientos Industriales y Máquinas Eléctricas) del departamento DIEE (Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética) de la ETSIIT de la Universidad de Cantabria ha adquirido la licencia profesional del software de diseño de máquinas eléctricas JMAG Designer. La licencia cuenta con otros módulos adicionales entre los que se encuentra el programa JMAG-Express y la versión gratuita del mismo JMAG-Express Public que es la que se empleará durante el desarrollo y evaluación de los distintos modelos.

2 ALCANCE

El proyecto consiste en el diseño geométrico y electromagnético conceptual de los arrollamientos eléctricos y núcleos magnéticos de un prototipo de motor de inducción trifásico de jaula de ardilla, mediante el software de diseño de máquinas eléctricas rotativas JMAG-Express Public, que se complementa con otra herramienta, la hoja de cálculo CALASIN.

El proceso de diseño tiene como objeto la determinación de un modelo que cumpla con una serie de requisitos específicos de funcionamiento. Es un proceso iterativo, durante el cual los parámetros de diseño considerados se van a ir modificando hasta que el diseño se ajuste a los requerimientos establecidos. En concreto se precisa que el modelo verifique las condiciones de operación a la velocidad asignada sin comprometer las restricciones de funcionamiento establecidas en el arranque e instante en que el par desarrollado por el motor es máximo.

El proceso de diseño se desglosa en las siguientes etapas:

- Diseño geométrico y electromagnético inicial, en el que se estimarán las dimensiones principales del modelo mediante un cálculo analítico previo, y se definirán los materiales y condiciones de alimentación del mismo. Posteriormente, el modelo inicial estimado se evaluará en JMAG-Express Public para obtener sus características operativas y de este modo analizar si es preciso realizar ajustes en el mismo para que verifique las condiciones de funcionamiento precisadas.
- Optimización del modelo de inicial: Partiendo de esa premisa se realiza un análisis de los parámetros que afectan en mayor medida al comportamiento de la máquina. Para ello se utiliza la herramienta de análisis de sensibilidad que facilita JMAG-Express Public, y que muestra el grado de influencia que los parámetros de diseño ejercen sobre la característica que se pretende mejorar. Una vez se conocen los parámetros que influyen de forma más significativa en el comportamiento de la máquina, se realiza una evaluación paramétrica de los mismos, para ver el modo en que afectan a las características operativas del motor y obtener una estimación de los posibles valores que ha de tomar.

En base a las conclusiones extraídas de ambos análisis se plantean las siguientes propuestas de diseño que consisten en: la aproximación de las barras del rotor al entrehierro, ajuste de las dimensiones de las ranuras y conductores del estator, en base al modelo anterior se incorpora el ajuste de la profundidad de la boca de ranura del estator, e incremento de diámetro de las barras de la jaula del rotor.

De nuevo, todas las alternativas de diseño serán evaluadas en JMAG-Express Public y se incorpora en esta etapa de diseño el análisis con la herramienta CALASIN.

Asimismo, se analizarán las características en el arranque e instante en que el par motor es máximo para comprobar si las distintas alternativas de diseño planteadas se ajustan a las restricciones establecidas en ambos estados de funcionamiento.

Por último, en base al estudio de las alternativas de diseño planteadas tras el análisis de sensibilidad y evaluación paramétrica de los parámetros de diseño del modelo inicial, se opta por incorporar a este aquellos que han resultado ser más adecuados en la consecución de las características de funcionamiento a la velocidad asignada: aproximación de las barras del rotor al entrehierro, aproximación de los devanados del

estator al entrehierro, y leve ensanchamiento de las ranuras del estator. Este último modelo presenta unas características asignadas más próximas a las precisadas en las especificaciones

- Alternativas de diseño: Tras realizar la evaluación y análisis de las alternativas de diseño del modelo inicial, en las que se han realizado variaciones discretas de los parámetros geométricos, se observó que no era posible mejorar las características de funcionamiento a la velocidad asignada sin comprometerlas en otros estados de funcionamiento. Se detectó que el par máximo desarrollado por las distintas propuestas de diseño era superior al requerido para un funcionamiento estándar para el cual está previsto que opere el motor, así mismo la corriente en el arranque es elevada y no es recomendable. Por este motivo, se decide incluir en el proceso de diseño ajustes no planteados hasta el momento: variación de la geometría de las barras de la jaula y ranuras del rotor. Con este cambio se lograron reducir de forma importante el par máximo y, el par e intensidad en el arranque, sin comprometer las características asignadas alcanzadas con el modelo anterior. Finalmente, para tratar de mejorar aún más las condiciones de operación en el arranque e instante en que el par motor es máximo, se optó por realizar más ajustes en las dimensiones de la geometría oval de las barras. Para averiguar la influencia que los nuevos parámetros incorporados por la geometría oval ejercían en las características de funcionamiento del modelo, se realizó una evaluación paramétrica de los mismos. En base a los resultados obtenidos en la evaluación paramétrica se realizan las siguientes modificaciones: disminución del radio externo de la barra e incremento de su longitud, se define de este modo una nueva propuesta de diseño que presenta unas características más adecuadas en el arranque e instante en que el par motor es máximo, pero en el que fue preciso incrementar de forma notable el deslizamiento a plena carga (reducir su velocidad asignada) para que verificase las especificaciones de funcionamiento asignadas y que comportó un incremento de las pérdidas eléctricas y una leve rebaja en el rendimiento, pero que pueden considerarse aceptables.

3 ANTECEDENTES

3.1 ASPECTOS GENERALES DE LOS MOTORES DE INDUCCIÓN

La máquina asíncrona o de inducción es un dispositivo de conversión electromecánica de la energía de tipo rotativo. La transformación de energía se produce por la interacción de los dos campos magnéticos giratorios desarrollados por el inductor y el inducido.

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 el funcionamiento del mismo (fundamentalmente en los elementos de rodadura). Las pérdidas son bajas de manera que suelen poseer buen rendimiento, y el factor de potencia a plena carga es razonablemente bueno, además el arranque se produce de forma autónoma. Estas propiedades justifican su empleo en todo tipo de sectores (industrial, residencial, servicios, etc.) y en todos los niveles de potencia.

Sin embargo, presenta una serie de inconvenientes inherentes a su funcionamiento, su velocidad es prácticamente constante desde cero hasta plena carga de manera que no se puede variar sin comprometer el rendimiento, 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 los de jaula de ardilla, que se utilizan comúnmente para controlar bombas, ventiladores, compresores y muchas otras aplicaciones industriales.

3.1.1 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. A excepción de los transformadores, las restantes máquinas también incluyen un tercer elemento: las partes móviles que constituyen el sistema mecánico.

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 alojado en su interior, separadas por un espacio de aire muy estrecho o entrehierro que permite el movimiento del rotor y evita el contacto entre ambos órganos, cuyo valor depende de la potencia del motor.

El estator constituye la parte del circuito magnético que contiene los devanados inductores que crean el campo magnético en el entrehierro, mientras que el rotor alberga el devanado inducido que recibe el campo magnético creado por el inductor. En el inducido se genera el par y la potencia aplicados a la carga mecánica. En la práctica se adopta esta configuración por factores tecnológicos como la mayor facilidad de construcción, aislamiento, refrigeración, etc. la ubicación del inductor y el inducido no influye en el principio de operación de la máquina.

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

- Los arrollamientos eléctricos del estator y el rotor.
- Aislamiento eléctrico de los devanados.
- Los núcleos magnéticos del rotor y el estator.
- Los elementos de transmisión de la potencia mecánica.
- Los elementos de conexión eléctrica del estator (caja de bornes) y del rotor (anillos-escobillas).
- Los elementos de protección de material y refrigeración.

Devanados eléctricos

Constituyen el circuito eléctrico de la máquina, conducen las corrientes eléctricas del inductor y el inducido. 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.

El **devanado del estator** de un motor asíncrono normalmente es trifásico, en máquinas de pequeña potencia también puede ser monofásico o bifásico. Se conforma 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.

Los tipos de arrollamientos del estator son:

- Arrollamientos de hilo: Consisten en un conjunto de conductores delgados de sección circular de cobre recubiertos por un esmalte (aislante). Son bobinados de forma manual o con una máquina bobinadora en las ranuras del estator ocupando posiciones aleatorias en las mismas. Dada su limitada capacidad de aislamiento, se emplea en máquinas de baja tensión (hasta 1 kV), y potencias inferiores a los centenares de kW. Los motores que emplean este tipo de devanados suelen poseer ranuras semiabiertas a fin de facilitar el bobinado de la máquina.
- 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 precisen 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, dado que la conductividad del cobre o del aluminio de las barras es bastante superior al de las chapas de acero del núcleo magnético por lo que las barras conducen prácticamente la totalidad de la corriente, y el nivel de tensión no es excesivo. Sin embargo, en ocasiones de arranques intensos las barras pueden perder contacto con las chapas y generar pequeños arcos eléctricos. Para evitar riesgos de ignición en ciertas aplicaciones, las barras llevan un aislamiento de contacto con el núcleo del rotor. 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.

- 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 para el control de la fase de arranque. En funcionamiento normal estos tres anillos se encuentran cortocircuitados. Este tipo de motores de inducción requieren mantenimiento periódico y sus dimensiones generales son elevadas.

En ambos tipos de rotor se suelen emplear ranuras ligeramente inclinadas con respecto al eje de la máquina, con el fin de mejorar la distribución de flujo en el entrehierro.

La interacción de f.m.m.s del inductor y el inducido, que produce el flujo resultante en el entrehierro, solo es posible si ambas ondas de f.m.m. giran a la misma velocidad, por lo tanto, el número de polos de los devanados del rotor y el estator ha de ser el mismo para garantizar el correcto funcionamiento del motor, tal y como se demostrará cuando se explique el principio de funcionamiento del motor.

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. También proporcionan soporte mecánico, protegen a los conductores de la degradación provocada por el entorno, y facilitan la transmisión de calor al exterior.

La temperatura a la que están expuestos los materiales empleados en los elementos aislantes es el factor de mayor influencia en la degradación y envejecimiento de sus propiedades. La normativa internacional y nacional (UNE-EN 60085 y 60034-1) realiza una clasificación térmica de los sistemas y los materiales aislantes conforme a la temperatura máxima de operación.

Durante la fabricación del motor, los conductores están sometidos a esfuerzos mecánicos de tracción, flexión y abrasión. En funcionamiento, los fenómenos térmicos y eléctricos también actúan sobre el material aislante que recubre los conductores. De manera, que el conductor debe estar provisto de un buen aislamiento mecánico, térmico y eléctrico.

A parte de los arrollamientos de un motor de inducción, que son los elementos más destacados y exigentes del aislamiento, existen otros elementos que también requieren aislamiento eléctrico, como los terminales y conexiones eléctricas, escobillas, anillos rozantes, elementos auxiliares, y en ocasiones los núcleos magnéticos y los rodamientos.

Núcleos magnéticos del estator y el rotor

Los núcleos ferromagnéticos constituyen el circuito magnético del motor. Canalizan el flujo magnético creado por los arrollamientos eléctricos. Este flujo magnético variable en el tiempo provoca pérdidas por histéresis (ligadas a la magnetización no lineal del material) y por corrientes parásitas inducidas. En consecuencia, para tratar de limitar las pérdidas magnéticas, los núcleos se ejecutan apilando chapas magnéticas de acero al silicio de delgado espesor aisladas entre sí. Las chapas magnéticas tienen forma de corona circular encontrándose dentada la circunferencia interior si se trata del estator y exterior del rotor. En las ranuras practicadas en la estructura cilíndrica se insertan los devanados eléctricos.

El bloque de chapas del circuito magnético del rotor tiene un orificio central donde se asienta el eje de la máquina.

Elementos de transmisión mecánica

Los elementos responsables de la transmisión de la potencia mecánica consisten en:

- Eje de rotación. Transmite el par a la carga accionada. Ha de soportar el estrés por torsión y tener la rigidez suficiente para resistir el peso y minimizar los efectos de flexión radial derivados de esfuerzos ocasionales por desequilibrios magnéticos. Normalmente, los motores tienen un único extremo para acoplar la carga. En algunas ocasiones se fabrican con los dos extremos de eje salientes. Para favorecer la refrigeración de la máquina se suele acoplar un ventilador a la estructura del eje.
- Elementos de rodadura. Sostienen al eje motor y por ende toda la estructura del rotor. Durante el funcionamiento del motor, se encuentran sometidos a esfuerzos radiales (perpendiculares al eje) y a empujes axiales (paralelos al eje), de manera han de soportar ambas solicitaciones. Los motores utilizan dos tipos de elementos de rodadura: Cojinetes de bolas o rodillos en motores grandes (más de 200 kW) o en motores muy pequeños, y rodamientos en motores pequeños y medianos. Los elementos de rodadura son uno de los principales causantes de avería en los motores.
- Elementos de enlace con la carga. Unen los extremos del eje del motor y de la máquina accionada para transmitir el par motor atenuando las posibles perturbaciones mecánicas ocasionadas por ambos dispositivos. La velocidad de operación de la máquina accionada determina la elección del tipo de elemento de enlace.

Elementos de conexión eléctrica

Los motores eléctricos están provistos de una **caja de bornes** en la que se encuentran los terminales de unión mecánica que enlazan eléctricamente los extremos de los devanados de cada fase con los conductores de fase correspondientes de la instalación eléctrica exterior. La caja de bornes consiste en un recinto protector de dimensiones acordes a los valores de tensión y de corriente asignados, montado sobre la carcasa en una ubicación conforme a la petición del usuario y el diseño general del motor.

En una máquina asíncrona trifásica la caja de bornes tiene seis terminales, correspondientes a los extremos de las tres fases del estator (dos extremos, principio y final, por cada fase), dispuestos en dos filas de tres, posibilitando la conexión del devanado del estator en estrella o en triángulo, de tal forma que el motor pueda funcionar con dos tensiones asignadas

distintas, que guardan entre sí una relación $U_L = \sqrt{3} \cdot U_f$. La conexión en estrella es utilizada cuando el motor se conecta a la tensión más elevada, mientras que se ha de conectar en triángulo si se requiere que el motor opere a la tensión más baja que se corresponde con la tensión asignada de fase.

También permite invertir el sentido de giro del motor (si fue diseñado para poder funcionar en ambos sentidos de rotación), para lograrlo es preciso invertir la secuencia de las fases, de manera que el campo magnético giratorio rote en sentido contrario. Permutando la alimentación de dos fases se logra tal cometido.

La identificación de los terminales de conexión está normalizada de acuerdo al estándar UNE-EN 60034-8. Cada fase se designa con una letra U, V y W, y los principios y finales de los extremos de cada fase con un número ,1 y 2 respectivamente.

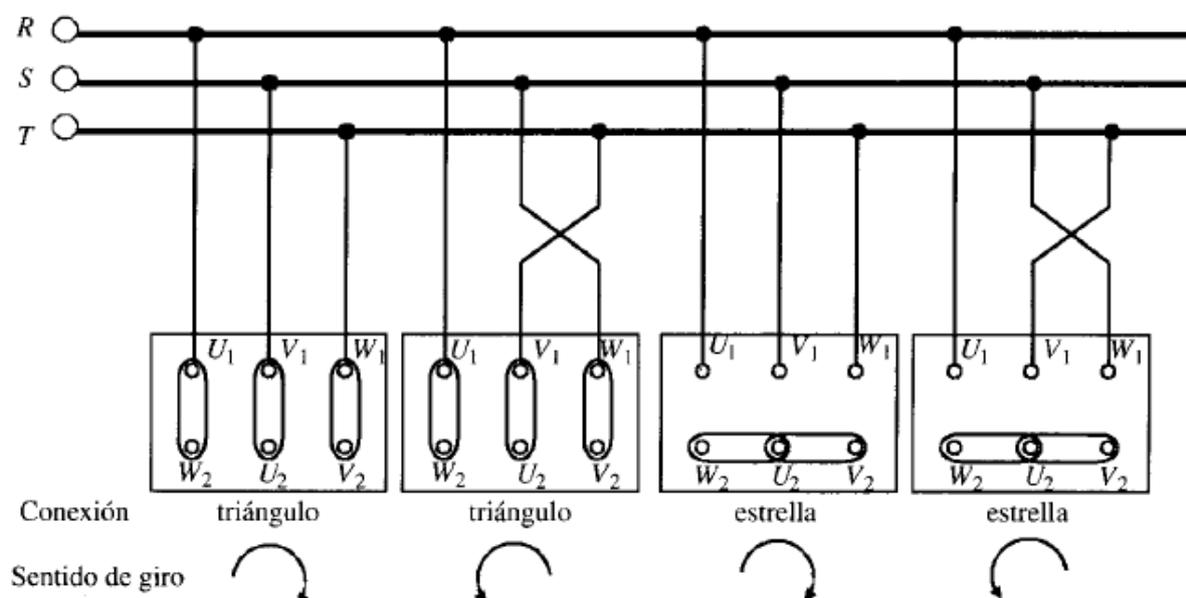


Figura 3.1. Esquema de bornes de una máquina asíncrona trifásica. Tipo de conexión e inversión de giro. Fuente: [1].

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 unir eléctricamente el bobinado del rotor con el equipo eléctrico exterior. Los motores trifásicos van provistos de tres anillos rozantes. El conjunto anillos-escobillas tiene un coste económico extra (sin olvidar el coste del propio bobinado interior), exige un mantenimiento, polucionan de polvo el aislamiento de los arrollamientos y están sujetos a posibles averías. Sin embargo, tradicionalmente han dotado a los accionamientos de un procedimiento excelente de arranque y regulación en redes eléctricas débiles y aplicaciones a velocidad variable respectivamente. Actualmente los suministros eléctricos son más estables y el control de velocidad se resuelve con motores de jaula de ardilla y convertidores electrónicos, eludiendo recurrir a los motores de anillos rozantes. Sin embargo, estos motores siguen estando en boga porque permiten aplicar procedimientos de control electrónico de recuperación de la potencia de deslizamiento que reenvía energía desde el rotor hacia la fuente de alimentación a través de estos anillos.

Envolventes. Sistemas de refrigeración

Las 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. También previene la exposición de las personas frente a riesgos mecánicos y eléctricos de operación del motor.

Su estructura cuenta con dos tapas laterales donde se ubican los cojinetes en los que se apoya el eje del motor. Para mejorar la refrigeración del motor, las envolventes suelen estar provistas de unas aletas en su superficie. Sujeta a la envolvente, se encuentra la placa de características, donde se detallan las magnitudes más relevantes del motor. En la carcasa también se dispone la caja de bornes.

Aspectos que caracterizan a la envolvente tales como el grado de protección frente a la penetración de objetos sólidos y agua, la resistencia frente a impactos, tamaño y forma

constructiva de la misma, están regulados por un conjunto de códigos normalizados que se describirán más adelante.

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.

Los motores se refrigeran de forma indirecta mediante flujos forzados de aire que atraviesan su interior actuando sobre sus partes activas (arrollamientos y núcleos magnéticos). El aire es intercambiado con el ambiente en circulación abierta, o está encerrado y en movimiento permanente en el interior del motor en circulación cerrada para impedir el acceso del aire ambiental. El calor extraído por este aire puede ser disipado al exterior de forma natural por contacto con la envolvente, o transferido a un segundo fluido (aire o agua) en el seno de un intercambiador térmico. Los elementos de refrigeración utilizados para estas labores son ventiladores, intercambiadores de calor, bombas de impulsión de fluidos, conducciones, etc.

Los métodos de refrigeración descritos anteriormente se identifican con un código alfa numérico precedido por las letras IC (International Cooling).

3.1.2 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 en el espacio 120° , 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, que es impuesta por la frecuencia de la red f_1 . La velocidad síncrona viene definida por las siguientes expresiones:

Expresada en revoluciones por minuto (r.p.m):

$$n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p}$$

Expresada en radianes eléctricos por segundo (rad elec./s):

$$\omega_1 = 2\pi \cdot f_1$$

Expresada en radianes geométricos por segundo (rad/s):

$$\Omega_1 = \frac{2\pi \cdot f_1}{p}$$

Siendo p número de pares de polos, f_1 la frecuencia de las corrientes de pulsación $\omega = 2\pi \cdot f_1$.

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 del mismo, 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 movimiento de rotación del rotor. Conforme a la Ley de Lenz, las f.e.m.s inducidas en el rotor son tales que causan corrientes 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.

Se concluye, por tanto, que la velocidad de giro del rotor ha de ser ligeramente distinta a la de sincronismo, de donde deriva su nombre asíncronas. La acepción máquinas de inducción, viene 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 desprende 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 $n_2 = n_1 - n$, que expresada en valor por unidad respecto a la velocidad de sincronismo:

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1}$$

n_1 (r.p.m): Velocidad de sincronismo

n (r.p.m): Velocidad de la máquina

Las f.e.m.s inducidas en las fases del rotor causan la circulación de corrientes de frecuencia $f_2 = s \cdot f_1$. De forma análoga a lo que sucedía en el devanado del estator, conforme al teorema de Ferraris, la circulación de estas corrientes por el devanado del rotor origina un campo magnético giratorio cuya velocidad relativa es:

$$n_2 = \frac{60 \cdot f_2}{p} = s \cdot \frac{60 \cdot f_1}{p} = s \cdot n_1 = n_1 - n$$

La velocidad absoluta del campo magnético, considerando que la velocidad de giro del rotor es n se obtiene con la siguiente expresión: $n_2 + n = (n_1 - n) + n = n_1$. Dicha expresión demuestra que el campo magnético del rotor gira a la misma velocidad de sincronismo que el campo magnético del estator, por lo que el campo magnético resultante de la interacción entre los campos generados por el inductor y el inducido en el entrehierro, gira a la velocidad de sincronismo n_1 . Este hecho es fundamental dado que, de este modo, se garantiza que la posición relativa entre los campos magnéticos del rotor y el estator sea invariante en el

tiempo, logrando un par en el eje constante (sin pulsaciones en cada vuelta). Para ello, es preciso que tanto el devanado del estator como el del rotor posean el mismo nº de polos.

Regímenes de funcionamiento

En función del valor que toma el deslizamiento se definen los distintos regímenes de funcionamiento de la máquina:

- Régimen **motor**: en este estado de funcionamiento la velocidad de giro de la máquina es inferior a la de sincronismo, $0 < n < n_1$, el deslizamiento varía entre $0 < s < 1$, y el sentido de giro coincide con el del campo magnético rotativo. La velocidad de giro de la máquina depende de la carga aplicada en el eje, al aumentar la carga mecánica del motor, el par resistente es superior al par interno del motor y el deslizamiento aumenta (la velocidad de giro del rotor se reduce) esto causa un ascenso de la corriente del rotor que causa que el par motor se incremente restableciéndose el equilibrio dinámico de los momentos resistente y motor. La máquina asíncrona funcionando como motor, absorbe potencia eléctrica a través del estator que es convertida en potencia mecánica en el eje solidario al rotor.
- Régimen **generador**: en este modo de funcionamiento la velocidad de giro de la máquina es mayor que la velocidad síncrona $n > n_1$, el deslizamiento siempre es $s < 0$, y el sentido de giro coincide con el del campo magnético rotativo. La máquina asíncrona en régimen generador absorbe potencia mecánica en su eje que es convertida en potencia eléctrica en el estator para ser suministrada a la red. El par del generador de inducción se opone a la velocidad (par de frenado en el eje), para lograr que el rotor gire a una velocidad superior a la de sincronismo, es preciso utilizar una máquina motriz externa que acoplada al eje de la máquina accione y produzca el giro de la máquina a esa velocidad.
- Régimen **freno**: En este estado de funcionamiento, la velocidad de la máquina es negativa $n < 0$, por lo que el deslizamiento es $s > 1$, y el sentido de rotación es contrario al del campo magnético. Una máquina asíncrona funcionando como freno a contracorriente, absorbe potencia eléctrica por el estator y potencia mecánica por su eje, la potencia total absorbida es disipada en forma de calor en adición a las pérdidas de la máquina, causando un incremento de temperatura que puede ser muy perjudicial.

En este régimen el par se opone a la velocidad, es decir, el par resultante es un par de frenado que se opone a su movimiento.

3.1.3 CURVA PAR – VELOCIDAD

Consiste en la representación gráfica del par desarrollado por la máquina asíncrona cuando opera en condiciones de frecuencia y tensión constantes en el estator, de manera que la variación del par de la máquina solo depende de la velocidad de giro del rotor (deslizamiento del motor). En la curva Par-Velocidad de la Figura 3.2 se distinguen los tres regímenes de funcionamiento descritos en el apartado anterior:

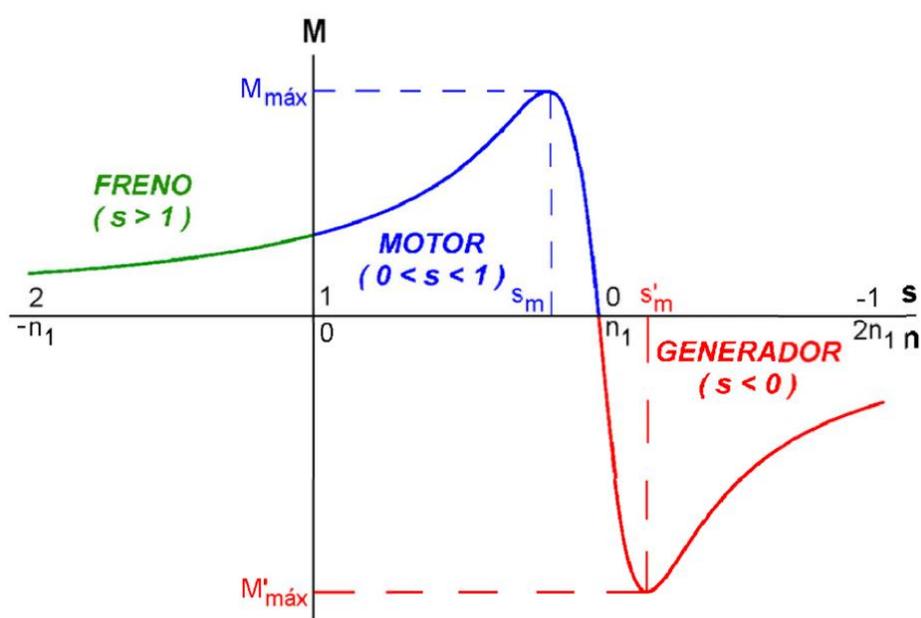


Figura 3.2. Curva Par – Velocidad de una máquina asíncrona. Modos de funcionamiento.

Fuente: [2].

Se analizará en detalle la característica de Par-Velocidad correspondiente al régimen motor de la máquina asíncrona, región de la curva comprendida entre $0 < n < n_1$ ($1 > s > 0$). En la Figura 3.3, se ha representado la zona de la curva en cuestión, en la que se distinguen los siguientes estados de funcionamiento:

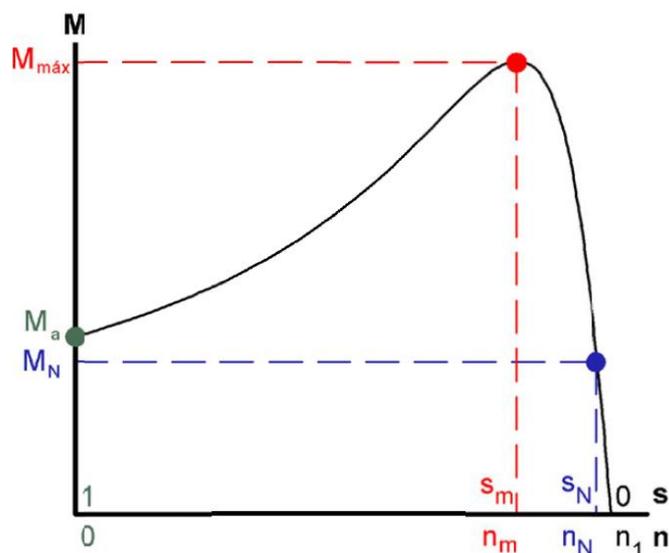


Figura 3.3. Curva Par – Velocidad de un motor de inducción. Estados de funcionamiento.

Fuente: [2].

- Funcionamiento en sincronismo: $s = 0$, $n = n_1$, $M = 0$. Corresponde al instante en que la velocidad de giro del rotor coincide con la de sincronismo ($n = n_1$), este hecho no puede producirse, tal y como se demostró al describirse el principio de funcionamiento del motor. No obstante, en la Figura 3.3 se ha representado el par interno del motor, el par útil se anula a una velocidad ligeramente inferior a la de sincronismo, instante en que el par interno no se anula por completo dado que ha de vencer el par resistente a causa del rozamiento y ventilación.
- Régimen asignado o nominal: $s = s_N$, $n = n_N$, $M = M_N$. Corresponde a la velocidad asignada y al par nominal (asignado o a plena carga), se produce a velocidades próximas a la de sincronismo.
- Funcionamiento con par máximo: $s = s_m$, $n = n_m$, $M = M_m$. Corresponde al par máximo o crítico del motor. La relación entre el par máximo y el par asignado define la capacidad de sobrecarga del motor suele ser proporcionado por el fabricante, en motores de uso general suele estar comprendida entre 1,8 y 2,7.
- Régimen de arranque: $s = 1$, $n = 0$, $M = M_a$. Instante en que la velocidad de giro del rotor es nula, el deslizamiento es igual a la unidad, y se produce el par de arranque del motor. El cociente entre el par de arranque y el par asignado también acostumbra a ser facilitado por el fabricante.

El par máximo de la curva establece el límite de estabilidad de operación del motor: la zona estable de la curva corresponde a deslizamientos comprendidos entre $0 < s < s_m$ y la inestable entre $s_m < s < 1$. Cuando el motor asíncrono acciona una carga mecánica en régimen dinámico, aparece una diferencia entre el par motor y el par resistente de la carga que causa la aceleración o frenado del rotor hasta que ambos pares se igualan alcanzándose el punto de funcionamiento. Si se ha alcanzado el equilibrio en la zona estable de la curva, y se produce un incremento del par resistente, el motor reduce su velocidad para de este modo proporcionar un par motor mayor que restaure el equilibrio (igualdad de pares motor y resistente), si se sigue incrementando el par resistente y se excede el valor de par motor máximo, aparece de nuevo un momento de frenado que no es compensado por el par motor causando la deceleración del rotor hasta su detención (zona inestable de la curva).

Normalmente, el motor de inducción opera con deslizamientos iguales o inferiores al asignado s_N y, por lo tanto, inferiores a s_m (zona estable de la curva). A velocidades próximas a la de sincronismo (deslizamientos bajos), la curva Par-Velocidad es rígida o dura, es decir, la velocidad varía muy poco con el par, y prácticamente lineal al ser la variación de par proporcional al deslizamiento.

Influencia de la tensión de alimentación y la resistencia del rotor en la curva Par – Velocidad

La variación del valor eficaz de la tensión de alimentación V_1 manteniendo la frecuencia de las corrientes del estator f_1 constante, causa una disminución del par al ser este función del cuadrado de la tensión V_1 , sin que se modifique el valor del deslizamiento máximo s_m dado que no depende de la tensión.

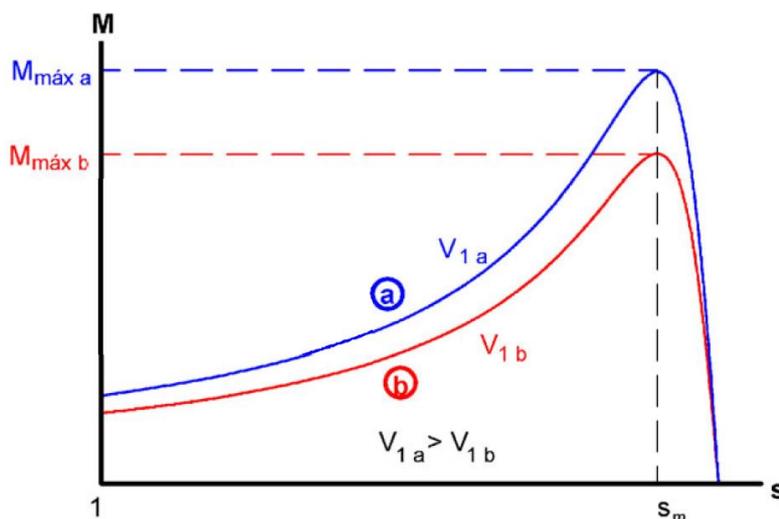


Figura 3.4. Influencia de la tensión V_1 en la característica Par-Velocidad de un motor de inducción. Fuente: [2].

Al aumentar la resistencia del rotor, el par máximo no se modifica al no depender de este parámetro, pero se produce a una velocidad menor (deslizamiento mayor), causando que la curva se desplace a velocidades menores (deslizamientos mayores), incrementándose el par en el arranque, y dado que la pendiente de la curva en la zona estable de funcionamiento disminuye el par asignado se produce a un deslizamiento mayor (velocidad menor), hecho que causa un incremento de las pérdidas en el cobre del rotor al ser estas proporcionales al deslizamiento.

En consecuencia, interesa contar con una resistencia del rotor elevada en el arranque para lograr un par adecuado en dicho instante, y un resistencia en el rotor baja cuando el motor opere a la velocidad asignada para aminorar las pérdidas.

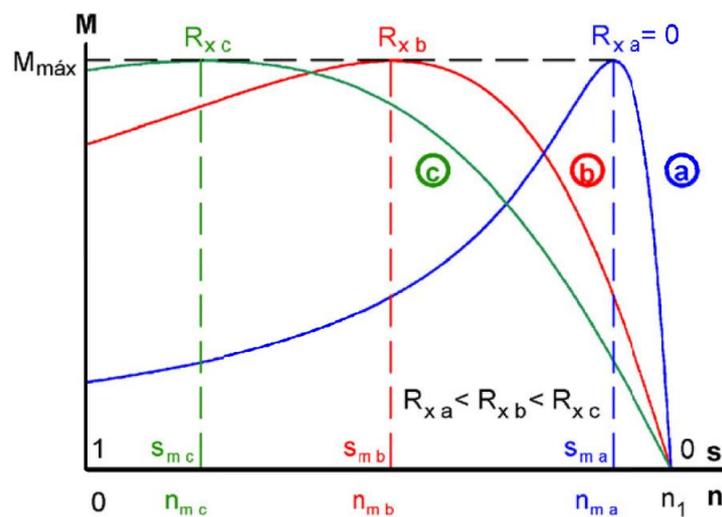


Figura 3.5. Efecto de la resistencia de rotor sobre la curva Par-Velocidad. Fuente: [2].

3.1.4 CIRCUITO EQUIVALENTE

El circuito eléctrico equivalente permite simplificar el análisis de un motor asíncrono dado que es posible emplear la Teoría de Circuitos para describir su funcionamiento. El circuito eléctrico equivalente está integrado por elementos concentrados e independientes que modelan separadamente los fenómenos internos (aspectos energéticos) de la máquina.

El funcionamiento de una máquina asíncrona es análogo al del transformador, la transferencia de energía entre el estator y el rotor se produce por inducción electromagnética de un modo semejante al exhibido entre el primario y el secundario del transformador. Por este motivo es posible deducir el circuito equivalente del motor asíncrono en base al circuito equivalente del transformador considerando ciertos aspectos que diferencian a ambos dispositivos: la frecuencia de las corrientes que circulan por el inductor es distinta a la frecuencia de las corrientes que circulan por el inducido, y el rotor (secundario del transformador) se encuentra en movimiento y por lo tanto la frecuencia en el inducido depende a su vez de la velocidad de giro del motor (deslizamiento).

El campo magnético común presente en el entrehierro de la máquina establece el flujo por polo máximo ϕ_M en el mismo y es originado por la acción conjunta de los arrollamientos del estator y el rotor.

Este campo magnético, que rota a la velocidad de sincronismo n_1 , induce en las fases del estator, de N_1 espiras efectivas por fase y factor de devanado ξ_{b1} ¹, f.e.m.s de rotación de valor eficaz E_1 con una frecuencia igual a la de las corrientes del estator f_1 (frecuencia de la red), y que viene dada por la siguiente expresión:

$$E_1 = 4,44 \cdot \xi_{b1} \cdot N_1 \cdot f_1 \cdot \phi_M$$

De igual modo, este campo magnético giratorio induce en el devanado del rotor, de N_2 espiras efectivas y factor de devanado ξ_{b2} , f.e.m.s de rotación de valor eficaz E_{2s} y de frecuencia f_2 :

$$E_{2s} = 4,44 \cdot \xi_{b2} \cdot N_2 \cdot f_2 \cdot \phi_M$$

¹ El factor de devanado es un coeficiente reductor próximo a la unidad, que depende de la configuración del devanado, y que resume los efectos que produce la distribución de los devanados en los núcleos de ambos órganos sobre la f.e.m.

La frecuencia de las corrientes del inductor y del inducido están relacionadas por la siguiente expresión: $f_2 = s \cdot f_1$

Si el rotor estuviese parado ($n = 0$), el deslizamiento sería la unidad ($s = 1$), y consecuentemente la frecuencia de las corrientes en el inductor y el inducido sería la misma ($f_2 = f_1$). En ese caso la f.e.m. inducida en una fase del rotor cuando se encuentra parado E_2 sería:

$$E_2 = 4,44 \cdot \xi_{b2} \cdot N_2 \cdot f_1 \cdot \Phi_M$$

Relacionando la expresión anterior con la de la f.e.m. inducida en una fase del rotor cuando este se encuentra en movimiento E_{2s} se tiene:

$$E_{2s} = s \cdot E_2$$

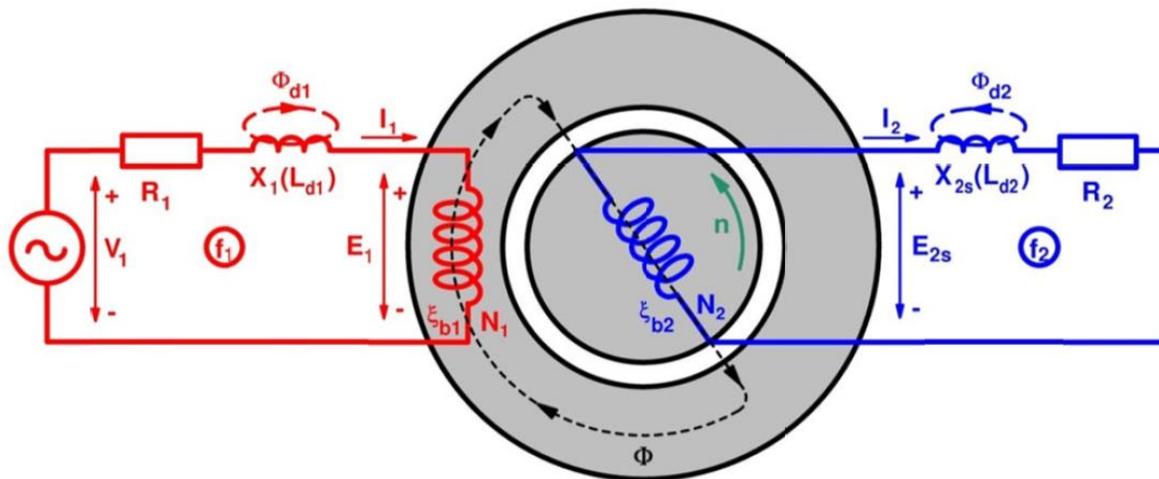


Figura 3.6. Circuito equivalente por fase de un motor asíncrono polifásico. Fuente: [2].

El circuito eléctrico equivalente de un motor de inducción se compone de una reactancia ideal que modela la magnetización vinculada al núcleo X_μ , dos reactancias ideales que modelan los flujos de dispersión en el inductor X_1 y el inducido X_2 con autoinductancias L_{d1} y L_{d2} respectivamente, una resistencia eléctrica equivalente a las pérdidas por histéresis y corrientes parásitas de los núcleos magnéticos R_{Fe} , y dos resistencias eléctricas que modelan las pérdidas eléctricas debidas a la resistividad de los conductores del estator R_1 y del rotor R_2 .

Las reactancias debidas a las autoinductancias en el inductor X_1 y en el inducido cuando el rotor está en movimiento X_{2s} y en reposo X_2 se deducen con las siguientes expresiones:

$$X_1 = 2\pi \cdot f_1 \cdot L_{d1} \quad X_2 = 2\pi \cdot f_1 \cdot L_{d2} \quad X_{2s} = 2\pi \cdot f_2 \cdot L_{d2} = s \cdot X_2$$

En el circuito de la Figura 3.6, las magnitudes del rotor f_2 , E_{2s} y X_{2s} dependen del deslizamiento (s), y por ende varían con la velocidad de giro n del motor. Si el rotor estuviese detenido las magnitudes del rotor correspondientes serían f_1 , E_2 y X_2 .

Para poder emplear el circuito equivalente de un modo más simple, es preciso reducir el secundario al primario (en caso de un motor asíncrono, trasladar el rotor al estator). Para ello se ha de sustituir al rotor real por otro equivalente, de tal forma que no se modifiquen las magnitudes del estator, el flujo de potencia a través del entrehierro, y el campo magnético y que, consecuentemente, el flujo por polo adquiera el mismo valor. Asimismo, las características del rotor equivalente han de ser idénticas a las del estator (mismo número de espiras efectivas $N_2' = N_1$, número de fases $m_1 = m_2'$ y factor de devanado $\xi'_{b2} = \xi_{b1}$ que el estator) y esté ha de estar inmóvil para que las corrientes en el inductor y el inducido posean la misma frecuencia $f_2' = f_1$. Teniendo en cuenta que el estator y el rotor reducido al estator se encuentran inmóviles, y el flujo por polo es el mismo en ambos, se deduce que la f.e.m. inducida en el rotor equivalente E_2' coincide con la del estator E_1 . Resultando el circuito equivalente de la Figura 3.7, en el que todas las magnitudes, tensiones corrientes y parámetros del circuito del rotor están referidas al estator y se expresan incorporando el superíndice a las mismas.

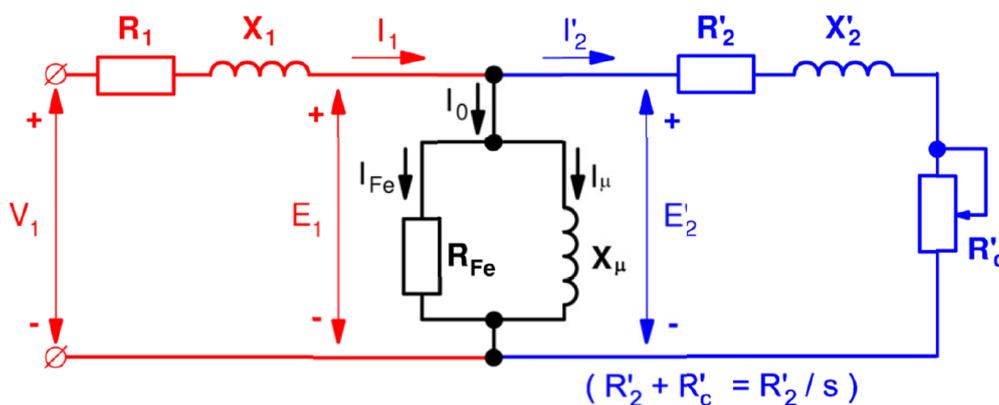


Figura 3.7. Circuito equivalente exacto por fase del motor asíncrono polifásico. Fuente: [2].

La resistencia equivalente del rotor reducida al estator, se ha desglosado a su vez en otras dos: la resistencia propia del devanado del rotor reducida al estator R_2' y la resistencia de carga reducida al estator R_c' que depende de la velocidad de giro del motor (deslizamiento del motor, s). Según la expresión:

$$R'_c = R'_2 \cdot \left(\frac{1}{s} - 1 \right)$$

La resistencia de carga simboliza el efecto equivalente a una carga mecánica aplicada al motor. Es decir, La potencia mecánica en el eje real desarrollada por el motor equivale a la potencia eléctrica total disipada en la resistencia de carga R_c de todas las fases.

Para simplificar aún más el análisis de la máquina, se traslada la rama en vacío (rama paralelo compuesta por la resistencia R_{Fe} y la reactancia X_μ) a los terminales de conexión a la red, obteniéndose el circuito eléctrico equivalente aproximado del motor (Figura 3.8). El error cometido con esta aproximación es superior al resultante en el transformador, al ser la corriente de vacío I_0 más relevante (0,35 a 0,4 veces la corriente asignada) a causa de la presencia del entrehierro que incrementa la reluctancia del circuito magnético, obteniéndose corrientes en el rotor apreciablemente más elevadas a las reales. No obstante, esta aproximación es aceptable en motores de potencia superior a los 10 kW (la corriente de vacío representa entre el 20% y el 50% de la corriente asignada).

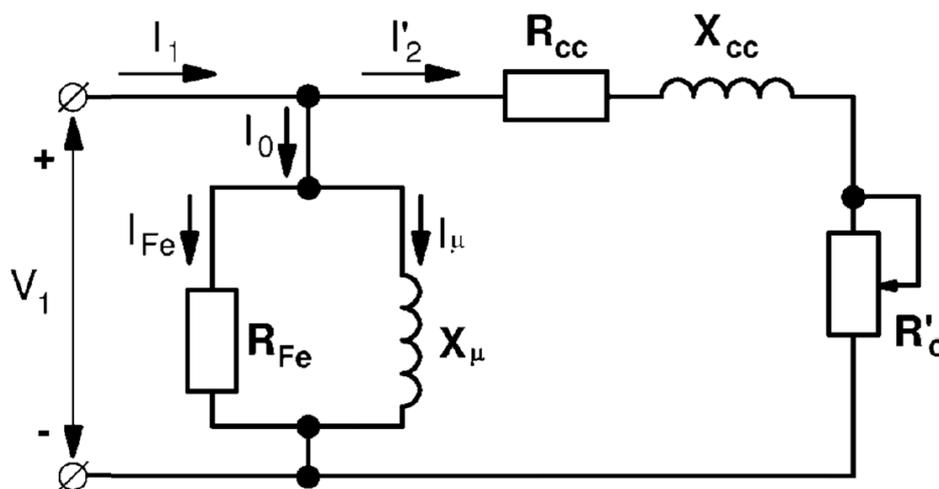


Figura 3.8 Circuito equivalente aproximado de un motor asíncrono polifásico. Fuente: [2].

En la Figura 3.8, R_{cc} y X_{cc} se corresponden con la resistencia y la reactancia de cortocircuito:

$$R_{cc} = R_1 + R'_2$$

$$X_{cc} = X_1 + X'_2$$

3.1.5 ARRANQUE DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN

El arranque es el proceso de puesta en marcha de una máquina eléctrica. En un motor de inducción, es preciso que el par de arranque sea superior al par resistente de la carga para que se produzca el arranque del motor; de esta forma se obtiene un par de aceleración que obliga a girar al rotor desde una velocidad nula a una velocidad cada vez más elevada, alcanzando el régimen permanente cuando se igualan pares motor y resistente, punto de funcionamiento estable.

En el proceso de arranque, la intensidad demandada es varias veces superior a la asignada. Esta corriente elevada puede provocar caídas de tensión en la instalación eléctrica que alimenta al motor afectando a otros dispositivos conectados a ella. Las normas de los diferentes países establecen las máximas corrientes de arranque permitidas. En España el REBT en su instrucción ITC-BT-47, apartado 6, Sobreintensidad de arranque, fija los límites de la relación I_s/I_N (corriente en el arranque entre corriente a plena carga) para motores de c.a.

Para reducir la corriente en el momento de la puesta en marcha de un motor se emplean métodos especiales de arranque, según que la máquina tenga su rotor en forma de jaula de ardilla o bobinado.

Arranque directo

El sistema de arranque directo consiste en conectar el motor directamente a la red de alimentación eléctrica ejecutando, por lo tanto, un arranque a su tensión asignada, a menudo se abrevia con la sigla DOL (Direct On Line, "directo en línea").

El arranque directo representa el sistema más simple y económico para arrancar el motor asíncrono y es tradicionalmente el más utilizado. Prevé la conexión directa a la red de alimentación y, por lo tanto, el arranque tiene lugar a plena tensión y con frecuencia constante, desarrollando un par de arranque elevado con tiempos de aceleración de media muy reducidos. Las aplicaciones típicas son relativas a motores de poca potencia incluso con arranque a plena carga.

Estas ventajas llevan intrínsecas algunos problemas, como por ejemplo la elevada corriente inicial de arranque, que puede alcanzar en los primeros instantes valores de hasta 10 ó 12 veces la intensidad nominal, para decrecer después a valores cercanos a las 6 u 8 veces y permanecer en este rango hasta alcanzar la velocidad de par máximo.

Los efectos de dicha corriente pueden identificarse en los elevados esfuerzos electrodinámicos de los cables de conexión al motor y podrían afectar incluso a los devanados del propio motor; además, los elevados pares iniciales de arranque pueden dar lugar a violentas aceleraciones que repercuten en esfuerzos sobre los elementos de transmisión (correas y juntas mecánicas) generando problemas en la distribución con la consecuente reducción de la vida mecánica de los componentes. Finalmente, han de tenerse en cuenta eventuales problemas de naturaleza eléctrica por caídas de la tensión en la línea de alimentación del motor o de la aparamenta conectada a la misma.

Arranque con tensión reducida

El procedimiento consiste en alimentar al motor con una tensión inferior a la asignada en el momento del arranque para posteriormente, cuando el rotor se encuentre en movimiento, aumentarla progresivamente hasta alcanzar su valor asignado.

Así se logra disminuir la corriente en el arranque al operar a una tensión inferior a la asignada en dicho instante, reduciéndose también el par de arranque al ser proporcional al cuadrado de la tensión. Por lo tanto, se ha de comprobar que el par de arranque del motor a tensión reducida sea suficientemente elevado como para que se verifique la condición de arranque. Dada esta limitación este procedimiento de arranque solo es válido si el motor arranca sin carga o con cargas mecánicas que no ejerzan un par resistente elevado a bajas velocidades.

- Arranque estrella-triángulo

El arranque estrella-triángulo es el más utilizado entre los métodos de arranque con tensión reducida, permite el arranque del motor reduciendo los esfuerzos mecánicos y limitando las corrientes durante el arranque a expensas de un par inicial de arranque reducido.

Puede utilizarse para motores dotados de una placa con 6 bornes y con doble tensión de alimentación. Resulta especialmente idóneo para arranque en vacío o con cargas de par bajo y constante o ligeramente creciente, como es el caso de ventiladores o bombas centrífugas de poca potencia.

El arranque estrella-triángulo sólo se puede realizar si el motor se conecta a una red eléctrica con una tensión de línea igual a la tensión asignada de fase del motor. Esto obliga a que para que el motor funcione a su tensión asignada deba conectarse en triángulo.

El arranque se realiza con el motor conectado en estrella. Cuando el motor ha adquirido cierta velocidad se conmutan las conexiones y se lo conecta en triángulo para que pase a funcionar con su tensión asignada. Al arrancar en estrella, la tensión de fase del motor ya no es la asignada sino $\sqrt{3}$ veces menor.

Esto provoca que la corriente de fase en este arranque sea $\sqrt{3}$ veces menor que en el arranque directo. En consecuencia, tanto la corriente de línea en el arranque estrella-triángulo como el par de arranque correspondiente son iguales a la tercera parte de sus respectivos valores en el arranque directo.

- Arranque con autotransformador

Consiste en intercalar un autotransformador entre la red y el motor, de tal forma que la tensión aplicada en el arranque sea solo una fracción de la asignada. El proceso puede realizarse en 2 o 3 escalones y con tensiones no inferiores al, 40, 60 y 75 por 100 de la tensión de la línea.

El arranque con autotransformador se considera bastante costoso, seguramente más que el arranque estrella-triángulo, y tiene aplicaciones en motores de jaula de ardilla de potencia media o alta con inercia elevada.

- Arranque con reactores o resistencias estartóricas

Este tipo de arranque es idóneo para rotores de jaula de ardilla, y la caída de tensión se produce por resistencias colocadas en serie con el estator en la fase de arranque, consecuentemente, la tensión aplicada al motor en la fase inicial disminuye k veces respecto a la tensión de red, a la que corresponde una disminución de par de k^2 veces. La corriente inicial de arranque queda limitada a la mitad de la que se obtendría con el arranque a plena tensión. Una vez completada la fase de aceleración, los reactores o las resistencias son desconectados y el motor vuelve a poseer los parámetros relativos a la tensión plena.

Pueden realizarse incluso más desconexiones graduales de los reactores o de las resistencias mediante comandos temporizados. Este método acarrea algunas consecuencias, presentes en la fase de arranque, como el notable descenso del factor de potencia a causa de las reactancias o un elevado recalentamiento producido por la disipación de potencia en las resistencias.

Es un sistema adoptado típicamente por máquinas con gran inercia que no necesitan valores de par y corriente particularmente altos durante el arranque.

- Arranque con arrancador suave

Un método moderno para realizar el arranque, que puede que todavía requiera de una inversión económica inicial considerable, consiste en utilizar arrancadores estáticos electrónicos comúnmente llamados soft starters o arrancadores suaves. La utilización de estos dispositivos permite reducir la corriente de arranque, determinar el par y fijar el tiempo de arranque, esto hace posible una alimentación muy gradual del motor que incrementa durante todo el procedimiento, a fin de obtener un arranque lineal, evitando esfuerzos eléctricos o en las partes mecánicas que caracterizan en mayor o menor grado los arranques directos y en estrella-triángulo. El arrancador suave está constituido principalmente por dos partes: una unidad de potencia y una unidad de mando y control. Los principales componentes de la unidad de potencia son el disipador térmico y los tiristores, controlados por la lógica implementada sobre una tarjeta de control, que constituye la unidad de mando, generalmente con microprocesador.

Arranque con rotor bobinado

Consiste en conectar una resistencia en serie con cada fase del rotor. Una vez arrancado el motor, se van disminuyendo gradualmente estas resistencias hasta que el rotor queda cortocircuitado.

Con este sistema se reduce la intensidad de arranque, y se aumenta el deslizamiento en el que se produce el par máximo, pero sin que éste varíe, lo que origina el aumento del par de arranque con respecto al del arranque directo. Incluso se puede obtener el par máximo en el arranque para un valor de resistencia conectada en serie con el rotor cuyo valor se obtiene teniendo en cuenta que con dicha resistencia el deslizamiento correspondiente al par máximo ha de ser igual a 1.

Arranque con rotor de jaula de ardilla

El sistema de arranque por introducción de resistencias en serie con el rotor es el más adecuado de los analizados, ya que permite obtener un elevado par en el arranque. Sin embargo, este método sólo se puede utilizar con motores de rotor bobinado.

- Motores de doble jaula

Los motores de doble jaula, realizan un arranque similar al de los motores de rotor bobinado, logrando un elevado par de arranque.

Los motores de doble jaula de ardilla poseen dos jaulas concéntricas construidas de tal manera que la jaula externa presenta una pequeña autoinducción (debida a los flujos de dispersión) y una elevada resistencia, mientras que la interna presenta baja resistencia y elevada autoinducción.

Esta configuración utiliza el fenómeno de desplazamiento de la corriente en el devanado del rotor para mejorar las propiedades de arranque del motor. Para lograrlo, la jaula externa situada más cerca del entrehierro, presenta barras de menor sección y se construyen con un material de mayor resistividad (latón o bronce) que la jaula interna (cobre). Así se consigue que la jaula externa tenga mayor resistencia que la interna. Por otro lado, cada ranura se estrecha en el espacio que hay entre ambas jaulas, dejando sólo una rendija delgada. Así se consigue que la jaula interna presente mayor inductancia de dispersión que la jaula externa.

De este modo la corriente en el rotor se distribuirá entre cada jaula dependiendo de las impedancias de las mismas. En el arranque la frecuencia del rotor coincide con la del estator, de tal forma que las reactancias son muy superiores a las resistencias, como consecuencia de ello la corriente fluye en su mayor parte por la jaula que presenta menor reactancia (la externa), a pesar de tener mayor resistencia. A velocidades normales las frecuencias rotóricas son despreciables, por lo que predominan las resistencias frente a las reactancias, y de este modo la mayor parte de la corriente circula por la jaula interior, que tiene menos resistencia. Así logramos que en el arranque la resistencia sea alta, lo que resulta en un elevado par de arranque y una baja corriente. A velocidad asignada la resistencia es baja con lo que se consigue un buen rendimiento.

Por consiguiente, en los motores de doble jaula el arranque se realiza con una resistencia elevada en el rotor que paulatinamente va disminuyendo a medida que el motor adquiere velocidad (deslizamientos menores, y por lo tanto frecuencia en el rotor menor).

- Motores de ranura profunda

Consiste en otra variedad constructiva para conseguir motores con alto par de arranque dotando al rotor de jaula simple, con ranuras profundas en las que se introducen conductores rectangulares o trapezoidales, con mayor profundidad que anchura. De modo que, la parte inferior presenta pequeña resistencia y alta autoinducción, y la parte superior alta resistencia y baja autoinducción. El cambio de la resistencia con la frecuencia se debe a las corrientes parásitas o de Foucault que se inducen en las barras, que son muy altas en el arranque y prácticamente despreciables a velocidades ordinarias. El comportamiento de este tipo de rotores es de este modo, similar al de doble jaula. En el arranque la corriente se concentra en la parte superior de los conductores (de alta resistencia) y en marcha normal la corriente circula preferentemente por la parte inferior, consiguiéndose así un par de arranque elevado.

3.1.6 EFICIENCIA EN LOS 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, en definitiva, 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.

La sustitución de motores con eficiencia estándar por otros de alta eficiencia supondría un potencial de ahorro energético considerable.

Además, el ahorro energético no solo supone una reducción del consumo, guarda una relación directa con el impacto medioambiental que produce. Por cada kWh generado se producen 0,59 kg de CO₂ el ahorro en emisiones de CO₂

3.1.7 PÉRDIDAS EN UNA MÁQUINA ELÉCTRICA. DEFINICIÓN DEL RENDIMIENTO

El rendimiento se define como el cociente entre la potencia útil o potencia mecánica motriz en el eje (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 f.e.m. 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 en el hierro: Se producen por las variaciones de flujo y pueden subdividirse en pérdidas por histéresis y pérdidas por corrientes parásitas (corrientes de Foucault).
- 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 y 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.

3.2 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 relacionan algunas variables de cada tipo [3].

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.

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.

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, son [4]:

Costes

Uno de los objetivos principales consiste en 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).

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, cobre y aluminio para los arrollamientos, así como 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, son factores a tener en cuenta en el diseño del motor.

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 proyecto se centra en el diseño eléctrico y magnético del motor.

3.2.1 ESTANDARIZACIÓN Y CLASIFICACIÓN DEL MOTOR ASÍNCRONO

Clases de diseño

La National Electrical Manufacturers Association (NEMA) Asociación de fabricantes norteamericanos de máquinas eléctricas, y el Comité Electrotécnico Internacional (CEI o IEC) han clasificado los motores asíncronos según sus características operativas en función del diseño de su rotor en:

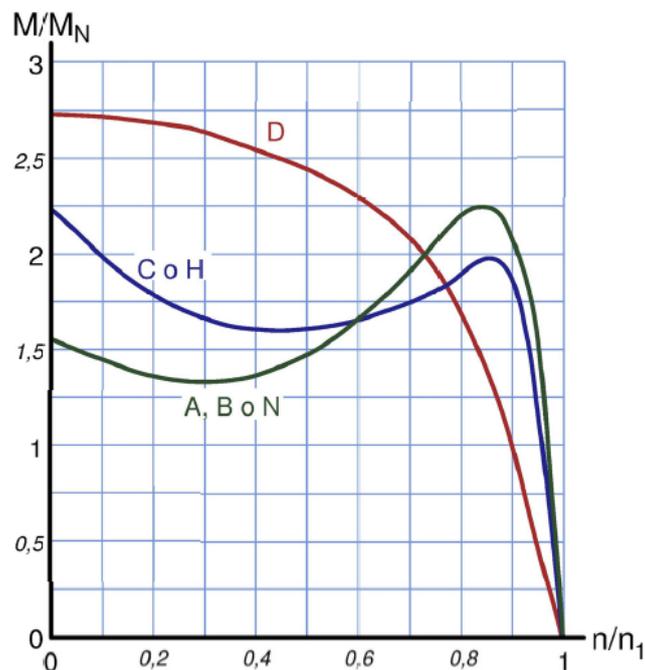


Figura 3.9. Curvas par-velocidad de los diseños NEMA A, B, C y D e IEC N y H.

- Clase A (NEMA)

Motores de jaula simple, en los que apenas se da el efecto pelicular, con barras de gran sección y, consecuentemente, de baja resistencia. Presentan un par de arranque normal, intensidad de arranque superior a otros diseños de propósito general como los diseños clase B, y bajo deslizamiento.

- Clase B (NEMA), N (IEC)

Motores de ranura profunda. Presenta un par de arranque normal similar al de los motores clase A (ligeramente inferior), su corriente de arranque es menor (25% inferior a la intensidad en el arranque de los motores clase A), y un par máximo moderado inferior al del diseño clase A.

La mayoría de motores de inducción pertenecen a este grupo. Estos motores de uso general se utilizan para impulsar ventiladores, bombas centrífugas, máquinas herramienta etc.

- Clase C (NEMA), H (IEC)

Motores de doble jaula o de ranura profunda. Tienen mayor par de arranque, y presentan menor par máximo y mayores deslizamientos a plena carga y de par máximo que los motores clase A y B, en consecuencia, presentan un rendimiento y factor de potencia medios.

Estos motores se emplean en condiciones de arranque difíciles, como por ejemplo las bombas y los compresores sometidos a carga. A pesar de su alto par o momento de torsión, los motores de diseño C no se recomiendan para carga de arranque de gran inercia. La razón es que la mayoría de pérdidas por efecto Joule en el rotor durante el arranque están concentradas en la jaula más externa, dado su pequeño tamaño, este tiende a sobrecalentarse y las barras se pueden fundir.

- Clase D (NEMA e IEC)

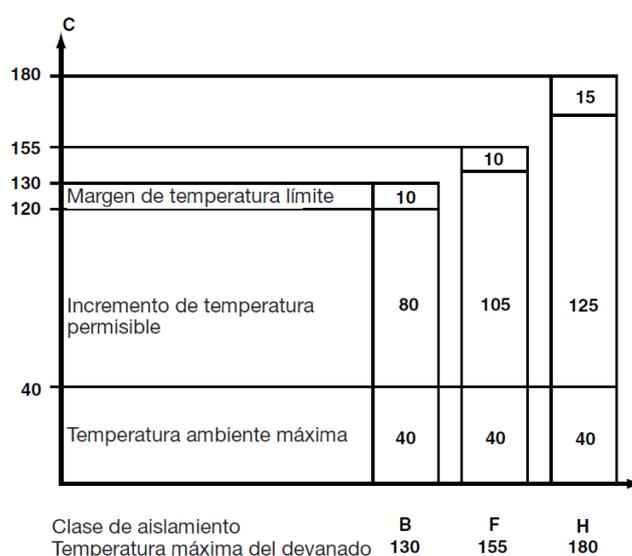
Motores de jaula simple en los que las barras del rotor son de pequeña sección y están construidas con un metal de alta resistividad como el latón. Esto hace que su resistencia sea elevada, lo que origina que el deslizamiento de par máximo sea muy alto, así como el correspondiente a la plena carga.

Estos motores se utilizan para acelerar cargas de gran inercia como secadoras centrífugas, las cuales requieren un tiempo relativamente largo para alcanzar su velocidad máxima.

En general los motores se diseñan para trabajo intermitente a fin de evitar sobrecalentamientos.

Clase térmica del sistema de aislamiento

Indica el límite de temperatura admitido por los devanados del motor. Se expresa a través de clases de aislamiento identificadas con letras, a las que se asocia la temperatura máxima admitida por los devanados. Las clases térmicas y temperaturas son: Y (90°), A (105°), E (120°), B (130°), F (155°), H (180°), N (200°), R (220°). A menudo se utilizan sistemas con clase de aislamiento F para los que se admite una sobretemperatura de la clase B (tiene en cuenta un margen de seguridad de la vida del aislamiento).



Tipos de servicio

El tipo de servicio define el ciclo de carga al que está sometida la máquina, incluidos si cabe 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 un tiempo de arranque no despreciable, un tiempo de funcionamiento a carga constante y un tiempo 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. No existe ningún tiempo 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.

Sistemas de refrigeración

El código IC (norma IEC 60034-6) es una designación relativa al método de refrigeración y está compuesta por cifras y letras que representan la disposición del circuito, el tipo de fluido refrigerante y el método de circulación de dicho fluido.

Formas constructivas. Posiciones de montaje

La norma internacional IEC 60034-7 clasifica las diferentes formas constructivas mediante un código precedido de las letras IM (International Mounting). La norma utiliza dos sistemas de clasificación, el código I y el código II.

- El código I es aplicable a las máquinas con cojinetes de escudo y un solo extremo de eje (casos simples). Consta de una letra (B -eje horizontal- o V -eje vertical-) y un número de una o dos cifras.
- El código II es aplicable a una gama más amplia de máquinas (todos los casos, incluye el código I). Consta de cuatro cifras las tres primeras son diversos aspectos constructivos y la cuarta designa el tipo de extremo de eje.

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 en milímetros del diámetro de la circunferencia de agujeros lisos o roscados de anclaje.

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.

3.3 TÉCNICAS MEF – CAD EN EL 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, asimismo 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 los mismos con la consecuente disminución en el tiempo y 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 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 nexo 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.

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

Pre-procesamiento:

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 del mismo, los materiales eléctricos se caracterizan por su resistividad, los materiales magnéticos (las láminas de acero en el caso del motor de inducción) son: la curva de magnetización, punto de saturación, pérdidas máximas, conductividad, densidad, factor de empilado, etc.

Consideración de los efectos de borde mediante circuito externo (modelo 2D)

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.

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.

Post proceso: Análisis de los resultados

Solución numérica: Diagramas, mapas de colores.

Cálculo de magnitudes, parámetros concentrados, y optimización.

3.3.1 RECURSOS DISPONIBLES

La incorporación de herramientas CAE (Ingeniería asistida por ordenador) se ha extendido en el ámbito de diseño de máquinas eléctricas por 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, así como la alimentación y el control, para obtener sus características como par, velocidad, potencia, así como 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 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

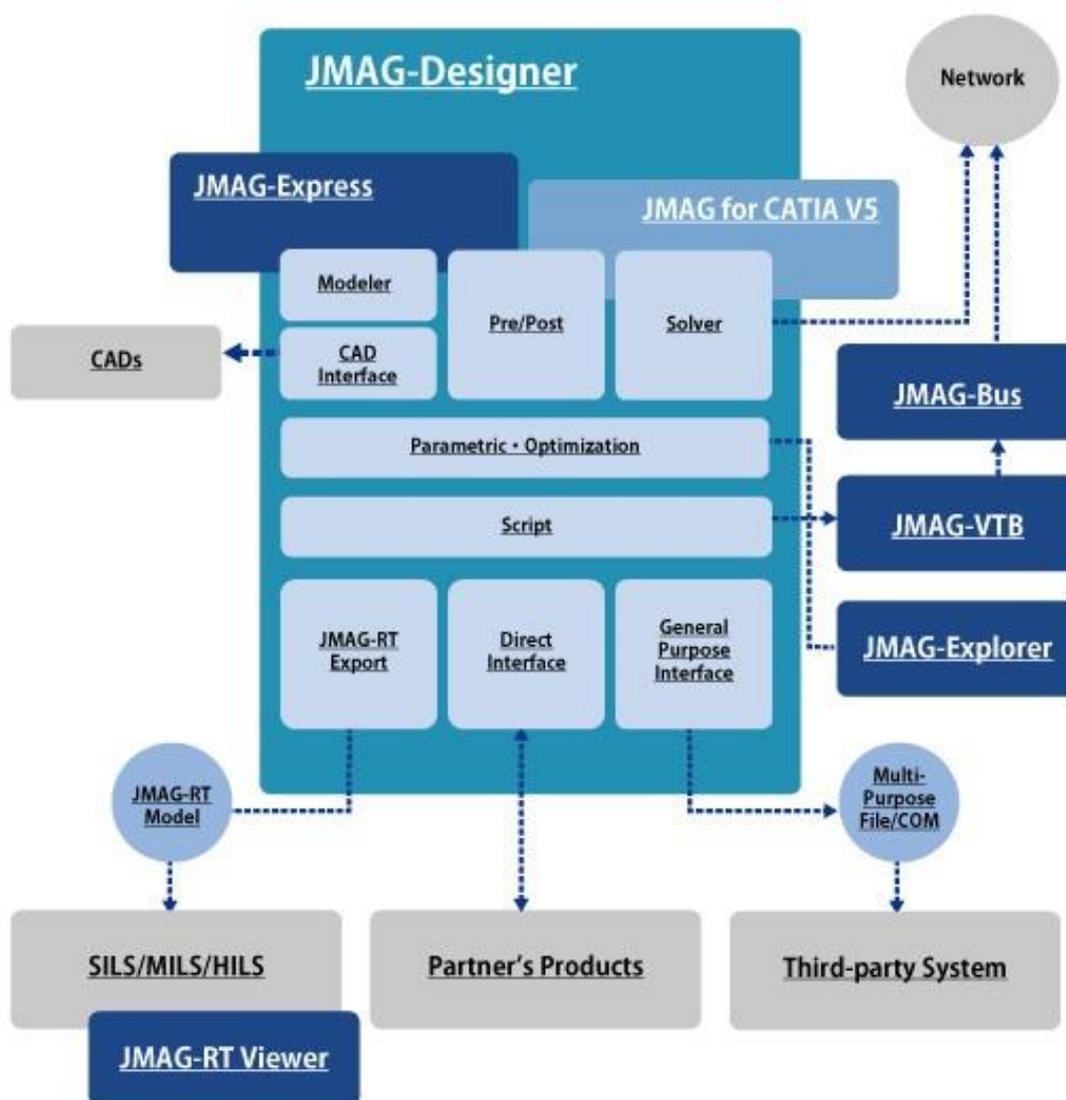
La compañía INTEGRATED Engineering Software, ofrece numerosos softwares de simulación 2D y 3D dedicados al análisis electromagnético, térmico y de trayectoria de partículas, integra en un mismo paquete tres métodos de resolución: BEM (Boundary Element Method), FEM (Finite Element Method) y FDTD (Finite Difference Time Domain Method), permitiendo escoger aquel que mejor se adapte a la aplicación concreta que se esté analizando, cuenta así mismo con numerosas herramientas de optimización como 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 específico para el diseño de motores asíncronos y transformadores

3.3.2 ENTORNO JMAG

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



JMAG Designer

Este producto permite el diseño electromagnético y análisis estructural y térmico.

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.

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 par – velocidad y mapas de eficiencia especificando el modo de control del modelo JMAG-RT en el visor JMAG-RT.

JMAG for CATIA

Enlaza el entorno CATIA con JMAG

3.3.3 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.

JMAG-Express Public cuenta con el mismo tipo de prestaciones que JMAG-Express Quick Mode, a lo largo del trabajo se analizarán en detalle las mismas.

4 NORMAS Y REFERENCIAS

4.1 DISPOSICIONES LEGALES Y NORMAS APLICADAS

A continuación, se enumeran las disposiciones legales y las normas de no obligado cumplimiento que se han considerado en la realización del proyecto:

- AENOR. 1996. *UNE- EN 50102: Grados de protección proporcionados por las envolventes de materiales eléctricos contra los impactos mecánicos externos (código IK)*. Madrid: AENOR.
- AENOR. 2011. *UNE-EN 60034-1: Máquinas eléctricas rotativas. Parte 1: Características asignadas y características de funcionamiento*. Madrid: AENOR
- AENOR. 1997. *UNE 60034-2: Máquinas eléctricas rotativas. Parte 2: Métodos para la determinación de las pérdidas y del rendimiento de las máquinas eléctricas rotativas a partir de los ensayos (excepto las máquinas para vehículos de tracción)*. Madrid: AENOR.
- AENOR. 2003. *UNE-EN 60034-5: Máquinas eléctricas rotativas. Parte 5: Grados de protección proporcionados por el diseño integral de las máquinas eléctricas rotativas (Código IP). Clasificación*. Madrid: AENOR.
- AENOR. 1997. *UNE-EN 60034-6: Máquinas eléctricas rotativas. Parte 6: Métodos de refrigeración (Código IC)*. Madrid: AENOR.
- AENOR. 1997. *UNE-EN 60034-7: Máquinas eléctricas rotativas. Parte 7: Clasificación de los tipos de construcción y de las disposiciones de montaje (Código IM)*. Madrid: AENOR.
- AENOR. 2003. *UNE-EN 60034-12: Máquinas eléctricas rotativas. Parte 12: Características de arranque de los motores trifásicos de inducción de jaula con una sola velocidad*. Madrid: AENOR.
- AENOR. 2008. *UNE-EN 60085: Aislamiento eléctrico. Evaluación y designación térmica*. Madrid: AENOR.

4.2 **BIBLIOGRAFÍA**

4.2.1 **LIBROS DE CONSULTA**

- [1] J. F. Mora, Máquinas Eléctricas, Quinta ed., Madrid: Mc Graw-Hill, 2003.
- [2] M. A. R. Pozueta, «Máquinas asíncronas,» 2008. [En línea]. Available: <http://personales.unican.es/rodrigma/PDFs/asincronas%20caminos.pdf>.
- [3] L. F. Mantilla Peñalba, Fundamentos de Transformadores Eléctricos y Máquinas Eléctricas Rotativas, Universidad de Cantabria, 2013.
- [4] I. Boldea y S. A. Nasar, The Induction Machine Handbook, New York: CRC Press, 2001.
- [5] Electric Motor Education and Research Foundation, EMERF, *Lamination Steels Third Edition. A compendium of Lamination Steel Alloys Commonly Used in Electric Motors.*, Electric Motor Education and Research Foundation EMERF, 2009.
- [6] J. Pyrhönen, T. Jokinen y V. Hrabovcová, Design of Rotating Electrical Machines, West Sussex (Inglaterra): John Wiley & Sons, Ltd, 2008.
- [7] K. G. Upadhyay, Design of Electrical Machines, New Delhi (India): New Age International, 2008.
- [8] J. C. Martín, Cálculo industrial de máquinas eléctricas. Tomo II: Método de cálculo, Badalona (Barcelona): Marcombo Boixareu Editores, 1976.
- [9] M. A. R. Pozueta, «Ayuda para el manejo de CALASIN (v4.0),» 2016. [En línea]. Available: <http://personales.unican.es/rodrigma/Descargas/Ayuda%20de%20CALASIN%20v4.0.pdf>.

4.2.2 **PÁGINAS WEB**

- <http://www.imag-international.com/>
- <http://old.weg.net/es/Productos-y-Servicios/Electric-Motors/Low-and-High-Voltage-Machines/M-Line-MGF-Low-and-High-Voltage-TEAAC-Squirrel-Cage>
- <http://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/index?openform&part=411>
- <http://www.vonroll.com/en/market-detail/high-voltage-electric-drives/?id=application3>

- <http://ocw.unican.es/enseñanzas-tecnicas/maquinas-electricas-g862>
- <https://www.integratedsoft.com/product/faraday/>
- <https://www.integratedsoft.com/product/amperes/>
- <http://www.cedrat.com/en/software/flux/>
- <http://www.alliance-winding.com/techpapers/optprocess.pdf>
- <http://ec.europa.eu/eurostat/cache/sankey/sankey.html?geo=ES&year=2014&unit=GW&fuels=0000&highlight=&nodeDisagg=1101000000&flowDisagg=false>
- <http://www.indielec.com/software-cms-4-50-50/>

4.2.3 OTROS DOCUMENTOS

- Rockwell Automation, *Conceptos básicos sobre el uso de los motores de inducción trifásicos*, Rockwell Automation AG, 1996 [Catálogo].
- WEG, *Motores Eléctricos. Guía de especificación*, [Catálogo].
- ABB Motors, *Guía del motor: Información técnica básica de motor de inducción de baja tensión*, [Catálogo].
- ABB Motors, *Cuaderno de aplicaciones técnicas nº 6: El motor asíncrono trifásico. Generalidades y oferta de ABB para la coordinación de las protecciones*. [Catálogo]

4.3 PROGRAMAS DE CÁLCULO

Para la realización del presente proyecto se han empleado los siguientes programas:

- JSOL Corporation, *JMAG-Express Public (2016.7) [Software]*, JSOL Corporation, 2016.
- M. A. R. Pozueta, *CALASIN v4.0 [Freeware]*, España: Universidad de Cantabria, 2016.
- Autodesk, Inc., *Autodesk Inventor Professional 2017 [Software]*, Autodesk, Inc, 2016.
- The MathWorks, Inc, *MATLAB R2016a [Software]*, The MathWorks, Inc, 2016.

5 DEFINICIONES Y ABREVIATURAS

5.1 LISTA DE SÍMBOLOS

A_r	Capa de corriente de ranura
a'	Número de ramas en paralelo de una fase
a'_1	Número de ramas en paralelo de una fase del estator
a'_2	Número de ramas en paralelo de una fase del rotor
a_{c1}	Ancho de un conductor del estator
b_0	Susceptancia magnetizante
b_1	Número de bobinas por par de polos y fase del estator
b_{c1}	Altura de un conductor del estator
b_{ins1}	Espesor tangencial total del aislamiento en la ranura del estator
b_{o1}	Abertura de la boca de ranura del estator
b_{o2}	Abertura de la boca de ranura del rotor
b_{s1}	Ancho de ranura del estator
b_{s1min}	Ancho mínimo de ranura del estator
b_{s2}	Ancho de ranura del rotor
b_{t1}	Ancho del diente del estator
$b_{t1^{1/3}}$	Ancho del diente del estator a $\frac{1}{3}$ de su altura
b_{t2}	Ancho del diente del rotor
B_δ	Inducción magnética en el entrehierro
B_M	Inducción magnética máxima en el entrehierro
B_{t1}	Inducción magnética en los dientes del estator
$B_{t1^{1/3}}$	Inducción magnética a $\frac{1}{3}$ de la altura del diente del estator
B_{t1M}	Inducción magnética máxima en los dientes del estator

B_{t2}	Inducción magnética en los dientes del rotor
B_{t2M}	Inducción magnética máxima en los dientes del rotor
B_{y1M}	Inducción magnética máxima en el yugo del estator
B_{y2M}	Inducción magnética máxima en el yugo del rotor
c	Inclinación de ranuras medida como longitud de arco de circunferencia
$\cos \phi_1$	Factor de potencia del motor
$\cos \phi_N$	Factor de potencia asignado
$\cos \phi_{1N}$	Factor de potencia asignado
d	Diámetro de la circunferencia que contiene los centros de las barras del rotor
d_1	Diámetro de la circunferencia externa de la barra oval
d_2	Diámetro de la circunferencia interna de la barra oval
$d_{1/3}$	Diámetro de la circunferencia que pasa a $\frac{1}{3}$ de la altura del diente del estator
D_1	Diámetro interior del estator
D_{1e}	Diámetro exterior del estator
D_2	Diámetro exterior del rotor
d_{c2}	Diámetro de una barra de la jaula del rotor
E_1	F.e.m. inducida en una fase del estator
E_{1N}	F.e.m. inducida en una fase del estator en condiciones asignadas
E_{bobina}	F.e.m. inducida en una bobina
E_f	F.e.m. resultante en un devanado distribuido
E_r	F.e.m. inducida en cada lado de la bobina
E_t	F.e.m. resultante en un devanado concentrado
e_{ins_c1}	Espesor de la capa de aislante del conductor del estator
e_{ins_s1}	Espesor de una pieza aislante en U del estator

f_1	Frecuencia de la red, frecuencia de las corrientes del estator
f_2	Frecuencia de las corrientes del rotor
g_0	Conductancia equivalente de pérdidas en el hierro
h_{ins1}	Espesor radial total del aislamiento en la ranura del estator
h_{o1}	Profundidad del cuello de ranura del estator
h_{o2}	Profundidad del cuello de ranura del rotor
h_r	Distancia entre los centros del diámetro externo e interno de las barras oval
h_{s1}	Altura de la ranura del estator
h_{s1min}	Altura mínima de ranura del estator
h_{su1}	Altura útil de ranura del estator
h_{y1}	Altura del yugo del estator
I_μ	Corriente de magnetización
I_0	Corriente de vacío
I_1	Intensidad en una fase del estator
I_2	Intensidad en una fase del rotor
I'_2	Intensidad en una fase del rotor referida al estator
I_{1N}	Intensidad asignada en una fase del estator
I_{2N}	Intensidad asignada en una fase del rotor
I'_{2N}	Intensidad asignada en una fase del rotor referida al estator
I_{bN}	Intensidad asignada en una barra de la jaula del rotor
I_{Fe}	Corriente de pérdidas en el hierro
I_{r1N}	Intensidad asignada de una rama en paralelo de una fase del estator
I_{r2N}	Intensidad asignada de una rama en paralelo de una fase del rotor
I_s	Intensidad en una fase del estator en el arranque del motor

J_1	Densidad de corriente por unidad de superficie en un conductor del estator
J_{1N}	Densidad de corriente en un conductor del estator en condiciones asignadas
J_2	Densidad de corriente por unidad de superficie en un conductor del rotor
K	Número de ranuras
K_1	Número de ranuras en el estator
K_2	Número de ranuras en el rotor
K_{Cu1}	Factor de ocupación de ranura del estator
K_{Cu2}	Factor de ocupación de ranura del rotor
K_E	Relación entre E_{1N} y V_{1N}
K_{Fe1}	Factor de empilado del estator
K_{Fe2}	Factor de empilado del rotor
l_δ	Longitud axial equivalente o longitud axial efectiva del entrehierro
l_{Fe}	Longitud útil del hierro
l_g	Longitud axial geométrica del motor
l_v	Longitud de un canal radial de ventilación
l_{ve}	Longitud efectiva de un canal radial de ventilación
l_{v1}	Longitud de un canal radial de ventilación del estator
m	Número de fases
m_1	Número de fases del estator
m_2	Número de fases del rotor
m_i	Relación de transformación de corrientes
M	Par de rotación del motor
n_1	Velocidad síncrona del motor en rpm
n_N	Velocidad asignada del motor en rpm

n_v	Número de canales radiales de ventilación
n_{v1}	Número de canales radiales de ventilación en el estator
N_1	Número de espiras efectivas en serie de una fase del estator
N_2	Número de espiras efectivas en serie de una fase del rotor
N_{f1}	Número total de espiras de una fase del estator
N_{r1}	Número de espiras de una bobina simple del estator
p	Número de pares de polos del motor
P_{Cu}	Potencia de pérdidas en el cobre total
P_{Cu1}	Potencia de pérdidas en el cobre del estator
P_{Cu2}	Potencia de pérdidas en el cobre del rotor
P_{Fe}	Potencia de pérdidas en el hierro
P_N	Potencia activa asignada del motor
P_{1N}	Potencia activa absorbida en condiciones asignadas
P_{mi}	Potencia mecánica interna
P_u	Potencia útil
q	Número de ranuras por polo y fase
q_1	Número de ranuras por polo y fase del estator
q_2	Número de ranuras por polo y fase del rotor
R_1	Resistencia de una fase del estator
R_2	Resistencia de una fase del rotor
R_2'	Resistencia de una fase del rotor reducida al estator
R_{Fe}	Resistencia equivalente de pérdidas en el hierro
s	Deslizamiento del motor
s_m	Deslizamiento en el instante de par máximo

s_N	Deslizamiento asignado del motor
S_{1N}	Potencia aparente trifásica absorbida de la red
S_{c1}	Sección de un conductor del estator
S_{c1ins}	Sección de un conductor del estator incluyendo recubrimiento aislante
S_{c2}	Sección de una barra de la jaula del rotor
S_{c2ins}	Sección de un conductor del rotor incluyendo recubrimiento aislante
S_{su1}	Área útil de ranura del estator
S_{su2}	Área útil de ranura del rotor
S_{y1}	Sección transversal del yugo del estator
T	Par desarrollado por el motor
T_m	Par máximo del motor
T_N	Par asignado del motor
T_s	Par de arranque del motor
V_1	Tensión de fase del estator
V_{1L}	Tensión de línea del estator
V_{1N}	Tensión de fase asignada del estator
V_r	Volumen prismático del inducido
X_1	Reactancia de dispersión por fase del estator
X_μ	Reactancia magnetizante
X_2	Reactancia de dispersión por fase del rotor
X_2'	Reactancia de dispersión por fase del rotor reducida al estator
y_1	Paso de bobina del estator medido en número de ranuras
y_2	Paso de bobina del rotor medido en número de ranuras
y_p	Paso polar medido en número de ranuras

γ_{p1}	Paso polar medido en número de ranuras del estator
γ_{p2}	Paso polar medido en número de ranuras del rotor
Z_{k1}	Número de conductores en una ranura del estator
Z_{k2}	Número de conductores en una ranura del rotor
α_i	Ángulo eléctrico de inclinación de ranura
β	Acortamiento de paso medido en ángulo eléctrico
γ	Angulo geométrico entre dos ranuras consecutivas
δ_g	Espesor del entrehierro geométrico
η	Rendimiento del motor
η_N	Rendimiento asignado del motor
λ	Cociente entre paso polar y longitud axial efectiva del entrehierro
μ_0	Permeabilidad del vacío [$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m]
ν	Orden del armónico
ξ_{av}	Factor de acortamiento del armónico ν
ξ_{dv}	Factor de devanado del armónico ν
ξ_{bv}	Factor de distribución del armónico ν
ξ_{iv}	Factor de inclinación del armónico ν
ξ_i	Factor de inclinación para el armónico fundamental
ξ_{i2}	Factor de inclinación del rotor
ξ_{a1}	Factor de acortamiento del estator
ξ_{a2}	Factor de acortamiento del rotor
ξ_{b1}	Factor de devanado del estator
ξ_{b2}	Factor de devanado del rotor
ξ_{d1}	Factor de distribución del estator

ξ_{d2}	Factor de distribución del rotor
σ_{Ftan}	Esfuerzo tangencial
τ_p	Paso polar medido en longitud de arco de circunferencia
τ_{p1}	Paso polar medido en longitud de arco de circunferencia interior del estator
τ_{p2}	Paso polar medido en longitud de arco de circunferencia interior del rotor
τ_r	Paso de ranura medido en longitud de arco de circunferencia
τ_{r1}	Paso de ranura del estator
$\tau_{r1}^{1/3}$	Paso de ranura estator medido como longitud de arco de circunferencia de $d_{1/3}$
τ_{r2}	Paso de ranura del rotor
τ_{r2}^d	Paso de ranura del rotor medido en longitud de arco de circunferencia de d
ϕ	Flujo en el entrehierro
ϕ_M	Flujo máximo en el entrehierro
ϕ_{y1M}	Flujo máximo en el yugo del estator
Ω	Velocidad angular del motor [rad/s]
Ω_1	Velocidad síncrona del motor expresada en [rad/s]
Ω_N	Velocidad angular asignada del motor [rad/s]

5.2 LISTA DE ABREVIATURAS

c.a.	Corriente alterna
c.c.	Cortocircuito, corriente continua
f.e.m.	Fuerza electromotriz
f.m.m.	Fuerza magnetomotriz
FEM	Finite Element Method (Método por Elementos Finitos)
r.p.m.	Revoluciones por minuto

6 REQUISITOS DE DISEÑO

El proyecto se desarrolla a petición del grupo I+D+i GAIME (Grupo de Accionamientos Industriales y Máquinas Eléctricas) del departamento DIEE (Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética) de la ETSIIT en la Universidad de Cantabria.

De acuerdo a las especificaciones requeridas por el cliente, se va a proceder a diseñar un prototipo de un motor de inducción de jaula de ardilla con las siguientes características: trifásico de 4 polos, potencia asignada 3550 kW, tensión asignada (Δ/Y) 4000/2309 V, tipo de conexión del devanado inductor estrella, y frecuencia 50 Hz.

Las especificaciones que derivan de las legislación, reglamentación y normativa aplicables se enumeran a continuación:

- Diseño tipo N (B)
- Par de arranque (pu): 0,8
- Intensidad de arranque (p.u.): 5,8
- Par máximo (p.u.): 2,4
- Clase de aislamiento: F
- Incremento de temperatura: Clase B
- Índice de protección de la envolvente: IP55
- Tipo de servicio: S1

Toda la documentación necesaria para establecer los requisitos de diseño se detalla en el Anexo 1.

Los estudios realizados se han centrado en el diseño geométrico y electromagnético de los núcleos y arrollamientos del prototipo del motor. El desarrollo de las distintas propuestas de diseño se ha efectuado con el software de diseño de máquinas eléctricas rotativas JMAG-Express Public de la compañía japonesa JSOL Corporation, y el software de diseño de máquinas asíncronas CALASIN v4.0, desarrollado por Miguel Ángel Rodríguez Pozueta docente del Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética (DIEE) de la Universidad de Cantabria.

En la etapa inicial de diseño, se parte de una estimación de las dimensiones principales de la máquina obtenidas analíticamente y que se detallan en el Anexo 2.2, una vez se han definido sus características geométricas, materiales y operativas se procede a comprobar si el diseño verifica las características de funcionamiento especificadas previamente con JMAG-Express Public. La metodología de diseño (Anexo 2.3), se ha apoyado con las herramientas de análisis que proporciona JMAG-Express Public, que consisten en: análisis de sensibilidad que muestra el grado de influencia que los parámetros de diseño considerados ejercen sobre la característica de funcionamiento que se pretende optimizar, y análisis paramétricos que se realizan en base a los resultados emitidos por el análisis de sensibilidad, para visualizar de qué forma los parámetros de diseño involucrados en el estudio afectan a las características operativas del motor. Los resultados obtenidos en ambos estudios se contrastan y apoyan con la documentación consultada.

Una de las limitaciones del software JMAG-Express Public es su falta de precisión en la representación y obtención de los resultados, dado que considera muy pocos valores en el cálculo y los valores intermedios no computados los obtiene por interpolación lineal, por ende, los valores extraídos pueden diferir de forma considerable respecto a los valores reales. Ante la necesidad de obtener resultados más precisos se recurre al software de diseño de máquinas asíncronas CALASIN, que realiza el cálculo de las características de funcionamiento en base a el método clásico del circuito equivalente del motor. Los datos de entrada del programa son los parámetros del circuito equivalente que proporciona JMAG-Express Public. Este programa pese a considerar más pares de valores y analizar el funcionamiento del motor a una velocidad concreta sin interpolar, es más impreciso que JMAG-Express Public pues no considera la saturación y las pérdidas en el hierro de los núcleos magnéticos.

El trazado y ajuste de algunas curvas obtenidas durante el proceso de diseño se ha realizado en MATLAB. Los planos de las distintas partes constructivas del motor, se han realizado con el software de diseño CAD AutoCad Inventor. Las características de los distintos materiales empleados en el diseño del prototipo se han extraído de Lamination Steels Third Edition [5], y del propio JMAG-Express Public.

7 ANÁLISIS DE SOLUCIONES

7.1 ALTERNATIVAS DE DISEÑO

7.1.1 METODOLOGÍA DE DISEÑO. ALTERNATIVAS DE DISEÑO PLANTEADAS

El proceso de diseño se inicia con un dimensionado geométrico y electromagnético inicial, en el que se estiman las dimensiones principales del motor mediante un cálculo analítico previo. El modelo inicial estimado se evaluó con el software JMAG-Express Public para obtener sus características operativas. Analizando estas se concluyó que era preciso realizar modificaciones en el mismo para lograr que verificase las condiciones de funcionamiento precisadas. En la primera etapa del proceso, la elección de los parámetros de diseño y sus respectivos valores, se encaminó a la optimización de las características del motor en condiciones asignadas, prestando especial atención al par, y rendimiento del mismo.

Partiendo de esa premisa se realizó un análisis de los parámetros que afectan en mayor medida al comportamiento de la máquina. Para ello se utilizó la herramienta de análisis de sensibilidad que facilita JMAG-Express Public, que muestra el grado de influencia que los parámetros de diseño ejercen sobre la característica que se pretende mejorar y una vez se conocen los parámetros que influyen de forma más significativa en el comportamiento de la máquina, se realiza una evaluación paramétrica de los mismos, para ver el modo en que afectan a las características operativas del modelo, y obtener una estimación de los posibles valores que ha de tomar.

En base a las conclusiones extraídas de ambos análisis se plantean las siguientes propuestas de diseño que consisten en: la aproximación de las barras del rotor al entrehierro (diseño MA.1), ajuste de las dimensiones de las ranuras y conductores del estator (diseño MA.2), en base al modelo MA.2 se incorpora el ajuste de la profundidad de la boca de ranura (diseño MA.2a), e incremento de diámetro de las barras de la jaula del rotor (diseño MA.3).

De nuevo, todas las alternativas de diseño fueron evaluadas con JMAG-Express Public y CALASIN. Para apreciar las posibles mejoras en los parámetros de funcionamiento de todas ellas, se contrastó su valor con los resultados obtenidos en la evaluación del modelo inicial MA y los requerimientos de partida.

En base al estudio de las alternativas de diseño planteadas tras el análisis de sensibilidad y evaluación paramétrica de los parámetros de diseño del modelo MA, se opta por incorporar a este aquellos que han resultado ser más adecuados en la consecución de las características de funcionamiento a la velocidad asignada establecida: aproximación de las barras del rotor al entrehierro, aproximación de los devanados del estator al entrehierro, y leve ensanchamiento de las ranuras del estator (diseño MA.4). Con el ajuste de los parámetros geométricos que caracterizan al modelo MA.4, se logró incrementar el par y la potencia desarrollados por el motor a la velocidad nominal alcanzándose a su vez una mejora significativa en el rendimiento y el factor de potencia en relación a las restantes alternativas de diseño planteadas.

Tras realizar la evaluación y análisis de las alternativas de diseño del modelo MA, en las que se han realizado variaciones discretas de los parámetros geométricos, se observó que no era posible mejorar las características de funcionamiento a la velocidad asignada sin comprometerlas en otros estados de funcionamiento que a pesar de que el motor opere a la velocidad asignada la mayor parte del tiempo no pueden obviarse. Se detectó que el par máximo desarrollado por las distintas propuestas de diseño era superior al requerido para un funcionamiento estándar para el cual está previsto que opere el motor además, un par máximo muy elevado puede provocar que la transmisión y la máquina accionada estén sobrecargadas durante el arranque y aceleración de la carga, y no se esté aprovechando eficazmente la capacidad del motor, asimismo la corriente en el arranque es elevada y no es recomendable dado que en dicho instante la totalidad de la potencia absorbida por el estator es disipada en forma de calor exponiendo a los componentes del motor a temperaturas extremas para las cuales no fueron diseñados, y que podrían causar una degradación prematura de su integridad. Por este motivo, se decide incluir en el proceso de diseño ajustes no planteados hasta el momento: variación de la geometría de las barras de la jaula y ranuras del rotor (diseño MB).

Con la incorporación de este ajuste se procuran alcanzar las especificaciones a la velocidad asignada sin transgredir las restricciones establecidas en el arranque e instante en que el par motor es máximo. Nuevamente se evaluó la propuesta de diseño MB en ambos programas, y se analizaron sus características operativas. Este modelo presenta unas características a la velocidad asignada similares a las del modelo MA.4 pero con un par máximo e intensidad en

el arranque más adecuados, no obstante, para que el motor verificase las características de funcionamiento precisadas, se decidió establecer una velocidad a plena carga inferior, al presentar este modelo un par asignado más próximo al requerido y que por tanto no supondría un incremento importante del deslizamiento que comporta un aumento de las pérdidas eléctricas en los devanados al ser proporcionales al deslizamiento.

Finalmente, para tratar de mejorar las condiciones de operación en el arranque e instante en que el par motor es máximo, se optó por realizar más ajustes en las dimensiones de la geometría oval de las barras. Para averiguar la influencia que los nuevos parámetros incorporados por la geometría oval ejercían en las características de funcionamiento del modelo MB, se realizó una evaluación paramétrica de los mismos. En base a los resultados obtenidos en la evaluación paramétrica se realizan las siguientes modificaciones: disminución del radio externo de la barra e incremento de su longitud, y ubicación de las barras más alejadas del entrehierro, se define de este modo una nueva propuesta de diseño (modelo MB.1), que presenta unas características más adecuadas en el arranque e instante en que el par motor es máximo, pero en el que fue preciso incrementar de forma más notable el deslizamiento a plena carga (reducir su velocidad asignada), con el consecuente incremento de las pérdidas en el cobre y disminución del rendimiento.

7.1.2 ALTERNATIVAS DE DISEÑO MÁS ADECUADAS

Tras el análisis de las distintas propuestas de diseño planteadas se concluye que las más adecuadas en términos de consecución de las características asignadas son:

- Modelo MA.4
- Modelo MB

En relación al cumplimiento de las restricciones en el arranque e instante en que el par motor es máximo:

- Modelo MB
- Modelo MB.1

A continuación, se examinarán en detalle sus respectivas características operativas, a fin de contrastarlas y escoger el modelo que mejor se ajuste a las especificaciones.

Características de funcionamiento a la velocidad asignada

Se relacionan a continuación los parámetros de funcionamiento más relevantes de las propuestas de diseño mencionadas a la velocidad asignada de referencia.

Características a la velocidad asignada					
n (r.p.m.)			1490		
s			0,0067		
Parámetro	Programa	Modelo MA.4	Modelo MB	Modelo MB.1	Requisitos
I_{1N} (A)	JMAG	615,4	490,7	414,1	587
	CALASIN	359,38	386,08	276,42	
J_{1N} (A/mm ²)	JMAG	3,729	2,974	2,51	3,6
	CALASIN	-	-	-	
T_N (N·m)	JMAG	13840	13140	10980	22751,7
	CALASIN	15179	16377	11507,6	
η (%)	JMAG	90,96	92,26	92,67	97
	CALASIN	98,89	98,88	98,86	
P_N (kW)	JMAG	2066	1961	1639	3550
	CALASIN	2368,47	2555,28	1795,56	
$\cos \phi_{1N}$	JMAG	0,533	0,625	0,616	0,9
	CALASIN	0,96	0,964	0,946	
P_{Cu} (kW)	JMAG	199,970	159,020	124,010	-
	CALASIN	21,134	23,218	15,161	
P_{Fe} (kW)	JMAG	5,465	5,572	5,550	-
	CALASIN	-	-	-	
I_{μ} (A)	JMAG	75,77	71,65	71,23	146,725
	CALASIN	79,12	73,96	73,43	
I_{μ}/I_{1N}	JMAG	0,123	0,146	0,172	0,25
	CALASIN	0,22	0,192	0,266	

Tabla 7.1. Características de funcionamiento a la velocidad asignada 1490 rpm de las propuestas de diseño MA.4, MB y MB.1

En la Tabla 7.1 se muestra el rendimiento, y el factor de potencia resultantes del cálculo analítico con los valores proporcionados por JMAG-Express Public dado que el programa no realizaba el cálculo de los mismos correctamente. Asimismo, el rendimiento correspondiente a CALASIN se ha calculado considerando las pérdidas en el cobre proporcionadas por este último y las pérdidas en el hierro obtenidas con JMAG-Express Public dado que CALASIN no las considera en su análisis. Evidentemente el factor de potencia resultante en este programa será superior al que se obtendría si se considerasen las pérdidas en el hierro.

Del mismo modo, el rendimiento obtenido con ambos programas será ligeramente superior al no considerarse las pérdidas mecánicas por fricción, siendo mucho menor en JMAG-Express Public, al presentar unas pérdidas en el cobre considerablemente superiores en relación a CALASIN.

Analizando las magnitudes resultantes en la evaluación con ambos programas se deduce lo siguiente:

- El par asignado T_N y la potencia asignada P_N de los modelos MA.4 y MB son similares y se aproximan más a las requeridas a la velocidad de régimen de referencia, las prestaciones del modelo MB.1 a dicha velocidad distan más de los alcanzados en las otras propuestas de diseño consideradas. Por lo tanto, los modelos MA.4 y MB son más adecuados en este sentido. Cabe señalar la notable diferencia de estas características en ambos programas, que es debida al error cometido en la interpolación lineal efectuada por JMAG-Express Public.
- El modelo MB.1 destaca por unas pérdidas de potencia en el cobre P_{Cu} bajas. El rendimiento en este modelo es inferior si se considera el valor proporcionado por CALASIN al ser su potencia útil inferior a la que presentan los otros modelos, mientras que en JMAG-Express Public resulta ser el modelo más eficiente. La potencia de pérdidas en hierro P_{Fe} de los tres modelos es semejante. Dado que el rendimiento de los modelos en CALASIN es parecido, se puede considerar al modelo MB.1 más eficiente a razón de los resultados emitidos por JMAG-Express Public.
- En relación al factor de potencia $\cos \phi_{1N}$, en las alternativas de diseño consideradas es similar, siendo ligeramente superior en el modelo MB dado que una fracción menor de la corriente absorbida es destinada a la magnetización de los núcleos magnéticos.

El valor de este parámetro en JMAG-Express Public difiere bastante en relación a CALASIN, debido al error cometido por el programa.

Los valores de rendimiento y factor de potencia que realmente proporciona el programa son extraordinariamente bajos, esta circunstancia explicaría el valor tan elevado de corriente en una fase del estator. Si se atiende a la expresión que determina su valor², se observa que guarda una relación inversa con el rendimiento y el factor de potencia de manera que, al ser tan bajos, la corriente se incrementa de forma considerable, lo que justificaría también el elevado valor de pérdidas en el cobre del inductor y del inducido. No obstante, resulta difícil identificar que parámetros son la causa principal de dicho error pues todas las magnitudes están relacionadas

A continuación, se compararán las características de las propuestas de diseño tras establecer una velocidad asignada inferior para que, de este modo, verifiquen los requisitos de diseño precisados. Se considerarán los valores que facilita CALASIN, dado que permite analizar las características operativas a una velocidad concreta sin interpolar y se aproximarán más a la realidad operativa del motor, sin embargo, ha de tenerse en cuenta que el programa no considera la saturación y las pérdidas en el hierro de los núcleos magnéticos.

Las pérdidas en el hierro para el cálculo del rendimiento se extraerán de JMAG-Express Public. Uno de las limitaciones de este software es que solo permite introducir valores enteros de la velocidad para analizar las características de funcionamiento, y el error cometido puede ser relevante, no obstante, permite obtener una estimación más real de las características del motor y que CALASIN no considera (intensidad de magnetización constante, y pérdidas magnéticas despreciables).

Los valores obtenidos son orientativos, y no pueden considerarse definitivos, simplemente permiten estimar si los modelos se ajustan a las especificaciones establecidas.

$$I_{1N} = \frac{P_N}{3 \cdot V_{1N} \cdot \eta_N \cdot \cos \phi_{1N}}$$

Atendiendo a los resultados recopilados en la Tabla 7.2, se aprecia como el establecimiento de un deslizamiento asignado mayor causa un ascenso de las pérdidas en el cobre, que repercute negativamente en el rendimiento de los modelos pero que prácticamente no ha variado. El modelo que presenta menores pérdidas eléctricas es el diseño MB, al ser su deslizamiento asignado menor, y lógicamente es más eficiente que las otras dos alternativas.

Todos los modelos presentan unas características asignadas muy próximas a las requeridas, que pueden considerarse adecuadas, no obstante, el modelo MB.1 operará a esa velocidad con unas pérdidas en el cobre más elevadas como resultado, la temperatura de operación de este modelo será superior y habría que adaptar otros componentes a estas condiciones de operación (materiales aislantes con una clase térmica superior, sistema de refrigeración adecuado etc.) que no es objeto del presente proyecto.

Parámetro	Modelo MA.4	Modelo MB	Modelo MB.1	Especificaciones
n (r.p.m.)	1485,01	1486,12	1480,23	1490
s	0,00999	0,0093	0,0132	0,0067
T_N (N·m)	22590	22586	22416	22751,7
P_N (kW)	3513	3515	3475	3550
I_{1N} (A)	529,4	529,72	528,13	587
$\cos \phi_{1N}$	0,97	0,97	0,965	0,9
P_{Cu} (W)	46831,6	44012,6	57765	-
P_{Fe} (W)	5270	5438	5271	-
η (%)	98,54	98,61	98,22	97

Tabla 7.2. Comparativa de las características de funcionamiento a la nueva velocidad asignada del modelo MA.4, MB, y MB.1 resultantes de la evaluación en CALASIN.

Características de funcionamiento en el arranque del motor

A continuación, se estudiarán las características más relevantes en el arranque del motor de las distintas alternativas de diseño. La relación entre el par de arranque y el par asignado (T_s/T_N), y la intensidad de arranque entre la intensidad asignada (I_s/I_N), se han evaluado considerando los valores de par e intensidad en el arranque que facilita CALASIN y los valores asignados correspondientes a la nueva velocidad de régimen establecida en cada propuesta de diseño (Tabla 7.2).

Atendiendo a los resultados de la evaluación en el arranque de las propuestas de diseño en ambos programas, se observa que el modelo MB.1 se ajusta más a las condiciones impuestas en dicho estado de funcionamiento. La intensidad en el arranque es más elevada a la especificada, que fue establecida en base a un motor existente de características similares, pero que puede considerarse adecuada teniendo en cuenta que la intensidad asignada obtenida en CALASIN es inferior a la especificada.

Características en el arranque					
n (r.p.m.)			0		
s			1		
Parámetro	Programa	Modelo MA.4	Modelo MB	Modelo MB.1	Requisitos
I_s (A)	JMAG	5405	4825	4109	3404
	CALASIN	5422	4839	4120	
T_s (N·m)	JMAG	24040	17690	18230	18201
	CALASIN	24200	17799	18334	
I_s/I_N	CALASIN	10,24	9,14	7,8	5,8
T_s/T_N	CALASIN	1,07	0,79	0,82	0,8

Tabla 7.3. Comparativa de las características de los modelos MA.4, MB, y MB.1 en JMAG-Express Public y CALASIN con las especificaciones en el arranque.

Las magnitudes en el arranque resultantes del análisis efectuado por ambos programas son más parecidas en relación a las obtenidas en otros estados de funcionamiento evaluados, haciéndose patente el error cometido en el ajuste por interpolación lineal que realiza el programa en instantes intermedios no considerados por el mismo, y que CALASIN si permite obtener directamente.

Características operativas en el instante en que el par motor es máximo

Por último, se analizarán las características de las propuestas de diseño consideradas en el instante en que el par desarrollado por el motor es máximo.

Dado que en JMAG-Express Public no es posible conocer con precisión el valor de par máximo e instante concreto en que se produce, se hará uso de los datos que facilita CALASIN. De nuevo, el cociente de pares máximo y asignado T_m / T_N se ha obtenido considerando el valor de par asignado correspondiente a la nueva velocidad de régimen establecida en cada propuesta de diseño (Tabla 7.2).

Características en el instante de par máximo				
Parámetro	Modelo MA.4	Modelo MB	Modelo MB.1	Especificaciones
n_m (r.p.m.)	1344,7	1372,2	1344,8	-
s_m	0,1036	0,0852	0,0989	-
T_m (N·m)	115226,5	102833	87860,6	54604
T_m / T_N	5,1	4,55	3,92	2,4

Tabla 7.4. Comparativa de las características del modelo MA.4, MB y MB.1 obtenidas con CALASIN con los requerimientos en el instante en el que el par motor es máximo.

El modelo MB.1 presenta un par máximo más próximo al de las especificaciones, aunque sigue siendo elevado. La relación entre el par de arranque y el par asignado es inferior en el modelo MB.1, si además se tiene en cuenta que el par a la velocidad asignada es inferior en este diseño, esta relación es aún menor. En motores clase B se recomienda que el par máximo esté comprendido entre [1,75 – 3] veces el par asignado, dadas las imprecisiones presentadas en ambos programas se concluye que el modelo MB.1 presenta un valor de par máximo aceptable.

Curvas características

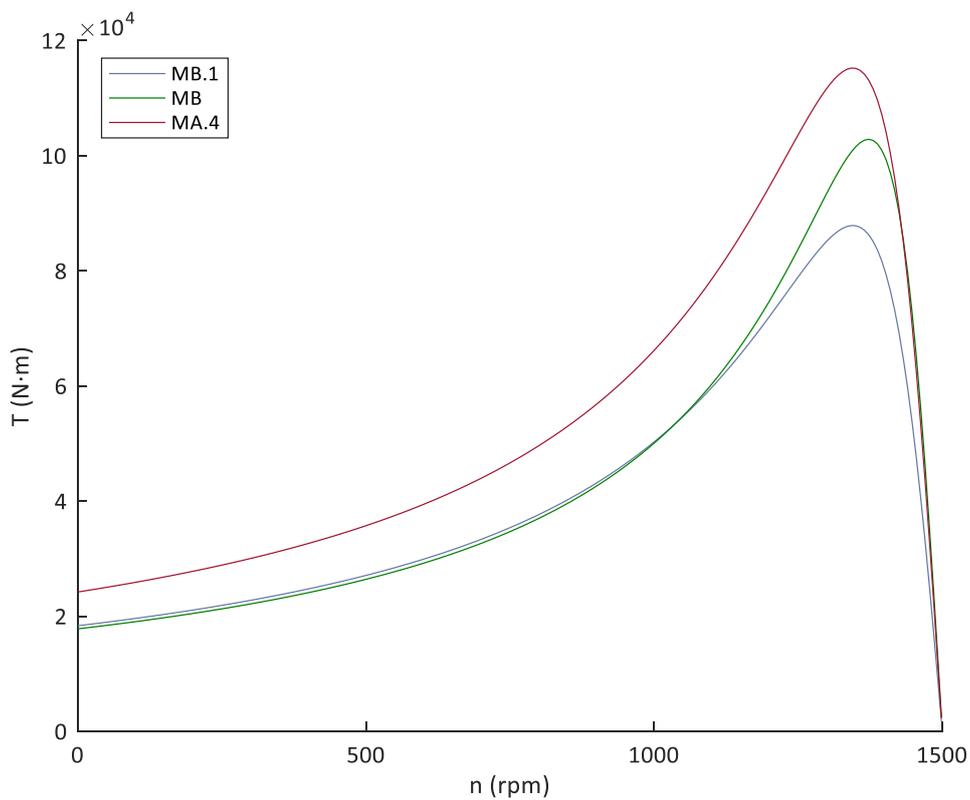


Figura 7.1. Curva Par-Velocidad de los modelos MA.4, MB y MB.1.

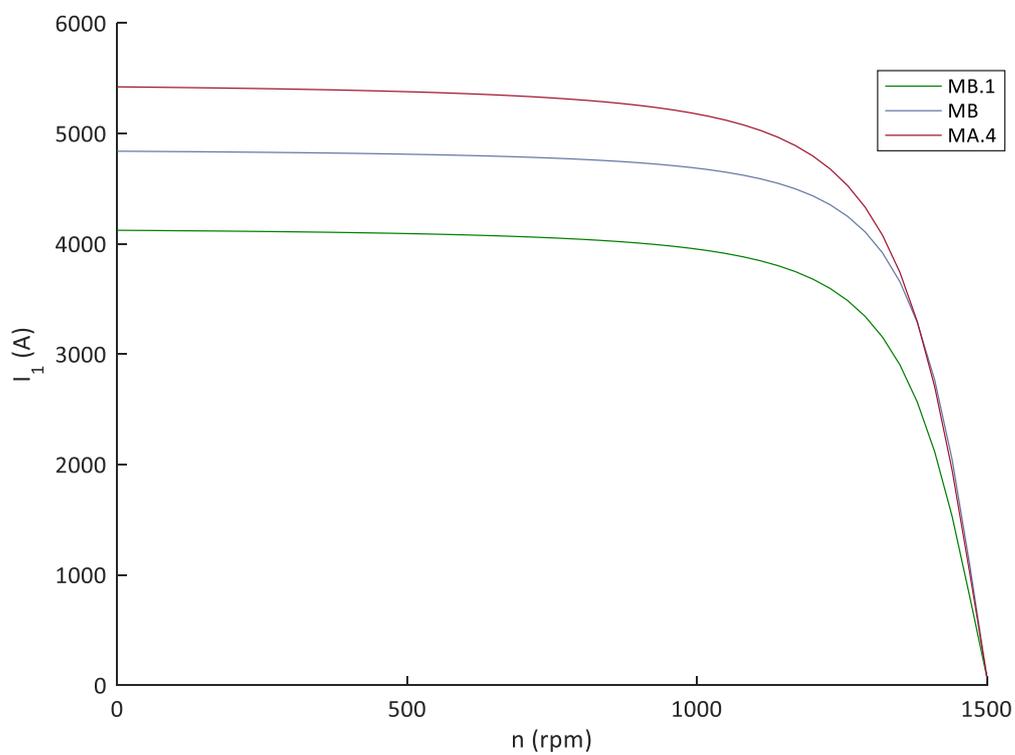


Figura 7.2. Curva Corriente por fase del estator-Velocidad de los modelos MA.4, MB y MB.1.

En el gráfico de la Figura 7.1, se aprecia claramente que el modelo MB.1 presenta un par máximo marcadamente inferior respecto a las restantes propuestas de diseño. La característica Par-Velocidad de este modelo se desplaza a deslizamientos mayores (velocidades menores) como consecuencia del valor más elevado de la resistencia del rotor, y dado que el flujo de dispersión es mayor (reactancia de dispersión más elevada) el par se reduce en todo el rango de velocidades, causando que el par asignado se produzca a una velocidad inferior. Los modelos MB y MB.1 presentan un par de arranque adecuado en el modelo MA.4 es superior al requerido para unas condiciones estándar de funcionamiento.

Atendiendo a la curva Intensidad en una fase del estator-Velocidad, se distingue visiblemente que el modelo MB.1 presenta una intensidad en el arranque mucho menor, también consecuencia del elevado valor de la reactancia de dispersión respecto a las otras alternativas de diseño estudiadas.

7.2 CONCLUSIONES. SOLUCIÓN ADOPTADA

En base a la comparativa realizada en el apartado anterior se concluye que el modelo que mejor se ajusta a las especificaciones sin comprometer en exceso las restricciones establecidas en el arranque e instante en que el par es máximo, es el modelo MB.1. No obstante, este modelo opera a una velocidad considerablemente inferior (deslizamiento más alto), y consecuentemente presenta mayores pérdidas en el cobre, y un rendimiento más bajo, a diferencia del modelo MB en el cual el par asignado se produce a una velocidad mayor (deslizamiento menor) y por tanto exhibirá menores pérdidas y mejor rendimiento, pero que cuenta con una intensidad de arranque y un par máximo considerablemente elevados para las exigencias operativas estándar a las que está destinado el motor. El modelo MA.4 queda descartado al presentar un par en el arranque, par máximo e intensidad en el arranque excesivos, a pesar de que las características asignadas se den a una velocidad superior a la del modelo MB.1.

Por lo tanto, se acepta como solución final el modelo MB.1., que presenta una velocidad asignada inferior y por ende mayores pérdidas y menor rendimiento, pero, dadas sus características en el arranque y de par máximo, un aprovechamiento más óptimo de su capacidad.

8 RESULTADOS FINALES

En este apartado se describirán los aspectos que caracterizan a la solución final escogida, el modelo MB.1, con el que se obtuvo un compromiso entre las características asignadas y las condiciones operativas en el arranque y de par máximo.

8.1 CARACTERÍSTICAS OPERATIVAS

A continuación, se resumen las características operativas de la solución final diseño MB.1 en los tres estados de funcionamiento.

8.1.1 CARACTERÍSTICAS ASIGNADAS

En la definición de las características de funcionamiento asignadas del diseño final se han considerado los valores que facilita CALASIN, pues permite obtener resultados más precisos al calcularlos a una velocidad concreta sin recurrir a una aproximación por interpolación lineal tal y como sucede en JMAG-Express Public. No obstante, CALASIN no considera las pérdidas en el hierro y la magnetización no lineal de los núcleos (corriente de magnetización constante), en consecuencia, se emplearán los valores que proporciona JMAG-Express Public de ambos parámetros para aproximar los resultados a la realidad operativa del motor.

Parámetro	Modelo MB.1
Velocidad asignada, n (r.p.m.)	1480,23
Deslizamiento asignado, s	0,0132
Par asignado, T_N (N·m)	22416
Potencia asignada, P_N (kW)	3475
Intensidad asignada en una fase del estator, I_{1N} (A)	528,13
Factor de potencia asignado, $\cos \phi_{1N}$	0,965
Pérdidas en el cobre totales, P_{Cu} (kW)	57,765
Pérdidas en el hierro, P_{Fe} (kW)	5,271
Rendimiento, η (%)	98,22
Corriente de magnetización, I_μ (A)	69,28
Corriente de magnetización ($\rho\mu$), I_μ/I_{1N}	0,13

Tabla 8.1. Características asignadas de la solución final adoptada modelo MB.1.

El rendimiento se ha deducido considerando las pérdidas en el cobre que facilita CALASIN y las pérdidas en el hierro proporcionadas por JMAG-Express Public. Este valor es superior al que se obtendría en realidad, dado que ninguno de los dos programas se considera las pérdidas mecánicas por rozamiento y ventilación.

El factor de potencia real será inferior al que proporciona CALASIN al no considerar las pérdidas en el hierro, las pérdidas mecánicas y la no linealidad del circuito magnético.

8.1.2 CARACTERÍSTICAS EN EL ARRANQUE Y PAR MÁXIMO

La Tabla 8.2 resume los valores del par e intensidad en el arranque y de par máximo del diseño final seleccionado.

Se ha adoptado el valor de par máximo que proporciona CALASIN dado que en JMAG-Express Public no es posible conocer con precisión el valor de par máximo e instante concreto en que se produce. El cociente de par máximo entre par asignado T_m/T_N se ha obtenido considerando el par asignado dado por CALASIN.

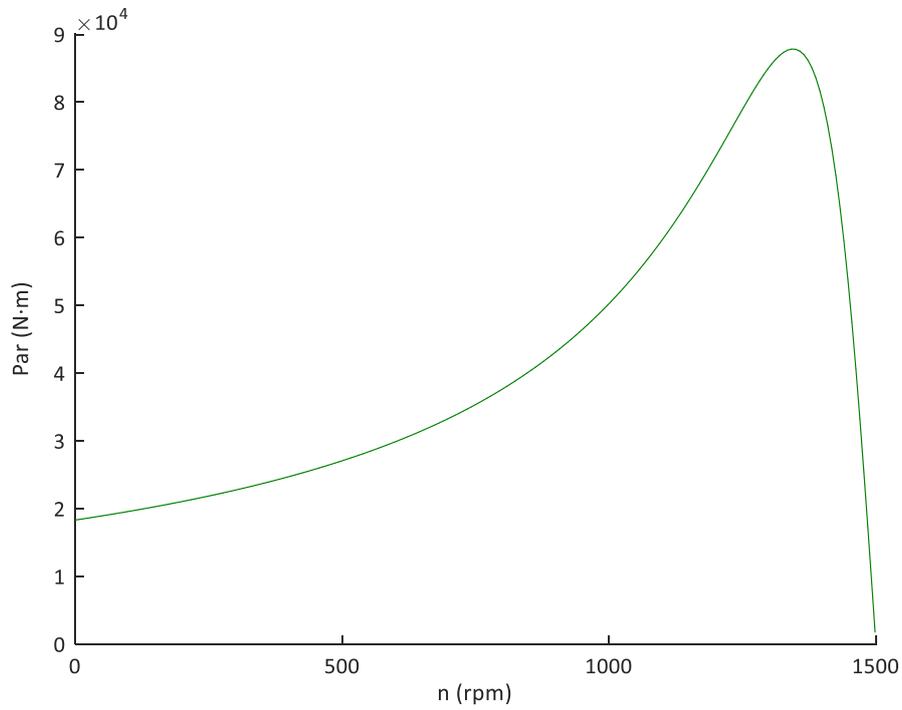
Se han considerado la intensidad y par de arranque que proporciona JMAG-Express Public, dado que en dicho instante el error cometido por este programa es menor y los valores son más precisos que en CALASIN pues considera las pérdidas en el hierro y la variación de la corriente de magnetización con la velocidad. La relación entre el par de arranque y el par asignado (T_s/T_N), y la intensidad de arranque entre la intensidad asignada (I_s/I_N), se han evaluado considerando los valores asignados facilitados por CALASIN.

Parámetro	Modelo MB.1
Par máximo, T_m (N·m)	87860,6
Par máximo (pu), T_m/T_N	3,92
Intensidad en el arranque, I_s (A)	4109
Par en el arranque, T_s (N·m)	18230
Intensidad en el arranque (pu), I_s/I_N	0,78
Par en el arranque (pu), T_s/T_N	0,81

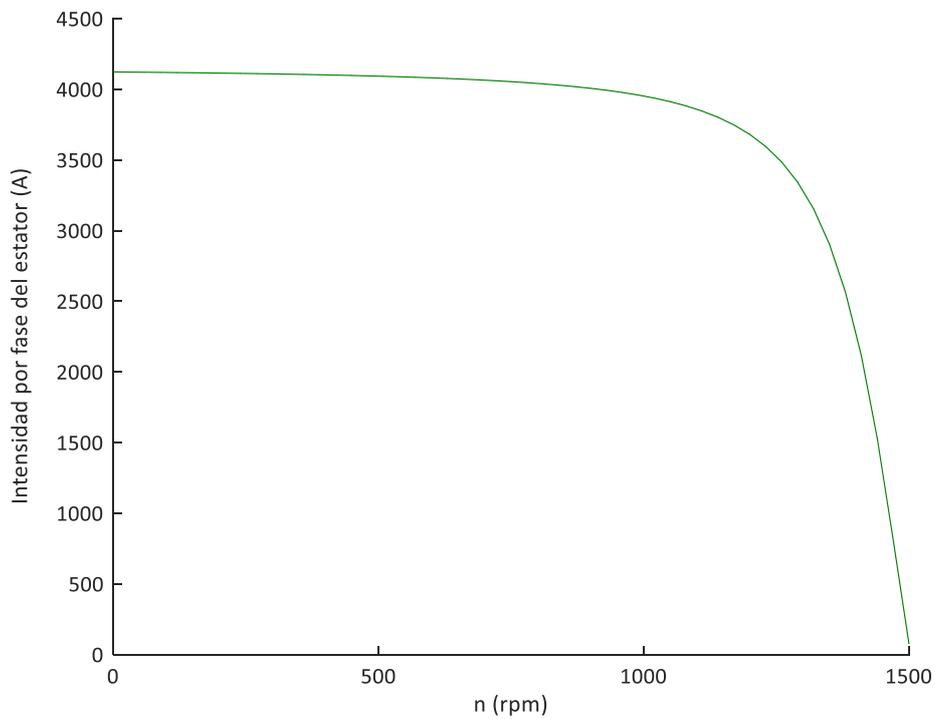
Tabla 8.2. Características de la solución final adoptada modelo MB.1 en el arranque e instante en que el par motor es máximo.

8.1.3 CURVAS CARACTERÍSTICAS

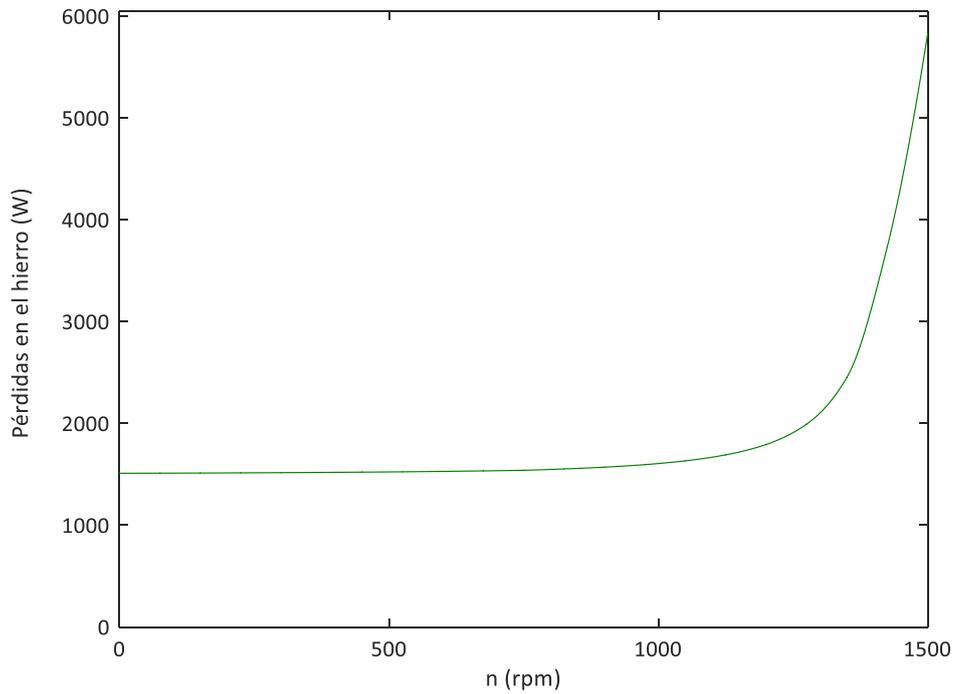
Características Par - Velocidad



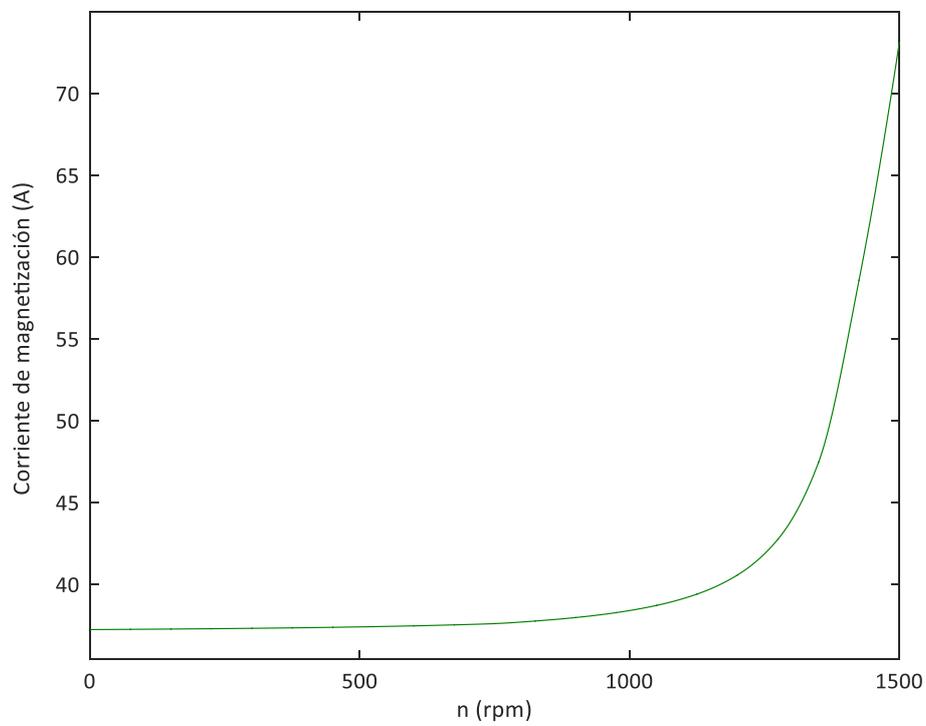
Característica Intensidad en una fase del estator - Velocidad



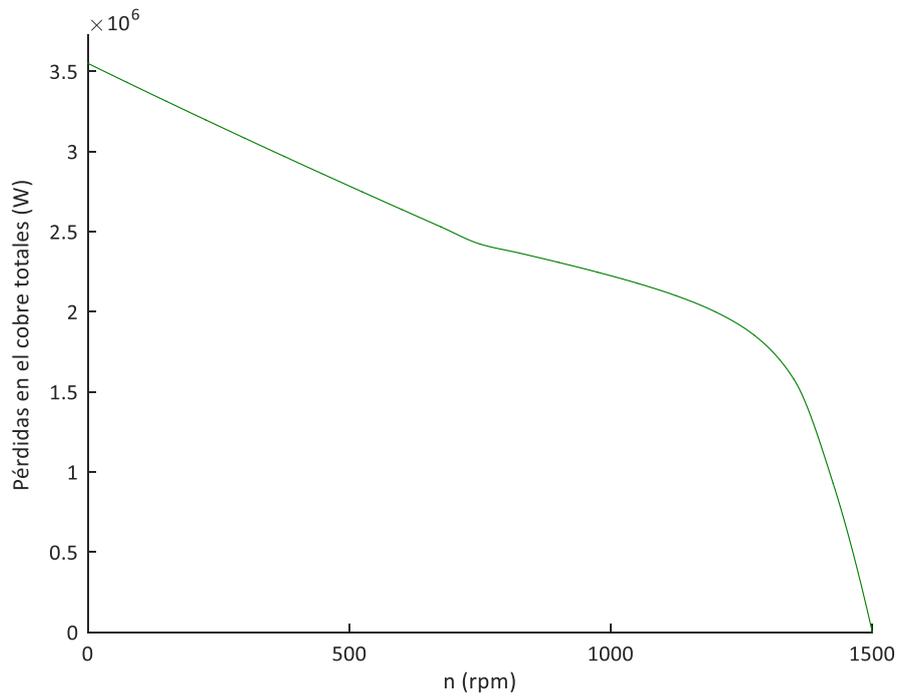
Característica Pérdidas en el hierro - Velocidad



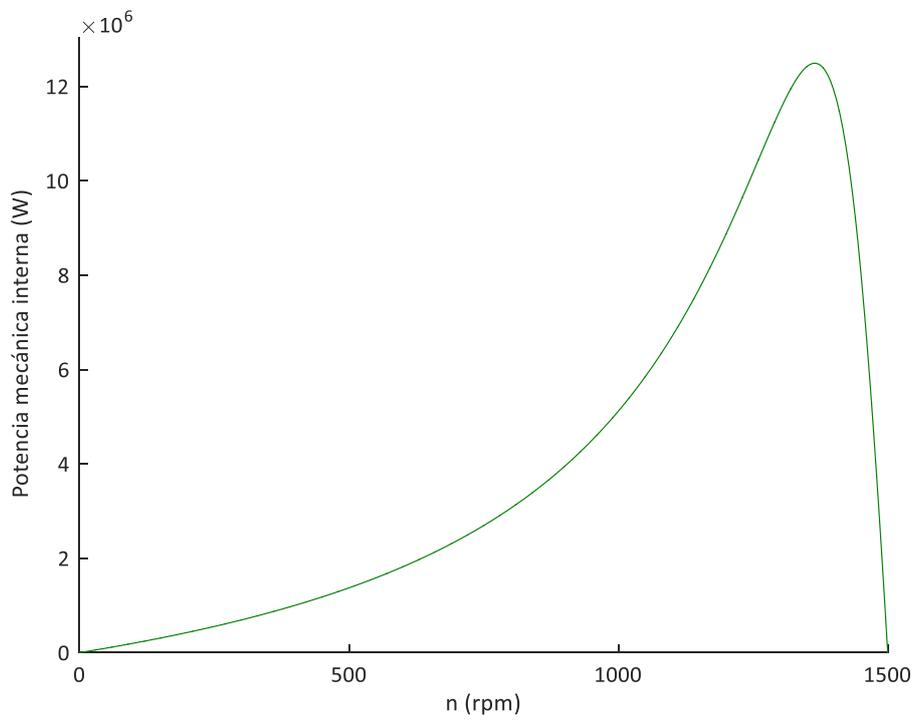
Característica Corriente de magnetización - Velocidad



Característica Pérdidas en el cobre totales - Velocidad



Característica Potencia mecánica interna - Velocidad



8.2 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS

8.2.1 DIMENSIONES GENERALES DEL MOTOR

Parámetros geométricos de la solución final escogida, modelo MB.1, extraídas de JMAG-Express Public.

Parámetro	Magnitud
Diámetro exterior del motor, mm	1098
Espesor del entrehierro, mm	1,8
Longitud axial del motor, mm	867,5
Número de polos	4

Tabla 8.3. Dimensiones y propiedades generales del diseño final escogido MB.1.

8.2.1 DIMENSIONES DEL NÚCLEO DEL ESTATOR

Dimensiones del núcleo del estator (so_006: Crevice, Flat bottom, Slot Width, Core back width) del modelo adoptado MB.1, extraídas de JMAG-Express Public. Los planos que definen la geometría y dimensiones de las chapas magnéticas que conforman el núcleo se encuentran en el Documento 3: Planos, del presente proyecto.

Parámetro	Magnitud
Número de ranuras	36
Diámetro exterior del núcleo, mm	1098
Diámetro interior, mm	736,4
Ancho de ranura, mm	27
Altura del yugo del estator, mm	91
Profundidad de la boca de ranura, mm	14
Ancho de la cuña de cierre, mm	4,583
Alto de la cuña de cierre, mm	8,06
Radio de redondeo de las aristas superiores del diente, mm	0,6743
Radio de redondeo de las aristas inferiores de la ranura, mm	2,7

Tabla 8.4 Dimensiones del núcleo del estator del diseño final adoptado MB.1.

8.2.2 DEVANADO DEL ESTATOR

Los diagramas de devanado y diagramas de ranura del devanado del estator se encuentran en el Documento 3: Planos. Propiedades del devanado del estator del modelo MB.1 extraídas de JMAG-Express Public:

Parámetro	Magnitud
Tipo de conexión	Estrella
Número total de espiras en serie de una bobina	12
Número de ramas en paralelo	1
Número de espiras por bobina	4
Geometría de los conductores	Rectangular
Ancho del conductor, mm	22
Alto del conductor, mm	7,5
Espesor capa aislante del conductor, mm	0,15
Espesor de la pieza en U (aislamiento de ranura), mm	0,5
Factor de ocupación de ranura, %	74,57
Factor de ocupación de ranura máximo, %	75
Área de la ranura, mm ²	2043
Área del conductor, mm ²	660
Resistencia de una fase, ohm	0,01357
Tipo de devanado	Imbricado
Número de capas	2
Paso de ranura	8
Densidad de corriente en el conductor (@1A), A/mm ²	6,061e-03

Tabla 8.5. Características del devanado del estator de la solución final, diseño MB.1.

8.2.3 DIMENSIONES DEL NÚCLEO Y JAULA DEL ROTOR

Dimensiones del núcleo y jaula del rotor (rim_002: Oval bar) del modelo adoptado MB.1, extraídas de JMAG-Express Public. Los planos que definen la geometría y dimensiones de las chapas magnéticas que conforman el núcleo se encuentran en el Documento 3: Planos.

Parámetro	Magnitud
Número de barras / ranuras	24
Diámetro exterior del núcleo, mm	732,8
Diámetro del eje, mm	220
Radio del extremo circular externo de la barra oval, mm	14
Radio del extremo circular interno de la barra oval, mm	4
Distancia entre centros de los extremos circulares de la barra, mm	92
Profundidad del centro del extremo circular externo de la barra respecto al diámetro exterior, mm	22
Abertura del cuello de ranura	5,4
Radio de redondeo de las aristas superiores del diente, mm	2,14

Tabla 8.6. Dimensiones del núcleo y la jaula del rotor del diseño final adoptado MB.1.

8.2.4 DIMENSIONES DE LOS ANILLOS DE CORTOCIRCUITO DE LA JAULA DEL ROTOR

Dimensiones de los anillos de cortocircuito del diseño final adoptado MB.1, extraídas de JMAG-Express Public (Figura 3.5).

Parámetro	Magnitud
Tipo de sección	Trapezoidal
Altura, mm	28,18
Ancho superior, mm	84,55
Ancho inferior, mm	84,55
Distancia entre la posición central del anillo y la posición central de las barras del rotor (Figura 3.6), mm	0
Sección efectiva de paso de corriente, %	100
Resistencia, ohm	1,235e-05

Tabla 8.7. Dimensiones de los anillos de c.c. de la jaula del rotor del diseño final MB.1.

8.3 CARACTERÍSTICAS DE MASA VOLUMEN E INERCIA

Las propiedades de masa, volumen e inercia del modelo final seleccionado MB.1 han sido obtenidas de JMAG-Express Public. Los materiales que han de emplearse en la fabricación del prototipo y sus respectivas propiedades se detallan en el Documento 4: Pliego de Condiciones del presente proyecto.

Total	Masa total, kg	6194
	Volumen total, mm ³	7,922e+08
Estator	Masa del núcleo, kg	2851
	Volumen del núcleo, mm ³	3,751e+08
	Masa de los devanados, kg	760,4
	Volumen de los devanados, mm ³	8,487e+07
	Masa total (so_006), kg	3611
Rotor	Masa de la jaula, kg	379,5
	Volumen de la jaula, mm ³	4,236e+07
	Masa del núcleo, kg	2203
	Volumen del núcleo, mm ³	2,899e+08
	Masa total (rim_002), kg	2583
Inercia (kg · m ²)	Jaula	40,97
	Núcleo del rotor	149,8
	Total	190,7

Tabla 8.8. Características de masa volumen e inercia de la solución final diseño MB.1.

8.4 CONCLUSIONES TECNOLÓGICAS Y ACADÉMICAS

El presente proyecto comprende el diseño y caracterización elemental de un modelo de un motor de inducción que reproduzca en la medida de lo posible los requisitos de funcionamiento precisados y que sirva de base para posteriores análisis más detallados y mejoras del mismo.

En las etapas preliminares de diseño prevalece la obtención rápida de resultados a la precisión de los mismos, los programas empleados en el desarrollo y evaluación de las distintas alternativas de diseño se ajustan a esta descripción y permiten estimar de un modo aproximado las características geométricas y operativas que debiera poseer el prototipo definitivo que es el alcance del presente trabajo.

El diseño de prototipos es una fase fundamental en el proceso de desarrollo de un motor, el empleo de softwares de simulación como JMAG-Express permite realizar ensayos de prototipos virtuales y obtener así un modelo que verifique razonablemente los requisitos requeridos, sin necesidad de realizar numerosos ensayos de prototipos físicos que comportan una inversión económica y de tiempo adicionales.

8.4.1 EVALUACIÓN DEL PROGRAMA JMAG-Express Public

El programa destaca por su interfaz gráfica sencilla e intuitiva y su rapidez en la obtención y caracterización de los distintos modelos. Permite comparar fácilmente las distintas características operativas de los modelos gráficamente, con múltiples opciones de representación, permite asimismo visualizar la disposición de los devanados del estator mediante tres métodos de representación. Además, el programa cuenta con numerosas plantillas parametrizadas que agilizan enormemente el proceso de diseño, dado que permiten al usuario variar la dimensiones y analizar su repercusión en las condiciones de operación de un modo simple.

El programa cuenta, asimismo con dos herramientas de análisis y optimización muy útiles: el análisis de sensibilidad que permite averiguar los parámetros de diseño que inciden de forma más significativa en la característica de funcionamiento que se precise optimizar y el modo paramétrico que realiza una evaluación simultánea de las características de funcionamiento del motor a medida que va modificando el parámetro de diseño considerado conforme a las indicaciones dadas por el usuario. Al terminar, muestra los resultados de forma gráfica,

permitiendo comparar las distintas características operativas del motor para cada caso generado en una misma gráfica.

Entre las limitaciones técnicas encontradas durante el desarrollo del proyecto se destacan las siguientes:

- La escasez de valores obtenidos en cálculo realizado por el programa y que no puede ser ajustado a conveniencia, y el ajuste mediante interpolación lineal de los valores intermedios no contemplados por el programa que empobrecen el rigor de los resultados y la calidad en la representación gráfica de las características de funcionamiento obtenidos con el programa.
- La herramienta de análisis de sensibilidad que facilita el programa, no considera todas las características operativas ni parámetros de diseño involucrados y que pueden incidir de forma importante en el desarrollo del modelo, por este motivo fue preciso contrastar estos análisis con la documentación consultada. Asimismo, no pueden realizarse análisis de forma consecutiva pues el error acumulado es considerable y los resultados emitidos por dicho análisis pueden diferir bastante.
- En relación al modo paramétrico que incorpora el programa solo permite modificar un parámetro de diseño en cada evaluación paramétrica, y al igual que en el análisis de sensibilidad, no todos los parámetros de diseño pueden ser estudiados con esta herramienta.
- Considera, con independencia de la geometría y dimensiones de las ranuras del inductor y el inducido, que las reactancias de dispersión del estator y del rotor referido al estator son idénticas, cuando en realidad la reactancia de dispersión total se reparte de distinta forma entre el estator y el rotor en función de la geometría de las ranuras de ambos órganos.
- Solo permite obtener las características de funcionamiento en valores enteros de velocidad sin precisión decimal.
- Cálculo erróneo del rendimiento y el factor de potencia que puede revertir de forma importante en las restantes características resultantes en la evaluación (como la corriente y las pérdidas en el cobre).

8.4.2 CONCLUSIONES ACADÉMICAS

Con la realización del proyecto se ha adquirido una comprensión más amplia del motor de inducción y su principio de funcionamiento y, de la naturaleza y factores que intervienen en el proceso de diseño de una máquina eléctrica.

Se han empleado dos programas de cálculo aptos en las etapas iniciales de diseño en las que no se requieren resultados muy precisos dado que se trata de obtener un modelo aproximado, uno basado en métodos analíticos (método del circuito eléctrico equivalente), CALASIN, y el otro basado en técnicas numéricas (método de elementos finitos), JMAG-Express Public, de tal forma que ha sido posible entender el funcionamiento y diseño del motor desde dos perspectivas distintas.

Dadas las limitaciones que presentaban ambos programas fue preciso entender los principios y los elementos involucrados en el diseño del motor de un modo más exhaustivo.

El proceso de diseño de una máquina eléctrica es iterativo, los parámetros de diseño considerados se van rectificando hasta que el modelo se ajusta a los requerimientos establecidos. El modelo resultante depende de la función o funciones objetivo a optimizar (materiales activos, rendimiento, costes globales, o una combinación ponderada de todas ellas) y de las restricciones fijadas tales como el incremento de temperatura, la corriente/par en el arranque, el par máximo etc.

DOCUMENTO 2: ANEXOS

ÍNDICE

ANEXO 1: DOCUMENTACIÓN DE PARTIDA	92
1 ASPECTOS GENERALES DE DISEÑO DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS	93
2 DOCUMENTACIÓN DE PARTIDA.....	94
2.1 ESPECIFICACIONES DEL MOTOR.....	94
2.2 CARACTERIZACIÓN DEL MOTOR	94
2.3 VALORES RECOMENDADOS DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO	96
2.3.1 INDUCCIÓN MAGNÉTICA MÁXIMA EN EL ENTREHIERRO Y EN LOS DIENTES Y YUGOS DE LOS NÚCLEOS MAGNÉTICOS. DENSIDAD LINEAL DE CORRIENTE	96
2.3.2 DENSIDAD DE CORRIENTE	99
2.3.3 COCIENTE LONGITUD AXIAL ENTRE PASO POLAR DEL MOTOR DE INDUCCIÓN	99
2.4 ASPECTOS CONSTRUCTIVOS DE DISEÑO DEL MOTOR DE INDUCCIÓN.....	100
2.4.1 NÚCLEOS MAGNÉTICOS DEL ROTOR Y EL ESTATOR.....	100
2.4.2 DISEÑO DE LOS ARROLLAMIENTOS DEL ROTOR Y EL ESTATOR	108
2.4.3 CARACTERÍSTICAS DE LOS CONDUCTORES ELÉCTRICOS	108
2.4.4 DISTRIBUCIÓN DE LOS DEVANADOS EN LAS RANURAS	109
2.5 DISEÑO DEL ASILAMIENTO.....	111
2.5.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES DIELECTRICOS	111
2.5.2 FACTOR DE LLENADO	112
ANEXO 2: CÁLCULOS	113
ANEXO 2.1: CÁLCULO DE LAS CARACTERÍSTICAS ASIGNADAS.....	114
1 CÁLCULO DE LAS CARACTERÍSTICAS ASIGNADAS	115
1.1 VELOCIDAD DE SINCRONISMO Y DESLIZAMIENTO.....	115
1.2 PAR NOMINAL	116
1.3 POTENCIA ABSORBIDA	116
1.4 INTENSIDAD DE FASE ASIGNADA	117
ANEXO 2.2: VALOR ESTIMADO DE LAS DIMENSIONES DEL MODELO INICIAL.....	118
2 VALOR ESTIMADO DE LAS DIMENSIONES DEL MODELO INICIAL	119

2.1	ALGORITMO DE CÁLCULO	119
2.2	CÁLCULO DE LAS DIMENSIONES PRINCIPALES DEL MOTOR.....	124
2.2.1	DIÁMETRO INTERIOR DEL ESTATOR Y LONGITUD AXIAL DEL MOTOR.....	124
2.2.2	ESPESOR DEL ENTREHIERRO GEOMÉTRICO	128
2.2.3	DIÁMETRO EXTERIOR DEL ROTOR.....	129
2.3	DIMENSIONADO DE LOS ARROLLAMIENTOS DEL ESTATOR	129
2.3.1	CARACTERIZACIÓN DEL DEVANADO	129
2.3.2	NÚMERO DE ESPIRAS Y FLUJO POR POLO.....	137
2.3.3	DIMENSIONADO DE LOS CONDUCTORES.....	141
2.4	DIMENSIONADO DEL NÚCLEO DEL ESTATOR	145
2.4.1	LONGITUD ÚTIL DEL HIERRO	145
2.4.2	ALTURA DEL YUGO	146
2.4.3	DIMENSIONES DE LAS RANURAS Y DIENTES	147
2.4.4	DIÁMETRO EXTERIOR	154
2.5	DIMENSIONADO DE LA JAULA DEL ROTOR.....	155
2.5.1	CARACTERIZACIÓN DEL DEVANADO	155
2.5.2	DIMENSIONES DE LAS BARRAS.....	158
2.6	DIMENSIONADO DEL NÚCLEO DEL ROTOR	160
2.6.1	LONGITUD ÚTIL DEL HIERRO	160
2.6.2	DIMENSIONES DE LAS RANURAS Y DIENTES	161
	ANEXO 2.3: METODOLOGÍA DE DISEÑO	168
3	METODOLOGÍA DE DISEÑO.....	169
3.1	DIMENSIONADO GEOMÉTRICO Y ELECTROMAGNÉTICO INICIAL.....	173
3.1.1	DEFINICIÓN DEL MODELO INICIAL EN JMAG-Express Public	173
3.1.2	EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL MODELO INICIAL	190
3.1.3	ANÁLISIS Y CONCLUSIONES EXTRAIDAS DE LA EVALUACIÓN DEL MODELO INICIAL	198
3.2	OPTIMIZACIÓN DEL MODELO INICIAL	200
3.2.1	ESTUDIO DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO DEL MODELO MA. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	201
3.2.2	ESTUDIO DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO DEL MODELO MA. ANÁLISIS PARAMÉTRICO 212	
3.2.3	ESTUDIO DE LAS ALTERNATIVAS DE DISEÑO DEL MODELO MA	240
3.3	ALTERNATIVAS DE DISEÑO	275

3.3.4	ALTERNATIVA DE DISEÑO MB. VARIACIÓN DE LA GEOMETRÍA DE LAS BARRAS DEL ROTOR 275	
	ANEXO 2.4: CÁLCULO DE LAS DIMENSIONES DE LAS ALTERNATIVAS DE DISEÑO.....	301
4	DIMENSIONES DE LAS ALTERNATIVAS DE DISEÑO	302
4.1	CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO DEL MODELO MA EN LA EVALUACIÓN PARAMÉTRICA.....	302
4.1.1	INTERVALO DE VALORES DEL ANCHO DE RANURA DEL ESTATOR	302
4.1.2	INTERVALO DE VALORES DEL DIÁMETRO DE LAS BARRAS DEL ROTOR	302
4.1.3	INTERVALO DE VALORES DEL ESPESOR DEL ENTREHIERRO Y DIÁMETRO EXTERIOR DEL ROTOR 302	
4.2	CÁLCULO DE LAS DIMENSIONES DE LAS ALTERNATIVAS DE DISEÑO DEL MODELO MA 304	
4.2.1	DIMENSIONES DE LA PROPUESTA DE DISEÑO MA.1.....	304
4.2.2	DIMENSIONES DE LA PROPUESTA DE DISEÑO MA.2.....	306
4.2.3	DIMENSIONES DE LA PROPUESTA DE DISEÑO MA.2a.....	309
4.2.4	DIMENSIONES DE LA PROPUESTA DE DISEÑO MA.3.....	311
4.2.5	DIMENSIONES DE LA PROPUESTA DE DISEÑO MA.4.....	314
4.3	DIMENSIONES DEL MODELO MB.....	316
4.4	DIMENSIONES DE LA ALTERNATIVA DE DISEÑO MB.1	318
	ANEXO 2.5: CÁLCULO DEL RENDIMIENTO Y DEL FACTOR DE POTENCIA.....	320
5	CÁLCULO DEL RENDIMIENTO Y DEL FACTOR DE POTENCIA DE LAS ALTERNATIVAS DE DISEÑO	321
5.1	ALTERNATIVA DE DISEÑO MA.1	322
5.2	ALTERNATIVA DE DISEÑO MA.2	322
5.3	ALTERNATIVA DE DISEÑO MA.2A	323
5.4	ALTERNATIVA DE DISEÑO MA.3	323
5.5	ALTERNATIVA DE DISEÑO MA.4	324
5.6	ALTERNATIVA DE DISEÑO MB	324
5.7	ALTERNATIVA DE DISEÑO MB.1	325
	ANEXO 2.6: VARIACIÓN DEL DESLIZAMIENTO ASIGNADO	326

6	VARIACIÓN DEL DESLIZAMIENTO ASIGANDO DE LAS ALTERNATIVAS DE DISEÑO.....	327
6.1	ALTERNATIVA DE DISEÑO MA.4	328
6.2	ALTERNATIVA DE DISEÑO MB	328
6.3	ALTERNATIVA DE DISEÑO MB.1	329

ANEXO 1: DOCUMENTACIÓN DE PARTIDA

1 ASPECTOS GENERALES DE DISEÑO DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS

El diseño de una máquina eléctrica de tipo rotativo comienza por definir ciertas características básicas, las más destacadas son [6]:

- Tipo de máquina: síncrona, asíncrona, de corriente continua DC, etc.
- Tipo de construcción: polos salientes, polos lisos, flujo axial, flujo radial, etc.
- Potencia nominal: Potencia eléctrica en el eje de la máquina P_N (kW), en el caso de motores de inducción.
- Velocidad asignada de la máquina en rpm, n_N , o la velocidad angular asignada expresada en rad/s, Ω_N .
- Número de pares de polos p de la máquina (con convertidores electrónicos, esto también es objeto de optimización).
- Frecuencia asignada de la máquina, o frecuencia de la red f_1 en Hz (con convertidores electrónicos, esto también es objeto de optimización).
- Tensión asignada V_N de la máquina (V).
- Número de fases de la máquina, m .
- Ciclo de trabajo (S1-S9).
- Clase de envolvente y estructura de la máquina.
- Información adicional, como el rendimiento, par con el rotor bloqueado o par en el arranque requerido, el par de aceleración máximo, la corriente en el arranque, dispositivo de control de velocidad etc.
- Normativa aplicada en el diseño de la máquina.
- Factores económicos.
- Fabricación.

2 DOCUMENTACIÓN DE PARTIDA

Este apartado contiene la documentación que se ha considerado para establecer los requisitos de diseño.

2.1 ESPECIFICACIONES DEL MOTOR

De acuerdo a las especificaciones requeridas por el cliente, el prototipo del motor asíncrono ha de poseer las siguientes características:

Tipo de rotor	Jaula de ardilla
Número de fases, m_1	3
Potencia nominal, P_N (kW)	3550
Tensión nominal Δ/Y (V)	4000/2309
Número de polos, $2p$	4
Tipo de conexión	Estrella (Y)
Frecuencia de la red, f_1 (Hz)	50

Tabla 2.1. Especificaciones motor de inducción.

2.2 CARACTERIZACIÓN DEL MOTOR

Caracterización según las normas

A continuación, se relacionan las características de la máquina derivadas de la normativa, y condiciones de operación del motor:

Par de arranque (p.u.), T_s / T_N	0,8
Corriente en el arranque (p.u.), I_s / I_{1N}	5,8
Par máximo (p.u.), T_m / T_N	2,4
Clase de aislamiento	F
Incremento de temperatura	Clase B
Índice de protección	IP55
Tipo de servicio	S1
Condiciones ambientales	Estándar ³

Tabla 2.2. Caracterización del motor según las normas y condiciones de operación.

Características asignadas y de funcionamiento

Se asume un valor de rendimiento, factor de potencia y velocidad asignada en base a motores ya existentes con el mismo número de polos, tensión y potencia asignada como punto de partida en el diseño del motor, los datos se extraen del catálogo proporcionado por WEG. El cálculo de las características asignadas se detalla en el Anexo 2.1.

Velocidad síncrona, n_1 (rpm)	1500
Deslizamiento asignado, s_N (%)	0,67
Velocidad asignada, n_N (rpm)	1490
Factor de potencia asignado, $\cos \phi_{1N}$	0,9
Rendimiento asignado, η (%)	97
Corriente de fase asignada, I_{1N} (A)	587
Par asignado, T_N (N·m)	22751,7

Tabla 2.3. Características asignadas y de funcionamiento requeridas.

³ Altitud: 1000 m, Temperatura ambiente: -20 °C a +40 °C

2.3 VALORES RECOMENDADOS DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO

Este apartado contiene los valores recomendados que garantizan un diseño correcto de los núcleos magnéticos y arrollamientos del motor, pues se basan en motores existentes adecuadamente diseñados.

2.3.1 INDUCCIÓN MAGNÉTICA MÁXIMA EN EL ENTREHIERRO Y EN LOS DIENTES Y YUGOS DE LOS NÚCLEOS MAGNÉTICOS. DENSIDAD LINEAL DE CORRIENTE

Los valores permitidos inducción magnética, B_M (T), y densidad lineal de corriente A_r (kA/m), dependen fundamentalmente del diseño del aislamiento, y del sistema de refrigeración del motor.

Densidad lineal de corriente A_r

La densidad lineal de corriente o capa de corriente de ranura, se define como la densidad lineal de corriente media en un paso de ranura del estator, cuando la ranura abarca Z_{K1} conductores por los que circula una corriente I_{r1N} .

$$A_r = \frac{Z_{K1} \cdot I_{r1N}}{\tau_{r1}} = \frac{6 \cdot N_1 \cdot I_{1N}}{\pi \cdot D_1}$$

Los factores a tener en cuenta en la elección de la densidad lineal de corriente son [7]:

- Capacidad de sobrecarga⁴: Una densidad lineal de corriente baja implica un número menor de espiras por fase y por lo tanto una reactancia de dispersión menor, un diámetro del estator mayor, y un incremento de la capacidad de sobrecarga.
- Incremento de temperatura: Valores elevados de densidad lineal de corriente, requieren la utilización de una mayor cantidad de cobre, y consecuentemente se incrementan las pérdidas por efecto Joule provocando el ascenso de la temperatura en los devanados. Su valor se ha de limitar para evitar someter al motor a temperaturas excesivamente elevadas, que pueden provocar el deterioro, y envejecimiento prematuro de los componentes.
- Pérdidas en el cobre: Tal y como se ha mencionado previamente, un valor excesivo de A_r supone mayores pérdidas en el cobre, y por lo tanto rendimientos más bajos.

⁴ Relación entre el par nominal y el par máximo del motor: T_M / T_N

- Dimensiones y coste de la máquina: Si se pretende una máquina menos voluminosa y pesada y consecuentemente más barata, se ha de escoger un valor elevado de A_r , pues supone valores de reactancia de dispersión mayores y, en consecuencia, diámetros menores.

Los valores recomendados que ha de tomar A_r difieren según el autor. En [6] se recomienda que A_r esté comprendido entre $[30 \div 65]$ kA/m. Mientras que en [7] para una potencia superior a 100 kW A_r ha de encontrarse entre $[30 \div 40]$ kA/m. Los valores más elevados son adecuados para máquinas de gran potencia.

Inducción magnética máxima en el entrehierro B_M

La inducción magnética máxima en el entrehierro, o densidad de flujo magnético en el entrehierro B_M está limitada por el valor máximo de densidad de flujo en las distintas partes de la máquina especialmente en los dientes, por la corriente de magnetización, y por las pérdidas en los núcleos magnéticos.

Los efectos involucrados en la elección del valor de B_M son [7]:

- Capacidad de sobrecarga⁴: De la expresión de la fuerza electromotriz inducida f.e.m. en una fase del estator: $E_1 = 4,44 \cdot \xi_{b1} \cdot N_1 \cdot f_1 \cdot \Phi_M$, se deduce que, para un valor de f.e.m. dado, si la inducción magnética en el entrehierro es débil, el flujo máximo por polo Φ_M será menor, y por lo tanto es necesario un mayor número de espiras por fase para generar la misma tensión inducida E_1 , y en consecuencia la reactancia de dispersión será mayor, esto implica que la capacidad de sobrecarga será menor, pues el par máximo desarrollado por la máquina es menor. Por lo tanto, la inducción magnética en el entrehierro ha de ser elevada.
- Factor de potencia: Si la inducción magnética es elevada, la corriente de magnetización necesaria para magnetizar el núcleo ferromagnético aumenta debido a la saturación magnética de estos, de manera que el factor de potencia disminuye. B_M ha de ser bajo.
- Coste y dimensiones: Un valor de inducción magnética elevado, implica diámetros menores, consiguiéndose así un motor más barato.
- Incremento de temperatura: Los valores de densidad de flujo magnético elevados suponen mayores pérdidas en el hierro, y un mayor ascenso de la temperatura del motor.

- Pérdidas en el hierro, rendimiento, y corriente de magnetización: Una inducción magnética en el entrehierro elevada, acarrea mayores pérdidas en el hierro, una elevada corriente de magnetización, y consecuentemente una disminución del rendimiento del motor.

Los valores recomendados de inducción magnética máxima en el entrehierro, de acuerdo a [4] para un motor con dos pares de polos ($p \geq 2$) han de estar comprendidos entre $[0,65 \div 0,75]$ T. En [6] se fija entre $[0,7 \div 0,9]$ T. Los valores más elevados corresponden a motores más grandes.

Inducción magnética máxima en los dientes del rotor y el estator B_{tM}

Los valores de densidad de flujo máxima en los dientes del estator recomendadas en [6] han de estar comprendidos entre $[1,4 \div 2,1]$ T, y en los dientes del rotor entre $[1,5 \div 2,2]$ T. En [7] se recomienda que la inducción magnética máxima en los dientes B_{t1M} en el estator y B_{t2M} en el rotor a $\frac{1}{3}$ de la altura del diente respecto al diámetro exterior del rotor o interior del estator no exceda 1,6 T.

Si el valor de inducción magnética en los dientes B_t supera dichas restricciones una posible solución sería disminuir el número de ranuras por polo y fase, o disminuir la sección de los conductores aumentando la densidad de corriente, para que el ancho de los dientes aumente.

Inducción magnética máxima en el yugo del rotor y el estator B_{yM}

Los valores de inducción magnética máxima en el yugo del estator recomendadas en [6] han de estar comprendidos entre $[1,4 \div 1,7]$ T, y en el yugo del rotor entre $[1 \div 1,6]$ T. En [7] se recomienda que la densidad de flujo máxima en los yugos B_{y1M} en el estator y B_{y2M} en el rotor esté comprendida entre $[1,3 \div 1,5]$ T.

Si se dan valores de inducción magnética en el yugo del estator superiores a los recomendados hay tres procedimientos para rebajarlo a niveles más adecuados. Aumentar el diámetro exterior del estator hasta que el valor de inducción en el yugo del estator se encuentre dentro del intervalo indicado anteriormente. Aumentar la relación de aspecto λ , incrementando la longitud axial de la máquina y disminuyendo el diámetro interior del estator, manteniendo el mismo diámetro exterior del inducido de manera que la altura del yugo del estator aumenta disminuyendo B_{y1M} . O bien aumentar la densidad de corriente para disminuir la sección transversal de los conductores del estator y en consecuencia su altura.

Sin embargo, si el rendimiento es un factor de diseño importante dichas medidas se han de tomar con cierta prudencia.

2.3.2 DENSIDAD DE CORRIENTE

Los valores permitidos de densidad de corriente J (A/mm^2) en los conductores, dependen fundamentalmente del diseño del aislamiento, del sistema de refrigeración del motor, de la clase de servicio (S1 - S9), y del rendimiento del motor.

Valores más elevados de densidad de corriente llevan asociados mayores pérdidas en el cobre de los arrollamientos de motor al aumentar su resistencia, con el consecuente aumento de la temperatura. Por lo tanto, los motores más eficientes tienen densidades de corriente menores. Sin embargo, se logra una reducción en el peso y dimensiones de los conductores.

Densidad de corriente en los devanados del estator J_1

Los valores recomendados de densidad de corriente en los devanados del estator según [6] han de encontrarse entre $[3 \div 8] A/mm^2$.

Densidad de corriente en los conductores (barras) del rotor J_2

Los valores recomendados de densidad de corriente en las barras conductoras del rotor según [6] han de fijarse entre $[3 \div 8] A/mm^2$ si el material con el que están fabricadas es cobre.

2.3.3 COCIENTE LONGITUD AXIAL ENTRE PASO POLAR DEL MOTOR DE INDUCCIÓN

La elección de este parámetro depende de las dimensiones y las características que ha de poseer el motor. En [4] se recomienda que dicho cociente esté comprendido entre $[1,2 - 1,8]$ para motores con $2p = 4$ polos. En [7] se relaciona el valor del cociente entre paso polar y longitud axial (l_δ/τ_p) con la prestación requerida del motor:

l_δ/τ_{p1}	Prestación
1	Buen diseño global
1 – 1,25	Factor de potencia mayor
1,5	Alto rendimiento
1,5 – 2	Motor más barato

Tabla 2.4. Valores recomendados del cociente $\lambda = l_\delta/\tau_{p1}$.

2.4 ASPECTOS CONSTRUCTIVOS DE DISEÑO DEL MOTOR DE INDUCCIÓN

En este apartado se van a tratar los aspectos constructivos de las distintas partes de la máquina que se han de tener en cuenta para que el diseño se aproxime a las características operativas necesarias.

2.4.1 NÚCLEOS MAGNÉTICOS DEL ROTOR Y EL ESTATOR

Chapas magnéticas de los núcleos

Los núcleos magnéticos de ambos órganos, rotor y estator, están sometidos a la acción de campos magnéticos variables que provocan pérdidas de potencia por histéresis y corrientes parásitas, para atenuar estos efectos los núcleos se construyen apilando chapas magnéticas de acero al silicio⁵ de pequeño espesor aisladas entre sí mediante un aislamiento eléctrico interlaminar en la superficie de contacto. Las chapas magnéticas empleadas en máquinas rotativas son de grano no orientado, es decir son isótropas pues poseen las mismas propiedades de magnetización en todas las direcciones de magnetización. El material del que se componen se encuentra dentro de los ferromagnéticos blandos.

Las principales características que definen a las chapas magnéticas son [3]:

- Pérdidas específicas de potencia totales (W/kg): Parámetro básico de selección, las normas establecen valores máximos para cada grano. El fabricante proporciona valores de pérdidas totales para valores concretos de inducción máxima, frecuencia, y espesor.
- Permeabilidad magnética: Relaciona la densidad de flujo magnético con la fuerza magnetizadora o campo magnético aplicado. Es un parámetro fundamental del diseño electromagnético del dispositivo para optimizar la utilización de los materiales activos (cobre y acero electrotécnico).
- Conductividad térmica (W/m·K): Es el parámetro fundamental de diseño térmico del núcleo magnético y condiciona bastante el volumen del dispositivo.

La chapa magnética ideal para una máquina eléctrica rotativa se caracteriza por tener reducidas pérdidas de potencia, elevada permeabilidad (es esencial para reducir la corriente de magnetización y las pérdidas del motor), y gran conductividad térmica.

⁵ El silicio incrementa la resistividad del acero: limita el valor de las corrientes parásitas, y reduce en menor medida las pérdidas de potencia por histéresis. Pero reduce la permeabilidad magnética del acero.

Cada diseño se identifica normativamente con un grado, que depende del nivel de potencia de la máquina. Los principales organismos de normalización de chapas son:

- ASTM (American Society for Testing Materials) en Estados Unidos
- AISI ((American Iron & Steel Institute) en Estados Unidos
- IEC (International Electrotechnical Commision) en gran parte del resto del mundo
- EN (European Standards) en Europa siguiendo las directrices internacionales de IEC
- JIS (Japanese Industrial Standards)

Las clases de aislamiento interlaminar se encuentran normalizadas por ASTM A 976, se identifican por la letra C (Coating) seguida de un número (0-5). Cuanto mayor es la cifra, mayor es la capacidad de aislamiento eléctrico. Según los fabricantes, el aislamiento eléctrico de las chapas magnéticas empleado en las máquinas eléctricas rotativas suele ser C-3, y C-5.

La elección de la chapa magnética depende de los niveles de inducción y la frecuencia a la que van a estar sometidos los núcleos. Los grados recomendados para máquinas de gran potencia según los fabricantes (Grupo AK Steel, [5]) son:

EN 10106:1995	AISI serie M (inactivo)	ASTM A677-05	JIS C 2552:2000	IEC/CEI 60404-8-4
M 270-50 A ⁶	M15	47F168	50-A-270	270-50-A5
M 290-50 A	M19	47F174	50-A-290	290-50-A5
M 310-50 A	M22	47F185	50-A-310	310-50-A5

Tabla 2.5. Grados normalizados recomendados de las chapas magnéticas: Completamente procesadas (FP), 0,5 mm de espesor (Calibre normalizado: Gauge 26).

⁶ Garantiza valores de pérdidas en el núcleo bajas, y en consecuencia mejores rendimientos. Sin embargo, su precio es mayor. Tiene un alto contenido de Silicio 2,7% (AK Steels), elevada resistividad.

Las propiedades magnéticas de las chapas indicadas en la Tabla 2.5, se detallan a continuación:

Grado (EN 10106:1995)	M 270-50 A	M 290-50 A	M 310-50 A
Densidad (kg/m ³)	7600	7600	7650
Pérdidas en el hierro máximas (W/kg) 1,5 T / 50 Hz	2,7	2,9	3,1
Resistividad eléctrica ($\mu\Omega \cdot \text{cm}$)	50	43	43
Factor de empilado	0,97		

Tabla 2.6. Propiedades de los grados recomendados de las chapas magnéticas. Fuente: Grupo Arcelor Mittal y AK Steels [5].

Las chapas magnéticas que conforman los núcleos tienen forma de corona circular, en ocasiones cuentan con una serie de orificios que atraviesan axialmente la máquina permitiendo la circulación de aire u otro fluido refrigerante a lo largo del núcleo magnético. Los núcleos magnéticos pueden construirse formando un único bloque de chapas, adecuado cuando la ventilación de la máquina es axial, o un conjunto constituido por varios bloques formando canales radiales de ventilación. Esta última forma constructiva es la más adecuada para motores de gran potencia, sin embargo, implica pérdidas adicionales, mayores inductancias de dispersión (mayores flujos de dispersión) que reducen el par máximo, y el factor de potencia.

Al tratarse de motor de polos lisos o entrehierro uniforme, la superficie externa del rotor e interna del estator es cilíndrica y ranurada para poder disponer los devanados de ambos órganos.

Entrehierro

El espesor del entrehierro depende de factores electromagnéticos⁷ (corriente de magnetización, pérdidas pulsantes), y factores mecánicos (tolerancias mecánicas etc.). El espacio de aire comprendido entre los núcleos magnéticos del rotor y el estator o entrehierro ha de ser lo más estrecho posible pues al no ser un material magnético (permeabilidad igual a la del vacío: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m), se requiere un valor de f.m.m. más elevada para poder magnetizarlo y por consiguiente una corriente de magnetización mayor.

Geometría de las ranuras y dientes

Se emplean dos tipos de ranuras en el estator de los motores de inducción, ranuras abiertas y semicerradas. La elección entre una u otra depende nivel de potencia del motor y por ende del tipo de conductor que se vaya a utilizar:

- Ranuras abiertas: se emplean en máquinas de gran potencia dado que se suelen emplear devanados con bobinas completamente acabadas (preformadas) que precisan ranuras abiertas para poder colocar los conjuntos completos en las mismas, una vez insertado el devanado la ranura se cierra mediante una cuña de cierre.
- Ranuras semicerradas: se emplean en máquinas de pequeña potencia que suelen utilizar conductores tipo hilo que se insertan uno por uno por la estrecha abertura de la ranura mediante una máquina bobinadora o manualmente, ocupando posiciones aleatorias.

La forma de las ranuras del estator incide en las características operativas del motor, suelen ser de forma rectangular. En [7] se recomienda que la altura y el ancho de ranura guarde la siguiente proporción: $h_s / b_s \in (2 \div 5)$, en [4] $h_s / b_s \in (3 \div 6)$. Ranuras más profundas en relación a su altura suponen valores de reactancia de dispersión mayores y consecuentemente pares menores, mientras que ranuras proporcionalmente más anchas suponen mayores aberturas de ranura, reactancias de dispersión menores y mayor par.

⁷ **Factor de potencia:** La fmm requerida para conducir el flujo magnético que ha de atravesar el entrehierro es proporcional al producto de la densidad de flujo por el espesor del entrehierro. De manera que cuanto más ancho sea el entrehierro mayor será la corriente necesaria para magnetizar el núcleo, y en consecuencia el factor de potencia será menor.

Capacidad de sobrecarga: Si el espesor del entrehierro es grande, la capacidad de sobrecarga es mayor, por la reducción en la reactancia de dispersión debida al efecto zig-zag.

Perdidas debido a pulsaciones en el flujo: Son debidas a la variación de reluctancia del entrehierro por la presencia de ranuras, canales radiales de ventilación e irregularidades en el mismo. Son menores con entrehierros más anchos.

La reluctancia que presentan las ranuras cerradas es menor que la reluctancia dada por las ranuras semicerradas siendo inferior a los dos tipos anteriores en ranuras abiertas. Por lo tanto, las ranuras abiertas cuentan con una reactancia de dispersión menor que las ranuras semicerradas, siendo superior en ranuras cerradas. En las ranuras abiertas, la distribución del flujo magnético no es uniforme al contrario que en las ranuras cerradas. No obstante, la reactancia de dispersión en ranuras cerradas es considerablemente elevada. Las ranuras semicerradas procuran un compromiso óptimo entre el valor de la reactancia de dispersión y la distribución de flujo.

En los motores de inducción, se emplean ranuras abiertas en uno de los dos órganos, mientras que en el otro se utilizan ranuras semicerradas. El motivo es que una abertura de ranura del estator grande en relación al espesor del entrehierro supone una densidad de flujo promedio menor para un valor de f.m.m. dado, y mayores pulsaciones de flujo en los dientes del rotor, que causarían pérdidas adicionales en los núcleos magnéticos. Los armónicos de flujo en el entrehierro provocan pares parásitos, ruido y vibraciones. Por esta razón, para ranuras semicerradas en el estator, se acostumbra a cumplir esta relación [4]: $b_{o1}/\delta_g \cong (4 - 6)$. Por el mismo motivo, la abertura de las ranuras del rotor por espesor del entrehierro ha de verificar: $b_{o2}/\delta_g \cong (3 - 4)$, siempre que sea posible. Valores pequeños del cociente abertura de ranura entre espesor del entrehierro, implican valores más elevados de campo magnético en los cuellos de las ranuras y en consecuencia valores de inductancia de dispersión de ranura más elevados que causan menores pares y corrientes en el arranque, y valores más bajos de par máximo.

Según se explicó en el apartado de antecedentes en la memoria del presente trabajo, la forma de la curva Par-Velocidad puede ser manipulada modificando los parámetros del circuito equivalente del motor mediante la variación de la geometría y del material de las barras del rotor. La resistencia del rotor R_2 es inversamente proporcional a la sección transversal de las barras y directamente proporcional a la resistividad del material del cual están fabricadas, variando ambos parámetros es posible ajustar la característica Par-Velocidad. La reactancia de dispersión del rotor X_2 , que representa la dispersión de flujo magnético (líneas de flujo en el rotor que no enlazan a los devanados del estator), se puede ajustar variando la posición de las barras respecto al diámetro exterior del rotor, si se las ubica próximas al entrehierro, el flujo disperso será menor y en consecuencia también la reactancia de dispersión del rotor, y

viceversa, si se alejan de la superficie externa del rotor. Otro modo de ajustar este parámetro consiste en modificar la geometría de las barras, barras más profundas en proporción a su anchura, presentan una reactancia de dispersión mayor.

Aprovechando el efecto de desplazamiento de corriente (efecto pelicular) durante el funcionamiento del motor es posible incrementar su par de arranque y disminuir su par máximo:

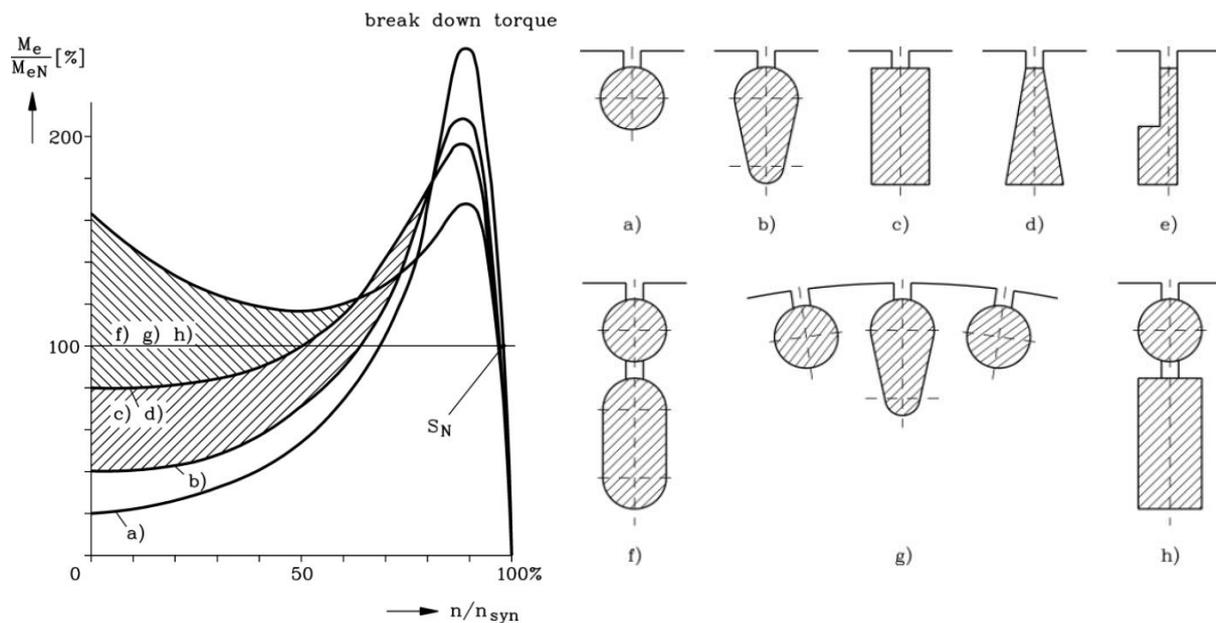


Figura 2.1. Geometría de las barras y sus respectivas curvas Par-Velocidad:

Sin o con muy poco desplazamiento de corriente: a), b)

Con desplazamiento de corriente: c), d), e), f), g), h)

Ranuras por polo y fase del estator. Número de ranuras del estator

A continuación, se enumeran los criterios que se han considerado en la elección de este parámetro:

- Pérdidas debidas a las pulsaciones de flujo: Si se emplean ranuras abiertas, la anchura de estas debe ser tal que minimice, en la medida de lo posible, las irregularidades en el entrehierro que provocan pérdidas debido a las pulsaciones de flujo en los dientes, vibraciones y ruido. Este efecto indeseado se resuelve empleando un mayor número de ranuras de menor anchura que procuran un entrehierro más uniforme.
- Reactancia de dispersión: A medida que se incrementa el número de ranuras, también aumenta la cantidad de ranuras por aislar. Por lo tanto, la cantidad de espacio destinado al aislamiento aumenta, provocando que la trayectoria que ha de recorrer el flujo de dispersión a través del aire sea más larga. En consecuencia, el flujo de dispersión se reduce.
- Corriente de magnetización y pérdidas en los núcleos: A mayor número de ranuras menor es la sección de los dientes, incrementándose así la densidad de flujo en los mismos. Una inducción magnética excesiva en los dientes causa su saturación magnética, este hecho implica un incremento de la corriente de magnetización y de las pérdidas en el hierro.
- Costes: Al incrementar el número de ranuras, aumenta el número de bobinas a insertar y aislar en las ranuras, con el consecuente aumento en los costes.

En resumen:

Menos ranuras: Menores costes, menor espacio destinado al aislamiento y a las aberturas de las ranuras.

Más ranuras: Reactancia de dispersión menor y mayor par máximo, menos armónicos en la f.m.m., mejor refrigeración.

Se ha de tratar de utilizar el mayor número de ranuras posible. La anchura mínima del diente [4] queda delimitada por factores tecnológicos y electromagnéticos a un valor de 3,5 mm. El número de ranuras por polo y fase no ha de ser inferior a 2 para evitar que la reactancia de dispersión sea elevada.

Número de ranuras en el rotor

La característica Par-Velocidad ideal se obtiene cuando la distribución espacial de la onda de flujo a lo largo de la periferia del entrehierro es sinusoidal. En realidad, el flujo en el entrehierro no es puramente sinusoidal al contener órdenes armónicos impares debido a la distribución del devanado del estator y a la variación de reluctancia en el entrehierro por la presencia de ranuras en el estator y el rotor. Los armónicos de flujo en el entrehierro causan que el motor desarrolle pares parásitos síncronos y asíncronos, que provocan que la curva Par-Velocidad no sea suave durante el arranque, y que el motor tenga un funcionamiento inestable acompañado de ruido y vibraciones. La combinación del número de ranuras en el estator y el rotor tiene una influencia directa en este sentido.

La elección del número de ranuras se realizará en base a un conjunto de pautas que regulan la elección de las combinaciones del número de ranuras en el estator y el rotor para tratar de evitar las perturbaciones introducidas por los pares parásitos síncronos y asíncronos, pérdidas adicionales, esfuerzos radiales, ruido y vibraciones. A continuación, se relacionan algunas de las combinaciones de K_1/K_2 dadas por diversos autores, que han propiciado resultados satisfactorios:

K_1	K_2
24	18, 30, 32
36	22, 24, 28, 42, 44, 60
48	38, 44, 56, 58, 60, 84
60	44, 48, 50, 70, 72, 74, 84

Tabla 2.7. Combinaciones de ranuras en el estator K_1 y el rotor K_2 recomendadas en motores asíncronos trifásicos de jaula de ardilla con $p = 2$ pares de polos. Fuente: [8].

En la Tabla 2.8, los números de ranuras en el rotor están organizados de tal forma que el primer número del listado proporciona la combinación de ranuras más óptima, siendo la menos óptima la correspondiente al último número.

K_1	K_2
36	24, 40, 42, 60, 44, 30, 44
48	60, 84, 56, 44
60	72, 48, 84, 44

Tabla 2.8. Combinaciones de ranuras en el estator K_1 y el rotor K_2 adecuadas en motores asíncronos trifásicos de jaula de ardilla con $p = 2$ pares de polos y con inclinación de ranuras en el rotor en 1 o 2 pasos de ranura del estator. Fuente: [6].

Diámetro exterior del estator

En base a motores existentes en [4] se recomienda que en motores con $2p = 4$ polos la relación entre el diámetro exterior e interior del estator esté comprendida entre: $D_{1e}/D_1 \in (1,46 - 1,49)$.

2.4.2 DISEÑO DE LOS ARROLLAMIENTOS DEL ROTOR Y EL ESTATOR

El nivel de tensión, corriente, y el número de fases son los factores más determinantes en el diseño de los arrollamientos. El nivel de corriente determina la sección de los conductores, y el tipo de conexión de las bobinas (serie, paralelo, o una combinación de ambos). Las necesidades de aislamiento y por ende la colocación de las bobinas en las ranuras dependen del nivel de tensión. Por último, el número de fases determina la disposición general del arrollamiento.

2.4.3 CARACTERÍSTICAS DE LOS CONDUCTORES ELÉCTRICOS

Arrollamientos del estator

Los devanados están constituidos por un conjunto de bobinas interconectadas, que a su vez están formadas por espiras conductoras. En las ranuras de los núcleos magnéticos próximos al entrehierro, se insertan los devanados.

El tipo de arrollamientos empleados en motores de gran potencia, son los arrollamientos preformados tipo diamante. La sección de este tipo de devanados es rectangular.

En los devanados estartóricos de los motores de inducción se suele emplear cobre como material conductor dada su elevada conductividad eléctrica y térmica que permiten obtener un motor más eficiente, menos voluminoso y más económico.

Arrollamientos de rotor. Jaula de ardilla

Las barras de la jaula y anillos extremos están realizadas con aluminio fundido a presión para baja y media potencia y de latón o cobre para altas potencias. Para media y alta potencia, las barras son soldadas a los anillos por sus extremos para proporcionar una baja resistencia de contacto, también pueden ser moldeadas a presión. Dada la elevada conductividad, capacidad para asumir valores elevados de densidad de corriente y propiedades térmicas del cobre, se acostumbra a utilizar este material en motores en los que la eficiencia es un factor fundamental.

2.4.4 DISTRIBUCIÓN DE LOS DEVANADOS EN LAS RANURAS

Factores que afectan a la f.e.m. inducida en un devanado. Técnicas de atenuación de armónicos

La distribución de la fuerza magnetomotriz f.m.m. producida por un devanado concentrado o distribuido, no es de carácter senoidal por el contenido armónico de la onda. Los armónicos en la f.m.m. causan pares parásitos, esfuerzos radiales, pérdidas adicionales en los núcleos y arrollamientos del motor, ruido y vibración. La acción conjunta de las f.m.m. del inductor y el inducido establece el flujo magnético en el entrehierro que a su vez origina f.e.m.s inducidas en la máquina y por ende también contendrán armónicos. Por lo tanto, interesa lograr una forma onda que se aproxime a una senoide, para ello es preciso cancelar los armónicos causantes de dicha distorsión. Dada la simetría del circuito magnético solo se producen armónicos de orden impar, si además el devanado es trifásico, bien sea su conexión en estrella o en triángulo, no se produce tercer orden armónico ni ninguna componente múltiplo del tercer armónico en la f.e.m. en los terminales de la máquina.

No es posible lograr la anulación completa de los armónicos, no obstante, las amplitudes de las componentes armónicas son inversamente proporcionales a su orden de manera que bastaría con anular hasta el quinto o séptimo orden armónico para lograr una onda prácticamente senoidal.

Para lograrlo se utilizan diversas técnicas constructivas que eliminan las componentes armónicas causantes de dicha distorsión, y a su vez procuran un mejor aprovechamiento de los núcleos ferromagnéticos. A continuación, se describen dichas técnicas y el efecto que causan en la f.e.m.:

- Devanados distribuidos. Factor de distribución: En la práctica las bobinas que conforman el devanado se distribuyen uniformemente en las ranuras practicadas en la periferia interior o exterior de los núcleos magnéticos, de tal forma que las espiras de una fase correspondientes a un mismo polo no van a estar sometidas a los mismos flujos magnéticos causando un cierto desfase entre los valores instantáneos de la f.e.m. en las espiras de distintas ranuras. Las ondas de f.e.m. son idénticas, pero se encuentran desfasadas de manera que la resultante de todas ellas es menor que en el caso de que no existiese ese desfase espacio-temporal. Este efecto se contempla a través del factor de distribución que representa la relación entre la f.e.m. resultante de un devanado distribuido y la f.e.m. teórica producida por un devanado concentrado en el que todas las espiras de un polo estuviesen afectadas por el mismo flujo magnético.
- Devanados de paso acortado. Factor de acortamiento o factor de paso: Si el paso de bobina no es diametral (no coincide con el paso polar), si no que se acorta en una o más ranuras para cancelar armónicos, la bobina abrazará solo una fracción del flujo, se produce un desfase entre las f.e.m. de ambos lados de la bobina que causa una reducción de la f.e.m. resultante, este efecto se contabiliza a través del factor de acortamiento. El acortamiento de paso origina una disminución no solo de la f.e.m., también de la longitud de las cabezas de bobina.
- Inclinación de ranuras. Factor de inclinación de ranura: Con el objeto de atenuar la influencia de los armónicos de ranura y mejorar así la onda de f.m.m. en el entrehierro, se acostumbra a inclinar las ranuras axialmente un ángulo correspondiente a una o dos ranuras. Cuando existe inclinación de ranura en el estator o el rotor, el campo magnético común ya no coincide con el campo magnético total del armónico fundamental, dado que, una pequeña parte de este pasa a ser campo magnético de dispersión, y por lo tanto la f.e.m. inducida se verá reducida en un factor conocido como factor de inclinación. Esta técnica es habitual en motores de menor diámetro en los que no es posible utilizar una combinación de ranuras que favorezca la reducción de las componentes armónicas.

Todos estos factores se suelen agrupar en un coeficiente conocido como factor de devanado igual al producto de todos los factores mencionados previamente, si el devanado es distribuido, de paso acortado y se ha realizado una inclinación de las ranuras.

Al efectuar un acortamiento y distribución de las bobinas e inclinación de las ranuras se reducen los armónicos de la tensión y de la f.m.m. logrando de este modo mayor pureza de la onda de f.e.m. de salida, a expensas de una leve rebaja en el valor de f.e.m. fundamental, pero esta disminución se ve compensada con creces por la mejora en la senoide de salida.

Dado que el factor de inclinación suele tomar valores muy próximos a 1, su influencia es despreciable en relación al factor de distribución y acortamiento.

En máquinas de gran potencia los devanados suelen ser de doble capa, dada su mayor facilidad de fabricación (menos ranuras para un número dado de bobinas) y las conexiones de sus extremos son más sencillas que en los devanados de una capa.

2.5 DISEÑO DEL AISLAMIENTO

2.5.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES DIELECTRICOS

Los aislantes de las máquinas eléctricas aseguran el aislamiento eléctrico entre conductores y entre estos y las restantes masas metálicas que operan a potencial eléctrico nulo. El material dieléctrico o aislante se caracteriza por poseer una conductividad eléctrica baja, de manera que, solo una fracción despreciable de corriente circula por su través (corriente de fuga), asegurándose de este modo que la corriente sea conducida mayoritariamente por los arrollamientos de la máquina.

La elección del material dieléctrico de los distintos elementos que componen el sistema de aislamiento ha de estar sujeta a sus propiedades eléctricas, mecánicas y físico-químicas.

El tipo de material y espesor del aislamiento de los núcleos, ranuras, conductores, cabezas de bobina, y extremos de conexión de los devanados, depende de la clase de aislamiento que es función de la tensión de la máquina, y del ambiente en el que está previsto que operé el motor.

2.5.2 FACTOR DE LLENADO

El factor de ocupación o factor de llenado representa la fracción de espacio útil en la ranura destinado al conductor, es un indicador del nivel de utilización de material en la máquina y, por lo tanto, interesa que su valor sea lo más elevado posible. Además, una mejora en el factor de llenado supone un aumento en el rendimiento del motor.

Existen distintas formas de entender el factor de ocupación o factor de llenado:

- Factor de ocupación de ranura: Se evalúa considerando el recubrimiento aislante de los conductores.
- Factor de ocupación de cobre: Se evalúa considerando al conductor desnudo.

El factor de ocupación de ranura depende fundamentalmente del material de los devanados, del nivel de tensión, y del tipo de devanado de la máquina. Los arrollamientos de pequeñas máquinas eléctricas suelen emplear conductores circulares, en ese caso el factor de ocupación de un conductor aislado en una ranura descontando el espacio reservado al aislamiento de ranura varía, dependiendo de la calidad en el montaje de los devanados, entre [0,6 – 0,66].

No obstante, el factor de ocupación se define para ranuras sin aislamiento. Valores de $K_{Cu1} \in (0,5 - 0,6)$ son habituales en máquinas de baja tensión. El límite inferior corresponde a conductores circulares esmaltados y el límite superior a devanados de bobinas preformadas de conductores rectangulares. En máquinas de alta tensión, el aislamiento es más exigente y por lo tanto el espacio destinado a este es mayor $K_{Cu1} \in (0,3 - 0,45)$, el valor inferior corresponde a conductores circulares y el superior a conductores rectangulares.

Los arrollamientos estatóricos de grandes máquinas eléctricas suelen construirse con bobinas preformadas de cobre. Al emplear conductores rectangulares o bien bobinas prefabricadas o preformadas, el factor de ocupación mejora en relación al correspondiente a conductores circulares.

En los devanados de jaula, si las barras de aluminio o cobre se moldean a presión en el núcleo magnético del rotor, el factor de ocupación del rotor $K_{Cu2} = 1$.

ANEXO 2: CÁLCULOS

ANEXO 2.1: CÁLCULO DE LAS CARACTERÍSTICAS ASIGNADAS

1 CÁLCULO DE LAS CARACTERÍSTICAS ASIGNADAS

En base a las especificaciones del motor exigidas por el cliente, la normativa referente a los motores eléctricos etc., se fijan ciertos parámetros de funcionamiento. A continuación, se realiza el cálculo de alguno de ellos.

1.1 VELOCIDAD DE SINCRONISMO Y DESLIZAMIENTO

La velocidad síncrona del motor se obtiene de acuerdo a la siguiente expresión:

$$n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p} \quad (1.1)$$

n_1 (rpm): Velocidad síncrona del motor

f_1 (Hz): Frecuencia de la red

p : Número de pares de polos

El deslizamiento asignado s_N en valor por unidad, se calcula con la siguiente expresión:

$$s_N = \frac{n_1 - n_N}{n_1} \quad (1.2)$$

s_N : Deslizamiento asignado del motor (p.u.)

n_N (rpm): Velocidad asignada del motor

En la Tabla 1.1 se resumen los valores de todos los parámetros:

p	f_1 (Hz)	n_1 (rpm)	n_N (rpm)	s_N
2	50	1500	1490 ⁸	0,0067

Tabla 1.1. Velocidad síncrona, y velocidad y deslizamiento en condiciones nominales.

⁸ Se asigna este valor en base a un motor existente (Anexo 1)

1.2 PAR NOMINAL

El par nominal desarrollado por el motor en condiciones asignadas se obtiene con la siguiente expresión:

$$T_N = \frac{P_N}{\Omega_N} = \frac{P_N}{\frac{2\pi}{60} \cdot n_N} \quad (1.3)$$

T_N (N·m): Par nominal

Ω_N (rad/s): Velocidad angular asignada

En la Tabla 1.2 se resumen los valores de todos los parámetros:

P_N (kW)	n_N (rpm)	T_N (N·m)
3550	1490	22751,7

Tabla 1.2. Valor de par asignado.

1.3 POTENCIA ABSORBIDA

Mediante la ecuación (1.4) se obtiene la potencia absorbida por el estator en condiciones asignadas, su valor se muestra en la Tabla 1.3:

$$P_{1N} = \frac{P_N}{\eta_N} \quad (1.4)$$

P_{1N} (kW): Potencia activa absorbida por el estator en condiciones asignadas

P_N (kW): Potencia activa nominal del motor en condiciones asignadas

η_N : Rendimiento nominal del motor

En la Tabla 1.3 se detallan los valores de los parámetros.

P_N (kW)	η_N (rpm)	P_{1N} (kW)
3550	0,97 ⁹	3659,8

Tabla 1.3. Valor de la potencia activa absorbida por el estator en condiciones asignadas

⁹ Se asigna este valor en base a motores existentes, y recomendaciones.

1.4 INTENSIDAD DE FASE ASIGNADA

La intensidad nominal por fase I_{1N} en el estator se obtiene según la ecuación (1.5).

$$I_{1N} = \frac{P_{1N}}{3 \cdot V_{1N} \cdot \cos \phi_{1N}} \quad (1.5)$$

I_{1N} (A): Intensidad asignada de fase

V_{1N} (V): Tensión asignada de fase

$\cos \phi_{1N}$: Factor de potencia en condiciones asignadas

A continuación, se muestran los valores de cada miembro de la ecuación:

V_{1N} (kV)	$\cos \phi_{1N}$	P_{1N} (kW)	I_{1N} (A)
2,309	0,9 ¹⁰	3659,8	587

Tabla 1.4. Valor de la intensidad por fase en condiciones asignadas.

¹⁰ Se asigna este valor en base a motores existentes, y recomendaciones.

ANEXO 2.2: VALOR ESTIMADO DE LAS DIMENSIONES DEL MODELO INICIAL

2 VALOR ESTIMADO DE LAS DIMENSIONES DEL MODELO INICIAL

En el diseño de máquinas eléctricas es preciso, una vez se han definido los requerimientos del motor, obtener una aproximación analítica de las dimensiones del mismo para poder concretar el modelo que será estudiado mediante programas de diseño basado en técnicas numéricas como el análisis por elementos finitos.

2.1 ALGORITMO DE CÁLCULO

El dimensionado del motor se inicia definiendo las especificaciones de diseño en base a los requerimientos precisados por el cliente, a la normativa relativa a los motores de inducción, entre otros factores que se detallan en el Anexo 1, y por otro lado, los valores asignados de inducción magnética máxima en las distintas partes del motor (entrehierro, dientes y yugos de los núcleos magnéticos), densidad lineal de corriente, densidad de corriente en los conductores y la relación entre la longitud axial del entrehierro y el paso polar de la máquina, los factores a tener en cuenta en la elección de las distintas magnitudes se detallan en el Anexo 1. En base a estas condiciones se recurre a las relaciones y ecuaciones recomendadas en la bibliografía dedicada al diseño de máquinas eléctricas para dimensionar los circuitos eléctricos y magnéticos del motor.

En primer lugar, se calcula el diámetro interior del estator. Para ello, existen distintos conceptos que relacionan las dimensiones principales del motor ($D^2 \cdot L$, longitud axial del entrehierro y diámetro interior del estator) con la capacidad o potencia que la máquina es capaz de desarrollar. En esta ocasión, se empleará el concepto de esfuerzo tangencial que relaciona el par desarrollado por el motor con el volumen del inducido. El valor del esfuerzo tangencial depende de la potencia, la velocidad y el método de enfriamiento de la máquina, la expresión para definir su valor involucra las magnitudes de inducción máxima en el entrehierro, densidad lineal de corriente, y factor de potencia definidas en la primera etapa del proceso.

Una vez, se ha calculado el volumen del inducido, es necesario asumir un valor del cociente entre la longitud axial del entrehierro y paso polar del estator¹¹ para poder obtener el diámetro interior del estator. Acto seguido, utilizando la relación entre la longitud axial del entrehierro y el diámetro interior del estator, se puede obtener la longitud axial del entrehierro. Para tener en cuenta la distorsión de flujo magnético debida a los extremos de los núcleos y los canales radiales de ventilación, necesarios en la refrigeración de motores de gran potencia, se define el concepto de longitud equivalente del núcleo o longitud axial efectiva del entrehierro, de manera que descontando los efectos antes señalados se obtendría la longitud axial total de la máquina. Dado que JMAG-Express Public no contempla la presencia de dichos conductos no se tendrá en cuenta su efecto, por lo tanto, la longitud axial de la máquina coincide con la longitud efectiva del entrehierro.

Tras obtener el diámetro interior del estator, se define el valor del espesor del entrehierro geométrico. Existen diversas relaciones empíricas para calcularlo. En función de la expresión que se utilice dependerá de unos factores u otros como la potencia, y el número de pares de polos del motor.

Una vez conocidos el diámetro interior del estator y el espesor del entrehierro, podemos estimar el diámetro exterior del rotor.

A continuación, se ha de caracterizar el devanado del estator: tipo de devanado, número de ranuras por polo y fase, número total de ranuras, paso polar, paso de bobina, paso de ranura, número de capas, número de ramas en paralelo, número de bobinas por par de polos y fase, y factor de devanado. En el Anexo 1 se describen los criterios de selección de cada magnitud.

Para terminar de definir completamente el devanado del estator, se ha de determinar el número de espiras por fase de una rama en paralelo y el flujo magnético por polo en el entrehierro. Se procede de la siguiente manera, se parte de un valor de flujo por polo máximo que se determina en función del valor de inducción magnética máxima en el entrehierro estimada inicialmente. Para calcular la f.e.m. inducida nominal en una fase del estator se utiliza una expresión que relaciona este valor con la tensión de fase asignada del estator, y que depende del número de polos del motor.

¹¹ Los valores recomendados de este parámetro se recogen en el Anexo 1 y se fijan en la primera etapa del proceso.

Una vez se han concretado ambos valores se deduce el número de espiras de una rama en paralelo por fase de acuerdo a la expresión de la f.e.m. inducida en una fase del estator. Se ha de tener en cuenta que el número de espiras que forman la bobina necesariamente ha de ser un valor entero, por lo tanto, se ha de redondear el valor obtenido en el cálculo.

Dado que la f.e.m. inducida en una fase del estator es la misma, al modificar el número de espiras, el flujo por polo y por ende la inducción magnética máxima en el entrehierro han variado por lo que es preciso recalcular el flujo por polo y posteriormente la inducción magnética máxima que será utilizada en la determinación de las restantes dimensiones del motor. Asimismo, se ha de comprobar que el valor definitivo de inducción máxima en el entrehierro no exceda los límites recomendados.

A continuación, se procede con el cálculo de los conductores del estator. Se ha de definir su sección en función de la intensidad nominal que circula por cada conductor y la densidad de corriente en los mismos fijada acorde a las recomendaciones. Conocida el área de los conductores, se ha de decidir el tipo de sección más adecuado, todos estos aspectos se contemplan en el Anexo 1. Finalmente, tras concretar el área y el tipo de sección del conductor, se consultan las secciones y dimensiones normalizadas de los mismos, y se escoge el conductor cuya área se aproxime más a la obtenida en los cálculos. Para comprobar si se conserva de forma aproximada la densidad de corriente en el conductor asignada en un principio, se calcula de nuevo su valor con la sección normalizada. Con el propósito de orientar la elección de las dimensiones del conductor se partirá de los valores entre los que se ha de encontrar el ancho de ranura del estator en base a una expresión que relaciona este parámetro con el paso de ranura del estator. Para ello, es preciso definir la clase y espesor del aislamiento en función del nivel de tensión etc., de este modo descontando su valor al ancho de ranura, obtendremos el intervalo en el que se ha de encontrar el ancho del conductor.

Tras caracterizar el devanado del estator se procede con el dimensionado del núcleo magnético del estator.

Para poder dimensionar las ranuras, dientes, y yugo del estator, es preciso obtener la longitud útil del hierro, es decir, la fracción de longitud total de la máquina que tiene funcionalidad magnética.

Una vez se ha obtenido la longitud útil del hierro, es posible calcular la altura del yugo del estator en base a la inducción magnética máxima en el mismo, establecida conforme a las recomendaciones contempladas en el Anexo 1, el flujo máximo en el yugo que depende de la inducción magnética máxima en el entrehierro calculada previamente, y la longitud útil del hierro.

A continuación, con la densidad de flujo máxima en los dientes establecida conforme a las recomendaciones detalladas en el Anexo 1, se procede con el dimensionado de los dientes del estator, en concreto se determinarán la anchura máxima de los dientes y mínima de las ranuras del estator. Asimismo, se comprobará si el intervalo de valores que puede tomar el ancho de ranura del estator, anticipado en etapas anteriores, verifica las condiciones impuestas.

Conocidas las dimensiones del conductor, el número de conductores por ranura y las capas de aislamiento que recubren a los conductores se puede definir la altura útil de las ranuras (altura de la ranura descontando el espacio dedicado a las cuñas de cierre y espesor del aislamiento de ranura) partiendo de la expresión empleada por JMAG-Express Public para calcular el factor de ocupación de ranura, para ello se ha de asumir el valor de dicho parámetro conforme a las recomendaciones (Anexo 1).

Una vez definida la altura de las ranuras, y la altura del yugo del estator es posible determinar el diámetro exterior del estator, tras obtener su valor se comprobará si se encuentra dentro de los valores recomendados en la documentación consultada.

Posteriormente, se procede con el dimensionado de la jaula del rotor. En primer lugar, se determina el número de ramas en paralelo, número de ranuras del rotor, que se ha seleccionado conforme a la combinación de ranuras del estator y del rotor recomendadas para evitar un funcionamiento inestable del motor, número de fases, número de ranuras por polo y fase, y factor de devanado.

Finalmente, se realiza el cálculo de la sección transversal de las barras igual al cociente entre la corriente asignada que circula por cada barra del rotor y la densidad de corriente en las mismas. El valor de densidad de corriente en las barras se ha fijado conforme a las recomendaciones (Anexo 1), el cálculo de la corriente asignada en cada barra del rotor se detalla más adelante. Una vez se ha determinado el área transversal de la barra se ha de elegir su geometría y definir sus dimensiones.

Tras precisar las características y dimensiones de los conductores del rotor se procede con el dimensionado del núcleo magnético. Se obtendrá en primer lugar la longitud útil del hierro del rotor y posteriormente se deducirán la anchura máxima de ranura y mínima del diente que verifique las condiciones de inducción magnética máxima en los dientes.

Para dimensionar las ranuras del rotor, se va a utilizar un método similar al empleado para deducir la anchura mínima del diente y máxima de las ranuras del estator. Se estudiará la situación más desfavorable, que corresponde a las dimensiones del conductor que procuran los dientes más estrechos, y se comprobará si la inducción magnética, en ese caso, no excede el valor máximo recomendado. Por último, se definirán las dimensiones de la boca de ranura, y se comprobarán los valores de inducción magnética en los dientes con las dimensiones de las barras finalmente adoptadas.

Siguiendo el esquema de cálculo descrito en el apartado anterior se procede con el dimensionamiento del modelo inicial.

2.2 CÁLCULO DE LAS DIMENSIONES PRINCIPALES DEL MOTOR

2.2.1 DIÁMETRO INTERIOR DEL ESTATOR Y LONGITUD AXIAL DEL MOTOR

Cálculo del diámetro interior del estator y longitud axial del entrehierro

Para el cálculo de ambas dimensiones se hará uso la ecuación (2.1), que relaciona el volumen del inducido con el par desarrollado por la máquina.

$$T = \frac{\pi \cdot \sigma_{Ftan} \cdot V_r}{2} \quad (2.1)$$

T (N·m): Par desarrollado por la máquina

σ_{Ftan} (N/m²): Esfuerzo tangencial

V_r (m³): Volumen prismático del inducido

El esfuerzo tangencial, actuando sobre la superficie externa del rotor, produce el par de la máquina. Se calcula con la siguiente expresión:

$$\sigma_{Ftan} = \frac{A_r \cdot B_M \cdot \cos \phi}{\sqrt{2}} \quad (2.2)$$

A_r (A/m): Densidad lineal de corriente (valor eficaz)

B_M (T): Inducción máxima en el entrehierro

$\cos \phi$: Factor de potencia del motor

Los parámetros necesarios para el cálculo del esfuerzo tangencial, se han escogido conforme a la Documentación de partida (Anexo 1).

El volumen prismático del inducido viene definido por la siguiente expresión:

$$V_r = D_1^2 \cdot l_\delta \quad (2.3)$$

D_1 (m): Diámetro interior del estator

l_δ (m): Longitud efectiva del entrehierro

Sustituyendo la expresión anterior en la ecuación (2.3) y operando se obtiene:

$$V_r = D_1^2 \cdot l_\delta = \frac{2 \cdot T}{\pi \cdot \sigma_{Ftan}} \quad (2.4)$$

Para poder resolver la ecuación es preciso asumir un valor del parámetro $\lambda = l_\delta/\tau_{p1}$, cociente entre la longitud axial del entrehierro y el paso polar del estator. Los criterios adoptados en la elección de λ se detallan en el Anexo 1.

El paso polar medido respecto al diámetro interior del estator se define como:

$$\tau_{p1} = \frac{\pi \cdot D_1}{2p} \quad (2.5)$$

Sustituyendo τ_{p1} en la expresión de λ se obtiene la siguiente relación:

$$\lambda = \frac{l_\delta}{\tau_{p1}} = \frac{l_\delta}{\frac{\pi \cdot D_1}{2p}} = \frac{2p \cdot l_\delta}{\pi \cdot D_1}$$

$$\frac{l_\delta}{D_1} = \frac{\pi \cdot \lambda}{2p} \quad (2.6)$$

Expresando el volumen prismático en función del cociente de la ecuación (2.6) y despejando se obtiene el **diámetro interior del estator**.

$$V_r = D_1^2 \cdot l_\delta = D_1^3 \cdot \frac{l_\delta}{D_1}$$

$$D_1 = \sqrt[3]{\frac{V_r}{\frac{l_\delta}{D_1}}} \quad (2.7)$$

Una vez se conoce el diámetro interior del estator, mediante la expresión (2.6) se calcula la **longitud efectiva del entrehierro** o longitud equivalente del núcleo como sigue:

$$l_\delta = \frac{l_\delta}{D_1} \cdot D_1 \quad (2.8)$$

Calculo de la longitud axial geométrica del motor

La longitud obtenida en la ecuación (2.8) no es la longitud real del motor. En los extremos de los núcleos se produce una expansión de las líneas de campo magnético que participa en la producción de par del motor, este efecto se contabiliza mediante un núcleo ficticio de mayor longitud.

$$l_{\delta} \approx l_g + 2 \cdot \delta_g$$

l_g : Longitud geométrica del entrehierro

δ_g : Espesor del entrehierro geométrico

Esta corrección no es de gran importancia por lo que se puede despreciar sin cometer mucho error. No obstante, si el motor está provisto de canales radiales de ventilación el efecto que producen sobre el flujo magnético es más relevante y se ha de considerar. En la zona correspondiente a los canales radiales, el campo magnético se reduce de forma considerable, este efecto equivale a una disminución de la longitud efectiva del entrehierro.

Contabilizando ambos efectos se obtiene una máquina equivalente (mismo flujo magnético a través del entrehierro) sin canales radiales de ventilación ni expansión de las líneas de campo magnético en los extremos y cuya longitud axial es la longitud efectiva del entrehierro l_{δ} . Si solo hay canales radiales en uno de los órganos l_{δ} se obtiene con la siguiente expresión:

$$l_{\delta} \approx l_g + 2 \cdot \delta_g - n_v \cdot l_{ve}$$

En la que n_v es el número de canales radiales y l_{ve} es la longitud efectiva de uno de ellos, se calcula con la siguiente expresión:

$$l_{ve} = l_v \cdot k'$$

La longitud de un canal radial l_v viene afectada por un factor k' inferior a la unidad, de manera que, la longitud efectiva de un canal radial es inferior a la longitud geométrica del mismo. Esto es así dado que se ha considerado que el campo magnético se anula por completo en la región de los canales radiales, por lo que, para que el flujo magnético sea el mismo, su longitud efectiva ha de ser menor.

Dado que el programa no considera la presencia de canales radiales de ventilación se va a asumir que la longitud efectiva y la longitud geométrica del entrehierro son iguales, a pesar de que los motores de gran potencia suelen contar con dichos canales radiales.

$$l_{\delta} \approx l_g$$

En la Tabla 2.1, se resumen los valores de los parámetros necesarios para el cálculo del diámetro interior del estator y la longitud efectiva del entrehierro junto con sus respectivas magnitudes.

Descripción	Variable	Valor
Inducción magnética máxima en el entrehierro (Anexo 1)	B_M (T)	0,8
Densidad lineal de corriente (Anexo 1)	A_r (A/m)	60480
Factor de potencia (Anexo 1)	$\cos \phi_N$	0,9
Esfuerzo tangencial (2.2)	σ_{Ftan} (N/m ²)	30791,4
Par asignado del motor (1.3)	T_N (N·m)	22751,7
Volumen del inducido (2.4)	V_r (m ³)	0,4704
Cociente entre longitud axial del entrehierro y paso polar del estator (Anexo 1)	$\lambda = \frac{l_{\delta}}{\tau_{p1}}$	1,5
Cociente entre longitud axial y diámetro interior del estator (2.6)	$\frac{l_{\delta}}{D_1}$	1,178
Diámetro interior del estator (2.7)	D_1 (m)	0,7364
Longitud axial efectiva del entrehierro (2.8)	l_{δ} (m)	0,8675

Tabla 2.1. Cálculo del diámetro interior del estator y de la longitud efectiva del entrehierro: Magnitudes de los parámetros empleados en el cálculo y dimensiones resultantes.

2.2.2 ESPESOR DEL ENTREHIERRO GEOMÉTRICO

La influencia de este parámetro en el funcionamiento del motor se ha descrito en el Anexo 1. Se ha de escoger un valor de compromiso entre los factores electromagnéticos y mecánicos que intervienen en el diseño del motor. Existen diversas fórmulas empíricas para su determinación que difieren según el autor.

En [4] el espesor del entrehierro depende de la potencia del motor. Según el número de pares de polos que posea el motor se utiliza una expresión u otra. Para motores con más de un par de polos ($p \geq 2$) se utiliza la siguiente ecuación:

$$\delta_g \approx 0,1 + 0,012 \cdot \sqrt[3]{P_N} \quad (2.9)$$

En [6] el espesor del entrehierro también es función de la potencia y el número de pares de polos que posea la máquina. Para motores con más de un par de polos ($p > 1$), se emplea la siguiente ecuación:

$$\delta_g \approx 0,18 + 0,006 \cdot P_N^{0,4} \quad (2.10)$$

En ambas expresiones la potencia del motor P_N se ha de expresar en W, el espesor del entrehierro geométrico viene dado en mm.

En [7] el espesor del entrehierro geométrico en mm se deduce con la ecuación (2.11). Los parámetros D_1 y l_g son el diámetro interior del estator y la longitud axial de la máquina expresadas en m.

$$\delta_g \approx 0,2 + 2 \cdot \sqrt{D_1 \cdot l_g} \quad (2.11)$$

En principio se empleará la ecuación (2.11) para dimensionar el entrehierro.

Descripción	Variable	Valor
Diámetro interior del estator	D_1 (m)	0,7364
Longitud axial geométrica del motor	l_g (m)	0,8675
Espesor del entrehierro geométrico (2.11)	δ_g (mm)	1,8

Tabla 2.2. Cálculo del espesor del entrehierro geométrico: Magnitudes de los parámetros empleados en el cálculo y espesor resultante.

2.2.3 DIÁMETRO EXTERIOR DEL ROTOR

Una vez determinado el diámetro interior del estator y el espesor del entrehierro geométrico es posible definir el diámetro exterior del rotor:

$$D_2 = D_1 - 2 \cdot \delta_g \quad (2.12)$$

D_2 (mm): Diámetro exterior del rotor

Descripción	Variable	Valor
Diámetro interior del estator	D_1 (mm)	736,4
Espesor del entrehierro geométrico	δ_g (mm)	1,8
Diámetro exterior del rotor (2.12)	D_2 (mm)	732,8

Tabla 2.3. Cálculo del diámetro exterior del rotor: Magnitudes empleadas en el cálculo y diámetro resultante.

2.3 DIMENSIONADO DE LOS ARROLLAMIENTOS DEL ESTATOR

2.3.1 CARACTERIZACIÓN DEL DEVANADO

Tipo de devanado

El devanado que se va emplear es **imbricado**. Los devanados imbricados se realizan con bobinas de igual tamaño y forma, pero desfasados entre sí en el espacio. Siempre se ejecutan por polos (el número de grupos polares por fase coincide con el número de polos del motor, $G = 2p$), cada grupo polar se efectúa conectando en serie varias bobinas de una misma fase pertenecientes al mismo polo.

El devanado trifásico se distribuye en las ranuras uniformemente repartidas en la circunferencia interna del núcleo magnético del estator, por lo tanto, las bobinas de una fase pertenecientes a un mismo polo no van a estar sometidas al mismo flujo magnético.

Número de ranuras por polo y fase. Número total de ranuras

El número de ranuras por polo y fase viene dado por la siguiente expresión:

$$q = \frac{K}{2 \cdot p \cdot m} \quad (2.13)$$

q: Nº ranuras/polos/fase

K: Nº total de ranuras

m: Número de fases

Por lo tanto, el número total de ranuras:

$$K = 2 \cdot q \cdot p \cdot m \quad (2.14)$$

En principio se escogerá el número ranuras por polo y fase y posteriormente se deducirán el número total de ranuras. El valor de q se ha fijado de acuerdo a la Documentación de partida (Anexo 1). El devanado es entero, es decir, todos los grupos polares son idénticos y en consecuencia el valor de q ha de ser entero.

Descripción	Variable	Valor
Número de ranuras por polo y fase del estator	q_1	3
Número de fases del estator	m_1	3
Número de pares de polos	p	2
Número total de ranuras del estator (2.14)	K_1	36

Tabla 2.4. Número total de ranuras del estator y magnitudes empleadas en el cálculo.

Paso polar, paso de bobina y paso de ranura

El **paso polar** es la distancia entre dos polos consecutivos, se puede expresar como:

$$\tau_p = \frac{\pi \cdot D}{2p} \quad (2.15)$$

τ_p : Paso polar medido en longitud de arco de circunferencia

$$y_p = \frac{K}{2p} \quad (2.16)$$

y_p : Paso polar medido en número de ranuras

El **paso de bobina** es la distancia que separa los dos lados activos de una bobina. Normalmente se mide en número de ranuras y en tal caso se designa como y_1 . Las bobinas pueden ser de paso diametral si el paso de bobina es igual al paso polar ($y_1 = y_p$), de paso acortado si el paso de bobina es inferior al paso polar ($y_1 < y_p$) y de paso alargado si el paso de bobina es mayor que el paso polar ($y_1 > y_p$).

Tal y como se ha descrito en el Anexo 1, para tratar de mejorar la calidad de la onda de f.e.m., al cancelar de forma considerable las componentes armónicas de la misma, se acostumbra a acortar el paso en una o dos ranuras. En esta ocasión se opta por acortar el paso en una ranura.

$$y_1 = y_p - \text{acortamiento} \quad (2.17)$$

y_1 : N° ranuras/bobina

El **paso de ranura** consiste en la distancia entre ranuras adyacentes. Se define como:

$$\tau_r = \frac{\pi \cdot D}{K} \quad (2.18)$$

τ_r : Paso de ranura medido en longitud de arco de circunferencia

Descripción	Variable	Valor
Diámetro interior del estator	D_1 (mm)	736,4
Número total de ranuras del estator	K_1	36
Paso polar medido en longitud de arco de circunferencia interior del estator (2.15)	τ_{p1} (mm)	587,9
Paso polar del estator medido en número de ranuras (2.16)	y_{p1} (Ranuras/polo)	9
Paso de bobina del estator acortado en 1 ranura (2.17)	y_1 (Ranuras/bobina)	8
Paso de ranura del estator (2.18)	τ_{r1} (mm)	64,26

Tabla 2.5. Cálculo del paso polar, paso de bobina y paso de ranura del estator.

Número de capas

El devanado será de **dobles capas**. En este tipo de configuración en una ranura se insertan dos lados activos correspondientes a dos bobinas distintas formando dos capas, superior e inferior, de conductores separadas por un aislante. Cada bobina tiene dispuesto uno de sus lados activos en la parte inferior de una ranura y el otro en la parte superior de otra ranura.

Número de ramas en paralelo

La conexión de los grupos polares que constituyen una fase puede realizarse en serie o formando a' ramas en paralelo. Si los grupos polares se conectan entre sí formando un determinado número de ramas en paralelo es preciso que todas las ramas de una fase sean idénticas para que se induzca la misma f.e.m. en todas ellas y tengan la misma impedancia. En este diseño se opta por conectar los grupos polares de cada fase en serie ($a_1' = 1$).

Número de bobinas por par de polos y fase

En devanados de doble capa cada ranura alberga dos lados activos con un lado de bobina por capa, por lo tanto:

$$b_1 = 2 \cdot q_1 \quad (2.19)$$

b_1 : Nº bobinas/par de polos/fase del estator

Dado que el valor de q ha de ser entero, también lo ha de ser el número de bobinas por par de polos polo y fase.

Descripción	Variable	Valor
Número de ranuras por polo y fase del estator	q_1	3
Número de bobinas por par de polos y fase del estator (2.19)	b_1	6

Tabla 2.6. Cálculo del número de bobinas por par de polos y fase.

Factor de devanado: Factor de distribución, factor de acortamiento

En el Anexo 1, se explicó el efecto que producía la disposición del devanado en las ranuras sobre el flujo magnético y la f.e.m. inducida. A pesar de que técnicas como la distribución y acortamiento de paso de los devanados lograban un flujo y en consecuencia una f.e.m. más senoidal al cancelarse parcialmente el contenido armónico de la onda de f.m.m., el valor de f.e.m. se reducía levemente en comparación con un devanado concentrado y de paso diametral. Para tener en cuenta dichos efectos se introdujo un factor reductor conocido como **factor de devanado** que engloba a su vez el factor de distribución y acortamiento cuando el devanado es distribuido y de paso acortado:

$$\xi_{b1} = \xi_{d1} \cdot \xi_{a1} \quad (2.20)$$

ξ_{b1} : Factor de devanado del estator

ξ_{d1} : Factor de distribución del estator

ξ_{a1} : Factor de paso o acortamiento del estator

Si el devanado es de paso diametral y concentrado (una ranura por polo y fase, $q = 1$), una f.e.m. de igual dirección y magnitud se induce en todas las espiras pertenecientes a un mismo devanado de fase. Es decir, la f.e.m. en una fase del estator es igual a la suma aritmética de la f.e.m.s inducidas en cada espira conductora, su valor se obtiene con la siguiente expresión:

$$E_1 = (\sqrt{2} \cdot \pi) \cdot N_1 \cdot f_1 \cdot \Phi_M = 4,44 \cdot N_1 \cdot f_1 \cdot \Phi_M \quad (2.21)$$

E_1 (V): Valor eficaz de fuerza electromotriz inducida en una fase del estator

N_1 : Nº espiras por fase de una rama en paralelo del estator

f_1 (Hz): Frecuencia de la red

Φ_M (Wb): Flujo máximo por polo

Si el devanado es distribuido y de paso acortado, la f.e.m. obtenida con la expresión (2.21) ha de ir afectada por el factor de devanado (2.20):

$$E_1 = 4,44 \cdot \xi_{b1} \cdot N_1 \cdot f_1 \cdot \Phi_M \quad (2.22)$$

A continuación, se procede con la deducción del factor de paso o acortamiento y el factor de distribución.

El **factor de distribución** resume la disminución de la f.e.m. ocasionada por la distribución espacial de las bobinas del devanado estartórico. Relaciona el valor de f.e.m. real producido por el devanado distribuido y la f.e.m. teórica que produciría un devanado concentrado.

La distribución de los devanados provoca que las espiras de una fase correspondientes a un mismo polo no estén sometidas a los mismos flujos magnéticos causando un cierto desfase entre los valores instantáneos de la f.e.m. en las espiras de distintas ranuras. Por lo tanto, la f.e.m. de una fase resulta de la suma vectorial o fasorial, y no aritmética, de las f.e.m.s inducidas en cada bobina (Figura 2.1).

El ángulo geométrico γ entre dos ranuras consecutivas se define como:

$$\gamma = \frac{360^\circ}{K} \tag{2.23}$$

Al que le corresponde un ángulo eléctrico: $p \cdot \gamma$

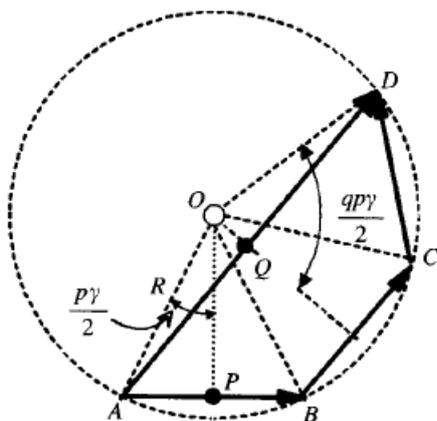


Figura 2.1. Composición fasorial de f.e.m.s. de un devanado distribuido Fuente: [1].

El número de bobinas resultantes, si el devanado es de una capa, es igual a q , y las f.e.m.s inducidas en cada bobina vienen representadas por los vectores de igual módulo según se indica en la Figura 2.1¹²:

$$E_{\text{bobina}} = |AB| = |BC| = |CD|$$

La f.e.m. resultante de los tres devanados corresponde según el diagrama fasorial a:

$$E_f = |AD| = 2 |QD| = 2 \cdot R \cdot \text{sen}\left(\frac{q \cdot p \cdot \gamma}{2}\right)$$

Si se tratase de un devanado concentrado la f.e.m. sería:

$$E_t = q \cdot E_{\text{bobina}} = q \cdot |AB| = 2 \cdot q \cdot |AP| = 2 \cdot q \cdot R \cdot \text{sen}\left(\frac{p \cdot \gamma}{2}\right)$$

El factor de distribución, tal y como se había mencionado previamente, se define como el cociente entre la f.e.m. real resultante del devanado distribuido, y la f.e.m. teórica resultante si el devanado fuese concentrado:

¹² El diagrama fasorial de la Figura 2.1 corresponde a un devanado de 3 bobinas/fase.

$$\xi_{d1} = \frac{E_f}{E_t} = \frac{\text{sen}\left(\frac{q \cdot p \cdot \gamma}{2}\right)}{q \cdot \text{sen}\left(\frac{p \cdot \gamma}{2}\right)} \quad (2.24)$$

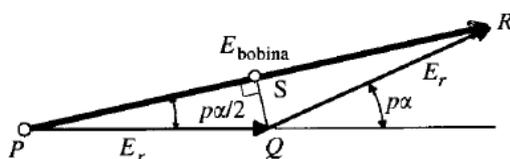
De este modo es posible deducir la f.e.m. inducida en un devanado distribuido mediante la expresión (2.21) multiplicando esta por el factor de distribución.

La expresión (2.24) es dada para el armónico fundamental ($v = 1$), para cualquier armónico de orden v se tiene:

$$\xi_{dv} = \frac{\text{sen}\left(v \cdot \frac{q \cdot p \cdot \gamma}{2}\right)}{q \cdot \text{sen}\left(v \cdot \frac{p \cdot \gamma}{2}\right)} \quad (2.25)$$

El **factor de acortamiento** o **factor de paso** contabiliza la reducción en el valor de f.e.m. provocada por el acortamiento en el paso de bobina, que es realizado con el fin de atenuar el contenido armónico de la onda. Este coeficiente relaciona la f.e.m. producida por un devanado de paso acortado y la f.e.m. ficticia que produciría un devanado de paso diametral. También se puede entender como el cociente entre la suma vectorial y la suma aritmética de f.e.m.s elementales.

Si el paso de bobina no es diametral (abarca un arco polar inferior a 180° correspondientes a un paso polar expresado en grados eléctricos) se produce un desfase entre las f.e.m. de ambos lados de la bobina que causa una reducción de la f.e.m. resultante. Si el acortamiento expresado en grados eléctricos es β ($\beta = p \cdot \alpha$ en la Figura 2.2) este desfase se refleja en las f.e.m. en serie de los dos lados de la bobina.



En la Figura 2.2 se ha designado E_r a la f.e.m. inducida en cada lado de la bobina, y E_{bobina} a la f.e.m. resultante de la composición vectorial de f.e.m.s inducidas en cada rama:

Figura 2.2. Diagrama fasorial de f.e.m.s de un devanado de paso acortado.

$$E_{bobina} = |PR| = 2 |PS| = 2 \cdot E_r \cdot \cos \frac{\beta}{2}$$

Fuente: [1].

Si la bobina fuese de paso diametral la f.e.m. teórica resultante en la misma se obtendría como suma aritmética de las f.e.m.s inducidas en cada rama:

$$E_t = 2 \cdot E_r$$

En consecuencia, el factor de paso o acortamiento, cociente entre la f.e.m. real producida por un devanado de paso acortado (suma vectorial de f.e.m.s) y la f.e.m. teórica que originaría un devanado de paso diametral (suma aritmética de f.e.m.s) para el armónico fundamental es:

$$\xi_{a1} = \frac{E_{bobina}}{E_t} = \cos \frac{\beta}{2} \tag{2.26}$$

Para cualquier orden armónico el desfase pasa a ser $v \cdot \beta$, y el factor de paso se calcula como:

$$\xi_{av} = \cos \left(v \cdot \frac{\beta}{2} \right) \tag{2.27}$$

El ángulo de acortamiento β expresado en grados eléctricos viene dado por la siguiente expresión:

$$\beta = (y_p - y_1) \cdot \frac{180^\circ}{y_p} = \left(1 - \frac{y_1}{y_p} \right) \cdot 180^\circ = \text{acortamiento} \cdot \frac{180^\circ}{y_p} \tag{2.28}$$

$y_p - y_1 =$ acortamiento de paso medido en ranuras

$\frac{y_1}{y_p}$: Paso relativo

De nuevo, se puede emplear la ecuación (2.21) para calcular la f.e.m. inducida en un devanado de paso acortado sin más que aplicar el factor de acortamiento a dicha expresión.

La Tabla 2.7 resume el cálculo de todos los factores: ξ_d, ξ_a, ξ_b .

K_1		q_1		y_1 / y_p	
36		3		8 / 9	
Orden armónico v	$v \cdot \gamma$ Grados geométricos (2.23)	ξ_{dv} Factor de distribución (2.25)	$v \cdot \beta$ Grados eléctricos (2.28)	ξ_{av} Factor de acortamiento (2.27)	ξ_{bv} Factor de devanado (2.20)
1	10°	0,96	20°	0,985	0,946
5	50°	0,218	100°	0,643	0,14
7	70°	- 0,177	140°	0,342	- 0,06

Tabla 2.7. Cálculo del factor de devanado, factor de acortamiento y factor de distribución del estator para los órdenes armónicos: $v = 1, 5, 7$.

Reparando en el factor de devanado del orden armónico fundamental, y del 5º y 7º armónico en la Tabla 2.7, se comprueba cómo, a través del acortamiento y distribución de las bobinas en las ranuras del estator, se logra reducir ostensiblemente el valor de dichos armónicos sin apenas variar la componente fundamental de la f.e.m., que se ve reducida en un 5% aproximadamente.

2.3.2 NÚMERO DE ESPIRAS Y FLUJO POR POLO

La expresión de f.e.m. inducida en una fase del estator ya se indicó previamente (2.22), en condiciones asignadas:

$$E_{1N} = 4,44 \cdot \xi_{b1} \cdot N_1 \cdot f_1 \cdot \phi_M \quad (2.29)$$

E_{1N} (V): Valor eficaz de f.e.m. inducida en una fase del estator en condiciones asignadas

En consecuencia, el **número de espiras efectivas en serie de una fase** del estator o lo que es lo mismo número de espiras de cada rama en paralelo de una fase del estator necesarias para inducir la f.e.m. E_{1N} será:

$$N_1 = \frac{E_{1N}}{4,44 \cdot \xi_{b1} \cdot f_1 \cdot \phi_M} \quad (2.30)$$

Para obtener su valor se ha de calcular E_{1N} y el flujo por polo ϕ_M .

Se partirá de un valor estimado de f.e.m. inducida en una fase del estator en condiciones asignadas mediante la siguiente relación:

$$K_E = \frac{E_{1N}}{V_{1N}} \approx 0,98 - 0,005 \cdot p \quad (2.31)$$

V_{1N} (V): Tensión asignada de una fase del estator

p: Número de pares de polos

$$E_{1N} = K_E \cdot V_{1N} \quad (2.32)$$

El **flujo por polo** viene dado por la siguiente expresión:

$$\phi_M = \frac{l_\delta \cdot D_1}{p} \cdot B_M \quad (2.33)$$

Según se ha indicado anteriormente, para estimar el valor inicial de flujo por polo se partirá del valor de inducción magnética máxima en el entrehierro B_M considerado al inicio.

Una vez se ha obtenido el número de espiras efectivas en serie de una fase, es posible obtener el **número total de espiras de una fase** del estator según se indica a continuación:

$$N_{f1} = a'_1 \cdot N_1 \quad (2.34)$$

N_{f1} : Número de espiras totales de una fase del estator

a'_1 : Número de ramas en paralelo de una fase del estator

N_1 : Número de espiras de una rama en paralelo de una fase del estator

El **número de espiras que conforman una bobina** simple se obtiene con la siguiente expresión:

$$N_{r1} = \frac{N_{f1}}{p \cdot b_1} \quad (2.35)$$

N_{r1} : Número de espiras de una bobina simple del estator

b_1 : N° bobinas/par de polos/fase del estator

$p \cdot b_1$: N° bobinas por fase del estator

Conforme a lo indicado previamente, el número de bobinas por par de polos y fase (2.19) ha de ser entero, y en consecuencia el número de espiras de una bobina también.

El **número de conductores por ranura**, teniendo en cuenta que el devanado empleado es de doble capa y que por tanto cada ranura alberga dos lados activos pertenecientes a dos bobinas distintas formadas por N_{r1} espiras cada una se tiene:

$$Z_{K1} = 2 \cdot N_{r1} \quad (2.36)$$

Z_{K1} : Número de conductores por ranura del estator

El número de conductores por ranura ha de ser un valor entero y por tratarse de un devanado de doble capa ha de ser divisible por dos.

Valores provisionales

En primer lugar, se hará una estimación del valor de flujo por polo, número de espiras por fase, número de espiras por bobina y del número de conductores por ranura:

Descripción	Variable	Valor
Longitud axial del entrehierro	l_{δ} (m)	0,8675
Diámetro interior del estator	D_1 (m)	0,7364
Número de pares de polos	p	2
Inducción magnética máxima en el entrehierro	B_M (T)	0,8
Flujo por polo (2.33)	ϕ_M (Wb)	0,2555
Relación E_{1N} / V_{1N} (2.31)	K_E	0,97
Tensión asignada de una fase del estator	V_{1N} (V)	2309
F.e.m. en una fase del estator en condiciones asignadas (2.32)	E_{1N} (V)	2240
Factor de devanado	ξ_{bv}	0,946
Frecuencia de la red	f_1 (Hz)	50
Número de espiras efectivas en serie de una fase (2.30)	N_1	41,78
Número de ramas en paralelo de una fase del estator	a'_1	1
Número total de espiras de una fase del estator (2.34)	N_{f1}	41,78
Número de bobinas por par de polos y fase del estator	b_1	6
Número de espiras de una bobina simple del estator (2.35)	N_{r1}	3,48
Número de conductores por ranura del estator (2.36)	Z_{K1}	6,96

Tabla 2.8. Valores provisionales de ϕ_M , B_M , N_1 , N_{f1} , N_{r1} y Z_{K1} .

Valores definitivos

El número de espiras por bobina obtenido en el cálculo se ha de aproximar a un valor entero adecuado. Teniendo en cuenta que, para una f.e.m. en el estator dada, el flujo por polo es inversamente proporcional al número de espiras (2.30), y que, a su vez, es directamente proporcional a la inducción magnética máxima en el entrehierro (2.33), el número de espiras ha de ser tal que no cause un aumento excesivo del flujo por polo y en consecuencia de la inducción magnética en el entrehierro por encima de los valores recomendados, que podrían causar la saturación de los núcleos y un incremento de las pérdidas magnéticas.

Por lo tanto, se opta por redondear el número de espiras por bobina a un valor entero inmediatamente superior al obtenido provisionalmente, con el fin de garantizar que la inducción magnética en el entrehierro no sea excesiva.

Al modificar el número de espiras de una bobina N_{r1} es preciso recalcular todos los parámetros involucrados:

Para el cálculo del número de conductores por ranura del estator Z_{K1} se empleará la misma expresión de antes (2.36) utilizando el número de espiras por bobina ajustado.

El número de espiras totales por ranura N_{f1} resulta del producto del número de espiras por bobina por el número de bobinas por fase del estator ($p \cdot b_1$):

$$N_{f1} = N_{r1} \cdot p \cdot b_1 \quad (2.37)$$

Por lo tanto, el número de espiras efectivas en serie de una fase del estator (número de espiras de una rama en paralelo por fase del estator):

$$N_1 = \frac{N_{f1}}{a'_1} \quad (2.38)$$

El valor de flujo por polo definitivo, tras el ajuste del número de espiras resulta:

$$\Phi_M = \frac{E_{1N}}{4,44 \cdot \xi_{b1} \cdot f_1 \cdot N_1} \quad (2.39)$$

Y por último la inducción magnética en el entrehierro ajustada resulta:

$$B_M = \frac{p}{l_\delta \cdot D_1} \cdot \Phi_M \quad (2.40)$$

La Tabla 2.9 resume los valores finalmente adoptados tras el ajuste del número de espiras por bobina redondeado a un valor entero de 4 espiras/bobina. Se comprueba que la inducción magnética máxima en el entrehierro se reduce a un valor razonable ($B_M = 0,7 \text{ T}$).

Descripción	Variable	Valor
Número de espiras de una bobina simple del estator (ajustado)	N_{r1}	4
Número de conductores por ranura del estator (2.36)	Z_{k1}	8
Número de pares de polos	p	2
Número de bobinas por par de polos y fase del estator	b_1	6
Número total de espiras de una fase del estator (2.37)	N_{f1}	48
Número de ramas en paralelo de una fase del estator	a'_1	1
Número de espiras efectivas en serie de una fase (2.38)	N_1	48
F.e.m. en una fase del estator en condiciones asignadas	E_{1N} (V)	2240
Factor de devanado	ξ_{bv}	0,946
Frecuencia de la red	f_1 (Hz)	50
Flujo por polo (2.39)	ϕ_M (Wb)	0,2224
Longitud axial del entrehierro	l_δ (m)	0,8675
Diámetro interior del estator	D_1 (m)	0,7364
Inducción magnética máxima en el entrehierro (2.40)	B_M (T)	0,7

Tabla 2.9. Valores definitivos de ϕ_M , B_M , N_1 , N_{f1} , N_{r1} y Z_{k1} .

2.3.3 DIMENSIONADO DE LOS CONDUCTORES

Sección de un conductor

La sección transversal de un conductor del estator resulta del cociente entre la intensidad asignada que circula por cada conductor y la densidad de corriente en el mismo:

$$S_{c1} = \frac{I_{r1N}}{J_1} \quad (2.41)$$

S_{c1} (mm²): Sección transversal de un conductor del estator

I_{r1N} (A): Corriente asignada de una rama en paralelo de una fase del estator

J_1 (A/mm²): Densidad de corriente en un conductor del estator

La intensidad que circula por cada conductor es igual a la corriente asignada de una rama en paralelo por fase del estator. La intensidad asignada de una fase del estator I_{1N} se reparte uniformemente por las a_1' ramas en paralelo que constituyen la fase del devanado del estator, por lo tanto, la corriente asignada que circula por cada rama en paralelo y en consecuencia por los conductores que integran dicha rama:

$$I_{r1N} = \frac{I_{1N}}{a_1'} \quad (2.42)$$

La intensidad asignada de una fase del estator (1.5) se obtuvo anteriormente (Tabla 1.4). El valor de densidad de corriente en el conductor del estator se ha establecido conforme a las recomendaciones (Anexo 1).

I_{1N} (A)	a_1'	I_{r1N} (A)	J_1 (A/mm ²)	S_{c1} (mm ²)
587	1	587	3,6	163

Tabla 2.10. Cálculo de la intensidad asignada que circula por un conductor del estator y su sección transversal.

Geometría y dimensiones del conductor

Se pueden emplear conductores circulares o rectangulares cuyas secciones y dimensiones se encuentran normalizadas.

Consultando las secciones normalizadas de conductores circulares, se comprueba que el área obtenida en los cálculos supera con creces la sección normalizada más elevada, en consecuencia, sería preciso emplear un conjunto de varios conductores circulares conectados en paralelo. No obstante, esta opción queda descartada dado que se optó por conectar todas las bobinas en serie.

Asimismo, en motores de gran potencia se acostumbra a emplear conductores de sección rectangular, dado que las exigencias de aislamiento son mayores y los conductores rectangulares mejoran el factor de ocupación de ranura (mayor fracción de cobre en la ranura).

Se decide finalmente utilizar conductores de sección rectangular. Según se ha indicado en el algoritmo de cálculo, para orientar la elección de las dimensiones del conductor, se partirá de los valores entre los que se ha de encontrar el ancho de ranura del estator en base a las

recomendaciones, de tal forma que es posible obtener el rango de valores entre los que se ha de encontrar el ancho de los conductores, si se descuenta el espesor del aislamiento al ancho de ranura.

En [4] se recomienda que la anchura de las ranuras del estator esté comprendida entre los valores dados por la siguiente expresión:

$$b_{s1} = \tau_{r1} \cdot (0,36 \div 0,5) \tag{2.43}$$

b_{s1} (mm): Ancho de ranura del estator

τ_{r1} (mm): Paso de ranura del estator

Por lo tanto, la anchura del conductor se obtiene descontando al ancho de ranura el espacio destinado al aislamiento:

$$a_{c1} = b_{s1} - b_{ins1} \tag{2.44}$$

a_{c1} (mm): Ancho de un conductor del estator

b_{ins1} (mm): Espesor de la capa aislante lateral total del estator

Es preciso definir las distintas capas que componen el aislamiento tanto del conductor como de la pared de bobina, en el Anexo 1 se detallan los criterios a tener en cuenta en la elección del material aislante empleado y los espesores de las distintas capas.

A continuación, se detallan las distintas capas aislantes con sus respectivos espesores:

Capa	Espesor/capa (mm)	Espesor (mm)	
		Tangencial	Radial
Aislamiento del conductor	0,15	2 capas · 0,15 · 1 conductor = 0,3	2 capas · 0,15 · 8 conductores = 2,4
Aislamiento de pared de bobina	1	2 capas · 1 = 2	2 capas · 1 = 2
Aislamiento entre 2 bobinas	1,5	-	1,5
Altura dedicada a cuña de cierre	14	-	14
Espesor Total (mm)		$b_{ins} = 2,3$	$h_{ins} = 19,9$

Tabla 2.11. Capas de aislamiento del estator y sus respectivos espesores.

El espesor del aislamiento de pared de bobina se ha de adoptar teniendo en cuenta que en el caso de que la ranura sea abierta, JMAG-Express Public considera que el aislamiento lo componen dos piezas en U enfrentadas, por lo tanto, el ancho del conjunto estará compuesto por cuatro capas elementales, dos a cada lado, y el alto por otras dos capas, una en la parte superior y otra en la parte inferior de la ranura. Se ha de indicar al programa, el espesor de la pieza aislante: 0,5 mm/pieza.

Conocida el área del conductor y los valores entre los que ha de estar comprendido el ancho del mismo, es posible deducir el intervalo de posibles valores que puede tomar la altura del conductor:

$$S_{c1} = a_{c1} \cdot b_{c1} \quad (2.45)$$

b_{c1} (mm): Altura de un conductor del estator

$$b_{c1} = \frac{S_{c1}}{a_{c1}} \quad (2.46)$$

A continuación, se relacionan los intervalos de valores que puede tomar el ancho de ranura, y la altura y el ancho del conductor conforme a las recomendaciones:

Descripción	Variable	Valor
Paso de ranura del estator	τ_{r1} (mm)	64,26
Ancho de ranura del estator (2.43)	b_{s1} (mm)	(23,13 ÷ 32,13)
Espesor del aislamiento (Tabla 2.11)	b_{ins} (mm)	2,3
Ancho del conductor del estator (2.44)	a_{c1} (mm)	(20,83 ÷ 29,83)
Sección de un conductor	S_{c1} (mm ²)	163
Altura del conductor del estator (2.46)	b_{c1} (mm)	(7,83 ÷ 5,47)

Tabla 2.12. Intervalo de valores recomendado del ancho de ranura, y de las dimensiones del conductor del estator.

Tras obtener los posibles valores que puede tomar el ancho y el alto del conductor, se consultan las dimensiones y áreas normalizadas, y se escoge un conductor rectangular normalizado cuya sección se aproxime al área obtenida en los cálculos. Para verificar que con la nueva sección adoptada la densidad de corriente en el conductor se conserva de forma aproximada se vuelve a calcular su valor:

$$J_1 = \frac{I_{r1N}}{S_{c1}} \quad (2.47)$$

Se resumen a continuación las dimensiones, sección y densidad de corriente del conductor definitivos.

a_{c1} (mm)	b_{c1} (mm)	S_{c1} (mm ²)	I_{r1N} (A)	J_1 (A/mm ²)
22	7,5	164 ¹³	587	3,58

Tabla 2.13. Valores normalizados de las dimensiones y de la sección del conductor. Cálculo de la densidad de corriente en el conductor con la sección normalizada.

Se comprueba que la densidad de corriente en el conductor apenas ha variado respecto al valor establecido inicialmente.

2.4 DIMENSIONADO DEL NÚCLEO DEL ESTATOR

2.4.1 LONGITUD ÚTIL DEL HIERRO

Para realizar el estudio de los efectos magnéticos que acontecen en los núcleos del rotor y el estator es preciso emplear la longitud magnética de estos en lugar de su longitud axial geométrica o longitud total obtenida previamente. Esto es así por dos motivos:

Los núcleos magnéticos no constituyen un bloque macizo de acero, si no que se conforman apilando chapas magnéticas de delgado espesor aisladas entre sí mediante un recubrimiento dieléctrico, en consecuencia, una fracción de la longitud total de la máquina es material no magnético. Este efecto se contabiliza mediante el factor de ocupación del hierro o factor de empilado, para chapas de 0,5 mm de espesor: $K_{Fe} = 0,96 \div 0,98$, los fabricantes suelen facilitar su valor.

$$l_{Fe1} = K_{Fe1} \cdot l_g \quad (2.48)$$

l_{Fe1} (mm): Longitud axial útil del hierro del estator

K_{Fe1} : Factor de empilado del estator

l_g (mm): Longitud axial geométrica del estator

¹³ Área del conductor considerando la reducción debida al redondeo de los bordes

Si también se emplean canales radiales de ventilación, el núcleo del estator se divide en conjuntos elementales de chapas separados una longitud l_{v1} para conformar los n_{v1} conductos de ventilación, el espacio comprendido entre los bloques elementales de chapas es aire y no posee operatividad magnética. Por lo tanto, considerando el apilamiento y la presencia de canales radiales de ventilación se tiene:

$$l_{Fe1} = K_{Fe1} \cdot [l_g - (n_{v1} \cdot l_{v1})] \quad (2.49)$$

n_{v1} : Número de canales radiales de ventilación del estator

l_{v1} (mm): Longitud de un canal radial de ventilación del estator

Dado que el diseño del motor carece de canales radiales de ventilación, la longitud útil del hierro del estator se obtendrá con la ecuación (2.48). El factor de empilado es extraído del catálogo de chapas magnéticas ofertado por el fabricante (Anexo 1).

l_g (m)	K_{Fe1}	l_{Fe1} (m)
0,8675	0,97	0,8415

Tabla 2.14. Cálculo de la longitud útil del hierro del estator

2.4.2 ALTURA DEL YUGO

El flujo que penetra el entrehierro y la sección de los dientes, se reparte por igual en los yugos del estator y del rotor, por lo tanto, el flujo magnético máximo en el yugo del estator será:

$$\phi_{y1M} = \frac{\phi_M}{2} \quad (2.50)$$

ϕ_M (Wb): Flujo máximo por polo

ϕ_{y1M} (Wb): Flujo máximo en el yugo del estator

La inducción magnética máxima en el yugo del estator resulta del cociente entre el flujo magnético máximo en el yugo del estator y la sección transversal S_{y1} del mismo:

$$B_{y1M} = \frac{\phi_{y1M}}{S_{y1}} = \frac{\phi_{y1M}}{l_{Fe1} \cdot h_{y1}} \quad (2.51)$$

B_{y1M} (T): Inducción magnética máxima en el yugo del estator

h_{y1} (m): Altura del yugo del estator

En el Anexo 1 se especificó el intervalo de valores entre los que ha de estar comprendida la inducción magnética máxima del yugo del estator. La altura del yugo del estator se ha de dimensionar teniendo en cuenta que la densidad de flujo en el mismo debe estar comprendido entre los valores recomendados. Despejando la altura del yugo del estator de la ecuación (2.51):

$$h_{y1} = \frac{\phi_{y1M}}{l_{Fe1} \cdot B_{y1M}} \quad (2.52)$$

La Tabla 2.15 resumen los valores de los parámetros involucrados en el cálculo de la altura del yugo del estator:

ϕ_M (Wb)	ϕ_{y1M} (Wb)	B_{y1M} (T)	l_{Fe1} (m)	h_{y1} (m)
0,2224	0,1112	1,45 ¹⁴	0,8415	0,091

Tabla 2.15. Cálculo de la altura del yugo del estator.

2.4.3 DIMENSIONES DE LAS RANURAS Y DIENTES

Geometría de las ranuras y dientes

Según se ha indicado anteriormente, en motores de inducción de alta tensión se emplean devanados preformados tipo diamante que exigen ranuras abiertas para permitir su inserción en las mismas. La geometría de las ranuras adoptada es rectangular y en consecuencia da lugar a dientes trapeciales.

El Anexo 1 resume ciertas recomendaciones de diseño en relación a la proporción que deben guardar las dimensiones de las ranuras del estator. En [4] se recomienda que $h_{s1}/b_{s1} = (3 - 6)$, en [7] $h_{s1}/b_{s1} = (2 - 5)$.

La anchura mínima del diente [4] queda delimitada, por factores tecnológicos, a un valor de 3,5 mm según se ha indicado en el Anexo1.

¹⁴ El valor de inducción magnética máxima en el entrehierro se ha seleccionado conforme a las recomendaciones (Anexo 1).

Cálculo de la anchura máxima de ranura y mínima del diente

El ancho de los dientes del estator ha de ser tal que a $\frac{1}{3}$ de la altura del diente la densidad de flujo magnético no exceda los valores de inducción magnética máxima en el diente establecidos conforme a las recomendaciones (Anexo 1): $B_{t1}|_{1/3} < B_{t1M}$.

El diámetro correspondiente a $\frac{1}{3}$ de la altura del diente viene dado por la siguiente expresión:

$$d_{1/3} = D_1 + \frac{2}{3} \cdot h_{t1} = D_1 + \frac{2}{3} \cdot h_{s1} \quad (2.53)$$

$d_{1/3}$ (mm): Diámetro correspondiente a $\frac{1}{3}$ de la altura del diente del estator

h_{t1} (mm): Altura del diente del estator

h_{s1} (mm): Altura de la ranura del estator

D_1 (mm): Diámetro interior del estator

El flujo en el entrehierro ϕ (Wb) abarcado por un paso de ranura del estator:

$$\phi = l_{\delta} \cdot \tau_{r1} \cdot B_{\delta}$$

l_{δ} (m): Longitud axial efectiva del entrehierro

τ_{r1} (m): Paso de ranura medido en longitud de arco de circunferencia del estator

B_{δ} (T): Inducción magnética en el entrehierro

Si se asume que los dientes carecen de saturación magnética, el flujo magnético comprendido en un paso de ranura fluye esencialmente por los dientes, y no por las ranuras ni el aislamiento del estator. En consecuencia, el flujo magnético que atraviesa el entrehierro se concentra en los dientes del estator de sección transversal $l_{Fe1} \cdot b_{t1}$:

$$\phi = l_{Fe1} \cdot b_{t1} \cdot B_{t1}$$

b_{t1} (mm): Ancho del diente del estator

B_{t1} (T): Inducción magnética en los dientes del estator

Por lo tanto, igualando ambas expresiones se tiene:

$$l_{\delta} \cdot \tau_{r1} \cdot B_{\delta} = l_{Fe1} \cdot b_{t1} \cdot B_{t1}$$

La longitud útil del hierro del estator l_{Fe1} se obtiene mediante la expresión (2.48) al carecer el motor de canales radiales de ventilación, asimismo, en apartados anteriores se concluyó que $l_g \approx l_\delta$ por el mismo motivo. Operando y sustituyendo se tiene:

$$\frac{b_{t1}}{\tau_{r1}} = \frac{B_\delta}{B_{t1}} \cdot \frac{l_\delta}{l_{Fe1}} = \frac{B_\delta}{B_{t1}} \cdot \frac{l_\delta}{K_{Fe1} \cdot l_\delta} = \frac{B_\delta}{B_{t1}} \cdot \frac{1}{K_{Fe1}} \quad (2.54)$$

En condiciones de flujo máximo en el entrehierro, se ha de cumplir que $B_{t1} \leq B_{t1M}$, por consiguiente, la relación entre el ancho del diente y el paso de ranura ha de verificar:

$$\frac{b_{t1}}{\tau_{r1}} \geq \frac{B_M}{B_{t1M}} \cdot \frac{1}{K_{Fe1}} \quad (2.55)$$

B_M (T): Inducción magnética máxima en el entrehierro

B_{t1M} (T): Inducción magnética máxima en los dientes del estator

El paso de ranura del estator resulta de la suma del ancho del diente y del ancho de la ranura:

$$\tau_{r1} = b_{t1} + b_{s1} \quad (2.56)$$

Para obtener la relación entre el ancho de ranura y el paso de ranura del estator en función de la desigualdad (2.55) se divide (2.56) por el paso de ranura, despejando se tiene:

$$\frac{b_{s1}}{\tau_{r1}} \leq 1 - \frac{b_{t1}}{\tau_{r1}} \quad (2.57)$$

Las expresiones anteriores (2.55) (2.57) se han de particularizar para el paso de ranura expresado como longitud de arco de circunferencia del diámetro correspondiente a $\frac{1}{3}$ de la altura del diente (2.53) para de este modo estimar los valores de anchura máxima de ranura y mínima del diente que garantizan que la inducción magnética en los dientes no sobrepase los valores recomendados.

$$\tau_{r1}^{1/3} = \frac{\pi \cdot d_{1/3}}{K_1} \quad (2.58)$$

Dado que por el momento se desconoce la altura de las ranuras y, por ende, de los dientes, se expresará el paso de ranura como longitud de arco de circunferencia del diámetro interior del estator. Más adelante cuando se obtenga la altura de las ranuras se comprobará si la inducción magnética a $\frac{1}{3}$ de la altura del diente es inferior a la inducción magnética máxima establecida.

Descripción	Variable	Valor
Inducción magnética máxima en el entrehierro	B_M (T)	0,7
Inducción magnética máxima en los dientes del estator	B_{t1M} (T)	1,65
Factor de empilado del estator	K_{Fe1}	0,97
Relación entre el ancho del diente y el paso de ranura del estator (2.55)	$\frac{b_{t1}}{\tau_{r1}} \geq$	0,435
Relación entre el ancho de ranura y el paso de ranura del estator (2.57)	$\frac{b_{s1}}{\tau_{r1}} \leq$	0,565
Paso de ranura del estator (Tabla 2.5)	τ_{r1} (mm)	64,26
Ancho del diente del estator	b_{t1} (mm) \geq	27,96
Ancho de ranura del estator	b_{s1} (mm) \leq	36,3

Tabla 2.16. Cálculo de la anchura máxima de las ranuras y mínima de los dientes del estator.

Dimensiones definitivas de las ranuras del estator

En apartados anteriores se definió el ancho de los conductores a_{c1} y espesor de las capas de aislante que recubren a los conductores y a las paredes de la ranura b_{ins1} , por lo tanto, la anchura mínima que han de poseer las ranuras del estator:

$$b_{s1min} = a_{c1} + b_{ins1} \quad (2.59)$$

Del mismo modo la altura mínima de ranura:

$$h_{s1min} = Z_{K1} \cdot b_{c1} + h_{ins1} \quad (2.60)$$

Conforme a lo indicado en el algoritmo de cálculo, para deducir la altura de las ranuras, se hará uso de la expresión utilizada por JMAG-Express Public para el cálculo del factor de ocupación de ranura o factor de llenado de ranura según se indica a continuación:

$$K_{Cu1} = \frac{S_{c1ins} \cdot Z_{K1}}{S_{su1}} \quad (2.61)$$

K_{Cu1} : Factor de ocupación de ranura del estator

Z_{K1} : Número de conductores por ranura del estator

S_{c1ins} (mm²): Sección transversal de un conductor del estator incluyendo recubrimiento aislante

S_{su1} (mm²): Área útil de la ranura del estator

En el cálculo de K_{Cu1} , no se ha considerado el redondeo de las aristas de los conductores y las ranuras en consecuencia el factor de llenado deducido por el programa será algo superior.

La sección transversal de un conductor del estator incluyendo el espesor de la capa aislante del conductor viene dado por la siguiente expresión:

$$S_{c1ins} = (a_{c1} + 2 \cdot e_{ins_c1}) \cdot (b_{c1} + 2 \cdot e_{ins_c1}) \quad (2.62)$$

a_{c1} (mm): Ancho de un conductor del estator

b_{c1} (mm): Altura de un conductor del estator

e_{ins_c1} (mm): Espesor de la capa aislante del conductor del estator

El área útil de ranura corresponde al área disponible en la ranura dedicada a contener los conductores, se obtiene sustrayendo a la sección transversal total el espacio destinado al aislamiento de pared de ranura y a la cuña y cierre de ranura. En apartados anteriores se dijo que el espesor de la capa aislante de ranura se ha de descomponer a su vez en capas elementales de espesor e_{ins_s1} correspondiente a una de las dos piezas aislantes en U enfrentadas que componen el aislamiento de pared de ranura del estator, por lo tanto, el aislamiento lateral está compuesto de 4 capas y el vertical de 2 capas:

$$S_{su1} = (b_{s1} - 4 \cdot e_{ins_s1}) \cdot (h_{su1} - 2 \cdot e_{ins_s1}) \quad (2.63)$$

b_{s1} (mm): Ancho de la ranura del estator

h_{su1} (mm): Altura útil de la ranura del estator

e_{ins_s1} (mm): Espesor de la pieza aislante en U de pared de ranura del estator

La altura útil de ranura del estator corresponde a la altura total descontando la profundidad de la boca de ranura en la que se inserta la cuña de cierre:

$$h_{su1} = h_{s1} - h_{o1}$$

h_{s1} (mm): Altura de la ranura del estator

h_{o1} (mm): Profundidad de la boca de ranura del estator

Operando se tiene:

$$h_{su1} = \frac{S_{c1ins} \cdot Z_{K1}}{K_{Cu1} \cdot (b_{s1} - 4 \cdot e_{ins_s1})} + 2 \cdot e_{ins_s1} \quad (2.64)$$

$$h_{s1} = h_{su1} + h_{o1} \quad (2.65)$$

Para el cálculo de la altura total y la altura útil de ranura se hará uso del ancho mínimo del conductor adoptando un valor ligeramente superior para permitir la correcta inserción de los devanados sin que se produzcan daños en el aislamiento, se considerará el factor de llenado de ranura que el programa asigna por defecto, los espesores de las distintas capas aislantes y las dimensiones del conductor se fijaron anteriormente, la profundidad de la boca de ranura se ha establecido en base a la propuesta de diseño emitida por JMAG-Express Public:

Descripción	Variable	Valor
Ancho del conductor del estator (Tabla 2.13)	a_{c1} (mm)	22
Espesor lateral total del aislamiento (Tabla 2.11)	b_{ins1} (mm)	2,3
Ancho mínimo de ranura del estator (2.59)	b_{s1min} (mm)	24,3
Ancho de ranura del estator	b_{s1} (mm)	27
Nº de conductores por ranura del estator (Tabla 2.9)	Z_{K1}	8
Altura del conductor del estator (Tabla 2.13)	b_{c1} (mm)	7,5
Espesor radial total del aislamiento (Tabla 2.11)	h_{ins1} (mm)	18,9 ¹⁵
Altura mínima de ranura del estator (2.60)	h_{s1min} (mm)	78,9
Espesor de la capa de aislante del conductor del estator (Tabla 2.11)	e_{ins_c1} (mm)	0,15
Sección de un conductor del estator incluyendo recubrimiento aislante (2.62)	S_{c1ins} (mm ²)	173,94
Espesor de la pieza aislante en U del estator	e_{ins_s1} (mm)	0,5
Factor de llenado de ranura del estator	K_{Cu1}	0,75
Altura útil de la ranura del estator (2.64)	h_{su1} (mm)	75,214
Profundidad de la boca de ranura del estator	h_{o1} (mm)	14
Altura de la ranura del estator (2.65)	h_{s1} (mm)	89,214
Relación entre el alto y el ancho de ranura	h_{s1} / b_{s1}	3,3

Tabla 2.17. Cálculo de las dimensiones y de los valores mínimos del ancho y el alto de ranura.

¹⁵ Considerando que el aislamiento de ranura está compuesto por una capa en la parte superior y otra en la parte inferior de la ranura correspondientes a cada una de las piezas aislantes en U de 0,5 mm de espesor.

Se comprueba que la altura de la ranura es superior al valor mínimo, y que la relación entre el alto y el ancho de ranura, está comprendido en el intervalo de valores recomendado.

El paso de ranura del estator resulta de la suma del ancho del diente y del ancho de la ranura, luego el ancho del diente será:

$$b_{t1} = \tau_{r1} - b_{s1} \quad (2.66)$$

τ_{r1} (mm)	b_{s1} (mm)	b_{t1} (mm)
64,26	27	37,26

Tabla 2.18. Cálculo del ancho del diente

En la Tabla 2.16 se calculó el ancho del diente mínimo que garantiza que la inducción magnética en los dientes no sobrepase el valor máximo recomendado, para un paso de ranura medido como arco de circunferencia interior del estator. El ancho del diente es superior al valor mínimo verificándose dicha restricción.

No obstante, dado que ya se conoce la altura de las ranuras y por ende de los dientes del estator, se ha de comprobar si a $\frac{1}{3}$ de la altura del diente, con el ancho del diente obtenido en los cálculos, la densidad de flujo magnético no excede el valor de inducción magnética máxima en el diente establecido conforme a las recomendaciones: $B_{t1}|_{1/3} < B_{t1M}$.

En apartados anteriores ya se dieron las expresiones para el cálculo del diámetro (2.53) y del paso de ranura (2.58) correspondientes a $\frac{1}{3}$ de la altura del diente.

El ancho del diente correspondiente a $\frac{1}{3}$ de la altura del diente:

$$b_{t1}^{1/3} = \tau_{r1}^{1/3} - b_{s1} \quad (2.67)$$

La inducción magnética a $\frac{1}{3}$ de la altura del diente resulta del cociente entre el flujo por polo y la sección transversal del diente por polo a un $\frac{1}{3}$ de la altura, igual al producto de la longitud útil del hierro del estator, el ancho del diente a $\frac{1}{3}$ de la altura y el número de dientes por polo que es igual al número de ranuras por polo y_{p1} :

$$B_{t1}^{1/3} = \frac{\Phi_M}{l_{Fe1} \cdot b_{t1}^{1/3} \cdot y_{p1}} \quad (2.68)$$

La Tabla 2.19 resume las magnitudes empleadas en el cálculo de la inducción magnética en el diente del estator a $\frac{1}{3}$ de la altura del mismo, se verifica que no se supera el valor de inducción máximo establecido conforme a las recomendaciones, siendo bastante inferior al establecido, lo cual evidencia la posibilidad de incrementar aún más el número de ranuras por polo y fase.

Descripción	Variable	Valor
Diámetro interior del estator	D_1 (m)	0,7364
Altura del diente del estator	h_{t1} (m)	0,089214
Diámetro correspondiente a $\frac{1}{3}$ de la altura del diente del estator (2.53)	$d_{1/3}$ (m)	0,79584
Número total de ranuras del estator	K_1	36
Paso de ranura medido como longitud de arco de circunferencia de $d_{1/3}$ (2.58)	$\tau_{r1^{1/3}}$ (m)	0,06945
Ancho de ranura del estator	b_{s1} (m)	0,027
Ancho del diente a $\frac{1}{3}$ de la altura del diente del estator (2.67)	$b_{t1^{1/3}}$ (m)	0,04245
Longitud útil del hierro del estator	l_{Fe1} (m)	0,8415
Paso polar del estator medido en número de ranuras	γ_{p1}	9
Flujo por polo máximo	ϕ_M (Wb)	0,2224
Inducción magnética a $\frac{1}{3}$ de la altura del diente del estator	$B_{t1^{1/3}}$ (T)	0,69
Inducción magnética máxima en los dientes del estator	B_{t1M} (T)	1,65

Tabla 2.19. Comprobación de la inducción magnética en el diente del estator a $\frac{1}{3}$ de la altura del mismo.

2.4.4 DIÁMETRO EXTERIOR

Una vez se conoce el diámetro interior, la altura del yugo y la altura de las ranuras del estator, es posible deducir el diámetro exterior del mismo:

$$D_{1e} = D_1 + 2 \cdot (h_{y1} + h_{s1}) \quad (2.69)$$

D_1 (mm)	h_{y1} (mm)	h_{s1} (mm)	D_{1e} (mm)	D_{1e}/D_1
736,4	91	89,214	1097	1,49

Tabla 2.20. Cálculo del diámetro exterior del estator.

El cociente entre el diámetro exterior y el diámetro interior del estator satisface las recomendaciones definidas en el Anexo 1.

2.5 DIMENSIONADO DE LA JAULA DEL ROTOR

2.5.1 CARACTERIZACIÓN DEL DEVANADO

Número de ranuras y barras

En el Anexo 1 se detallan las reglas de selección de las combinaciones de ranuras en el rotor y el estator que minimizan o cancelan las componentes armónicas de flujo en el entrehierro para lograr una característica Par – Velocidad más suave. Asimismo, se dan tablas con las combinaciones recomendadas en función del número de polos de la máquina que en la práctica se han empleado satisfactoriamente.

Se opta por una combinación de ranuras: $K_1 / K_2 = 36 / 24$, **$K_2 = 24$ ranuras** en el rotor.

Cada ranura alberga una barra ($Z_{K_2} = 1$ conductor/ranura) por lo tanto el número total de barras conductoras que conforman la jaula del rotor es igual al número de ranuras.

Número de fases

El número de fases del rotor m_2 , es función del número de barras del rotor (igual al número de ranuras), y del número de polos del motor:

$$m_2 = \frac{K_2}{2 \cdot p} \quad (2.70)$$

Número de ramas en paralelo

Las barras que constituyen la jaula de ardilla, se conectan por sus extremos mediante sendos anillos de cortocircuito, formando de este modo, tantas ramas en paralelo por fase como pares de polos posea el motor:

$$a'_2 = p \quad (2.71)$$

Paso polar, paso de bobina y paso de ranura

El paso polar medido como longitud de arco de circunferencia, y por el número de ranuras en el rotor se obtienen con (2.15) y (2.16), el paso de ranura del rotor mediante la ecuación (2.18) todas ellas referidas a las magnitudes del rotor. El paso de bobina coincide con el paso polar.

Número de espiras efectivas en serie por fase. Número de conductores fase

Cada rama en paralelo por fase está formada por $N_2 = 1$ espira/fase y esta, a su vez, por 2 barras conductoras en serie por fase.

Número de ranuras por polo y fase

El número de ranuras por polo y fase del rotor se obtiene con la expresión (2.13), teniendo en cuenta que el número de fases es igual al número de ranuras por polo, se deduce:

$$q_2 = \frac{K_2}{2 \cdot p \cdot m_2} = \frac{K_2}{2 \cdot p \cdot \frac{K_2}{2 \cdot p}} = 1 \text{ ranura/polo y fase} \quad (2.72)$$

Factor de devanado. Factor de inclinación

Dado que la jaula de ardilla se puede asemejar a un devanado de paso diametral con $q_2 = 1$, los factores de distribución (2.24), y acortamiento (2.26) son respectivamente: $\xi_{d2} = 1$, $\xi_{a2} = 1$.

En consecuencia, el **factor de devanado del rotor**, constará exclusivamente del factor de inclinación de ranura:

$$\xi_{b2} = \xi_{i2} \quad (2.73)$$

Para tratar de mejorar ciertas características del motor, se acostumbra a inclinar axialmente las ranuras del estator o el rotor. La inclinación de las ranuras causa, al igual que con la distribución y acortamiento de los devanados del estator, una ligera disminución de la f.e.m., con una reducción del contenido armónico de la onda. El **factor de inclinación** de ranura para el armónico fundamental viene dado por a siguiente expresión:

$$\xi_i = \frac{\text{sen}(\alpha_i)}{\alpha_i} \quad (2.74)$$

ξ_i : Factor de inclinación

α_i : Ángulo eléctrico de inclinación de ranuras expresado en radianes

$$\alpha_i = \frac{c}{\tau_p} \cdot \frac{\pi}{2} \quad (2.75)$$

c : Inclinación de ranuras medida en longitud de arco de circunferencia

τ_p : Paso polar medido en longitud de arco de circunferencia

El factor de inclinación más efectivo en la cancelación de armónicos, se logra con una inclinación equivalente a un paso de ranura: $c = \tau_r$. El paso polar y el paso de ranura vienen dados por las expresiones (2.15) y (2.18) respectivamente operando se tiene:

$$\frac{c}{\tau_p} = \frac{\tau_r}{\tau_p} \cong \frac{2 \cdot p}{K} = \frac{1}{q \cdot m} \quad (2.76)$$

Sustituyendo la expresión anterior en (2.75) y posteriormente en (2.74):

$$\xi_i = \frac{\text{sen}\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{1}{q \cdot m}\right)}{\frac{\pi}{2} \cdot \frac{1}{q \cdot m}} \quad (2.77)$$

Para cualquier orden armónico v:

$$\xi_{iv} = \frac{\text{sen}\left(v \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \frac{1}{q \cdot m}\right)}{v \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \frac{1}{q \cdot m}} \quad (2.78)$$

Dado que JMAG-Express Public no considera la inclinación de ranuras en ninguno de los dos órganos ($\xi_{i2} = 1$), se asumirá un valor de factor de devanado del rotor: $\xi_{b2} = 1$.

A continuación, se resumen las magnitudes de los parámetros necesarios para caracterizar el devanado del rotor:

Descripción	Variable	Valor
Número total de ranuras del rotor	K_2	24
Número de pares de polos	p	2
Número de fases del rotor (2.70)	m_2	6
Número de ramas en paralelo de una fase del rotor (2.71)	a'_2	2
Paso polar del rotor medido en ranuras (2.16)	γ_{p2}	6
Paso de bobina del rotor medido en número de ranuras	γ_2	6
Paso de ranura del rotor (2.18)	τ_{r2} (mm)	95,92
Número de espiras efectivas por fase del rotor	N_2	1
Número de ranuras por polo y fase del rotor (2.72)	q_2	1
Factor de devanado del rotor	ξ_{b2}	1

Tabla 2.21. Magnitudes empleadas en la caracterización de la jaula del rotor.

2.5.2 DIMENSIONES DE LAS BARRAS

Cálculo de la sección de las barras

La sección de una barra conductora viene dada por el cociente entre la corriente que circula por la barra y la densidad de corriente admisible en la misma:

$$S_{c2} = \frac{I_{bN}}{J_2} \quad (2.79)$$

S_{c2} (mm²): Sección transversal de una barra del rotor

I_{bN} (A): Corriente asignada en una barra del rotor

J_2 (A/mm²): Densidad de corriente en una barra del rotor

La densidad de corriente en un conductor del rotor se ha de fijar conforme a las recomendaciones referidas en el Anexo 1. La intensidad en cada barra corresponde a la corriente asignada en cada espira que integra una rama en paralelo por fase del rotor. Dado que todas las barras son idénticas la corriente asignada de una fase del rotor I_{2N} se reparte por igual entre las a_2' ramas en paralelo que constituyen la fase del rotor, por lo tanto, la intensidad que circula por cada rama I_{r2N} y, por ende, por cada barra de la jaula del rotor:

$$I_{bN} = I_{r2N} = \frac{I_{2N}}{a_2'} \quad (2.80)$$

La corriente asignada por fase del rotor se obtiene a través de la relación de transformación de corrientes entre el rotor y el estator:

$$m_i = \frac{I_{2N}}{I'_{2N}} = \frac{m_1 \cdot \xi_{b1} \cdot N_1}{m_2 \cdot \xi_{b2} \cdot N_2} \quad (2.81)$$

m_i : Relación de transformación de corrientes

I_{2N} (A): Intensidad asignada por fase del rotor

I'_{2N} (A): Intensidad asignada por fase del rotor referida al estator

$$I_{2N} = m_i \cdot I'_{2N} \quad (2.82)$$

En los motores de inducción, la corriente en el rotor referida al estator es aproximadamente de la misma magnitud que la componente real de la corriente en el estator, en condiciones asignadas:

$$I'_{2N} \approx I_{1N} \cdot \cos \phi_{1N} \quad (2.83)$$

I_{1N} (A): Intensidad asignada de fase del estator

$\cos \phi_{1N}$: Factor de potencia en condiciones asignadas

Según el circuito eléctrico equivalente por fase de un motor asíncrono trifásico se tiene que la corriente absorbida por el estator es igual a la suma de la corriente de magnetización y la corriente en el rotor referida al estator:

$$\bar{I}_1 = \bar{I}'_2 + \bar{I}_0$$

La corriente de magnetización en los motores de inducción, a diferencia de en los transformadores, cobra relevancia, no obstante, no se comete mucho error si se desprecia. En consecuencia, la corriente en el rotor referida al estator estará en fase con la f.e.m. inducida en el estator, y a su vez con la tensión de la red, asumiéndose así un valor aproximado de la corriente en el rotor referida al estator según la expresión (2.83).

Descripción	Variable	Valor
Intensidad asignada por fase del estator	I_{1N} (A)	587
Factor de potencia en condiciones asignadas	$\cos \phi_{1N}$	0,9
Intensidad asignada en el rotor referida al estator (2.83)	I'_{2N}	528,3
Nº de espiras efectivas en serie de una fase del estator	N_1	48
Factor de devanado del estator	ξ_{b1}	0,946
Número de fases del estator	m_1	3
Número de espiras efectivas por fase del rotor	N_2	1
Factor de devanado del rotor	ξ_{b2}	1
Número de fases del rotor	m_2	6
Relación de transformación de corrientes (2.81)	m_i	22,685
Intensidad asignada por fase del rotor (2.82)	I_{2N} (A)	11983,3
Número de ramas en paralelo del rotor	a'_2	2
Intensidad asignada en una barra de la jaula (2.80)	I_{bN} (A)	5991,66
Densidad de corriente en la barra	J_2 (A/mm ²)	5
Sección de una barra de la jaula del rotor (2.79)	S_{c2} (mm ²)	1198,33

Tabla 2.22. Cálculo de la sección de una barra de la jaula del rotor.

Geometría y dimensiones de las barras

Anteriormente se dijo que la característica Par – Velocidad puede ser ajustada a conveniencia mediante la variación del material y la geometría de las barras. En principio, por simplicidad, se opta por barras de sección circular, más adelante se valorará cambiar su geometría, si es preciso, para lograr unas características de funcionamiento concretas.

El diámetro de una barra de la jaula del rotor viene dado por la siguiente expresión:

$$d_{c2} = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{c2}}{\pi}} \quad (2.84)$$

d_{c2} (mm): Diámetro de una barra de la jaula del rotor

S_{c2} (mm ²)	d_{c2} (mm)
1198,33	39

Tabla 2.23. Cálculo del diámetro de una barra de la jaula del rotor

2.6 DIMENSIONADO DEL NÚCLEO DEL ROTOR

2.6.1 LONGITUD ÚTIL DEL HIERRO

La longitud útil del hierro del rotor se deduce mediante las ecuaciones (2.48) y (2.49) empleadas en el cálculo de la longitud útil del hierro del estator, expresadas en función de los parámetros que caracterizan al rotor.

Dado que los núcleos magnéticos de ambos órganos poseen la misma longitud axial geométrica neta ($l_{g1} = l_{g2} = l_g$), carecen de canales radiales de ventilación, y se construyen con el mismo tipo de chapas magnéticas ($K_{Fe1} = K_{Fe2}$), la longitud útil del hierro del rotor será:

$$l_{Fe2} = l_{Fe1} = K_{Fe1} \cdot l_g \quad (2.85)$$

l_{Fe2} (mm): Longitud axial útil del hierro del rotor

l_{Fe1} (mm): Longitud axial útil del hierro del estator

K_{Fe1} : Factor de empilado del estator

l_g (mm): Longitud axial geométrica del núcleo de ambos órganos

l_g (m)	$K_{Fe1} = K_{Fe2}$	$l_{Fe2} = l_{Fe1}$ (m)
0,8675	0,97	0,8415

Tabla 2.24 Cálculo de la longitud útil del hierro del rotor.

2.6.2 DIMENSIONES DE LAS RANURAS Y DIENTES

Geometría de las ranuras y dientes

Se decide emplear ranuras semicerradas, los motivos por los cuales se ha optado por este tipo de ranuras se describen en el Anexo1: Documentación de partida, donde también se detallan los posibles valores que puede tomar la relación que ha de guardar la abertura de la boca de ranura del rotor con el espesor del entrehierro para propiciar un funcionamiento adecuado del motor.

Dado que se ha optado por emplear barras de sección circular fabricadas por inyección a presión de cobre fundido en las ranuras del núcleo del rotor y al no existir aislamiento ente las barras y el núcleo magnético ($S_{c2ins} = S_{c2}$), las ranuras del rotor tendrán la misma geometría y dimensiones que las barras que conforman la jaula del rotor ($S_{su2} = S_{c2}$ y $b_{s2} = d_{c2}$). Por lo tanto, teniendo en cuenta que el número de conductores por ranura es: $Z_{K2} = 1$, el factor de ocupación de ranura del rotor:

$$K_{Cu2} = \frac{S_{c2ins} \cdot Z_{K2}}{S_{su2}} = \frac{S_{c2} \cdot 1}{S_{c2}} = 1 \quad (2.86)$$

Cálculo de la anchura máxima de ranura y mínima del diente

El procedimiento es similar al empleado en el cálculo de la anchura mínima de los dientes y máxima de las ranuras del estator, se ha de verificar que la inducción magnética en los dientes del rotor no exceda el valor máximo recomendado (Anexo 1): $B_{t2} < B_{t2M}$. El razonamiento empleado en la deducción de las relaciones entre el ancho del diente y el ancho de ranura con el paso de ranura del estator, es el mismo, por lo tanto, para el rotor se tiene:

$$\frac{b_{t2}}{\tau_{r2}} \geq \frac{B_M}{B_{t2M}} \cdot \frac{1}{K_{Fe2}} \quad (2.87)$$

b_{t2} (mm): Ancho del diente del rotor

B_{t2M} (T): Inducción magnética máxima en los dientes del rotor

$$\frac{b_{s2}}{\tau_{r2}} \leq 1 - \frac{b_{t2}}{\tau_{r2}} \quad (2.88)$$

b_{s2} (mm): Ancho de ranura del rotor

τ_{r2} (mm): Paso de ranura del rotor

A continuación, se resumen los resultados obtenidos en el cálculo. Dado que se ha optado por asumir la misma inducción magnética máxima en los dientes del rotor y el estator, el factor de empilado es el mismo en ambos órganos, y las condiciones de flujo máximo en el entrehierro no han variado, las relaciones calculadas en la Tabla 2.25 coinciden con las obtenidas para el estator.

Descripción	Variable	Valor
Inducción magnética máxima en el entrehierro	B_M (T)	0,7
Inducción magnética máxima en los dientes del rotor	B_{t2M} (T)	1,65
Factor de empilado del rotor	K_{Fe2}	0,97
Relación entre el ancho del diente y el paso de ranura del rotor (2.87)	$\frac{b_{t2}}{\tau_{r2}} \geq$	0,435
Relación entre el ancho de ranura y el paso de ranura del rotor (2.88)	$\frac{b_{s2}}{\tau_{r2}} \leq$	0,565

Tabla 2.25. Cálculo de las relaciones del ancho de la ranura y del ancho del diente con el paso de ranura en el rotor.

Para deducir la anchura máxima de ranura y mínima del diente, se ha de analizar la circunstancia más desfavorable, es decir, cuando los dientes son más estrechos.

Al emplear barras de sección circular, la región del diente en la que es más probable que se supere el valor máximo de inducción magnética establecido, corresponde a la circunferencia que contiene los centros de las barras del rotor, pues es donde el diente es más estrecho. La situación más perjudicial corresponde a las barras con mayor sección y, por ende, mayor diámetro (2.84), pues a medida que este se incrementa, los dientes se estrechan.

La sección de una barra es inversamente proporcional a la densidad de corriente en la misma (2.79), luego, para la misma intensidad asignada en la barra, esta será mayor cuanto menor sea la densidad de corriente. La sección transversal máxima de una barra se obtendrá con la densidad de corriente correspondiente al límite inferior del intervalo de valores recomendado en las barras del rotor si se emplea cobre como material conductor (Anexo 1).

En estas circunstancias se ha de comprobar si las relaciones (2.87) y (2.88) se siguen verificando con la anchura de ranura máxima (igual al diámetro máximo de las barras) y el paso de ranura expresado como longitud de arco de circunferencia del diámetro correspondiente a la circunferencia sobre la que se encuentran los centros de las barras.

$$\tau_{r2^d} = \frac{\pi \cdot d}{K_2} \quad (2.89)$$

τ_{r2^d} (mm): Paso de ranura del rotor medido como arco de circunferencia de d

d (mm): Diámetro de la circunferencia que contiene los centros de las barras del rotor

K_2 : Número de ranuras del rotor

La distancia a la que se encuentran los centros de las barras respecto al centro del rotor, se obtiene descontando al diámetro exterior del rotor, la longitud de la boca de ranura y el radio de la ranura del rotor en ambos extremos. La profundidad de la boca de ranura se ha de escoger teniendo en cuenta que, al incrementar su valor, el diámetro de la circunferencia que contiene los centros de las barras será menor y, en consecuencia, si se conserva la sección transversal de la ranura, los dientes serán más estrechos pudiéndose llegar a superar el valor de inducción magnética máxima en los mismos.

$$d = D_2 - 2 \cdot \left(h_{o2} + \frac{b_{s2}}{2} \right) \quad (2.90)$$

D_2 (mm): Diámetro exterior del rotor

h_{o2} (mm): Profundidad de la boca de ranura del rotor

Conocido el ancho de ranura o el diámetro de la ranura del rotor b_{s2} , se evalúan las relaciones anteriores para un paso de ranura correspondiente al diámetro de la circunferencia descrita por los centros de las barras del rotor. La relación b_{s2}/τ_{r2^d} se calcula directamente, el cociente entre el ancho máximo del diente y el paso de ranura medido como longitud de arco de circunferencia que contiene los centros de las barras se obtiene con la siguiente expresión:

$$\frac{b_{t2}}{\tau_{r2^d}} = 1 - \frac{b_{s2}}{\tau_{r2^d}} \tag{2.91}$$

Descripción	Variable	Valor
Intensidad asignada en una barra de la jaula	I_{bN} (A)	5991,66
Densidad de corriente en la barra	J_2 (A/mm ²)	3
Sección máxima de una barra de la jaula del rotor (2.79)	S_{c2} (mm ²)	1932,8
Diámetro máximo de las barras del rotor (2.84)	d_{c2} (mm)	49,6
Anchura máxima de ranura del rotor	b_{s2} (mm)	49,6
Diámetro exterior del rotor	D_2 (mm)	732,8
Profundidad de la boca de ranura del rotor	h_{o2} (mm)	4
Diámetro de la circunferencia en la que se encuentran los centros de las barras (2.90)	d (mm)	675,2
Número de ranuras del rotor	K_2	24
Paso de ranura del rotor medido como longitud de arco de circunferencia de d (2.89)	τ_{r2^d} (mm)	88,38
Relación entre el ancho de ranura máximo y el paso de ranura del rotor referido a d	$\frac{b_{s2}}{\tau_{r2^d}}$	0,561
Relación entre el ancho del diente mínimo y el paso de ranura del rotor referido a d (2.91)	$\frac{b_{t2}}{\tau_{r2^d}}$	0,439
Relación entre el ancho del diente y el paso de ranura del rotor (Tabla 2.25)(2.87)	$\frac{b_{t2}}{\tau_{r2}} \geq$	0,435
Relación entre el ancho de ranura y el paso de ranura del rotor (Tabla 2.25)	$\frac{b_{s2}}{\tau_{r2}} \leq$	0,565

Tabla 2.26. Comprobación de las relaciones del ancho máximo de ranura y mínimo del diente con el paso de ranura medido como longitud de arco de circunferencia de d .

Dado que $b_{s2}/\tau_{r2^d} \leq 0,565$ y $b_{t2}/\tau_{r2^d} \geq 0,435$ se verifica que, con las barras de mayor sección y con una longitud de la boca de ranura $h_{o2} = 4$ mm, la inducción magnética en los dientes no excede el valor máximo establecido, por lo tanto, cualquier sección inferior a la máxima (barras con una densidad de corriente superior al límite inferior del intervalo de valores recomendado para la misma intensidad asignada en la barra) cumplirá dichas restricciones.

Empleando las barras con mayor sección, la inducción magnética máxima en la zona más estrecha de los dientes del rotor, se obtiene, teniendo en cuenta que, el flujo máximo comprendido en un paso de ranura del rotor es el mismo que en el diente:

$$l_{\delta} \cdot \tau_{r2d} \cdot B_M = l_{Fe2} \cdot b_{t2} \cdot B_{t2M}$$

Dado que la longitud axial efectiva del entrehierro es igual a la longitud axial geométrica del motor y que la longitud útil del hierro viene dada por (2.85), la inducción magnética máxima en los dientes de rotor:

$$B_{t2M} = B_M \cdot \frac{l_{\delta}}{l_{Fe2}} \cdot \frac{\tau_{r2d}}{b_{t2}} = B_M \cdot \frac{l_{\delta}}{K_{Fe2} \cdot l_{\delta}} \cdot \frac{\tau_{r2d}}{b_{t2}} = B_M \cdot \frac{1}{K_{Fe2}} \cdot \frac{\tau_{r2d}}{b_{t2}} \quad (2.92)$$

A continuación, se muestra el resultado obtenido en el cálculo de la inducción magnética máxima si se emplean en la jaula del rotor barras con la sección máxima permitida. Se comprueba que la inducción magnética en los dientes es inferior al valor máximo recomendado.

B_M (T)	K_{Fe2}	τ_{r2d}/b_{t2}	B_{t2M} (T)
0,7	0,97	1 / 0,439	1,64

Tabla 2.27. Cálculo de la inducción magnética máxima en los dientes del rotor si se emplean barras cuya sección es la máxima permitida.

Dado que se optó por emplear barras de menor sección (Tabla 2.22) el diámetro de las ranuras también lo es, y consecuentemente la inducción magnética en los dientes del rotor, al ser estos más anchos, será inferior al valor límite impuesto.

Dimensiones definitivas de ranuras y dientes

Las ranuras, según se ha indicado antes, serán semicerradas, con la misma geometría (circular), sección y dimensiones que las barras del rotor (Tabla 2.23).

Si las barras ocupan la misma posición respecto a la superficie externa del rotor (d), la boca de ranura será más profunda al ser menor el diámetro de los conductores y de la ranura (b_{s2}). La expresión para deducir su valor es la siguiente:

$$h_{o2} = \frac{D_2 - d - b_{s2}}{2} \quad (2.93)$$

D_2 (mm)	d (mm)	b_{s2} (mm)	h_{o2} (mm)
732,8	675,2	39	9,3

Tabla 2.28. Cálculo de la profundidad de la boca de ranura del rotor.

Según se señaló previamente la abertura de la boca de ranura ha de ser tal que verifique [4]:

$$b_{o2}/\delta_g \cong (3 - 4):$$

δ_g (mm)	b_{o2}/δ_g	b_{o2} (mm)
1,8	3	5,4

Tabla 2.29. Cálculo de la abertura de la boca de ranura del rotor.

Se procede a comprobar las relaciones entre el ancho de ranura y el ancho del diente con el paso de ranura medido como longitud de arco de circunferencia descrita por los centros de las barras del rotor. Según se ha aclarado anteriormente, al emplearse barras de menor diámetro, las ranuras serán más estrechas y, naturalmente, los dientes más anchos, por lo tanto, las relaciones b_{s2}/τ_{r2^d} y b_{t2}/τ_{r2^d} respetarán las restricciones establecidas. Dado que las barras ocupan la misma posición (mismo diámetro d), el paso de ranura τ_{r2^d} será el mismo (Tabla 2.26).

Descripción	Variable	Valor
Diámetro de las barras del rotor (Tabla 2.23)	d_{c2} (mm)	39
Diámetro de una ranura del rotor	b_{s2} (mm)	39
Diámetro de la circunferencia en la que se encuentran los centros de las barras	d (mm)	675,2
Paso de ranura del rotor medido como longitud de arco de circunferencia de d	τ_{r2^d} (mm)	88,38
Relación entre el ancho de ranura y el paso de ranura del rotor referido a d	$\frac{b_{s2}}{\tau_{r2^d}}$	0,442
Relación entre el ancho del diente y el paso de ranura del rotor referido a d (2.91)	$\frac{b_{t2}}{\tau_{r2^d}}$	0,558

Tabla 2.30. Valores de b_{s2}/τ_{r2^d} y b_{t2}/τ_{r2^d} con el diámetro de las barras finalmente adoptado.

Por último, se obtiene la inducción magnética en los dientes del rotor B_{t2M} con la expresión (2.92), empleando para ello la relación entre el ancho del diente y el paso de ranura calculado con las dimensiones de las barras finalmente asumidas. Se comprueba que no se excede el valor máximo de inducción magnética establecido en los dientes ($B_{t2M} < 1,65 \text{ T}$), tal y como se había anticipado previamente.

$B_M \text{ (T)}$	K_{Fe2}	τ_{r2^d}/b_{t2}	$B_{t2M} \text{ (T)}$
0,7	0,97	1 / 0,558	1,29

Tabla 2.31. Cálculo de la inducción magnética en los dientes del rotor con la sección de las barras definitiva.

ANEXO 2.3: METODOLOGÍA DE DISEÑO

3 METODOLOGÍA DE DISEÑO

El proceso de diseño que se va a llevar a cabo, tiene como objeto la determinación de un modelo que cumpla con una serie de requisitos específicos de funcionamiento. Es un proceso iterativo, durante el cual los parámetros de diseño considerados se van a ir modificando hasta que el diseño se ajuste a los requerimientos establecidos.

El modelo resultante depende de la función o funciones objetivo a optimizar (materiales activos, rendimiento, costes globales, o una combinación ponderada de todas ellas) y de las restricciones fijadas tales como el incremento de temperatura, la corriente/par en el arranque, el par máximo etc.

El proceso de diseño se desglosa en las siguientes etapas:

- Diseño geométrico y electromagnético inicial, en el que se estimarán las dimensiones principales del motor mediante un cálculo analítico previo. El comportamiento, y características de funcionamiento del prototipo inicial estimado, se evalúan con el software de simulación de máquinas eléctricas rotativas JMAG-Express en su versión pública. De los resultados del análisis se concluye si es preciso modificar el modelo, para lograr que verifique las condiciones de funcionamiento precisadas. En la primera etapa del proceso, la elección de los parámetros de diseño y sus respectivos valores, irá encaminada a la optimización de las características del motor en condiciones asignadas, prestando especial atención al par, y rendimiento del mismo.
- Optimización del modelo de inicial: Partiendo de esa premisa se procede a realizar un análisis de los parámetros que afectan en mayor medida al comportamiento de la máquina. Para ello se utiliza la herramienta de análisis de sensibilidad que facilita JMAG-Express Public, y que muestra el grado de influencia que los parámetros de diseño ejercen sobre la característica que se pretende mejorar. Dado que el análisis no contempla parámetros que pueden ejercer una gran influencia en el desempeño del motor, la elección de los mismos se ha apoyado y complementado con la bibliografía consultada. Una vez se conocen los parámetros que influyen de forma más significativa en el comportamiento de la máquina, se realiza una evaluación paramétrica de los mismos, para ver el modo en que afectan a las características operativas del motor, y obtener una estimación de los posibles valores que ha de tomar.

En base a las conclusiones extraídas de ambos análisis se plantean las siguientes propuestas de diseño que consisten en: la aproximación de las barras del rotor al entrehierro (diseño MA.1), ajuste de las dimensiones de las ranuras y conductores del estator (diseño MA.2), en base al modelo MA.2 se incorpora el ajuste de la profundidad de la boca de ranura (diseño MA.2a), e incremento de diámetro de las barras de la jaula del rotor (diseño MA.3).

De nuevo, todas las alternativas de diseño serán evaluadas con JMAG-Express Public. Para apreciar las posibles mejoras en los parámetros de funcionamiento de todas ellas, se contrastará su valor con los resultados obtenidos en la evaluación del modelo inicial MA y los requerimientos de partida.

Uno de los inconvenientes del software es su falta de precisión en la representación de los resultados dado que calcula muy pocos valores para definir las distintas curvas, además el ajuste de la curva es realizado por el programa mediante interpolación lineal, teniendo en cuenta que los valores numéricos a velocidades intermedias son obtenidos en base a esa interpolación, las curvas y por ende los valores extraídos de ella pueden diferir de forma considerable respecto a los valores reales. Este hecho es más acusado en el análisis a velocidades cercanas a la asignada, pues es muy próxima a la velocidad síncrona del motor, instante en el cual las características son nulas, y las características calculadas en el instante anterior son muy elevadas, de manera que interpola entre dos valores muy extremos, y consecuentemente el error cometido es mayor.

Con el objeto de enmendar el error cometido por JMAG-Express Public se decide apoyar el análisis con una herramienta software, CALASIN, que realiza el cálculo del comportamiento del motor en base a el método clásico del circuito equivalente de la máquina, utilizando para el análisis los parámetros del circuito equivalente que proporciona JMAG-Express Public. Este programa pese a considerar más pares de valores para representar las distintas curvas características y analizar el funcionamiento del motor a una velocidad concreta sin interpolar, es más impreciso que JMAG-Express Public pues no considera la saturación y las pérdidas en el hierro de los núcleos magnéticos.

Por este motivo, se compararán las características de funcionamiento resultantes de la evaluación con ambos programas, para obtener una orientación más objetiva con la realidad operativa del motor.

Asimismo, se analizarán las características en el arranque e instante en que el par motor es máximo para comprobar si las distintas propuestas de diseño planteadas se ajustan a las restricciones establecidas en ambos estados de funcionamiento.

Por último, en base al estudio de las alternativas de diseño planteadas tras el análisis de sensibilidad y evaluación paramétrica de los parámetros de diseño del modelo MA, se opta por incorporar a este aquellos que han resultado ser más adecuados en la consecución de las características de funcionamiento a la velocidad asignada: aproximación de las barras del rotor al entrehierro, aproximación de los devanados del estator al entrehierro, y leve ensanchamiento de las ranuras del estator (diseño MA.4).

- Alternativas de diseño: Tras realizar la evaluación y análisis de las alternativas de diseño del modelo MA, en las que se han realizado variaciones discretas de los parámetros geométricos, se observó que no era posible mejorar las características de funcionamiento a la velocidad asignada sin comprometerlas en otros estados de funcionamiento que si bien el motor opera a la velocidad asignada la mayor parte del tiempo no pueden obviarse. Se detectó que el par máximo desarrollado por las distintas propuestas de diseño era superior al requerido para un funcionamiento estándar para el cual está previsto que opere el motor, así mismo la corriente en el arranque es elevada y no es recomendable dado que en dicho instante la totalidad de la potencia absorbida por el estator es disipada en forma de calor exponiendo a los componentes del motor a temperaturas extremas para las cuales no fueron diseñados, que podría causar una degradación prematura de su integridad. Por este motivo, se decide incluir en el proceso de diseño ajustes no planteados hasta el momento: variación de la geometría de las barras de la jaula y ranuras del rotor (diseño MB). Con la incorporación de estos ajustes se pretende alcanzar las especificaciones a la velocidad asignada sin infringir las restricciones establecidas en el arranque e instante en que el par motor es máximo. Nuevamente se evaluó la propuesta de diseño MB en ambos programas, y se analizaron sus características operativas. En base a este análisis, se decidió establecer una velocidad a plena carga inferior para que el motor verificase las características de funcionamiento requeridas. Finalmente, para tratar de mejorar las

condiciones de operación en el arranque e instante en que el par motor es máximo, se optó por realizar más ajustes en las dimensiones de la geometría oval de las barras. Para averiguar la influencia que los nuevos parámetros incorporados por la geometría oval ejercían en las características de funcionamiento del modelo, se realizó una evaluación paramétrica de los mismos. En base a los resultados obtenidos en la evaluación paramétrica se realizan las siguientes modificaciones: disminución del radio externo de la barra e incremento de su longitud, se define de este modo una nueva propuesta de diseño (modelo MB.1), que presenta unas características más adecuadas en el arranque e instante en que el par motor es máximo, pero en el que fue preciso incrementar de forma más notable el deslizamiento a plena carga (reducir su velocidad asignada).

3.1 DIMENSIONADO GEOMÉTRICO Y ELECTROMAGNÉTICO INICIAL

El proceso de diseño comienza con un dimensionado preliminar de los núcleos y arrollamientos del motor. Con el propósito de obtener una estimación de las dimensiones principales del motor, se ha realizado un cálculo analítico previo en base a las especificaciones requeridas, relaciones/ecuaciones recomendadas en la extensa bibliografía dedicada al diseño de máquinas eléctricas, y a las restricciones fijadas por la normativa expresa. Los cálculos y los aspectos de diseño se detallan en el Anexo 1 y 2. Una vez definidas las dimensiones del modelo inicial se comprueba si verifica las características de funcionamiento, par, corriente, rendimiento, factor de potencia, etc. a la velocidad asignada, mediante el software de simulación JMAG-Express Public.

3.1.1 DEFINICIÓN DEL MODELO INICIAL EN JMAG-Express Public

Los datos que hay que proporcionar al programa JMAG-Express Public se detallan a continuación:

Tipo de motor:

De los motores que oferta el programa, se escoge *Three phase induction motor*, motor de inducción trifásico de jaula de ardilla.

Geometría del estator y el rotor:

El programa ofrece tres alternativas, importar la geometría generada en un software CAD externo mediante un archivo tipo DXF, utilizar una plantilla del motor completo, o construir un modelo nuevo. Si se opta por construir una nueva combinación se ha de escoger la geometría de las ranuras tanto del estator como del rotor. En esta ocasión se ha optado por la tercera opción. A continuación, se ilustran las geometrías escogidas:



Figura 3.1. Geometría de las ranuras del rotor (*rim_001*, JMAG-Express Public)

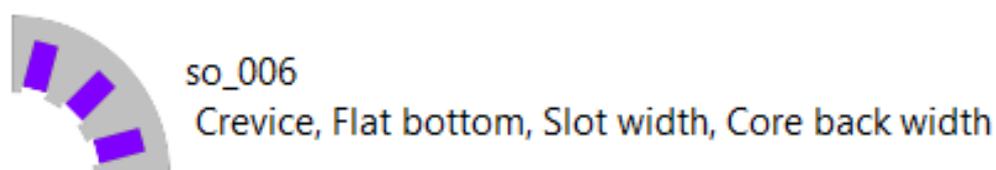


Figura 3.2. Geometría de las ranuras del estator (so_006, JMAG-Express Public)

Unidades de las dimensiones y precisión decimal:

Se dejan los valores que vienen por defecto en el programa, unidades de las dimensiones en mm y 4 posiciones decimales.

Requerimientos de la máquina. Requirement:

En este apartado se fijan los valores de funcionamiento que se pretenden conseguir *Targeted Value* y los parámetros para el dimensionado del motor *Sizing Parameter*.

En la Tabla 3.1 se resumen los parámetros considerados, y sus respectivos valores:

<i>Targeted Value</i>	
Potencia Nominal / <i>Rated Power</i> (kW)	3550
Velocidad asignada / <i>Rated revolution speed</i> (rpm)	1490
<i>Sizing Parameter</i>	
Número de polos / <i>Number of Poles</i>	4
Número de ranuras del estator / <i>Number of Slots</i>	36
Número de barras / <i>Number of bars</i>	24
Valor eficaz de la tensión de fase / <i>Power Supply Voltage (RMS)</i> (V)	2309
Material Jaula del Rotor / <i>Cage</i>	Cobre / <i>Copper</i>

Tabla 3.1. Requerimientos de la máquina (Requirement, JMAG-Express Public)

El programa utiliza la función *Sizing Function* que calcula los valores recomendados de los parámetros de diseño (dimensiones, materiales, devanados, y fuente de alimentación), y elabora una propuesta de diseño en base a la potencia nominal indicada anteriormente, al relacionar la potencia de salida con el volumen del dispositivo. El programa detecta incongruencias en los valores introducidos, a través de una serie de mecanismos como las constantes de tensión y par.

Dimensiones principales del motor. *Dimensions*:

Este apartado alberga las dimensiones de la máquina, agrupadas por componentes del motor del siguiente modo: dimensiones generales, *all*; dimensiones del estator, *stator*; dimensiones del rotor, *im_rotor*; dimensiones de los anillos de cortocircuito, *End Ring*. Cada parámetro consta de una variable *Variable name*, un nombre *Label*, y un valor *Value*. La apariencia de dicho apartado se muestra a continuación:

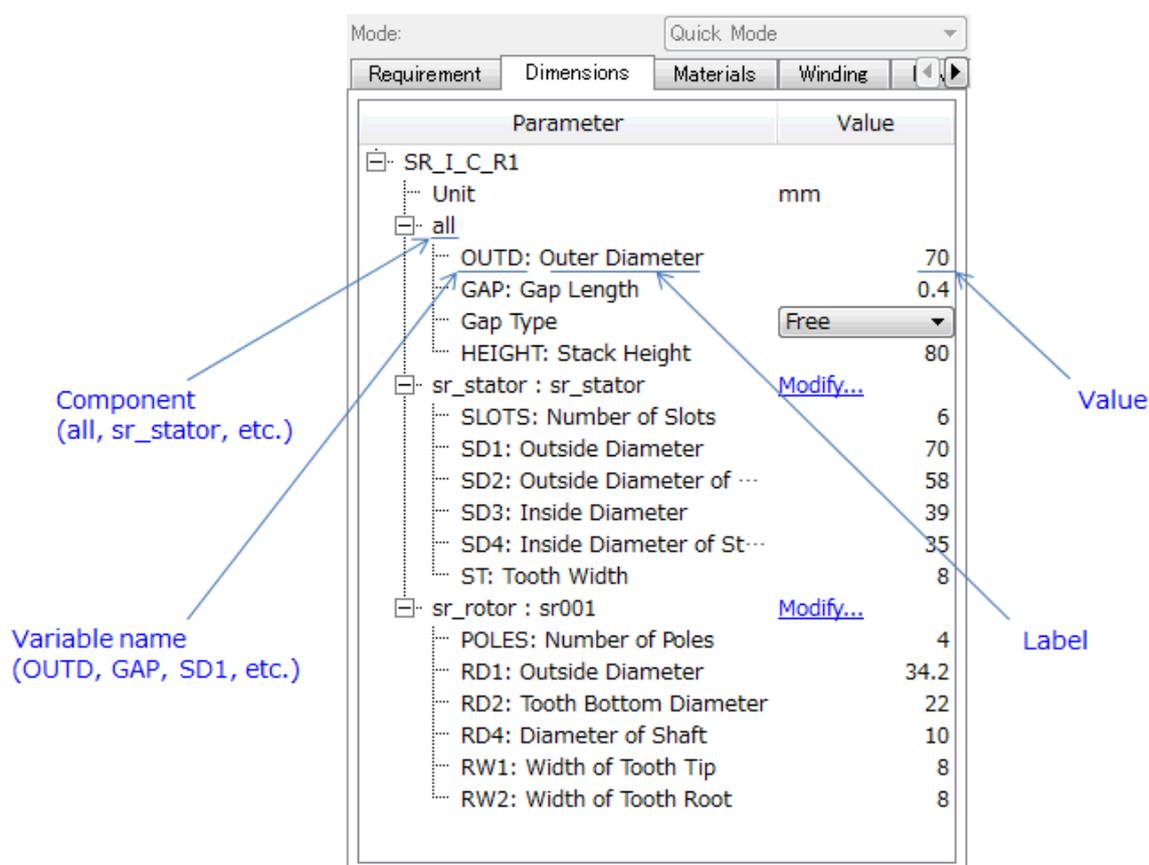


Figura 3.3. Apariencia del apartado *Dimensions* en *JMAG-Express Public*.

Pulsando sobre *Modify*, se puede cambiar o editar las plantillas del estator (so_006), o del rotor (rim_001) seleccionadas previamente.

Adicionalmente, el programa permite introducir expresiones en los valores de las variables, esto es interesante cuando los parámetros guardan relación entre sí. La sintaxis para hacer referencia a una variable es la siguiente “Part!Variable” (pej.: stator!SD1).

Se enumeran algunos aspectos a tener en cuenta antes de definir los valores que han de tomar los parámetros considerados:

Dimensiones generales *all*:

- Diámetro exterior del motor [OUTD: Outer Diameter]: Las restantes dimensiones se ven afectadas cuando se modifica su valor.
- Espesor del entrehierro [GAP: Gap length]: Una vez se fija su valor, el diámetro exterior del rotor queda definido automáticamente.
- Tipo de entrehierro [Gap Type]: El programa permite elegir entre dos opciones, Gap Type: [Fix] la longitud del espacio entre el diámetro interior del estator y exterior del rotor es fija y no se ve afectada por los cambios realizados en las restantes dimensiones, o Gap Type: [Free] la longitud del entrehierro se estrecha o se ensancha en función de los cambios realizados en las restantes variables.
- Longitud axial de la máquina [HEIGHT: Stack Height]: La longitud axial del estator coincide con la longitud axial de su núcleo, tal y como se ilustra en la Figura 3.4.

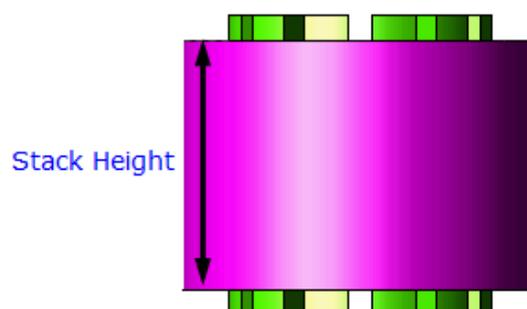


Figura 3.4. Longitud axial de la máquina conforme JMAG-Express Public

- Número de polos [POLES: Number of Poles]: Se especifican el número de polos (2p) del motor.

Dimensiones del estator [stator: so_006]:

Su geometría se define con los siguientes parámetros: Número de ranuras [SLOTS: Number of Slots]; Diámetro exterior del núcleo [SD1: Outside Diameter]; Diámetro interior del núcleo [SD4: Inside Diameter]; Ancho de ranura del estator [SW3: Slot Width]; Altura del yugo del estator [SW4: Core Back Width]; Profundidad de la boca de la ranura [ST: Tooth Tang Depth]; Profundidad de la cuña de cierre [SW5: Wedge Length]; Longitud de la cuña de cierre [STD2: Wedge Depth]; Radio de redondeo de los dientes [SF1: Teeth Top R]; Radio de redondeo de las ranuras [SF2: Slot Bottom Radio].

De momento, se aceptan los valores de las dimensiones de la cuña de cierre, y los radios de redondeo de ranura y diente propuestos por el programa.

Dimensiones del rotor [im_rotor: rim_001]:

Los parámetros que determinan sus dimensiones son: Número de barras [BARS: Number of Secondary Conductors]; Diámetro exterior [RD1: Outside Diameter]; Diámetro del eje [RD2: Shaft Diameter]; Diámetro de las barras [RL1: Bar Diameter]; Distancia de los centros de las barras respecto al diámetro exterior del rotor [RC1: Bar Center Depth]; Abertura de la boca de ranura [RW1: Slot Opening Width]; Radio de redondeo de los dientes [RF1: Teeth Top R].

En los cálculos realizados en el Anexo 2, se obtuvo el diámetro de la circunferencia que contiene los centros de las barras conductoras, d . La distancia a la que se hallan dichos centros respecto a la superficie externa del núcleo del rotor, se obtiene con la siguiente expresión:

$$RC1 = \frac{RD1 - d}{2} \quad (3.1)$$

En este modelo inicial se aceptan los valores de diámetro del eje, y radio de redondeo de los dientes, resultantes del cálculo realizado por el programa.

Dimensiones de los anillos de cortocircuito [End Ring]:

Se han de especificar las siguientes características:

- Ajuste de la sección transversal del anillo [Section Setting]: Cuando el área transversal es la misma para ambos anillos se selecciona [Same] en el menú desplegable, en caso contrario [Different]. El ajuste por defecto es [Same]
- Tipo de sección [Section Type]: Se puede elegir entre sección rectangular [Rectangular], trapezoidal [Trapezoid], o especificar directamente el valor del área transversal del anillo [Section Area]. En función del tipo de sección que se elija, se mostrarán unos parámetros u otros. El programa fija por defecto la sección tipo trapezoidal, en principio se adopta esta geometría. En ese caso, se han de introducir las siguientes dimensiones [CEH: Height], [CEU: Upper Width], [CEL: Lower Width]. En la Figura 3.5 se muestran dichos parámetros geométricos:

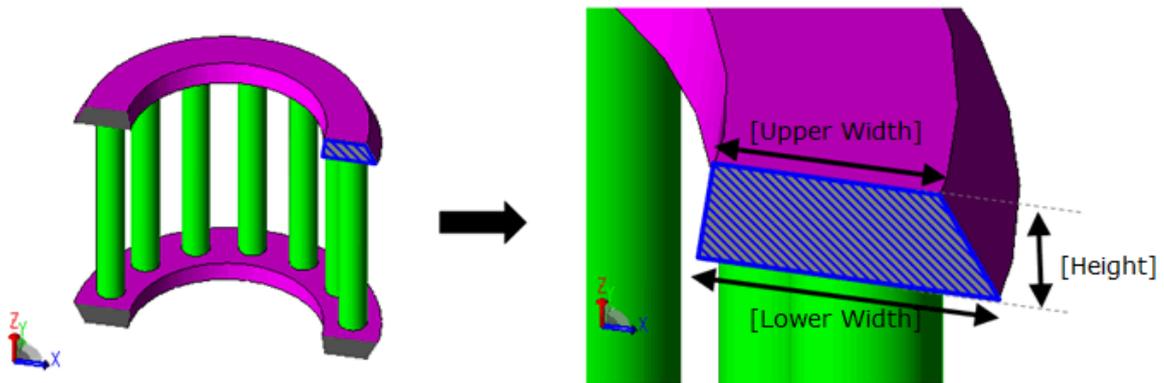


Figura 3.5. Dimensiones de la sección transversal tipo trapezoidal de los anillos de c.c.

- Distancia entre la posición central del anillo y la posición central de las barras del rotor [CEP: Offset].

El valor por defecto se fija en 0, es decir las posiciones centrales del anillo de c.c. y las barras del rotor coinciden. En la Figura 3.6 se muestra el modo en que este parámetro modifica la posición relativa de los centros de las barras y la posición central del anillo.

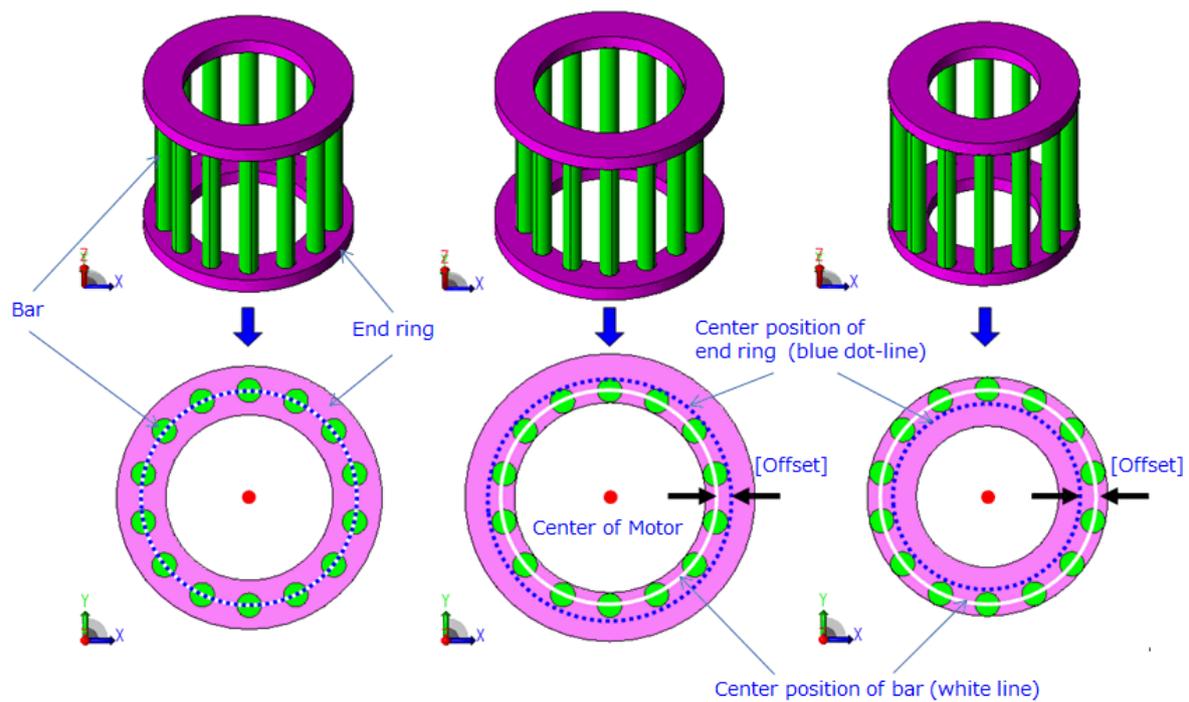


Figura 3.6. Posición relativa de los centros de las barras del rotor y la posición central del anillo de c.c. en función del valor que toma el parámetro [CEP: Offset]: Izquierda igual a cero, centro valor positivo, derecha valor negativo.

- Sección efectiva de paso de corriente del anillo [CES: Effective Section Area (%)]:

Se ha de especificar el porcentaje de área de la sección transversal del anillo que es atravesado por corriente, por defecto se fija en 100%.

Ninguno de los valores de las dimensiones del anillo ni el tipo de sección y definición del mismo se han modificado.

Utilizando el modelo propuesto por JMAG-Express Public, se realizan cambios en la geometría del mismo para que se ajuste a las dimensiones obtenidas analíticamente.

En la Tabla 3.2 se resumen las dimensiones finalmente adoptadas:

Componente	Descripción	Variable	Valor
Dimensiones generales <i>all</i> (mm)	Diámetro exterior del motor	OUTD	1098
	Espesor del entrehierro	GAP	1,8
	Tipo de entrehierro	Gap Type	Fix
	Longitud axial de la máquina	HEIGHT	867,5
	Numero de polos	POLES	4
Dimensiones del estator <i>stator: so_006</i> (mm)	Número de ranuras	SLOTS	36
	Diámetro exterior	SD1	1098
	Diámetro interior	SD4	736,4
	Ancho de ranura	SW3	27
	Altura del yugo del estator	SW4	91
	Profundidad de la boca de ranura	ST	14
Dimensiones del rotor <i>im_rotor: rim_001</i> (mm)	Número de barras	BARS	24
	Diámetro exterior	RD1	732,8
	Diámetro de las barras	RL1	39
	Profundidad posición centros de las barras ¹⁶	RC1	28,4
	Abertura de la boca de ranura	RW1	5,4

Tabla 3.2. Resumen de las dimensiones del modelo inicial introducidas en JMAG-Express Public

¹⁶ Para el cálculo de RC1, se utiliza la expresión (3.1) con $d = 675,2$ mm.

En la Figura 3.7 se muestra la geometría del diseño del prototipo inicial [Motor Diagram]:

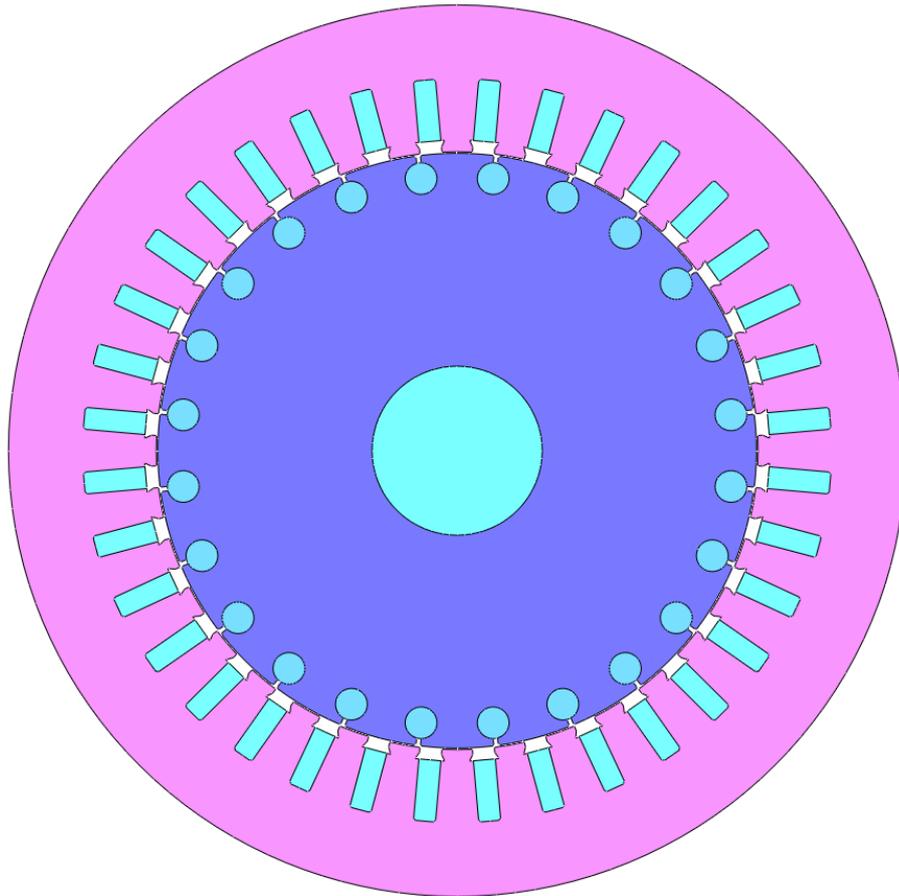


Figura 3.7. Geometría del modelo inicial en JMAG-Express Public [Motor Diagram]

Definición de materiales. Materials:

En este apartado, se especifican los materiales activos que componen cada parte del motor.

Los materiales electrotécnicos utilizados son:

- Materiales magnéticos [Magnetic Materials], utilizados en las chapas que conforman los núcleos del estator y el rotor:

El material empleado en las chapas de los núcleos es el mismo para ambos órganos. En el Anexo 1, se detallan las características del mismo. El programa cuenta con una base de datos con chapas de acero de distinto grado normalizadas de acuerdo al estándar JIS C 2552:1986 [JSOL – Stee_Sheets], se definen las características de la chapa a través de la curva de magnetización y su densidad. También permite la incorporación de nuevos materiales [Custom Steel], para ello se han de definir sus propiedades (curva de magnetización B-H, ecuación de las pérdidas en el hierro, densidad).

- Materiales eléctricos [Coil]: Devanados del rotor, y el estator.

Los materiales pertenecientes a esta categoría son cobre [Copper], aluminio [Aluminum], o un material definido por el usuario [Other]. Dichos materiales se caracterizan por su densidad, y su conductividad eléctrica.

Los motivos que justifican la elección de dichos materiales se encuentran en el Anexo 1.

La siguiente tabla recoge los materiales utilizados en las distintas partes constructivas:

Parte del motor	Material	Propiedades
Núcleo del rotor: <i>Rotor Core</i> Núcleo del estator: <i>Stator Core</i>	JSOL-Steel_Sheets	Grado: 50-A-270 (JIS) Densidad: 7600 kg/m ³
Devanado del estator: <i>Coil</i> Jaula de ardilla: <i>Cage</i>	Cobre / <i>Cooper</i>	Conductividad eléctrica: 6,45e+07 S/m Densidad: 8960 kg/m ³

Tabla 3.3. Materiales utilizados en el modelo inicial (JMAG-Express Public)

Características del devanado. Winding:

En este apartado se han de definir las características del devanado. Se han de especificar las siguientes propiedades:

- Método de conexión de las fases del estator [Connect Method]: estrella [Star] o triángulo [Delta].
- Tipo de conexión de las bobinas [Coil Connection]: serie [Series], paralelo [Parallel], o combinaciones serie-paralelo [6S, 2P (Series in Pole)] y [2S, 6P (Parallel in Pole-pair)].
- Propiedades de la bobina [Coil Property]: número de vueltas o espiras de una bobina por fase, dimensiones y geometría de la sección transversal del conductor, y el espesor del aislamiento. También se pueden introducir los valores de resistencia por fase directamente.

Según los parámetros que se escojan, existen distintas alternativas de entrada de datos [Input Item]. Al existir una correlación¹⁷ entre el número de vueltas [Turns], dimensiones del conductor [Wire Size], y el factor de llenado de ranura [Slot Fill Factor], basta con especificar dos de los tres parámetros para determinar el tercero. Los parámetros de entrada son: Resistencia por fase [Phase Resistance]; Número de espiras por fase y factor de llenado [Turns / Slot Fill Factor]; Dimensiones del conductor y factor de llenado [Wire Size /Slot Fill Factor]; o Número de espiras y dimensiones del conductor [Turns/Wire Size].

Se decide establecer como parámetros de entrada el número de espiras por fase y las dimensiones del conductor. Al escoger este método se ha de indicar al programa los siguientes parámetros:

- Número de espiras que conforman la bobina [Number of Turns].
- Tipo de geometría del conductor [Setting Type]: conductor circular [Round Wire Dimension] o conductor rectangular [Rectangle Wire Dimension].
- Dimensiones del conductor, si se trata de un conductor rectangular se ha de indicar la anchura y altura del mismo [Wire Size], si el conductor es circular se ha de proporcionar su diámetro [Wire Diameter].
- Espesor de película [Film Thickness]: Se ha de introducir el espesor de la capa de aislante que recubre cada conductor.
- Número de capas [Number of Strands]: Para devanados con conductores conectados en paralelo, se tiene que especificar su número.
- Espesor de aislamiento [Insulation Thickness]: Se ha de indicar el espesor de la capa de aislante que previene el contacto eléctrico entre los conductores y la ranura. El programa utiliza este parámetro para calcular el factor de llenado de ranura.
- Factor de llenado máximo [Maximum Slot Fill Factor]: Se ha de indicar su valor porcentual, si el programa detecta que el factor de llenado de ranura excede el valor máximo establecido lo advierte mostrando una alerta. El valor por defecto es 75%.

¹⁷ Slot fill factor = (Wire cross section area + Insulation film area) x N^o of turns / (Slot area - Insulation sheet area)

- Factor corrector de la longitud de la bobina [Correction Factor], se deja el valor que fija el programa: 1.
- Resistencia por fase [Phase Resistance]: El programa calcula la resistencia por fase con la siguiente ecuación:

$$R_{\text{phase}} = \frac{1}{\sigma} \cdot \frac{L_{\text{phase}} \cdot Kl \cdot N_{\text{turn}} \cdot N_{\text{coil}}}{S_{\text{wire}}}$$

R_{phase} : Resistencia por fase (ohm)

σ : Conductividad eléctrica del material (1/ohm/m)

L_{phase} : Longitud de la bobina (m)

Kl : Factor corrector de la longitud de la bobina

N_{coil} : Número de bobinas por fase

N_{turn} : Número de espiras por fase

S_{wire} : Sección transversal de un conductor (m²)

JMAG-Express computa la longitud de una bobina L_{phase} con la siguiente expresión:

$$L_{\text{phase}} = \text{Longitud axial de la máquina} + 2 \cdot \text{Longitud de la cabeza de bobina}$$

En devanados distribuidos el programa realiza el cálculo de la longitud de cabeza según la interpretación de la geometría de la Figura 3.8:

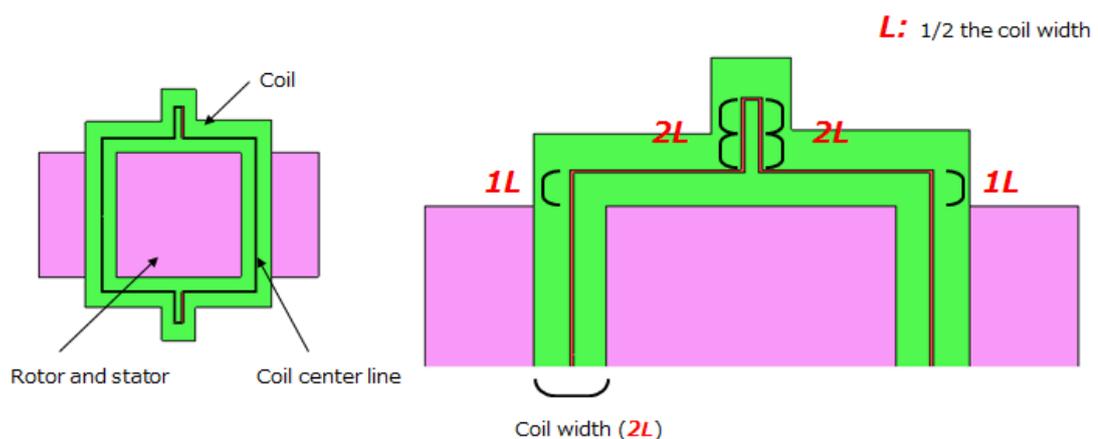


Figura 3.8. Dimensiones de la longitud de cabeza de bobina según JMAG-Express Public

$$\text{Longitud de la cabeza de bobina} = \text{Distancia entre ranuras} + 6 \cdot L$$

$$L = \frac{1}{2} \cdot \text{ancho de la bobina}$$

El programa mide la distancia entre ranuras *Distance between slots* como la longitud del arco que conecta el centro de la región de la bobina *Coil region* donde se encuentra uno de los lados de la bobina con el centro de la región de la bobina donde se inserta el otro lado (paso de ranura).

- Número de capas [Layers]: Este parámetro puede tomar dos valores, 1 para devanados de una capa, en los que cada ranura solo alberga un lado activo de bobina, o 2 para devanados de doble capa en los que dos lados activos correspondientes a dos bobinas distintas ocupan una misma ranura.
- Disposición del devanado [Winding]: En esta sección se define la forma en que los devanados se van a distribuir en las ranuras del estator. En [Winding Scheme] se ha de escoger el tipo de devanado, [Automatic] si se trata de un devanado distribuido, [Automatic (Concentrated Winding)] si se trata de un devanado concentrado, o [Manual] si es el propio usuario quien decide cómo se han de disponer las bobinas en las ranuras.

Una vez se ha decidido el tipo de devanado, el programa fija el valor del paso de ranura [Coil Pitch] en 1, y el número de capas [Layers] en 2 si se trata de un devanado concentrado. Si se opta por un devanado distribuido, se ha de fijar el valor de paso de ranura, el programa calcula el paso de ranura¹⁸ una vez se han definido el número de ranuras del estator y el número de polos, y permite realizar devanados de paso acortado (paso de ranura inferior al paso polar) escogiendo del menú desplegable un valor inferior al paso de ranura diametral. Por último, para introducir de forma manual la posición de las bobinas en las ranuras, el programa proporciona una tabla, previamente se ha de fijar en [Edith Phase] el orden de las fases [Phase Order], es decir, fijar el sentido de rotación del campo magnético.

El programa representa la disposición de las bobinas de tres formas:

Superpone el esquema del devanado sobre la geometría del motor [Motor Diagram], el programa permite visualizar cada fase por separado, o si se prefiere, conjuntamente (Figura 3.9):

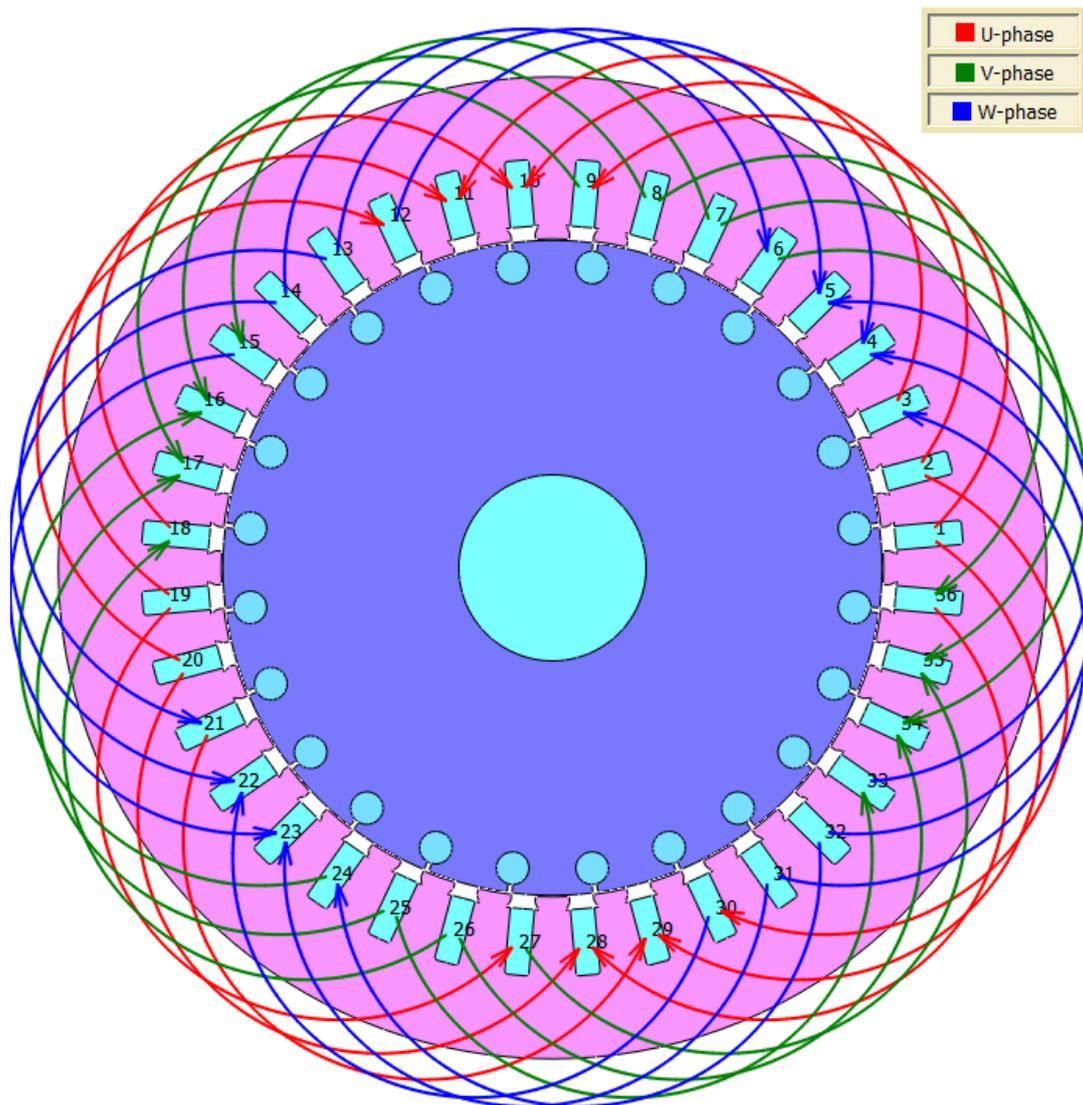


Figura 3.9. Representación de la configuración de las bobinas de las tres fases sobre la geometría del motor en JMAG-Express Public

Mediante el diagrama del devanado [Winding Diagram], donde se muestra el número de bobinas por fase, la conexión de las bobinas en cada fase (U, V, W), así como la conexión entre fases. Cada bobina se identifica con un círculo y en el interior de este se indica el número de ranura que ocupa, también muestra la posición que la bobina ocupa dentro de la ranura (UP SLOT/DOWN SLOT):

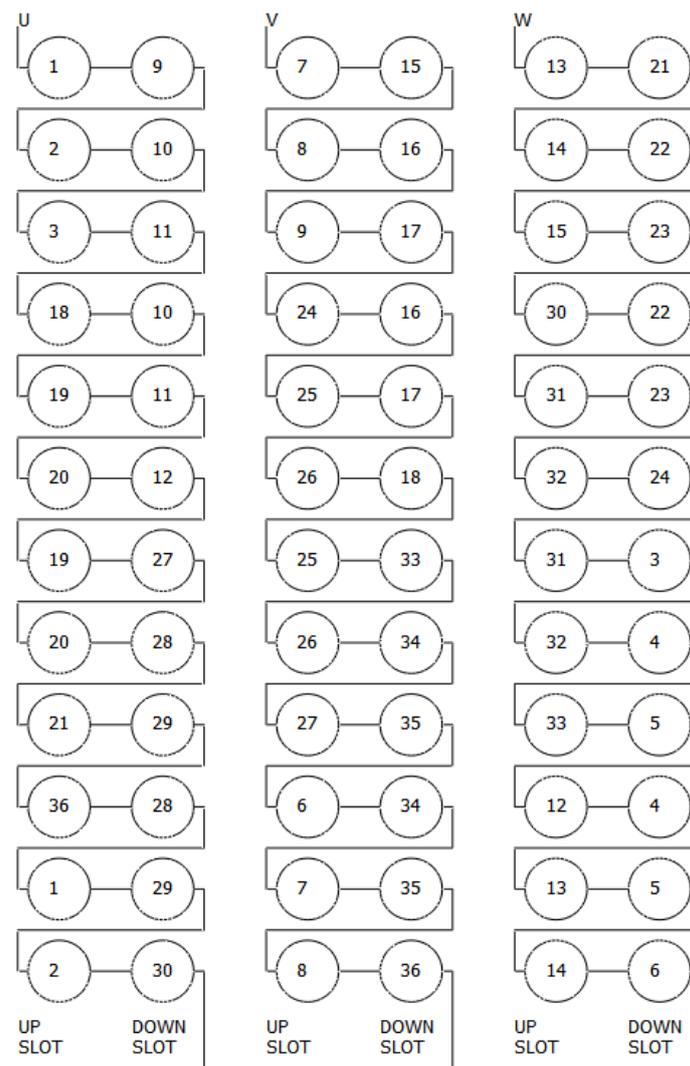


Figura 3.10. Representación de la disposición de las bobinas de las tres fases del motor mediante el diagrama del devanado [Winding Diagram] en JMAG-Express Public.

[Slot Diagram] se asemeja al esquema de representación gráfico clásico (esquema rectangular), esta representación permite apreciar fácilmente las conexiones entre las bobinas, y las ranuras en las que se encuentran insertados sus respectivos lados activos. Los lados activos del bobinado se representan por medio de rectas verticales, las cabezas de bobina se dibujan en la parte superior del esquema y las conexiones entre bobinas y los extremos libres del bobinado (principio U, final U' de la fase U) en la parte inferior. Se pueden visualizar las fases conjuntamente, o por separado.

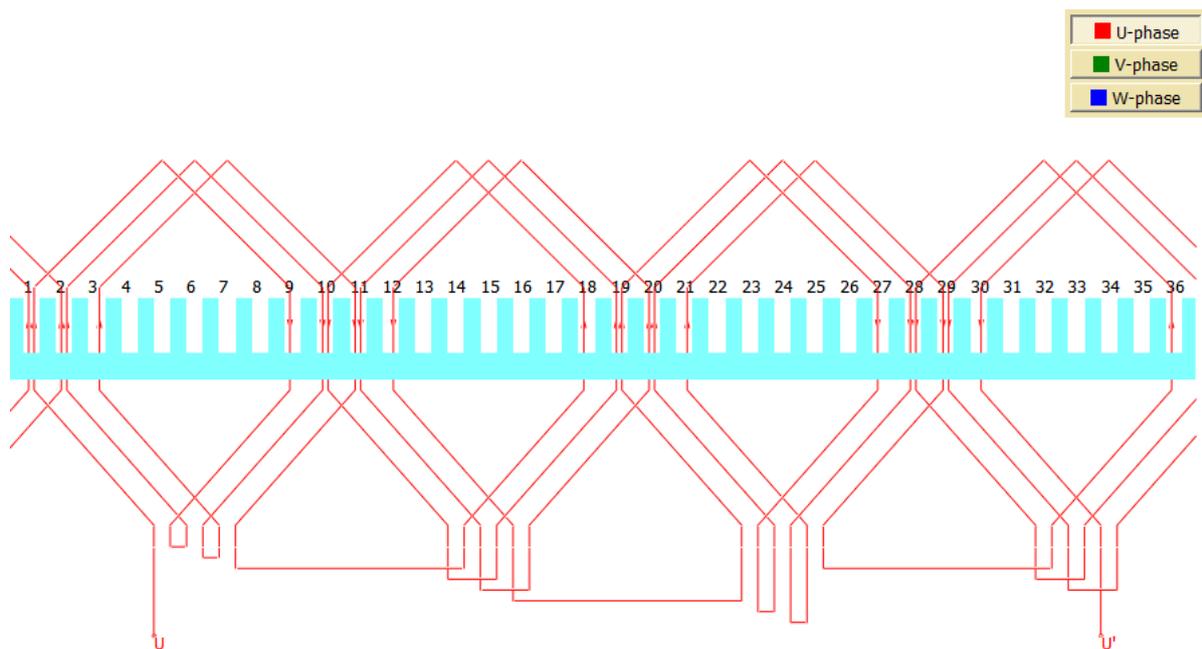


Figura 3.11. Representación de la disposición de las bobinas de la fase U del modelo inicial [Slot Diagram] en JMAG-Express: Devanado trifásico imbricado, por polos, $2p = 4$ polos, doble capa, 4 grupos polares por fase, 3 bobinas/polo/fase, 36 ranuras, 3 ranuras/polo/fase, paso de bobina acortado en 1 ranura, 1 rama en paralelo.

La Tabla 3.4 resume los valores de los parámetros descritos anteriormente:

Método de conexión / <i>Connect Method</i>	<i>Star</i>
Conexión de las bobinas / <i>Coil Connection</i>	<i>Series</i>
<i>Características de la bobina / Coil Property</i>	
Parámetros de entrada / <i>Input Item</i>	<i>Turns / Wire Size</i>
Geometría del conductor / <i>Setting Type</i>	<i>Rectangle Wire Dimension</i>
Dimensiones del conductor / <i>Wire Size</i>	22 x 7,5 mm
Espesor de película / <i>Film Thickness</i>	0,15 mm
Ramas en paralelo / <i>Number of strands</i>	1
Espesor del aislamiento / <i>Insulation Thickness</i>	0,5 mm
Factor de llenado máximo / <i>Maximum Slot Fill Factor</i>	75%
Número de capas / <i>Layers</i>	2
<i>Distribución del devanado / Winding</i>	
Tipo de devanado / <i>Winding Scheme</i>	<i>Imbricado / Automatic</i>
Paso de ranura / <i>Coil Pitch</i> ¹⁸	8

Tabla 3.4. Propiedades del devanado del diseño inicial introducidas en JMAG-Express Public

¹⁸ Paso polar: $\gamma_p = K_1 / 2p = 36 / 4 = 9$ ranuras/polo, Paso de bobina diametral $\gamma_1 = \gamma_p$, Paso acortado $\gamma_1 < \gamma_p$, $\gamma_1 = \gamma_p - \text{Acortamiento} = 9 - 1 = 8$ ranuras/bobina.

Características de la fuente de alimentación. Drive:

En esta sección se han de definir las propiedades de la fuente de alimentación [Circuit Property]. La red trifásica que ha de abastecer al motor se caracteriza por el valor máximo o valor de pico de la tensión de fase [Phase Voltage (peak)] en V, y la frecuencia de la red [Frequency] en Hz.

El valor de estos parámetros es calculado automáticamente por JMAG-Express conforme a las condiciones introducidas en el apartado de requerimientos [Requirement].

A continuación, se muestran los valores deducidos por JMAG-Express Public:

Propiedades de la fuente de alimentación / <i>Circuit Property: Three-phase Voltage Source</i>	
Valor de pico de la tensión de fase/ <i>Phase Voltage (peak), V</i>	3256
Frecuencia / <i>Frequency, Hz</i>	50

Tabla 3.5. Propiedades de la fuente de alimentación [Drive] en JMAG-Express Public

3.1.2 EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL MODELO INICIAL

Con el modelo inicial completamente definido, se procede a analizar su comportamiento mediante el estudio de los resultados generados en la evaluación del modelo con JMAG-Express Public.

Al ejecutar la simulación, el programa emite una propuesta de las dimensiones no especificadas en el cálculo analítico y muestra un resumen de sus características geométricas, físicas y operativas, estas últimas también gráficamente. Los resultados de la evaluación se muestran en el apartado de características [Characteristics], que a su vez se divide en tres categorías:

- Comparativa de diseños, consiste en una tabla que recopila las distintas propuestas de diseño estudiadas, es de gran utilidad pues permite comparar de forma rápida sus características.
- Curvas de funcionamiento, donde figuran las gráficas de las características que se relacionan en la Tabla 3.6 en función de la velocidad, salvo la variación de la fuerza magnetomotriz que es representada en función del número de ranura.

Característica	Unidad	Descripción
Par	N·m	Par medio del motor cuando ha alcanzado el régimen permanente, es decir, cuando las fluctuaciones en el tiempo de la corriente o la velocidad son fijas y las variaciones en el par son estables. Es función de la resistencia $(1 - s) / s \cdot r_2$ en el circuito equivalente en T del motor (Figura 3.12).
Rendimiento	%	Rendimiento del motor.
Potencia	W	Potencia del motor.
Pérdidas en el cobre	W	Pérdidas Joule totales suma de las pérdidas en el cobre del rotor y el estator.
Pérdidas en el hierro	W	Suma de las pérdidas por histéresis y corrientes parásitas en el núcleo del estator.
Corriente en una fase del estator	A	Valor eficaz de la corriente del estator por fase.
Pérdidas en el cobre del estator	W	Pérdidas en la resistencia del estator, r_1 en el circuito equivalente en T del motor (Figura 3.12)
Pérdidas en el cobre del rotor	W	Pérdidas en la resistencia del rotor, r_2 en el circuito equivalente en T del motor (Figura 3.12)
Factor de potencia	-	Cociente entre la potencia activa y la potencia aparente del motor.
Corriente de magnetización	A	Corriente necesaria para producir el flujo magnético en el entrehierro.
Fuerza magnetomotriz	A	Valor total de la fuerza magnetomotriz entre las fases U, V y W cuando la amplitud de la corriente en la fase U es 1 A.

Tabla 3.6. Resumen de las características mostradas en los gráficos de JMAG-Express Public

El usuario también puede elegir el tipo de gráfico a representar [Graph Type]: [Series Graph] muestra las curvas de los parámetros antes mencionados de los distintos modelos o casos evaluados en todo el rango de funcionamiento, y [Response Graph] que traza la curva utilizando los valores de los parámetros de funcionamiento a representar resultantes de los distintos casos estudiados en función de los parámetros que se hayan variado (dimensiones, materiales etc.) para un punto de funcionamiento concreto, en el caso del motor de inducción se ha de especificar la velocidad en rpm de dicho punto [Target Point]. Se pueden escoger los parámetros a representar tanto en el eje de abscisas como en el eje de ordenadas, además se pueden representar distintos parámetros de funcionamiento en un mismo gráfico. Los datos representados para distintos valores de velocidad, etc. se pueden revisar en una tabla asociada a cada gráfico que es mostrada al pulsar sobre este.

Informe de características, donde se muestran los resultados del análisis para una velocidad concreta definida por el usuario [Machine Constant] así como las propiedades del devanado [Winding], propiedades de la fuente de alimentación [Drive], dimensiones [Dimensions], propiedades de masa (kg) volumen (mm^3) e inercia ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$) totales y de cada parte del motor [Mass Property], y propiedades de los materiales empleados en cada parte del motor (núcleos magnéticos, devanados del estator, y jaula de ardilla) [Materials] que definen el prototipo.

El apartado [Machine Constants], contiene los parámetros del circuito equivalente [Equivalent Circuit Parameters], las características en el arranque [Starting Characteristics], características concernientes a la parte eléctrica [Electric Part], potencia [Power], pérdidas [Loss], y circuito eléctrico [Electric Circuit]. En cada categoría se recopilan las siguientes características Tabla 3.7:

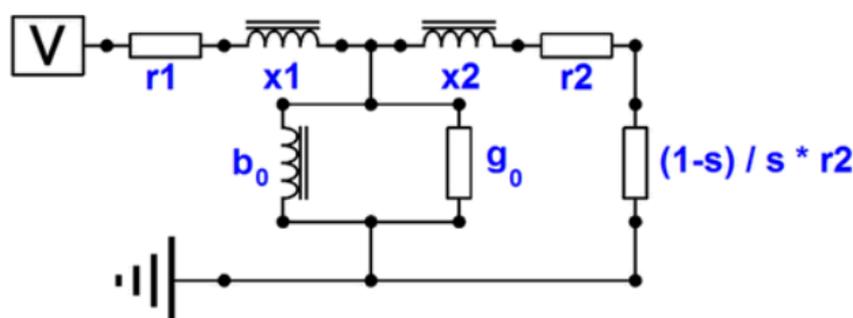


Figura 3.12. Circuito equivalente en T por fase del motor (JMAG-Express Public).

Característica		Unidad	Descripción
Parámetros del circuito equivalente <i>Equivalent Circuit Parameters</i> (Figura 3.12)	Reactancia de dispersión del estator	ohm	x1
	Reactancia de dispersión del rotor	ohm	x2
	Resistencia del devanado del estator	ohm	r1
	Resistencia del devanado del rotor	ohm	r2
	Conductancia equivalente de pérdidas en el hierro	S	g0
	Susceptancia magnetizante	S	b0
	Inductancia magnetizante	H	$L_{magnetizante} = 1 / (b0 \cdot 2\pi \cdot f)$ f: Frecuencia nominal, Hz
Características en el arranque <i>Starting characteristics</i>	Impedancia en el arranque (Parte real)	ohm	Impedancia (real) total del circuito equivalente en T cuando s = 1
	Impedancia en el arranque (Parte imaginaria)	ohm	Impedancia (imaginaria) total del circuito equivalente en T cuando s = 1
	Corriente en el arranque	A	Corriente por fase cuando s = 1
	Par en el arranque	N·m	Par cuando s = 1

Parte eléctrica <i>Electric Part</i>	Corriente en una fase del estator	A	Valor eficaz de la corriente del estator por fase.
	Densidad de corriente en el conductor	A/mm ²	Utiliza las siguientes expresiones: Densidad de corriente en el conductor = Corriente eficaz / (Nº ramas en paralelo · Sección transversal del conductor) Sección transversal del conductor = (Sección transversal de 1 conductor · Nº conductores en paralelo)
Potencia <i>Power</i>	Par	N·m	Par medio del motor. Según el valor de $(1 - s) / s \cdot r_2$ en el circuito equivalente en T del motor.
	Rendimiento	%	Rendimiento del motor.
	Potencia	W	Potencia del motor.
	Factor de potencia	-	Potencia activa / potencia aparente.
Pérdidas <i>Loss</i>	Pérdidas en el cobre	W	Pérdidas Joule totales suma de las pérdidas en el rotor y el estator.
	Pérdidas en el hierro	W	Pérdidas en el hierro del estator.
	Pérdidas en el cobre del estator	W	Pérdidas en r_1 en el circuito equivalente en T del motor.
	Pérdidas en el cobre del rotor	W	Pérdidas en r_2 en el circuito equivalente en T del motor.
Circuito eléctrico <i>Electric Circuit</i>	Corriente de magnetización	A	Corriente necesaria para producir el flujo magnético en el entrehierro.

Tabla 3.7. Características contempladas en la sección [Machine constant] JMAG-Express

Public

A continuación, se muestran los parámetros que definen el diseño del prototipo inicial y sus respectivos valores (

Figura 3.13, Figura 3.14):

Dimension		
All	Outer Diameter, mm	1098
	Gap Length, mm	1.8
	Stack Height, mm	867.5
	Number of Poles	4
stator : so_006	Number of Slots	36
	Outside Diameter, mm	1098
	Inside Diameter, mm	736.4
	Slot Width, mm	27
	Core Back Width, mm	91
	Tooth Tang Depth, mm	14
	Wedge Length, mm	8.06
	Wedge Depth, mm	4.583
	Teeth Top R, mm	0.6743
	Slot Bottom R, mm	2.7
im_rotor : rim_001	Number of Secondary Conductor	24
	Outside Diameter, mm	732.8
	Shaft Diameter, mm	208.1
	Bar Diameter, mm	39
	Bar Center Depth, mm	28.4
	Slot Opening Width, mm	5.4
End Ring	Teeth Top R, mm	2.015
	Section Type	Trapezoid
	Height, mm	28.18
	Upper Width, mm	84.55
	Lower Width, mm	84.55
	Offset, mm	0
	Effective Section Area, %	100
Resistance, ohm	1.408e-05	

Winding	
Connection Type	Star Connection
Series Number	12
Parallel Number	1
Number of Turns	4
Setting Type	Rectangle Wire Dimension
Wire Width, mm	22
Wire Height, mm	7.5
Film Thickness, mm	0.15
Number of Strands	1
Insulation Thickness, mm	0.5
Slot Fill Factor, %	74.57
Max Slot Fill Factor, %	75
Correction Factor	1
Slot Area, mm ²	2043
Conductor Area, mm ²	660
Phase Resistance, ohm	0.01357
Winding	Auto Winding
Number of Layers	2
Coil Pitch	8
Coil Current Density(@1A), A/mm ²	6.061e-03

Drive	
Phase Voltage(peak), V	3256
Frequency, Hz	50

Figura 3.13. Características del modelo MA en JMAG-Express Public: Dimensiones [Dimensions], propiedades del devanado [Winding] propiedades de la fuente de alimentación [Drive]

Mass Property		
Total	Total Weight, kg	6193
	Total Volume, mm ³	7.953e+08
Stator	Stator Core - Mass, kg	2851
	Stator Core - Volume, mm ³	3.751e+08
	Coil - Mass, kg	760.4
	Coil - Volume, mm ³	8.487e+07
	Part Weight(so_006)	3611
Rotor	Rotor Core - Mass, kg	2359
	Rotor Core - Volume, mm ³	3.105e+08
	Cage - Mass, kg	222.8
	Cage - Volume, mm ³	2.487e+07
	Part Weight(rim_001)	2582
Inertia, kg m²	Rotor Core	162.8
	Cage	25.5
	Total	188.3

Materials		
Stator Core	Category	JSOL - Steel_Sheets
	Type	50A270
	Density, kg/m ³	7600
Coil	Category	Copper
	Density, kg/m ³	8960
	Drive Temperature, degC	20
	Base Temperature, degC	20
	Temperature Correction Factor, ppm/degC	3810
Rotor Core	Category	JSOL - Steel_Sheets
	Type	50A270
	Density, kg/m ³	7600
Cage	Category	Copper
	Conductivity, S/m	6.45e+07
	Density, kg/m ³	8960
Common Material Properties	Iron Loss Correction Factor	1

Figura 3.14. Características del modelo MA en JMAG-Express Public: Propiedades de masa [Mass Property], y materiales utilizados [Materials].

Los resultados obtenidos en la evaluación con JMAG-Express Public a la velocidad asignada 1490 rpm se muestran en la Figura 3.15:

Machine Constant		
Revolution Speed	N, rpm	1490
Equivalent Circuit Parameters	Primary leakage reactance, ohm	0.2777
	Secondary leakage reactance, ohm	0.2777
	Primary resistance, ohm	0.01357
	Secondary resistance, ohm	0.04482
	Iron loss equivalent conductance, S	3.786e-04
	Excitation susceptance, S	0.03281
	Exciting Inductance, H	0.09701
Starting Characteristics	Starting Impedance (real part), ohm	0.05761
	Starting Impedance(imaginary part), ohm	0.553
	Starting Current(RMS), A	4141
	Starting Torque, Nm	1.441e+04
Electric Part	Primary Current(RMS), A	525.5
	Wire Current Density, A/m ²	3.185e+06
Power	Torque, Nm	9612
	Efficiency, %	12.14
	Power, W	1.434e+06
	Power Factor	0.07629
Loss	Copper Loss, W	1.405e+05
	Iron Loss, W	5452
	1st Current Loss, W	6.498e+04
	2nd Current Loss, W	7.549e+04
Electric Circuit	Magnetizing Current, A	71.35

Figura 3.15. Características de funcionamiento del diseño inicial MA a la velocidad asignada (Machine Constant, JMAG-Express Public)

Exportación de los resultados obtenidos en la evaluación con JMAG-Express Public

Una vez, obtenidas las distintas características del diseño, JMAG-Express Public permite exportar los resultados, bien mediante un archivo PDF que resume las distintas curvas características analizadas, y las tablas con las propiedades de una de las propuestas del diseño que se esté visualizando en el momento de generar el archivo, o un archivo de datos CSV con las propiedades del modelo y los datos calculados por el programa utilizados en la representación de los diferentes gráficos estudiados, y si se precisa realizar un estudio más detallado del prototipo, el programa genera un archivo compatible con otra versión de JMAG, JMAG Desginer, y otros software de diseño de máquinas eléctricas etc. como SPEED.

También, se puede exportar su geometría para ser utilizada en un programa CAD externo, en un archivo DXF. Otra alternativa que ofrece JMAG-Express Public es la posibilidad de exportar los resultados para programas de simulación y diseño basado en modelos, uno de los softwares compatibles es MATLAB/Simulink. Para ello el programa crea un modelo JMAG-RT y genera un archivo de datos (.rtt) que incluye información del motor. Este modelo se puede insertar en diagrama de circuito como un bloque más.

3.1.3 ANÁLISIS Y CONCLUSIONES EXTRAIDAS DE LA EVALUACIÓN DEL MODELO INICIAL

Para comprobar si el diseño inicial MA cumple con las especificaciones de partida se procede a contrastar los resultados obtenidos en la evaluación de JMAG-Express Public con los requerimientos del motor.

	n (rpm)	s	Parámetro	Modelo MA	Especificaciones
Características en el arranque	0	1	I_s (A)	4141	3404
			T_s (N·m)	14410	18201
			I_s/I_N	7,88	5,8
			T_s/T_N	1,5	0,8
Características a la velocidad asignada	1490	0,0067	I_{1N} (A)	525,5	587
			J_1 (A/mm ²)	3,185	3,6
			T_N (N·m)	9612	22751,7
			η (%)	12,14	97
			P_N (kW)	1434	3550
			$\cos \phi_{1N}$	0,07629	0,9
			I_0^{19} (A)	71,35	146,725
			I_0/I_{1N}	0,14	0,25

Tabla 3.8. Comparativa de las características del modelo inicial MA con las especificaciones.

¹⁹ $I_0 \sim I_\mu$

I_0 : Corriente en vacío, I_μ : Corriente de magnetización

En la Tabla 3.8 se constata que el modelo no cumple con las especificaciones. El par T_N , la potencia P_N , rendimiento η , y la corriente de magnetización I_μ en condiciones asignadas son muy inferiores a los valores requeridos, la corriente absorbida por fase del estator I_{1N} , se aproxima a el valor fijado en las especificaciones, pero sigue siendo inferior. Atendiendo a las características en el arranque, se observa que el par en el arranque T_s es bastante inferior al de las especificaciones, y la corriente I_s es superior. Un par en el arranque bajo puede causar que el motor sea incapaz de arrancar o que el motor trate de arrancar varias veces con el agravante de una corriente muy elevada asociada. Una corriente excesiva, aunque solo sea durante una pequeña fracción de tiempo puede causar caídas de tensión considerables, y calentamientos extremos en las distintas partes de la máquina que menguan la vida útil de los componentes.

Tras el análisis realizado se concluye que es preciso modificar el diseño inicial, para que se ajuste mejor a las especificaciones.

Una posible solución sería modificar el deslizamiento al cual se da el par nominal²⁰. Sin embargo, una disminución de la velocidad o un aumento del deslizamiento implica un aumento de las pérdidas en el cobre, y en consecuencia afecta negativamente al rendimiento²¹.

Uno de los inconvenientes del software es su falta de precisión en la representación de los resultados dado que calcula muy pocos valores para definir las distintas curvas, además el ajuste de la misma es realizado por el programa mediante una interpolación lineal, teniendo en cuenta que los valores numéricos a velocidades intermedias son obtenidos en base a esa interpolación, las curvas y por ende los valores extraídos de ella pueden diferir de forma considerable respecto a los reales. Este hecho es más acusado en el análisis a velocidades cercanas a la asignada, pues es muy próxima a la velocidad síncrona del motor, instante en el cual las características son nulas, y las características calculadas en el instante anterior son muy elevadas, de manera que interpola entre dos valores muy extremos, y consecuentemente el error cometido es mayor. Por este motivo, se han de aceptar los resultados extraídos con JMAG-Express Public con cierta reserva.

²⁰ $T \sim s$ en la zona estable de la curva, para deslizamientos s bajos.

²¹ $\eta = (1 - s)$

3.2 OPTIMIZACIÓN DEL MODELO INICIAL

Del análisis de los resultados emitidos por JMAG-Express Public, se extrajo la conclusión de que era preciso optimizar el diseño inicial MA para que verificase las especificaciones pretendidas. A continuación, se va a proceder a analizar los posibles parámetros a modificar, y el modo en que estos afectan al comportamiento del motor.

La elección y variación de los parámetros de diseño, depende de la función objetivo que se decida optimizar. El programa cuenta con una herramienta de análisis de sensibilidad que muestra el grado de influencia que los parámetros ejercen sobre el objetivo que se pretende mejorar. Una vez se conocen los parámetros que influyen de forma más significativa, se realiza un análisis paramétrico de los mismos, para ver el modo en que afectan a las características operativas del motor. La elección de los parámetros de diseño se ha realizado en base a el análisis de sensibilidad y a la bibliografía consultada, pues el programa no contempla todos los parámetros que pueden ejercer una gran influencia en el desempeño del motor.

En la primera etapa del proceso, la elección de los parámetros de diseño y sus respectivos valores, irá encaminada a la optimización de las características del motor en condiciones asignadas, prestando especial atención al par, y rendimiento del mismo, tratando de no comprometer el resto de características de funcionamiento.

3.2.1 ESTUDIO DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO DEL MODELO MA. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Tal y como se ha mencionado anteriormente, es preciso conocer los posibles parámetros susceptibles de modificar en base a las variables operativas del motor que se deseen mejorar.

Con el propósito de obtener una orientación en la elección de las variables de diseño se procede a realizar un estudio de las mismas, en base a los resultados obtenidos mediante el análisis de sensibilidad, que serán contrastados con la bibliografía consultada para comprobar la coherencia en el análisis que realiza el programa.

De las conclusiones del estudio se decidirán los parámetros que serán objeto de análisis paramétrico.

Análisis de sensibilidad. *Sensitivity Analysis*

Esta herramienta de JMAG-Express Public, permite visualizar en qué medida los parámetros de diseño que intervienen en el análisis de sensibilidad, influyen en la característica examinada.

Para medir el grado de influencia que los parámetros de diseño ejercen sobre la característica analizada, JMAG-Express Public utiliza un parámetro, sensibilidad *Sensitivity*. La sensibilidad de los parámetros de diseño se obtiene de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\text{Sensibilidad} = \frac{dr}{dp} \cdot \left(\frac{1}{r}\right) \quad (3.2)$$

p: Parámetro de diseño

r: Característica analizada

El rango de cálculo de las dimensiones para obtener la sensibilidad es el 10% de la longitud del entrehierro [GAP]. La sensibilidad se obtiene añadiendo o sustrayendo valores (5% de la longitud del entrehierro) a la geometría sobre la que se está obteniendo la sensibilidad. De manera que, cada vez que se realiza un análisis las dimensiones pueden variar levemente, por este motivo para obtener resultados más fiables no conviene realizar muchos análisis consecutivamente.

El análisis de sensibilidad obtiene los parámetros de diseños más eficaces para lograr la característica pretendida [Objective Function]²². Para ello se ha de indicar la característica de funcionamiento que se desee estudiar. El programa no calcula la sensibilidad a una velocidad concreta²³, de manera que no se ha de especificar. Para el caso de un motor de inducción:

- Par, *Torque*.
- Rendimiento, *Efficiency*.
- Pérdidas en el cobre, *Copper Loss*.
- Pérdidas en hierro, *Iron Loss*.
- Reactancia de dispersión del estator, *Primary Leakage Reactance*.
- Reactancia de dispersión del rotor, *Secondary Leakage Reactance*.
- Resistencia del devanado del estator, *Primary Resistance*.
- Resistencia del devanado del rotor, *Secondary Resistance*.
- Conductancia equivalente de pérdidas en el hierro, *Iron Loss Equivalent Conductance*.
- Susceptancia magnetizante, *Excitation Susceptance*.
- Valor eficaz de la corriente en una fase del estator, *Primary Current*.

Los parámetros de diseño que intervienen en el análisis de sensibilidad se dividen en:

- Parámetros geométricos [Dimensions]: Diámetro exterior del estator (SD1), diámetro interior del estator (SD4), ancho de ranura del estator (SW3), altura del yugo del estator (SW4), profundidad de la boca de las ranuras del estator (ST), longitud de la cuña de cierre (SW5), profundidad de la cuña de cierre (STD2), diámetro exterior del rotor (RD1), diámetro del eje (RD2), diámetro de las barras del rotor (RL1), distancia a la que se encuentran los centros de las barras respecto a el diámetro exterior del rotor (RC1), abertura de la boca de las ranuras del rotor (RW1).

²² El tipo de función objetivo difiere dependiendo del tipo de motor.

²³ En algunos tipos de motores, en función de la característica analizada, se ha de indicar la velocidad, para obtener la sensibilidad a esa velocidad concreta.

- Parámetros del devanado [Winding]: Número de espiras por fase que componen la bobina (Number of Turns).
- Parámetros de la fuente de alimentación [Drive]: Valor de pico de la tensión de fase (Phase Voltage (peak)).

Tras indicarle al programa la función objetivo, se ejecuta el análisis. Al finalizar muestra un listado con los parámetros de diseño que han intervenido en el estudio ordenados según el grado de influencia. La magnitud del grado de influencia se representa gráficamente con una barra, cuanto mayor sea la longitud de la barra, más efectivo será el parámetro de diseño correspondiente en la optimización de la característica.

Tal y como se ha comentado anteriormente, la elección y ajuste de los parámetros irá encaminada a la mejora de las características en condiciones asignadas. Para ello se va a realizar el análisis de sensibilidad a las características de par y rendimiento del motor. Dado que la mejora en el rendimiento depende en gran medida de la limitación de las pérdidas del motor también se efectuará el análisis de sensibilidad de las pérdidas en el cobre, y el hierro. Otro factor a tener en cuenta es la relación que guarda el rendimiento con el factor de potencia²⁴, son inversamente proporcionales, para tratar de no modificar el factor de potencia sin perjudicar el rendimiento es preciso que la corriente absorbida aumente en menor medida que el rendimiento, sin embargo, una corriente menor puede afectar negativamente al par máximo desarrollado por la máquina. Las pérdidas en el estator²⁵ ($R_1 \cdot I_{1N}^2$) son inversamente proporcionales al cuadrado del rendimiento y al cuadrado del factor de potencia.

²⁴

$$\eta_N = \frac{P_N}{3 \cdot V_{1N} \cdot I_{1N} \cdot \cos \phi_{1N}}$$

²⁵

$$I_{1N} = \frac{P_N}{3 \cdot V_{1N} \cdot \eta_N \cdot \cos \phi_{1N}}$$

Análisis de sensibilidad del par

En la Figura 3.16 se muestran los resultados del análisis.

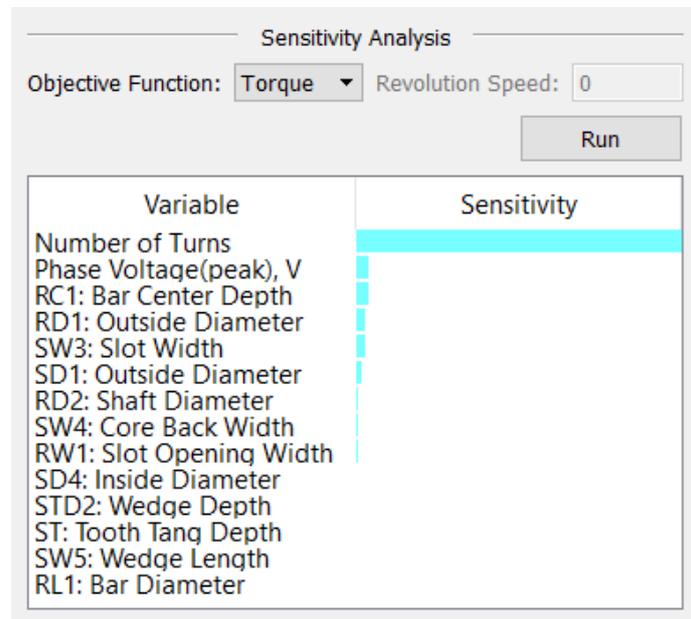


Figura 3.16. Análisis de sensibilidad del par del modelo MA en JMAG-Express Public

Atendiendo a los resultados se puede concluir que los parámetros cuyo ajuste repercutirá de forma más notable en la característica de par son:

- Número de espiras [Number of Turns].
- Valor de pico de la tensión de fase [Phase Voltage (peak)].
- Distancia a la que se encuentran los centros de las barras respecto el diámetro exterior del rotor [RC1].
- Diámetro exterior del rotor [RD1].
- Ancho de las ranuras del estator [SW3].

Análisis de sensibilidad del rendimiento

Los parámetros resultantes del análisis de sensibilidad del rendimiento, se muestran en la Figura 3.17.

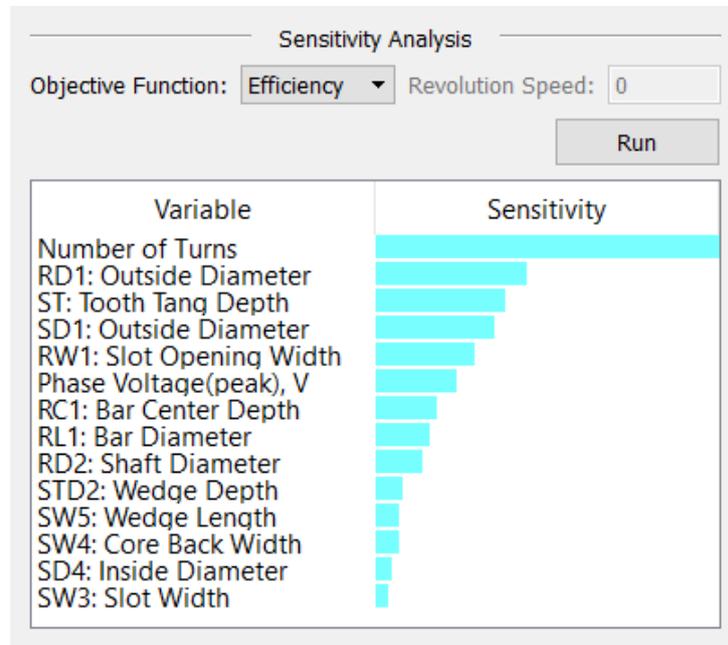


Figura 3.17. Análisis de sensibilidad del rendimiento del modelo MA en JMAG-Express Public

A razón de los resultados, se puede concluir que los parámetros cuyo ajuste repercutirá de forma más notable en el rendimiento del motor son:

- Número de espiras [Number of Turns].
- Diámetro exterior del rotor [RD1].
- Profundidad de la boca de las ranuras del estator [ST].
- Diámetro exterior del estator [SD1].

Análisis de sensibilidad de las pérdidas en el cobre

En la Figura 3.18, se muestran los resultados del análisis de sensibilidad de las pérdidas en el cobre.

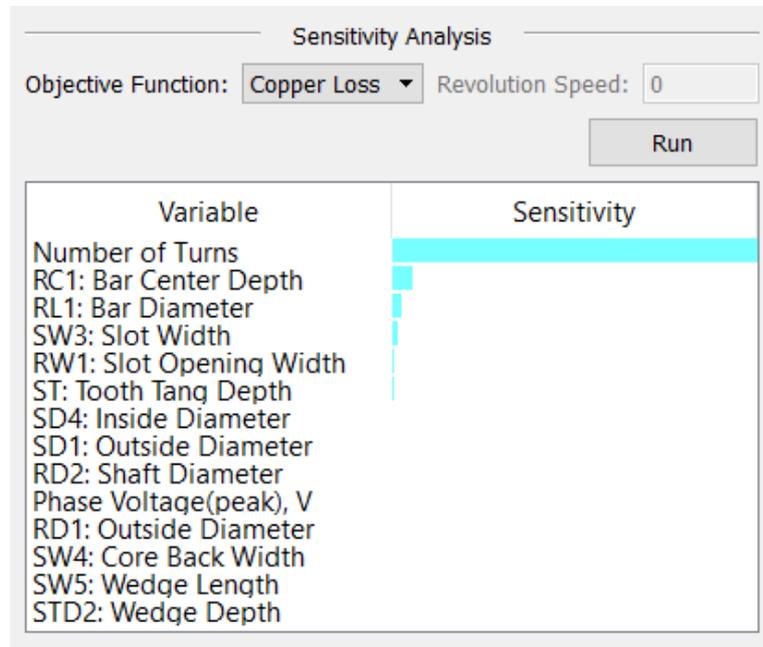


Figura 3.18. Análisis de sensibilidad de las pérdidas en el cobre del modelo MA en JMAG-Express Public

Analizando los resultados, se deduce que los parámetros cuyo ajuste repercutirá de forma más notable en el rendimiento del motor son:

- Número de espiras [Number of Turns].
- Distancia a la que se encuentran los centros de las barras respecto el diámetro exterior del rotor [RC1].
- Ancho de las ranuras del estator [SW3].
- Diámetro de las barras del rotor [RL1].

Análisis de sensibilidad de las pérdidas en el hierro

En la Figura 3.19, se resumen los parámetros de diseño organizados de mayor a menor grado de influencia en las pérdidas de los núcleos magnéticos.

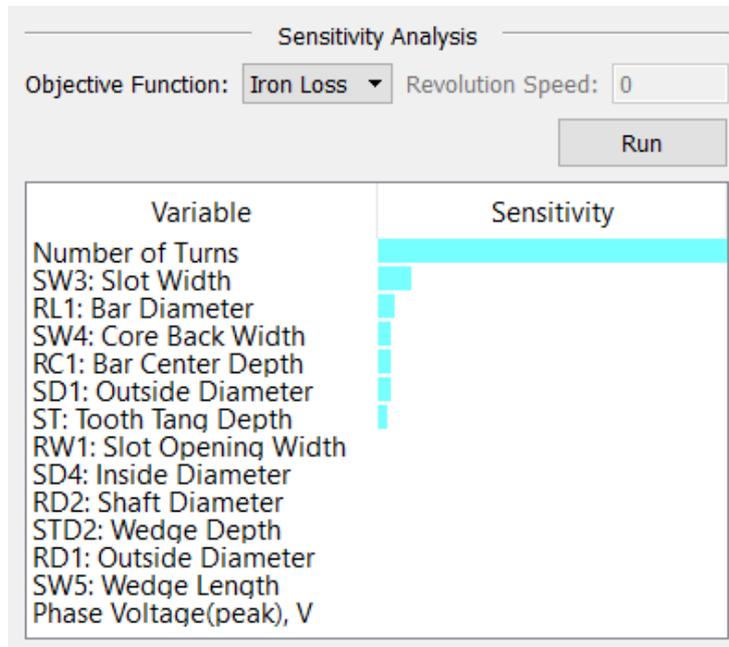


Figura 3.19. Análisis de sensibilidad de las pérdidas en el hierro del modelo MA en JMag-Express Public

Los resultados evidencian que los parámetros de diseño potencialmente eficaces en la mejora de las pérdidas en el hierro son:

- Número de espiras [Number of Turns].
- Ancho de las ranuras del estator [SW3].
- Diámetro de las barras del rotor [RL1].
- Altura del yugo del estator [SW4].

Conclusiones extraídas del análisis de sensibilidad. Selección de los parámetros de diseño

Conforme al análisis de sensibilidad el parámetro que mayor influencia ejerce en ambas características es el número de espiras por bobina. Sin embargo, aumentar o reducir su valor no es aconsejable²⁶ ya que puede suponer valores considerables de inducción magnética en los núcleos del motor (si se reduce su número) que incrementan las pérdidas y la temperatura del mismo provocando daños en sus componentes, o valores de inducción magnética muy bajos (si se aumenta su número) con lo que no se estaría haciendo un aprovechamiento óptimo de los materiales activos. En principio se descarta el estudio de este parámetro.

El diámetro exterior del rotor también parece ejercer gran influencia en ambas características, de su ajuste derivan otros cambios en la geometría que pueden estar involucrados en la mejora de la característica y que el programa no contempla, como el aumento del entrehierro manteniendo el diámetro interior del estator fijo, la disminución del paso polar al encontrarse las barras más próximas entre sí pues el número de ranuras permanece igual. O la disminución de la altura del yugo si el diámetro del eje no se modifica.

Por ejemplo, el valor tan bajo de corriente de magnetización (inferior al 20% de la corriente asignada) es debido a que la relación entre el paso polar y el entrehierro es bastante grande y el grado de saturación es bajo. De lo que se deduce que los núcleos están ligeramente sobredimensionados o bien que el entrehierro es demasiado estrecho y habría que aumentarlo. Dicho cambio permite reducir las dimensiones del motor y las pérdidas debidas a la pulsación del flujo en los núcleos. Otra alternativa sería reducir el diámetro exterior para incrementar el grado de saturación en el yugo del núcleo del estator. Con lo que se consigue reducir el volumen y el peso del motor.

En la documentación consultada, se informa de las posibles causas que provocan un bajo rendimiento del motor y la forma de atenuarlas según se indica a continuación:

- Pérdidas en los devanados del estator elevadas. Posibles soluciones:
 - Aumentar la sección de los conductores del estator disminuyendo la densidad de corriente en los mismos, o incrementando el espacio destinado a los conductores en las ranuras. (Disminución de la resistencia por fase)

²⁶ $E_1 = 4,44 \cdot \xi_{b1} \cdot N_1 \cdot f_1 \cdot \Phi_M$

- Disminuir el número de espiras o el paso de ranura.
- Disminuir la longitud de las cabezas de bobina, parte de la bobina que se encuentra fuera del núcleo magnético y que por lo tanto no participa en la conversión de energía, de este modo se reducen las pérdidas de carácter resistivo y disminuye el flujo de dispersión debido a las cabezas de bobina.
- Mejorar de la conductividad térmica del aislante que recubre los devanados, de este modo se mejora el funcionamiento del motor al reducir su temperatura.
- Incrementar el factor de potencia. Disminuyendo las reactancias de dispersión del rotor y el estator o bien aumentando la reactancia magnetizante, disminuyendo el entrehierro o incrementando el número de espiras.
- Pérdidas en el hierro de los núcleos elevadas. Posibles soluciones:
 - Disminuir la densidad de flujo incrementando el número de espiras del estator o el paso de ranura e incrementar la longitud axial de la máquina o el diámetro exterior del estator.
 - Utilizar una chapa magnética con mejores prestaciones (menores pérdidas específicas).
- Pérdidas adicionales (reparto no uniforme de la corriente en la sección de un conductor fundamentalmente en el arranque instantáneo en el cual el desplazamiento de corriente o efecto piel es más acusado debido al valor de la frecuencia en el rotor en ese instante, existencia de campos magnéticos armónicos, pulsaciones de inducción magnética producidas por las ranuras). Posibles soluciones:
 - Utilizar una combinación distinta de ranuras en el estator y el rotor, K_1/K_2 .
 - Aumentar el espesor del entrehierro.
 - Modificar la inclinación de las barras del rotor.
 - Reducir la abertura de las ranuras, o utilizar cuñas de cierre de material magnético. De este modo la distorsión de la distribución de flujo en el entrehierro provocada por la presencia de ranuras, y que dan lugar a una serie de armónicos en el mismo, se reducen.

- Pérdidas en las barras del rotor. Posibles soluciones:
 - Aumentar la sección transversal de las barras y de los anillos de c.c., o emplear materiales de menor resistividad, de este modo disminuye la resistencia del rotor.
 - Disminuir el número de espiras del estator o el paso de ranura, de este modo la corriente que circula por las barras disminuye.

Para que el par máximo, y en consecuencia el par nominal se den en deslizamientos pequeños mejorando el rendimiento del motor, es preciso que la resistencia del rotor sea baja. La geometría de las ranuras del rotor juega un papel significativo en este sentido. Con unas barras más largas en proporción a la anchura, de mayor sección, y ubicadas próximas a la superficie exterior del rotor se consigue ese perfil. Este diseño tendrá baja resistencia dada su gran sección, y valores de reactancia de dispersión más bajos dada la proximidad de las barras al entrehierro (disminución de los flujos de dispersión). Sin embargo, un valor menor de resistencia y reactancia de dispersión del rotor implica un par mayor y una corriente más elevada en el arranque. Si también se precisa limitar el par máximo un valor de reactancia de dispersión bajo no es adecuado, aunque se puede resolver alargando aún más las barras o disponiéndolas más alejadas del entrehierro. En el caso de la geometría circular los parámetros que pueden ser ajustados son el diámetro de las barras, la abertura de las bocas de la ranura, y la profundidad a la que se encuentran sus centros respecto al diámetro exterior del rotor. Luego, la geometría circular de las barras del rotor del modelo MA apenas permite variar las características mencionados. Por este motivo también se va a estudiar la posibilidad de modificar la forma de las ranuras del rotor, aunque en principio el estudio de los parámetros de diseño irá enfocado a la mejora de las características asignadas del modelo MA preservando la geometría considerada inicialmente.

El efecto que ejerce la geometría de las ranuras del rotor y las barras conductoras alojadas en su interior, se puede extender a la geometría de las ranuras del estator: ranuras más profundas en proporción a la anchura afectan a la reactancia de dispersión, su valor se incrementa, por lo tanto, el par y la corriente absorbida disminuyen.

Finalmente, se escogen los siguientes parámetros de diseño que serán estudiados mediante el análisis paramétrico que realiza JMAG-Express Public:

Derivados del análisis de sensibilidad:

- Variación del diámetro interior del rotor [RD1], manteniendo las dimensiones del núcleo del estator.
- Variación del ancho de ranura del estator [SW3].
- Distancia de los centros de las barras respecto el diámetro exterior del rotor [RC1].
- Profundidad de la boca de ranura del estator [ST], modificamos de este modo la sección de la ranura, y aumentamos o reducimos la reactancia de dispersión.
- Diámetro de las barras del rotor [RL1].

Derivados de la documentación consultada y que el análisis de sensibilidad no contempla:

- Espesor del entrehierro [GAP].

3.2.2 ESTUDIO DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO DEL MODELO MA. ANÁLISIS PARAMÉTRICO

Tras determinar los parámetros de diseño idóneos para mejorar las características de par y rendimiento del diseño inicial MA, se hará un estudio de todos ellos en el modo paramétrico *Parametric Mode* de JMAG-Express Public para analizar su repercusión en el funcionamiento del motor.

Modo paramétrico. *Parametric Mode*

El modo paramétrico de JMAG-Express Public realiza una evaluación simultánea de las características de funcionamiento del motor a medida que va modificando el parámetro de diseño considerado conforme a las indicaciones dadas por el usuario. Al terminar, muestra los resultados de forma gráfica, permitiendo comparar las distintas características operativas del motor para cada caso generado en una misma gráfica.

Los parámetros de diseño que pueden ser evaluados en el modo paramétrico, se muestran con un fondo coloreado en amarillo en el apartado [Characteristics], donde se resumen las distintas variables involucradas en el diseño del motor. Tal y como se aprecia en la

Figura 3.13, y Figura 3.14.

Este análisis permite advertir el impacto que los parámetros de diseño ejercen sobre las características del motor, y tener una estimación aproximada de los valores que ha de tomar para que el motor verifique las especificaciones, y restricciones indicadas al iniciar el proceso de diseño. Una de las limitaciones que se ha de tener en cuenta al realizar el análisis es que solo se puede modificar un parámetro de diseño en cada evaluación paramétrica.

El procedimiento que se ha de seguir para llevar a cabo la evaluación paramétrica es el siguiente. En primer lugar, se ha de escoger un parámetro de diseño que pueda ser evaluado por el programa en el apartado [Characteristics]. Al seleccionarlo, se abre un cuadro de diálogo que permite introducir el valor del parámetro [Input Parameter], se ha de escoger la opción [Parametric Range Input], para especificar los valores que ha de tomar el parámetro de diseño. El programa ofrece dos métodos de introducción de datos:

[Range], si se quiere realizar la evaluación del parámetro entre dos valores a intervalos regulares, de manera que se ha de indicar el valor inicial [Start] y final [End] y las divisiones [Division] del intervalo. [Table] si se quieren introducir valores concretos del parámetro de diseño, o si se quiere modificar el material de las chapas de los núcleos.

Una vez se definen los valores que ha de tomar el parámetro se ejecuta el análisis. Al terminar el programa muestra los resultados para cada caso en función del valor que toma el parámetro de diseño.

Evaluación paramétrica de la distancia de los centros de las barras respecto al diámetro exterior del rotor [RC1]

Con la variación de este parámetro, se pretende aumentar el par nominal, para lograrlo se han de aproximar las barras del rotor a la superficie externa del mismo, y de este modo disminuir la reactancia de dispersión al reducir el flujo de dispersión de ranura.

Dado que la sección transversal de las barras es inferior a la sección para la que se calculó el nivel máximo de inducción en los dientes, se garantiza que no se va a superar este valor. De manera que se va a tratar de aproximar lo máximo posible las barras a la superficie externa del rotor. El límite inferior del intervalo se fijará en función del radio de las barras, teniendo en cuenta que las barras han de encontrarse completamente insertadas en el núcleo magnético. El diámetro de las barras [RL1] del diseño MA se fijó en 39 mm luego sus radios miden 19,5 mm, se considerará como límite inferior del intervalo $RC1 = 20,5$ mm (longitud de la boca de ranura de 1 mm). El límite superior será aproximadamente igual al valor que toma este parámetro en el modelo MA, $RC1 = 28,5$ mm.

Los valores del parámetro [RC1] se introducen con el método [Range]. Se consideran intervalos regulares de 2 mm por lo tanto el número de divisiones ha de ser 4 (Figura 3.20).

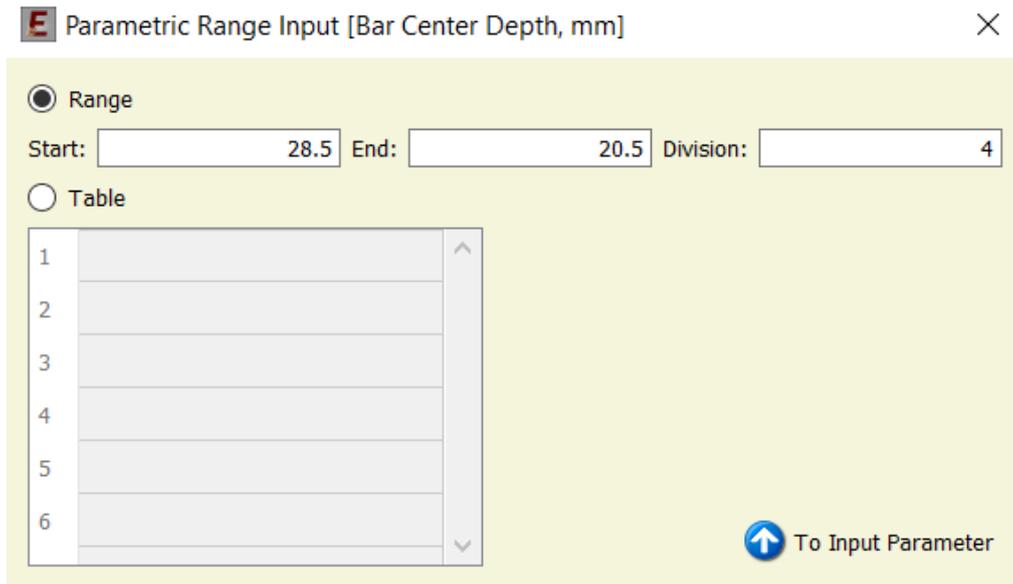


Figura 3.20. Evaluación paramétrica de RC1 en JMAG-Express Public: Rango de valores que ha de tomar RC1 durante la evaluación paramétrica del modelo MA.

En la Figura 3.21 se muestra la variación de la profundidad de los centros de las barras respecto al diámetro exterior del rotor en el diagrama del motor.

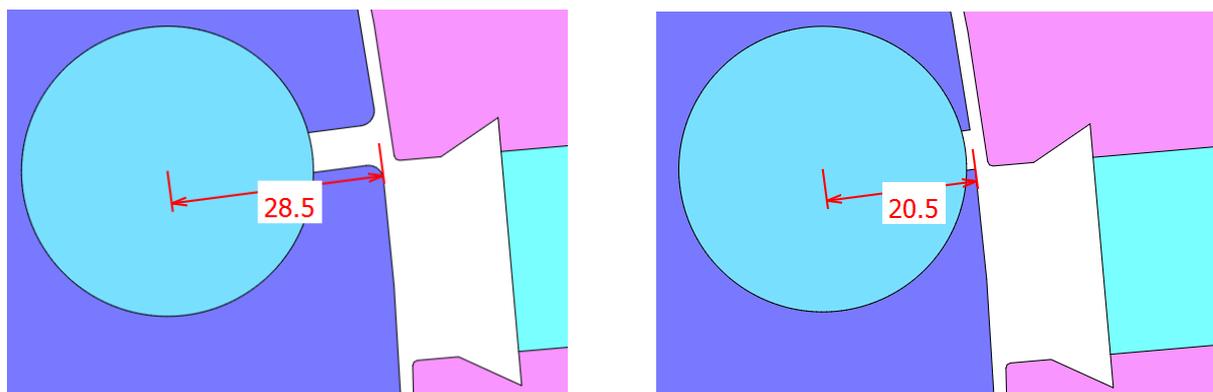


Figura 3.21. Evaluación paramétrica de RC1 en JMAG-Express Public: Variación de RC1 vista en el apartado [Motor Diagram].

Tras indicarle al programa los valores que ha de tomar RC1 y ejecutar la evaluación paramétrica, se procede a analizar los resultados extraídos de la misma. Se va a utilizar el tipo de gráfico [Response Graph]. En la Figura 3.22, se muestra la curva que relaciona los valores de par *Torque* en función de la profundidad a la que se encuentran los centros de las barras respecto al diámetro exterior del rotor *Bar Center Depth* en mm a la velocidad asignada 1490 rpm.

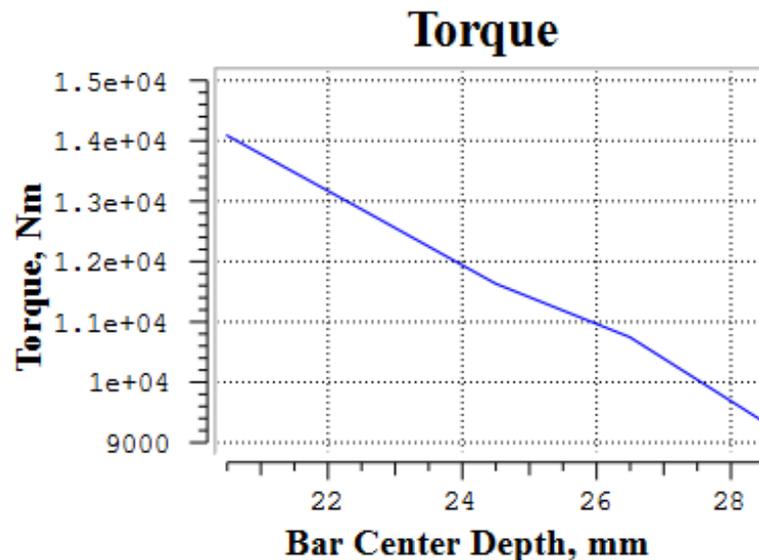


Figura 3.22. Evaluación paramétrica de RC1 en JMAG-Express Public: Variación del par [Torque] en función de la profundidad de los centros de las barras respecto a la superficie externa del rotor [Bar Center Depth] a la velocidad asignada 1490 rpm del modelo MA.

Se comprueban las hipótesis planteadas antes de realizar la evaluación paramétrica. Al aproximar las barras al entrehierro, el par aumenta debido a la aminoración de los flujos de dispersión. A medida que se van alejando las barras el par disminuye pues el flujo útil o mutuo, que es el que realmente transmite energía entre el estator y el rotor, disminuye, aumenta la dispersión de ranura.

Se utiliza el mismo tipo de gráfico para estudiar el efecto de RC1 en el rendimiento del diseño MA (Figura 3.23).

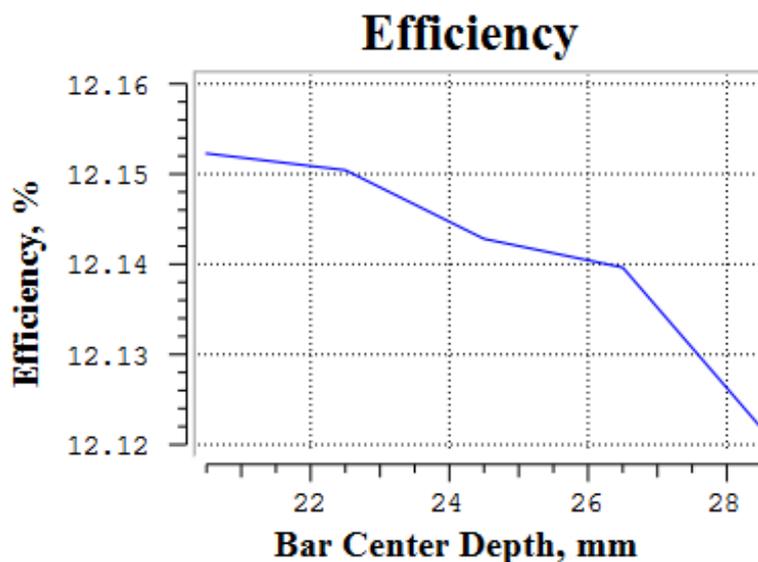


Figura 3.23. Evaluación paramétrica de RC1 en JMAG-Express Public: Variación del rendimiento [Efficiency] en función de la profundidad de los centros de las barras respecto a la superficie externa del rotor [Bar Center Depth] a la velocidad asignada 1490 rpm del modelo MA.

La proximidad de las barras al entrehierro parece no ejercer gran influencia en el rendimiento del motor. Se observan mejoras en el mismo, si bien no importantes a medida que se reduce este parámetro. Esto es debido al error cometido por JMAG-Express Public al ajustar los valores intermedios, pues considera muy pocos puntos en el cálculo de las distintas características de funcionamiento. A velocidades próximas a las asignada las características varían fuertemente, dado que a velocidades cercanas a la de sincronismo apenas hay variación de flujo en las barras del rotor, y por lo tanto las f.e.m.s y las corrientes inducidas en ellas son aproximadamente cero, la potencia de salida en el eje es nula y en consecuencia el rendimiento también, mientras que en el instante en el que se alcanza el par máximo es mayor. El valor obtenido a la velocidad asignada, que es aproximado por interpolación lineal entre esos dos valores, no concuerda con la realidad operativa del motor. Además, el valor máximo de las distintas características puede encontrarse a una velocidad intermedia que el programa no considera, empeorando aún más la precisión en los resultados.

No obstante, en el análisis de sensibilidad se observó que el grado de influencia de este parámetro en el rendimiento del diseño MA no era relevante.

En el gráfico de la Figura 3.24 se han representado conjuntamente los valores de pérdidas en el cobre, y potencia entregada por el motor en función del parámetro de diseño a la velocidad asignada. Se comprueba que cuanto menor es la distancia que separa los centros de las barras y el diámetro externo, mayor es la potencia de salida en el eje, y las pérdidas en el cobre, sin embargo, estas últimas se incrementan en menor medida, y en consecuencia hay una ligera mejora en el rendimiento.

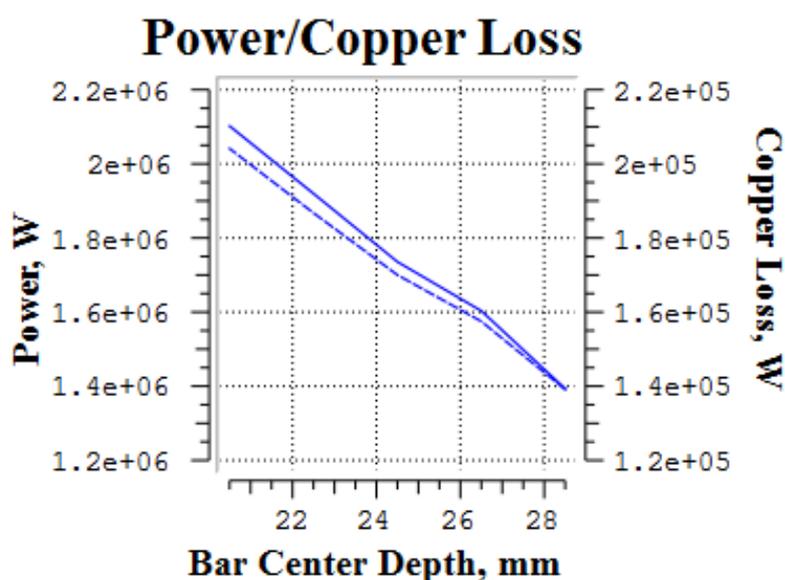


Figura 3.24. Evaluación paramétrica de RC1 en JMAG-Express Public: Variación de la potencia [Power] (Curva de trazo continuo) y las pérdidas en el cobre [Copper Loss] (Curva a trazos) en función de la profundidad de los centros de las barras respecto a la superficie externa del rotor [Bar Center Depth] a la velocidad asignada 1490 rpm del modelo MA.

El incremento de flujo mutuo a medida que la distancia de los centros de las barras del rotor respecto al diámetro exterior del rotor se reduce, supone un aumento de la corriente absorbida y de la corriente de magnetización, esta última en menor medida dada la reducción de los flujos de dispersión.

A continuación, se muestran las curvas de par y rendimiento en función de la velocidad [Series Graph] de los casos correspondientes a los valores extremos del intervalo de RC1 introducidos en el modo paramétrico:

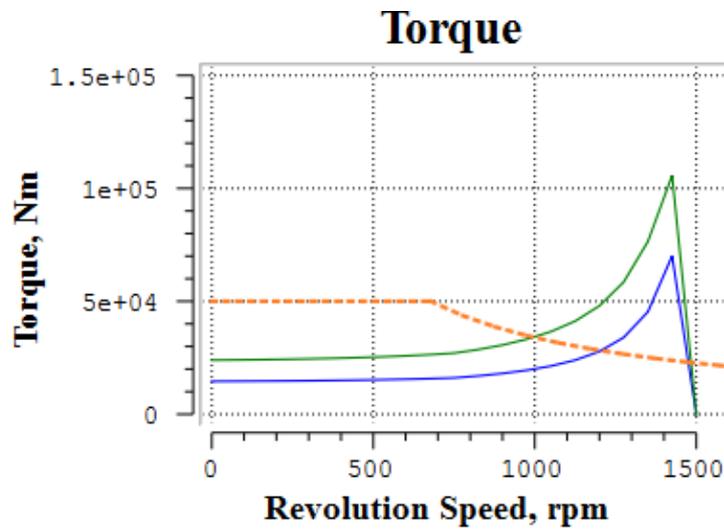


Figura 3.25. Evaluación paramétrica de RC1 en JMAG-Express Public: Curva Par-Velocidad

Azul: RC1 = 28,5 mm, Verde: RC1 = 20,5 mm

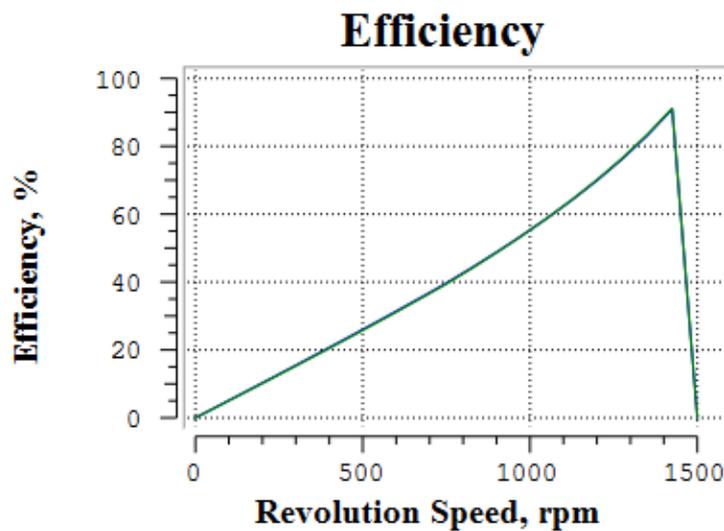


Figura 3.26. Evaluación paramétrica de RC1 en JMAG-Express Public: Curva Rendimiento-Velocidad. Azul: RC1 = 28,5 mm, Verde: RC1 = 20,5 mm.

Se evidencia la falta de precisión en la representación de las características. De la forma de ambas curvas se deduce que el valor máximo puede encontrarse en un instante intermedio no contemplado por el programa.

En la característica Par-Velocidad se aprecia claramente el aumento del par en todo el rango de velocidades cuando las barras se encuentran más próximas al entrehierro (curva verde, Figura 3.25).

A pesar de que se logra una mejora en el par a la velocidad asignada, el par máximo y el par en el arranque pueden ser excesivos. De manera que se ha de adoptar un valor que no comprometa en exceso estos valores. En la Figura 3.27 se representa el par en función del parámetro de diseño en el arranque y a la velocidad asignada, 1490 rpm.

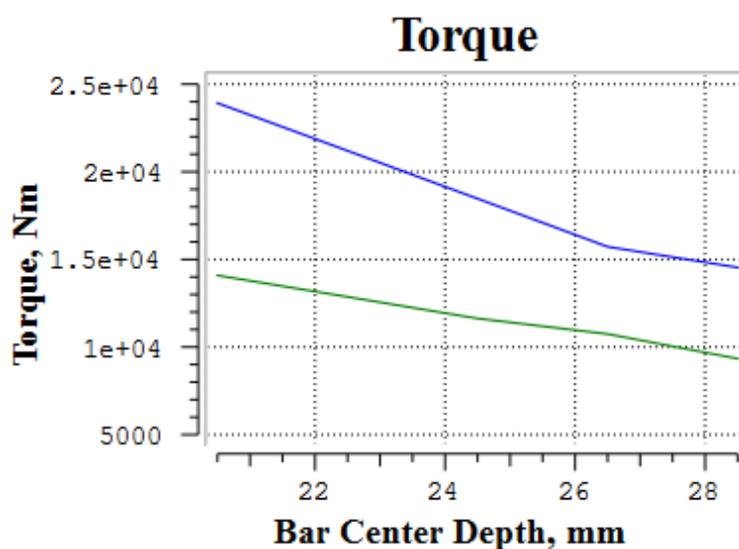


Figura 3.27. Evaluación paramétrica de RC1 en JMAG-Express Public: Variación del par [Torque] en función de la profundidad de los centros de las barras respecto a la superficie externa del rotor [Bar Center Depth]: Azul: 0,01 rpm, Verde: 1490 rpm.

La relación entre el par en el arranque y el par nominal se acrecienta con la disminución del parámetro de diseño.

Evaluación paramétrica del ancho de las ranuras del estator [SW3]

En el Anexo 2, se planteó desde un principio que el factor de llenado de ranura se aproximase al 75% para garantizar un mejor aprovechamiento de las ranuras²⁷, de manera que solo se puede incrementar su valor pues, si disminuye, el espacio destinado al aislamiento de ranura se reduciría y en consecuencia el factor de llenado excedería el límite de factor de llenado máximo y no es aconsejable. En [4] se proporciona el rango de valores entre los que se ha de encontrar el ancho de ranura en función del paso de ranura del estator. El valor máximo del ancho de ranura del estator se fijará en base a esa relación.

De nuevo, se van a introducir los valores de anchura de ranura del rotor, indicando los valores extremos y las divisiones del intervalo. El valor mínimo del intervalo coincide con el valor fijado en el modelo MA: SW3 = 27 mm, el valor máximo se ha obtenido en el Anexo 2.4: SW3=32 mm. Se considerarán intervalos regulares de 1 mm por lo tanto el número de divisiones ha de ser 5.

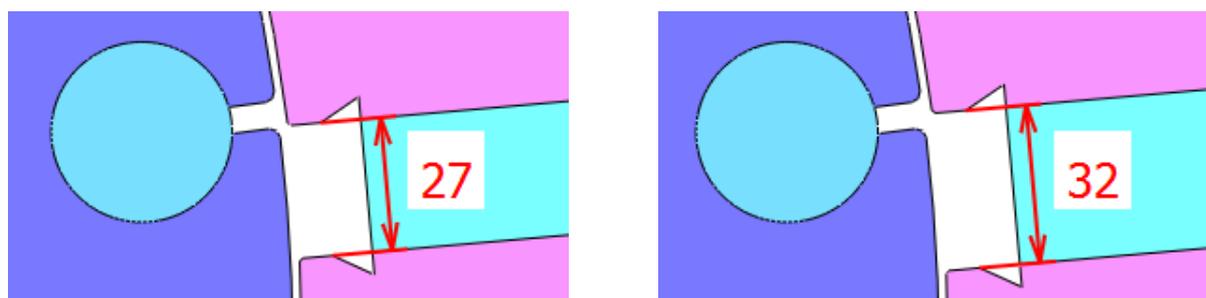


Figura 3.28. Evaluación paramétrica de SW3 en JMAG-Express Public: Variación de SW3 vista en el apartado [Motor Diagram].

La relación entre el ancho y la profundidad de ranura se reduce gradualmente a medida que aumenta SW3 pues la altura de las ranuras permanece igual durante la evaluación paramétrica. De manera que la reactancia de dispersión disminuye al aumentar el flujo que concatena los conductores del estator y el rotor, con el consecuente incremento del par. Se ha de tener en cuenta que este cambio implica una disminución del factor de llenado. Si el efecto que produce el incremento del ancho de las ranuras del estator favorece la consecución de las características de funcionamiento a la velocidad asignada, se realizará un estudio más minucioso de los valores que han de tomar los distintos parámetros involucrados.

²⁷ Slot fill factor = (Wire cross section area + Insulation film area) x N° of turns / (Slot area - Insulation sheet area)

Para estudiar los resultados de la evaluación paramétrica de SW3, se va a representar la relación que guarda la característica de par y rendimiento en función de la anchura de las ranuras del estator en mm a la velocidad asignada de referencia.

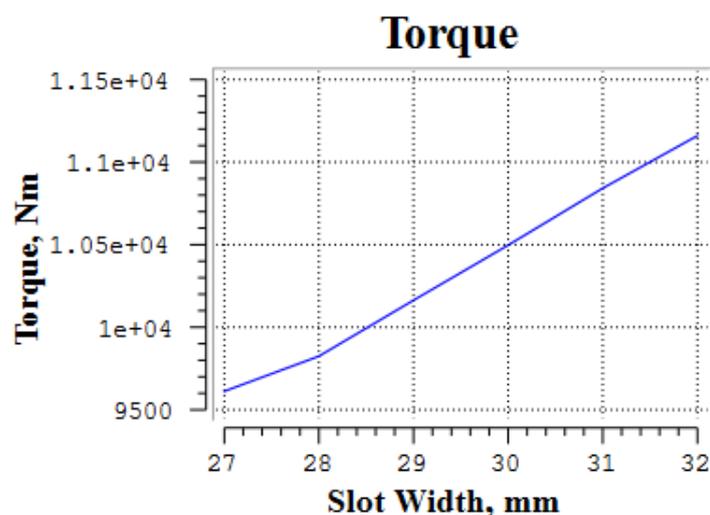


Figura 3.29. Evaluación paramétrica de SW3 en JMAG-Express Public: Variación del par [Torque] en función de la anchura de las ranuras del estator [Slot Width] a la velocidad asignada 1490 rpm del modelo MA.

Atendiendo a los resultados de la evaluación paramétrica, se comprueba que efectivamente el par aumenta a medida que las ranuras se ensanchan, con un incremento algo inferior respecto al conseguido con la aproximación de las barras al entrehierro, no obstante, se ha de tener en cuenta que se podría disminuir aún más la reactancia de dispersión acortando la longitud de las ranuras, logrando de este modo incrementar aún más el par, y mejorar a su vez el factor de llenado de ranura.

En relación al rendimiento (Figura 3.30) sucede algo similar a la evaluación paramétrica de la profundidad de los centros de las barras respecto a la superficie externa del rotor, se observa que no se produce una mejora sustancial. Aunque este parámetro apenas afectaba al rendimiento cuando se realizó el análisis de sensibilidad (Figura 3.17).

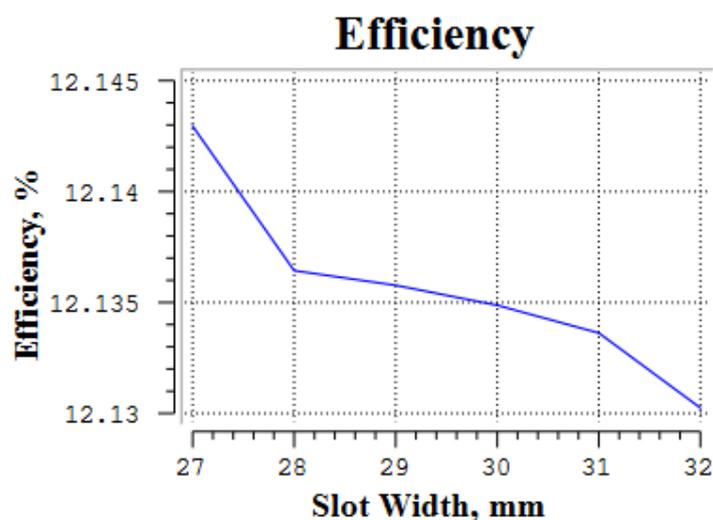


Figura 3.30. Evaluación paramétrica de SW3 en JMAG-Express Public: Variación del rendimiento [Efficiency] en función de la anchura de las ranuras del estator [Slot Width] a la velocidad asignada 1490 rpm del modelo MA.

En la Figura 3.31, se percibe el incremento tanto de la potencia del motor, como de las pérdidas en el cobre a causa de la elevación de la corriente absorbida en el estator por dos motivos: la disminución de la reactancia de dispersión (mayor fracción de flujo útil), y el incremento de la densidad de flujo en los dientes debido a la disminución de su sección por el ensanchamiento de las ranuras, que provoca la saturación de los mismos, hecho que supone un aumento de la corriente de magnetización para lograr magnetizar el núcleo, siendo el incremento de esta última menos acusado debido a la aminoración de los flujos de dispersión de ranura.

En la Figura 3.32, se ha representado la corriente absorbida por el estator y la corriente necesaria para magnetizar los núcleos ferromagnéticos. El gráfico muestra el ascenso de la corriente absorbida y la corriente de magnetización a medida que las ranuras se ensanchan.

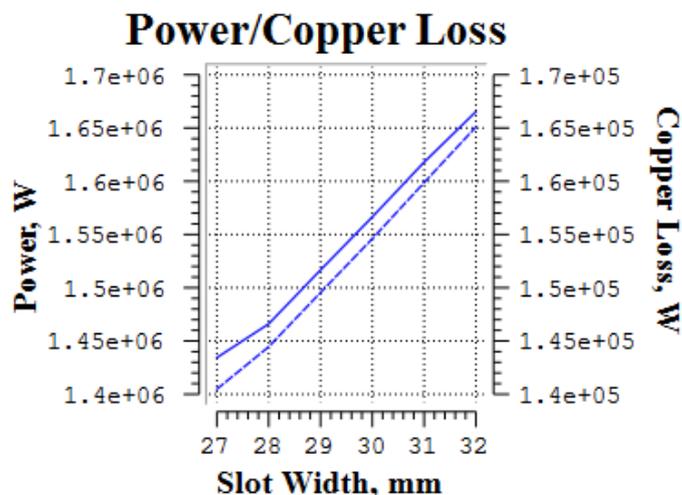


Figura 3.31. Evaluación paramétrica de SW3 en JMAG-Express Public: Variación de la potencia [Power] (Curva de trazo continuo) y las pérdidas en el cobre [Copper Loss] (Curva a trazos) en función de la anchura de las ranuras del estator [Slot Width] a la velocidad asignada 1490 rpm.

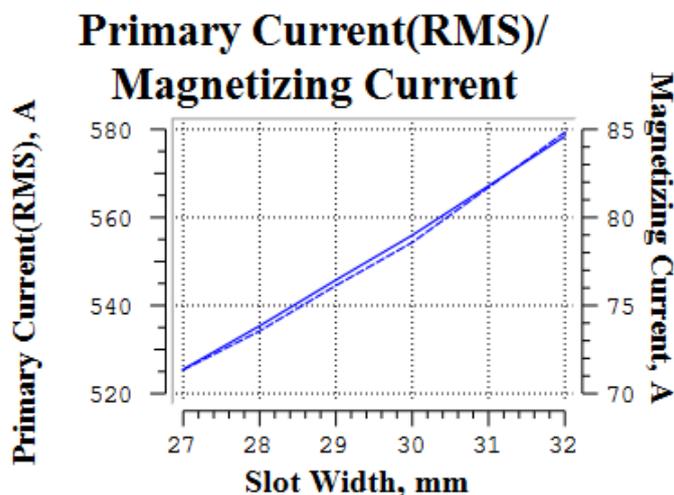
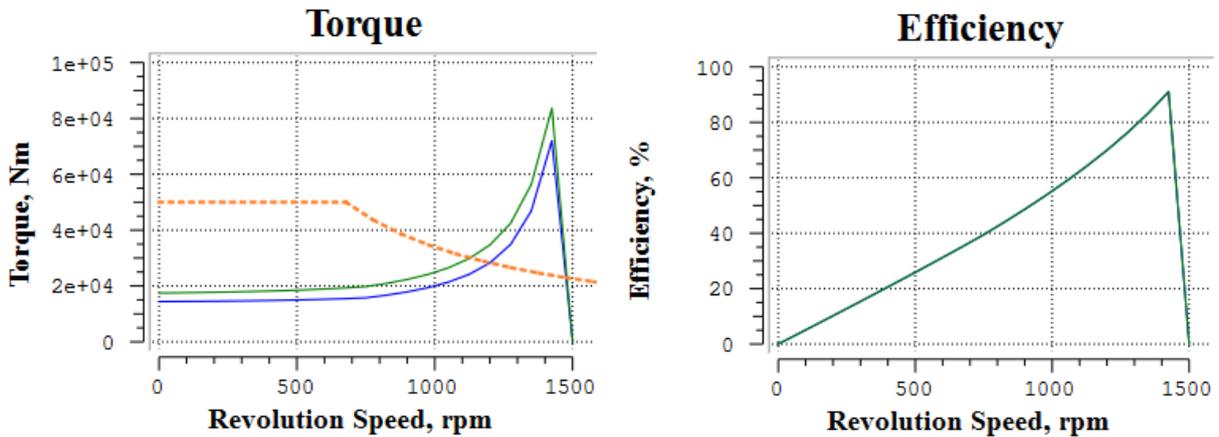


Figura 3.32. Evaluación paramétrica de SW3 en JMAG-Express Public: Variación de la corriente absorbida en el primario [Primary Current (RMS)] (Curva de trazo continuo) y la corriente de magnetización [Magnetizing Current] (Curva a trazos) en función de la anchura de las ranuras del estator [Slot Width] a la velocidad asignada 1490 rpm.

En la

Figura 3.33 se muestran las curvas de par y rendimiento en función de la velocidad de los casos correspondientes a los valores extremos del intervalo de la anchura de las ranuras del



estator introducidos en el modo paramétrico:

Figura 3.33. Evaluación paramétrica de SW3 en JMAG-Express Public: Curva Par-Velocidad [Torque – Revolution Speed] y Curva Rendimiento-Velocidad [Efficiency – Revolution Speed].

Azul: SW3 = 27 mm, Verde: SW3 = 32 mm

En los gráficos de la Figura 3.34, se han representado las características Potencia – Velocidad y Pérdidas en el cobre – Velocidad, correspondientes a los casos en los que la anchura de ranura toma los valores extremos del intervalo considerado en la evaluación paramétrica.

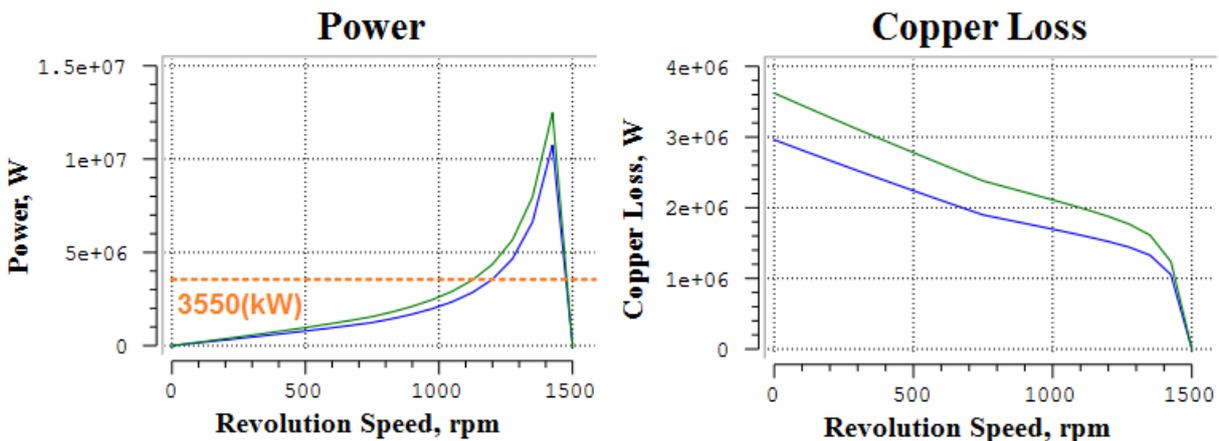


Figura 3.34. Evaluación paramétrica de SW3 en JMAG-Express Public: Curva Potencia-Velocidad [Torque – Revolution Speed] y Curva Pérdidas en el cobre-Velocidad [Efficiency – Revolution Speed].

Azul: SW3 = 27 mm, Verde: SW3 = 32 mm

Evaluación paramétrica de la longitud de la boca de ranura del estator [ST]

Tal y como sucedió con la variación paramétrica del ancho de ranura, para no exceder el valor del factor de llenado de ranura, solo se puede reducir su longitud.

Los valores que ha de tomar el parámetro de diseño se fijarán a intervalos regulares de 1 mm (4 divisiones), comprendidos entre $ST = 10$ mm, y $ST = 14$ mm. Los conductores quedan firmemente insertados en la ranura mediante la cuña de cierre, las cuñas de cierre del modelo MA [SW5] tiene una altura de 8,06 mm, por lo tanto, ha de permitirse que cumplan su función de sujeción dejando cierto espacio (2 mm aprox.) para que queden correctamente encajadas en la estructura de acero.

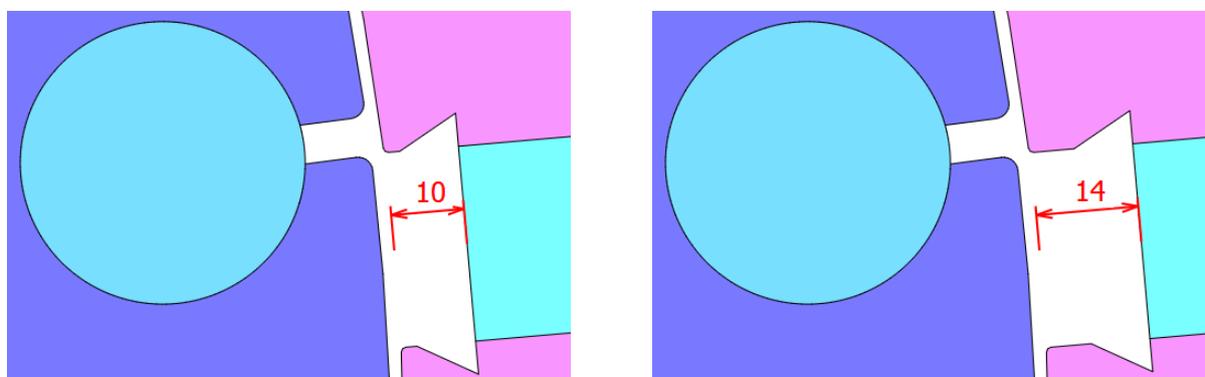


Figura 3.35. Evaluación paramétrica de ST en JMAG-Express Public: Variación de ST vista en el apartado [Motor Diagram].

En las gráficas que se muestran en la Figura 3.36 y la Figura 3.37, se ha representado las características de par y rendimiento a la velocidad asignada en función de la profundidad de la boca de ranura del estator.

Atendiendo a la Figura 3.36, se advierte que el par aumenta progresivamente a medida que la longitud de la boca de las ranuras del estator se reduce. Al encontrarse los devanados del estator más próximos al entrehierro, el flujo útil aumenta (disminuye la reactancia de dispersión de ranura), incrementándose de este modo el par desarrollado por la máquina. Sin embargo, dado que las restantes dimensiones del estator no se han modificado, la altura de las ranuras se incrementa al reducirse ST permaneciendo el ancho de las ranuras constante, de manera que la reactancia de dispersión de ranura se reduce en menor medida, por darse simultáneamente ambos efectos, luego el incremento de par es moderado.

Asimismo, el factor de llenado de ranura disminuye, al aumentar la sección de las ranuras. Corrigiendo las dimensiones del estator se puede lograr mejorar aún más el par.

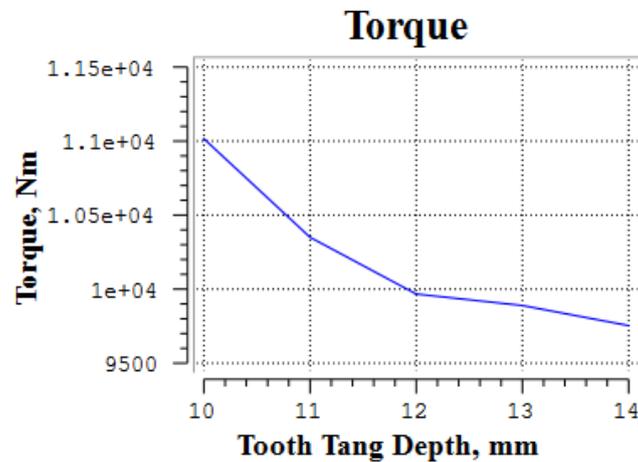


Figura 3.36. Evaluación paramétrica de ST en JMAG-Express Public: Variación del par [Torque] en función de la profundidad de la boca de las ranuras del estator [Tooth Tang Depth] a la velocidad asignada 1490 rpm del modelo MA.

A pesar de que este parámetro parecía ejercer una mayor influencia en el rendimiento conforme al análisis de sensibilidad (Figura 3.17), no se aprecian mejoras notables en el mismo. Probablemente, el error cometido por JMAG-Express Public afecte negativamente a los resultados. No obstante, si se aprecia una leve mejora cuando la profundidad de la boca de las ranuras del estator es menor.

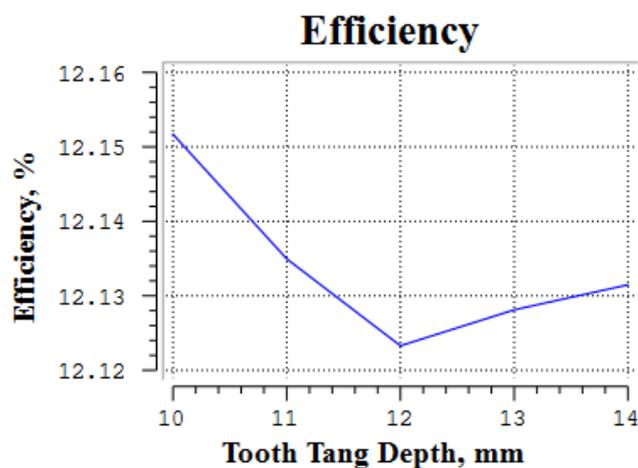


Figura 3.37. Evaluación paramétrica de ST en JMAG-Express Public: Variación del rendimiento [Efficiency] en función de la profundidad de la boca de las ranuras del estator [Tooth Tang Depth] a la velocidad asignada 1490 rpm del modelo MA.

La potencia desarrollada por la máquina y las pérdidas en el cobre aumentan por el incremento en la corriente absorbida, siendo el ascenso de la potencia útil más acusado que el de las pérdidas en el cobre, afectando positivamente al rendimiento.

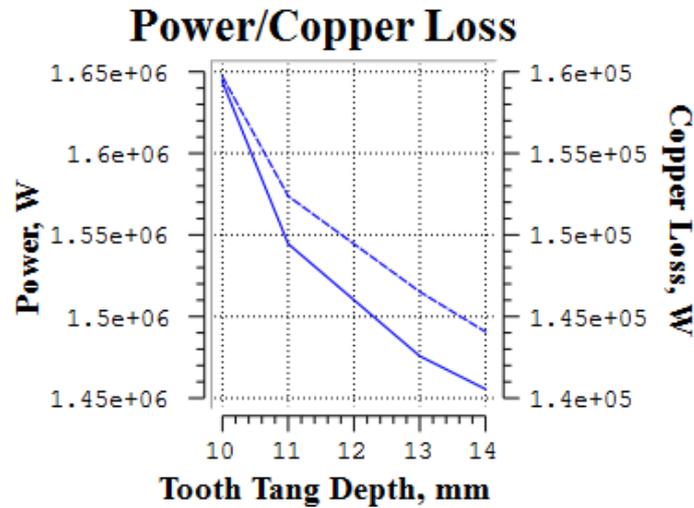


Figura 3.38. Evaluación paramétrica de ST en JMAG-Express Public: Variación de la potencia [Power] (Curva de trazo continuo) y las pérdidas en el cobre [Copper Loss] (Curva a trazos) en función de la profundidad de la boca de las ranuras del estator [Tooth Tang Depth] a la velocidad asignada 1490 rpm.

También se observa una mejora en el factor de potencia cuando el devanado del estator se encuentra más próximo al entrehierro debido a que la fracción de corriente absorbida destinada a la magnetización del núcleo es menor.

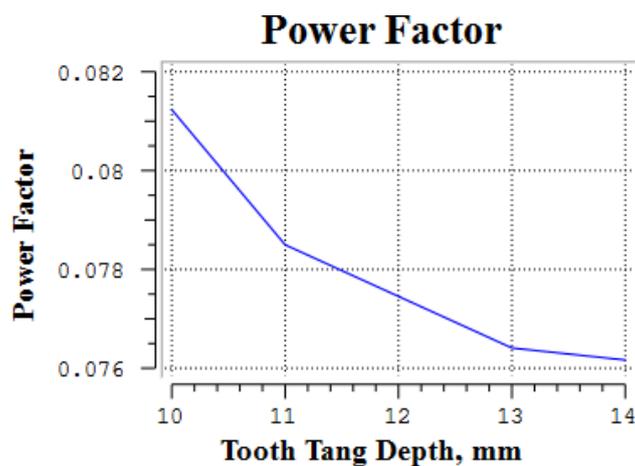


Figura 3.39. Evaluación paramétrica de ST en JMAG-Express Public: Variación del factor de potencia [Power Factor] en función de la profundidad de la boca de las ranuras del estator [Tooth Tang Depth] a la velocidad asignada 1490 rpm del modelo MA.

Para ver el modo en que la profundidad a la que se encuentran los devanados del estator afecta a las características de par y rendimiento en todo el rango de velocidades, también se muestran las curvas Par-Velocidad, y Rendimiento-Velocidad en la Figura 3.40, para las propuestas de diseño con una longitud de la boca de las ranuras del estator [ST] correspondientes a los valores extremos del intervalo introducidos en el modo paramétrico.

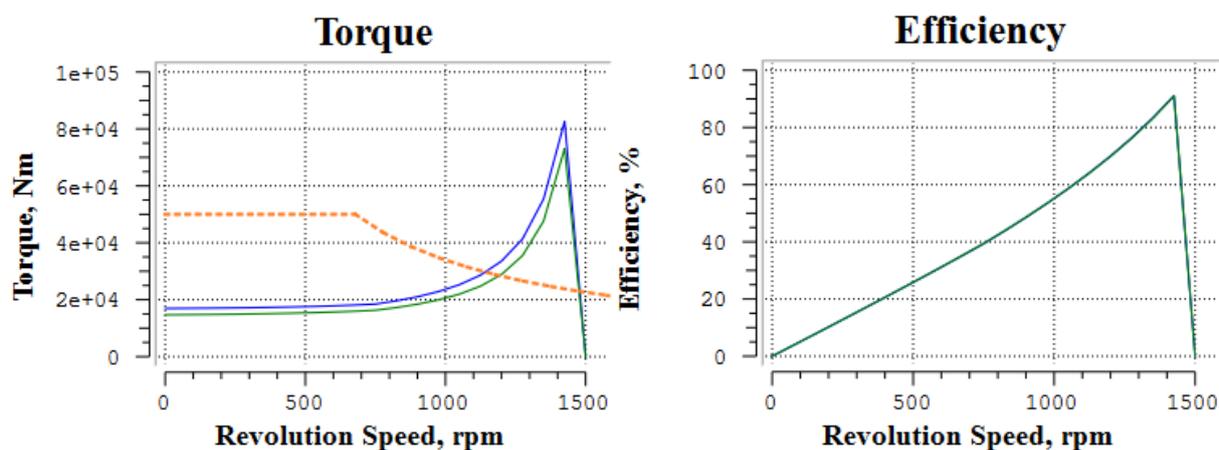


Figura 3.40. Evaluación paramétrica de ST en JMAG-Express Public: Curva Par-Velocidad [Torque – Revolution Speed] y Curva Rendimiento-Velocidad [Efficiency – Revolution Speed].

Azul: ST = 10 mm, Verde: ST = 14 mm

En la curva Par-Velocidad se percibe como el par desarrollado por la máquina aumenta con la reducción de este parámetro, no apreciándose apenas variación en la curva Rendimiento-Velocidad. Ambas curvas denotan la imprecisión del programa, no obstante, el intervalo de valores evaluado de este parámetro es inferior al utilizado en la evaluación paramétrica de la posición de los centros de las barras respecto al diámetro exterior del rotor de manera que la diferencia entre los casos representados en ambos gráficos es menor.

Evaluación paramétrica del diámetro de las barras del rotor [RL1]

A pesar de que este parámetro parece no ejercer una gran influencia en el análisis de sensibilidad del par y el rendimiento realizado por el programa, conforme a la documentación consultada, el incremento de la sección de las barras suponía una mejora en ambas características pues se conseguía reducir la resistencia del rotor en condiciones asignadas, y consecuentemente las pérdidas en el cobre. No obstante, en la evaluación paramétrica sería conveniente variar simultáneamente la distancia a la que se encuentran los centros de las barras pues a medida que la sección aumenta las barras se aproximan cada vez más al entrehierro y por ende la reactancia dispersión disminuye y a la inversa en caso de que se reduzca su sección. Es decir, se dan simultáneamente dos efectos que provocan el incremento o disminución de la resistencia y la reactancia de dispersión del rotor y que se han de tener en cuenta en el estudio de los resultados de la evaluación paramétrica.

Se utilizará el mismo método que en los casos anteriores para introducir los valores en la evaluación paramétrica. La variación de este parámetro se realizará entre²⁸ $RL1 = 39$ mm, y $RL1 = 49$ mm, a intervalos regulares de 2 mm (5 divisiones).

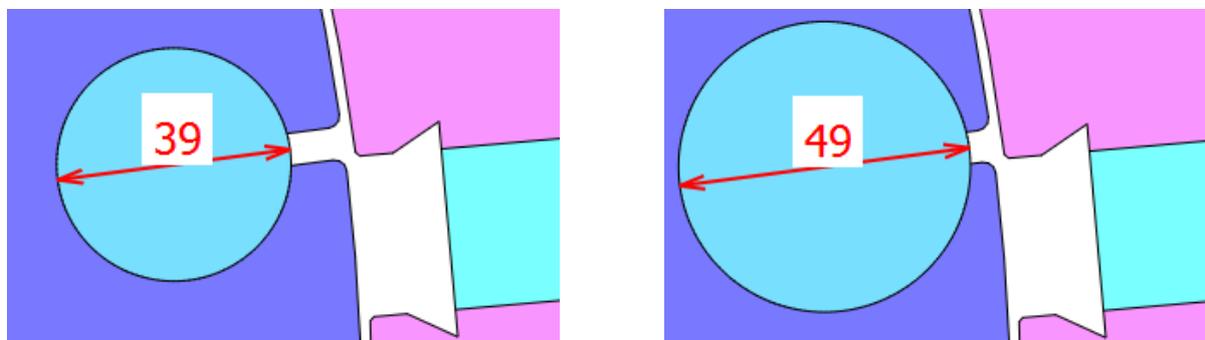


Figura 3.41. Evaluación paramétrica de RL1 en JMAG-Express Public: Variación de RL1 vista en el apartado [Motor Diagram].

²⁸ El cálculo de ambos valores se detalla en el Anexo 2, los valores extremos se han obtenido considerando que la densidad de corriente en las barras debe estar comprendida entre 3 A/mm^2 , y 8 A/mm^2 . Para el estudio se ha considerado que la densidad de corriente ha de estar comprendida entre 3 A/mm^2 y 5 A/mm^2 aproximadamente.

En la Figura 3.42 y la Figura 3.43, se ha representado la dependencia que guarda el par y el rendimiento con el diámetro de las barras del rotor a la velocidad de régimen 1490 rpm.

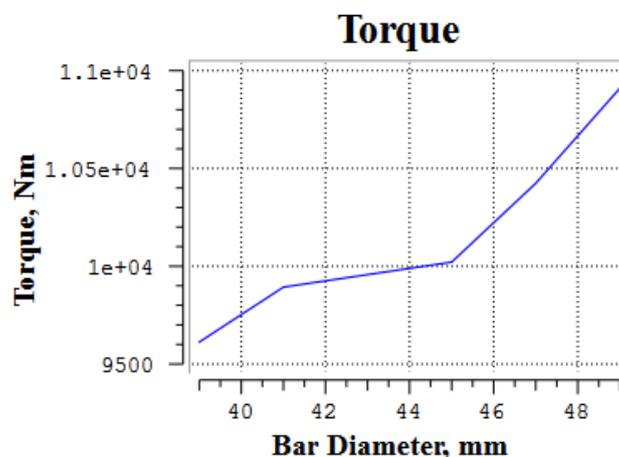


Figura 3.42. Evaluación paramétrica de RL1 en JMAG-Express Public: Variación del par [Torque] en función del diámetro de las barras del rotor [Bar Diameter] a la velocidad asignada 1490 rpm del modelo MA.

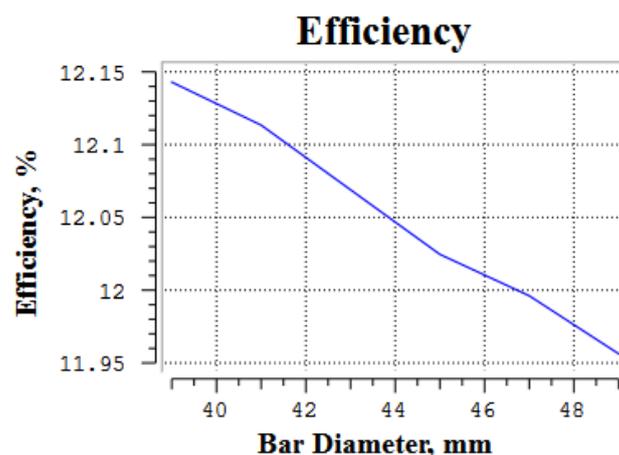


Figura 3.43. Evaluación paramétrica de RL1 en JMAG-Express Public: Variación del rendimiento [Efficiency] en función del diámetro de las barras del rotor [Bar Diameter] a la velocidad asignada 1490 rpm del modelo MA.

Tal y como se había comentado previamente el par se incrementa cuando las barras son de mayor sección, esto es debido a que la resistencia y la reactancia en el rotor disminuyen. Sin embargo, la corriente inducida en las barras es mayor, y en consecuencia las pérdidas en el cobre se incrementan de forma importante afectando al rendimiento del motor.

En el gráfico de la Figura 3.44, donde se relaciona la evolución de la potencia y las pérdidas en el cobre del motor con la sección de las barras conductoras a la velocidad asignada, se aprecia el ascenso gradual de ambas curvas a medida que la sección de las barras aumenta, esto es debido a que la cantidad de flujo que concatena los devanados del rotor y el estator es mayor por dos motivos: la longitud de la boca de las ranuras del rotor se reduce, y los conductores del rotor abarcan una mayor cantidad de flujo, incrementándose de este modo la corriente absorbida. Así mismo, al aumentar la sección de las barras los dientes del rotor se estrechan, en dichas zonas la concentración de flujo magnético es mayor, se incrementa la inducción en los dientes, de manera que se requiere una mayor fracción de la corriente absorbida para magnetizar los núcleos magnéticos (aumento de la corriente de magnetización) dado el elevado nivel de saturación de los dientes del rotor, Figura 3.45. Este aumento en la corriente de magnetización empeora el factor de potencia del motor, al aumentar la componente reactiva de la potencia aparente Figura 3.46.

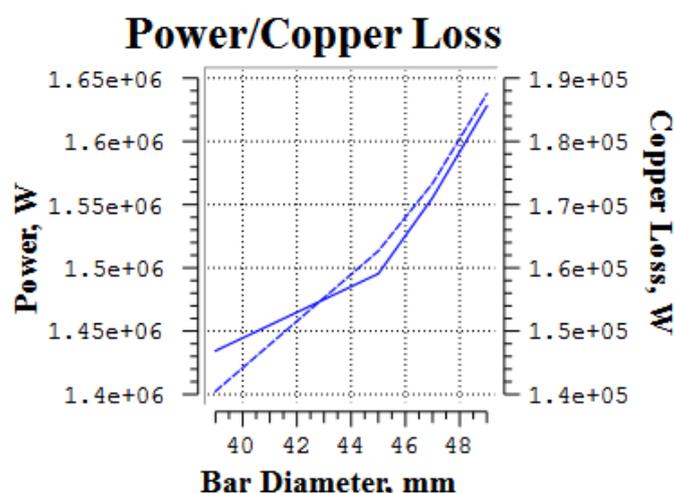


Figura 3.44. Evaluación paramétrica de RL1 en JMAG-Express Public: Variación de la potencia [Power] (Curva de trazo continuo) y las pérdidas en el cobre [Copper Loss] (Curva a trazos) en función del diámetro de las barras del rotor [Bar Diameter] a la velocidad asignada 1490 rpm del modelo MA.

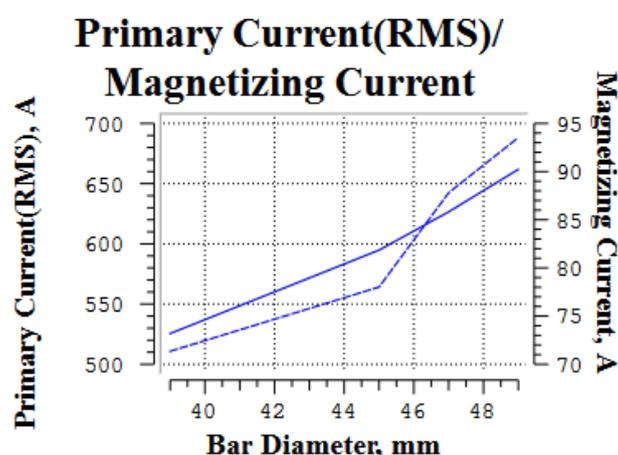


Figura 3.45. Evaluación paramétrica de RL1 en JMAG-Express Public: Variación de la corriente absorbida en el primario [Primary Current (RMS)] (Curva de trazo continuo) y la corriente de magnetización [Magnetizing Current] (Curva a trazos) en función del diámetro de las barras del rotor [Bar Diameter] a la velocidad asignada 1490 rpm.

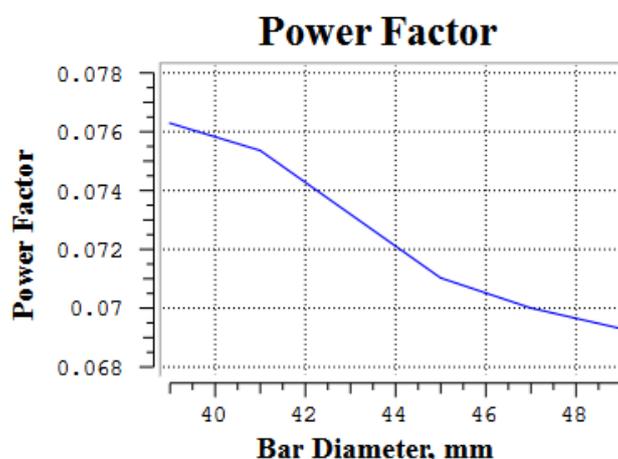


Figura 3.46. Evaluación paramétrica de RL1 en JMAG-Express Public: Variación del factor de potencia [Power Factor] en función del diámetro de las barras del rotor [Bar Diameter] a la velocidad asignada 1490 rpm del modelo MA.

Si se realizase una comparación entre un modelo con las barras de menor sección aproximándolas al entrehierro, es decir, reduciendo la longitud de la boca de las ranuras del rotor, con un modelo con barras de mayor sección y con la misma longitud de la boca de las ranuras que el modelo con las barras de menor sección, se comprobaría realmente el impacto de este parámetro en las características de funcionamiento.

En la Figura 3.47, se comparan las curvas Par-Velocidad y Rendimiento-Velocidad de los modelos con el diámetro de las barras del rotor correspondiente a los valores extremos del intervalo considerado en la evaluación paramétrica.

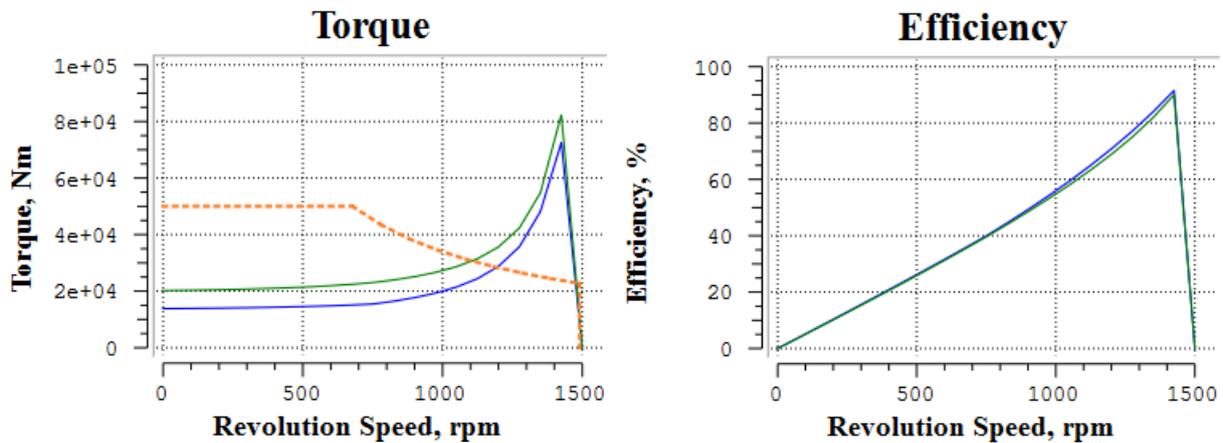


Figura 3.47. Evaluación paramétrica de RL1 en JMAG-Express Public: Curva Par-Velocidad [Torque – Revolution Speed] y Curva Rendimiento-Velocidad [Efficiency – Revolution Speed].

Azul: RL1 = 39 mm, Verde: RL1 = 49 mm

Del incremento de la sección de las barras y la consiguiente reducción de la resistencia del rotor cabía esperar un desplazamiento de la curva a deslizamientos menores (velocidades mayores) preservando la forma de la misma, es decir, el par máximo se conserva, pero se produce a una velocidad mayor, y el par en el arranque decrece. Sin embargo, sucede todo lo contrario, esto es debido a que el incremento de la sección de las barras no solo modifica su resistencia. Consultando los parámetros del circuito equivalente que facilita el programa, se observa que la reactancia de dispersión también se reduce, guarda coherencia con el razonamiento anterior pues el flujo de dispersión disminuye, de manera que la f.e.m. inducida aumenta aún más y del mismo modo las corrientes que circulan por las barras del rotor y el par en el eje de la máquina. También se observa que la reactancia magnetizante disminuye (elevación de la corriente de magnetización) por la saturación en los dientes.

Evaluación paramétrica del diámetro exterior del rotor [RD1]

Para evitar modificar los valores de las restantes dimensiones (diámetro interior del estator, etc.) se va a variar el espesor del entrehierro [GAP] en lugar del diámetro exterior del rotor pues se le indico al programa que este parámetro permaneciese fijo con independencia de los cambios realizados en la geometría, por lo tanto, si se reduce o aumenta el diámetro exterior del rotor, el diámetro interior del estator aumentaría o disminuiría en la misma proporción.

Los valores de este parámetro se han escogido en base a las fórmulas recomendadas por distintos autores [4] [6] [7], los cálculos realizados se detallan en el Anexo 2.4. El espesor del entrehierro se evaluará a intervalos regulares de 0,2 mm (5 divisiones) entre GAP = 1,7 mm y GAP = 2,7 mm.

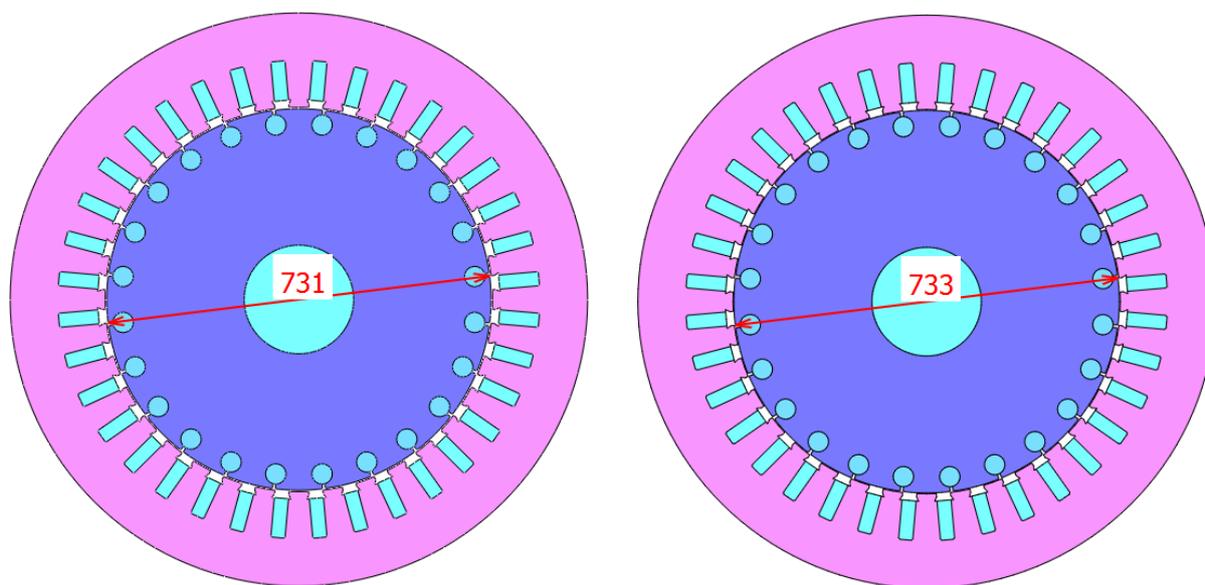


Figura 3.48. Evaluación paramétrica de RD1 en JMAG-Express Public: Variación de RD1 vista en el apartado [Motor Diagram].

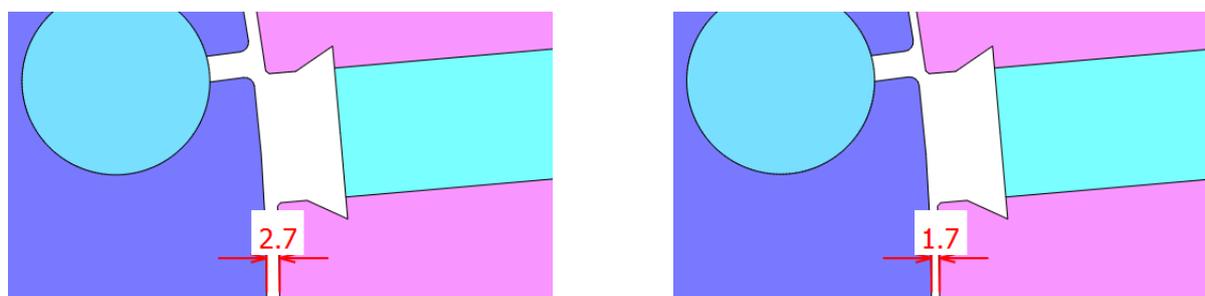


Figura 3.49. Evaluación paramétrica de RD1 en JMAG-Express Public: Variación de GAP vista en el apartado [Motor Diagram].

En la Figura 3.50, y la Figura 3.51, se han representado las curvas de par y rendimiento en función del diámetro exterior del rotor a la velocidad asignada. No se aprecian grandes variaciones en ambas características al modificar dicho parámetro, a pesar de que en el análisis de sensibilidad parecía influir de forma considerable.

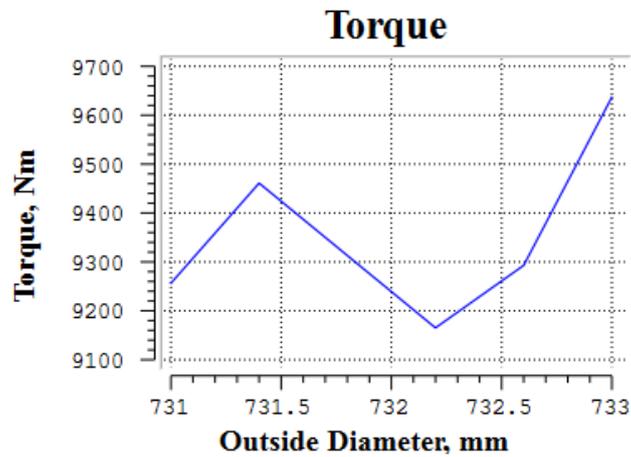


Figura 3.50. Evaluación paramétrica de RD1 en JMAG-Express Public: Variación del par [Torque] en función del diámetro exterior del rotor [Outside Diameter] a la velocidad asignada 1490 rpm del modelo MA.

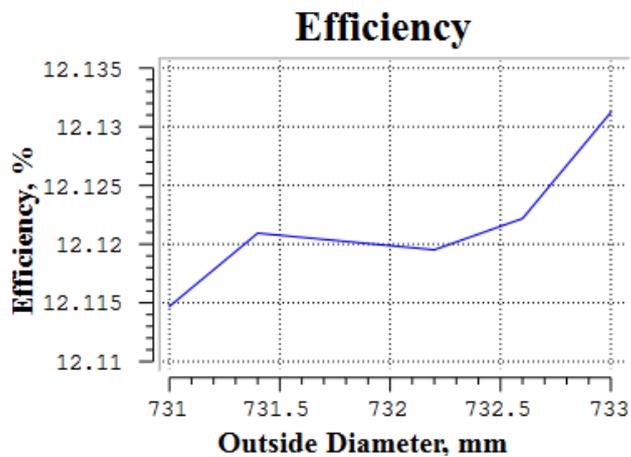


Figura 3.51. Evaluación paramétrica de RD1 en JMAG-Express Public: Variación del rendimiento [Efficiency] en función del diámetro exterior del rotor [Outside Diameter] a la velocidad asignada 1490 rpm del modelo MA.

No obstante, se ha de tener en cuenta la modificación del espesor del entrehierro. Al aumentar su longitud se precisa una fracción mayor de corriente para magnetizar el espacio de aire que separa al estator del rotor (Figura 3.52), que debilita su acoplamiento magnético dado el bajo valor de permeabilidad que caracteriza al aire (igual a la del vacío).

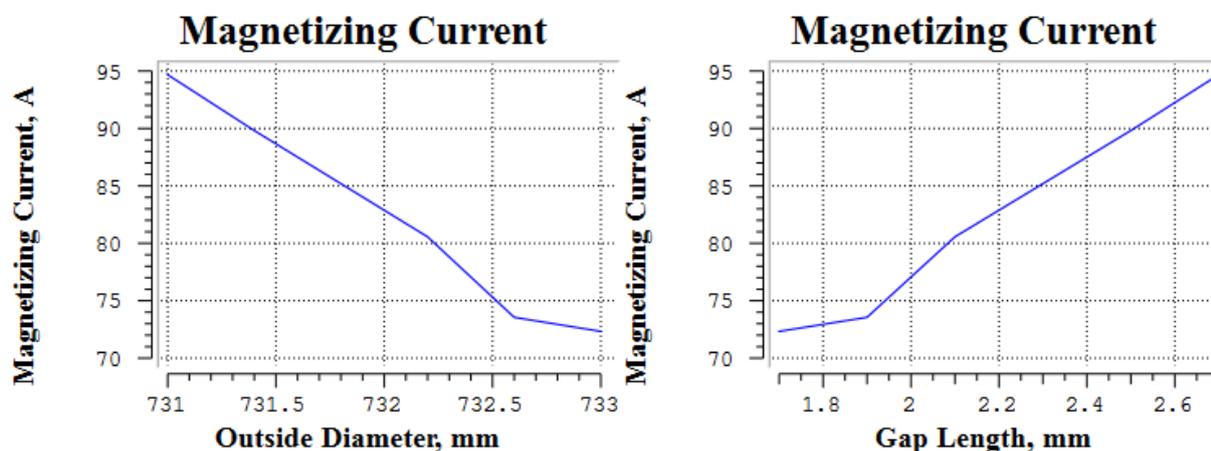


Figura 3.52. Evaluación paramétrica de RD1 en JMAG-Express Public: Variación de la corriente de magnetización [Magnetizing Current] en función del diámetro exterior del rotor [Outside Diameter] y del espesor del entrehierro [Gap, Length] a la velocidad asignada 1490 rpm del modelo MA.

Las pérdidas en el hierro aumentan ligeramente a medida que el entrehierro se estrecha por el incremento de las pérdidas a causa de las pulsaciones en el flujo originadas por la variación de reluctancia del entrehierro por la presencia de ranuras, canales radiales de ventilación e irregularidades en el mismo. Son menores con entrehierros más anchos.

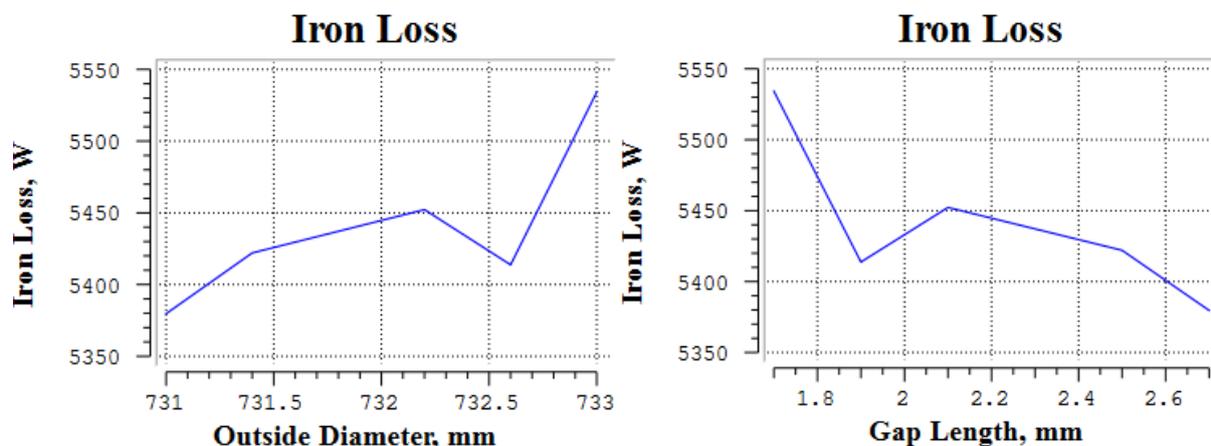


Figura 3.53. Evaluación paramétrica de RD1 en JMAG-Express Public: Variación pérdidas en el hierro [Iron Loss] en función del diámetro exterior del rotor [Outside Diameter] y del espesor del entrehierro [Gap, Length] a la velocidad asignada 1490 rpm del modelo MA.

El aumento de la corriente absorbida se debe esencialmente al incremento en la corriente de magnetización, que no es aprovechada en la generación del par y potencia útiles desarrollados por el motor, en consecuencia, el par y el rendimiento se reducen, así como el factor de potencia.

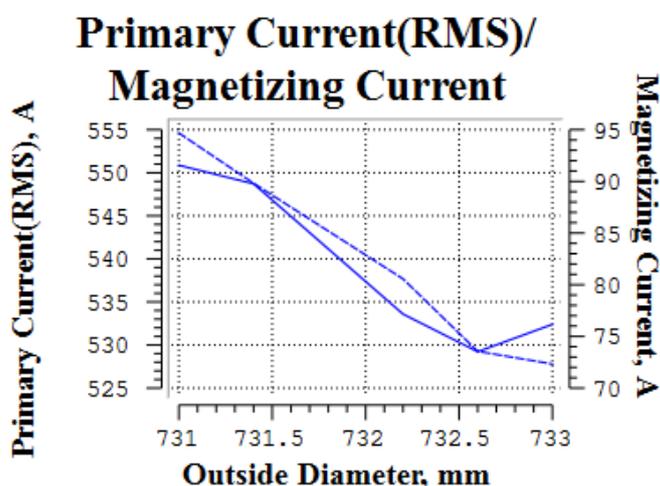


Figura 3.54. Evaluación paramétrica de RD1 en JMAG-Express Public: Variación de la corriente absorbida en el primario [Primary Current (RMS)] (Curva de trazo continuo) y la corriente de magnetización [Magnetizing Current] (Curva a trazos) en función del diámetro exterior del rotor [Outside Diameter] a la velocidad asignada 1490 rpm.

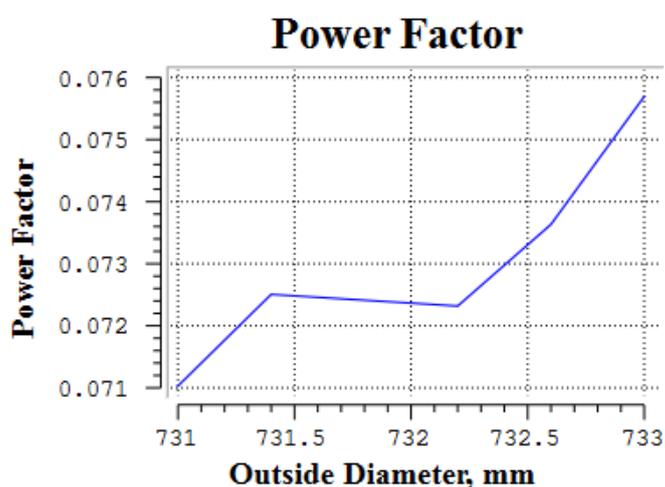


Figura 3.55. Evaluación paramétrica de RD1 en JMAG-Express Public: Variación del factor de potencia [Power Factor] en función del diámetro exterior del rotor [Outside Diameter] a la velocidad asignada 1490 rpm del modelo MA.

En la Figura 3.56, se muestran las características de par y rendimiento en función de la velocidad. No se aprecian diferencias notables, si una leve mejora cuando el entrehierro es más estrecho (diámetro externo del rotor mayor).

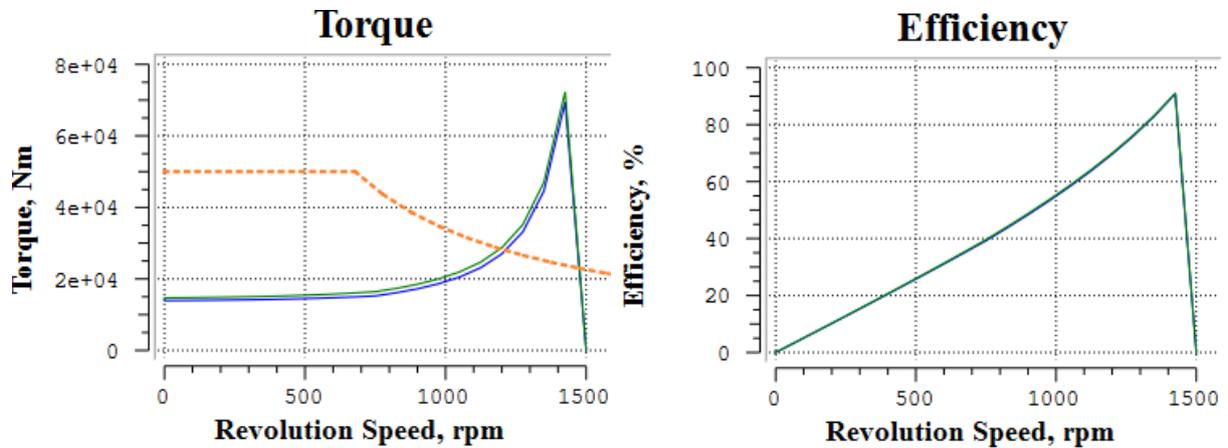


Figura 3.56. Evaluación paramétrica de RD1 en JMAG-Express Public: Curva Par-Velocidad [Torque – Revolution Speed] y Curva Rendimiento-Velocidad [Efficiency – Revolution Speed].

Azul: RD1 = 731 mm, Verde: RD1 = 733 mm

En la Figura 3.57 se evidencia el ascenso de la corriente de magnetización cuando el espesor del entrehierro es mayor.

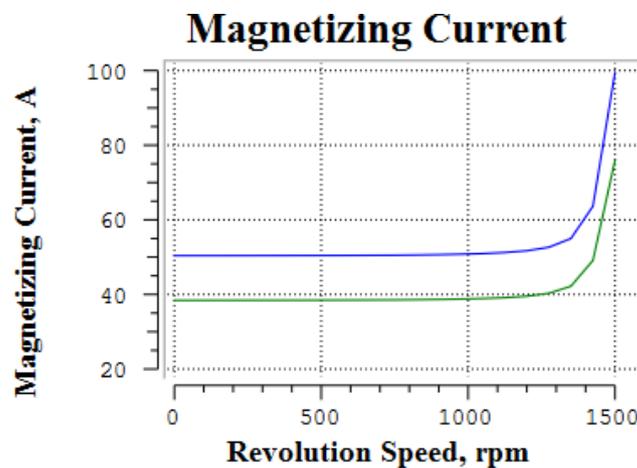


Figura 3.57. Evaluación paramétrica de RD1 en JMAG-Express Public: Curva Corriente de magnetización-Velocidad [Magnetizing Current – Revolution Speed]. Azul: RD1 = 731 mm,

Verde: RD1 = 733 mm

Conclusiones de la evaluación paramétrica. Determinación de las alternativas de diseño

Del estudio de los resultados realizado durante la evaluación paramétrica de los parámetros de diseño, se desprenden las siguientes conclusiones:

Las posibles alternativas para mejorar el par en condiciones asignadas consisten en:

- Aproximación de las barras del rotor al entrehierro, para ello se ha de reducir la distancia a la que se encuentran sus centros respecto al diámetro exterior del rotor. En definitiva, se disminuirá el valor del parámetro de diseño [RC1].
- Aumento de la anchura de las ranuras del estator [SW3], se ajustarán otros parámetros, como la altura de las ranuras, las dimensiones de los conductores etc., para incrementar aún más el par y mejorar otros aspectos como el factor de llenado de ranura. Se analizará la posibilidad de incorporar a este diseño el ajuste de la profundidad de la boca de las ranuras del estator [ST] (disminución de su valor).
- Aumento del diámetro de las barras del rotor [RL1], o barras del rotor de mayor sección. Se realizará un estudio más minucioso de este parámetro para tener una visión más certera del efecto que ejerce sobre el par dado que durante la evaluación y análisis del mismo, se observó que al aumentar el diámetro de las barras éstas se encontraban más próximas al entrehierro que las de menor diámetro, y en consecuencia la dispersión de flujo magnético era menor.

En relación al rendimiento, en ninguno de los parámetros de diseño evaluados parecían apreciarse grandes mejoras, no obstante, se tendrán en cuenta aquellos que tienen un impacto positivo en el mismo, y que se han incorporado en las alternativas planteadas para mejorar el par en condiciones asignadas, como la profundidad de la boca de las ranuras del estator [ST], la aproximación de las barras del rotor al entrehierro [RC1].

3.2.3 ESTUDIO DE LAS ALTERNATIVAS DE DISEÑO DEL MODELO MA

Tras el análisis pormenorizado de los parámetros de diseño involucrados en la mejora de las características en condiciones asignadas, en concreto del par y el rendimiento a la velocidad de régimen, se plantean tres propuestas de diseño.

A continuación, se efectuará un estudio detallado de todas ellas. En primer lugar, se ajustarán sus respectivas geometrías para que se adecúen a las nuevas condiciones derivadas de la variación de los parámetros de diseño considerados. Una vez se han corregido las dimensiones de las distintas alternativas, las propuestas de diseño definitivas se evaluarán con JMAG-Express Public para comprobar si verifican o se aproximan a los requerimientos de funcionamiento. Los resultados obtenidos se contrastarán con los del modelo inicial MA y con los requerimientos establecidos, para apreciar las posibles mejoras en las características operativas de cada alternativa de diseño.

Durante el desarrollo y evaluación del modelo inicial llevado a cabo con el software JMAG-Express Public, se han detectado ciertas limitaciones que empobrecen el rigor del análisis, como la escasez de valores obtenidos en cálculo realizado por el programa y que no puede ser ajustado a conveniencia, y el ajuste mediante interpolación lineal de los valores intermedios no contemplados por el programa. Estos hechos cobran importancia en el estudio a la velocidad asignada tal y como se ha comentado previamente.

Por este motivo, en esta etapa de diseño, dada la falta de precisión en la determinación de los resultados que presenta JMAG-Express Public, se hará uso del programa de cálculo de máquinas asíncronas CALASIN v4.0, desarrollado por Miguel Ángel Rodríguez Pozueta docente del Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética (DIEE) de la Universidad de Cantabria, con el propósito de lograr una perspectiva más veraz de las características operativas de las distintas propuestas de diseño.

CALASIN v4.0 (CALculo de máquinas ASINcronicas)

CALASIN consiste en un libro de cálculo Excel que realiza el análisis y obtención de algunas curvas características de la máquina asíncrona trifásica mediante circuitos equivalentes de parámetros constantes. Para el análisis se utilizarán los parámetros del circuito equivalente que proporciona JMAG-Express Public.

Dado que se conocen todos los parámetros del circuito equivalente, CALASIN utilizará en su análisis el circuito equivalente exacto en el que se suprime la resistencia de pérdidas en hierro R_{Fe} dado que, en máquinas asíncronas, la corriente de pérdidas en el hierro $I_{Fe} \ll I_{\mu}$, por lo que aproxima la corriente de magnetización a la corriente de vacío I_0 .

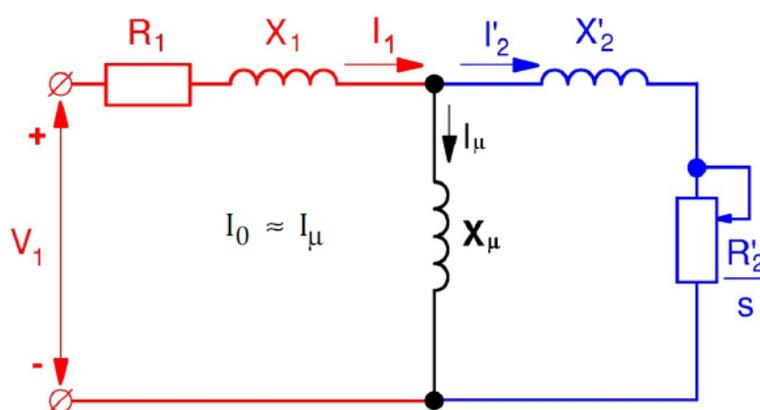


Figura 3.58. Circuito equivalente "exacto" de una máquina asíncrona trifásica. Fuente: [9].

Los datos a introducir en CALASIN en la sección *Datos* se enumeran a continuación:

- Tipo de conexión del estator: Estrella / Triángulo
- Tensión de línea del estator: V_{1L} (V)
- Frecuencia de la tensión del estator: f_1 (Hz)
- Número de polos de la máquina: $2p$
- Reactancia magnetizante: X_{μ} (Ω)
- Resistencia de una fase del estator: R_1 (Ω)
- Resistencia de una fase del rotor reducida al estator: R_2' (Ω)
- Reactancia de dispersión por fase del estator: X_1 (Ω)
- Reactancia de dispersión por fase del rotor reducida al estator: X_2' (Ω)

Una vez introducidos los datos, el programa muestra los resultados de magnitudes que no dependen de la velocidad ni el deslizamiento del motor como la velocidad de sincronismo n_1 expresada en r.p.m. y Ω_1 en rad/s, la velocidad y el deslizamiento correspondientes al instante en el que la máquina alcanza el par máximo (n_m y s_m respectivamente), la corriente de fase del estator en vacío I_0 igual a la corriente de magnetización I_μ , y la potencia de pérdidas Joule en vacío P_{Cu0} entre otras.

Así mismo, el programa proporciona los valores de las características más relevantes de tres estados de funcionamiento:

- Estado de funcionamiento definido por el usuario indicando su deslizamiento o velocidad en r.p.m.
- Estado de funcionamiento correspondiente al instante en el que el motor desarrolla su par máximo ($n = n_m$, $s = s_m$).
- Estado de funcionamiento correspondiente al arranque ($n = 0$, $s = 1$).

Las magnitudes de los estados de funcionamiento mencionados anteriormente proporcionadas por CALASIN, y que serán utilizadas para estudiar cada propuesta diseño, se enumeran a continuación:

- Deslizamiento: s
- Velocidad: n (r.p.m.)
- Pérdidas en el cobre del estator: P_{Cu1} (W)
- Pérdidas en el cobre del rotor: P_{Cu2} (W)
- Potencia mecánica interna (prácticamente igual a la potencia útil, P_u): P_{mi} (W)
- Par de rotación: M (N·m)
- Factor de potencia del motor: $\cos \phi_1$
- Corriente de una fase del estator: I_1 (A)

El programa no calcula el rendimiento del motor, que se obtendrá con la ecuación (3.3), en la que no se han considerado las pérdidas en el hierro ni mecánicas, por lo que, el valor obtenido con dicha expresión será superior al valor real. El término P_{Cu} corresponde a las pérdidas totales en el cobre ($P_{Cu} = P_{Cu1} + P_{Cu2}$):

$$\eta (\%) = \frac{P_{mi}}{P_{mi} + P_{Cu}} \cdot 100 \quad (3.3)$$

CALASIN también muestra diversas curvas características en función del deslizamiento en todos los regímenes de funcionamiento de la máquina ($-1 < s < 2$). El estudio se centra en el régimen motor ($0 < s < 1$).

No obstante, a pesar de que CALASIN considera más pares de valores en la obtención de las distintas características y que calcula el valor de las variables de funcionamiento a una velocidad concreta sin interpolar, es más impreciso que JMAG-Express Public pues no considera la saturación y las pérdidas en el hierro²⁹ de los núcleos magnéticos.

Por lo tanto, los resultados obtenidos con ambos programas se compararán a fin de aproximarlos a la realidad operativa de los distintos modelos.

Alternativa de diseño MA.1: Aproximación de las barras del rotor al entrehierro [RC1]

Del estudio de los resultados emitidos por el análisis de sensibilidad y la posterior evaluación paramétrica de la profundidad a la que se encuentran los centros de las barras del rotor respecto al diámetro exterior del mismo, se concluyó que su disminución repercutía positivamente en el incremento del par desarrollado por el motor a la velocidad asignada, no apreciándose una gran mejoría en el rendimiento debido, probablemente, al error cometido por el programa. Por este motivo, se procede a realizar un estudio más detallado de este parámetro.

²⁹ Aproxima la corriente de excitación a la corriente de magnetización pues no considera la corriente absorbida por la resistencia equivalente a las pérdidas por histéresis y corrientes parásitas en los núcleos magnéticos

En la Tabla 3.9, se muestra el valor de la distancia a la que se encuentran los centros de las barras respecto al diámetro exterior del rotor del modelo MA y el valor finalmente adoptado de este parámetro. Los cálculos realizados en su obtención se detallan en el Anexo 2.4.

Parámetro	Diseño MA	Diseño MA.1
RC1 (mm)	28,4	24,5

Tabla 3.9. Alternativa de diseño MA.1: Disminución de la distancia a la que se encuentran los centros de las barras respecto al diámetro exterior del rotor [RC1].

Los resultados de la propuesta de diseño MA.1 se van a obtener en primer lugar con JMAG-Express Public y posteriormente con CALASIN dado que se emplearán los parámetros del circuito equivalente que calcula JMAG-Express Public.

En la Tabla 3.10, se muestran los valores de los parámetros que serán utilizados por CALASIN para analizar ambas propuestas de diseño.

Parámetro		Diseño MA		Diseño MA.1	
Tipo de conexión del estator		Estrella		Estrella	
V_{1L} (V)		4000		4000	
f_1 (Hz)		50		50	
2p (Nº de polos)		4		4	
b_0 (S)	X_μ (Ω) ³⁰	0,03281	30,48	0,03339	29,95
R_1 (Ω)		0,01357		0,01357	
R_2' (Ω)		0,04482		0,04333	
X_1 (Ω)		0,2777		0,2425	
X_2' (Ω)		0,2777		0,2425	

Tabla 3.10. Alternativa de diseño MA.1: Datos necesarios para realizar el análisis de los diseños MA y MA.1 con CALASIN.

³⁰ JMAG Express Public calcula la susceptancia magnetizante b_0 (S). La reactancia magnetizante es la inversa de la susceptancia manetizante: $X_\mu = 1 / b_0$

La Tabla 3.11 reúne los resultados obtenidos en JMAG-Express Public y CALASIN de ambos modelos junto a los valores de las especificaciones a la velocidad asignada.

Características a la velocidad asignada				
n (r.p.m.)		1490		
s		0,0067		
Parámetro	Programa	Modelo MA	Modelo MA.1	Especificaciones
I_{1N} (A)	JMAG	525,5	570,9	587
	CALASIN	349,75	361,72	
J_{1N} (A/mm ²)	JMAG	3,185	3,46	3,6
	CALASIN	-	-	
T_N (N·m)	JMAG	9612	11640	22751,7
	CALASIN	14720	15273	
η (%)	JMAG	12,14	12,15	97
	CALASIN	99,12	99,11	
P_N (kW)	JMAG	1434	1736	3550
	CALASIN	2296,87	2383,22	
$\cos \phi_{1N}$	JMAG	0,07629	0,08306	0,9
	CALASIN	0,956	0,959	
P_{Cu} (W)	JMAG	140470	169420	-
	CALASIN	20395	21321,4	
P_{Fe} (W)	JMAG	5452	5520	-
	CALASIN	-	-	
I_{μ} (A)	JMAG	71,35	72,95	146,725
	CALASIN	75,09	76,49	
I_{μ}/I_{1N}	JMAG	0,136	0,128	0,25
	CALASIN	0,215	0,211	

Tabla 3.11. Alternativa de diseño MA.1: Comparativa de las características del modelo MA y MA.1 en JMAG-Express Public y CALASIN con los requerimientos del motor a la velocidad asignada 1490 r.p.m.

Atendiendo a los resultados obtenidos con ambos programas se observa lo siguiente:

- La propuesta de diseño MA.1 presenta valores de par T_N y potencia P_N superiores al modelo inicial, aunque siguen siendo inferiores a los requeridos. Las dos características presentan valores superiores en CALASIN, sin embargo, este último no contempla las pérdidas en el hierro.
- La corriente en una fase del estator I_{1N} del modelo MA.1 es mayor que la del modelo inicial este incremento es destinado a la generación del par y potencia útiles del motor pues se requiere aproximadamente la misma corriente magnetizante I_μ para excitar los núcleos magnéticos, de manera que hay una leve mejora en el factor de potencia $\cos \phi_{1N}$ en comparación con el modelo inicial. La corriente absorbida toma valores considerablemente inferiores en CALASIN. La corriente de magnetización es similar en ambos programas, ligeramente superior en CALASIN dado que aproxima su valor a la corriente de vacío al no considerar las pérdidas magnéticas en el núcleo.
- El rendimiento de ambos modelos es similar, dado que en el diseño MA.1 las pérdidas en el cobre P_{Cu} y en el hierro P_{Fe} se han incrementado en la misma proporción que la potencia de salida P_N . Las pérdidas en el cobre son significativamente elevadas en JMAG-Express Public comparadas con CALASIN.

Sorprende el valor excesivamente bajo del rendimiento obtenido en JMAG-Express Public, que debiera ser inferior al calculado utilizando los valores de CALASIN (al no considerar las pérdidas mecánicas ni las pérdidas en el hierro), pero no tan reducido. Sucede algo parecido con el factor de potencia que es notablemente inferior al esperado en este tipo de máquinas, debiera ser similar al calculado por CALASIN, algo inferior porque no se han considerado factores como las pérdidas en el hierro etc.

Por este motivo, se decide realizar el cálculo de ambas magnitudes analíticamente. Para apreciar el error cometido por JMAG-Express Public, y obtener un valor más coherente con los valores extraídos del programa. En el Anexo 2.5 se detallan las expresiones y el cálculo de ambos parámetros. La Tabla 3.12 muestra los valores resultantes del modelo inicial MA y de la alternativa de diseño MA.1:

Magnitud	Modelo MA	Modelo MA.1
η (%)	90,76	90,85
$\cos \phi_{1N}$	0,434	0,483

Tabla 3.12. Alternativa de diseño MA.1: Cálculo analítico del rendimiento y el factor de potencia a la velocidad asignada 1490 r.p.m. de los modelos MA y MA.1.

A pesar de que el rendimiento y el factor de potencia siguen siendo inferiores, adquieren valores más razonables. Este hecho evidencia la falta de rigor de JMAG-Express Public en el cálculo de ambas magnitudes y que puede ser extrapolado a las restantes características. Por ejemplo, esta circunstancia explicaría el valor tan elevado de corriente en una fase del estator. Si se atiende a la expresión que determina su valor³¹, se observa que guarda una relación inversa con el rendimiento y el factor de potencia de manera que, al ser tan bajos, la corriente se incrementa de forma considerable, lo que justificaría también el elevado valor de pérdidas en el cobre del inductor y del inducido. No obstante, resulta difícil identificar que parámetros son la causa principal de dicho error pues todas las magnitudes están relacionadas.

De ahora en adelante se empleará el rendimiento y el factor de potencia calculados analíticamente para analizar las distintas alternativas de diseño. Pues, a pesar de que probablemente diferirán de los valores reales, proporcionan una orientación más objetiva.

³¹

$$I_{1N} = \frac{P_N}{3 \cdot V_{1N} \cdot \eta_N \cdot \cos \phi_{1N}}$$

También se van a analizar las características en el arranque (Tabla 3.13) y en el instante en el que el motor desarrolla el par máximo (Tabla 3.14) de ambos modelos para verificar que no se infringen las restricciones de funcionamiento establecidas en ambos estados de funcionamiento.

Dado que en JMAG-Express Public no es posible conocer con precisión el valor de par máximo e instante concreto en que se produce, se hará uso de los datos que facilita CALASIN.

Características en el arranque				
n (r.p.m.)			0	
s			1	
Parámetro	Programa	Modelo MA	Modelo MA.1	Especificaciones
I_s (A)	JMAG	4141	4733	3404
	CALASIN	4154	4748	
T_s (N·m)	JMAG	14410	18240	18201
	CALASIN	14505	18359	
I_s/I_N	JMAG	7,88	8,3	5,8
	CALASIN	11,88	13,12	
T_s/T_N	JMAG	1,5	1,57	0,8
	CALASIN	0,98	1,2	

Tabla 3.13. Alternativa de diseño MA.1: Comparativa de las características del modelo MA y MA.1 en JMAG-Express Public y CALASIN con las especificaciones en el arranque.

Características en el instante de par máximo			
Parámetro	Modelo MA	Modelo MA.1	Especificaciones
n_m (r.p.m.)	1378,4	1365,5	-
s_m	0,08	0,089	-
T_m (N·m)	88304	100916	54604
T_m/T_N	6	6,6	2,4

Tabla 3.14 Alternativa de diseño MA.1: Comparativa de las características del modelo MA y MA.1 obtenidas con CALASIN con los requerimientos en el instante en el que el motor desarrolla el par máximo.

Tal y como se había advertido en el análisis paramétrico de la distancia a la que se encuentran los centros de las barras respecto al diámetro exterior del rotor, el aumento de par se produce en todo el rango de velocidades cuando las barras se encuentran más próximas al entrehierro. El par en el arranque del modelo MA.1 se aproxima más al de las especificaciones, la relación entre el par en el arranque y el par asignado es superior al de las especificaciones en ambos modelos dado que el par a la velocidad asignada de referencia es inferior al requerido. La corriente en el arranque de ambos modelos es superior a la requerida, hecho que puede suponer un ascenso excesivo de la temperatura y de las pérdidas en el cobre, dado que en dicho instante toda la potencia absorbida por el motor es disipada en forma de calor, así como caídas de tensión importantes en la línea. El cociente entre la corriente en el arranque y la corriente a la velocidad asignada es superior en CALASIN al ser la corriente a la velocidad asignada bastante inferior a la obtenida por JMAG-Express Public.

El par máximo es considerablemente elevado en ambos modelos, superior en el diseño MA.1. Un par máximo muy elevado no es aconsejable, puede provocar que la transmisión y la máquina accionada estén sobrecargadas durante el arranque y aceleración de la carga, y no se esté aprovechando eficazmente la capacidad del motor.

Conforme a lo argumentado hasta el momento, a pesar de que el diseño MA.1 presenta mejoras en las condiciones de funcionamiento a la velocidad asignada respecto al modelo de partida, como el par y la potencia de salida en el eje, la corriente absorbida en una fase del estator etc. y un par en el arranque más próximo al de las especificaciones, aún es preciso optimizar esta propuesta de diseño pues no satisface los requisitos establecidos al inicio. No obstante, no se descarta la incorporación del ajuste del parámetro de diseño que caracteriza al diseño MA.1 en otros modelos.

Alternativa de diseño MA.2: Ajuste de las dimensiones de las ranuras y conductores del estator

Del estudio de los parámetros de diseño potencialmente útiles en la consecución de las características de funcionamiento requeridas, se concluyó que el empleo de ranuras en el estator más anchas en relación a su altura, contribuía en la mejora de las características de funcionamiento a la velocidad asignada en concreto el par con un sutil empeoramiento del rendimiento. Se lograba, igualmente, un incremento en el par de arranque respecto al modelo inicial. Asimismo, se observó que realizando un ajuste más detallado de las dimensiones de las ranuras era posible favorecer aún más las condiciones de operación del modelo, pues al incrementar su anchura se producía una leve reducción en el factor de ocupación de ranura dado que las dimensiones de los conductores y altura de las ranuras no se alteraron durante la evaluación paramétrica del ancho de ranura. Por lo tanto, para mejorar el factor de ocupación se escogerá un conductor normalizado de mayor anchura y, dado que se ha de conservar la densidad de corriente en el mismo, menor altura, de este modo también se consigue reducir el flujo de dispersión de ranura al ser esta menos profunda, incrementándose así el par desarrollado por el motor.

A continuación, se comparan las dimensiones del modelo de partida y de la propuesta de diseño MA.2. Los cálculos realizados en la determinación de los valores se describen en el Anexo 2.4:

Parámetro	Diseño MA	Diseño MA.2
$a_{c1} \times b_{c1}$ (mm)	22 x 7,5	25 x 6,5
SW3 (mm)	27	29
SD1 (mm)	1098	1085
K_{Cu1} (%) ³²	74,57	74,79

Tabla 3.15. Alternativa de diseño MA.2: Aumento del ancho de ranura [SW3], disminución del alto de ranura (diámetro exterior del estator menor[SD1]) y variación de las dimensiones del conductor [$a_{c1} \times b_{c1}$]. Factor de ocupación en el estator K_{Cu1} resultante.

³² Factor de ocupación (Slot Fill Factor) extraído de JMAG-Express Public.

El análisis y obtención de las características de funcionamiento de la propuesta de diseño MA.2, de nuevo, se realizará con JMAG-Express Public y posteriormente con CALASIN.

Los datos a introducir en CALASIN se relacionan a continuación:

Parámetro		Diseño MA		Diseño MA.2	
Tipo de conexión del estator		Estrella		Estrella	
V_{1L} (V)		4000		4000	
f_1 (Hz)		50		50	
2p (Nº de polos)		4		4	
b_0 (S)	X_μ (Ω)	0,03281	30,48	0,03491	28,65
R_1 (Ω)		0,01357		0,01376	
R_2' (Ω)		0,04482		0,04484	
X_1 (Ω)		0,2777		0,2541	
X_2' (Ω)		0,2777		0,2541	

Tabla 3.16. Alternativa de diseño MA.2: Datos necesarios para realizar el análisis de los diseños MA y MA.2 con CALASIN.

Tras la evaluación y análisis del modelo en JMAG-Express Public y CALASIN se procede a comparar las magnitudes resultantes de las características de funcionamiento de los modelos MA y MA.2 con las especificaciones a la velocidad de régimen. Nuevamente, se realiza el cálculo analítico del rendimiento y del factor de potencia en base a los resultados emitidos por JMAG-Express Public. En el Anexo 2.5 se detalla el procedimiento de cálculo efectuado.

Magnitud	Modelo MA	Modelo MA.2
η (%)	90,76	90,62
$\cos \phi_{1N}$	0,434	0,451

Tabla 3.17. Alternativa de diseño MA.2: Cálculo analítico del rendimiento y del factor de potencia a la velocidad asignada 1490 r.p.m. de los modelos MA y MA.2.

Características a la velocidad asignada				
n (r.p.m.)		1490		
s		0,0067		
Parámetro	Programa	Modelo MA	Modelo MA.2	Especificaciones
I_{1N} (A)	JMAG	525,5	563,1	587
	CALASIN	349,75	350,84	
J_{1N} (A/mm ²)	JMAG	3,185	3,465	3,6
	CALASIN	-	-	
T_N (N·m)	JMAG	9612	10690	22751,7
	CALASIN	14720	14736,3	
η (%)	JMAG	12,14	12,12	97
	CALASIN	99,12	99,12	
P_N (kW)	JMAG	1434	1596	3550
	CALASIN	2296,87	2299,33	
$\cos \phi_{1N}$	JMAG	0,07629	0,07829	0,9
	CALASIN	0,956	0,954	
P_{Cu} (W)	JMAG	140470	159740	-
	CALASIN	20395	20512,8	
P_{Fe} (W)	JMAG	5452	5449	-
	CALASIN	-	-	
I_{μ} (A)	JMAG	71,35	76,02	146,725
	CALASIN	75,08	79,91	
I_{μ}/I_{1N}	JMAG	0,136	0,135	0,25
	CALASIN	0,215	0,228	

Tabla 3.18. Alternativa de diseño MA.2: Comparativa de las características del modelo MA y MA.2 en JMAG-Express Public y CALASIN con los requerimientos del motor a la velocidad asignada 1490 r.p.m.

Atendiendo a los resultados obtenidos con ambos programas se deduce lo siguiente:

- El par T_N y la potencia P_N de la propuesta de diseño MA.2 han mejorado respecto al modelo de partida MA, no obstante, aún se encuentran alejados de los valores establecidos en las especificaciones. Las dos características presentan valores superiores en CALASIN al no considerar las pérdidas en el hierro.
- La corriente en una fase del estator I_{1N} del modelo MA.2 ha aumentado respecto al modelo inicial, sin embargo, a diferencia de lo que ocurría con el diseño MA.1, este incremento es ocasionado, en mayor medida, por el ascenso de la corriente de magnetización I_μ , por este motivo la mejora en las características de par y potencia es moderado, este hecho provoca, a su vez, una ligera reducción en el factor de potencia según se observa en el valor proporcionado por CALASIN, en JMAG-Express Public apenas ha variado, sin embargo, experimenta una leve mejora respecto al modelo de partida. Al igual que en el modelo MA.1, la corriente absorbida toma valores considerablemente inferiores en CALASIN mientras que la corriente de magnetización es similar en ambos programas, ligeramente superior en CALASIN dado que aproxima su valor a la corriente de vacío al no considerar las pérdidas magnéticas en el núcleo.
- El rendimiento en ambos modelos es similar, algo inferior en el diseño MA.2 al ser el incremento de pérdidas en el cobre P_{Cu} más acusado que el aumento de la potencia útil P_N , luego, a pesar de que se han logrado rebajar las pérdidas en el hierro P_{Fe} , el rendimiento se ve reducido sutilmente. El ascenso de las pérdidas en el cobre es motivado por el incremento de la corriente absorbida debido a la aminoración del flujo de dispersión (menor reactancia de dispersión $X_1 = X_2'$, Tabla 3.16), y la menor sección transversal de los conductores del estator (aumento del valor de la resistencia en el estator R_1 , Tabla 3.16) en relación al modelo inicial. Las pérdidas en el cobre son significativamente elevadas en JMAG-Express Public en comparación con CALASIN tal y como se apreció en el análisis de la propuesta de diseño MA.1.

En definitiva, las características de funcionamiento a la velocidad asignada de referencia, más concretamente el par y la corriente, del modelo MA.2, si bien han mejorado respecto al modelo inicial MA, aún no verifican las especificaciones establecidas, sería preciso incorporar más ajustes a la propuesta de diseño para lograr la consecución de los requerimientos fijados a la velocidad de régimen.

A continuación, se procede con la evaluación de alguna de las características de funcionamiento más relevantes en el arranque y en el instante en el que el motor desarrolla el par máximo, para apreciar si las variaciones llevadas a cabo en las dimensiones del modelo de partida y que caracterizan a la alternativa de diseño MA.2, favorecen o no el cumplimiento de las restricciones de diseño establecidas en ambos estados de funcionamiento.

Características en el arranque				
n (r.p.m.)			0	
s			1	
Parámetro	Programa	Modelo MA	Modelo MA.2	Especificaciones
I_s (A)	JMAG	4141	4521	3404
	CALASIN	4154	4534	
T_s (N·m)	JMAG	14410	17190	18201
	CALASIN	14505	17298	
I_s/I_N	JMAG	7,88	8,03	5,8
	CALASIN	11,88	12,92	
T_s/T_N	JMAG	1,5	1,6	0,8
	CALASIN	0,98	1,17	

Tabla 3.19. Alternativa de diseño MA.2: Comparativa de las características del modelo MA y MA.2 en JMAG-Express Public y CALASIN con las especificaciones en el arranque.

Características en el instante de par máximo			
Parámetro	Modelo MA	Modelo MA.2	Especificaciones
n_m (r.p.m.)	1378,4	1367,12	-
s_m	0,08	0,0886	-
T_m (N·m)	88304	96287,5	54604
T_m/T_N	6	6,5	2,4

Tabla 3.20. Alternativa de diseño MA.2: Comparativa de las características del modelo MA y MA.2 obtenidas con CALASIN con los requerimientos en el instante en el que el motor desarrolla el par máximo.

El empleo de ranuras en el estator más anchas en proporción a su altura junto con el ajuste de las restantes magnitudes, ha supuesto un ascenso del par desarrollado por el motor en todo el espectro de velocidades. El par en el arranque del modelo MA.2 se aproxima más al de las especificaciones, la relación entre el par en el arranque y el par asignado es superior al de las especificaciones en ambos modelos dado que el par a la velocidad asignada de referencia es inferior al requerido, siendo más acusada esta diferencia en JMAG-Express Public al ser el par a la velocidad asignada inferior al obtenido con CALASIN. La corriente en el arranque de ambos modelos es superior a la requerida y, tal y como se explicó al estudiar la propuesta de diseño MA.1, no es aconsejable. El cociente entre la corriente en el arranque y la corriente a la velocidad asignada es superior en CALASIN al ser la corriente a la velocidad asignada bastante inferior a la obtenida por JMAG-Express Public.

El par máximo es considerablemente elevado en ambos modelos, superior en el diseño MA.2. Un par máximo muy elevado no es aconsejable, puede provocar que la transmisión y la máquina accionada estén sobrecargadas durante el arranque y aceleración de la carga, y no se esté aprovechando eficazmente la capacidad del motor.

Por lo tanto, a pesar de que el diseño MA.2 presenta mejoras en las condiciones de funcionamiento a la velocidad asignada respecto al modelo MA, como el par y la potencia de salida en el eje, la corriente absorbida en una fase del estator etc. y un par en el arranque más próximo al de las especificaciones, aún es preciso optimizar esta propuesta de diseño pues no satisface los requisitos de diseño. No obstante, no se descarta la incorporación del ajuste del parámetro de diseño que caracteriza al diseño MA.2 en otros modelos.

Alternativa de diseño MA.2a: Incorporación del ajuste de [ST] en el modelo MA.2

Entre las conclusiones extraídas de la evaluación paramétrica y análisis de sensibilidad del modelo inicial, se valoró la posibilidad de incorporar el ajuste de la profundidad de la boca de ranura del estator [ST] a la alternativa de diseño MA.2, al observarse que, a medida que los arrollamientos del estator se encontraban más próximos al entrehierro (acortamiento de longitud de la boca de ranura), se incrementaba el rendimiento y el factor de potencia, magnitudes que, en la alternativa de diseño MA.2, se reducen. Asimismo, se pretende elevar el par a la velocidad asignada, sin causar un aumento excesivo en el par de arranque y el par máximo.

Para ello, es preciso definir de nuevo algunas magnitudes, tales como el diámetro exterior del estator, para lograr que la altura útil de las ranuras y altura del yugo permanezcan igual que en el modelo MA.2. Las magnitudes que se han modificado respecto al modelo MA.2 se relacionan a continuación. En el Anexo 2.4 se describe el procedimiento realizado para su deducción.

Parámetro	Diseño MA.2	Diseño MA.2a
ST (mm)	14	11
SD1 (mm)	1085	1079
K_{Cu1} (%)	74,79	74,79

Tabla 3.21. Alternativa de diseño MA.2a: Disminución de la profundidad de la boca de ranura [ST] y del diámetro exterior del estator [SD1] respecto al modelo MA.2. Factor de ocupación en el estator K_{Cu1} resultante.

Tras definir las dimensiones de la propuesta de diseño MA.2a se efectúa su evaluación en JMAG-Express Public y CALASIN. Los datos que se han de proporcionar a CALASIN son:

Parámetro		Diseño MA.2		Diseño MA.2a	
Tipo de conexión del estator		Estrella		Estrella	
V_{1L} (V)		4000		4000	
f_1 (Hz)		50		50	
2p (Nº de polos)		4		4	
b_0 (S)	X_μ (Ω)	0,03491	28,65	0,03519	28,42
R_1 (Ω)		0,01376		0,01372	
R_2' (Ω)		0,04484		0,04408	
X_1 (Ω)		0,2541		0,2331	
X_2' (Ω)		0,2541		0,2331	

Tabla 3.22. Alternativa de diseño MA.2a: Datos necesarios para realizar el análisis de los diseños MA.2 y MA.2a con CALASIN.

En la Tabla 3.23, se detallan las magnitudes de las características de funcionamiento más destacadas a la velocidad asignada de las propuestas de diseño MA.2 y MA.2a, a fin de estudiar como el ajuste de la profundidad de la boca de ranura revierte en las condiciones operativas del motor.

Características a la velocidad asignada				
n (r.p.m.)		1490		
s		0,0067		
Parámetro	Programa	Modelo MA.2	Modelo MA.2a	Especificaciones
I_{1N} (A)	JMAG	563,1	594,1	587
	CALASIN	350,84	356,85	
J_{1N} (A/mm ²)	JMAG	3,465	3,658	3,6
	CALASIN	-	-	
T_N (N·m)	JMAG	10690	12030	22751,7
	CALASIN	14736,3	15020,1	
η (%)	JMAG	12,12	12,12	97
	CALASIN	99,12	99,11	
P_N (kW)	JMAG	1596	1795	3550
	CALASIN	2299,33	2343,62	
$\cos \phi_{1N}$	JMAG	0,07829	0,08217	0,9
	CALASIN	0,954	0,956	
P_{Cu} (W)	JMAG	159740	179670	-
	CALASIN	20512,8	20970,4	
P_{Fe} (W)	JMAG	5449	5418	-
	CALASIN	-	-	
I_{μ} (A)	JMAG	76,02	76,86	146,725
	CALASIN	79,91	80,61	
I_{μ}/I_{1N}	JMAG	0,135	0,129	0,25
	CALASIN	0,228	0,226	

Tabla 3.23. Alternativa de diseño MA.2a: Comparativa de las características del modelo MA.2 y MA.2a en JMAG-Express Public y CALASIN con los requerimientos del motor a la velocidad asignada 1490 r.p.m.

El rendimiento y el factor de potencia, obtenidos analíticamente en base a las magnitudes resultantes en JMAG-Express Public, se muestran a continuación:

Magnitud	Modelo MA.2	Modelo MA.2a
η (%)	90,62	90,65
$\cos \phi_{1N}$	0,451	0,481

Tabla 3.24. Alternativa de diseño MA.2a: Cálculo analítico del rendimiento y del factor de potencia a la velocidad asignada 1490 r.p.m. de los modelos MA.2 y MA.2a.

Del análisis de los resultados emitidos por ambos programas se concluye que, el ajuste de la profundidad de ranura en el diseño MA.2, procura una mejora en las características de funcionamiento a la velocidad nominal establecida, en concreto cabe destacar la mejora en el factor de potencia, uno de los parámetros de funcionamiento que se pretendían optimizar expresamente. No se ha logrado una mejora sustancial en el rendimiento debido a que la sección transversal de los conductores del estator permanece igual³³ y el valor eficaz de la corriente en el primario I_{1N} del modelo MA.2a ha aumentado considerablemente respecto al modelo MA.2 con el consecuente ascenso de las pérdidas Joule, no obstante, el incremento de la potencia útil del motor P_N de la propuesta de diseño MA.2a ha sido algo mayor que en el diseño MA.2, aumentando así el rendimiento. La disminución de la potencia de pérdidas en el hierro, aunque no ha sido significativa, también favorece su mejora.

El incremento en la intensidad de fase del modelo MA.2a es destinado, en mayor medida, al desarrollo de par motor, pues la corriente de magnetización no ha aumentado significativamente en relación al modelo MA.2. Esto es propiciado por la disminución del flujo de dispersión al aproximar los arrollamientos del estator al entrehierro³⁴. De este modo se consigue incrementar el factor de potencia a la velocidad de régimen.

En relación a las características de funcionamiento a la velocidad asignada, el diseño MA.2a es más adecuado que el diseño MA.2, al lograrse mejorar el par, la potencia y el factor de potencia, sin un excesivo aumento de la corriente de magnetización. La potencia útil y de pérdidas en el cobre se han incrementado proporcionalmente respecto al modelo MA.

³³ La resistencia equivalente de pérdidas en el cobre del estator de ambos modelos apenas ha variado R_1 (Tabla 3.22)

³⁴ Disminución de la reactancia de dispersión X_1 (Tabla 3.22).

El rendimiento de ambas propuestas de diseño es inferior al del modelo de partida MA, no obstante, en el modelo MA.2a se ha logrado incrementar levemente.

Para estudiar completamente el modelo MA.2a se realiza el análisis de las características de funcionamiento en el arranque e instante en el que el par motor es máximo:

Características en el arranque				
n (r.p.m.)			0	
s			1	
Parámetro	Programa	Modelo MA.2	Modelo MA.2a	Especificaciones
I_s (A)	JMAG	4521	4922	3404
	CALASIN	4534	4963	
T_s (N·m)	JMAG	17190	20060	18201
	CALASIN	17298	20179	
I_s/I_N	JMAG	8,03	8,28	5,8
	CALASIN	12,92	13,91	
T_s/T_N	JMAG	1,6	1,67	0,8
	CALASIN	1,17	1,34	

Tabla 3.25. Alternativa de diseño MA.2a: Comparativa de las características del modelo MA.2 y MA.2a en JMAG-Express Public y CALASIN con las especificaciones en el arranque.

Características en el instante de par máximo			
Parámetro	Modelo MA.2	Modelo MA.2a	Especificaciones
n_m (r.p.m.)	1367,12	1357,66	-
s_m	0,0886	0,0949	-
T_m (N·m)	96287,5	104819,7	54604
T_m/T_N	6,5	6,9	2,4

Tabla 3.26. Alternativa de diseño MA.2a: Comparativa de las características del modelo MA.2 y MA.2a obtenidas con CALASIN con los requerimientos en el instante en el que el motor desarrolla el par máximo.

Conforme a las magnitudes resultantes de la evaluación con ambos programas, se observa que el par y la corriente de fase en el arranque del diseño MA.2a han aumentado respecto al modelo MA.2, aunque no de forma importante. La relación entre el par en el arranque y el par asignado de la alternativa de diseño MA.2a, si se emplean los valores proporcionados por JMAG-Express Public, se conserva de forma aproximada respecto al modelo MA.2. El cociente entre la intensidad en el arranque y asignada no se ha modificado perceptiblemente si se consideran los valores emitidos por JMAG-Express Public. Esta diferencia es más apreciable en CALASIN, tal y como sucedía con otras alternativas de diseño estudiadas. En relación al par máximo desarrollado por el diseño MA.2a, se advierte que sigue siendo marcadamente elevado, aunque se ha logrado incrementar el par en condiciones asignadas y la relación que guarda este con el par máximo no ha aumentado en exceso.

En definitiva, con la incorporación del ajuste de la profundidad de la boca de ranura a la alternativa de diseño MA.2, se han logrado mejorar las características a la velocidad asignada, en especial el par, la potencia y el factor de potencia, sin comprometer excesivamente el rendimiento, a pesar del incremento de las pérdidas en el cobre, ni las características en el arranque e instante en el que el par motor es máximo. Sin embargo, la propuesta de diseño MA.2a no satisface las especificaciones establecidas y, en consecuencia, es necesario realizar más ajustes a la misma.

Alternativa de diseño MA.3: Aumento del diámetro de las barras del rotor [RL1]

Conforme a los resultados obtenidos en el análisis de sensibilidad y posterior evaluación paramétrica del diámetro de las barras del rotor del diseño inicial MA, se optó por estudiar más detalladamente la repercusión de este parámetro en las características operativas del motor al apreciarse, durante el estudio, que el aumento del diámetro de las barras ocasionaba, al no alterar la posición de los centros de las barras, un acortamiento simultáneo de la longitud del cuello de ranura del rotor. Este hecho causaba, por un lado, la reducción de la resistencia del rotor, propiciada por el aumento de la sección transversal de las barras y, por otro, de la reactancia de dispersión debido a la aminoración de los flujos de dispersión de ranura a medida que la longitud del cuello se acortaba. También se detectó un ascenso de la corriente de magnetización que afectaba negativamente al factor de potencia, dado que, el aumento del diámetro de las barras supone un estrechamiento de los dientes ocasionando un incremento de la inducción magnética en los mismos que causa su saturación magnética.

Por este motivo, se compararán las características de funcionamiento de la alternativa de diseño MA.3 con la propuesta MA.1, de este modo, al poseer ambos modelos la misma longitud de la boca de ranura ($h_{o2} = 5 \text{ mm}$), se analizará específicamente la influencia del diámetro de las barras [RL1] sobre las características de funcionamiento de la máquina al considerar exclusivamente su intervención en estas. No obstante, se ha de contemplar la influencia que ejerce el estrechamiento de los dientes, causado por el empleo de barras de mayor diámetro (ranuras más anchas), en las características.

En el Anexo 2.4 se detallan los cálculos realizados en la obtención de los parámetros geométricos que caracterizan a la propuesta de diseño MA.3. A continuación se muestran las dimensiones ajustadas de las alternativas de diseño MA.1 y MA.3.

Parámetro	Diseño MA.1	Diseño MA.3
RL1 (mm)	39	47
RC1 (mm)	24,5	28,5

Tabla 3.27. Alternativa de diseño MA.3: Incremento del diámetro de las barras [RL1] y ajuste de la posición de los centros de las barras [RC1].

Tras realizar los ajustes pertinentes en el modelo inicial MA, se evalúa la propuesta de diseño MA.3 en JMAG-Express Public y CALASIN. Se relacionan a continuación los datos de los modelos MA.1 y MA.3 que se han de facilitar a CALASIN.

Atendiendo a los parámetros del circuito equivalente extraídos de JMAG-Express Public, se comprueba que la resistencia del rotor referida al estator del modelo MA.3 es menor que la del modelo MA.1 (barras de mayor sección transversal) y la reactancia de dispersión del modelo MA.3, si bien es ligeramente menor que en el modelo MA.1, dista menos que en el modelo MA (Tabla 3.10). En relación a la reactancia magnetizante X_{μ} , se aprecia como decrece su valor al incrementarse el diámetro de las barras, en consecuencia, la corriente de magnetización del modelo MA.3 aumentará, tal y como se razonó anteriormente.

Parámetro		Diseño MA.1		Diseño MA.3	
Tipo de conexión del estator		Estrella		Estrella	
V_{1L} (V)		4000		4000	
f_1 (Hz)		50		50	
2p (Nº de polos)		4		4	
b_0 (S)	X_μ (Ω)	0,03339	29,95	0,03703	27,01
R_1 (Ω)		0,01357		0,01357	
R_2' (Ω)		0,04333		0,042	
X_1 (Ω)		0,2425		0,2369	
X_2' (Ω)		0,2425		0,2369	

Tabla 3.28. Alternativa de diseño MA.3: Datos necesarios para realizar el análisis de los diseños MA.1 y MA.3 con CALASIN.

Para analizar más detalladamente el impacto que el diámetro de las barras del rotor ejerce sobre las características de funcionamiento a la velocidad asignada, se han resumido las más relevantes en la Tabla 3.30, correspondientes a las alternativas de diseño MA.1 y MA.3.

Asimismo, se proporciona el rendimiento y el factor de potencia de ambas propuestas de diseño calculados analíticamente:

Magnitud	Modelo MA.1	Modelo MA.3
η (%)	90,85	89,60
$\cos \phi_{1N}$	0,483	0,4

Tabla 3.29. Alternativa de diseño MA.3: Cálculo analítico del rendimiento y del factor de potencia a la velocidad asignada 1490 r.p.m. de los modelos MA.1 y MA.3.

Características a la velocidad asignada				
n (r.p.m.)			1490	
s			0,0067	
Parámetro	Programa	Modelo MA.1	Modelo MA.3	Especificaciones
I_{1N} (A)	JMAG	570,9	622,4	587
	CALASIN	361,72	374,41	
J_{1N} (A/mm ²)	JMAG	3,46	3,772	3,6
	CALASIN	-	-	
T_N (N·m)	JMAG	11640	10350	22751,7
	CALASIN	15274	15733	
η (%)	JMAG	12,15	11,99	97
	CALASIN	99,11	99,10	
P_N (kW)	JMAG	1736	1544	3550
	CALASIN	2383,22	2454,897	
$\cos \phi_{1N}$	JMAG	0,08306	0,06991	0,9
	CALASIN	0,959	0,955	
P_{Cu} (W)	JMAG	169420	173610	-
	CALASIN	21321,4	22182,6	
P_{Fe} (W)	JMAG	5520	5621	-
	CALASIN	-	-	
I_μ (A)	JMAG	72,95	80,23	146,725
	CALASIN	76,49	84,77	
I_μ/I_{1N}	JMAG	0,128	0,129	0,25
	CALASIN	0,211	0,226	

Tabla 3.30. Alternativa de diseño MA.3: Comparativa de las características del modelo MA.1 y MA.3 en JMAG-Express Public y CALASIN con los requerimientos del motor a la velocidad asignada 1490 r.p.m.

De los resultados emitidos por ambos programas se deduce lo siguiente:

- No se ha logrado un aumento importante del par T_N y la potencia P_N con la propuesta de diseño MA.3 si se la compara con el modelo MA.1. En relación al modelo MA (Tabla 3.11) si se han logrado incrementar ambas características, a expensas de una rebaja en el rendimiento y el factor de potencia.
- El incremento de las pérdidas en el cobre P_{Cu} del modelo MA.3 es provocado principalmente por el ascenso de la intensidad que circula por el devanado inductor I_{1N} . Las pérdidas magnéticas P_{Fe} también se han incrementado debido a la saturación magnética en los dientes del rotor. Naturalmente, el aumento de la potencia de pérdidas ha causado la disminución en el rendimiento del modelo MA.3.
- El incremento de la corriente asignada de fase es propiciado, en mayor medida, por el ascenso de la corriente de magnetización hecho que implica un efecto negativo en el factor de potencia del diseño MA.3. Asimismo, este ascenso es originado, en parte, por la disminución del flujo de dispersión (la reactancia de dispersión del modelo MA.3 es ligeramente inferior a la del modelo MA.1, según se indicó previamente).

Por estos motivos, se concluye que la alternativa de diseño MA.3 no resulta efectiva en la consecución de las características de funcionamiento a la velocidad nominal de referencia, a pesar de que se esperaba, con la incorporación del ajuste del diámetro de las barras, una mejora significativa en estas.

Para estudiar el efecto que el diámetro de las barras ejerce sobre las características en el arranque e instante en el que el par motor es máximo se muestran las más relevantes de los modelos MA.1 y MA.3.

Al emplear barras de mayor sección en la jaula del rotor, se preveía un desplazamiento de la curva Par-Velocidad a velocidades mayores (deslizamientos menores) preservándose el valor máximo del par, que se produce a una velocidad mayor, y reduciéndose el par en el arranque a causa del desplazamiento de la curva, tal y como se señaló en el análisis paramétrico del parámetro en cuestión. Sin embargo, no sucede así dado que, a pesar de que la resistencia del rotor del modelo MA.3 es menor, la reactancia de dispersión también lo es, si bien es más similar a la del modelo MA.1, en consecuencia, la característica de par del modelo MA.3 será algo superior en todo el rango de velocidades y, del mismo modo, la corriente absorbida.

Características en el arranque				
n (r.p.m.)			0	
s			1	
Parámetro	Programa	Modelo MA.1	Modelo MA.3	Especificaciones
I_s (A)	JMAG	4733	4848	3404
	CALASIN	4748	4862	
T_s (N·m)	JMAG	18240	18530	18201
	CALASIN	18359	18634	
I_s/I_N	JMAG	8,3	7,8	5,8
	CALASIN	13,12	12,98	
T_s/T_N	JMAG	1,57	1,78	0,8
	CALASIN	1,2	1,18	

Tabla 3.31. Alternativa de diseño MA.3: Comparativa de las características del modelo MA.1 y MA.3 en JMAG-Express Public y CALASIN con las especificaciones en el arranque.

Características en el instante de par máximo			
Parámetro	Modelo MA.1	Modelo MA.3	Especificaciones
n_m (r.p.m.)	1365,5	1366,5	-
s_m	0,089	0,089	-
T_m (N·m)	100916	103133	54604
T_m/T_N	6,6	6,5	2,4

Tabla 3.32. Alternativa de diseño MA.3: Comparativa de las características del modelo MA.1 y MA.3 obtenidas con CALASIN con los requerimientos en el instante en el que el motor desarrolla el par máximo.

Efectivamente al comparar las magnitudes resultantes de ambos modelos en el arranque e instante en que el motor desarrolla el par máximo, se aprecia el ascenso del par del modelo MA.3 en los dos estados de funcionamiento, también se distingue el incremento de la corriente absorbida en el arranque del motor. El par máximo se produce a una velocidad próxima en ambos diseños, encontrándose un poco por encima la correspondiente al modelo MA.3.

Para apreciar gráficamente estas diferencias, se han representado en una misma gráfica las características Par-Velocidad de las propuestas de diseño MA.1 y MA.3. El trazado de las curvas se ha realizado en Matlab empleando el par resultante del análisis mediante el circuito equivalente exacto de ambos modelos:

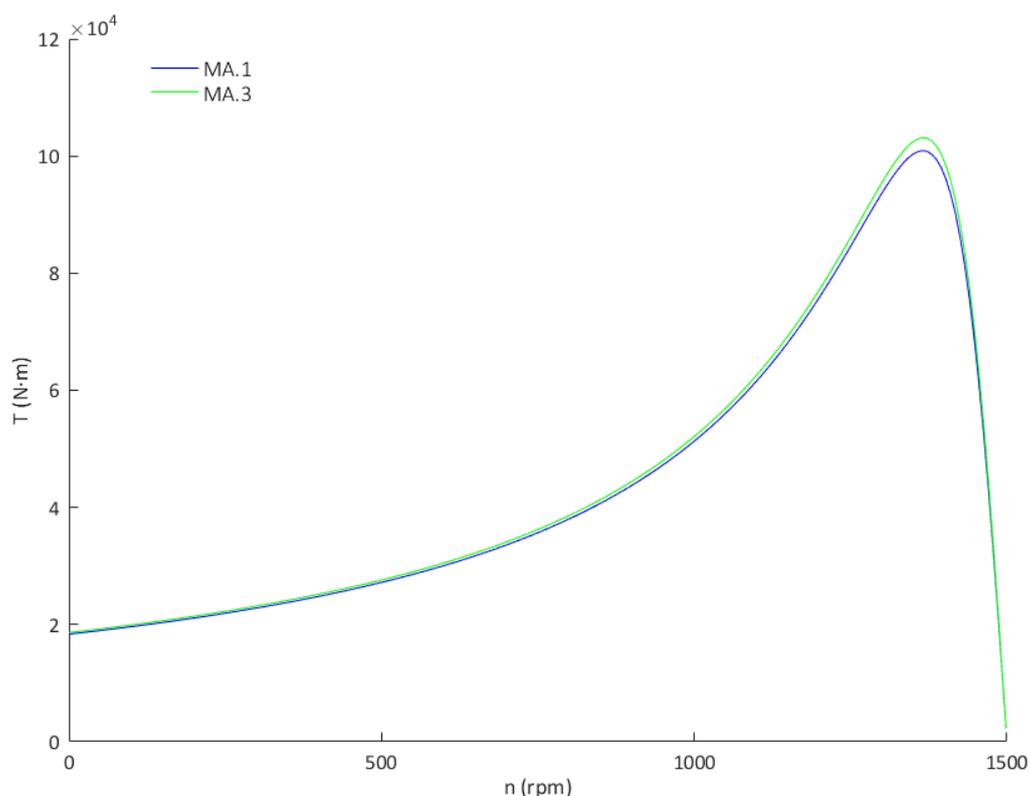


Figura 3.59. Alternativa de diseño MA.3: Curva Par-Velocidad de los modelos MA.1 y MA.3.

Asimismo, en el gráfico de la Figura 3.60, se comparan las curvas Par-Velocidad de la propuesta de diseño MA.1 y de la propuesta de diseño MA.3 ajustando los parámetros del circuito equivalente de la misma de tal forma que coincidan con los del modelo MA.1 salvo la resistencia del rotor referida al estator que se mantiene igual (Tabla 3.28). De este modo es posible contemplar el efecto que causaría este parámetro en la característica Par-Velocidad.

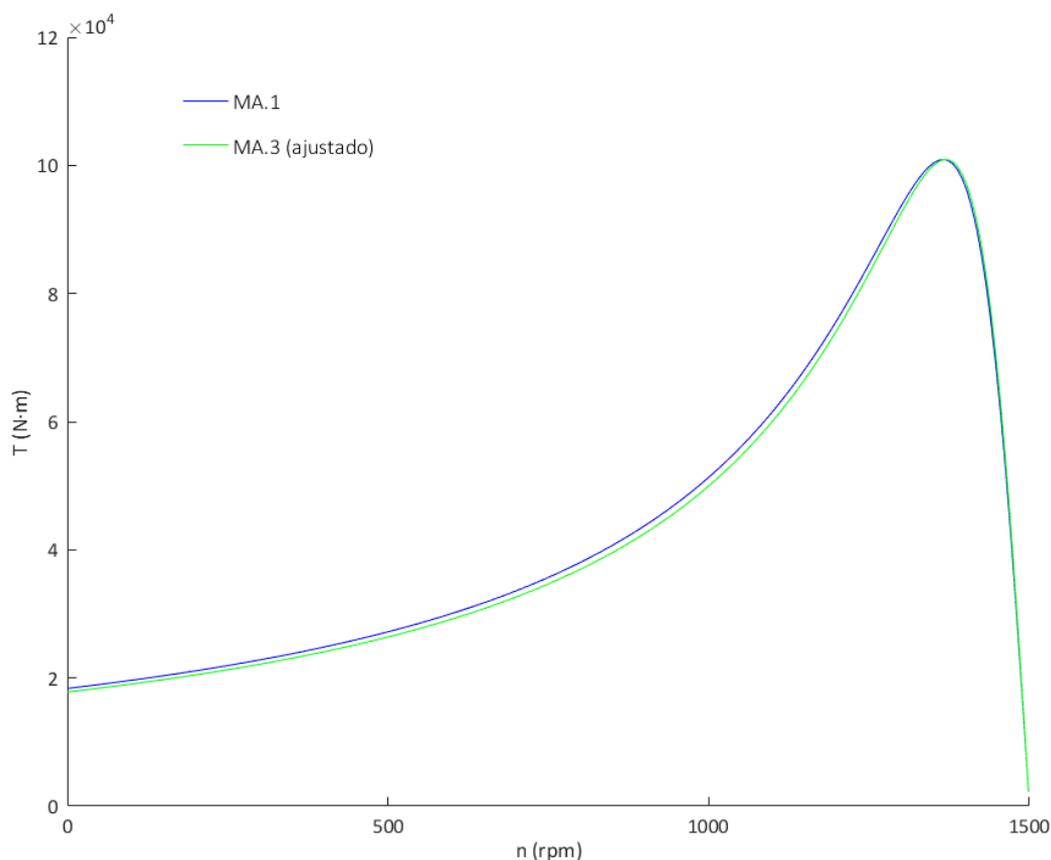


Figura 3.60. Alternativa de diseño MA.3: Curva Par-Velocidad del modelo MA.1 y del modelo MA.3 con ajuste de los parámetros del circuito equivalente.

En la Figura 3.60 se aprecia claramente el desplazamiento de la curva T-n del diseño MA.3 ajustado a velocidades mayores a causa de la disminución de la resistencia del rotor, el par máximo en ambos modelos es el mismo, pero en el diseño MA.3 se produce a una velocidad mayor, y el par en el arranque del modelo MA.3 se reduce respecto al del modelo MA.1.

Dado que los parámetros de funcionamiento de la propuesta de diseño MA.3 no se ajustan a las especificaciones requeridas, se descarta por el momento, emplear barras de mayor diámetro en otros modelos.

Alternativa de diseño MA.4: Disminución de los parámetros [RC1] y [ST] incremento [SW3]

En base a las alternativas de diseño analizadas, se decide aplicar al modelo de partida MA el ajuste de los parámetros que han contribuido favorablemente en la mejora de las características de funcionamiento a la velocidad asignada, y consisten en:

- Aproximación de las barras del rotor al entrehierro: Disminución del parámetro [RC1]
- Aproximación del devanado del estator al entrehierro: Disminución del parámetro [ST]
- Ligero aumento del ancho de las ranuras del estator: Incremento de [SW3]

Al modificar el ancho de las ranuras [SW3] y la profundidad de la boca de ranura del estator [ST], se han de ajustar otras dimensiones del modelo MA para que el factor de ocupación de ranura no varíe excesivamente. Dado que se opta por mantener la altura del yugo y las dimensiones de los conductores del estator, es preciso adaptar el diámetro exterior del estator para preservar el factor de ocupación de ranura. Se asumen los mismos valores de profundidad de la boca de ranura del modelo MA.1. En el Anexo 2.4 se detalla el cálculo de las dimensiones ajustadas.

Parámetro	Diseño MA	Diseño MA.4
RC1 (mm)	28,4	24,5
ST (mm)	14	11
SW3 (mm)	27	28
SD1 (mm)	1098	1086
K_{Cu1} (%) ³⁵	74,57	74,7

Tabla 3.33. Alternativa de diseño MA.4: Parámetros ajustados respecto al modelo MA.

³⁵ Factor de ocupación (*Slot Fill Factor*) extraído de JMAG-Express Public.

Tras efectuar los cambios en el modelo MA, se evalúa el diseño resultante con JMAG-Express Public y CALASIN. Los datos que se han de facilitar a CALASIN en su análisis se resumen a continuación:

Parámetro		Diseño MA		Diseño MA.4	
Tipo de conexión del estator		Estrella		Estrella	
V_{1L} (V)		4000		4000	
f_1 (Hz)		50		50	
2p (Nº de polos)		4		4	
b_0 (S)	X_μ (Ω)	0,03281	30,48	0,03451	28,98
R_1 (Ω)		0,01357		0,01352	
R_2' (Ω)		0,04482		0,04373	
X_1 (Ω)		0,2777		0,2118	
X_2' (Ω)		0,2777		0,2118	

Tabla 3.34. Alternativa de diseño MA.4: Datos necesarios para realizar el análisis de los diseños MA y MA.4 con CALASIN.

Se relacionan a continuación las características de funcionamiento de los modelos MA y MA.4 a la velocidad asignada 1490 rpm resultantes de la evaluación realizada por ambos programas, y el rendimiento y el factor de potencia deducidos analíticamente en base a las magnitudes extraídas de JMAG-Express Public.

Magnitud	Modelo MA	Modelo MA.4
η (%)	90,76	90,96
$\cos \phi_{1N}$	0,434	0,533

Tabla 3.35. Alternativa de diseño MA.4: Cálculo analítico del rendimiento y del factor de potencia a la velocidad asignada 1490 r.p.m. de los modelos MA y MA.4.

Características a la velocidad asignada				
n (r.p.m.)			1490	
s			0,0067	
Parámetro	Programa	Modelo MA	Modelo MA.4	Especificaciones
I_{1N} (A)	JMAG	525,5	615,4	587
	CALASIN	349,75	359,38	
J_{1N} (A/mm ²)	JMAG	3,185	3,729	3,6
	CALASIN	-	-	
T_N (N·m)	JMAG	9612	13840	22751,7
	CALASIN	14720	15179	
η (%)	JMAG	12,14	12,16	97
	CALASIN	99,12	99,12	
P_N (kW)	JMAG	1434	2066	3550
	CALASIN	2296,87	2368,47	
$\cos \phi_{1N}$	JMAG	0,07629	0,08969	0,9
	CALASIN	0,956	0,96	
P_{Cu} (W)	JMAG	140470	199970	-
	CALASIN	20395	21134	
P_{Fe} (W)	JMAG	5452	5465	-
	CALASIN	-	-	
I_{μ} (A)	JMAG	71,35	75,77	146,725
	CALASIN	75,09	79,12	
I_{μ}/I_{1N}	JMAG	0,136	0,123	0,25
	CALASIN	0,215	0,22	

Tabla 3.36. Alternativa de diseño MA.4: Comparativa de las características del modelo MA y MA.4 en JMAG-Express Public y CALASIN con los requerimientos del motor a la velocidad asignada 1490 r.p.m.

Analizando las magnitudes de las características de funcionamiento a la velocidad asignada de referencia de ambos modelos con los requerimientos, se extraen las siguientes conclusiones:

- Con el ajuste de los parámetros geométricos que caracterizan al modelo MA.4, se ha logrado incrementar el par y la potencia desarrollados por el motor a la velocidad nominal alcanzándose a su vez una mejora significativa en el rendimiento y el factor de potencia en relación a las restantes alternativas de diseño planteadas. Esta diferencia es más apreciable si se consideran los resultados de la evaluación con JMAG-Express Public.
- La intensidad asignada en una fase del estator es superior en el modelo MA.4 debido al ascenso de flujo mutuo al realizarse la aproximación de los devanados del rotor y el estator al entrehierro, y emplearse ranuras más anchas en el estator (disminución del flujo de dispersión, reactancia de dispersión menor $X_1 = X_2'$, Tabla 3.34). Este ascenso de la corriente absorbida por el estator es destinado en mayor proporción a la generación de par útil, dado que el aumento de la corriente de magnetización del modelo MA.4 no ha sido tan relevante. La corriente de magnetización se ha incrementado levemente por el nivel de saturación de los dientes del estator del modelo MA.4, al ser estos un poco más estrechos que en el modelo MA.
- El rendimiento del modelo MA.4 es superior al del modelo MA al ser el ascenso de la potencia útil más importante que el de las pérdidas de potencia eléctricas y magnéticas. La elevación de las pérdidas en el cobre es motivada por el aumento de la corriente absorbida debido a la aminoración del flujo de dispersión, las pérdidas en el hierro apenas han variado en relación al modelo inicial.

No obstante, el modelo MA.4 sigue sin verificar las especificaciones a la velocidad de referencia, en consecuencia, es preciso realizar más ajustes en la misma.

A continuación, se resumen las características en el arranque e instante en que el par desarrollado por la máquina es máximo, para comprobar si se verifican las restricciones establecidas en ambos estados de funcionamiento.

La intensidad en el arranque del modelo MA.4 se ha incrementado de forma considerable en relación a otras alternativas de diseño estudiadas, esto es debido a la significativa rebaja del flujo de dispersión que causa un ascenso de la corriente absorbida en todo el rango de velocidades de la máquina. Sucede algo similar con el par desarrollado por la máquina, que es notablemente superior al requerido en ambos estados de funcionamiento.

Características en el arranque				
n (r.p.m.)			0	
s			1	
Parámetro	Programa	Modelo MA	Modelo MA.4	Especificaciones
I_s (A)	JMAG	4141	5405	3404
	CALASIN	4154	5422	
T_s (N·m)	JMAG	14410	24040	18201
	CALASIN	14505	24200	
I_s/I_N	JMAG	7,88	8,78	5,8
	CALASIN	11,88	15,09	
T_s/T_N	JMAG	1,5	1,74	0,8
	CALASIN	0,98	1,59	

Tabla 3.37. Alternativa de diseño MA.4: Comparativa de las características del modelo MA y MA.4 en JMAG-Express Public y CALASIN con las especificaciones en el arranque.

Características en el instante de par máximo			
Parámetro	Modelo MA	Modelo MA.4	Especificaciones
n_m (r.p.m.)	1378,4	1344,7	-
s_m	0,08	0,1036	-
T_m (N·m)	88304	115226,5	54604
T_m/T_N	6	7,59	2,4

Tabla 3.38. Alternativa de diseño MA.4: Comparativa de las características del modelo MA y MA.4 obtenidas con CALASIN con los requerimientos en el instante en el que el motor desarrolla el par máximo.

Conclusiones del estudio de las alternativas de diseño del modelo MA

Del estudio de las distintas alternativas de diseño planteadas, se extraen las siguientes conclusiones:

- En relación a la consecución de las características asignadas a la velocidad nominal de referencia, las alternativas de diseño MA.1, MA.2a y MA.4 son las más adecuadas pues se consigue incrementar el par lográndose a su vez mejorar el rendimiento y el factor de potencia respecto al modelo de partida. La alternativa de diseño MA.3 presenta un par superior, pero a expensas de una rebaja en el rendimiento y el factor de potencia. No obstante, en todas ellas, el par a la velocidad asignada de referencia aún sigue siendo inferior al requerido, para lograr incrementar el par sin modificar los parámetros geométricos y de alimentación de ningún modelo sería preciso establecer una velocidad asignada inferior, el motor operaría entonces con unas pérdidas en el cobre superiores con el consecuente ascenso de la temperatura que a largo plazo puede menguar la vida útil de los componentes.
- En relación al cumplimiento de las restricciones en el arranque del motor, todas las alternativas de diseño cuentan con un par similar al de las especificaciones salvo en el modelo MA.4 que es superior, evidentemente, la relación entre el par en el arranque y el par asignado siempre queda por encima del valor establecido dado que el par a la velocidad asignada de referencia es inferior al requerido. La corriente en el arranque de todos los diseños evaluados, es superior a la especificada, para lograr rebajar su valor sería preciso aumentar la reactancia de dispersión en el arranque, con la geometría circular de las ranuras y barras del rotor adoptada inicialmente, solo es posible incrementar su valor alejando las barras de la superficie externa del rotor mediante el parámetro RC1 (mayor flujo de dispersión), este ajuste implicaría una disminución de la corriente y del par en todo el régimen de funcionamiento del motor.
- Atendiendo al par máximo desarrollado por las distintas propuestas de diseño se observa que es notablemente superior al requerido, de nuevo para disminuirlo a valores más razonables, sería necesario aumentar la reactancia de dispersión, alejando las barras del rotor, o bien, los arrollamientos del estator del entrehierro.

En base a las conclusiones expuestas no parece posible incrementar el par asignado sin comprometer otras características operativas del motor como la corriente absorbida y par en el arranque y el par máximo del motor, este hecho suscita la necesidad de emplear otros recursos que por el momento no se han considerado.

Tal y como se ha comentado en apartados anteriores, la geometría de las ranuras del rotor ejerce una influencia importante en las características operativas del motor. La geometría circular empleada hasta el momento, apenas permite ajustar la resistencia y reactancia del rotor, parámetros que, como se ha visto, permiten manipular las condiciones de operación de la máquina. Por esta razón, se estudiará modificar la geometría de las barras y se adoptará aquella que mejor se adecúe a las especificaciones y restricciones establecidas. Por lo tanto, se decide integrar en el proceso de diseño este planteamiento.

Otra opción consistiría en reducir la velocidad asignada de la máquina (incrementar su deslizamiento s), para que esta desarrolle el par requerido en las especificaciones sin tener que alterar su geometría o condiciones de alimentación. No obstante, esta variación implica un ascenso de las pérdidas eléctricas en el rotor al ser proporcionales al deslizamiento, pérdidas que se disipan en forma de calor incrementando la temperatura de operación del motor. Por lo tanto, si el par a la velocidad asignada de referencia es considerablemente inferior al requerido, el desplazamiento del deslizamiento puede ser excesivo y no es recomendable, además, en motores de gran potencia el deslizamiento a plena carga debe estar comprendido entre $[0,4 - 0,7]$ % muy próximo a la velocidad síncrona del motor ($s = 0$).

3.3 ALTERNATIVAS DE DISEÑO

En base al estudio de las alternativas de diseño del modelo MA, se concluyó que era preciso adoptar otros planteamientos no contemplados hasta el momento, al no lograrse, con los parámetros de diseño considerados en la evaluación del modelo inicial y desarrollo y estudio de las diferentes alternativas de diseño planteadas, una mejora significativa en las características de funcionamiento a la velocidad asignada sin comprometer las condiciones de operación en el arranque e instante en que el par motor es máximo. Se decide, por tanto, incluir el ajuste de la geometría de las ranuras y barras de la jaula de rotor al proceso de diseño.

El procedimiento a seguir será el mismo que en el desarrollo del modelo inicial, se realizarán los cambios oportunos en los parámetros de diseño antes mencionados y se evaluará el diseño resultante con JMAG-Express Public y CALASIN. Las magnitudes de las características de funcionamiento emitidas por ambos programas se contrastarán con los requerimientos para apreciar las posibles mejoras alcanzadas. En caso de no cumplirse los objetivos impuestos, se efectuará un estudio de los parámetros de diseño, y en base a los resultados del estudio se adecuarán las dimensiones del modelo. Por último, el diseño ajustado se evaluará nuevamente con ambos programas, y las características de funcionamiento obtenidas en la evaluación se compararán con las especificaciones.

3.3.4 ALTERNATIVA DE DISEÑO MB. VARIACIÓN DE LA GEOMETRÍA DE LAS BARRAS DEL ROTOR

La geometría circular de las barras del rotor adoptada en el diseño inicial y en los posteriores diseños desarrollados en base a este, es propia de los diseños clase A, este tipo de motores se caracterizan por un par de arranque normal, pero con una corriente en el arranque y par máximo más elevados.

En este este tipo de diseño apenas se produce el efecto de desplazamiento de corriente (efecto pelicular) en la sección de las barras y, por lo tanto, no es posible beneficiarse de este fenómeno, que permite contar con una resistencia elevada en el arranque y baja a deslizamientos bajos (velocidades mayores).

Por este motivo, se opta por emplear barras con geometría oval, habituales en diseños clase B que cuentan con un par en el arranque similar a los diseños clase A algo superior, pero con una corriente en el arranque y un par máximo menores.

Dimensiones del diseño MB

La variación de la geometría de las ranuras y barras de la jaula del rotor se realiza en base al modelo MA.1. En el Anexo 2.4 se detalla el cálculo de las dimensiones de la barra oval.

Para modificar la geometría de las barras del rotor en JMAG-Express Public, se opta por emplear la plantilla correspondiente disponible en el programa. El procedimiento a seguir se indicó anteriormente cuando se introdujo el diseño inicial en JMAG-Express Public. Pulsando sobre *Modify* (Figura 3.3) aparece el siguiente cuadro de diálogo, en este selecciona la opción [Switch to Selected Template] y la geometría de la barra deseada: *rim_002 Oval bar*.

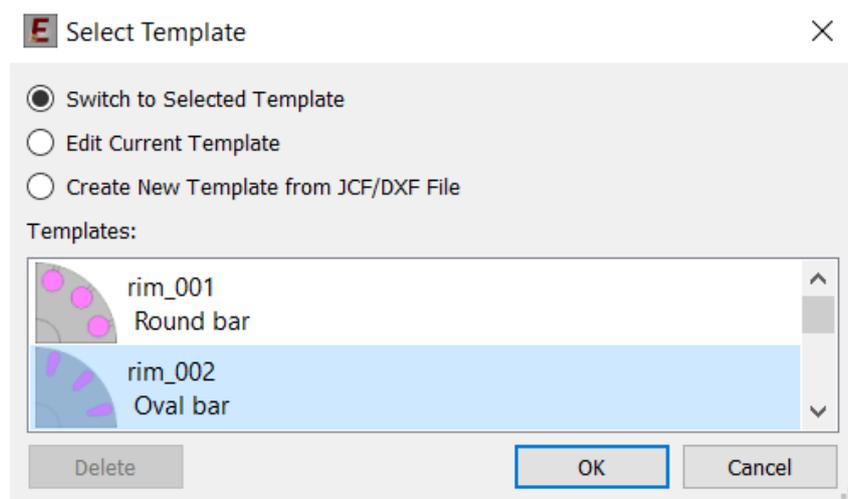


Figura 3.61. Diseño MB: Variación de la geometría de las barras del rotor en JMAG-Express Public (rim_002 Oval bar).

Los parámetros geométricos que se han incorporado, con el cambio de la geometría, en JMAG-Express Public, y sus respectivos valores obtenidos analíticamente se relacionan a continuación:

Componente	Descripción	Variable	Valor
Dimensiones del rotor <i>im_rotor: rim_002</i> (mm)	Radio externo de la barra, <i>Bar Outer Side Radius</i>	RL2	19,5
	Radio interno de la barra, <i>Bar Inner Side Radius</i>	RL3	4
	Posición centro del diámetro exterior de las barras respecto al entrehierro <i>Bar Outer Center Depth</i>	RC2	24,5
	Distancia entre los centros de los diámetros interno y externo de las barras <i>Distance between Bar Edge Centers</i>	RC3	58

Tabla 3.39. Alternativa de diseño MB: Resumen de las dimensiones de las barras del rotor introducidas en JMAG-Express Public.

Los restantes parámetros permanecen igual que en el modelo MA.1, el diámetro externo de las barras del modelo MB se mantiene igual al de las barras del modelo MA.1 ($RL1 = 39 \text{ mm} = 2 \cdot RL2$) y la misma longitud del cuello de ranura del rotor ($RC2 = RC1$, Tabla 3.9) dado que en este modelo el par en el arranque se aproximaba al establecido conforme a las restricciones. Evidentemente, si la sección de las barras se incrementa, la resistencia de estas disminuirá produciéndose un desplazamiento de la curva Par-Velocidad a deslizamientos menores (velocidades mayores), provocando el descenso del par en el arranque y viceversa si se reduce su sección.

Una de las ventajas que presenta esta geometría, es que se puede incrementar su sección sin que se produzca un ascenso de la inducción magnética en los dientes que cause su saturación magnética.

Evaluación del modelo MB en JMAG-Express Public y CALASIN. Análisis de resultados

Una vez se ha definido el diseño MB en JMAG-Express Public, se realiza su evaluación en este y posteriormente, con los parámetros del circuito equivalente proporcionados por JMAG-Express Public, en CALASIN. A continuación, se resumen los datos que se han de introducir en CALASIN para que efectué el análisis del modelo MB y MA.4. Se decide comparar las características de funcionamiento del modelo MB con las del modelo MA.4, porque se lograba una mejora más relevante en este diseño en relación a otras alternativas, pero con un ascenso de la corriente absorbida, par máximo y par en el arranque considerable.

Parámetro		Diseño MA.4		Diseño MB	
Tipo de conexión del estator		Estrella		Estrella	
V_{1L} (V)		4000		4000	
f_1 (Hz)		50		50	
2p (Nº de polos)		4		4	
b_0 (S)	X_μ (Ω) ³⁶	0,03451	28,98	0,03227	30,99
R_1 (Ω)		0,01352		0,01357	
R_2' (Ω)		0,04373		0,04041	
X_1 (Ω)		0,2118		0,238	
X_2' (Ω)		0,2118		0,238	

Figura 3.62. Alternativa de diseño MB: Datos necesarios para realizar el análisis de los diseños MA.4 y MB con CALASIN.

La Tabla 3.41 resume las características de funcionamiento de los modelos MA.4 y MB a la velocidad de régimen 1490 r.p.m obtenidas en JMAG-Express Public y CALASIN. También se proporciona el rendimiento y el factor de potencia de ambos modelos resultantes del cálculo analítico (Anexo 2.5) en función de las magnitudes facilitadas por JMAG-Express Public.

Magnitud	Modelo MA.4	Modelo MB
η (%)	90,96	92,26
$\cos \phi_{1N}$	0,533	0,625

Tabla 3.40. Alternativa de diseño MB: Cálculo analítico del rendimiento y del factor de potencia a la velocidad asignada 1490 r.p.m. de los modelos MA.4 y MB.

³⁶ JMAG Express Public calcula la susceptancia magnetizante b_0 (S). La reactancia magnetizante es la inversa de la susceptancia manetizante: $X_\mu = 1 / b_0$

Características a la velocidad asignada				
n (r.p.m.)			1490	
s			0,0067	
Parámetro	Programa	Modelo MA.4	Modelo MB	Especificaciones
I_{1N} (A)	JMAG	615,4	490,7	587
	CALASIN	359,38	386,08	
J_{1N} (A/mm ²)	JMAG	3,729	2,974	3,6
	CALASIN	-	-	
T_N (N·m)	JMAG	13840	13140	22751,7
	CALASIN	15179	16377	
η (%)	JMAG	12,16	12,33	97
	CALASIN	99,12	99,10	
P_N (kW)	JMAG	2066	1961	3550
	CALASIN	2368,47	2555,28	
$\cos \phi_{1N}$	JMAG	0,08969	0,1063	0,9
	CALASIN	0,96	0,964	
P_{Cu} (W)	JMAG	199970	159020	-
	CALASIN	21134	23217,6	
P_{Fe} (W)	JMAG	5465	5572	-
	CALASIN	-	-	
I_{μ} (A)	JMAG	75,77	71,65	146,725
	CALASIN	79,12	73,96	
I_{μ}/I_{1N}	JMAG	0,123	0,146	0,25
	CALASIN	0,22	0,192	

Tabla 3.41. Alternativa de diseño MB: Comparativa de las características del modelo MA.4 y MB en JMAG-Express Public y CALASIN con los requerimientos del motor a la velocidad asignada 1490 r.p.m.

Al adoptar la geometría oval se ha logrado incrementar el par y la potencia a la velocidad asignada de referencia, lográndose, asimismo, una mejora en el rendimiento y el factor de potencia. Si se consideran los resultados emitidos por JMAG-Express Public, el modelo MB experimenta una aminoración de las pérdidas en el cobre, al reducirse la corriente absorbida por el estator y la resistencia equivalente del rotor (barras de mayor sección transversal), las pérdidas magnéticas apenas han variado. En consecuencia, al aminorarse las pérdidas eléctricas y mantenerse las pérdidas magnéticas, aumentando la potencia disponible en el eje, el modelo MB resulta ser más eficiente. En cambio, si se repara en los valores proporcionados en CALASIN, el rendimiento se reduce moderadamente, debido a que la corriente absorbida se ha incrementado originando un aumento de las pérdidas en el cobre. El factor de potencia ha mejorado en ambos programas debido a que una fracción mayor de la corriente absorbida es invertida en el desarrollo del par y potencia útiles.

No obstante, a pesar de las numerosas ventajas que exhibe el modelo MB frente a otras alternativas de diseño planteadas, se siguen sin verificar las características de funcionamiento requeridas a la velocidad asignada de referencia.

Para terminar de comprobar si la geometría oval empleada en las barras de la jaula del rotor proporciona resultados satisfactorios en el arranque e instante en que el par motor es máximo se comparan las características operativas más relevantes con las especificaciones en ambos estados de funcionamiento:

Características en el instante de par máximo			
Parámetro	Modelo MA.4	Modelo MB	Especificaciones
n_m (r.p.m.)	1344,7	1372,2	-
s_m	0,1036	0,0852	-
T_m (N·m)	115226,5	102833	54604
T_m / T_N	7,59	6,3	2,4

Tabla 3.42. Alternativa de diseño MB: Comparativa de las características del modelo MA.4 y MB obtenidas con CALASIN con los requerimientos en el instante en el que el motor desarrolla el par máximo.

Características en el arranque				
n (r.p.m.)			0	
s			1	
Parámetro	Programa	Modelo MA.4	Modelo MB	Especificaciones
I_s (A)	JMAG	5405	4825	3404
	CALASIN	5422	4839	
T_s (N·m)	JMAG	24040	17690	18201
	CALASIN	24200	17799	
I_s/I_N	JMAG	8,78	9,8	5,8
	CALASIN	15,09	12,53	
T_s/T_N	JMAG	1,74	1,35	0,8
	CALASIN	1,59	1,09	

Tabla 3.43. Alternativa de diseño MB: Comparativa de las características del modelo MA.4 y MB en JMAG-Express Public y CALASIN con las especificaciones en el arranque.

Se relacionan también la resistencia y la reactancia de ambos modelos en el arranque:

Parámetro	Diseño MA.4	Diseño MB
R_s (Ω)	0,05664	0,05339
X_s (Ω)	0,4222	0,4742

Tabla 3.44. Alternativa de diseño MB: Reactancia y resistencia en el arranque de los modelos MA.4 y MB proporcionados por JMAG-Express Public.

Se aprecia como el modelo MB presenta una resistencia inferior en el arranque con una reactancia de dispersión mayor en dicho instante que causa una reducción de la corriente y del par en el arranque del motor.

El modelo MB presenta mejoras en las características de funcionamiento a la velocidad asignada comprometiendo en menor medida las restricciones establecidas en el arranque y momento en que el par motor es máximo respecto al modelo MA.4. Si bien la corriente en el arranque y el par máximo de la propuesta de diseño MB siguen siendo elevados, el valor de ambas magnitudes es marcadamente superior en el modelo MA.4, asimismo este último presenta un par de arranque elevado, y dado que el motor operará bajo condiciones de carga estándar no es necesario contar con un par elevado en dicho instante. En relación al modelo MB el par en el arranque se aproxima en mayor medida al requerido. La relación entre la corriente en el arranque y a la velocidad asignada considerando los valores obtenidos en JMAG-Express Public es superior en el modelo MB dado que este presenta una corriente asignada inferior, mientras que en CALASIN sucede lo contrario, la corriente asignada se ha incrementado respecto al modelo MA.4, y en consecuencia el cociente de intensidades en el arranque y a la velocidad asignada es menor.

En el gráfico de la Figura 3.63, se han representado las características Par-Velocidad de los modelos MB y MA.4. El trazado de ambas curvas se ha realizado en Matlab con los valores resultantes del análisis mediante el circuito equivalente. En el gráfico se aprecia claramente que el modelo MB presenta un par máximo y un par en el arranque inferiores al modelo MA.4, sin grandes variaciones en la característica de par desde cero hasta plena carga.

Del mismo modo, se han representado la corriente absorbida en una fase del estator en función de la velocidad de los modelos MA.4 y MB (Figura 3.64). El modelo MB presenta una intensidad en el arranque inferior, siendo similar en ambos modelos a velocidades próximas a la asignada.

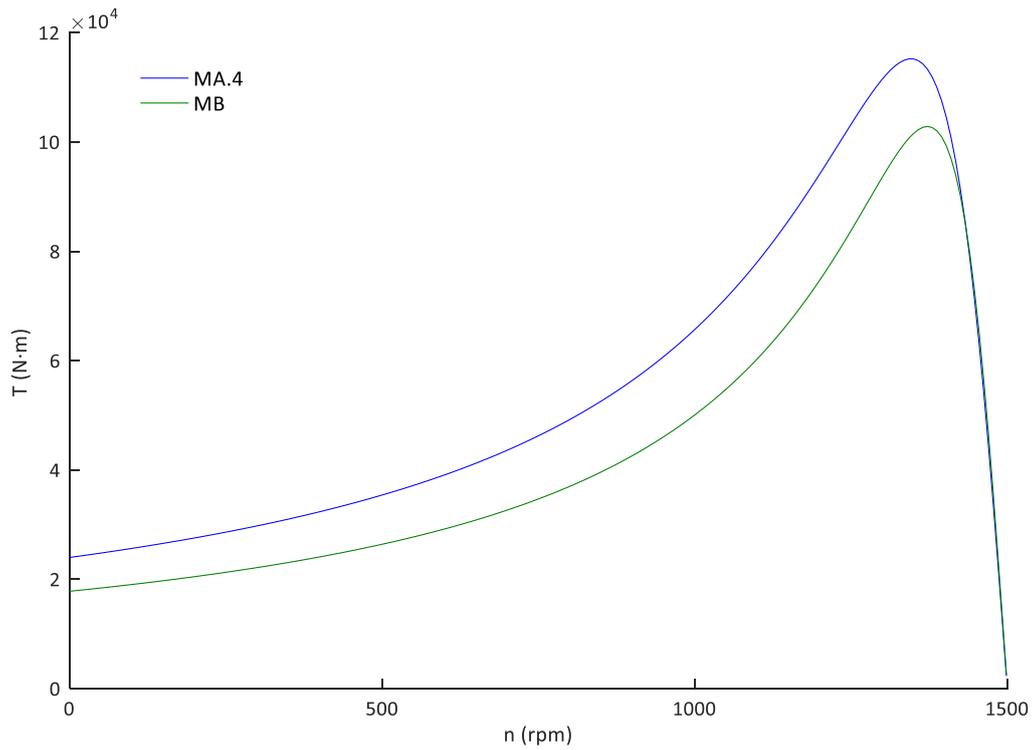


Figura 3.63. Alternativa de diseño MB: Curva Par-Velocidad de los modelos MA.4 y MB.

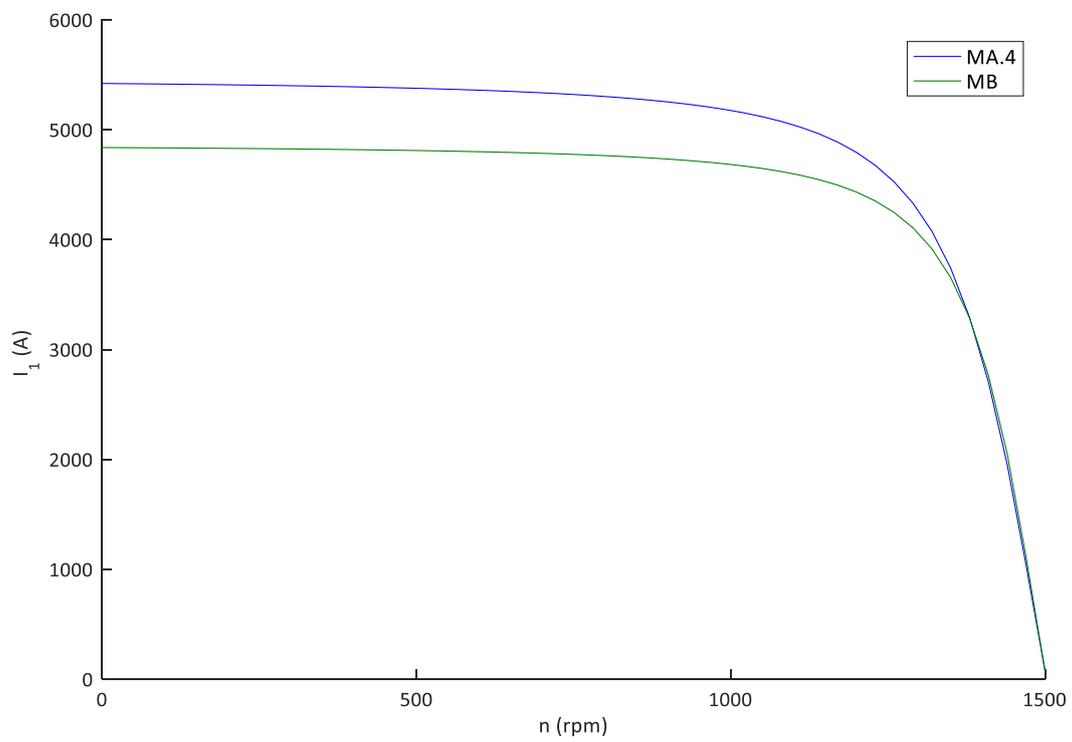


Figura 3.64. Alternativa de diseño MB: Curva Corriente en una fase del estator-Velocidad de los modelos MA.4 y MB.

En definitiva, el modelo MB cuenta con unos parámetros de funcionamiento a la velocidad asignada más acordes a las especificaciones respecto a las restantes alternativas de diseño examinadas, con un par máximo y corriente en el arranque elevado que aún sería preciso rebajar, y un par en el arranque próximo al requerido. No obstante, el par y la potencia desarrollados a dicha velocidad siguen sin verificar las especificaciones.

Variación del deslizamiento y evaluación en CALASIN. Análisis de resultados

Al ser el par desarrollado por el modelo MB a la velocidad asignada de referencia más similar al especificado, si se considera el valor que proporciona CALASIN, es posible establecer una velocidad de funcionamiento a plena carga inferior (incremento del deslizamiento asignado), de tal forma que el par y potencia del modelo MB se asemejen más a los requeridos. En el Anexo 2.6 se resume el cálculo del nuevo valor de deslizamiento y velocidad asignados.

Las características de funcionamiento resultantes de la evaluación del modelo MB a la nueva velocidad asignada en CALASIN:

Parámetro	Modelo MB	Especificaciones
n (r.p.m.)	1486,12	1490
s	0,0093	0,0067
T_N (N·m)	22586	22751,7
P_N (kW)	3515	3550
I_{1N} (A)	529,72	587
$\cos \phi_{1N}$	0,97	0,9
P_{Cu} (W)	44012,6	-
η (%)	98,76	97
I_s / I_N	9,13	5,8
T_s / T_N	0,79	0,8
T_m / T_N	4,55	2,4

Tabla 3.45. Alternativa de diseño MB: Características de funcionamiento a la velocidad asignada 1486,12 r.p.m. resultantes de la evaluación en CALASIN.

Al asignar una velocidad de régimen menor, se logra que el motor desarrolle un par y potencia próximos a los requeridos, la corriente absorbida en una fase del estator se asemeja más a la establecida en las especificaciones, la relación entre el par de arranque y el par asignado verifica las condiciones fijadas, y el cociente entre el par máximo y asignado, si bien sigue siendo elevado, se reduce considerablemente al producirse un incremento del par asignado (Tabla 3.42), de igual modo, la relación entre la corriente en el arranque y asignada se reduce al incrementarse la corriente absorbida a dicha velocidad (Tabla 3.43). Evidentemente, y tal y como se anticipó anteriormente, este ascenso de la intensidad asignada causa un aumento de las pérdidas eléctricas en los devanados y, en consecuencia, una leve rebaja en el rendimiento del motor.

Los valores de las características operativas obtenidos con CALASIN no son los valores reales al no considerar las pérdidas magnéticas, mecánicas, y la magnetización no lineal de los núcleos magnéticos, pero muestran a grandes rasgos, mejoras en las características que pueden considerarse próximas a las requeridas. No obstante, el par máximo e intensidad de arranque siguen siendo elevados y es preciso tratar de reducirlos lo máximo posible, es decir, tratando de preservar las características operativas del motor a una velocidad próxima a la asignada de referencia sin que se produzca una disminución importante del par de arranque.

Por este motivo, tal y como se realizó en el proceso de optimización del modelo inicial, se decide efectuar una evaluación paramétrica de los parámetros de diseño que incorpora la geometría oval de las barras del modelo MB, para apreciar su influencia en las características operativas del motor y estimar el valor de las dimensiones a ajustar.

Estudio de los parámetros de diseño del modelo MB: Evaluación paramétrica de [RL2] y [RC3]

Se decide analizar el efecto que causa la variación simultánea del radio externo de la barra oval [RL2] y la distancia comprendida entre los centros de los extremos circulares de la barra oval [RC3] al ser estos parámetros los que ejercen una influencia mayor sobre las características de funcionamiento, junto con la posición de las barras respecto al entrehierro [RC2] equivalente a [RC1] en la geometría circular, y dado que ya se realizó su estudio en el apartado de optimización del modelo inicial no es preciso efectuarlo de nuevo pues ya se conoce el efecto que causa en las características de funcionamiento.

La variación de ambos parámetros se efectuará conservando el radio interno de la barra [RL3], y manteniendo la misma longitud de la boca de ranura que el modelo MB, por ello es preciso adaptar también la profundidad de los centros de la circunferencia externa de la barra [RC2]. Las restantes dimensiones del modelo MB no se modifican.

Los valores que han de tomar [RL2] y [RC3] se han escogido tratando de mantener la densidad de corriente en las barras (misma sección transversal que la barra oval del modelo MB). El radio externo de la barra se evaluará a intervalos regulares de 1,5 mm el valor mínimo del intervalo se ha fijado en $RL2 = 15$ mm y el máximo en $RL2 = 22,5$ mm, la distancia entre los centros de las barras se variará a intervalos regulares de 9 mm los límites del intervalo de evaluación del parámetro se han establecido en $RC3 = 40$ mm y $RC3 = 85$ mm, por último para conservar la longitud del cuello de ranura del rotor se ha variado simultáneamente la profundidad de los centros de la circunferencia externa de la barra [RC2].

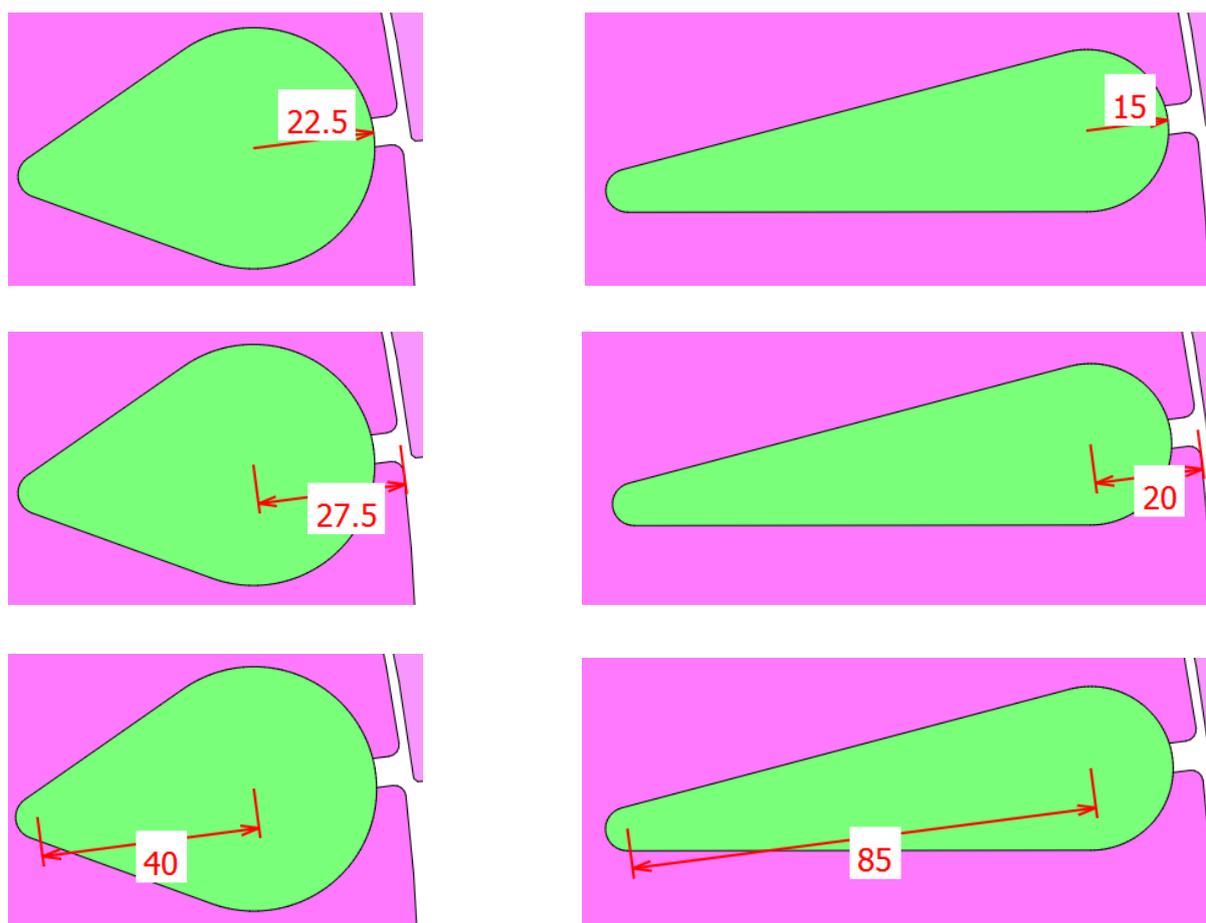


Figura 3.65. Evaluación paramétrica de RL2 y RC3 en JMAG-Express Public: Variación de RL2, RC2 y RC3 vista en el apartado [Motor Diagram].

La variación de los parámetros mencionados se ha realizado de forma manual, dado que el Modo paramétrico de JMAG-Express Public solo permite variar un parámetro en cada evaluación. Tras implementar los cambios en el programa, se realiza el estudio de las distintas características operativas de forma gráfica.

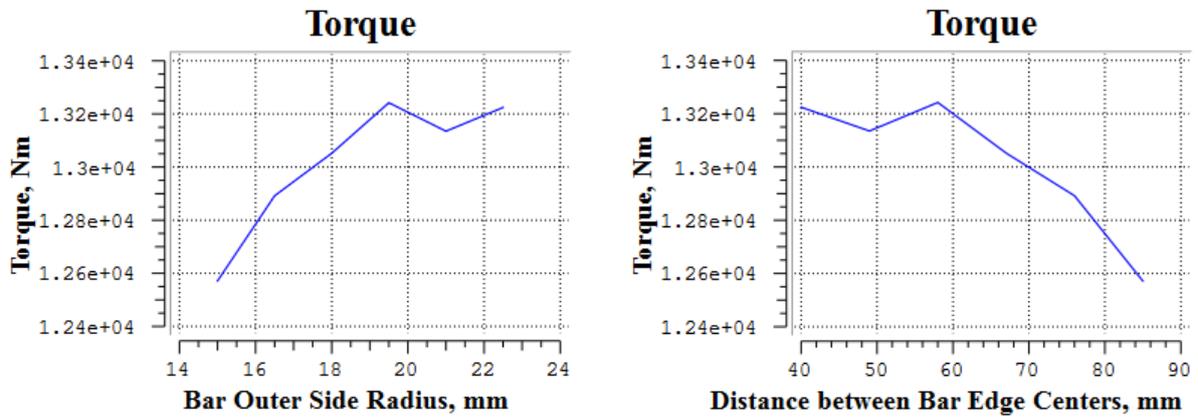


Figura 3.66. Evaluación paramétrica de RL2 y RC3 en JMAG-Express Public: Variación del par [Torque] en función del radio externo de la barra [Bar Outer Side Radius] y de la distancia que separa los centros de la circunferencia externa e interna de la barra [Distance between Bar Edge Centers] a la velocidad asignada 1490 rpm del modelo MB.

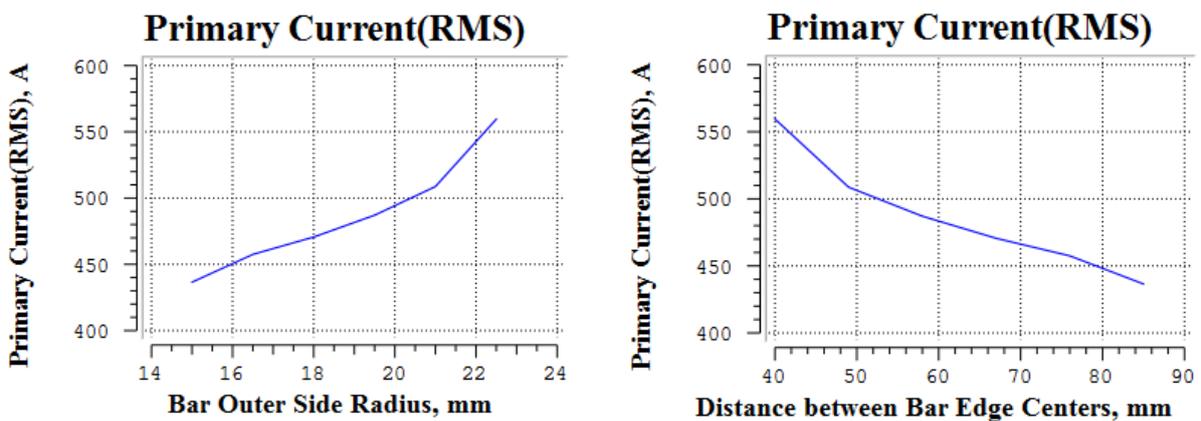


Figura 3.67. Evaluación paramétrica de RL2 y RC3 en JMAG-Express Public: Variación de la intensidad de fase del estator [Primary Current (RMS)] en función del radio externo de la barra [Bar Outer Side Radius] y de la distancia que separa los centros de la circunferencia externa e interna de la barra [Distance between Bar Edge Centers] a la velocidad asignada 1490 rpm del modelo MB.

Atendiendo a las curvas de par y corriente de una fase del estator a la velocidad asignada 1490 r.p.m. en función de la variación de los parámetros [RC3] y [RL2] (Figura 3.66 y Figura 3.67) se observa que se produce un incremento de ambas características a medida que el radio externo de la barra aumenta y los centros de los extremos de la barra se aproximan.

También se empleará el mismo tipo de gráfico para representar ambas características en el arranque, dado que con el estudio de este parámetro se pretende averiguar que configuración es la más adecuada para reducir la corriente en el arranque y, en la medida de lo posible, se conserve el par de arranque. En las gráficas de la Figura 3.68 y Figura 3.69, se aprecia que las barras con un radio externo mayor y menor longitud, presentan una corriente en el arranque más elevada y un par en el arranque más reducido. Por lo tanto, un posible ajuste de las dimensiones de las barras consistiría en una disminución del radio externo e incremento de su longitud.

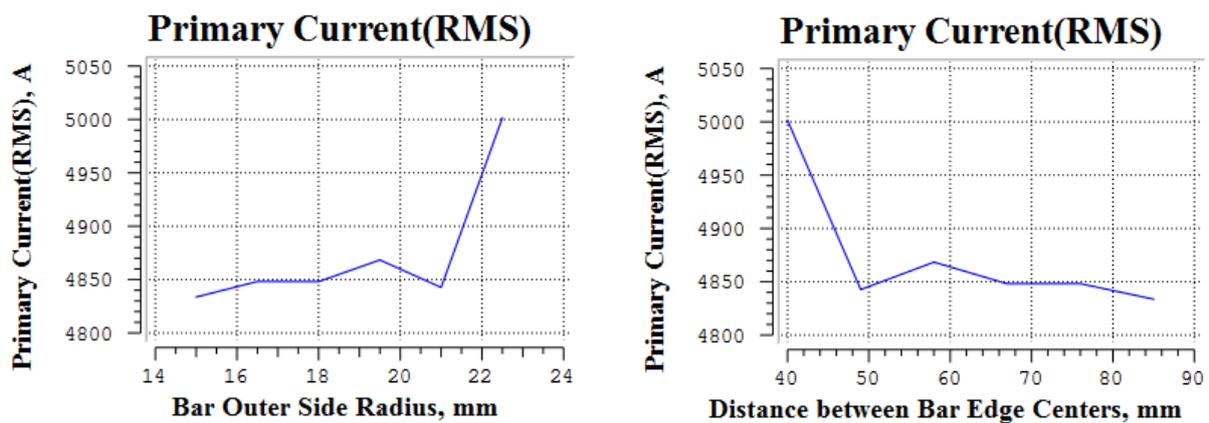


Figura 3.68. Evaluación paramétrica de RL2 y RC3 en JMAG-Express Public: Variación de la intensidad de fase del estator [Primary Current (RMS)] en función del radio externo de la barra [Bar Outer Side Radius] y de la distancia que separa los centros de la circunferencia externa e interna de la barra [Distance between Bar Edge Centers] en el arranque 0,01 rpm del modelo MB.

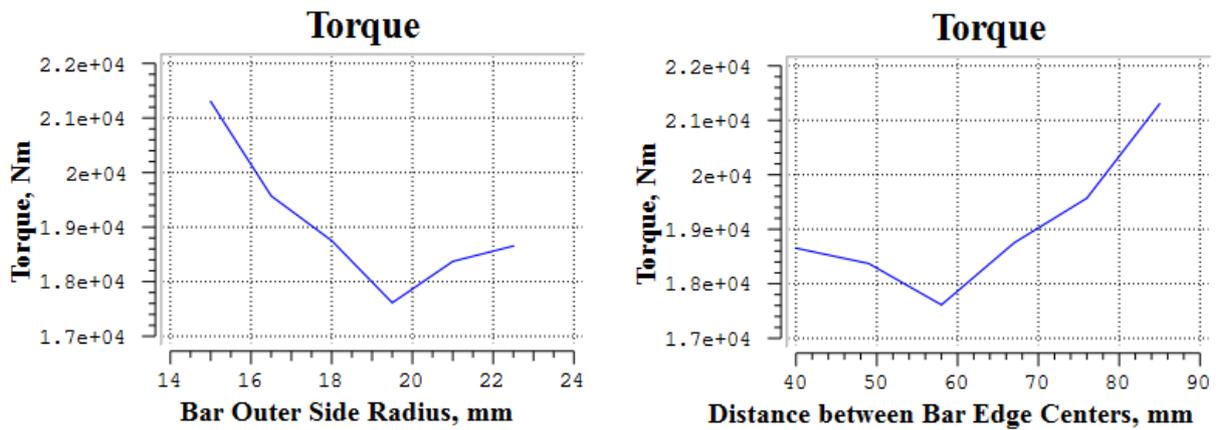


Figura 3.69. Evaluación paramétrica de RL2 y RC3 en JMAG-Express Public: Variación del par [Torque] en función del radio externo de la barra [Bar Outer Side Radius] y de la distancia que separa los centros de la circunferencia externa e interna de la barra [Distance between Bar Edge Centers] en el arranque 0,01 rpm del modelo MB.

A continuación, se muestran las características de rendimiento y factor de potencia en función de la variación de [RC3] y [RL2] a la velocidad asignada 1490 rpm. Las barras de menor diámetro y mayor longitud cuentan con valores de rendimiento y factor de potencia más elevados.

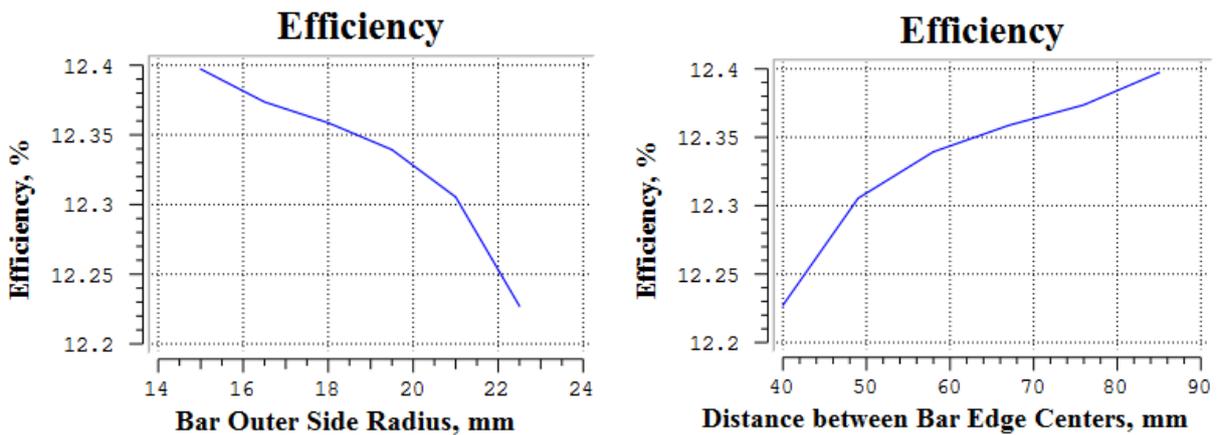


Figura 3.70. Evaluación paramétrica de RL2 y RC3 en JMAG-Express Public: Variación del rendimiento [Efficiency] en función del radio externo de la barra [Bar Outer Side Radius] y de la distancia que separa los centros de la circunferencia externa e interna de la barra [Distance between Bar Edge Centers] a la velocidad asignada 1490 rpm del modelo MB.

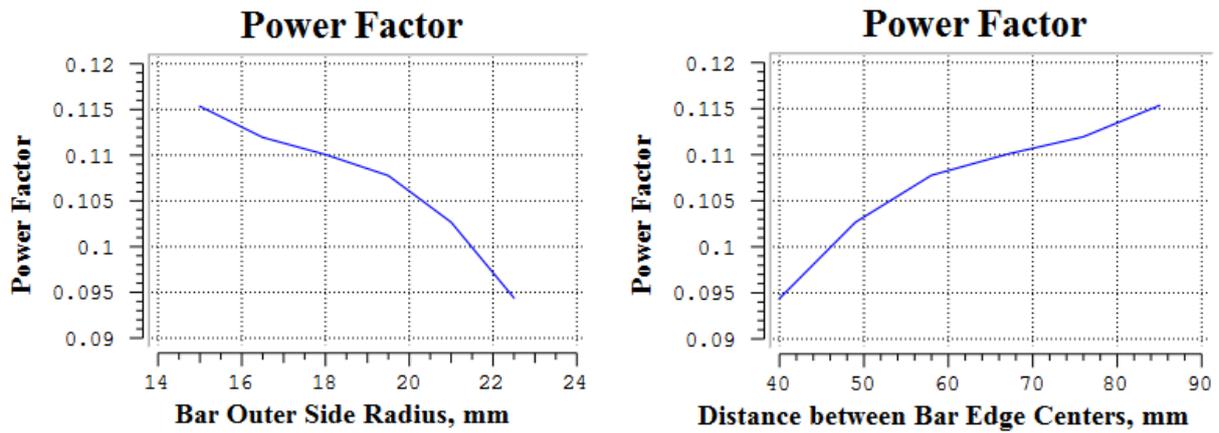


Figura 3.71. Evaluación paramétrica de RL2 y RC3 en JMAG-Express Public: Variación del factor de potencia [Power Factor] en función del radio externo de la barra [Bar Outer Side Radius] y de la distancia que separa los centros de la circunferencia externa e interna de la barra [Distance between Bar Edge Centers] a la velocidad asignada 1490 rpm del modelo MB.

Atendiendo a la variación de potencia útil y de pérdidas en el cobre (Figura 3.72) del modelo MB, se observa que conforme el radio externo de la barra aumenta y su longitud se acorta se produce un incremento de ambas características siendo más acusado el ascenso de las pérdidas en el cobre, hecho que causa una disminución del rendimiento.

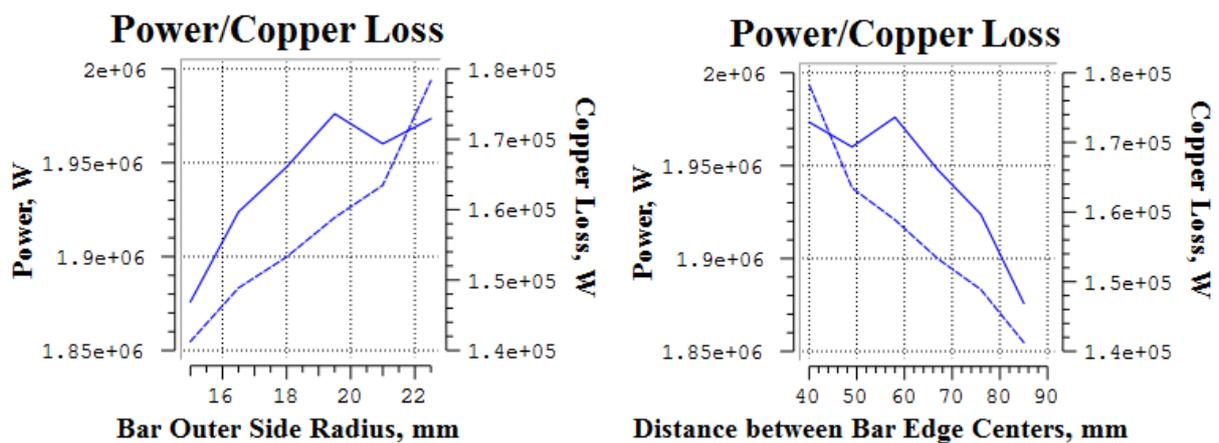


Figura 3.72. Evaluación paramétrica de RL2 y RC3 en JMAG-Express Public: Variación de la potencia [Power] (Curva de trazo continuo) y las pérdidas en el cobre [Copper Loss] (Curva a trazos) en función del radio externo de la barra [Bar Outer Side Radius] y de la distancia que separa los centros de la circunferencia externa e interna de la barra [Distance between Bar Edge Centers] a la velocidad asignada 1490 rpm del modelo MB.

Por último, se muestran las curvas de par e intensidad en una fase del estator en función de la velocidad de los casos correspondientes a los valores extremos del intervalo de [RC3] y [RL2].

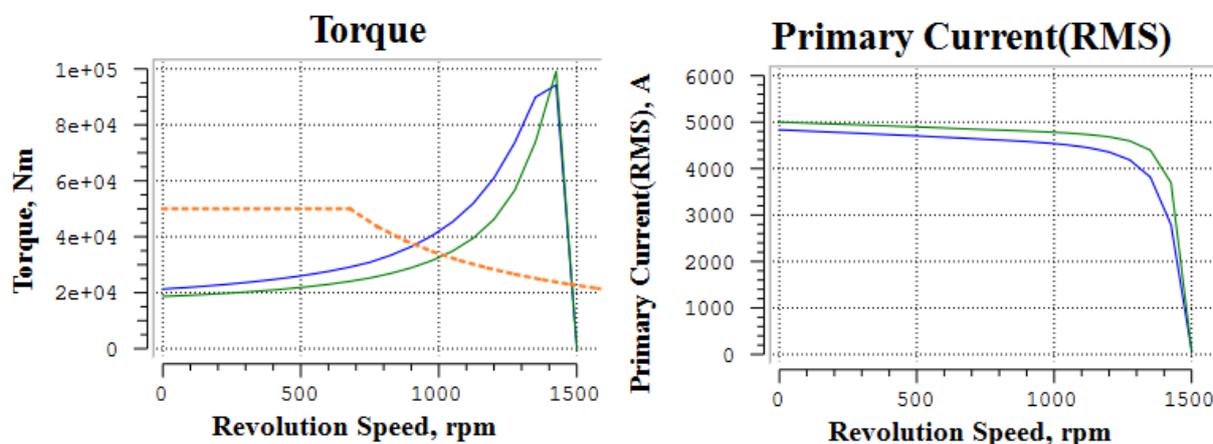


Figura 3.73. Evaluación paramétrica de RL2 y RC3 en JMAG-Express Public: Curva Par-Velocidad [Torque – Revolution Speed] y Curva Intensidad en el primario-Velocidad [Primary Current (RMS) – Revolution Speed]. Azul: RL2 = 15 mm y RC3 = 85 mm, Verde: RL2 = 22,5 mm y RC3 = 40 mm.

En las gráficas se distingue claramente como el par en el arranque se incrementa y la intensidad disminuye a medida que las barras se alargan y su radio externo se reduce, también se aprecia como el par máximo decrece y se produce a una velocidad menor.

Esto es propiciado por el reparto de corriente en las barras debido a la variación de la frecuencia de las corrientes rotóricas (efecto pelicular en el conductor) que causa que la sección efectiva del conductor varíe y del mismo modo la resistencia y reactancia del rotor. Tal y como se señaló en el apartado de antecedentes del presente trabajo, la frecuencia de las corrientes del rotor está relacionada con la frecuencia de las corrientes del estator a través del deslizamiento ($f_2 = s \cdot f_1$). En el arranque ($n = 0$, $s = 1$) la frecuencia de las corrientes del rotor coincide con las del estator ($f_2 = f_1$), en consecuencia, la influencia de las reactancia es más relevante, la corriente tiende a concentrarse en la parte superior de la ranura al poseer una reactancia de dispersión menor por encontrarse más próxima al entrehierro donde el flujo de dispersión es menor pues el recorrido de sus líneas de campo presenta mayor reluctancia al incluir en mayor proporción sendas en el aire (permeabilidad magnética igual a la del vacío), causando que la sección efectiva de la ranura se reduzca y la resistencia de las

barras se incremente. Conforme el motor adquiere velocidad (disminuye su deslizamiento), la frecuencia en el rotor se reduce, y la corriente va ocupando una fracción mayor del conductor, en régimen asignado el deslizamiento es muy pequeño y la frecuencia rotórica muy baja de manera que las reactancias de dispersión son despreciables, y la corriente se reparte uniformemente por la barra aumentando su sección efectiva y reduciéndose así la resistencia del rotor.

En definitiva, en el arranque del motor la resistencia del rotor es elevada al reducirse la sección efectiva del conductor propiciado un par en el arranque elevado, mientras que en régimen asignado la resistencia se reduce al aumentar la sección efectiva de las barras.

Alternativa de diseño del modelo MB. Diseño MB.1

En base a la evaluación paramétrica de [RC3] y [RL2] se deciden emplear barras de menor radio externo y mayor longitud, pues esta configuración presentaba una intensidad en el arranque y par máximo menores, pero con un par en el arranque superior. Para tratar de no alterar de forma significativa el par en el arranque también se alejarán las barras del entrehierro, para ello se modificará la posición de los centros de la circunferencia externa de la barra [RC2]. Asimismo, se apreció una disminución del par asignado, por lo tanto, será preciso reajustar el deslizamiento asignado del motor, para que este desarrolle el par y la potencia requeridos.

En la Tabla 3.46 se relacionan las magnitudes de los parámetros que caracterizan al modelo MB.1 y los correspondientes al modelo MB. En el Anexo 2.4 se detallan los cálculos realizados.

Parámetro	Diseño MB	Diseño MB.1
RL2 (mm)	19,5	14
RL3 (mm)	4	4
RC2 (mm)	24,5	22
RC3 (mm)	58	92

Tabla 3.46. Alternativa de diseño MB.1: Disminución del radio externo de la barra [RL2], variación de la profundidad de los centros de la circunferencia de la barra [RC2] e incremento de la distancia que separa los centros de los extremos circulares de la barra [RC3] respecto al diseño MB.

Tras efectuar los cambios en las dimensiones de las barras del modelo MB, se evalúa el diseño resultante en JMAG-Express Public y seguidamente en CALASIN. La Tabla 3.47, resume los datos que se han de proporcionar a CALASIN para que realice su análisis.

Parámetro		Diseño MB		Diseño MB.1	
Tipo de conexión del estator		Estrella		Estrella	
V_{1L} (V)		4000		4000	
f_1 (Hz)		50		50	
2p (Nº de polos)		4		4	
b_0 (S)	X_μ (Ω)	0,03227	30,99	0,03208	31,17
R_1 (Ω)		0,01357		0,01357	
R_2' (Ω)		0,04041		0,05755	
X_1 (Ω)		0,238		0,2792	
X_2' (Ω)		0,238		0,2792	

Tabla 3.47. Alternativa de diseño MB.1: Datos necesarios para realizar el análisis de los diseños MB y MB.1 con CALASIN.

La Tabla 3.49 resume las características de funcionamiento de los modelos MB y MB.1 a la velocidad de régimen 1490 r.p.m obtenidas en JMAG-Express Public y CALASIN. También se proporciona el rendimiento y el factor de potencia de ambos modelos resultantes del cálculo analítico (Anexo 2.5) en función de las magnitudes facilitadas por JMAG-Express Public.

Magnitud	Modelo MB	Modelo MB.1
η (%)	92,26	92,67
$\cos \phi_{1N}$	0,625	0,616

Tabla 3.48. Alternativa de diseño MB.1: Cálculo analítico del rendimiento y del factor de potencia a la velocidad asignada 1490 r.p.m. de los modelos MB y MB.1.

Características a la velocidad asignada				
n (r.p.m.)			1490	
s			0,0067	
Parámetro	Programa	Modelo MB	Modelo MB.1	Especificaciones
I_{1N} (A)	JMAG	490,7	414,1	587
	CALASIN	386,08	276,42	
J_{1N} (A/mm ²)	JMAG	2,974	2,51	3,6
	CALASIN	-	-	
T_N (N·m)	JMAG	13140	10980	22751,7
	CALASIN	16377	11507,6	
η (%)	JMAG	12,33	12,39	97
	CALASIN	99,10	99,16	
P_N (kW)	JMAG	1961	1639	3550
	CALASIN	2555,28	1795,56	
$\cos \phi_{1N}$	JMAG	0,1063	0,1074	0,9
	CALASIN	0,964	0,946	
P_{Cu} (W)	JMAG	159020	124010	-
	CALASIN	23217,6	15161,4	
P_{Fe} (W)	JMAG	5572	5550	-
	CALASIN	-	-	
I_{μ} (A)	JMAG	71,65	71,23	146,725
	CALASIN	73,96	73,43	
I_{μ}/I_{1N}	JMAG	0,146	0,172	0,25
	CALASIN	0,192	0,266	

Tabla 3.49. Alternativa de diseño MB.1: Comparativa de las características del modelo MB y MB.1 en JMAG-Express Public y CALASIN con los requerimientos del motor a la velocidad asignada 1490 r.p.m.

Tal y como se indicó anteriormente, la disminución del radio externo de la barra e incremento de su longitud, y el distanciamiento de esta respecto a la superficie externa del rotor, ha causado que la intensidad absorbida en una fase del estator, el par, y la potencia a la velocidad asignada de referencia se reduzcan considerablemente, esto es a debido al incremento del flujo de dispersión (reactancia de dispersión mayor, Tabla 3.47) al ubicar las barras más alejadas del entrehierro y emplear barras de mayor longitud. Dado que la corriente que circula por los devanados del estator y barras de rotor es menor, se han logrado reducir las pérdidas en el cobre de los devanados del estator, y en menor medida, en la jaula del rotor al incrementarse su resistencia (Tabla 3.47), las pérdidas en el hierro son similares en ambos modelos, en consecuencia, el rendimiento del modelo MB.1 es superior. El factor de potencia se reduce dado que una fracción mayor de la corriente absorbida constituye corriente de magnetización.

Por lo tanto, para lograr que el modelo MB.1 verifique las características de funcionamiento especificadas a la velocidad de régimen, será preciso establecer una velocidad asignada menor (incrementar el deslizamiento asignado), en esta ocasión esta variación será más apreciable al ser el par a la velocidad asignada de referencia mucho menor que en el modelo MB, no obstante, las pérdidas que presenta este modelo son muy inferiores luego, a pesar de que al incrementar el deslizamiento las pérdidas eléctricas aumentarán, este ascenso será moderado.

La Tabla 3.50 resume las características de funcionamiento resultantes de la evaluación de los modelos MB y MB.1 a la nueva velocidad asignada en CALASIN. En el Anexo 2.6 se resume el cálculo del nuevo valor de deslizamiento y velocidad asignados. El incremento de deslizamiento del modelo MB.1, ha supuesto un ascenso de las pérdidas en el cobre que repercute negativamente en el rendimiento del motor, pero es un valor que puede considerarse aceptable.

Parámetro	Modelo MB	Modelo MB.1	Especificaciones
n (r.p.m.)	1486,12	1480,23	1490
s	0,0093	0,0132	0,0067
T _N (N·m)	22586	22416	22751,7
P _N (kW)	3515	3475	3550
I _{1N} (A)	529,72	528,13	587
cos φ _{1N}	0,97	0,965	0,9
P _{Cu} (W)	44012,6	57765	-
η (%)	98,76	98,36	97

Tabla 3.50. Alternativa de diseño MB.1: Comparativa de las características de funcionamiento a la nueva velocidad asignada del modelo MB y MB.1 resultantes de la evaluación en CALASIN.

A continuación, se muestran las características de funcionamiento más relevantes en el arranque e instante en que el par desarrollado por el motor es máximo considerando para ambos estados de funcionamiento los valores facilitados por CALASIN. Las relaciones entre el par en el arranque y el par asignado, par máximo entre par asignado, e intensidad en el arranque ente intensidad asignada, están referidas a las características a la nueva velocidad de régimen establecida.

Características en el arranque			
n (r.p.m.)		0	
s		1	
Parámetro	Modelo MB	Modelo MB.1	Especificaciones
I _S (A)	4839,2	4120,8	3404
T _S (N·m)	17798,6	18334,2	18201
I _S /I _N	9,13	7,8	5,8
T _S /T _N	0,788	0,818	0,8

Tabla 3.51. Alternativa de diseño MB.1: Comparativa de las características del modelo MB y MB.1 en CALASIN con las especificaciones en el arranque.

Características en el instante de par máximo			
Parámetro	Modelo MB	Modelo MB.1	Especificaciones
n_m (r.p.m.)	1372,2	1344,8	-
s_m	0,0852	0,0989	-
T_m (N·m)	102833	87860,6	54604
T_m/T_N	4,55	3,92	2,4

Tabla 3.52. Alternativa de diseño MB.1: Comparativa de las características del modelo MB y MB.1 obtenidas con CALASIN con los requerimientos en el instante en que el par motor es máximo.

La alternativa de diseño MB.1 presenta unas características en el arranque más adecuadas, la intensidad en el arranque se ha reducido, aunque sigue siendo elevada manteniéndose el par en dicho instante. Atendiendo a los valores de resistencia y reactancia en el arranque de ambos modelos (Tabla 3.53), se observa que el diseño MB.1 presenta un valor de resistencia y reactancia en el arranque superiores, en ese instante la corriente tiende a concentrarse en la región de la barra más próxima al entrehierro el radio externo de las barras del modelo MB.1 es menor que el de las barras del modelo MB, por lo tanto el modelo MB.1 tendrá una sección efectiva menor y por ende una resistencia más elevada en el arranque, y al ser de mayor longitud y estar ubicadas más alejadas del entrehierro mayor flujo de dispersión (mayor reactancia en el arranque).

Parámetro	Diseño MB	Diseño MB.1
R_s (Ω)	0,05339	0,07013
X_s (Ω)	0,4742	0,5559

Tabla 3.53. Alternativa de diseño MB.1: Reactancia y resistencia en el arranque de los modelos MB y MB.1 proporcionados por JMAG-Express Public.

El par máximo continúa siendo elevado, pero se ha logrado reducir su valor. También se aprecia como el deslizamiento correspondiente al instante en que el par desarrollado por el motor es máximo se incrementa esto es debido al desplazamiento de la característica Par-Velocidad a deslizamientos mayores a causa del incremento de la resistencia del rotor.

En la Figura 3.74 se han representado las características Par-Velocidad de los modelos MB y MB.1. El trazado de ambas curvas se ha realizado en Matlab con los valores resultantes del análisis mediante el circuito equivalente. En el gráfico se aprecia claramente que el modelo MB.1 presenta un par máximo inferior, que se produce a una velocidad menor, y un par en el arranque similar al modelo MB. Al reducirse la velocidad correspondiente al par máximo, la pendiente de la zona estable de la curva aumenta, y consecuentemente el par asignado se da a una velocidad menor.

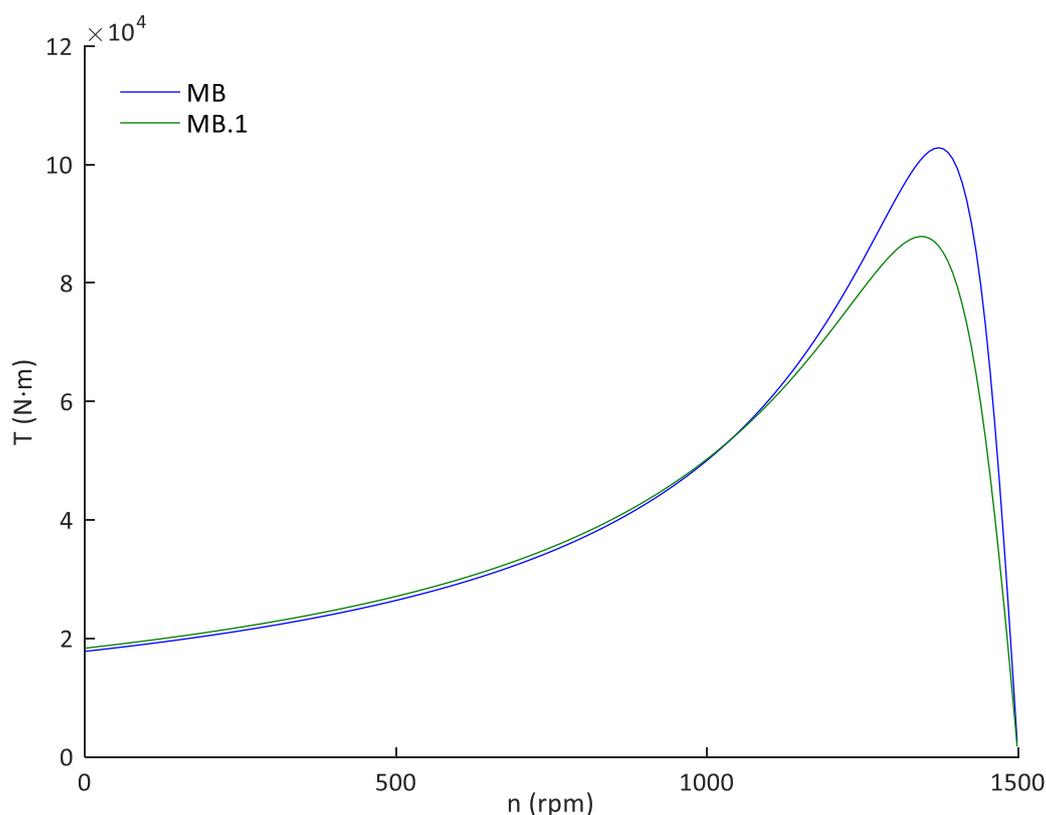


Figura 3.74. Alternativa de diseño MB.1: Curva Par-Velocidad de los modelos MB y MB.1.

También se ha trazado la curva Intensidad en una fase del estator – Velocidad de ambos modelos (Figura 3.75), en la gráfica se distingue la disminución de la intensidad en el arranque y en menor medida a velocidades próximas a las asignada, esto es consecuencia de la mayor longitud de las barras que presentan mayores flujos de dispersión (valor más elevado de reactancia de dispersión).

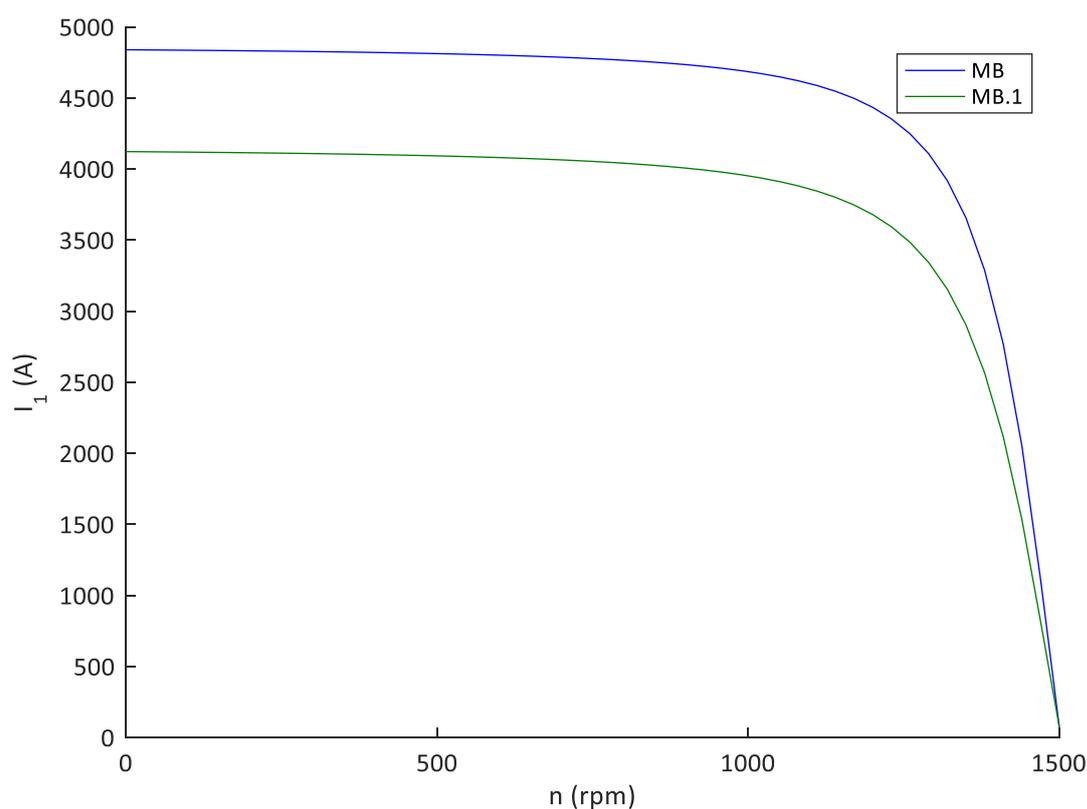


Figura 3.75. Alternativa de diseño MB.1: Curva Corriente en una fase del estator-Velocidad de los modelos MB y MB.1.

Sorprende que los valores de reactancia de dispersión en el estator X_1 y del rotor reducido al estator X_2' facilitados por JMAG-Express Public sean de igual magnitud. La Tabla 3.54 muestra la distribución empírica de las reactancias de acuerdo a NEMA, expresado como fracción de X_{cc} ³⁷. La geometría oval y en concreto la del modelo MB.1 que es de mayor profundidad se ajusta más a un diseño case B, el programa, sin embargo, no considera el reparto de reactancias asumiendo que ambas son iguales independientemente de la geometría y dimensiones de las barras, en consecuencia, las magnitudes resultantes de la evaluación con JMAG-Express Public pueden diferir de forma importante respecto a los valores que se obtendrían en realidad, y dado que el análisis con CALASIN se realiza en base a los parámetros del circuito equivalente que calcula JMAG-Express Public, tampoco serán fieles a la realidad.

³⁷ $X_{cc} = X_1 + X_2'$

Clase de motor	X_1	X_2'
A	0,5	0,5
B	0,4	0,6
C	0,3	0,7
D	0,5	0,5

Tabla 3.54. Distribución empírica de X_1 y X_2' según NEMA. Proporción respecto a X_{cc} .

ANEXO 2.4: CÁLCULO DE LAS DIMENSIONES DE LAS ALTERNATIVAS DE DISEÑO

4 DIMENSIONES DE LAS ALTERNATIVAS DE DISEÑO

Este apartado resume todos los cálculos realizados a lo largo de la evaluación y optimización del diseño inicial MA, así como de las diversas alternativas de diseño estudiadas.

4.1 CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO DEL MODELO MA EN LA EVALUACIÓN PARAMÉTRICA

A continuación, se detallan los cálculos realizados en la deducción de los valores de alguno de los parámetros de diseño ajustados en la evaluación paramétrica del modelo inicial MA.

4.1.1 INTERVALO DE VALORES DEL ANCHO DE RANURA DEL ESTATOR

La anchura de ranura del estator ha de estar comprendida en el intervalo de valores dado por la expresión (2.43), que fue calculado cuando se estimaron las dimensiones del conductor y ranuras del modelo inicial. En la Tabla 2.12 se muestran dichos valores. En base a ese intervalo se decide emplear como límite superior $SW3 = b_{s1} = 32$ mm en la evaluación paramétrica del ancho de ranura del estator.

4.1.2 INTERVALO DE VALORES DEL DIÁMETRO DE LAS BARRAS DEL ROTOR

En el Anexo 1 se detallan los valores recomendados de densidad de corriente en las barras de la jaula del rotor si se emplea cobre como material conductor. La sección transversal de las barras se obtiene con (2.79), y el diámetro de las barras con (2.84). Se empleará como límite superior del intervalo, el diámetro dado por la sección correspondiente a la densidad de corriente mínima recomendada en las barras ($J_2 = 3$ A/mm²). En la Tabla 2.26 se obtuvo la sección máxima de las barras S_{c2} y su diámetro, que se redondea a un valor de $d_{c2} = RL1 = 49$ mm para ser introducido en la evaluación paramétrica del diámetro de las barras del rotor.

4.1.3 INTERVALO DE VALORES DEL ESPESOR DEL ENTREHIERRO Y DIÁMETRO EXTERIOR DEL ROTOR

El espesor del entrehierro puede ser calculado a través de diversas expresiones (2.9) (2.10) y (2.11) según se señaló cuando se estimó su valor para el modelo inicial, deducido mediante la expresión (2.11).

En esta ocasión se decide emplear las dos expresiones restantes para obtener una estimación de los posibles valores que puede tomar el espesor del entrehierro geométrico y que se adoptarán en la evaluación paramétrica de este. El espesor dado por ambas ecuaciones en mm depende de la potencia asignada del motor expresada en W.

La Tabla 4.1 resume los resultados obtenidos en el cálculo. En base a estos se decide fijar como límite superior del intervalo de valores en la evaluación paramétrica $\delta_g = \text{GAP} = 2,7\text{mm}$.

Descripción	Variable	Valor
Potencia activa asignada	P_N (W)	3550000
Espesor del entrehierro geométrico (2.9)	δ_g (mm)	1,93
Espesor del entrehierro geométrico (2.10)	δ_g (mm)	2,68

Tabla 4.1. Cálculo del espesor del entrehierro geométrico. Evaluación paramétrica del modelo inicial en JMAG-Express Public.

Se opta por fijar $\delta_g = \text{GAP} = 1,7$ mm como límite inferior de intervalo.

Tras deducir los valores extremos del intervalo de espesor del entrehierro que se emplearán en la evaluación paramétrica, se calcula el diámetro exterior del rotor D_2 correspondiente:

Descripción	Variable	Valor	
Diámetro interior del estator	D_1 (mm)	736,4	
Espesor del entrehierro geométrico	δ_g (mm)	1,7	2,7
Diámetro exterior del rotor (2.12)	D_2 (mm)	733	731

Tabla 4.2. Intervalo de valores en la evaluación paramétrica del diámetro exterior del rotor del modelo inicial en JMAG-Express Public.

4.2 CÁLCULO DE LAS DIMENSIONES DE LAS ALTERNATIVAS DE DISEÑO DEL MODELO MA

En este apartado se resumen los cálculos llevados a cabo para definir las magnitudes de las propuestas de diseño estudiadas.

4.2.1 DIMENSIONES DE LA PROPUESTA DE DISEÑO MA.1

La alternativa de diseño MA.1 resulta de la reducción de la profundidad de la boca de ranura o aproximación de las barras conductoras que conforman la jaula del rotor al entrehierro del modelo de partida MA. Se opta por una profundidad de ranura $h_{o2} = 5$ mm. Al modificar la longitud del cuello de ranura es preciso definir de nuevo la posición de las barras en JMAG-Express Public, mediante el parámetro [RC1: Bar Center Depth]. Para poder precisar la profundidad de los centros de las barras, se ha de deducir, de nuevo, el diámetro de la circunferencia que contiene los centros de las barras del rotor d . El diámetro exterior del rotor D_2 y el ancho de las ranuras, igual al diámetro de las barras ($b_{s2} = d_{c2}$), no se han modificado respecto al modelo de partida. A continuación, se muestran las magnitudes resultantes:

Descripción	Variable	Valor
Diámetro exterior del rotor	D_2 (mm)	732,8
Diámetro de las barras del rotor (Tabla 2.23)	d_{c2} (mm)	39
Diámetro de las ranuras del rotor	b_{s2} (mm)	39
Profundidad de la boca de ranura del rotor	h_{o2} (mm)	5
Diámetro de la circunferencia descrita por los centros de las barras del rotor (2.90)	d (mm)	683,8
Profundidad centros de las barras respecto diámetro exterior del rotor (3.1)	RC1 (mm)	24,5

Tabla 4.3. Alternativa de diseño MA.1: Cálculo de RC1.

Al aproximar las barras conductoras a la superficie externa del rotor, la región de los dientes, correspondiente a la circunferencia descrita por los centros de las barras, se ampliará al ser el diámetro de esta mayor en relación al modelo MA, en consecuencia, la inducción magnética en dicha zona no excederá el valor máximo recomendado y se verificarán las relaciones que han de guardar el ancho del diente y el ancho de ranura con el paso de ranura del rotor.

En la Tabla 4.4, se comprueba que las relaciones del ancho de ranura y del ancho del diente con el paso de ranura del rotor medido como longitud de arco de la circunferencia que contiene los centros de las barras de la jaula del rotor, b_{s2}/τ_{r2^d} y b_{t2}/τ_{r2^d} respectivamente, verifican las restricciones establecidas.

Descripción	Variable	Valor
Diámetro de las ranuras del rotor	b_{s2} (mm)	39
Diámetro de la circunferencia descrita por los centros de las barras (Tabla 4.3)	d (mm)	683,8
Número de ranuras del rotor	K_2	24
Paso de ranura del rotor medido como longitud de arco de circunferencia de d (2.89)	τ_{r2^d} (mm)	89,51
Relación entre el ancho de ranura y el paso de ranura del rotor referido a d	$\frac{b_{s2}}{\tau_{r2^d}}$	0,436
Relación entre el ancho del diente y el paso de ranura del rotor referido a d (2.91)	$\frac{b_{t2}}{\tau_{r2^d}}$	0,564
Relación entre el ancho del diente y el paso de ranura del rotor mínimo (Tabla 2.25)(2.87)	$\frac{b_{t2}}{\tau_{r2}} \geq$	0,435
Relación entre el ancho de ranura y el paso de ranura del rotor máximo (Tabla 2.25)	$\frac{b_{s2}}{\tau_{r2}} \leq$	0,565

Tabla 4.4. Alternativa de diseño MA.1: Comprobación de las relaciones del ancho de ranura y del ancho del diente con el paso de ranura medido como longitud de arco de circunferencia de d .

Por último, se obtiene la inducción magnética en los dientes del rotor B_{t2M} con la expresión (2.92), empleando para ello la relación entre el ancho del diente y el paso de ranura calculado con las dimensiones finalmente asumidas. Se comprueba que no se excede el valor máximo de inducción magnética establecido en los dientes ($B_{t2M} < 1,65$ T), tal y como se había anticipado previamente.

B_M (T)	K_{Fe2}	τ_{r2^d}/b_{t2}	B_{t2M} (T)
0,7	0,97	1 / 0,564	1,27

Tabla 4.5. Alternativa de diseño MA.1: Inducción magnética en los dientes del rotor.

4.2.2 DIMENSIONES DE LA PROPUESTA DE DISEÑO MA.2

El diseño MA.2 se caracteriza por emplear ranuras de mayor anchura en el estator respecto al modelo de partida MA, para conservar el factor de ocupación de ranura es preciso ajustar las restantes dimensiones de la ranura, así como el ancho y el alto de los conductores del modelo inicial, la composición y espesores de las diversas capas aislantes permanecen igual. La Tabla 2.12 muestra el intervalo de valores recomendado del ancho de ranura y de las dimensiones de los conductores, en base a dichos valores se consultan las dimensiones y secciones normalizadas de conductores rectangulares y se opta por un conductor de mayor anchura a_{c1} y menor altura b_{c1} para garantizar que su sección transversal S_{c1} y por ende la densidad de corriente en el mismo J_1 (2.47) no varíen grandemente, para la misma intensidad asignada en el conductor I_{r1N} :

a_{c1} (mm)	b_{c1} (mm)	S_{c1} (mm ²)	I_{r1N} (A)	J_1 (A/mm ²)
25	6,5	162 ³⁸	587	3,62

Tabla 4.6. Alternativa de diseño MA.2: Dimensiones y sección normalizadas del conductor.

Densidad de corriente en el conductor con la sección normalizada.

Tras definir las dimensiones del conductor y la composición y espesor de las distintas capas aislantes se procede con el cálculo de las dimensiones mínimas que han de poseer las ranuras del estator y las dimensiones definitivas de las mismas, para ello se razonará de igual forma que con el modelo de partida. Para el cálculo de la altura total y la altura útil de ranura se hará uso del ancho mínimo del conductor adoptando un valor ligeramente superior para permitir la correcta inserción de los devanados sin que se produzcan daños en el aislamiento, se considerará el factor de llenado de ranura que el programa asigna por defecto que es el mismo que se empleó en el modelo de partida, también se conserva la profundidad de la boca de ranura. Obteniéndose los resultados recopilados en la Tabla 4.7.

³⁸ Área del conductor considerando la reducción debida al redondeo de los bordes

Descripción	Variable	Valor
Ancho del conductor del estator	a_{c1} (mm)	25
Espesor lateral total del aislamiento (Tabla 2.11)	b_{ins1} (mm)	2,3
Ancho mínimo de ranura del estator (2.59)	b_{s1min} (mm)	27,3
Ancho de ranura del estator	b_{s1} (mm)	29
Nº de conductores por ranura del estator (Tabla 2.9)	Z_{K1}	8
Altura del conductor del estator	b_{c1} (mm)	6,5
Espesor radial total del aislamiento (Tabla 2.11)	h_{ins1} (mm)	18,9 ³⁹
Altura mínima de ranura del estator (2.60)	h_{s1min} (mm)	70,9
Espesor de la capa de aislante del conductor del estator (Tabla 2.11)	e_{ins_c1} (mm)	0,15
Sección de un conductor del estator incluyendo recubrimiento aislante (2.62)	S_{c1ins} (mm ²)	172,04
Espesor de la pieza aislante en U del estator	e_{ins_s1} (mm)	0,5
Factor de llenado de ranura del estator	K_{Cu1}	0,75
Altura útil de la ranura del estator (2.64)	h_{su1} (mm)	68,966
Profundidad de la boca de ranura del estator	h_{o1} (mm)	14
Altura de la ranura del estator (2.65)	h_{s1} (mm)	82,966
Relación entre el alto y el ancho de ranura	h_{s1} / b_{s1}	2,86

Tabla 4.7. Alternativa de diseño MA.2: Cálculo de las dimensiones y de los valores mínimos del ancho y el alto de ranura del estator.

Se verifica que la altura de la ranura es superior al valor mínimo, y que la relación entre el alto y el ancho de ranura, está comprendido en el intervalo de valores recomendado.

³⁹ Considerando que el aislamiento de ranura está compuesto por una capa en la parte superior y otra en la parte inferior de la ranura correspondientes a cada una de las piezas aislantes en U de 0,5 mm de espesor.

Se ha de comprobar si a $\frac{1}{3}$ de la altura del diente, con el ancho del diente obtenido en los cálculos, la densidad de flujo magnético no excede el valor de inducción magnética máximo en el diente establecido conforme a las recomendaciones: $B_{t1}|_{1/3} < B_{t1M}$. Se verifica que no se supera el valor de inducción máximo (Tabla 4.8).

Descripción	Variable	Valor
Diámetro interior del estator	D_1 (m)	0,7364
Altura del diente del estator ($h_{s1} = h_{t1}$)	h_{t1} (m)	0,082966
Diámetro correspondiente a $\frac{1}{3}$ de la altura del diente del estator (2.53)	$d_{1/3}$ (m)	0,79168
Número total de ranuras del estator	K_1	36
Paso de ranura medido como longitud de arco de circunferencia de $d_{1/3}$ (2.58)	$\tau_{r1^{1/3}}$ (m)	0,06909
Ancho de ranura del estator	b_{s1} (m)	0,029
Ancho del diente a $\frac{1}{3}$ de la altura del diente del estator (2.67)	$b_{t1^{1/3}}$ (m)	0,03036
Longitud útil del hierro del estator	l_{Fe1} (m)	0,8415
Paso polar del estator medido en número de ranuras	γ_{p1}	9
Flujo por polo máximo	ϕ_M (Wb)	0,2224
Inducción magnética a $\frac{1}{3}$ de la altura del diente del estator	$B_{t1^{1/3}}$ (T)	0,73
Inducción magnética máxima en los dientes del estator	B_{t1M} (T)	1,65

Tabla 4.8. Alternativa de diseño MA.2: Comprobación de la inducción magnética en el diente del estator a $\frac{1}{3}$ de la altura del mismo.

En esta propuesta de diseño solo se han modificado las dimensiones de las ranuras y conductores, conservando el diámetro interior, altura del yugo y profundidad de la boca de ranura del estator respecto al modelo de partida MA, por lo tanto, se ha de definir de nuevo el diámetro exterior del estator mediante la expresión (2.69) para que las ranuras adquieran la altura ajustada sin que se modifiquen las restantes dimensiones.

D_1 (mm)	$h_{\gamma 1}$ (mm)	h_{s1} (mm)	D_{1e} (mm)	D_{1e}/D_1
736,4	91	82,966	1085	1,47

Tabla 4.9. Alternativa de diseño MA.2: Cálculo del diámetro exterior del estator.

Las dimensiones que se han modificado respecto al modelo de partida se resumen a continuación:

a_{c1} (mm)	b_{c1} (mm)	SW3 = b_{s1} (mm)	SD1 = D_{1e} (mm)
25	6,5	29	1085

Tabla 4.10. Alternativa de diseño MA.2: Dimensiones a introducir en JMAG-Express Public.

4.2.3 DIMENSIONES DE LA PROPUESTA DE DISEÑO MA.2a

Según se señaló en el Anexo 2.3, se decide incorporar a la alternativa de diseño MA.2 el ajuste de la profundidad de la boca de ranura [ST]. Para no modificar la altura útil de las ranuras ni del yugo del estator es preciso ajustar el diámetro exterior del mismo. Para ello, se calculará, en primer lugar, la altura total de la ranura, en base a la longitud de la boca de ranura ajustada.

La composición de las distintas capas aislantes y sus respectivos espesores se muestran a continuación. Solo se ha modificado la altura dedicada a la cuña de cierre (profundidad de la boca de ranura del estator) respecto al modelo inicial.

Capa	Espesor/capa (mm)	Espesor (mm)	
		Tangencial	Radial
Aislamiento del conductor	0,15	2 capas · 0,15 · 1 conductor = 0,3	2 capas · 0,15 · 8 conductores = 2,4
Aislamiento de pared de bobina	0,5 ⁴⁰	4 capas · 1 = 2	2 capas · 1 = 1
Aislamiento entre 2 bobinas	1,5	-	1,5
Altura dedicada a cuña de cierre	11	-	11
Espesor Total (mm)		$b_{ins1} = 2,3$	$h_{ins1} = 15,9$

Tabla 4.11. Alternativa de diseño MA.2a: Capas de aislamiento del estator y sus respectivos espesores.

⁴⁰ Espesor de la pieza aislante en U del estator. JMAG-Express Public considera que el aislamiento de pared de ranura o de bobina se compone de dos piezas aislantes en U enfrentadas de manera que el aislamiento lateral (tangencial) está compuesto de 4 capas y el vertical (radial) de 2 capas.

En la Tabla 4.12, se resume el cálculo de la altura mínima y definitiva de las ranuras del estator y la relación de aspecto de ranura (h_{s1}/b_{s1}) del modelo MA.2a. Las dimensiones de los conductores, el ancho de ranura mínimo y definitivo, y la altura útil de ranura permanecen igual que en el modelo MA.2 (Tabla 4.7).

Descripción	Variable	Valor
Ancho mínimo de ranura del estator (2.59)	b_{s1min} (mm)	27,3
Ancho de ranura del estator	b_{s1} (mm)	29
Nº de conductores por ranura del estator (Tabla 2.9)	Z_{K1}	8
Altura del conductor del estator	b_{c1} (mm)	6,5
Espesor radial total del aislamiento (Tabla 4.11)	h_{ins1} (mm)	15,9
Altura mínima de ranura del estator (2.60)	h_{s1min} (mm)	67,9
Altura útil de la ranura del estator	h_{su1} (mm)	68,966
Profundidad de la boca de ranura del estator	h_{o1} (mm)	11
Altura de la ranura del estator (2.65)	h_{s1} (mm)	79,966
Relación entre el alto y el ancho de ranura	h_{s1} / b_{s1}	2,76

Tabla 4.12. Alternativa de diseño MA.2a: Dimensiones mínimas y definitivas de las ranuras del estator. Cálculo de la altura de ranura y valor mínimo de esta.

Se verifica que la altura de la ranura es superior al valor mínimo, y que la relación entre el alto y el ancho de ranura, está comprendido en el intervalo de valores recomendado.

Dado que la altura de la ranura apenas se ha modificado, no es necesario comprobar si la densidad de flujo magnético a $\frac{1}{3}$ de la altura del diente, con el ancho del diente fijado, no excede el valor de inducción magnética máximo en el diente establecido conforme a las recomendaciones: $B_{t1}|_{1/3} < B_{t1M}$. La densidad de flujo en los dientes probablemente se incrementará levemente respecto al modelo MA.2, pero sin llegar a superarse el valor máximo establecido.

Una vez definida la altura de las ranuras de la propuesta de diseño MA.2a, se realiza el cálculo del diámetro exterior del estator (2.69). La altura del yugo y diámetro interior del inductor no se han modificado. Se comprueba que el cociente entre el diámetro exterior e interior del estator se encuentra dentro del intervalo de valores recomendado.

D_1 (mm)	h_{y1} (mm)	h_{s1} (mm)	D_{1e} (mm)	D_{1e}/D_1
736,4	91	79,966	1079	1,46

Tabla 4.13. Alternativa de diseño MA.2a: Cálculo del diámetro exterior del estator.

Las dimensiones que se han ajustado respecto al modelo MA.2 se dan a continuación:

$ST = h_{o1}$ (mm)	$SD1 = D_{1e}$ (mm)
11	1079

Tabla 4.14. Alternativa de diseño MA.2a: Dimensiones modificadas respecto al diseño MA.2 a introducir en JMAG-Express Public.

4.2.4 DIMENSIONES DE LA PROPUESTA DE DISEÑO MA.3

El modelo MA.3 se caracteriza por emplear barras de mayor diámetro en la jaula del rotor en relación al modelo MA. Adicionalmente, para analizar de un modo más concreto la influencia que ejerce este parámetro sobre las características de funcionamiento, se decide emplear la misma profundidad de la boca de ranura que la alternativa de diseño MA.1 ($h_{o2} = 5$ mm).

Se establece un diámetro en las barras d_{c2} ligeramente inferior al máximo permitido (densidad de corriente en el conductor ligeramente superior a la mínima recomendada, para la misma intensidad asignada en la barra I_{bN}). La sección de una barra S_{c2} y densidad de corriente en la misma J_2 se deducen con las siguientes expresiones:

$$S_{c2} = \frac{\pi \cdot d_{c2}^2}{4} \quad (4.1)$$

$$J_2 = \frac{I_{bN}}{S_{c2}} \quad (4.2)$$

Operando se obtiene:

d_{c2} (mm)	S_{c2} (mm ²)	I_{bN} (A)	J_2 (A/mm ²)
47	1734,94	5991,66	3,45

Tabla 4.15. Alternativa de diseño MA.3: Cálculo de la sección y densidad de corriente de las barras de la jaula del rotor.

Al modificar la longitud de la boca de ranura y anchura de la ranura, se ha de definir de nuevo la posición de las barras en JMAG-Express Public, mediante el parámetro [RC1]. Para poder precisar la profundidad a la cual se ubican de los centros de las barras, se ha de deducir el diámetro de la circunferencia que contiene los centros de las barras del rotor d . El diámetro exterior del rotor D_2 no se ha modificado respecto al modelo de partida. El ancho de las ranuras coincide con el diámetro de las barras del rotor ($b_{s2} = d_{c2}$), A continuación, se muestran las magnitudes resultantes:

Descripción	Variable	Valor
Diámetro exterior del rotor	D_2 (mm)	732,8
Diámetro de las barras del rotor	d_{c2} (mm)	47
Diámetro de las ranuras del rotor	b_{s2} (mm)	47
Profundidad de la boca de ranura del rotor	h_{o2} (mm)	5
Diámetro de la circunferencia descrita por los centros de las barras del rotor (2.90)	d (mm)	675,77
Profundidad centros de las barras respecto al diámetro exterior del rotor (3.1)	RC1 (mm)	28,5

Tabla 4.16. Alternativa de diseño MA.3: Cálculo de RC1.

Tras concretar el diámetro y posición de las barras de la jaula del rotor, se ha de comprobar si las relaciones que guarda el ancho de ranura y el ancho del diente con el paso de ranura del rotor expresado como longitud de arco de la circunferencia descrita por los centros de las barras del rotor del modelo MA.3, verifican las condiciones establecidas (Tabla 2.25), tal y como se realizó al definir la propuesta de diseño MA.1. Asimismo, se comprobará si la inducción magnética en los dientes del modelo MA.3 no excede el valor máximo establecido en los mismos.

Atendiendo a la Tabla 4.17 se comprueba que la relación entre el ancho del diente y el ancho de ranura con el paso de ranura del rotor medido como longitud de arco de circunferencia que contiene los centros de las barras del rotor del diseño MA.3, cumplen las especificaciones

Descripción	Variable	Valor
Diámetro de las ranuras del rotor	b_{s2} (mm)	47
Diámetro de la circunferencia descrita por los centros de las barras (Tabla 4.16)	d (mm)	675,77
Número de ranuras del rotor	K_2	24
Paso de ranura del rotor medido como longitud de arco de circunferencia de d (2.89)	τ_{r2^d} (mm)	88,46
Relación entre el ancho de ranura y el paso de ranura del rotor referido a d	$\frac{b_{s2}}{\tau_{r2^d}}$	0,531
Relación entre el ancho del diente y el paso de ranura del rotor referido a d (2.91)	$\frac{b_{t2}}{\tau_{r2^d}}$	0,469
Relación entre el ancho del diente y el paso de ranura del rotor mínimo (Tabla 2.25)(2.87)	$\frac{b_{t2}}{\tau_{r2}} \geq$	0,435
Relación entre el ancho de ranura y el paso de ranura del rotor máximo (Tabla 2.25)	$\frac{b_{s2}}{\tau_{r2}} \leq$	0,565

Tabla 4.17. Alternativa de diseño MA.3: Comprobación de las relaciones del ancho de ranura y del ancho del diente con el paso de ranura del rotor medido como longitud de arco de circunferencia de d .

La inducción magnética en los dientes del rotor B_{t2M} se obtiene con la expresión (2.92), empleando para ello la relación entre el ancho del diente y el paso de ranura del modelo MA.3. Se comprueba que no se excede el valor máximo de inducción magnética establecido en los dientes ($B_{t2M} < 1,65$ T), no obstante, si se observa un incremento notable en relación al modelo MA.1 (Tabla 4.5) y MA (Tabla 2.31).

B_M (T)	K_{Fe2}	τ_{r2^d}/b_{t2}	B_{t2M} (T)
0,7	0,97	1 / 0,469	1,53

Tabla 4.18. Alternativa de diseño MA.3: Inducción magnética en los dientes del rotor.

Se relacionan a continuación, las magnitudes que se han modificado respecto al modelo MA y que se han de ajustar en JMAG-Express Public:

RC1 (mm)	RL1 = d_{c2} (mm)
28,5	47

Tabla 4.19. Alternativa de diseño MA.3: Dimensiones a introducir en JMAG-Express Public.

4.2.5 DIMENSIONES DE LA PROPUESTA DE DISEÑO MA.4

En base a las propuestas de diseño estudiadas hasta el momento, se decide incorporar al modelo MA el ajuste de la profundidad de profundidad de la boca de ranura del rotor [RC1] y del estator [ST] y emplear ranuras ligeramente más anchas en el estator [SW3]. Al modificar estos parámetros geométricos, es preciso adecuar la geometría del modelo inicial a las nuevas dimensiones adoptadas.

Dado que se decide emplear la misma longitud del cuello de ranura del rotor y el mismo diámetro en las barras de la jaula del rotor del modelo MA.1, no es preciso realizar ningún cálculo al respecto.

Al modificarse el ancho de ranura, preservando el espesor y composición de las capas que componen el aislamiento tanto del conductor como de la ranura del modelo MA.2a (Tabla 4.11), atendiendo a la expresión que permite deducir la altura útil de ranura (2.64), se observa que, si se pretende preservar el factor de ocupación, necesariamente la altura útil de las ranuras ha de ser menor y consecuentemente, al estrecharse la profundidad de la boca de ranura del estator, la altura total de la ranura también (2.65). En la Tabla 4.20, se constata que la altura útil h_{su1} y total h_{s1} de las ranuras de modelo MA.4 es superior a la del modelo inicial, al emplear ranuras más anchas b_{s1} . Asimismo, se comprueba que la proporción que guardan el alto y el ancho de ranura verifica las restricciones establecidas, y que el ancho y el alto de ranura son superiores a los valores mínimos.

En esta ocasión no es necesario comprobar si a $\frac{1}{3}$ de la altura del diente, con el ancho del diente adoptado en el modelo MA.4, la densidad de flujo magnético no excede el valor de inducción magnética máximo en el diente establecido conforme a las recomendaciones: $B_{t1}|_{1/3} < B_{t1M}$, dado que se emplea un ancho de ranura inferior al del modelo MA.2 y, tal y como sucedía con el modelo MA.2a, apenas se ha variado la altura de las ranuras en relación

al modelo MA.2, por lo tanto la inducción magnética en los dientes del modelo MA.4 estará comprendida entre la obtenida para el modelo MA (Tabla 2.19) y el modelo MA.2 (Tabla 4.8) garantizándose que no se supera el valor límite establecido.

Descripción	Variable	Valor
Ancho del conductor del estator	a_{c1} (mm)	22
Espesor lateral total del aislamiento (Tabla 4.11)	b_{ins1} (mm)	2,3
Ancho mínimo de ranura del estator (2.59)	b_{s1min} (mm)	24,3
Ancho de ranura del estator	b_{s1} (mm)	28
Nº de conductores por ranura del estator (Tabla 2.9)	Z_{K1}	8
Altura del conductor del estator	b_{c1} (mm)	7,5
Espesor radial total del aislamiento (Tabla 4.11)	h_{ins1} (mm)	15,9
Altura mínima de ranura del estator (2.60)	h_{s1min} (mm)	75,9
Espesor de la capa de aislante del conductor del estator	e_{ins_c1} (mm)	0,15
Sección de un conductor del estator incluyendo recubrimiento aislante (2.62)	S_{c1ins} (mm ²)	173,94
Espesor de la pieza aislante en U del estator	e_{ins_s1} (mm)	0,5
Factor de llenado de ranura del estator	K_{Cu1}	0,75
Altura útil de la ranura del estator (2.64)	h_{su1} (mm)	72,36
Profundidad de la boca de ranura del estator	h_{o1} (mm)	11
Altura de la ranura del estator (2.65)	h_{s1} (mm)	83,36
Relación entre el alto y el ancho de ranura	h_{s1} / b_{s1}	2,98

Tabla 4.20. Alternativa de diseño MA.4: Dimensiones mínimas y definitivas de las ranuras del estator. Cálculo de la altura de ranura y valor mínimo de esta.

Al respetarse la altura del yugo y dimensiones de los conductores del estator del modelo inicial MA, es preciso modificar el diámetro exterior del estator (2.69) para lograr un factor de llenado similar al especificado al emplearse ranuras más anchas y con una longitud del cuello de ranura menor. En la Tabla 4.21 se comprueba que el cociente entre el diámetro exterior e interior del estator se encuentra dentro del intervalo de valores recomendado.

D_1 (mm)	h_{y1} (mm)	h_{s1} (mm)	D_{1e} (mm)	D_{1e}/D_1
736,4	91	83,36	1086	1,47

Tabla 4.21. Alternativa de diseño MA.4: Cálculo del diámetro exterior del estator.

A continuación, se relacionan las magnitudes que se han rectificado respecto al modelo MA y que se han de facilitar a JMAG-Express Public:

RC1 (mm)	ST = h_{o1} (mm)	SW3 = b_{s1} (mm)	SD1 = D_{1e} (mm)
24,5	11	28	1086

Tabla 4.22. Alternativa de diseño MA.4: Dimensiones modificadas respecto al diseño MA a introducir en JMAG-Express Public.

4.3 DIMENSIONES DEL MODELO MB

En base al estudio de las alternativas de diseño del modelo MA (Anexo 2.3) se decidió variar la geometría de las barras del rotor, al observarse que con la geometría circular adoptada en los diseños previos no se lograban las características a la velocidad asignada sin afectar negativamente las restricciones en el arranque e instante en que el par desarrollado por el motor es máximo. Se opta por utilizar una geometría oval.

Se empleará como modelo base el diseño MA.1, preservando las dimensiones del estator y del rotor (diámetro exterior del núcleo, diámetro del eje, profundidad de la boca de ranura). La geometría oval de las barras incorpora los siguientes parámetros: diámetro externo de la barra (d_1), diámetro interno de la barra (d_2), y distancia que separa los centros de las circunferencia interna y externa de la barra (h_r):

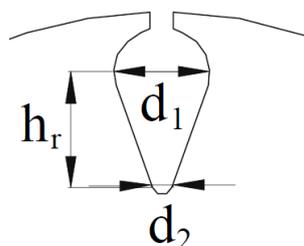


Figura 4.1. Dimensiones de la ranura oval.

La sección transversal de una barra con geometría oval viene dada por la siguiente expresión:

$$S_{c2} = \frac{\pi}{8} \cdot (d_1^2 + d_2^2) + \frac{d_1 + d_2}{2} \cdot h_r \quad (4.3)$$

Se escogerá, en principio, como diámetro externo de la barra el mismo diámetro que las barras del modelo MA.1, y se establecerán las restantes dimensiones de tal forma que la densidad de corriente en la barra se aproxime al límite inferior recomendado ($J_2 = 3 \text{ A/mm}^2$), es decir, se incrementará la sección de las barras hasta el límite máximo permitido, para así disminuir la resistencia del rotor.

Dado que en este diseño se pretende incrementar la reactancia de dispersión para reducir la corriente absorbida y par máximo del motor, los centros de la circunferencias externa e interna de la barra han de distanciarse. Finalmente, se opta por emplear las magnitudes resumidas en la Tabla 4.23, donde también se muestra el área, y la densidad de corriente en las barras resultantes de esa configuración:

Descripción	Variable	Valor
Diámetro externo de la barra oval	d_1 (mm)	39
Diámetro interno de la barra oval	d_2 (mm)	8
Distancia entre los centros de la circunferencia interna y externa de la barra oval	h_r (mm)	58
Sección transversal de la barra del rotor (4.3)	S_{c2} (mm ²)	1985,43
Intensidad asignada en una barra de la jaula (Tabla 2.22)	I_{bN} (A)	5991,66
Densidad de corriente en la barra del rotor (4.2)	J_2 (A/mm ²)	3,02

Tabla 4.23. Alternativa de diseño MB: Dimensiones, sección transversal y densidad de corriente de la barra oval de la jaula del rotor.

Con esta geometría la región de los dientes más susceptible a la saturación magnética corresponde al diámetro de la circunferencia descrita por los centros de la circunferencia externa de la barra oval, pues es donde el diente es más estrecho y por ende la inducción magnética más elevada. Dado que se emplea el mismo diámetro y posición de los centros de la circunferencia externa de las barras del rotor (profundidad de la boca de ranura) que el modelo MA.1 (Tabla 4.3), no es necesario comprobar si la densidad de flujo en dicha zona excede el límite impuesto conforme a las recomendaciones (Tabla 4.4 y Tabla 4.5).

A continuación, se relacionan las magnitudes de los parámetros geométricos del modelo MB a introducir en JMAG-Express Public:

RC2 (mm) ⁴¹	RL2 (mm) ⁴²	RL3 (mm) ⁴³	RC3 (mm) ⁴⁴
24,5	19,5	4	58

Tabla 4.24. Alternativa de diseño MB: Magnitudes de los parámetros geométricos a introducir en JMAG-Express Public.

4.4 DIMENSIONES DE LA ALTERNATIVA DE DISEÑO MB.1

En el Anexo 2.3 se concluyó que era preciso realizar ajustes a las dimensiones de las barras del modelo MB para tratar de disminuir la intensidad en el arranque y el valor máximo de par y de este modo aproximarlos más a las condiciones impuestas en ambos estados de funcionamiento. En la evaluación paramétrica del radio externo y distancia comprendida entre los centros de la circunferencia interna y externa de la barra oval, se observó que barras de menor radio externo y mayor longitud procuraban una menor corriente en el arranque y una reducción del par máximo, con un par de arranque superior. Para evitar un incremento excesivo del par en el arranque y favorecer la reducción de las dos características mencionadas, se ubicará a las barras más alejadas del entrehierro, se adoptará una profundidad del cuello de ranura $h_{o2} = 8$ mm, la nueva posición de las barras se define en JMAG-Express Public a través del parámetro [RC2] que corresponde a la posición de los centros de la circunferencia externa del rotor.

Se mantendrá el mismo radio interno (mismo diámetro d_2) que el modelo MB. A continuación, se resumen las dimensiones adoptadas, y la sección transversal y densidad de corriente en la barra.

⁴¹ Distancia de los centros de la circunferencia externa de la barra oval respecto al diámetro exterior del rotor equivalente a RC1 en la geometría circular: *rim_001 Round bar*

⁴² Radio externo de la barra oval: $RL2 = d_1 / 2$

⁴³ Radio interno de la barra oval: $RL3 = d_2 / 2$

⁴⁴ Distancia entre los centros de las circunferencias externa e interna de la barra oval: $RC3 = h_r$

Descripción	Variable	Valor
Diámetro externo de la barra oval	d_1 (mm)	28
Diámetro interno de la barra oval	d_2 (mm)	8
Distancia entre los centros de la circunferencia interna y externa de la barra oval	h_r (mm)	92
Sección transversal de la barra del rotor (4.3)	S_{c2} (mm ²)	1989
Intensidad asignada en una barra de la jaula (Tabla 2.22)	I_{bN} (A)	5991,66
Densidad de corriente en la barra del rotor (4.2)	J_2 (A/mm ²)	3,01

Tabla 4.25. Alternativa de diseño MB.1: Dimensiones, sección transversal y densidad de corriente de la barra oval de la jaula del rotor.

El diámetro exterior del rotor se mantiene igual que en el modelo MB, las magnitudes resultantes del cálculo de [RC2] son:

Descripción	Variable	Valor
Diámetro exterior del rotor	D_2 (mm)	732,8
Diámetro externo de la barra oval del rotor	d_2 (mm)	28
Diámetro de las ranuras del rotor	b_{s2} (mm)	28
Profundidad de la boca de ranura del rotor	h_{o2} (mm)	8
Diámetro de la circunferencia descrita por los centros de de la circunferencia externa de las barras del rotor (2.90)	d (mm)	688,8
Profundidad centros de circunferencia externa de las barras respecto diámetro exterior del rotor (3.1)	RC2 (mm)	22

Tabla 4.26. Alternativa de diseño MB.1: Cálculo de RC2.

Las magnitudes de los parámetros geométricos del modelo MB.1 a introducir en JMAG-Express Public:

RC2 (mm)	RL2 (mm)	RL3 (mm)	RC3 (mm)
22	14	4	92

Tabla 4.27. Alternativa de diseño MB.1: Magnitudes de los parámetros geométricos a introducir en JMAG-Express Public.

ANEXO 2.5: CÁLCULO DEL RENDIMIENTO Y DEL FACTOR DE POTENCIA

5 CÁLCULO DEL RENDIMIENTO Y DEL FACTOR DE POTENCIA DE LAS ALTERNATIVAS DE DISEÑO

Durante la evaluación y desarrollo de los distintos modelos con JMAG-Express Public se detectaron ciertos errores, entre los que destacan el reducido valor del rendimiento y del factor de potencia, muy por debajo de los valores esperados en esta clase de motores.

Por este motivo, se decide realizar el cálculo de ambas magnitudes analíticamente. Para apreciar el error cometido por JMAG-Express Public, y obtener un valor más coherente con los valores extraídos del programa. Para ello se emplearán las siguientes expresiones:

- Cálculo del **rendimiento**: Se define como el cociente entre la potencia útil del motor o potencia mecánica motriz en el eje P_u y la potencia activa total absorbida de la red que resulta de la suma de la potencia útil y la potencia de pérdidas en el cobre del estator y el cobre del rotor ($P_{Cu} = P_{Cu1} + P_{Cu2}$) y potencia de pérdidas en el hierro P_{Fe} fundamentalmente en el núcleo del estator. En el cálculo del rendimiento no se han incluido las pérdidas mecánicas debidas a la fricción del aire y fricción de los cojinetes dado que el programa no las considera. La expresión para su cálculo es la siguiente:

$$\eta (\%) = \frac{P_u}{P_u + P_{Cu1} + P_{Cu2} + P_{Fe}} \cdot 100 \quad (5.1)$$

- Cálculo del **factor de potencia**: Se define como el cociente entre la potencia activa P_{1N} y la potencia aparente S_{1N} totales absorbidas por el estator (5.2). La potencia activa total se obtiene con la ecuación (5.3) empleando el valor de rendimiento calculado previamente (5.1) y la potencia útil total que es facilitada por JMAG-Express Public. La potencia aparente total se calcula con la expresión (5.4), es la suma de la potencia aparente absorbida por las tres fases del estator, V_{1N} e I_{1N} son la tensión y corriente asignadas de fase dado que los devanados del estator están conectados en estrella.

$$\cos \phi_{1N} = \frac{P_{1N}}{S_{1N}} \quad (5.2)$$

$$P_{1N} = \frac{P_u}{\eta} \quad (5.3)$$

$$S_{1N} = 3 \cdot V_{1N} \cdot I_{1N} \quad (5.4)$$

Particularizando las expresiones anteriores con los valores del modelo MA y las distintas propuestas de diseño se obtienen los siguientes resultados:

5.1 ALTERNATIVA DE DISEÑO MA.1

Magnitud	Modelo MA	Modelo MA.1
$P_u = P_N$ (kW)	1434	1736
P_{Cu} (kW)	140,47	169,42
P_{Fe} (kW)	5,452	5,52
η (%)	90,76	90,85
P_{1N} (kW)	1579,9	1910,94
V_{1N} (V)	2309	2309
I_{1N} (A)	525,5	570,9
S_{1N} (kVA)	3640,77	3955,3
$\cos \phi_{1N}$	0,434	0,483

Tabla 5.1. Alternativa de diseño MA.1: Cálculo analítico del rendimiento y del factor de potencia a la velocidad asignada 1490 r.p.m. de los modelos MA y MA.1.

5.2 ALTERNATIVA DE DISEÑO MA.2

Magnitud	Modelo MA	Modelo MA.2
$P_u = P_N$ (kW)	1434	1596
P_{Cu} (kW)	140,47	159,74
P_{Fe} (kW)	5,452	5,449
η (%)	90,76	90,62
P_{1N} (kW)	1579,9	1761,19
V_{1N} (V)	2309	2309
I_{1N} (A)	525,5	563,1
S_{1N} (kVA)	3640,77	3901,27
$\cos \phi_{1N}$	0,434	0,451

Tabla 5.2. Alternativa de diseño MA.2: Cálculo analítico del rendimiento y del factor de potencia a la velocidad asignada 1490 r.p.m. de los modelos MA y MA.2.

5.3 ALTERNATIVA DE DISEÑO MA.2a

Magnitud	Modelo MA	Modelo MA.2
$P_u = P_N$ (kW)	1434	1795
P_{Cu} (kW)	140,47	179,67
P_{Fe} (kW)	5,452	5,418
η (%)	90,76	90,65
P_{1N} (kW)	1579,9	1761,19
V_{1N} (V)	2309	2309
I_{1N} (A)	525,5	594,4
S_{1N} (kVA)	3640,77	4118,12
$\cos \phi_{1N}$	0,434	0,481

Tabla 5.3. Alternativa de diseño MA.2a: Cálculo analítico del rendimiento y del factor de potencia a la velocidad asignada 1490 r.p.m. de los modelos MA y MA.2a.

5.4 ALTERNATIVA DE DISEÑO MA.3

Magnitud	Modelo MA	Modelo MA.3
$P_u = P_N$ (kW)	1434	1544
P_{Cu} (kW)	140,47	173,61
P_{Fe} (kW)	5,452	5,621
η (%)	90,76	89,60
P_{1N} (kW)	1579,9	1723,23
V_{1N} (V)	2309	2309
I_{1N} (A)	525,5	622,4
S_{1N} (kVA)	3640,77	4312,11
$\cos \phi_{1N}$	0,434	0,4

Tabla 5.4 . Alternativa de diseño MA.3: Cálculo analítico del rendimiento y del factor de potencia a la velocidad asignada 1490 r.p.m. de los modelos MA y MA.3.

5.5 ALTERNATIVA DE DISEÑO MA.4

Magnitud	Modelo MA	Modelo MA.4
$P_u = P_N$ (kW)	1434	2066
P_{Cu} (kW)	140,47	199,97
P_{Fe} (kW)	5,452	5,465
η (%)	90,76	90,96
P_{1N} (kW)	1579,9	2271,44
V_{1N} (V)	2309	2309
I_{1N} (A)	525,5	615,4
S_{1N} (kVA)	3640,77	4263,62
$\cos \phi_{1N}$	0,434	0,533

Tabla 5.5. Alternativa de diseño MA.4: Cálculo analítico del rendimiento y del factor de potencia a la velocidad asignada 1490 r.p.m. de los modelos MA y MA.4.

5.6 ALTERNATIVA DE DISEÑO MB

Magnitud	Modelo B
$P_u = P_N$ (kW)	1961
P_{Cu} (kW)	159,02
P_{Fe} (kW)	5,572
η (%)	92,26
P_{1N} (kW)	2125,59
V_{1N} (V)	2309
I_{1N} (A)	490,7
S_{1N} (kVA)	3399,67
$\cos \phi_{1N}$	0,625

Tabla 5.6. Diseño MB: Cálculo analítico del rendimiento y del factor de potencia a la velocidad asignada 1490 r.p.m.

5.7 ALTERNATIVA DE DISEÑO MB.1

Magnitud	Modelo B	Modelo MB.1
$P_u = P_N$ (kW)	1961	1639
P_{Cu} (kW)	159,02	124,01
P_{Fe} (kW)	5,572	5,55
η (%)	92,26	92,67
P_{1N} (kW)	2125,59	1768,56
V_{1N} (V)	2309	2309
I_{1N} (A)	490,7	414,1
S_{1N} (kVA)	3399,67	2868,97
$\cos \phi_{1N}$	0,625	0,616

Tabla 5.7. Diseño MB.1: Cálculo analítico del rendimiento y del factor de potencia a la velocidad asignada 1490 r.p.m. de los modelos MB y MB.1.

ANEXO 2.6: VARIACIÓN DEL DESLIZAMIENTO ASIGNADO

6 VARIACIÓN DEL DESLIZAMIENTO ASIGNANDO DE LAS ALTERNATIVAS DE DISEÑO

Para lograr las características de funcionamiento asignadas establecidas en las especificaciones sin modificar las dimensiones y condiciones de alimentación del motor es preciso reducir el deslizamiento asignado del mismo, que se estableció en base a motores existentes de características similares. Una reducción del deslizamiento de la máquina conlleva no solo un ascenso del par y la potencia mecánica del motor, también se produce un incremento de las pérdidas eléctricas, en consecuencia, no es recomendable rebajar en exceso su valor.

Tal y como se comentó al describir la característica par-velocidad de un motor de inducción en el apartado de antecedentes del presente trabajo, en la zona estable de la curva comprendida entre $0 < s < s_m$, la característica par-velocidad es prácticamente lineal siendo la variación del par proporcional al deslizamiento, este hecho nos permite predecir las características operativas del motor bajo cualquier condición de carga si previamente se dispone de las características de funcionamiento del mismo en otro estado de carga. El deslizamiento s correspondiente a las nuevas condiciones de carga (par T), se obtiene en base a las características asignadas especificadas del motor (deslizamiento s_N y par T_N asignados) según la siguiente expresión:

$$s = s_N \cdot \frac{T}{T_N} \quad (6.1)$$

La velocidad n , correspondiente al nuevo deslizamiento establecido:

$$n = n_1 \cdot (1 - s) \quad (6.2)$$

Estas expresiones son las que se emplearán para establecer el nuevo deslizamiento en los diseños en los que el par a la velocidad asignada de referencia no difiera mucho del requerido.

6.1 ALTERNATIVA DE DISEÑO MA.4

El diseño MA.4 presenta un par a la velocidad asignada de referencia próximo al par asignado establecido en las especificaciones y en consecuencia presenta una disminución del deslizamiento razonable, si se consideran los valores facilitados por CALASIN.

Magnitud	Modelo MA.4
s_N	0,0067
T_N (N·m)	22751,7
T (N·m)	15179,4
s	0,00999
n (rpm)	1485,01

Tabla 6.1. Alternativa de diseño MA.4: Variación del deslizamiento asignado en base a los valores proporcionados por CALASIN.

6.2 ALTERNATIVA DE DISEÑO MB

El diseño MB presenta un par a la velocidad asignada de referencia próximo al par asignado establecido en las especificaciones y en consecuencia presenta una disminución del deslizamiento razonable, si se consideran los valores facilitados por CALASIN.

Magnitud	Modelo MB
s_N	0,0067
T_N (N·m)	22751,7
T (N·m)	16376,6
s	0,0093
n (rpm)	1486,11

Tabla 6.2. Alternativa de diseño MB: Variación del deslizamiento asignado en base a los valores proporcionados por CALASIN.

6.3 ALTERNATIVA DE DISEÑO MB.1

En esta ocasión el par a la velocidad asignada de referencia dista más del requerido en esas condiciones y evidentemente el incremento de deslizamiento será más importante. No obstante, este modelo presenta unas pérdidas en el cobre bajas de manera que es posible asignar un deslizamiento mayor.

Magnitud	Modelo MB.1
s_N	0,0067
T_N (N·m)	22751,7
T (N·m)	11507,6
s	0,0132
n (rpm)	1480,25

Tabla 6.3. Alternativa de diseño MB.1: Variación del deslizamiento asignado en base a los valores proporcionados por CALASIN.

DOCUMENTO 3: PLANOS

ÍNDICE

1	DIAGRAMA DE DEVANADO Y DIAGRAMA DE RANURA	332
1.1	DIAGRAMA DE DEVANADO DEL ESTATOR DEL MODELO DEFINITIVO	332
1.2	DIAGRAMAS DE RANURA DEL ESTATOR DEL MODELO DEFINITIVO	333
2	CHAPAS MAGNÉTICAS DE LOS NÚCLEOS MAGNÉTICOS	336
2.1	CHAPA MAGNÉTICA DEL NÚCLEO DEL ESTATOR DEL DISEÑO DEFINITIVO	336
2.2	CHAPA MAGNÉTICA DEL NÚCLEO DEL ROTOR DEL DISEÑO DEFINITIVO.....	336

1 DIAGRAMA DE DEVANADO Y DIAGRAMA DE RANURA

JMAG-Express Public permite apreciar de forma gráfica la disposición de las bobinas en las ranuras a través de los diagramas de ranura y diagrama de devanado.

1.1 DIAGRAMA DE DEVANADO DEL ESTATOR DEL MODELO DEFINITIVO

El diagrama del devanado muestra el número de bobinas por fase, la conexión de las bobinas en cada fase (U, V, W), así como la conexión entre fases. Cada bobina se identifica con un círculo y en el interior de este se indica el número de ranura que ocupa, también muestra la posición que la bobina ocupa dentro de la ranura (UP SLOT/DOWN SLOT). Las bobinas de una misma fase van ocupando la posición superior e inferior de las ranuras alternativamente.

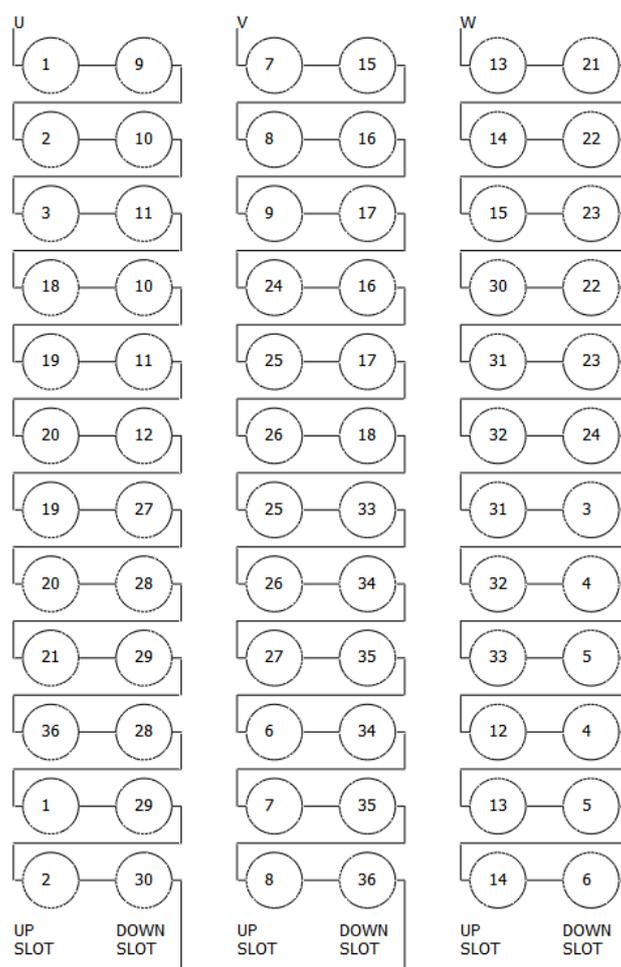


Figura 1.1. Representación de la disposición de las bobinas de las tres fases del motor mediante el diagrama del devanado [Winding Diagram] en JMAG-Express Public del diseño final MB.1.

1.2 DIAGRAMAS DE RANURA DEL ESTATOR DEL MODELO DEFINITIVO

Este diagrama se asemeja al esquema de representación gráfico clásico (esquema rectangular), esta representación permite apreciar fácilmente las conexiones entre las bobinas, y las ranuras en las que se encuentran insertados sus respectivos lados activos. Los lados activos del bobinado se representan por medio de rectas verticales, las cabezas de bobina se dibujan en la parte superior del esquema y las conexiones entre bobinas y los extremos libres del bobinado (principio U, final U' de la fase U) en la parte inferior.

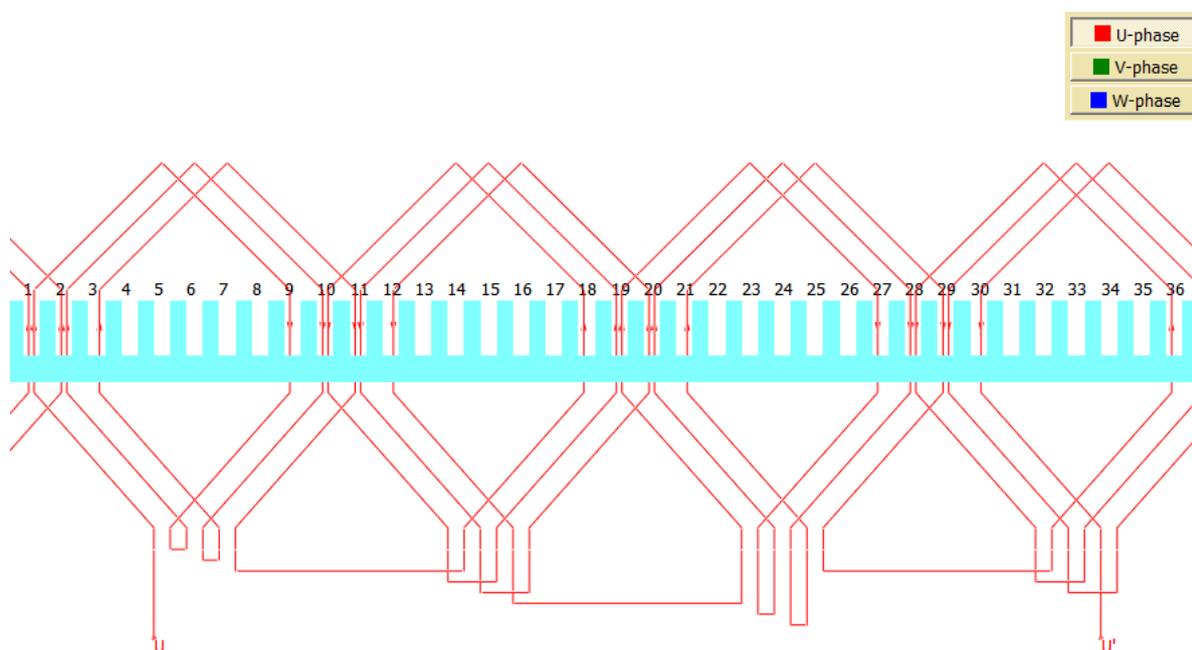


Figura 1.2. Representación de la disposición de las bobinas de la fase U del modelo final MB.1 [Slot Diagram] en JMAG-Express Public. Devanado trifásico imbricado, por polos, $2p = 4$ polos, doble capa, 4 grupos polares por fase, 3 bobinas/polo/fase, 36 ranuras, 3 ranuras/polo/fase, paso de bobina acortado en 1 ranura, 1 rama en paralelo.

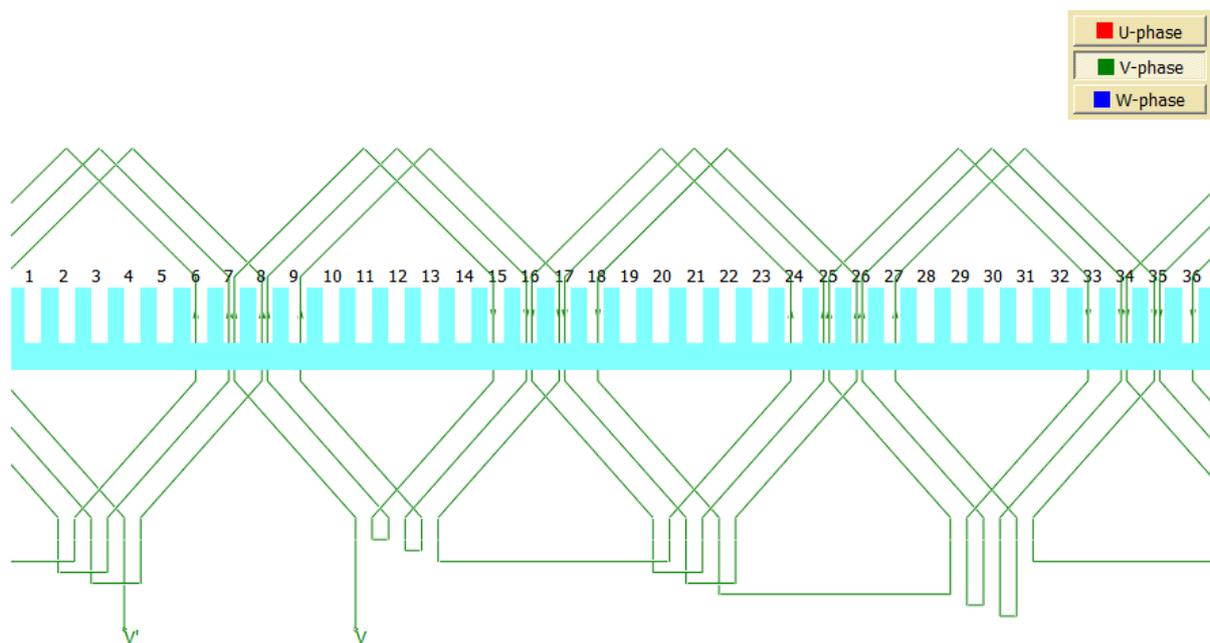


Figura 1.3. Representación de la disposición de las bobinas de la fase V del modelo final MB.1 [Slot Diagram] en JMAG-Express Public.

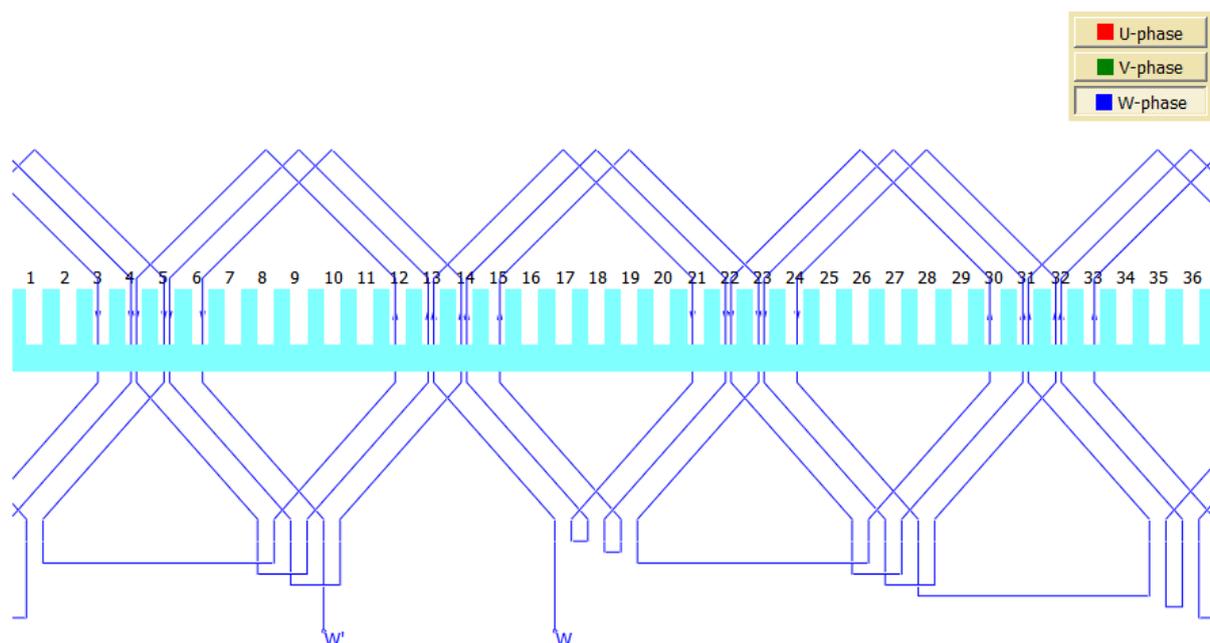


Figura 1.4. Representación de la disposición de las bobinas de la fase W del modelo final MB.1 [Slot Diagram] en JMAG-Express Public.

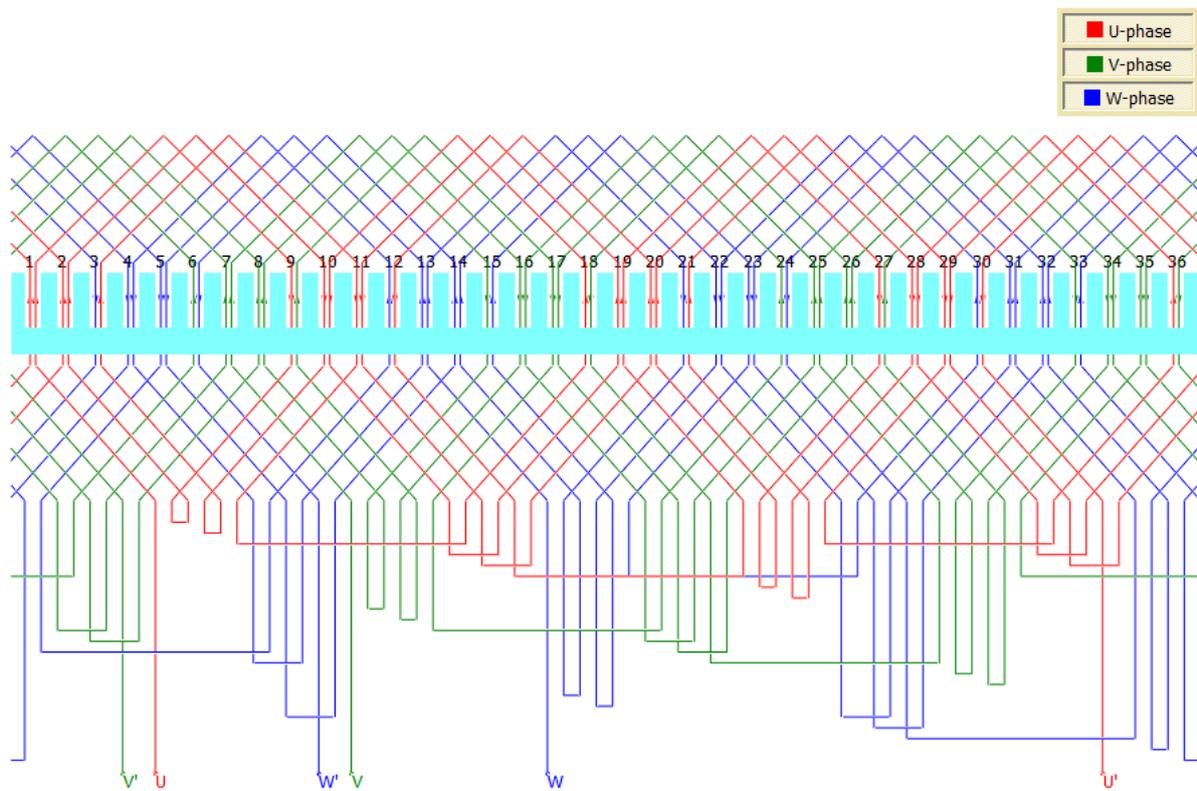
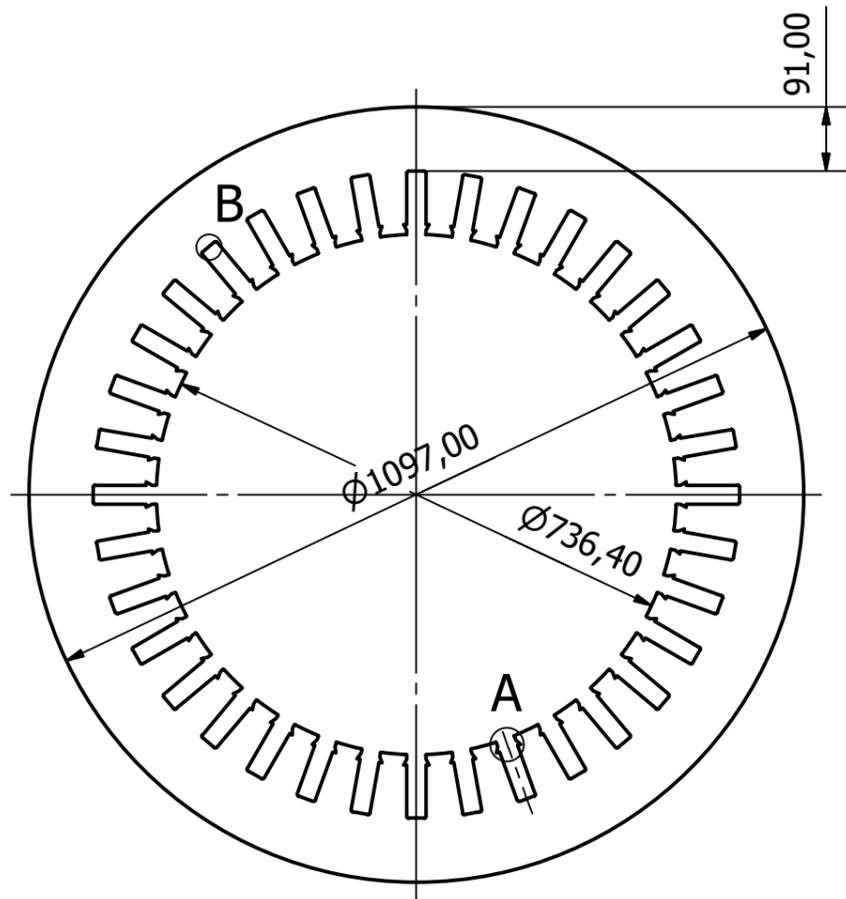


Figura 1.5. Representación de la disposición de las bobinas de las tres fases del modelo final MB.1 [Slot Diagram] en JMAG-Express Public.

2 CHAPAS MAGNÉTICAS DE LOS NÚCLEOS MAGNÉTICOS

2.1 CHAPA MAGNÉTICA DEL NÚCLEO DEL ESTATOR DEL DISEÑO DEFINITIVO

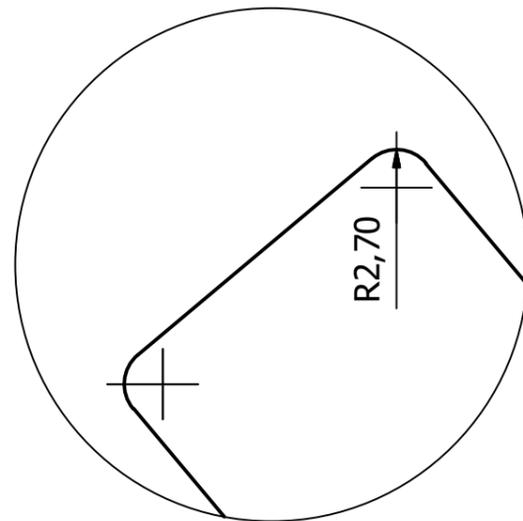
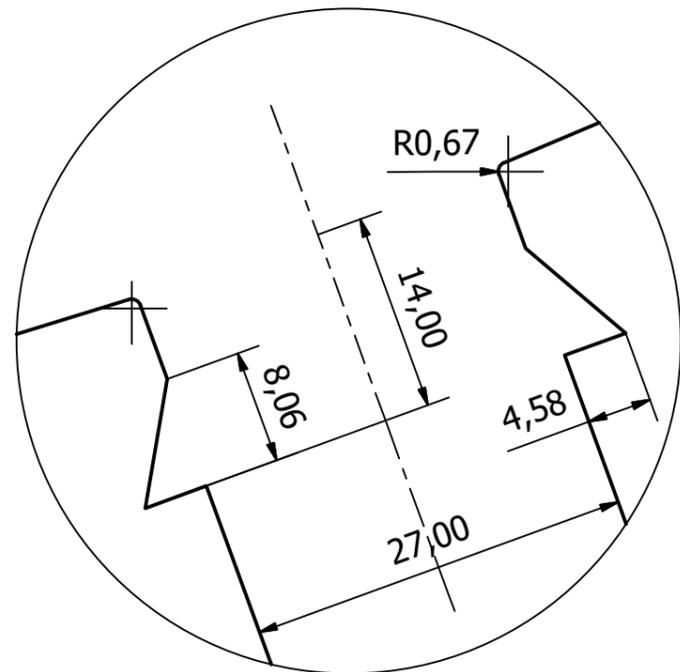
2.2 CHAPA MAGNÉTICA DEL NÚCLEO DEL ROTOR DEL DISEÑO DEFINITIVO



0,50

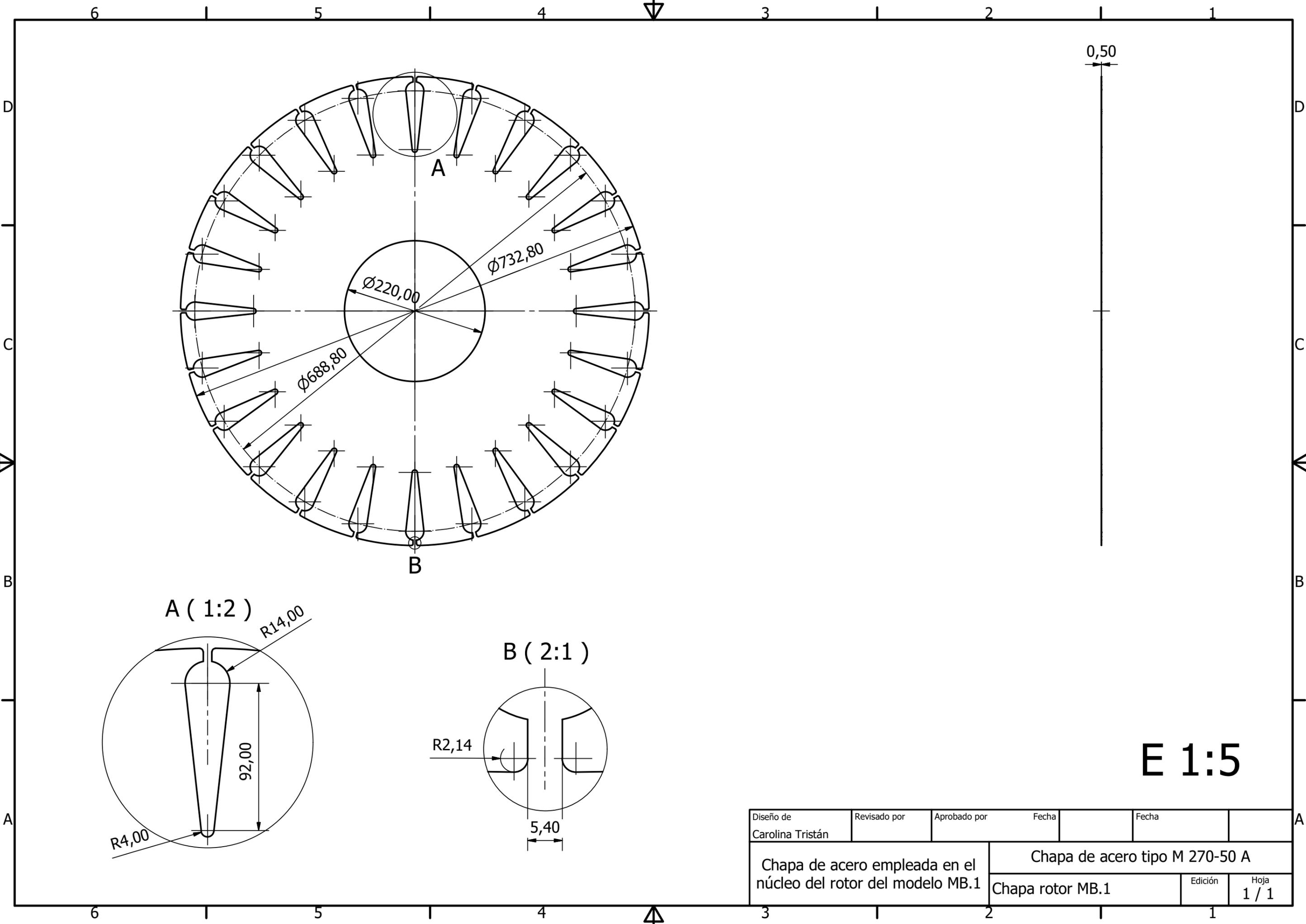
A (2 : 1)

B (2 : 1)



E 1 : 10

Diseño de Carolina Tristán	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha	
Chapa de acero empleada en el núcleo del estator del modelo MB.1			Chapa de acero tipo M 270A		
Estator MB.1			Edición	Hoja 1 / 1	



E 1:5

Diseño de Carolina Tristán	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha	
Chapa de acero empleada en el núcleo del rotor del modelo MB.1			Chapa de acero tipo M 270-50 A		
Chapa rotor MB.1			Edición	Hoja	
			1	1 / 1	

DOCUMENTO 4: PLIEGO DE CONDICIONES

ÍNDICE

1	ESPECIFICACIONES DE LOS MATERIALES Y ELEMENTOS CONSTITUTIVOS DEL OBJETO DEL PROYECTO	339
1.1	CHAPAS MAGNÉTICAS DE LOS NÚCLEOS DEL ESTATOR Y EL ROTOR	339
1.2	CONDUCTORES ELÉCTRICOS DE LOS DEVANADOS.....	344
1.3	PROPIEDADES DE MASA VOLUMEN E INERCIA	344
2	REGLAMENTACIÓN Y NORMATIVA APLICABLES.....	345
3	ASPECTOS LEGALES	345

1 ESPECIFICACIONES DE LOS MATERIALES Y ELEMENTOS CONSTITUTIVOS DEL OBJETO DEL PROYECTO

1.1 CHAPAS MAGNÉTICAS DE LOS NÚCLEOS DEL ESTATOR Y EL ROTOR

En la fabricación de los núcleos magnéticos del estator y el rotor se emplearán chapas de acero al silicio completamente procesadas (FP) de 0,5 mm de espesor (calibre normalizado: Gauge 26).

Grado (EN 10106:1995)	M 270-50 A
Densidad (kg/m ³)	7600
Pérdidas en el hierro máximas (W/kg) 1,5 T / 50 Hz	2,7
Resistividad eléctrica ($\mu\Omega \cdot \text{cm}$)	50
Factor de empilado	0,97

Tabla 1.1. Propiedades de la chapa magnética M 270-50 A. Fuente: Grupo Arcelor Mittal y AK Steels [5].

Se relacionan a continuación, las propiedades de magnetización y pérdidas magnéticas que caracterizan a la chapa M 270-50 A empleada en los núcleos (Grupo Arcelor Mittal [5]):

Curva de magnetización

H (A/m)	J 50 Hz	J100Hz	J200Hz	J400Hz	J700Hz	J1000Hz	J1500Hz
10	0,030	0,031	0,028	0,023	0,019	0,014	0,012
15	0,061	0,060	0,051	0,041	0,032	0,020	0,018
20	0,105	0,100	0,081	0,061	0,046	0,027	0,024
25	0,167	0,153	0,115	0,084	0,061	0,038	0,031
30	0,249	0,218	0,156	0,109	0,079	0,051	0,038
40	0,434	0,363	0,253	0,166	0,117	0,075	0,054
50	0,599	0,500	0,358	0,233	0,159	0,101	0,071
60	0,742	0,632	0,467	0,308	0,209	0,131	0,089
70	0,843	0,745	0,559	0,380	0,260	0,167	0,107
80	0,925	0,846	0,645	0,445	0,312	0,200	0,128
90	0,991	0,924	0,730	0,504	0,358	0,235	0,142
100	1,045	0,991	0,810	0,558	0,401	0,270	0,167
125	1,144	1,104	1,008	0,706	0,511	0,350	0,223
150	1,205	1,174	1,151	0,834	0,608	0,426	0,278
175	1,246	1,224	1,209	0,952	0,702	0,492	0,328
200	1,275	1,258	1,249	1,062	0,789	0,550	0,377
250	1,316	1,305	1,300	1,261	0,940	0,674	0,459
350	1,361	1,354	1,352	1,347	1,192	0,858	0,613
500	1,400	1,395	1,395	1,390	1,383	1,128	0,773
750	1,438	1,434	1,434	1,432	1,426	1,256	0,898
1000	1,465	1,462	1,462	1,460	1,455		
1250	1,486	1,483	1,483	1,482	1,478		
1500	1,506	1,501	1,502	1,500	1,498		
2000	1,537	1,533	1,532	1,531	1,530		
2500	1,562	1,558	1,558	1,558	1,556		
5000	1,655	1,652	1,653	1,652			
7500	1,721	1,717	1,718				
10000	1,771						

Tabla 1.2. Valores de la curva de magnetización de la chapa magnética M 270-50 A a distintas frecuencias.

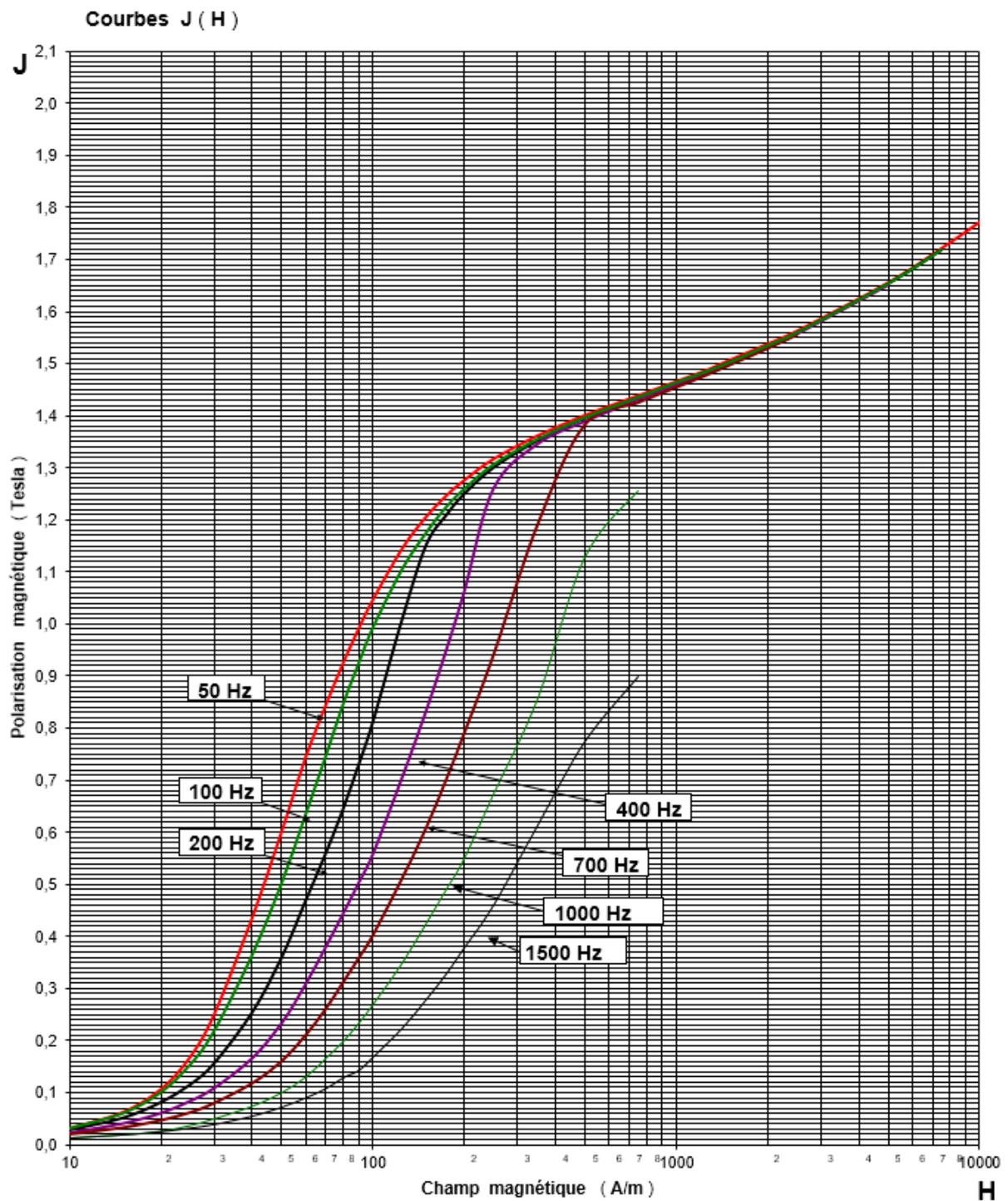


Figura 1.1. Curva de magnetización de la chapa magnética M 270-50 A a distintas frecuencias.

Curva de pérdidas en el hierro

	J(T)	50 Hz	100 Hz	200 Hz	400 Hz	700 Hz	1000 Hz	1500 Hz
Qualité 270 - 50	0,10	0,019	0,046	0,122	0,347	0,858	1,72	3,070
	0,15	0,041	0,100	0,264	0,759	1,83	3,15	6,390
Bobine E 77215 AT	0,20	0,070	0,169	0,450	1,30	3,09	5,36	10,54
	0,25	0,104	0,254	0,682	1,94	4,63	7,55	14,96
	0,30	0,142	0,351	0,940	2,67	6,36	11,18	21,92
	0,35	0,185	0,460	1,24	3,53	8,42	14,78	28,6
	0,40	0,232	0,582	1,58	4,51	10,71	18,88	36,0
	0,50	0,337	0,863	2,36	6,81	16,3	29,10	55,3
ST CHELY Le 31-08-04	0,60	0,456	1,19	3,29	9,54	23,2	40,30	79,2
	0,70	0,590	1,56	4,39	12,9	31,5	56,50	108,7
	0,80	0,739	1,99	5,61	16,7	41,3	74,80	142,1
	0,90	0,903	2,46	7,03	21,2	52,9	94,50	182,6
	1,00	1,09	2,96	8,60	26,3	66,6	120,8	
	1,10	1,29	3,53	10,29	32,0	82,4	146,3	
	1,20	1,53	4,18	12,3	38,5	101,0	183,5	
	1,30	1,85	4,96	14,5	46,0	123		
	1,40	2,20	5,96	17,3	55,1	149		
	1,50	2,66	7,25	21,0	66,3	179		
1,60	3,13	8,60	25,0	79,9				
1,70	3,56	10,13	29,9	97,0				
1,75								
1,80								

Tabla 1.3. Valores de la curva de pérdidas en el hierro de la chapa magnética M 270-50 A a distintas frecuencias.

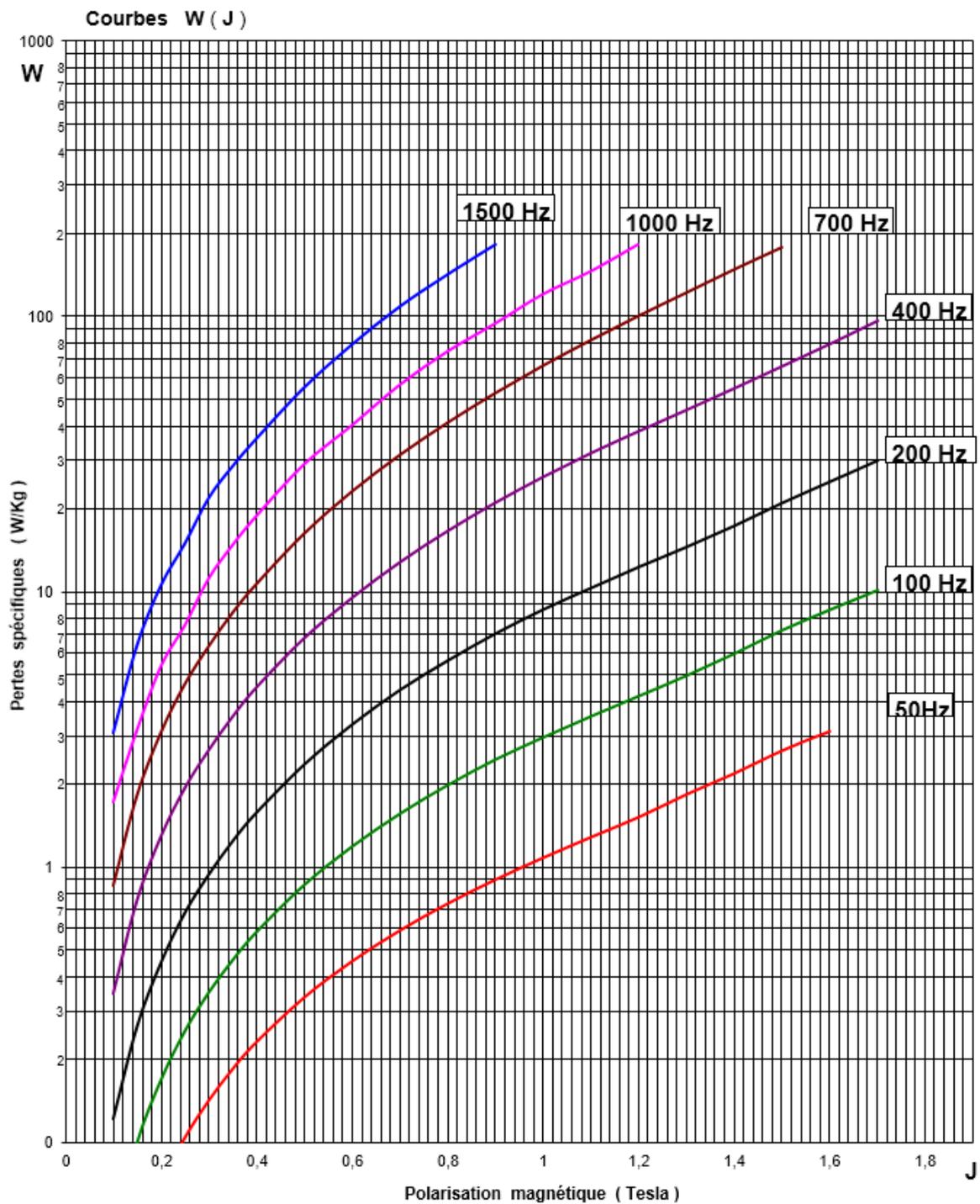


Figura 1.2. Curva de pérdidas en el hierro de la chapa magnética M 270-50 A a distintas frecuencias.

1.2 CONDUCTORES ELÉCTRICOS DE LOS DEVANADOS

El material que ha de emplearse en los arrollamientos del estator y jaula del rotor es cobre, se resumen a continuación sus propiedades extraídas de JMAG-Express Public:

Densidad (kg/m ³)	8960
Coeficiente aparente de temperatura a 20 °C (ppm/°C) ⁴⁵	3810
Conductividad eléctrica a 20 °C (S/m)	6,45e+07

Tabla 1.4. Propiedades del cobre.

1.3 PROPIEDADES DE MASA VOLUMEN E INERCIA

La solución adoptada presenta las siguientes propiedades de masa, volumen e inercia:

Total	Masa total, kg	6194
	Volumen total, mm ³	7,922e+08
Estator	Masa del núcleo, kg	2851
	Volumen del núcleo, mm ³	3,751e+08
	Masa de los devanados, kg	760,4
	Volumen de los devanados, mm ³	8,487e+07
	Masa total (so_006), kg	3611
Rotor	Masa de la jaula, kg	379,5
	Volumen de la jaula, mm ³	4,236e+07
	Masa del núcleo, kg	2203
	Volumen del núcleo, mm ³	2,899e+08
	Masa total (rim_002), kg	2583
Inercia (kg · m ²)	Jaula	40,97
	Núcleo del rotor	149,8
	Total	190,7

Tabla 1.5. Propiedades de masa, volumen e inercia del modelo MB.1.

⁴⁵ Pendiente o cambio fraccional en la resistividad por unidad de cambio en la temperatura

2 REGLAMENTACIÓN Y NORMATIVA APLICABLES

Las recomendaciones y normas de necesaria aplicación en el diseño del motor son las siguientes:

- UNE-EN 60034-1: Máquinas eléctricas rotativas. Parte 1: Características asignadas y características de funcionamiento.
- UNE 60034-2: Máquinas eléctricas rotativas. Parte 2: Métodos para la determinación de las pérdidas y del rendimiento de las máquinas eléctricas rotativas a partir de los ensayos (excepto las máquinas para vehículos de tracción).
- UNE-EN 60034-12: Máquinas eléctricas rotativas. Parte 12: Características de arranque de los motores trifásicos de inducción de jaula con una sola velocidad.
- UNE-EN 60085: Aislamiento eléctrico. Evaluación y designación térmica.

3 ASPECTOS LEGALES

Los aspectos legales a considerar en el presente proyecto consisten en:

- Real Decreto Legislativo 1/1996, de 12 de abril, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Propiedad Intelectual, regularizando, aclarando y armonizando las disposiciones legales vigentes sobre la materia.
- Normativa de la UC sobre Trabajos Fin de Grado
- Ley Orgánica 15/1999, de 13 de diciembre, de Protección de Datos de Carácter Personal.

DOCUMENTO 5: PRESUPUESTO

ÍNDICE

1	ESTADO DE MEDICIONES Y PRESUPUESTOS PARCIALES.....	348
1.1	CAPITULO I: MANO DE OBRA.....	348
1.2	CAPÍTULO II: RECURSOS INFORMÁTICOS.....	349
2	PRESUPUESTO GENERAL.....	350

1 ESTADO DE MEDICIONES Y PRESUPUESTOS PARCIALES

1.1 CAPITULO I: MANO DE OBRA

La duración del proyecto ha sido de 7 meses con una dedicación de 5 horas diarias, 5 días a la semana, un total de 700 horas.

La tarifa del proyectista (graduado) se estima en 1.800 €/mes x 14 pagas/año = 25.200 €/año; 240 días/año x 8h/día =1920 h/año; 25.200 €/año ÷ 1920 h/año = **13 €/h**.

Código	Descripción de partida	Unidad	Medición	Precio Unitario	Importe
01.01	Graduado Ingeniería en Tecnologías Industriales: Investigación y acopio de recursos necesarios en el desarrollo del proyecto	h	110,00	13,00	1.430,00 €
01.02	Graduado Ingeniería en Tecnologías Industriales: Diseño y cálculo analítico de modelos	h	200,00	13,00	2.600,00 €
01.03	Graduado Ingeniería en Tecnologías Industriales: Diseño y optimización de los modelos mediante simulación en computador	h	220,00	13,00	2.860,00 €
01.04	Graduado Ingeniería en Tecnologías Industriales: Confección de planos de los modelos	h	8,00	13,00	104,00 €
01.05	Graduado Ingeniería en Tecnologías Industriales: Redacción del proyecto	h	162,00	13,00	2.106,00 €
Total CAPÍTULO I:					9.100,00 €

El presupuesto del capítulo Mano de obra asciende a la cantidad de NUEVE MIL CIEN euros.

1.2 CAPÍTULO II: RECURSOS INFORMÁTICOS

Los recursos informáticos utilizados en el desarrollo del proyecto han consistido en un ordenador e impresora con un coste total de 1500 € y un tiempo de amortización de 4 años, y el software de pago JMAG con un coste de adquisición-mantenimiento de 4000 €/año.

El importe de cada partida se obtiene con la siguiente expresión:

Precio Unitario (€/h) = Coste total ÷ Tiempo de amortización

Coste de amortización (Importe) = Precio Unitario x Tiempo de utilización (Medición)

Código	Descripción de partida	Unidad	Medición	Precio Unitario	Importe
02.01	Ordenador e impresora	h	1680,00	0,04	67,20 €
02.02	Programa JMAG	h	220,00	0,17	37,40 €
Total CAPÍTULO II:					104,60 €

El presupuesto del capítulo Recursos informáticos asciende a un total de CIENTO CUATRO euros con SESENTA céntimos.

2 PRESUPUESTO GENERAL

Capítulo I: Mano de Obra		9.100,00 €
Capítulo II: Recursos Informáticos		104,60 €
Presupuesto de Ejecución de Material		<u>9.204,60 €</u>
Beneficio Industrial	13%	1.196,60 €
Subtotal del proyecto		<u>10.401,20 €</u>
I.V.A.	21%	2.184,25 €
Total Presupuesto		<u>12.585,45 €</u>

El presente presupuesto asciende a la cantidad de DOCE MIL QUINIENTOS OCHENTA Y CINCO euros con CUARENTA Y CINCO céntimos.

En Santander, a 13 de enero del 2016

Carolina Tristán Teja

Graduada en Ingeniería en Tecnologías Industriales