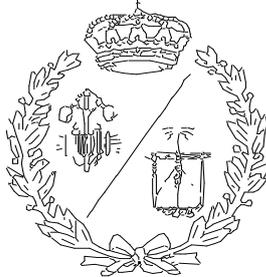


ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Proyecto Fin de Máster

**DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DE UN MOTOR
ASÍNCRONO TRIFÁSICO BIPOLAR MEDIANTE
LA HERRAMIENTA INFORMÁTICA JMAG-
DESIGNER**

**(Design and optimization of a three-phase two-
pole asynchronous motor using the software
JMAG-Designer)**

Para acceder al Título de

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN
INGENIERIA INDUSTRIAL**

Autor: Héctor Fernández Rebolleda

Octubre - 2018

ÍNDICE GENERAL

DOCUMENTO N°1: MEMORIA.....	3
DOCUMENTO N°2: ANEXOS.....	62
DOCUMENTO N°3: PLANOS	127
DOCUMENTO N°4: PRESUPUESTO.....	132

DOCUMENTO N°1: MEMORIA

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1 FICHA DE DATOS GENERALES	9
2 OBJETO DEL PROYECTO	9
3 ALCANCE DEL PROYECTO	9
4 ANTECEDENTES	10
4.1 MOTOR DE INDUCCIÓN DE JAULA DE ARDILLA	10
4.1.1 Aspectos constructivos y principio de funcionamiento.....	10
4.1.2 Curva de Par-Velocidad.....	11
5 APLICACIONES INDUSTRIALES.....	12
5.1 RELEVANCIA	12
5.2 CLASIFICACIÓN	13
5.2.1 Según el ambiente de trabajo	13
5.2.2 Según sus características de funcionamiento	13
5.2.3 Según el tipo de servicio	14
6 PROGRAMAS INFORMÁTICOS	16
6.1 JMAG-DESIGNER	16
6.1.1 JMAG-Express.....	16
7 NORMAS Y REFERENCIAS.....	16
7.1 DISPOSICIÓN LEGAL.....	16
7.1.1 Normas UNE.....	16
7.2 BIBLIOGRAFÍA.....	17
8 DEFINICIONES Y ABREVIATURAS.....	17
9 PLANTEAMIENTO. MODELO INICIAL	19
9.1 ESPECIFICACIONES BASE	19
9.2 ESTUDIOS	19
9.3 MODELO INICIAL.....	20
9.3.1 Corriente absorbida	21
9.3.2 Par.....	22
9.3.3 Pérdidas Joule	22

9.3.4	Distribución de densidad de flujo magnético	23
9.3.5	Sondas de densidad de flujo magnético.....	24
9.3.6	Pérdidas en el hierro.....	25
9.3.7	Curvas en Excel.....	27
9.4	PARAMETRIZACIÓN GEOMÉTRICA.....	30
9.4.1	Resultados comparados en Excel.....	31
9.4.2	Aumento del diámetro.....	31
9.4.3	Acercamiento de las barras del rotor	31
9.4.4	Disminución del área de las barras del rotor	32
9.4.5	Aumento del ancho de las ranuras del estator	32
10	OPTIMIZACIÓN. MODELO FINAL.....	32
10.1	OPTIMIZACIÓN DEL ROTOR	32
10.1.1	Gráficas de correlación	32
10.1.2	Correlación de los parámetros geométricos.....	34
10.1.3	Resultados del caso óptimo	36
10.2	OPTIMIZACIÓN DEL ESTATOR	39
10.2.1	Gráficas de correlación	39
10.2.2	Resultados del modelo final.....	41
10.2.3	Geometría del caso final	41
11	RESULTADOS. ANÁLISIS Y COMPARACIÓN.....	43
11.1	MODELO FINAL A 2970 r.p.m.....	43
11.1.1	Sondas de densidad de flujo.....	43
11.1.2	Corriente absorbida	45
11.1.3	Pérdidas	46
11.2	CURVAS EXCEL DEL MODELO FINAL.....	50
11.2.1	Par de salida.....	51
11.2.2	Corriente absorbida	52
11.2.3	Potencia.....	53
11.2.4	Rendimiento	54

11.2.5	Factor de potencia	54
11.3	COMPARACIÓN DE MODELO INICIAL Y FINAL	55
11.3.1	Par.....	55
11.3.2	Corriente.....	56
11.3.3	Potencia útil	56
11.3.4	Potencia absorbida	57
11.3.5	Rendimiento	57
11.3.6	Factor de potencia	58
11.4	MODELO FINAL EN RÉGIMEN NOMINAL.....	58
12	CONCLUSIONES.....	59
13	PRESUPUESTO FINAL	59

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1: LISTA DE NOMENCLATURA.	17
TABLA 2: RESULTADOS A RÉGIMEN NOMINAL DEL MODELO INICIAL. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	20
TABLA 3: RESULTADOS DEL MODELO INICIAL CON VARIACIÓN DE VELOCIDAD. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA) REVISAR LA NOTACIÓN PUNTO O COMA PARA LAS CANTIDADES	27
TABLA 4: RESULTADOS DEL CASO 36, CASO ÓPTIMO. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	36
TABLA 5: RESULTADOS DEL CASO FINAL. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	41
TABLA 6: MEDIDAS EN MILÍMETROS DEL MODELO FINAL. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).....	42
TABLA 7: COMPARACIÓN DE DENSIDADES DE FLUJO. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	44
TABLA 8: DATOS DE FUNCIONAMIENTO DEL MODELO FINAL. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)....	50
TABLA 9: DATOS DE RÉGIMEN NOMINAL DEL MODELO FINAL. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA) ..	58

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: CURVA DE PAR-VELOCIDAD DE UN MOTOR ASÍNCRONO TRIFÁSICO CON UNA TENSIÓN V1 Y FRECUENCIA F1 CONSTANTES. (FUENTE: TEORÍA DE LAS MÁQUINAS ASÍNCRONAS O DE INDUCCIÓN, MIGUEL ÁNGEL RODRÍGUEZ POZUETA)	11
FIGURA 2: CURVA CARACTERÍSTICA SEGÚN LA CLASIFICACIÓN NEMA. (FUENTE: HTTP://WWW.LHP.CO.IN/INDEX_WITHOUT_RIGHT.PHP?FILE=MOTOR_SCHOOL).....	14
FIGURA 3: CORRIENTE ABSORBIDA POR EL DEVANADO DEL ESTATOR. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA MEDIANTE JMAG)	21
FIGURA 4: CONTENIDO ARMÓNICO DE LA CORRIENTE EN EL DEVANADO DEL ESTATOR. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA MEDIANTE JMAG)	21
FIGURA 5: PAR DE SALIDA. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA MEDIANTE JMAG)	22
FIGURA 6: PÉRDIDAS EN EL COBRE. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA MEDIANTE JMAG)	22
FIGURA 7: DISTRIBUCIÓN DE DENSIDAD DE FLUJO EN EL MOTOR. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA MEDIANTE JMAG).....	23
FIGURA 8: POSICIÓN DE LAS SONDAS DE DENSIDAD DE FLUJO. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA MEDIANTE JMAG).....	24
FIGURA 9: VALORES DE DENSIDAD DE FLUJO EN EL MOTOR. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA MEDIANTE JMAG).....	24
FIGURA 10: DISTRIBUCIÓN DE PÉRDIDAS EN EL HIERRO DEL MODELO INICIAL. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA MEDIANTE JMAG)	25
FIGURA 11: DISTRIBUCIÓN DE PÉRDIDAS DE HISTÉRESIS EN EL MODELO INICIAL. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA MEDIANTE JMAG)	26
FIGURA 12: DISTRIBUCIÓN DE PÉRDIDAS POR CORRIENTES PARÁSITAS EN EL MODELO INICIAL. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA MEDIANTE JMAG)	26
FIGURA 13: CURVA PAR-VELOCIDAD DEL MODELO INICIAL. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	28
FIGURA 14: CURVA DE CORRIENTE-VELOCIDAD DEL MODELO INICIAL. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	28
FIGURA 15: POTENCIAS-VELOCIDAD DEL MODELO INICIAL. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	29
FIGURA 16: RENDIMIENTO-VELOCIDAD DEL MODELO INICIAL. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA) .	29
FIGURA 17: FACTOR DE POTENCIA-VELOCIDAD DEL MODELO INICIAL. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	30
FIGURA 18: COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE LOS CASOS PARAMÉTRICOS. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	31
FIGURA 19: GRÁFICA DE CORRELACIÓN ENTRE PAR DE SALIDA Y CORRIENTE ABSORBIDA. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	33

FIGURA 20: GRÁFICA DE CORRELACIÓN ENTRE EFICIENCIA Y CORRIENTE ABSORBIDA. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	34
FIGURA 21: 1. GRÁFICA DE CALOR PARA LA EFICIENCIA. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	34
FIGURA 22: 1. GRÁFICA DE CALOR PARA EL PAR DE SALIDA. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)...	35
FIGURA 23: 1. GRÁFICA DE CALOR PARA LA CORRIENTE ABSORBIDA. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	35
FIGURA 24: 2. GRÁFICA DE CALOR PARA LA EFICIENCIA. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	35
FIGURA 25: GRÁFICA DE CALOR PARA EL PAR DE SALIDA. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	35
FIGURA 26: GRÁFICA DE CALOR PARA LA CORRIENTE ABSORBIDA. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	36
FIGURA 27: DISTRIBUCIÓN DE LA DENSIDAD DE FLUJO MAGNÉTICO EN EL MOTOR OPTIMIZADO. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA MEDIANTE JMAG)	37
FIGURA 28: VALORES DE DENSIDAD DE FLUJO EN EL MOTOR OPTIMIZADO. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA MEDIANTE JMAG)	38
FIGURA 29: MENSAJE DE OPTIMIZACIÓN. (FUENTE: JMAG)	39
FIGURA 30: GRÁFICA DE CORRELACIÓN ENTRE EL PRODUCTO DE EFICIENCIA Y EL ANCHO DE LAS RANURAS. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA MEDIANTE JMAG)	40
FIGURA 31: GRÁFICA DE CORRELACIÓN ENTRE EL PRODUCTO DE EFICIENCIA Y LA PROFUNDIDAD DE LAS RANURAS. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA MEDIANTE JMAG)	40
FIGURA 32: GEOMETRÍA DEL MODELO FINAL. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA MEDIANTE JMAG)	42
FIGURA 33: DISTRIBUCIÓN DE DENSIDAD DE FLUJO MAGNÉTICO DEL MODELO FINAL. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA MEDIANTE JMAG)	43
FIGURA 34: DENSIDADES DE FLUJO EN EL MODELO FINAL. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA MEDIANTE JMAG)	44
FIGURA 35: FORMA DE ONDA DE LA CORRIENTE DE FASE DEL MODELO OPTIMIZADO. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA MEDIANTE JMAG)	45
FIGURA 36: CONTENIDO ARMÓNICO DE LA CORRIENTE DEL MODELO FINAL. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA MEDIANTE JMAG)	46
FIGURA 37: PÉRDIDAS JOULE DEL MODELO FINAL. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA MEDIANTE JMAG)	46
FIGURA 38: PÉRDIDAS POR CORRIENTES DE EDDY DEL MODELO FINAL. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA MEDIANTE JMAG)	47
FIGURA 39: PÉRDIDAS DE HISTÉRESIS DEL MODELO FINAL. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA MEDIANTE JMAG)	47
FIGURA 40: DENSIDAD DE PÉRDIDAS EN EL HIERRO DEL MODELO FINAL. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA MEDIANTE JMAG)	48

FIGURA 41: DENSIDAD DE PÉRDIDAS DE HISTÉRESIS DEL MODELO FINAL. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA MEDIANTE JMAG)	49
FIGURA 42: DENSIDAD DE PÉRDIDAS DE EDDY DEL MODELO FINAL. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA MEDIANTE JMAG)	49
FIGURA 43: CURVA PAR-VELOCIDAD DEL MODELO FINAL. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	51
FIGURA 44: CURVA CORRIENTE-VELOCIDAD DEL MODELO FINAL. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	52
FIGURA 45: CURVAS DE POTENCIA-VELOCIDAD DEL MODELO FINAL. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	53
FIGURA 46: CURVA DE RENDIMIENTO-VELOCIDAD DEL MODELO FINAL. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	54
FIGURA 47: CURVA DE FACTOR DE POTENCIA-VELOCIDAD DEL MODELO FINAL. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	54
FIGURA 48: CURVAS DE PAR. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	55
FIGURA 49: CURVAS DE CORRIENTE. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	56
FIGURA 50: CURVAS DE POTENCIA ÚTIL. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	56
FIGURA 51: CURVAS DE POTENCIA ABSORBIDA. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	57
FIGURA 52: CURVAS DE RENDIMIENTO. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	57
FIGURA 53: CURVAS DE FACTOR DE POTENCIA. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	58

1 FICHA DE DATOS GENERALES

TÍTULO	DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DE UN MOTOR ASÍNCRONO TRIFÁSICO BIPOLAR MEDIANTE LA HERRAMIENTA INFORMÁTICA JMAG-DESIGNER		
AUTOR	HÉCTOR FERNÁNDEZ REBOLLEDA		
DIRECTOR/PONENTE	LUIS FERNANDO MANTILLA PEÑALBA		
TITULACIÓN	MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL	FECHA	OCTUBRE, 2018

2 OBJETO DEL PROYECTO

El proyecto técnico que se presenta utiliza el software profesional JMAG-Designer con el propósito del estudio y optimización de un motor asíncrono trifásico bipolar de 110kW, de diseño propio. Se pretende mejorar las características de funcionamiento de dicho motor partiendo de un modelo inicial hasta definir un modelo final, así como mostrar el amplio abanico de posibilidades que ofrece la herramienta informática y su utilidad en la industria tanto para el diseño de nuevas máquinas, como para la resolución de problemas y mejoras de las máquinas existentes.

A propósito de lo anterior se usarán las licencias adquiridas para el uso del software profesional JMAG-Designer, del grupo GAIME del Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética de la Universidad de Cantabria.

3 ALCANCE DEL PROYECTO

En el proyecto técnico se desarrollan los siguientes apartados:

- Dimensionado y caracterización del motor.
- Análisis del entorno JMAG-Designer.
- Características del estudio transitorio electromagnético.
- Variación de parámetros geométricos, estudio de su influencia en la máquina.
- Optimización.

4 ANTECEDENTES

4.1 MOTOR DE INDUCCIÓN DE JAULA DE ARDILLA

4.1.1 Aspectos constructivos y principio de funcionamiento

Está formado por dos partes claramente distinguidas, de forma similar a otras máquinas rotatorias; el rotor y el estator.

En el estator se alojan los devanados que forman las bobinas de cada fase, alimentadas por una fuente trifásica de tensión. El núcleo del estator es de acero ferromagnético laminado, a través del cual se genera un campo magnético rotatorio de acuerdo a la corriente absorbida y la frecuencia de la fuente eléctrica (en España, la frecuencia de la red es de 50Hz). Dicho campo magnético rotatorio, atraviesa el entrehierro (zona de aire que separa el estator y el rotor donde se almacena la energía magnética, y que propicia la transformación de energía), y llega hasta el rotor.

El rotor también suele estar formado por laminaciones de acero ferromagnético, con ranuras donde se construyen las barras de cobre o aluminio, formando el 'devanado' secundario. Dichas barras suelen fundirse directamente sobre el núcleo de acero, de forma que ocupan todo el espacio de las ranuras. Dichas barras se cortocircuitan a ambos lados del rotor con anillos conductores del mismo material.

Cuando el campo magnético generado por el devanado del estator, o también llamado primario, alcanza las barras, induce en éstas una fuerza electromotriz que mueve el rotor intentando seguir el giro del campo magnético.

Los motores de inducción tienen una velocidad síncrona, esta velocidad es la de la onda de fuerza magnetomotriz que se distribuye casi sinusoidalmente por el entrehierro:

$$n_s = \frac{60 \cdot f_1}{p} \text{ (rpm)}$$

Donde f_1 es la frecuencia de la red eléctrica y p es el número de pares de polos. Por lo tanto, en España un motor de un solo par de polos (número mínimo de polos) tendrá una velocidad síncrona de 3000 rpm, disminuyendo ésta al aumentar el número de polos.

Sin embargo, el motor nunca funcionará a la velocidad de sincronismo, sino ligeramente más despacio en el mejor de los casos. En el caso de que el rotor gire a la velocidad de sincronismo, no habría movimiento relativo entre el campo magnético giratorio y los conductores de rotor donde se inducía una fuerza electromotriz, por lo que dicha f.e.m. desaparecería y desaparecería la corriente en el rotor, y también el par desarrollado por él. Por tanto, la velocidad de sincronismo es el límite teórico de velocidad a la que puede girar el rotor. El girar el rotor siempre a una velocidad inferior que la de sincronismo, su velocidad será asíncrona, de ahí parte de su nombre.

Medimos en tanto por uno la proporción en que la velocidad de funcionamiento del motor se aleja de la de sincronismo, llamándolo deslizamiento:

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

Su valor está comprendido entre 1 y 0. En motores industriales puede estar entre el 3% y el 8% funcionando a plena carga.

4.1.2 Curva de Par-Velocidad

Existen tres zonas de posible funcionamiento dependiendo del deslizamiento del motor. Lo más habitual es que funcione en régimen motor, aunque también pueden funcionar como generador o como freno:

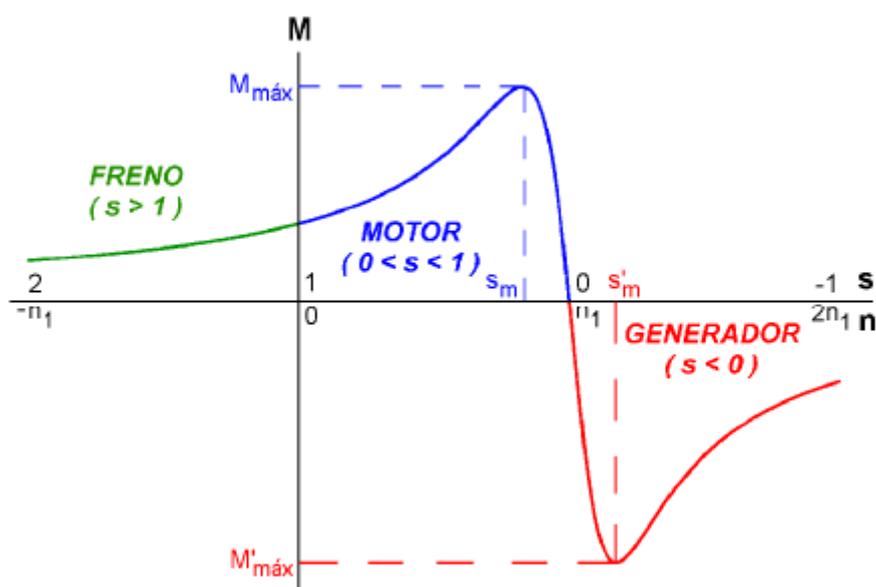


Figura 1: Curva de Par-Velocidad de un motor asíncrono trifásico con una tensión V_1 y frecuencia f_1 constantes. (Fuente: Teoría de las máquinas asíncronas o de inducción, Miguel Ángel Rodríguez Pozueta)

5 APLICACIONES INDUSTRIALES

5.1 RELEVANCIA

Las máquinas de inducción funcionan normalmente como motores, y proveen de la forma más común de impulso para aplicaciones industriales y domésticas. Su popularidad viene entre otras cosas de su construcción simple, lo que los hace más baratos que un motor de corriente continua de la misma potencia. Además, los motores de inducción requieren un mantenimiento prácticamente nulo gracias a la ausencia de elementos como anillos rozantes.

El principal inconveniente que presentan es la elevada corriente de arranque y el factor de potencia para bajas cargas de funcionamiento. Aun así, en la mayoría de las aplicaciones sus ventajas superan con mucho las desventajas.

La velocidad del motor de inducción es prácticamente constante, tradicionalmente se usaban en aplicaciones que requerían velocidad constante de operación, sin embargo, gracias al avance de la tecnología en el área de conversión electrónica de potencia, han pasado a ser ampliamente usados también en aplicaciones que requieren de amplias variaciones de velocidad con la incorporación de dispositivos electrónicos variadores de frecuencia.

Actualmente casi el 80% de los motores eléctricos que se usan son de este tipo. Al final de su vida útil, apenas un 2% del coste total es debido a la compra del mismo, debiéndose el resto principalmente a la energía eléctrica consumida.

Esto nos lleva a señalar dos puntos importantes en el diseño de motores de este tipo. Primero, cuanto menor potencia tienen estos motores, en general mayor es el volumen de ventas, siendo primordial hacer el coste de fabricación mínimo, dejando más de lado la eficiencia eléctrica. Segundo, cuanto mayor potencia desarrollan, más importante se vuelve la eficiencia energética para el comprador, por lo que hacer motores eficientes se vuelve casi una obligación cuando se alcanzan ciertas potencias, aumentando el coste de fabricación.

5.2 CLASIFICACIÓN

5.2.1 Según el ambiente de trabajo

- A prueba de goteo: Protegido contra la entrada de líquidos y partículas que incidan sobre el motor en un ángulo entre cero y quince grados respecto a la vertical. Sistema de refrigeración mediante un ventilador acoplado al eje de rotación.
- A prueba de salpicaduras: Ampliación del ángulo de protección de la clase anterior hasta los cien grados respecto a la vertical. Se suelen emplear en ambientes húmedos.
- Totalmente cerrados sin ventilación: Principalmente para uso en ambientes húmedos y polvorientos. La evacuación del calor se complica, lo que obliga a que su potencia no suela exceder los 10kW.
- Totalmente cerrados enfriados por ventilador: Motores de media y alta potencia encapsulados, incorporan un ventilador en el exterior directamente acoplado al eje de rotación para facilitar la evacuación de calor.
- A prueba de explosión: Diseñados para el uso en ambientes inflamables o explosivos, por ejemplo, minas o refinerías. La carcasa soporta las grandes presiones que se pueden acumular en su interior en caso de explosión interna.

5.2.2 Según sus características de funcionamiento

La NEMA clasifica en 4 clases de acuerdo al deslizamiento, par, y característica de arranque:

- Clase A: Motores de propósito general, muy utilizado en industrias. Pares normales de funcionamiento y un deslizamiento en régimen nominal cercano al 3%. Aplicable para una amplia gama de cargas industriales.
- Clase B: De propósito general en las industrias, al igual que la clase A. Pares de funcionamiento normales y una baja corriente de arranque; además de un deslizamiento a plena carga cercano al 3%. Aplicable a diversos tipos de cargas industriales.
- Clase C: Elevado par de arranque, corriente de arranque reducida y bajo deslizamiento a régimen nominal. Este diseño se usa para mover cargas de alta inercia con un arranque más exigente.

- Clase D: Par de arranque elevado, baja corriente de arranque y elevado deslizamiento en régimen nominal; entre el 5 y el 13%. Muy empleados en aplicaciones como cizallas o troqueles que requieren la aplicación repentina de un alto par.

En la siguiente imagen vemos la comparación de la curva característica de las distintas clases de motor según esta clasificación.

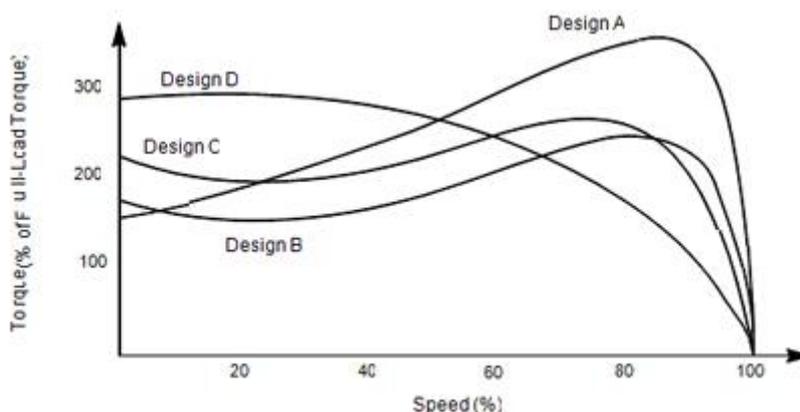


Figura 2: Curva característica según la clasificación NEMA. (Fuente: http://www.lhp.co.in/index_without_right.php?file=motor_school)

5.2.3 Según el tipo de servicio

Un aspecto muy a tener en cuenta de las máquinas eléctricas es el servicio al que se someterán. Esto define los periodos de funcionamiento en vacío, en reposo, y los arranques; considerando también la duración de estos. Se definen diez tipos de servicio en las Normas UNE 20-113-7 y UNE-EN 60034-1:1995. Se caracterizan por la letra S, acompañada del dígito correspondiente entre uno y diez:

- Tipo S1 – Servicio continuo: Define el funcionamiento a carga constante durante el tiempo suficiente para alcanzar el equilibrio térmico.
- Tipo S2 – Servicio temporal: Define el funcionamiento bajo carga constante en un periodo de tiempo determinado, inferior al necesario para alcanzar el equilibrio térmico, seguido de un periodo de reposo suficientemente largo como para que la temperatura descienda hasta ser igual a la del fluido refrigerante con un margen de 2°K.
- Tipo S3 – Servicio intermitente periódico: Define el funcionamiento basado en una sucesión de ciclos de servicio idénticos, cada uno con un periodo de funcionamiento bajo carga constante y un periodo de reposo. En este tipo de servicio la corriente de arranque influye mínimamente en el calentamiento.

-
- Tipo S4 – Servicio intermitente periódico con arranque: Define el funcionamiento que se basa en una sucesión de ciclos de servicio idénticos, cada uno de ellos incluyendo el tiempo de arranque, un periodo de funcionamiento bajo carga constante y un periodo de reposo.
 - Tipo S5 – Servicio intermitente periódico con frenado eléctrico: Define el funcionamiento que consta de una sucesión de ciclos de servicio idénticos, cada uno de ellos incluyendo el tiempo de arranque, un periodo de funcionamiento bajo carga constante, un periodo de frenado eléctrico rápido y un periodo de reposo.
 - Tipo S6 – Servicio ininterrumpido con carga intermitente: Define el funcionamiento basado en una sucesión de ciclos de servicio idénticos, cada uno de ellos incluyendo un periodo de funcionamiento bajo carga constante, y un periodo en vacío. En este tipo de servicio no hay periodos de reposo.
 - Tipo S7 – Servicio ininterrumpido periódico con frenado eléctrico: Define el funcionamiento de una sucesión de ciclos de servicio idénticos, cada uno de ellos incluyendo un periodo de arranque, un periodo de funcionamiento bajo carga constante y otro periodo de frenado eléctrico. En este tipo de servicio tampoco existe periodo de reposo.
 - Tipo S8 – Servicio ininterrumpido periódico con cambios de carga y de velocidad relacionados: Define el funcionamiento basado en una sucesión de ciclos de servicio idénticos, cada uno de ellos incluyendo un periodo de funcionamiento bajo carga constante correspondiente a una velocidad determinada, seguido de uno o varios periodos de funcionamiento similares, pero con otras cargas constantes asociadas a velocidades de giro diferentes. No existe periodo de reposo.
 - Tipo S9 – Servicio con variaciones no periódicas de carga y de velocidad: En este tipo de servicio, la carga y la velocidad presentan en general una variación no periódica dentro del margen de funcionamiento admisible. Este tipo de servicio suele incluir sobrecargas aplicadas que puede ser muy superiores a la plena carga.
 - Tipo S10 – Servicio con cargas constante diferentes: Este tipo de servicio consiste en un máximo de cuatro ciclos para cuatro valores diferentes de carga, cada uno de los cuales se mantiene durante un tiempo suficientemente largo como para que se alcance el equilibrio térmico. La carga máxima en un ciclo de este servicio puede tener un valor nulo, es decir, trabajar en vacío.

6 PROGRAMAS INFORMÁTICOS

6.1 JMAG-DESIGNER

El desarrollo principal de todo el trabajo se va a llevar a cabo sobre la herramienta informática JMAG-Designer, que es uno de los programas más avanzados para estudiar máquinas eléctricas: relés, transformadores, motores, generadores... Su entorno de simulación es amplio y permite modelizar todos los fenómenos que entran en juego en el funcionamiento de dichas máquinas. En el documento de Anexos se detallará en profundidad cómo funciona el programa y cómo se utiliza.

6.1.1 JMAG-Express

Éste es un subprograma derivado de JMAG-Designer, funcionando como asistente para el diseño de motores eléctricos. En este caso de un motor asíncrono trifásico de polos, conectado a baja tensión.

7 NORMAS Y REFERENCIAS

7.1 DISPOSICIÓN LEGAL

7.1.1 Normas UNE

- AENOR. 1997. UNE-EN 60034-7:1997: Clasificación de los tipos de construcción y de las disposiciones de montaje (código IM).
- AENOR. 2003. UNE-EN 60034-5:2003: Clasifica los grados de protección proporcionados por el diseño integral de las máquinas eléctricas rotativas (código IP).
- AENOR. 2009. UNE-EN 50347:2009: Designación de carcasas y bridas de motores de inducción trifásicos de aplicación general con dimensiones y potencias normalizadas.
- AENOR. 2011. UNE-EN 60034-1:2011: Regula las características asignadas y de funcionamiento de máquinas eléctricas rotativas, asegurando la compatibilidad electromagnética y limitando las emisiones de interferencias electromagnéticas generadas.

- AENOR. 2014. UNE-EN 60034-30-1:2014: Máquinas eléctricas rotativas. Parte 30-1: Clases de rendimiento para los motores trifásicos de inducción de jaula de velocidad única (código IE).

7.2 BIBLIOGRAFÍA

- https://www.engineeringtoolbox.com/nema-a-b-c-d-design-d_650.html
- RODRÍGUEZ POZUETA, M. 2015. *Máquinas eléctricas: Máquinas asíncronas y Tablas, fórmulas y gráficas para el cálculo de máquinas asíncronas* [sitio web]. 2015. [Consulta: 16 Julio 2018]. Disponible en: <http://personales.unican.es/rodrigma/primer/publicaciones.htm>
- FRAILE MORA, J. 2003. *Máquinas Eléctricas*. Quinta edición. Madrid, España. McGraw-Hill.
- JMAG. 2017. Manuales de usuario. [documentos pdf]. [Consulta: Julio/Agosto 2018]. Requisitos de acceso: Nombre de usuario y contraseña; necesario poseer licencia de JMAG. Disponible en: <https://www.jmag-international.com/>
- E. S. HAMDI, 1994. *Design of Small Electrical Machines*. Chichester, Nueva York. John Wiley & Sons Ltd.
- J. CATHEY, JIMMIE. 2001. *Electric machines analysis and design applying MATLAB*. Edición internacional. Boston, Massachusetts. McGraw-Hill.

8 DEFINICIONES Y ABREVIATURAS

Tabla 1: Lista de nomenclatura.

ac	Specific electric loading
A_{cs}	Área de cobre en una ranura del estator
a_{cr}	Área de conductor del rotor
A_{er}	Área transversal del anillo de cortocircuito
A_r	Área total ranuras del rotor
a_s	Área de conductor del estator
A_s	Área del cobre en la ranura del estator
A_{ss}	Área de ranura del estator
B_{av}	Densidad media de flujo magnético en el entrehierro

B_{cs}	Densidad de flujo magnético en el núcleo del estator
B_{cr}	Densidad de flujo magnético en el núcleo del rotor
B_{tr}	Densidad de flujo magnético en el diente del rotor
B_{ts}	Densidad de flujo magnético en el diente del estator
C_o	Coefficiente de salida
D	Diámetro interno del estator
d_{cr}	Ancho núcleo del rotor
d_{cs}	Ancho del núcleo del estator
D_{rotor}	Diámetro del rotor
D_s	Diámetro del conductor
E_s	Tensión inducida en el estator
f	Frecuencia de la fuente de alimentación
I_b	Intensidad en la barra del rotor
I_{er}	Intensidad en el anillo de cortocircuito
I_s	Corriente nominal del estator por fase
J	Densidad de corriente
k	Factor de empaquetado
k_c	Factor de ajuste
k_d	Factor de distribución
k_{ws}	Factor de devanado del estator
L	Longitud axial de la máquina
l_g	Longitud de entrehierro
L_i	Longitud axial equivalente de acero
L_{mts}	Longitud media de una vuelta de devanado en el estator
m_s	Número de fases del estator
P	Potencia activa útil
p	Número de polos
Q	Potencia aparente absorbida
q	Número de ranuras del estator por polo y por fase
r_s	Resistencia del devanado del estator por fase
s	Deslizamiento
S_r	Número de ranuras del rotor
S_s	Número de ranuras del estator
T_s	Número de vueltas en serie por fase
V	Tensión de fase de la fuente de alimentación.

W_{tr}	Ancho del diente del rotor
W_{ts}	Ancho del diente del estator
α_u	Paso de ranura en ángulo eléctrico
η	Rendimiento
λ	Factor de potencia
ϕ	Flujo por polo
τ	Paso polar
τ_s	Paso de ranura del estator en el diámetro interno del mismo

9 PLANTEAMIENTO. MODELO INICIAL

9.1 ESPECIFICACIONES BASE

Las dimensiones principales de la máquina son el diámetro interno del estator, y la longitud axial. Éstas se dimensionan en base a parámetros característicos definidos por el diseñador, como por ejemplo la potencia que supuestamente se va a desarrollar en régimen nominal, rendimiento y factor de potencia.

- Potencia nominal: $P = 110kW$
- Frecuencia de la red: $f = 50Hz$
- Tensión de alimentación: $U = 400/230V$
- Velocidad de sincronismo: $n_s = 3000rpm$
- Rendimiento: $\eta = 90\%$
- Factor de potencia/coseno de phi: $\cos\varphi = 0.80$

9.2 ESTUDIOS

El desarrollo principal de proyecto se apoya en estudios electromagnéticos transitorios, sobre los cuales se obtienen las características de funcionamiento del modelo diseñado, es decir, los datos de funcionamiento del modelo de referencia que se pretende mejorar.

Posteriormente, una vez verificada la correspondencia entre el modelo teórico calculado y los resultados de la simulación, se sucederán estudios con el objetivo de determinar la influencia

de determinados parámetros geométricos del motor sobre el funcionamiento de éste, partiendo de una base teórica.

Posteriormente se acotarán las variaciones de los parámetros beneficiosos y se ejecutará una optimización del modelo.

Finalmente se estudiarán los resultados de la optimización y se elaborarán conclusiones sobre el trabajo.

9.3 MODELO INICIAL

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para la velocidad de rotación de 2970 rpm, deslizamiento del 1% a través del estudio en JMAG descrito en el documento de Anexos. Mediante una tabla Excel, se introducen los datos de valores eficaces y medios obtenidos para calcular los parámetros restantes como la potencia útil, la potencia aparente absorbida, el factor de potencia y el rendimiento.

Tabla 2: Resultados a régimen nominal del modelo inicial. (Fuente: Elaboración propia)

Par (N·m)	386
$P_{\text{Útil}}$ (W)	120.052
$P_{\text{Absorbida}}$ (W)	130.104
I_s (A)	288
S (VA)	198.720
λ	0,655
η	0,923
Producto $\eta \cdot \lambda$	0,604
B_{av} (T)	0,845
B_{ts} (T)	1,92
B_{cr} (T)	1,85
B_{cs} (T)	1,71
P_{Joule} (W)	7.265,53

9.3.1 Corriente absorbida

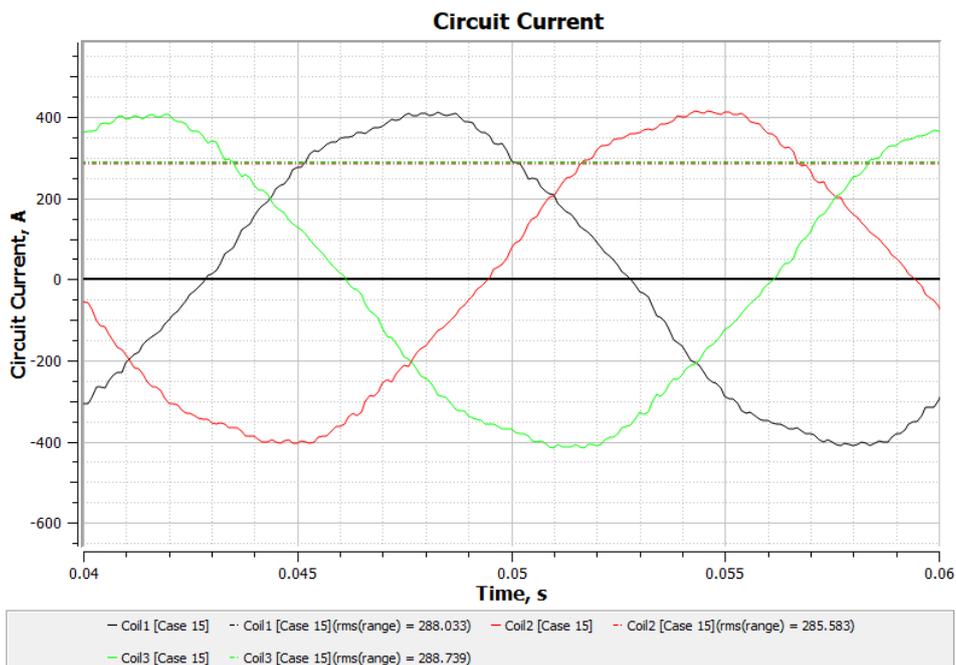


Figura 3: Corriente absorbida por el devanado del estator. (Fuente: Elaboración propia mediante JMAG)

El valor eficaz de la corriente absorbida por fase es de 288 Amperios. Se puede apreciar la existencia de armónicos poco importantes en la forma de onda, lo cual se verifica aplicando una transformada de Fourier.

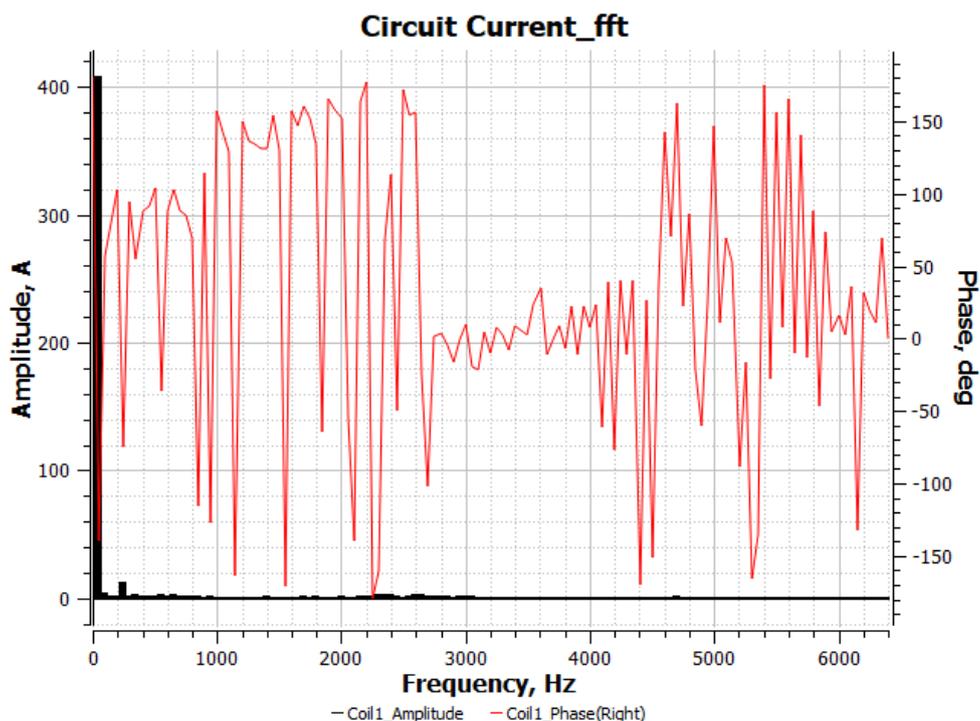


Figura 4: Contenido armónico de la corriente en el devanado del estator. (Fuente: Elaboración propia mediante JMAG)

9.3.2 Par

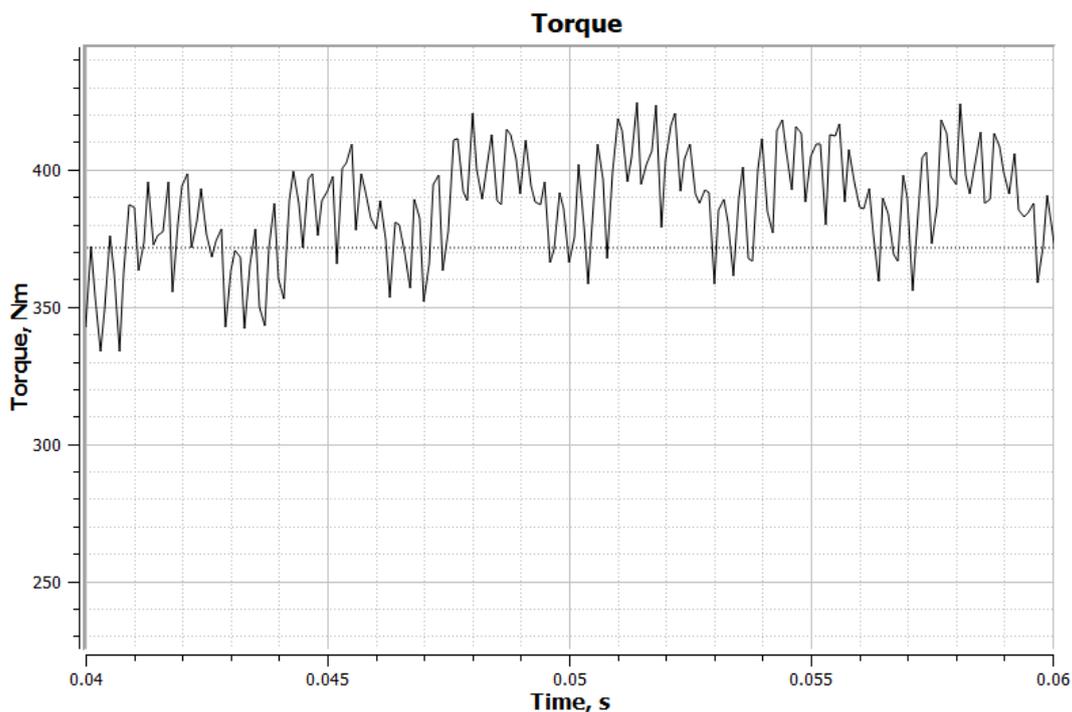


Figura 5: Par de salida. (Fuente: Elaboración propia mediante JMAG)

Se obtiene un par medio de $387 \text{ N} \cdot \text{m}$, de forma que la potencia de salida es la velocidad angular por dicho par.

9.3.3 Pérdidas Joule

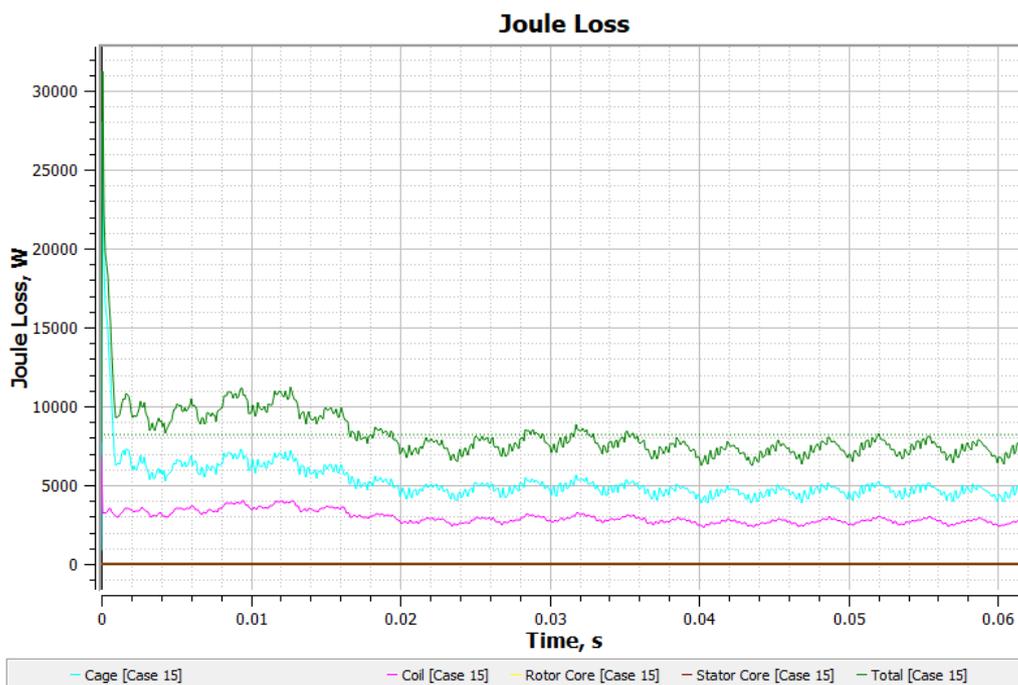


Figura 6: Pérdidas en el cobre. (Fuente: Elaboración propia mediante JMAG)

Estas pérdidas son las que se producen por efecto Joule en los devanados del estator y las barras del rotor.

9.3.4 Distribución de densidad de flujo magnético

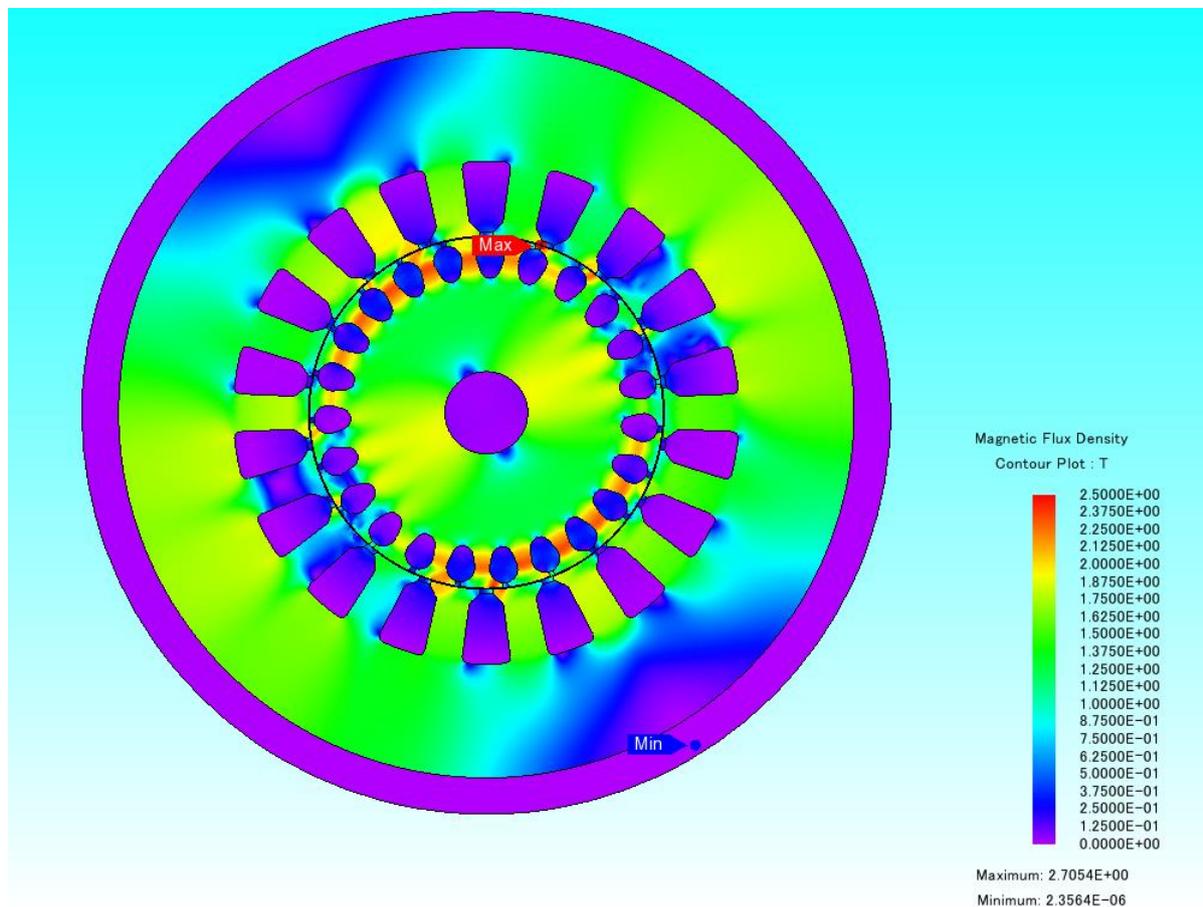


Figura 7: Distribución de densidad de flujo en el motor. (Fuente: Elaboración propia mediante JMAG)

El mapa que se muestra en la parte superior nos permite ver rápidamente el nivel de magnetización de todo el motor, en el que intuimos que en general, los niveles de densidad de flujo que se alcanzan son similares a los del diseño, aunque en los dientes del rotor sí parece saturado.

9.3.5 Sondas de densidad de flujo magnético

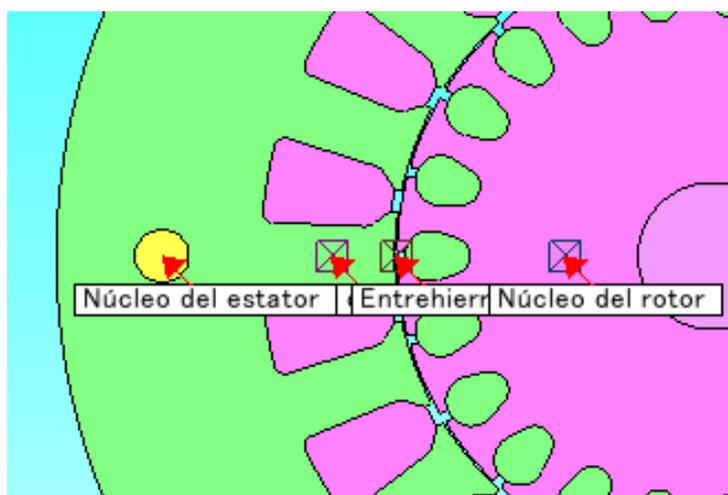


Figura 8: Posición de las sondas de densidad de flujo. (Fuente: Elaboración propia mediante JMAG)

En dichos puntos se obtiene la siguiente forma de onda de la densidad de flujo magnético.

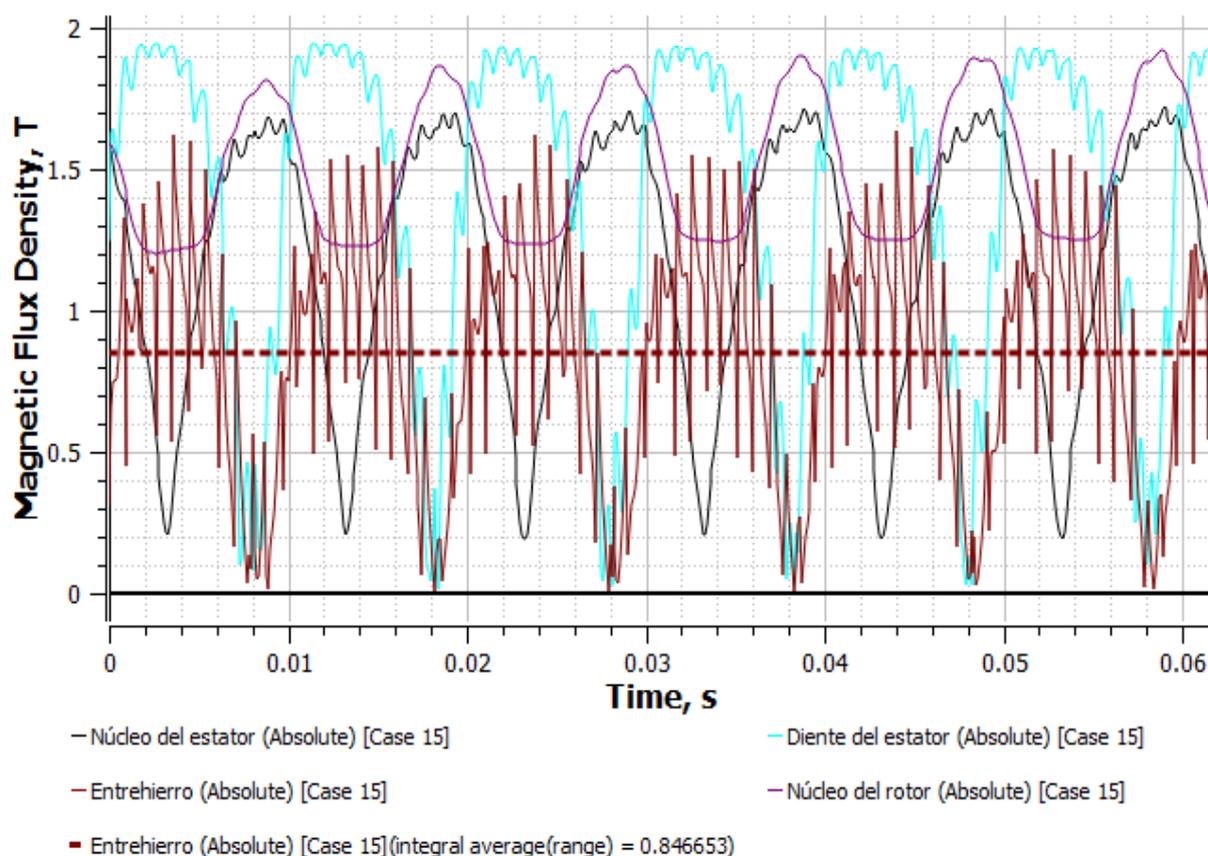


Figura 9: Valores de densidad de flujo en el motor. (Fuente: Elaboración propia mediante JMAG)

En dicho gráfico confirmamos que el valor de $B_{av} = 0.846 T$, siendo el valor de diseño $0.73T$. Tenemos por tanto una mayor energía magnética almacenada en el entrehierro, de ahí que

en lugar de obtener 110kW, se obtengan 120kW de potencia de salida. También influye en ello la corriente de magnetización, que será más elevada que en el caso del diseño teórico, donde el factor de potencia era mayor que el que se ha conseguido. Sin embargo, el valor medio de densidad de flujo en el entrehierro sigue estando en el rango de valores recomendado, siendo este $[0.7T - 0.9T]$.

Por otro lado, en el núcleo del estator se alcanzan valores de casi $B_{CS} = 1.7T$, siendo el valor de diseño $1.5T$. Es más elevado, y por tanto requiere mayor corriente de magnetización, reduciendo el factor de potencia. Por otro lado, también aumenta las pérdidas en el hierro, ya que estas aumentan cuadráticamente con el nivel de magnetización. Ocurre de forma similar con el diente del estator.

En el núcleo del rotor se alcanzan valores de $B_{Cr} = 1.85T$, habiéndose diseñado para alcanzar hasta $2T$ por motivos geométricos, por lo que en este caso el resultado es mejor que el teórico.

9.3.6 Pérdidas en el hierro

A partir del estudio de pérdidas en el hierro se obtienen las siguientes distribuciones de densidad de pérdidas. Las pérdidas del hierro se dividen en pérdidas de corrientes parásitas y de histéresis.

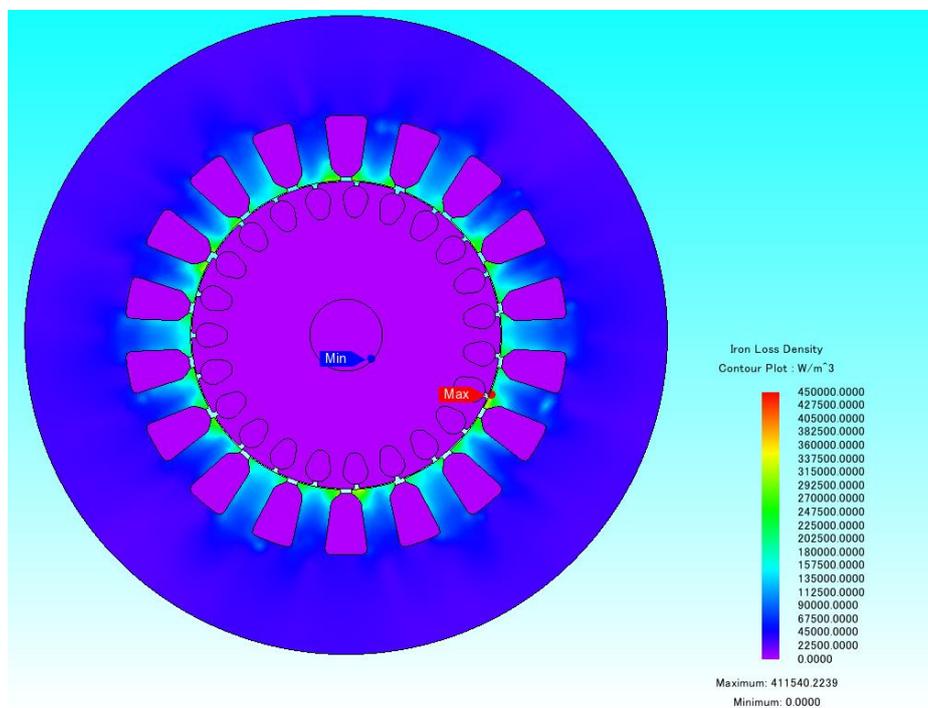


Figura 10: Distribución de pérdidas en el hierro del modelo inicial. (Fuente: Elaboración propia mediante JMAG)

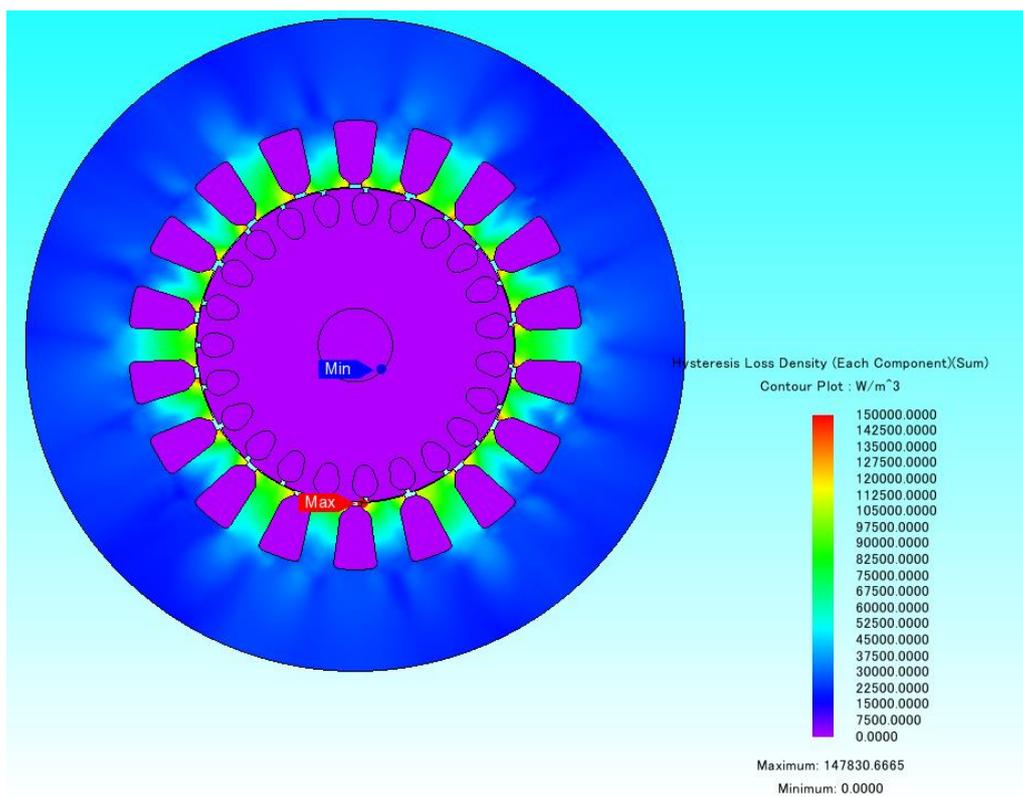


Figura 11: Distribución de pérdidas de histéresis en el modelo inicial. (Fuente: Elaboración propia mediante JMAG)

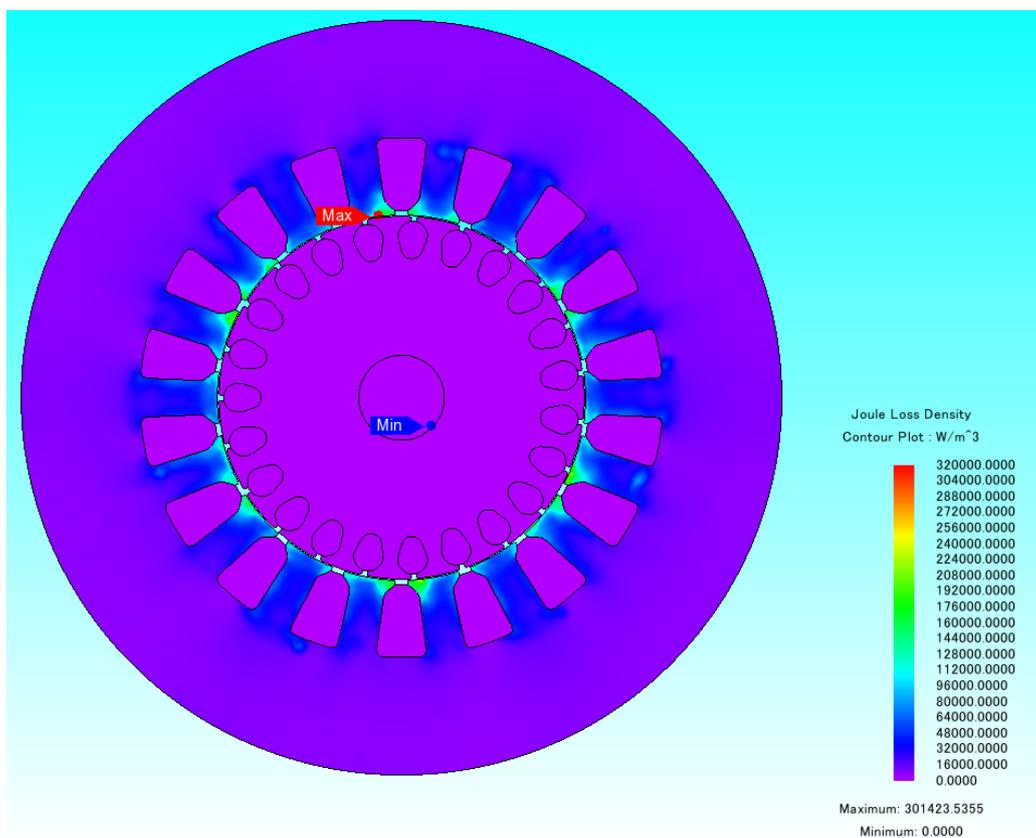


Figura 12: Distribución de pérdidas por corrientes parásitas en el modelo inicial. (Fuente: Elaboración propia mediante JMAG)

Como era de esperar, las mayores pérdidas en el hierro se producen en las zonas del estator con mayores densidades de flujo. Aun así, las pérdidas en el hierro no llegan a los 3kW, siendo menos de la mitad de las pérdidas que se producen por efecto Joule en los conductores.

9.3.7 Curvas en Excel

A partir de la siguiente tabla de datos, extraídos de la parametrización de velocidad, se crean las curvas de funcionamiento.

Tabla 3: Resultados del modelo inicial con variación de velocidad. (Fuente: Elaboración propia)

Velocidad (RPM)	PAR (N·m)	Corriente RMS (A)	Pérdidas Joule (W)	Potencia absorbida (W)	Potencia útil (W)	η (%)	λ
100,00	2.075	4.627	1.225.203	1.444.589	21.725	1,50	0,45
500,00	2.057	4.536	1.166.449	1.464.789	107.697	7,35	0,47
1.000,00	2.301	4.368	1.080.148	1.497.727	240.948	16,09	0,50
1.500,00	2.671	4.116	963.923	1.541.794	419.609	27,22	0,54
1.800,00	2.962	3.870	858.529	1.558.851	558.269	35,81	0,58
2.000,00	3.146	3.637	766.123	1.551.308	658.972	42,48	0,62
2.250,00	3.324	3.233	620.603	1.503.627	783.155	52,08	0,67
2.500,00	3.293	2.623	429.108	1.357.774	862.150	63,50	0,75
2.700,00	2.791	1.867	238.362	1.062.560	789.128	74,27	0,82
2.750,00	2.536	1.624	187.639	945.054	730.278	77,27	0,84
2.800,00	2.203	1.352	137.219	802.946	646.082	80,46	0,86
2.850,00	1.782	1.052	89.003	633.485	531.754	83,94	0,87
2.900,00	1.263	730	46.246	437.088	383.629	87,77	0,87
2.925,00	968	565	28.647	330.231	296.596	89,81	0,85
2.970,00	387	288	7.242	130.109	120.405	92,54	0,65
2.985,00	193	223	3.898	66.366	60.349	90,93	0,43

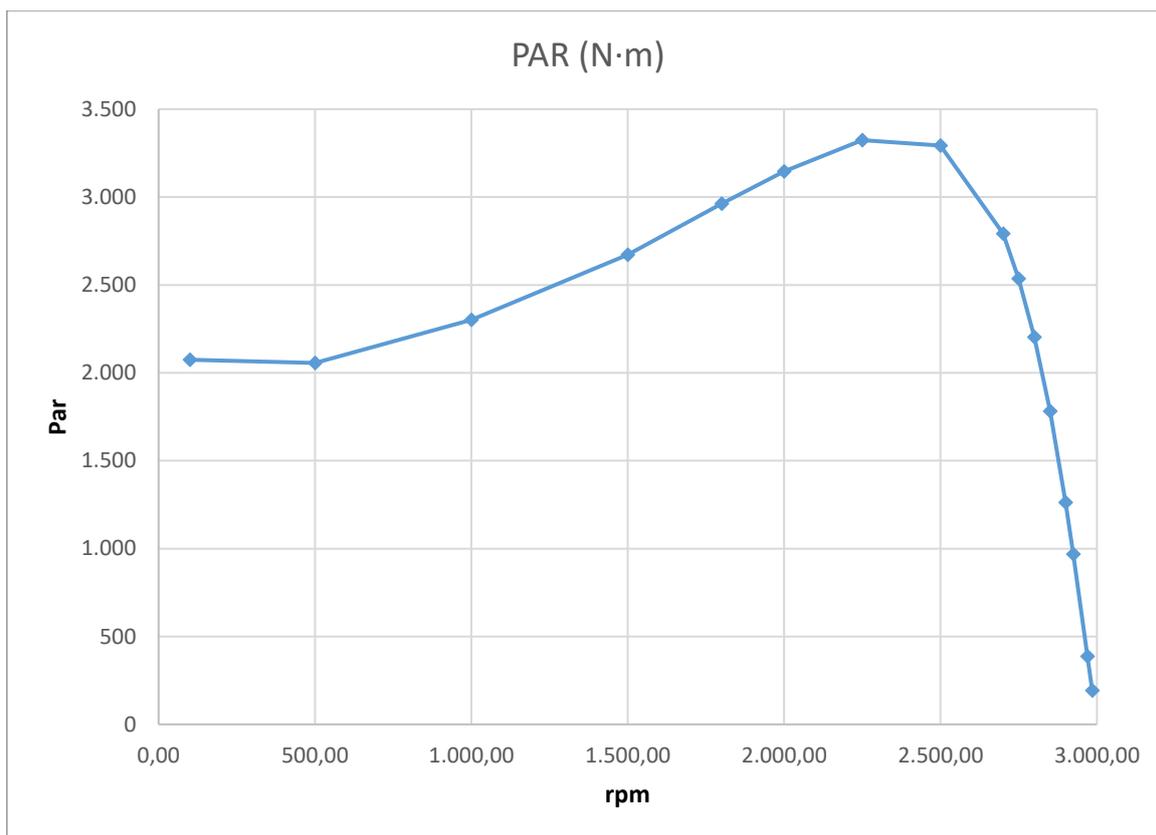


Figura 13: Curva Par-Velocidad del modelo inicial. (Fuente: Elaboración propia)

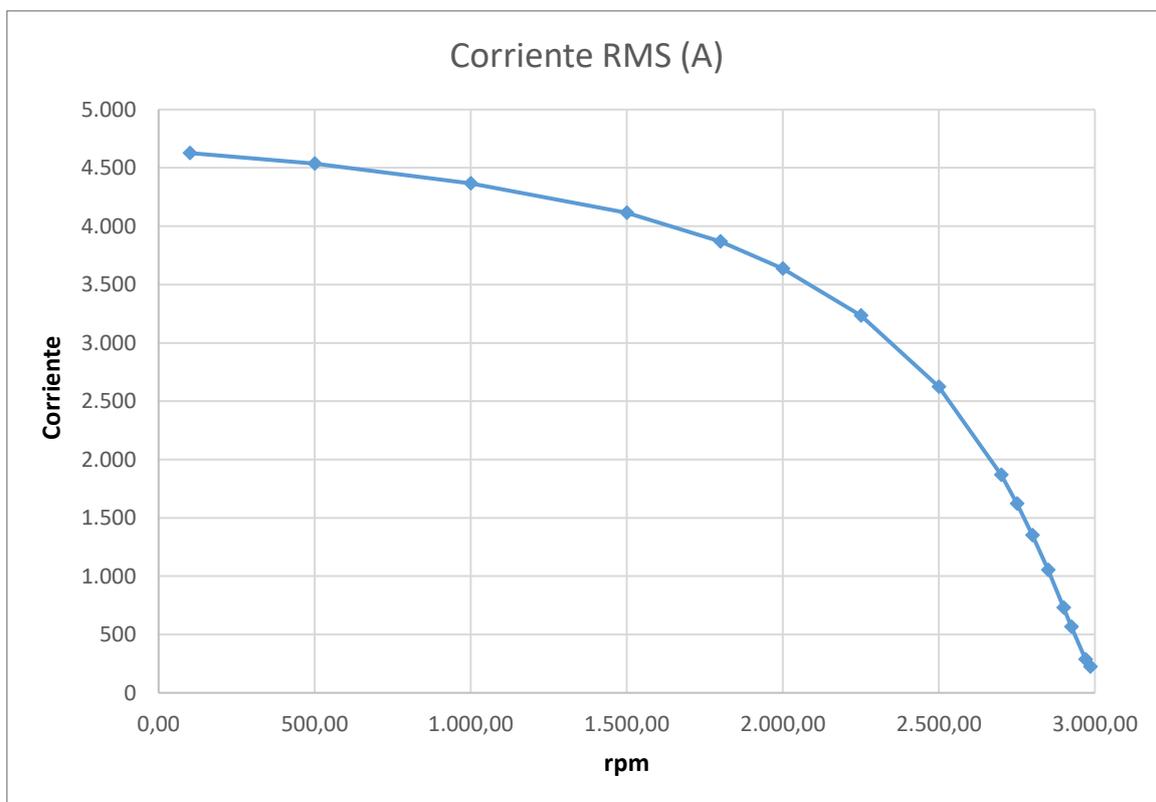


Figura 14: Curva de Corriente-Velocidad del modelo inicial. (Fuente: Elaboración propia)

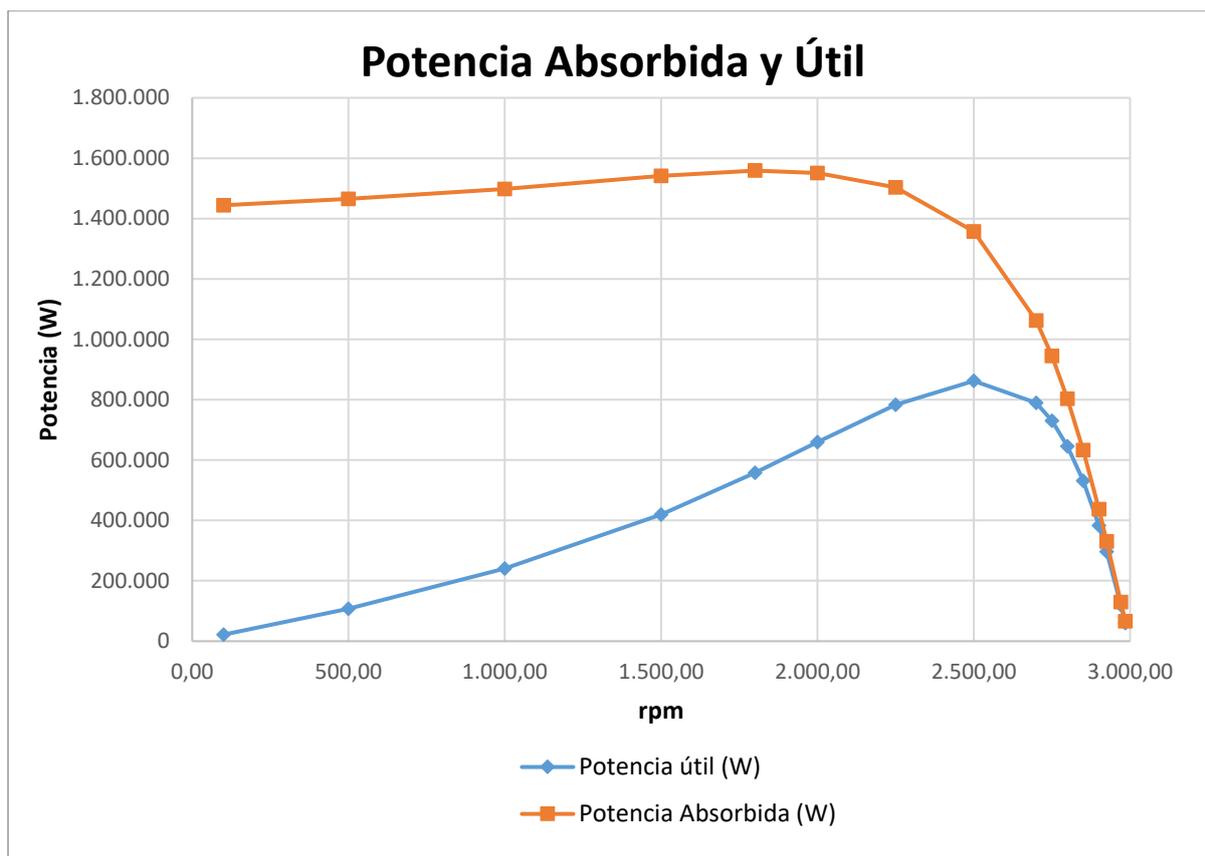


Figura 15: Potencias-Velocidad del modelo inicial. (Fuente: Elaboración propia)

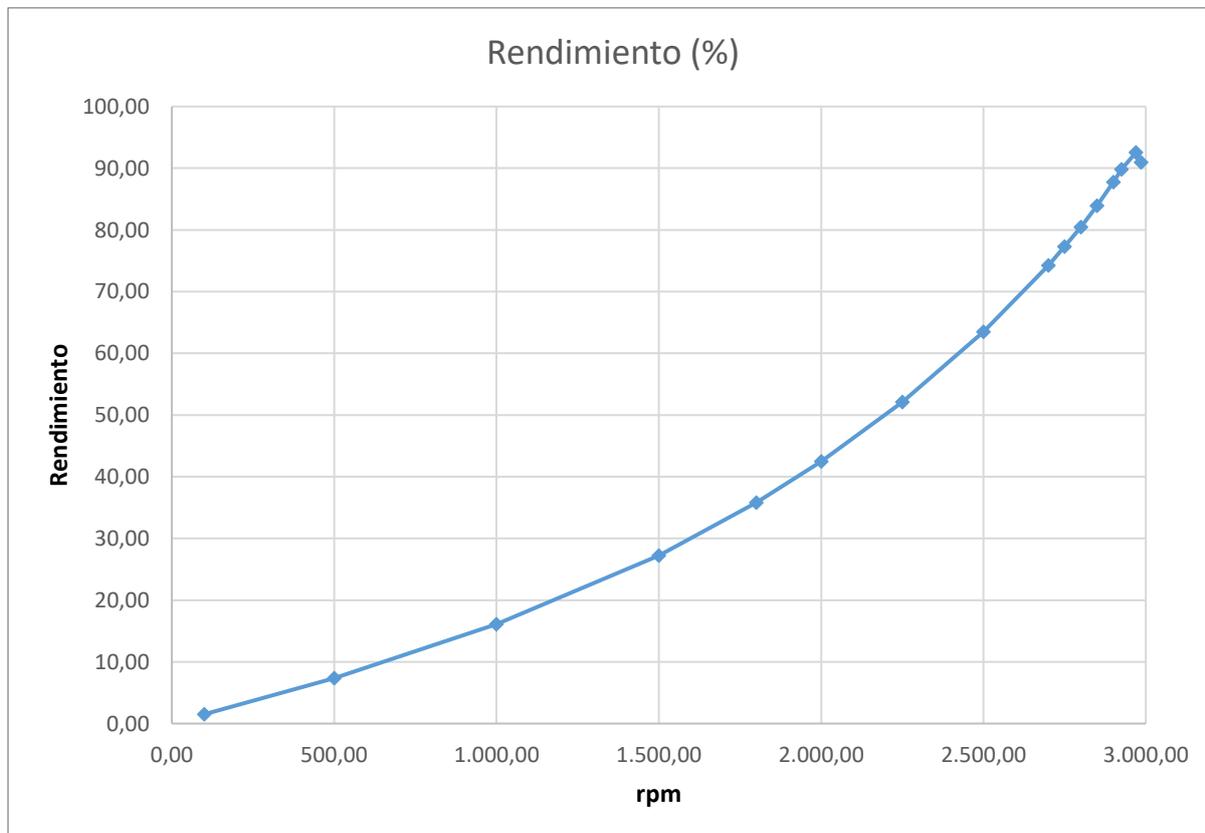


Figura 16: Rendimiento-Velocidad del modelo inicial. (Fuente: Elaboración propia)

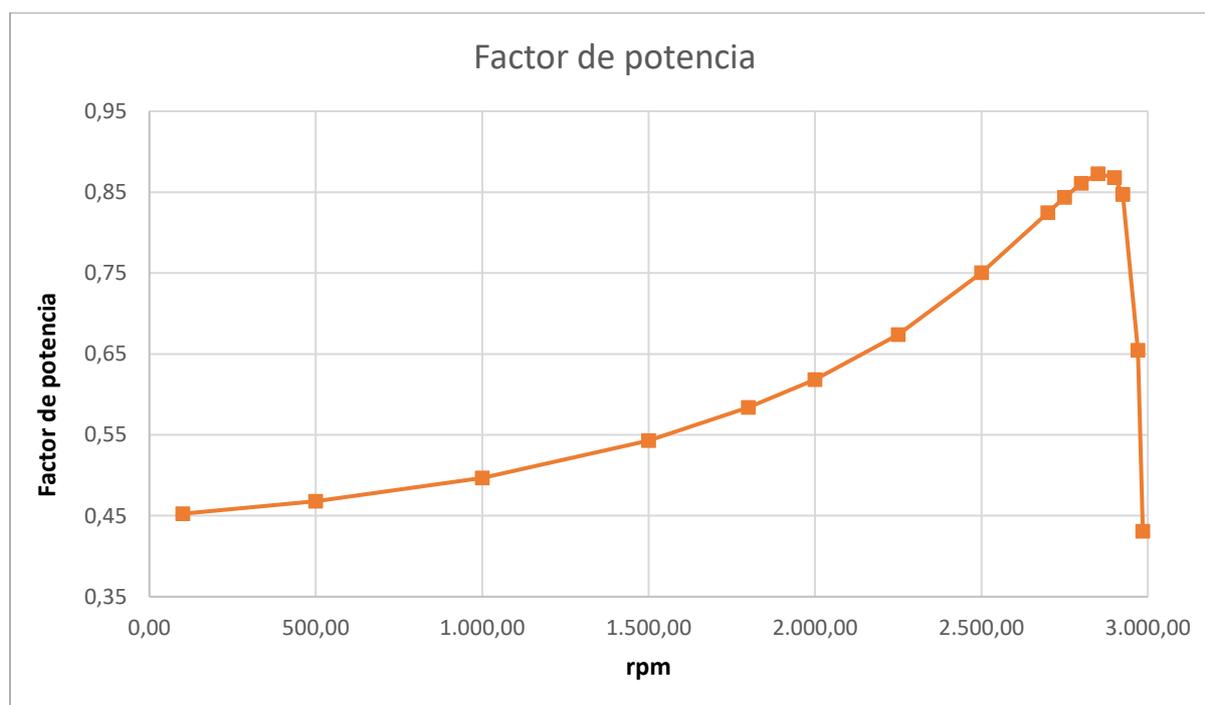


Figura 17: Factor de potencia-Velocidad del modelo inicial. (Fuente: Elaboración propia)

9.4 PARAMETRIZACIÓN GEOMÉTRICA

Antes de simular los casos paramétricos generados, basándonos en los fundamentos teóricos, sabemos qué resultados deberíamos obtener, o por lo menos su variabilidad; es decir, si aumentará el rendimiento, si disminuirá el factor de potencia, etc.

En cuanto al aumento del diámetro, la potencia de la máquina va en relación a su tamaño. Durante el diseño del motor, se ve que la potencia está relacionada con las dimensiones principales del motor mediante el coeficiente de salida. Al aumentar el diámetro, la potencia de la máquina aumentará sin lugar a duda. Al mismo tiempo, sabemos que, a mayor diámetro en motores de jaula, menor necesidad relativa de corriente de magnetización; por lo que mejorará el factor de potencia.

Si pensamos en lo que implica acercar las barras del rotor al entrehierro, sabremos que el efecto que tendrá será el de disminuir la dispersión secundaria, reduciendo corriente de magnetización y por tanto mejorando factor de potencia; además tendrá una alta eficiencia y un deslizamiento bajo. Por otro lado, siendo las barras 'grandes' tendrá poca resistencia en el rotor y el par de arranque será bajo, y la corriente de arranque será muy elevada.

La reducción del área de las barras del rotor supondrá un aumento de la resistencia del rotor, aumentando el par de arranque y reduciendo la corriente absorbida.

El aumento del área de la ranura del estator, sin aumentar la cantidad de cobre en su interior, debería suponer un empeoramiento en los parámetros de funcionamiento por varios motivos; se reduce el factor de llenado, desaprovechando la ranura. Además, se reduce la cantidad de acero entre ranuras, estrechando los dientes y provocando una mayor saturación magnética en estos, aumentando las pérdidas y la necesidad de corriente de magnetización.

9.4.1 Resultados comparados en Excel

	M	Putil	Pabs	I	S	F.P.	Rend	Producto	P.Joule
REFERENCIA	386	120053	130104	288	198720	0,655	0,923	0,604	7265,53
2	402	125029	133800	267	184230	0,726	0,934	0,679	6638,04
3	415	129072	137500	253	174570	0,788	0,939	0,739	6302,47
4	427	132805	140900	245	169050	0,833	0,943	0,786	6181,16
5	400,6	124594	135300	285,8	197202	0,686	0,921	0,632	8427,8
6	389	120986	131500	308	212520	0,619	0,920	0,569	7767,26
7	392	121919	134700	360	248400	0,542	0,905	0,491	9304,11
8	331	102947	109300	227	156630	0,698	0,942	0,657	4344,32
9	295	91750,2	96500	194	133860	0,721	0,951	0,685	3186,67
10	273	84907,8	88900	176	121440	0,732	0,955	0,699	2685,71
	Aumento del diametro								
	Acercamiento de barras de rotor al entrehierro								
	Aumento del area de ranuras del estator								
	Disminución del área de barras del rotor								

Figura 18: Comparación de resultados de los casos paramétricos. (Fuente: Elaboración propia)

9.4.2 Aumento del diámetro

Tal y como se predijo, el aumentar el diámetro aumenta la potencia de salida, el factor de potencia, y el rendimiento. Esto podría parecer un resultado alentador en vista a la optimización; sin embargo, tenemos poco uso para él, dado que tratamos de optimizar el motor del modelo inicial. Aumentar el tamaño de la máquina supondría estar construyendo una nueva, y no optimizando la que se tiene. Este estudio sin embargo nos ha servido para comprobar que en la simulación se cumple lo que dice la teoría.

9.4.3 Acercamiento de las barras del rotor

De nuevo, se cumple lo que se predice en la teoría. La corriente absorbida es prácticamente la misma que en el modelo inicial, sin embargo, el par ha aumentado, y por ello también lo ha hecho la potencia de salida. Consecuentemente, el factor de potencia ha aumentado, mientras que el rendimiento disminuye levemente al aumentar las pérdidas Joule. Esto se

debe a que, al acercar las barras al entrehierro y reducir la dispersión secundaria, las barras están siendo inducidas con una mayor fuerza electromotriz, y esa corriente extra que circula por las barras y da esa potencia extra de salida, está generando al mismo tiempo mayores pérdidas eléctricas.

9.4.4 Disminución del área de las barras del rotor

De nuevo se cumplen las predicciones hechas; disminuyendo la corriente absorbida, aumentando el factor de potencia y el rendimiento. Este efecto se puede usar junto con el acercamiento de las barras al entrehierro para contrarrestar la pérdida de rendimiento, y así conseguir un mejor resultado tanto de factor de potencia como de rendimiento. Además, estamos haciendo la máquina más barata al reducir la cantidad de cobre de ésta.

9.4.5 Aumento del ancho de las ranuras del estator

El efecto adverso de dicha operación se verifica en ambos casos, empeorando cuando más anchas se hacen las ranuras. Las predicciones se cumplen a la perfección, el factor de potencia cae drásticamente debido a la demanda de corriente de magnetización, y consigo trae un aumento de la corriente absorbida y de las pérdidas, tanto eléctricas como en el hierro.

10 OPTIMIZACIÓN. MODELO FINAL

10.1 OPTIMIZACIÓN DEL ROTOR

Se alcanza un resultado tras 80 casos generados mediante el algoritmo genético, es decir, 7 generaciones, termina la optimización habiendo convergido, siendo el caso óptimo el número 36. Como vemos, desde la generación 3 hasta la 7 han pasado cuatro generaciones, las especificadas en el criterio de parada.

10.1.1 Gráficas de correlación

Al terminar la optimización, nos vemos en posesión de una gran cantidad de resultados para distintas geometrías. Además, tenemos un resultado que ha terminado siendo el óptimo; lo que podemos hacer es aprovechar el resto de información, analizarla y extraer conclusiones.

Para ello, nos servimos de la matriz de correlación que proporciona JMAG sobre las variables de estudio y los parámetros variables de la optimización. Gracias a estos, obtenemos gráficas,

e información valiosa. Nuestro principal interés, es la relación entre el par y la corriente absorbida, representantes directos del producto del rendimiento y el factor de potencia.

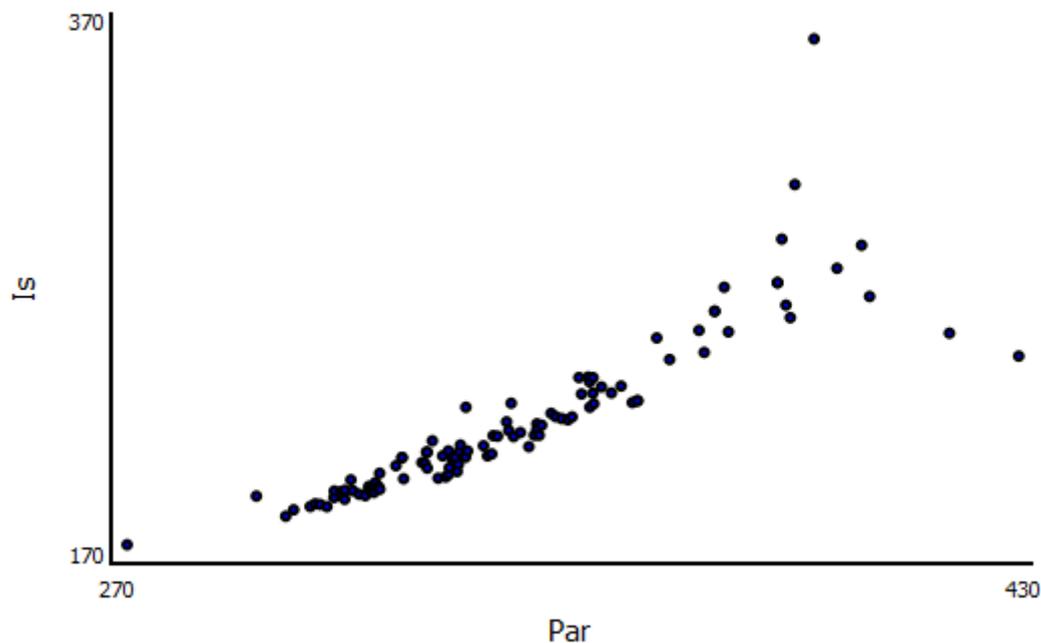


Figura 19: Gráfica de correlación entre par de salida y corriente absorbida. (Fuente: Elaboración propia)

En la gráfica, cada punto se corresponde a un caso resuelto. Tiene sentido encontrar que en general, más par de salida se corresponde a más corriente absorbida. Sin embargo, hay casos más beneficiosos que otros, viéndose como para un mismo valor del par, se pueden tener varios valores de corriente dependiendo de la geometría, y por tanto tener un valor distinto de eficiencia.

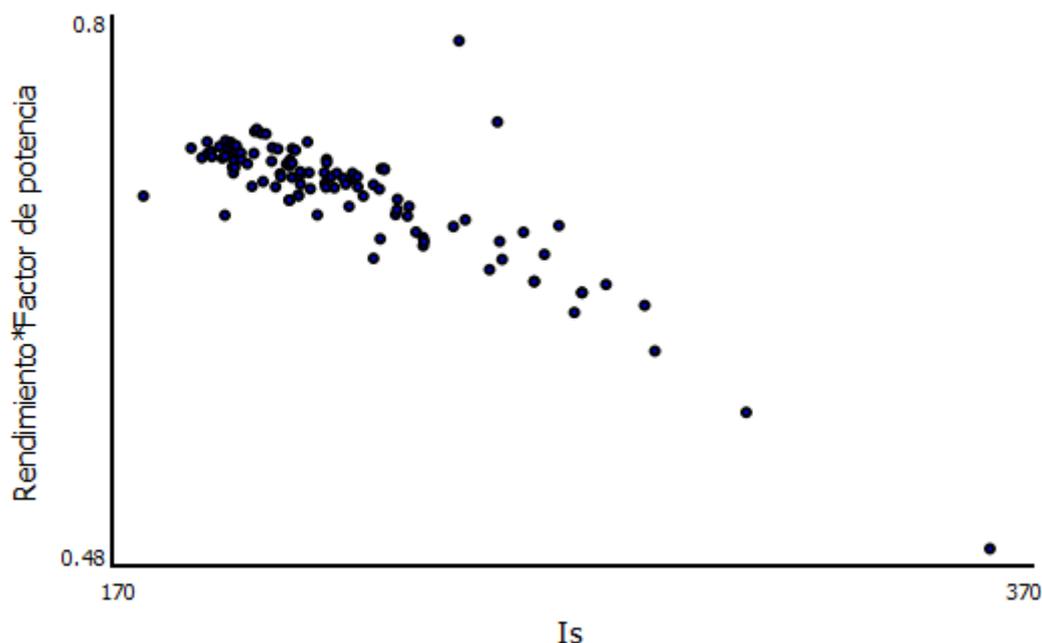


Figura 20: Gráfica de correlación entre eficiencia y corriente absorbida. (Fuente: Elaboración propia)

Vemos claramente cómo durante la optimización, de forma general, menor corriente absorbida se corresponde a mayor eficiencia. Esto se debe al acercamiento de las barras del rotor, y a la reducción del área de las barras; se mejora el acoplamiento magnético y con ello el factor de potencia, y se aumenta la resistencia del rotor, reduciendo la corriente absorbida, pero manteniendo un buen nivel de par. Estas circunstancias hacen que, a nivel global, mejora la característica de funcionamiento del motor.

10.1.2 Correlación de los parámetros geométricos

Con un gestor de gráficos de JMAG, podemos crear gráficas en las que se relacionan los parámetros geométricos usados entre sí, y con el funcionamiento del motor.

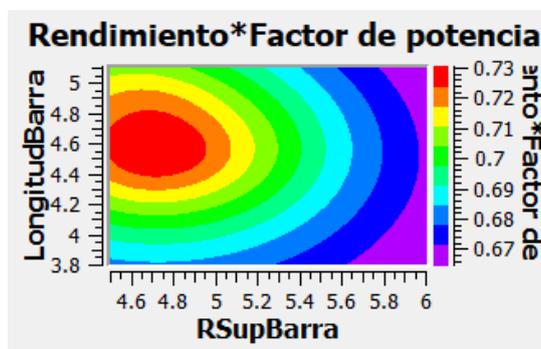


Figura 21: 1. Gráfica de calor para la eficiencia. (Fuente: Elaboración propia)

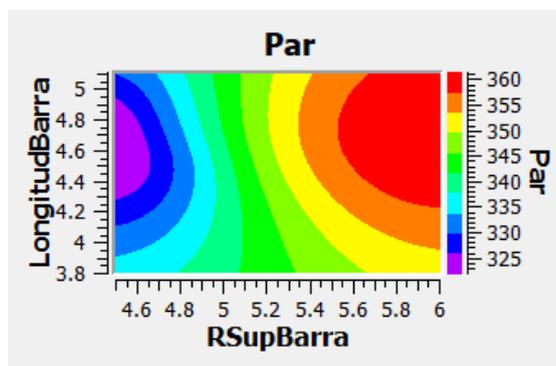


Figura 22: 1. Gráfica de calor para el par de salida. (Fuente: Elaboración propia)

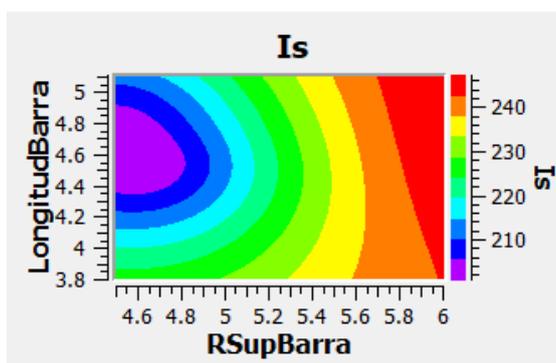


Figura 23: 1. Gráfica de calor para la corriente absorbida. (Fuente: Elaboración propia)

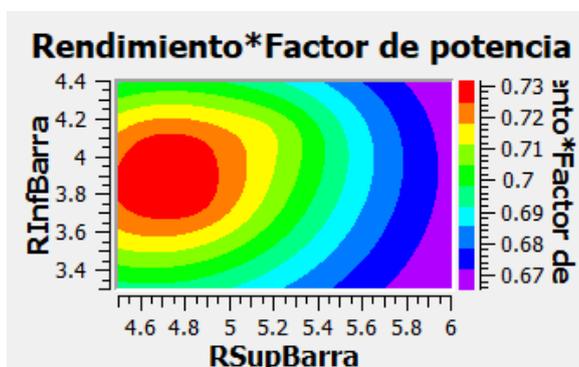


Figura 24: 2. Gráfica de calor para la eficiencia. (Fuente: Elaboración propia)

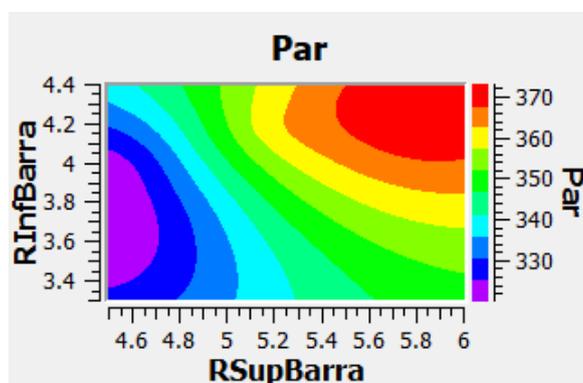


Figura 25: Gráfica de calor para el par de salida. (Fuente: Elaboración propia)

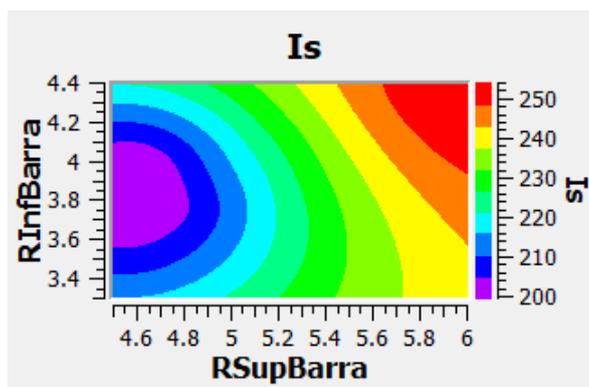


Figura 26: Gráfica de calor para la corriente absorbida. (Fuente: Elaboración propia)

En estas gráficas se acotan claramente los valores que mejores resultados dan con estos parámetros geométricos. Vemos que los valores que mejor eficiencia consiguen usan un radio superior de barras menor, produciendo menos par; sin embargo, vimos en las gráficas de correlación cómo a menor par, menor corriente, y es que los casos con menor corriente absorbida también son los que mejores resultados de eficiencia obtienen gracias a la reducción de área de las barras.

10.1.3 Resultados del caso óptimo

Se presenta en forma de tabla los resultados obtenidos del caso óptimo en esta optimización:

Tabla 4: Resultados del caso 36, caso óptimo. (Fuente: Elaboración propia)

	Modelo inicial	Optimizado del rotor
Par (N·m)	386	328
$P_{\text{Útil}}$ (W)	120.053	102.096
$P_{\text{Absorbida}}$ (W)	130.104	108.122
I_{s1} (A)	288	202
I_{s2} (A)	288	201
I_{s3} (A)	288	203
$I_{s\text{media}}$ (A)	288	202
S (VA)	198.720	139.051
λ	0,655	0,778
η	0,923	0,944
$\eta \cdot \lambda$	0,604	0,734
DistSupBarra (mm)	7,87	5,68
LongitudBarra(mm)	5,11	4,47
RInfBarra(mm)	4,4	4,02
RSupBarra(mm)	6	4,65

Como se puede observar, los resultados obtenidos son mucho más próximos a las especificaciones del diseño; corriente absorbida en torno a los 200 Amperios, potencia útil en torno a los 100kW...

Los resultados de la optimización son evidentes. El factor de potencia ha mejorado en un 12.3%, y el rendimiento ha mejorado en un 2.1%. La mejora del rendimiento puede parecer poca, pero siendo éste de un 94.4%, es muy significativo. Sin duda lo más notable es la mejora en el factor de potencia gracias a la disminución de la dispersión secundaria.

Comprobamos los niveles de densidad de flujo en el motor para ver si ha bajado la saturación en alguna de sus partes, y hacer visible la mejora en el acoplamiento del rotor.

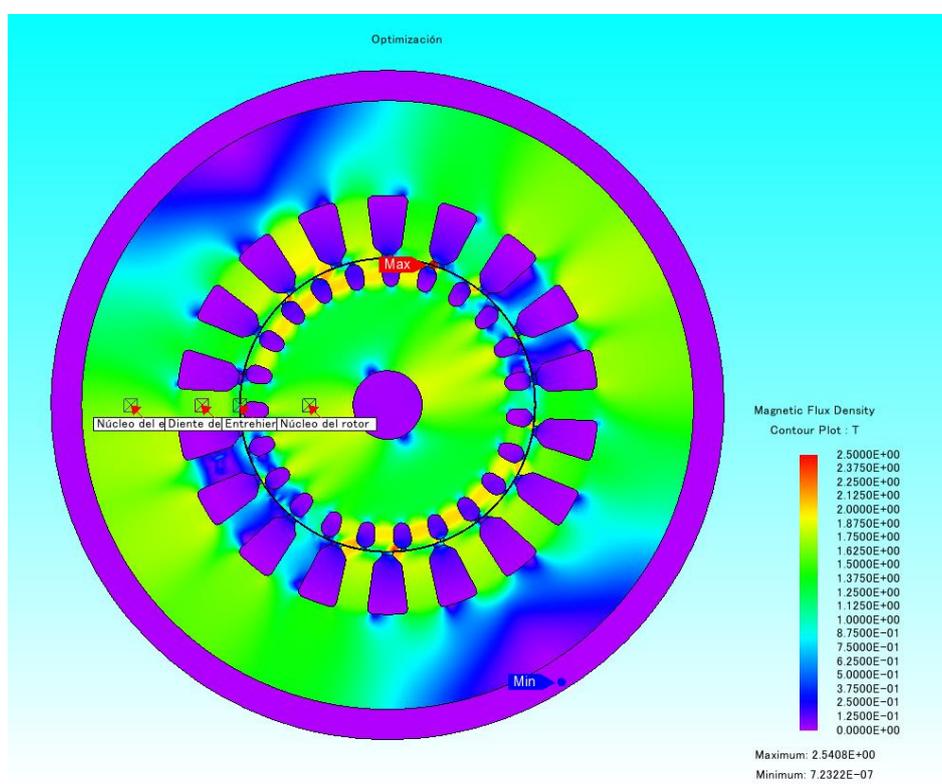


Figura 27: Distribución de la densidad de flujo magnético en el motor optimizado. (Fuente: Elaboración propia mediante JMAG)

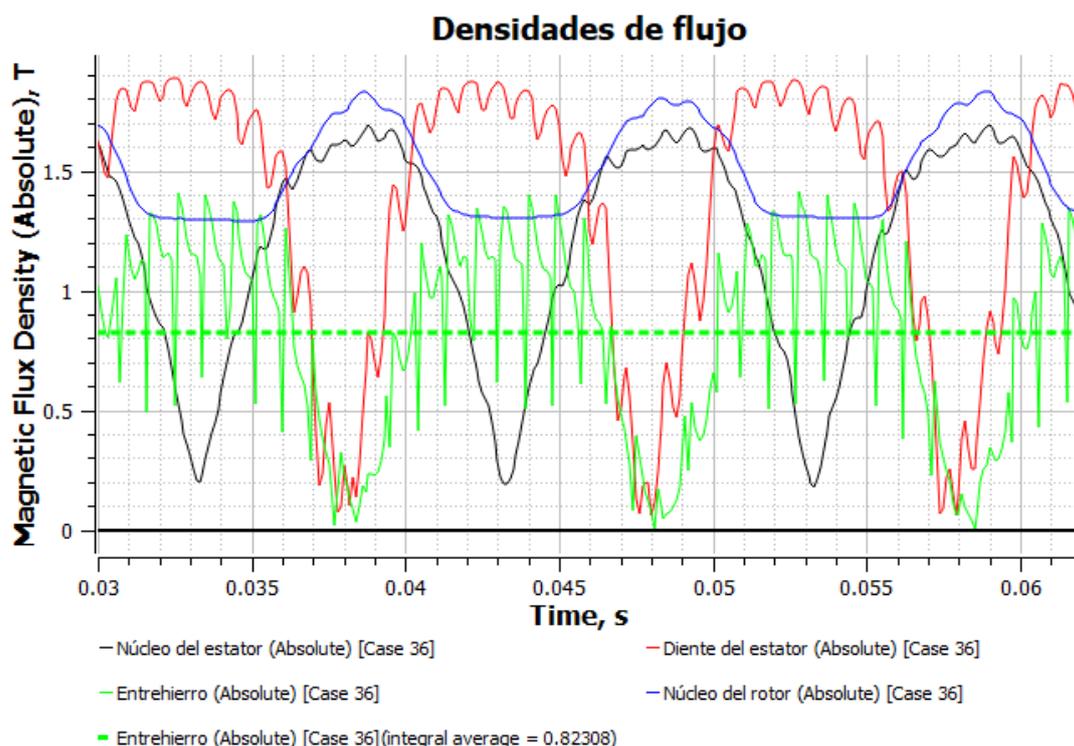


Figura 28: Valores de densidad de flujo en el motor optimizado. (Fuente: Elaboración propia mediante JMAG)

Podemos observar como el nivel de magnetización en el estator permanece prácticamente inalterado; sin embargo, la densidad en el rotor ha disminuido de 1.85T a 1.8T, debido en parte a que al reducir el área de las barras ha quedado más cantidad de acero para repartir el flujo magnético. De la misma forma, la densidad de flujo media en el entrehierro ha disminuido levemente, manteniéndose en un valor razonable.

En lugar de tomar este modelo como el definitivo, se plantea la posibilidad de optimizar las ranuras del estator. En dicho modelo, se obtendrán la totalidad de resultados con el objetivo de compararlos minuciosamente con el modelo inicial, incluidas sus curvas de funcionamiento.

10.2 OPTIMIZACIÓN DEL ESTATOR

Al terminar la optimización del estator se nos presenta la siguiente ventana, indicando la convergencia de la optimización.

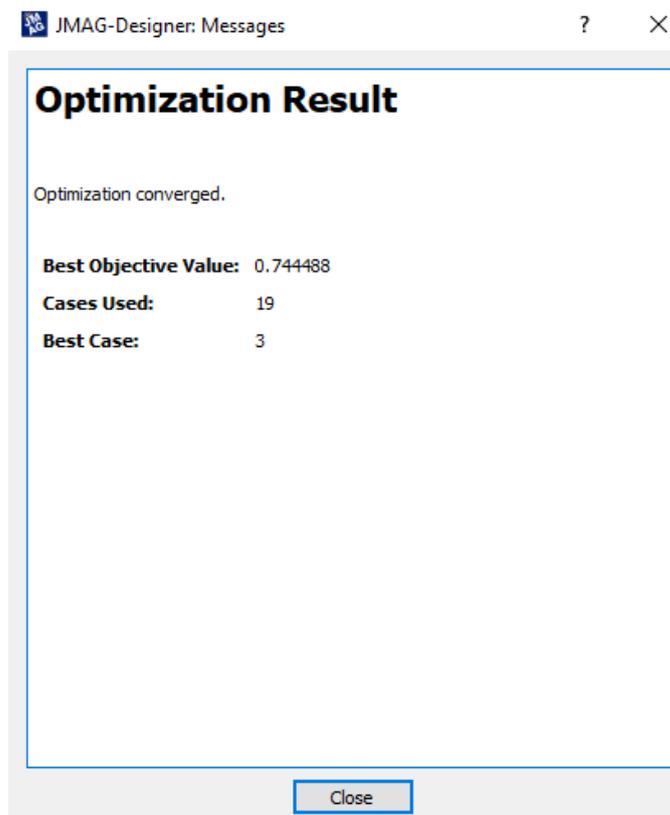


Figura 29: Mensaje de optimización. (Fuente: JMAG)

Siendo el 5 el número máximo de generaciones posibles, al final de la cuarta generación converge la optimización, siendo el mejor caso el tercero.

10.2.1 Gráficas de correlación

Al igual que en la optimización del rotor, obtenemos una buena cantidad de casos con resultados útiles aparte del propio caso óptimo.

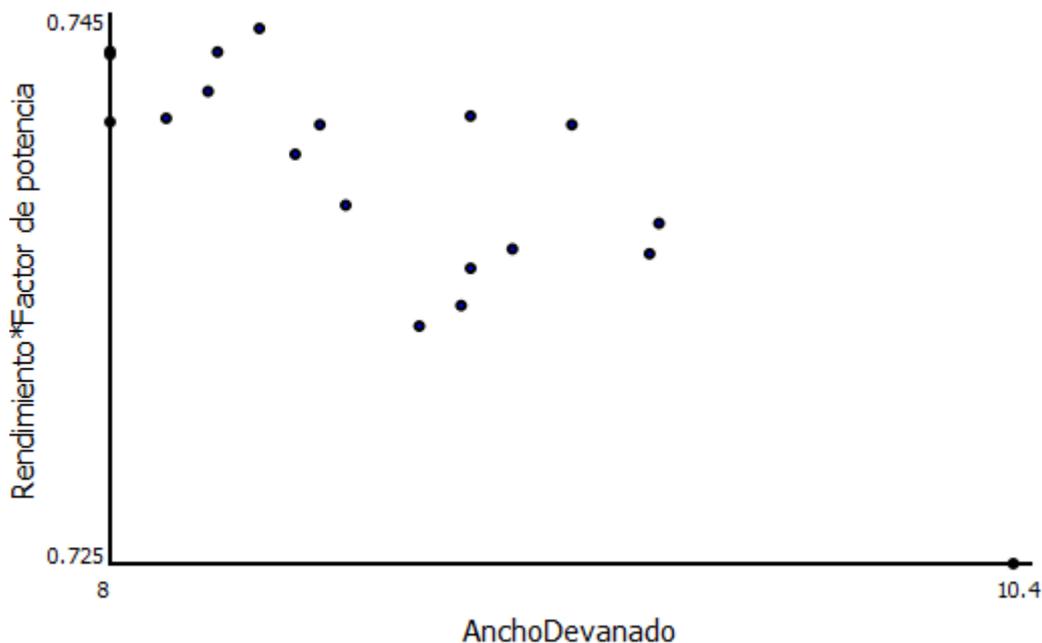


Figura 30: Gráfica de correlación entre el producto de eficiencia y el ancho de las ranuras. (Fuente: Elaboración propia mediante JMAG)

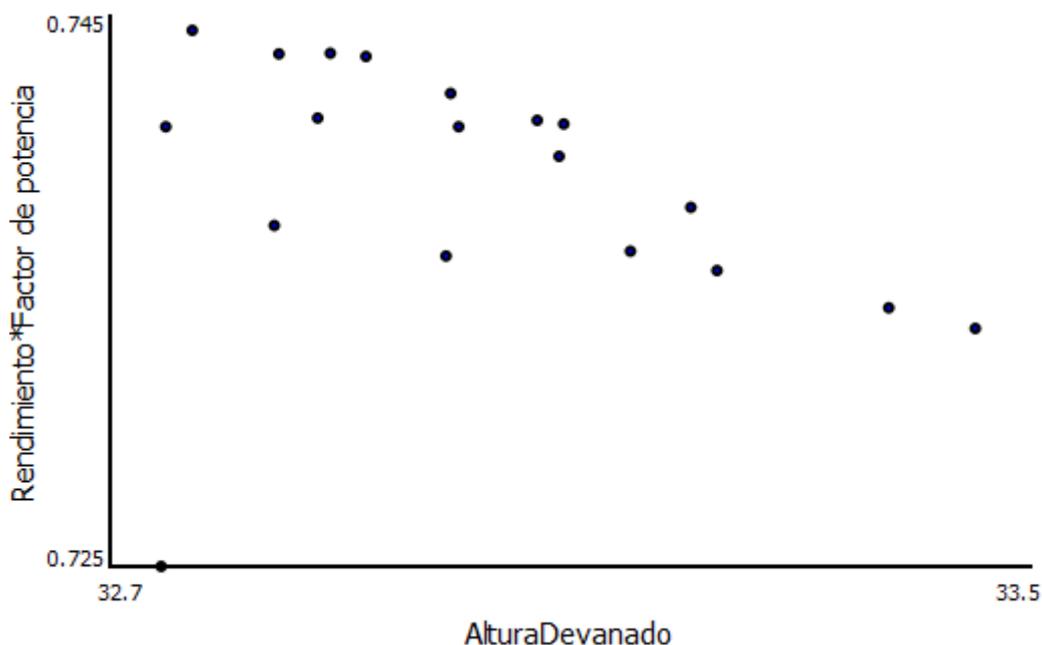


Figura 31: Gráfica de correlación entre el producto de eficiencia y la profundidad de las ranuras. (Fuente: Elaboración propia mediante JMAG)

Obviamente, los resultados que obtenemos indican que cuanto más pequeña sea la ranura, mejor eficiencia tiene el motor.

Esto pasa por dar más espacio al hierro, y confinar el cobre. Esto se consigue manteniendo el área de la ranura, pero estrechándola y aumentando su profundidad. Al mismo tiempo se aumenta el diámetro externo del estator para que no se sature el núcleo de acero.

10.2.2 Resultados del modelo final

Tabla 5: Resultados del caso final. (Fuente: Elaboración propia)

	<i>Modelo inicial</i>	<i>Optimizado del rotor</i>	<i>Modelo final</i>
<i>Par (N·m)</i>	386	328	323
<i>P_{Útil} (W)</i>	120.053	102.096	100.458
<i>P_{Absorbida} (W)</i>	130.104	108.122	106.037
<i>I_{s1} (A)</i>	288	202	198
<i>I_{s2} (A)</i>	288	201	199
<i>I_{s3} (A)</i>	288	203	200
<i>I_{smedia} (A)</i>	288	202	199
<i>S (VA)</i>	198.720	139.051	135.504
<i>λ</i>	0,655	0,778	0,771
<i>η</i>	0,923	0,944	0,947
<i>η · λ</i>	0,604	0,734	0,730

El rendimiento como se puede ver se mantiene casi constante con respecto al modelo optimizado del rotor, al igual que el factor de potencia. Sin embargo, estos cambios sí tienen otras implicaciones beneficiosas, aunque no se haya mejorado notablemente el funcionamiento.

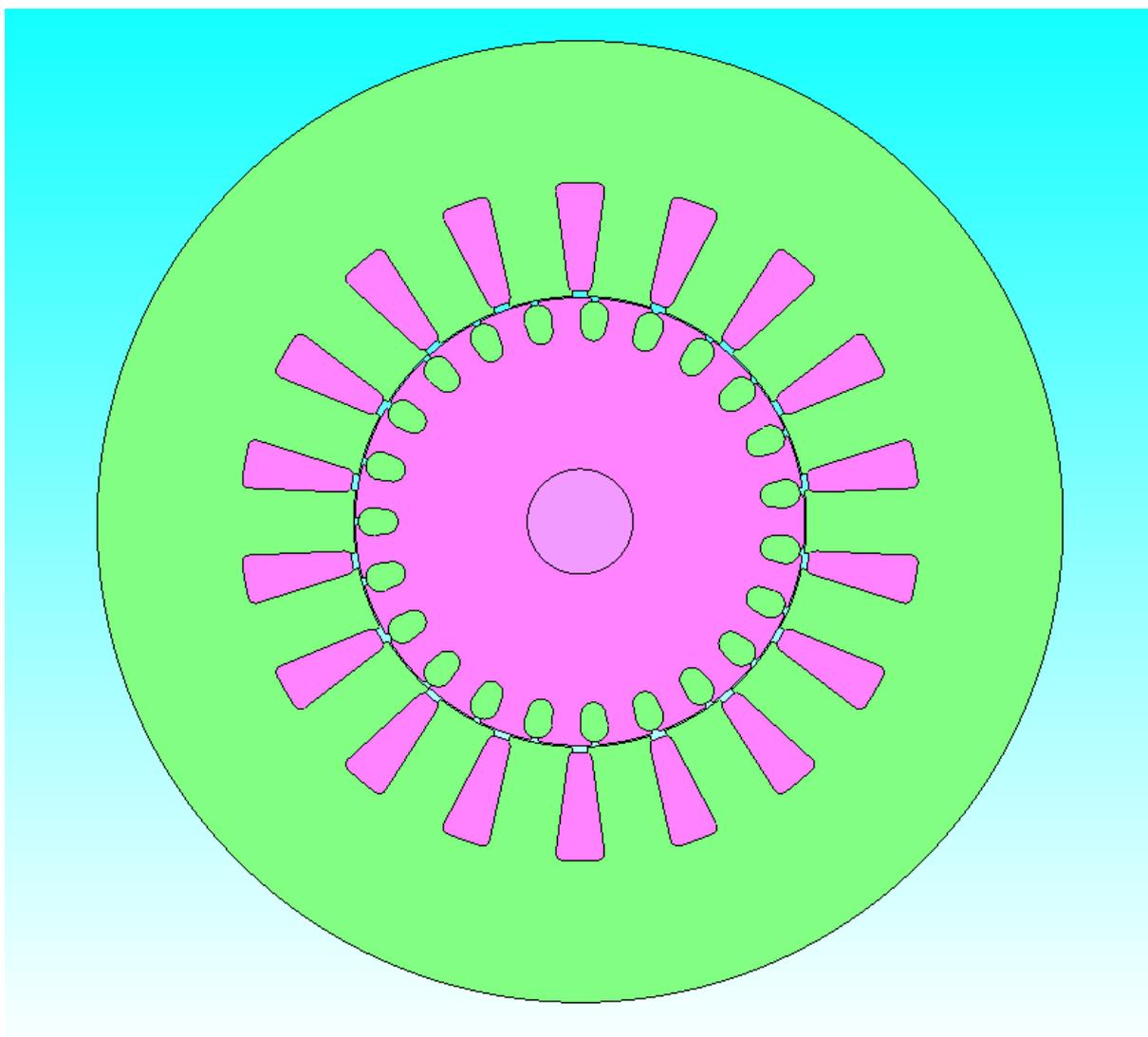
La potencia útil pasa a ser casi exactamente 100kW, la corriente absorbida 196 Amperios. Los criterios de diseño suponían obtener una potencia de salida de 110kW, una potencia habitual en motores asíncronos. Por ello se buscará en su curva de velocidad para qué deslizamiento se produce, y que características de rendimiento y factor de potencia tiene.

10.2.3 Geometría del caso final

Los valores de las medidas con las que se ha optimizado el rotor y el estator son los siguientes para el modelo finalizado.

Tabla 6: Medidas en milímetros del modelo final. (Fuente: Elaboración propia)

Dist. Sup. Barra	5,68
Longitud Barra	4,47
R. Inf. Barra	4,02
R. Sup. Barra	4,65
Separación devanado	1,70
Alto devanado	37,77
Ancho devanado	8,39
Diámetro externo	320

**Figura 32: Geometría del modelo final. (Fuente: Elaboración propia mediante JMAG)**

11 RESULTADOS. ANÁLISIS Y COMPARACIÓN

11.1 MODELO FINAL A 2970 r.p.m.

A continuación, se muestran las características de funcionamiento del modelo final girando a la velocidad a la que se han comparado todos los estudios, 2970 rev/min siendo el deslizamiento del 1%.

11.1.1 Sondas de densidad de flujo

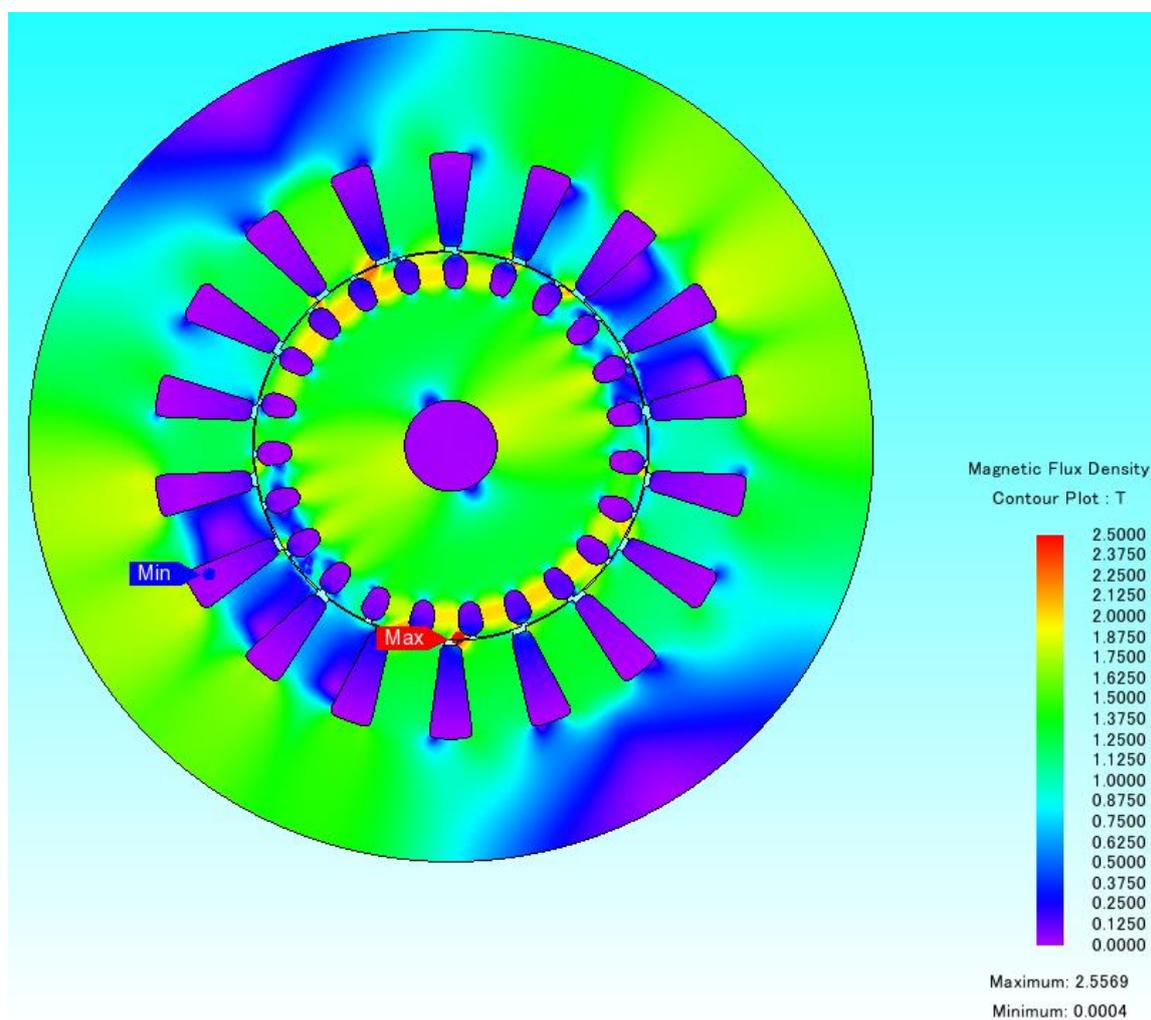


Figura 33: Distribución de densidad de flujo magnético del modelo final. (Fuente: Elaboración propia mediante JMAG)

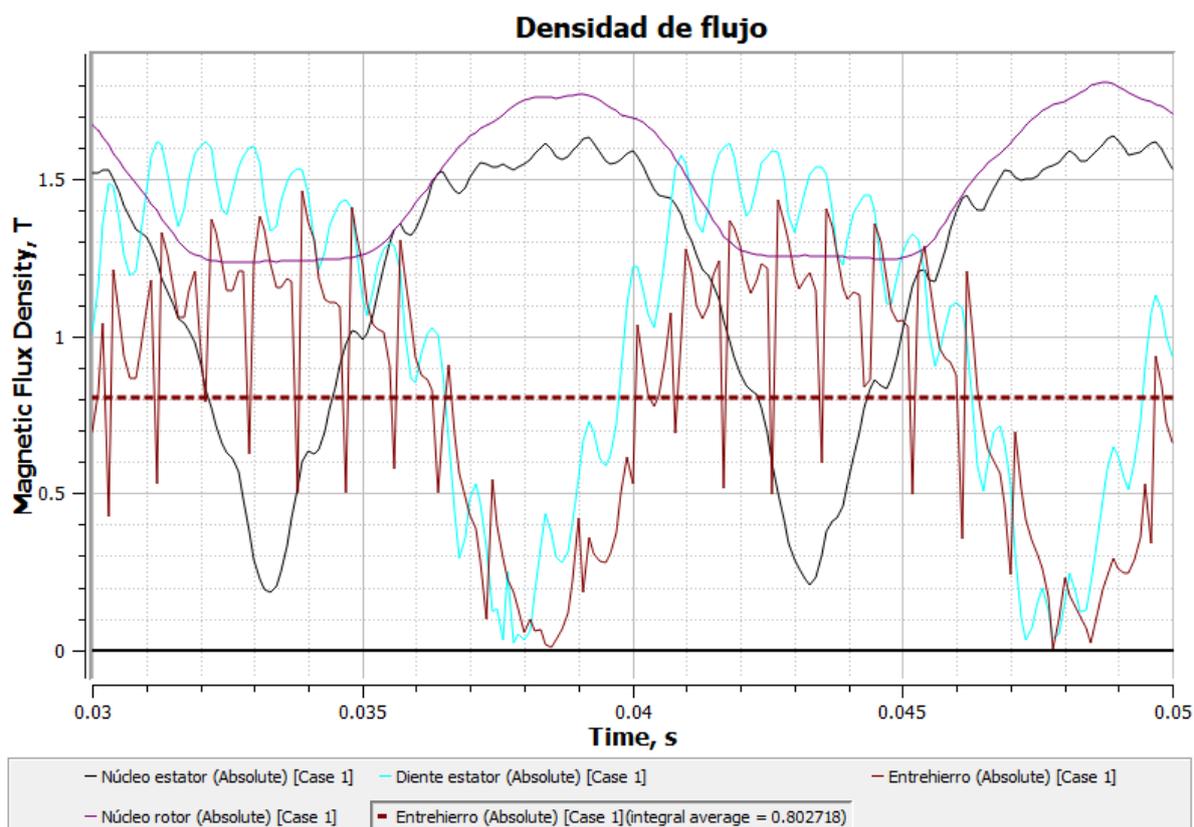


Figura 34: Densidades de flujo en el modelo final. (Fuente: Elaboración propia mediante JMAG)

En este caso la densidad de flujo magnético en el rotor se mantiene con un máximo de 1.8T, sin embargo, se aprecia claramente la mejora en el núcleo del estator y en sus dientes.

Tabla 7: Comparación de densidades de flujo. (Fuente: Elaboración propia)

Densidades	Modelo inicial	Optimizado del rotor	Modelo final
B_{av} (T)	0,845	0,823	0,802
B_{ts} (T)	1,92	1,89	1,60
B_{cr} (T)	1,85	1,82	1,80
B_{cs} (T)	1,71	1,70	1,64

La disminución de densidad de flujo en los dientes y en el núcleo del estator son el punto positivo de la optimización del estator, aunque no se ha mejorado notablemente los parámetros de funcionamiento, la saturación del acero ha bajado. Esto es positivo dado que reduce las pérdidas en el hierro, y por tanto disminuye la temperatura que se genera por pérdidas, reduciendo la necesidad de refrigeración.

11.1.2 Corriente absorbida

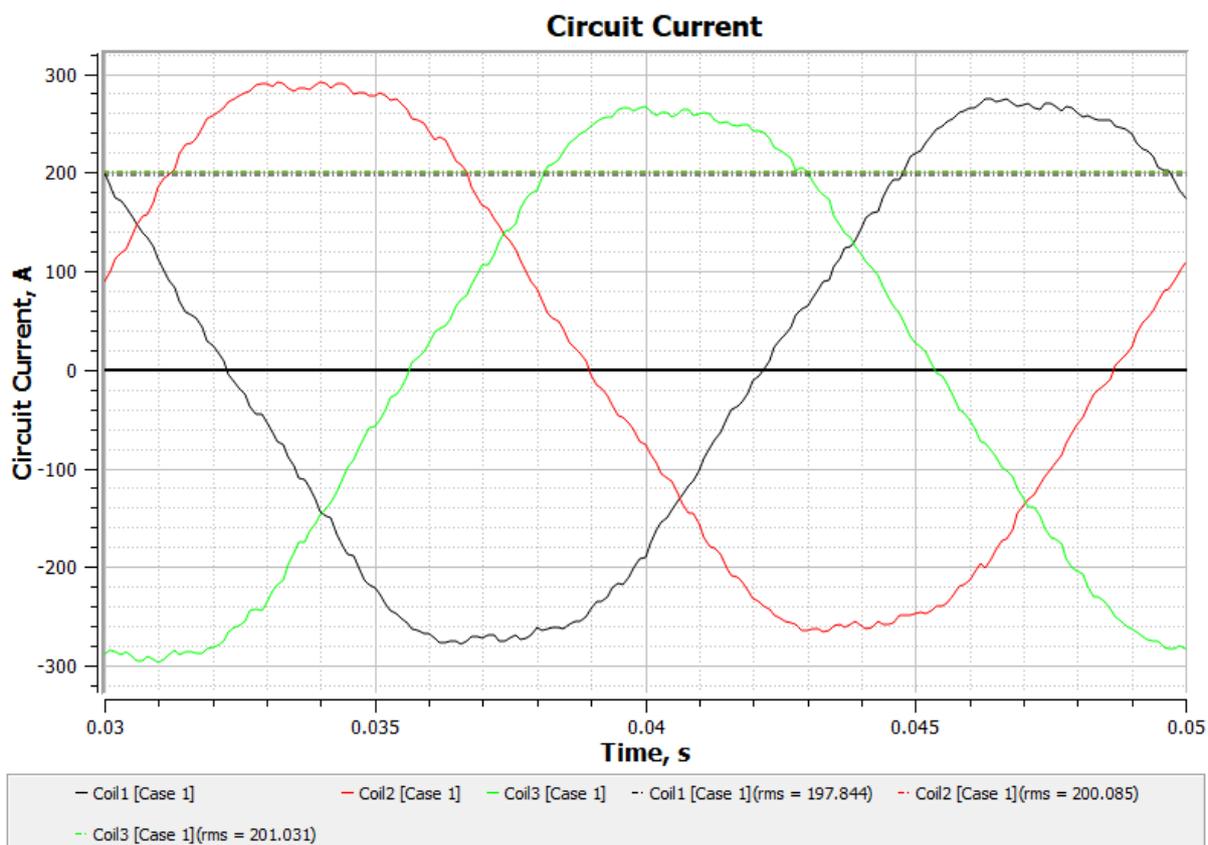


Figura 35: Forma de onda de la corriente de fase del modelo optimizado. (Fuente: Elaboración propia mediante JMAG)

El contenido armónico a simple vista es muy pequeño, lo comprobamos mediante la transformada de Fourier.

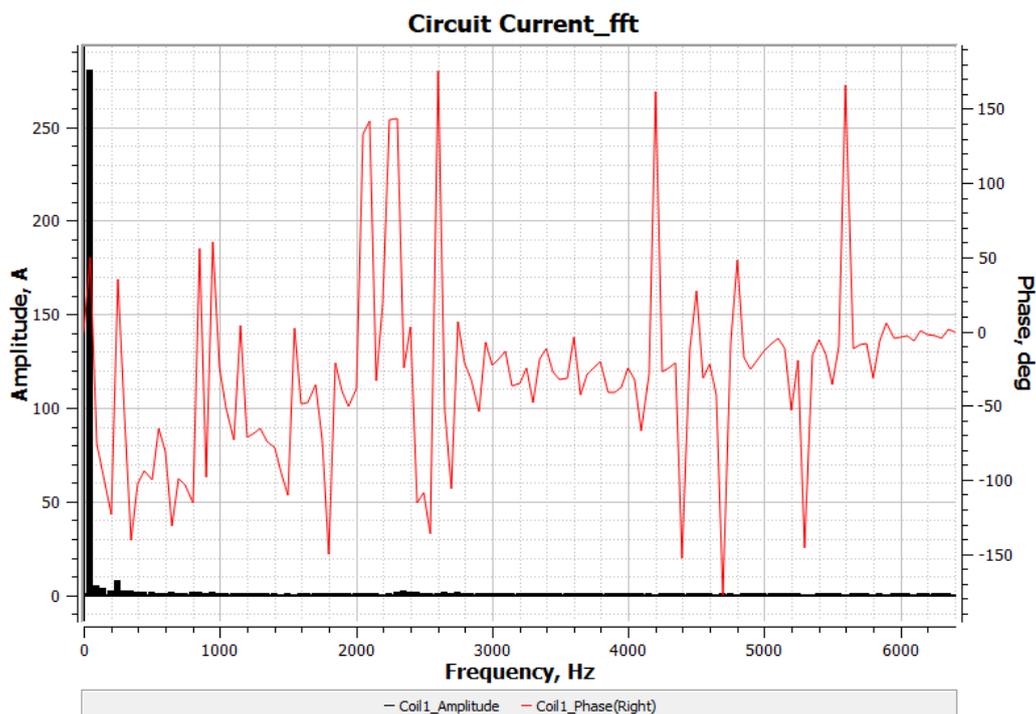


Figura 36: Contenido armónico de la corriente del modelo final. (Fuente: Elaboración propia mediante JMAG)

11.1.3 Pérdidas

Habiendo un total de 5579W de pérdidas, éstas se dividirán entre pérdidas en el cobre y pérdidas en el hierro.

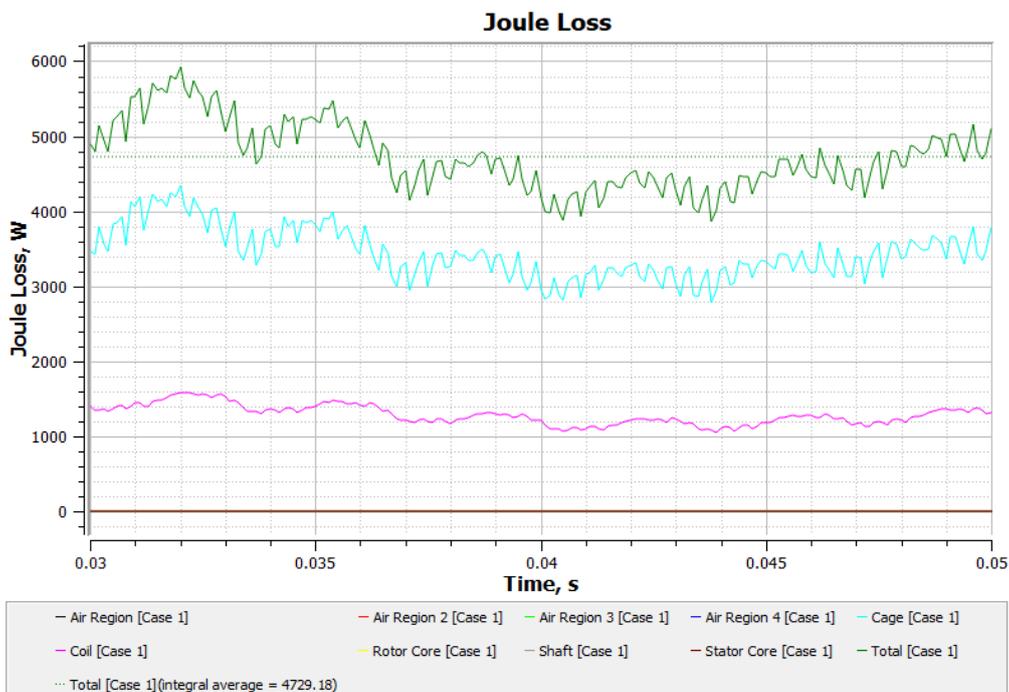


Figura 37: Pérdidas Joule del modelo final. (Fuente: Elaboración propia mediante JMAG)

Las pérdidas en el cobre por efecto Joule son por tanto 4729W, por lo que para completar el balance de potencias las pérdidas en el hierro serán de 850W. Las pérdidas en el hierro son la suma de las pérdidas por corrientes parásitas, y las pérdidas de histéresis.

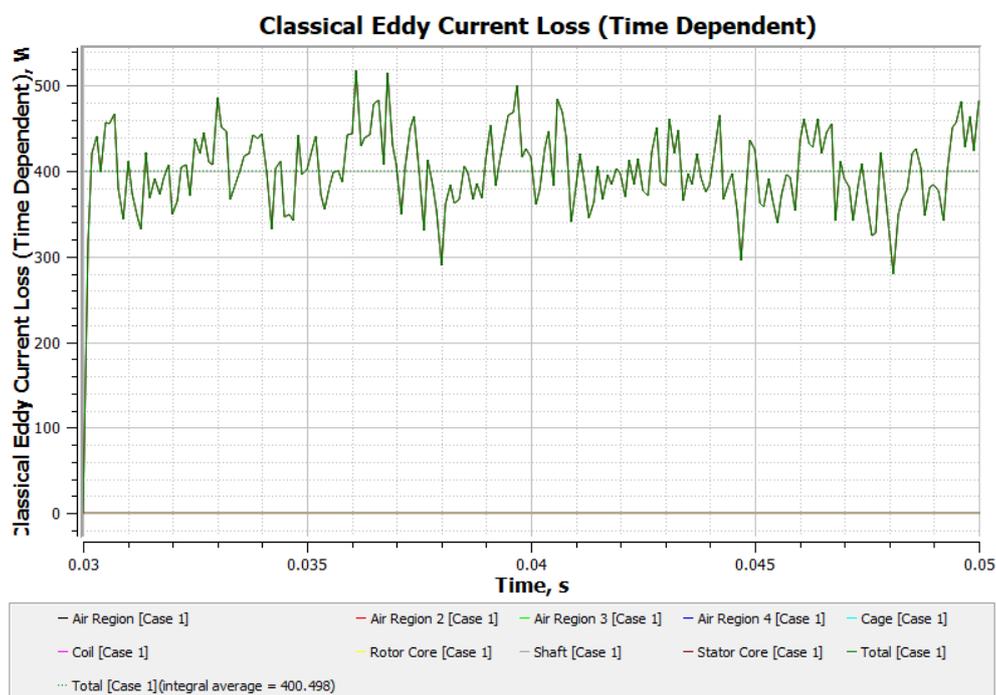


Figura 38: Pérdidas por corrientes de Eddy del modelo final. (Fuente: Elaboración propia mediante JMAG)

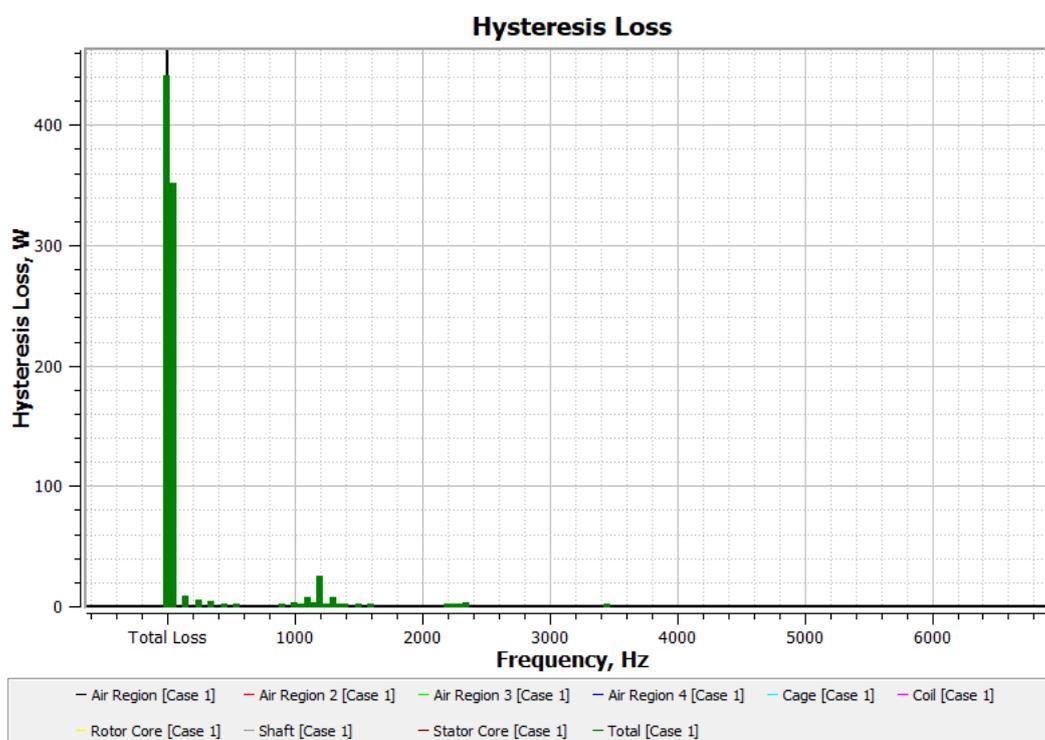


Figura 39: Pérdidas de histéresis del modelo final. (Fuente: Elaboración propia mediante JMAG)

Podemos observar como la media de las pérdidas por corrientes parásitas son unos 400W, mientras que las pérdidas de histéresis ascienden a 450W. Las pérdidas en el hierro son por tanto de 850W. El balance de potencias es consistente, siendo la potencia útil igual a la potencia activa absorbida menos las pérdidas Joule y las pérdidas en el hierro.

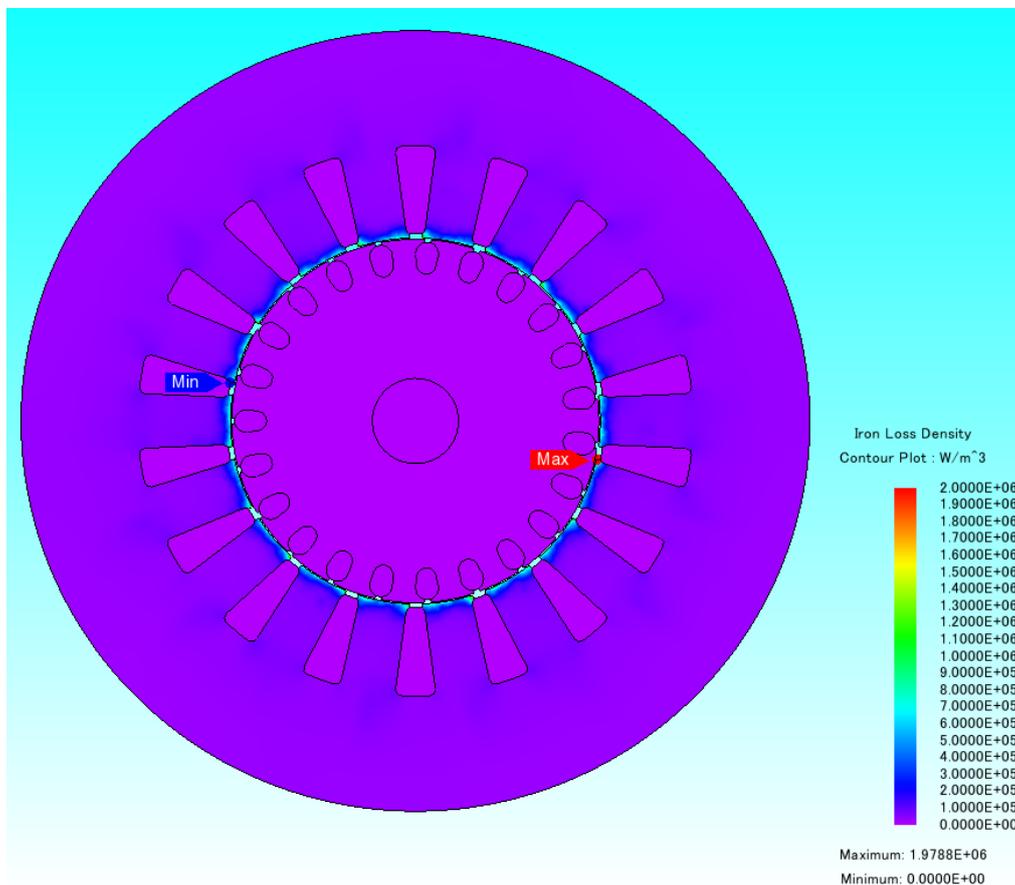


Figura 40: Densidad de pérdidas en el hierro del modelo final. (Fuente: Elaboración propia mediante JMAG)

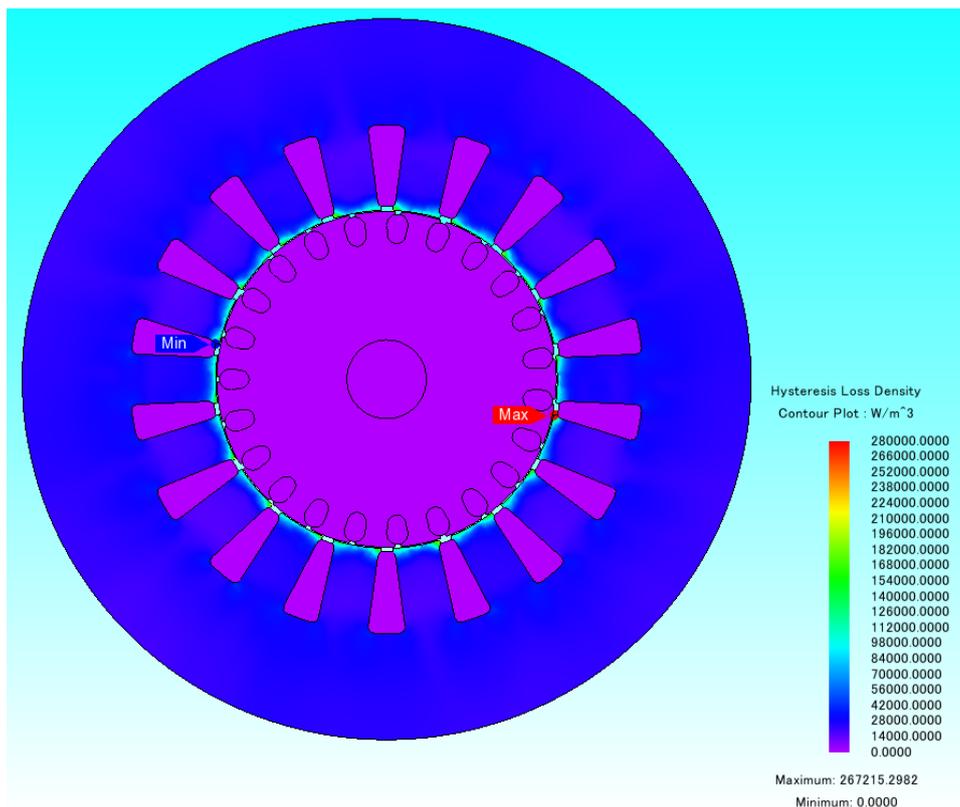


Figura 41: Densidad de pérdidas de histéresis del modelo final. (Fuente: Elaboración propia mediante JMAG)

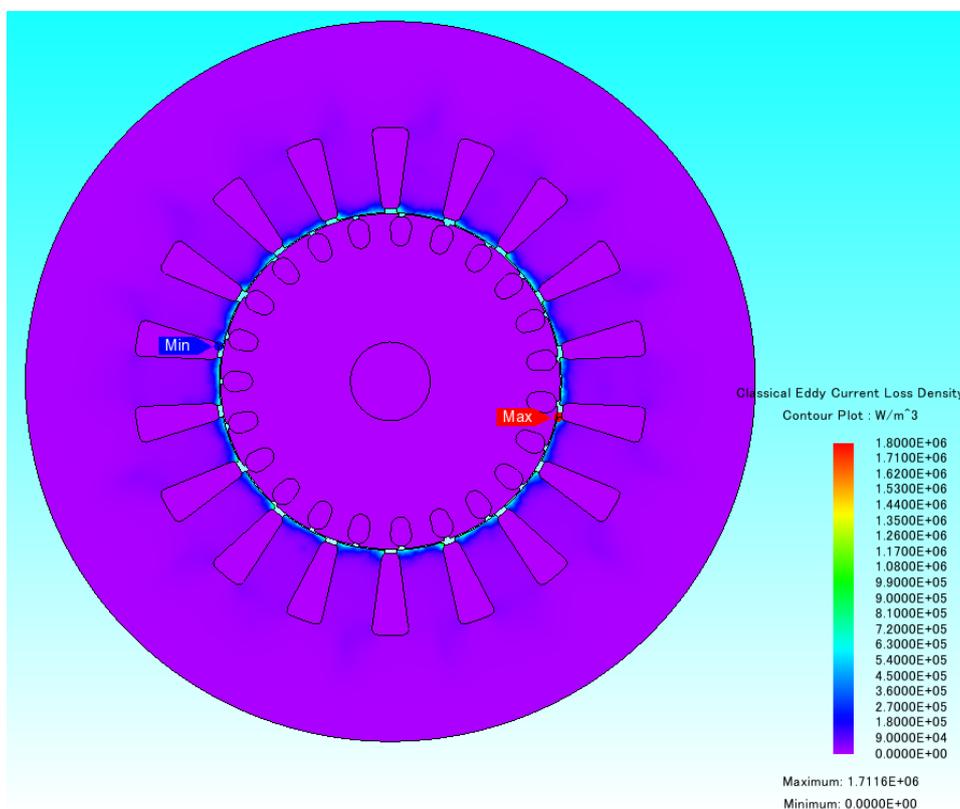


Figura 42: Densidad de pérdidas de Eddy del modelo final. (Fuente: Elaboración propia mediante JMAG)

11.2 CURVAS EXCEL DEL MODELO FINAL

A partir de la siguiente tabla de datos se crean todas las curvas de funcionamiento del modelo totalmente optimizado.

Tabla 8: Datos de funcionamiento del modelo final. (Fuente: Elaboración propia)

Velocidad (RPM)	PAR (N·m)	Corriente RMS (A)	Pérdidas Joule (W)	Potencia absorbida (W)	Potencia útil (W)	η	λ
100,00	1.500	3.547	822.321	960.876	15.704	0,016	0,393
500,00	1.373	3.482	794.967	985.384	71.902	0,073	0,410
1.000,00	1.560	3.358	752.745	1.027.816	163.356	0,159	0,444
1.500,00	1.870	3.136	678.384	1.072.170	293.693	0,274	0,495
1.800,00	2.076	2.928	609.021	1.087.283	391.339	0,360	0,538
2.000,00	2.216	2.751	550.660	1.090.147	464.204	0,426	0,574
2.250,00	2.371	2.455	457.148	1.074.811	558.769	0,520	0,635
2.500,00	2.392	1.996	326.671	992.014	626.229	0,631	0,720
2.700,00	2.075	1.413	187.959	795.199	586.788	0,738	0,815
2.750,00	1.898	1.223	148.913	710.722	546.489	0,769	0,842
2.800,00	1.662	1.013	109.147	606.910	487.208	0,803	0,868
2.850,00	1.360	788	70.375	483.176	405.983	0,840	0,889
2.900,00	984	546	35.734	338.108	298.725	0,884	0,898
2.925,00	763	420	21.594	257.827	233.732	0,907	0,889
2.970,00	323	199	4.729	106.038	100.459	0,947	0,772
2.985,00	163	142	2.066	54.152	50.968	0,941	0,553

11.2.1 Par de salida

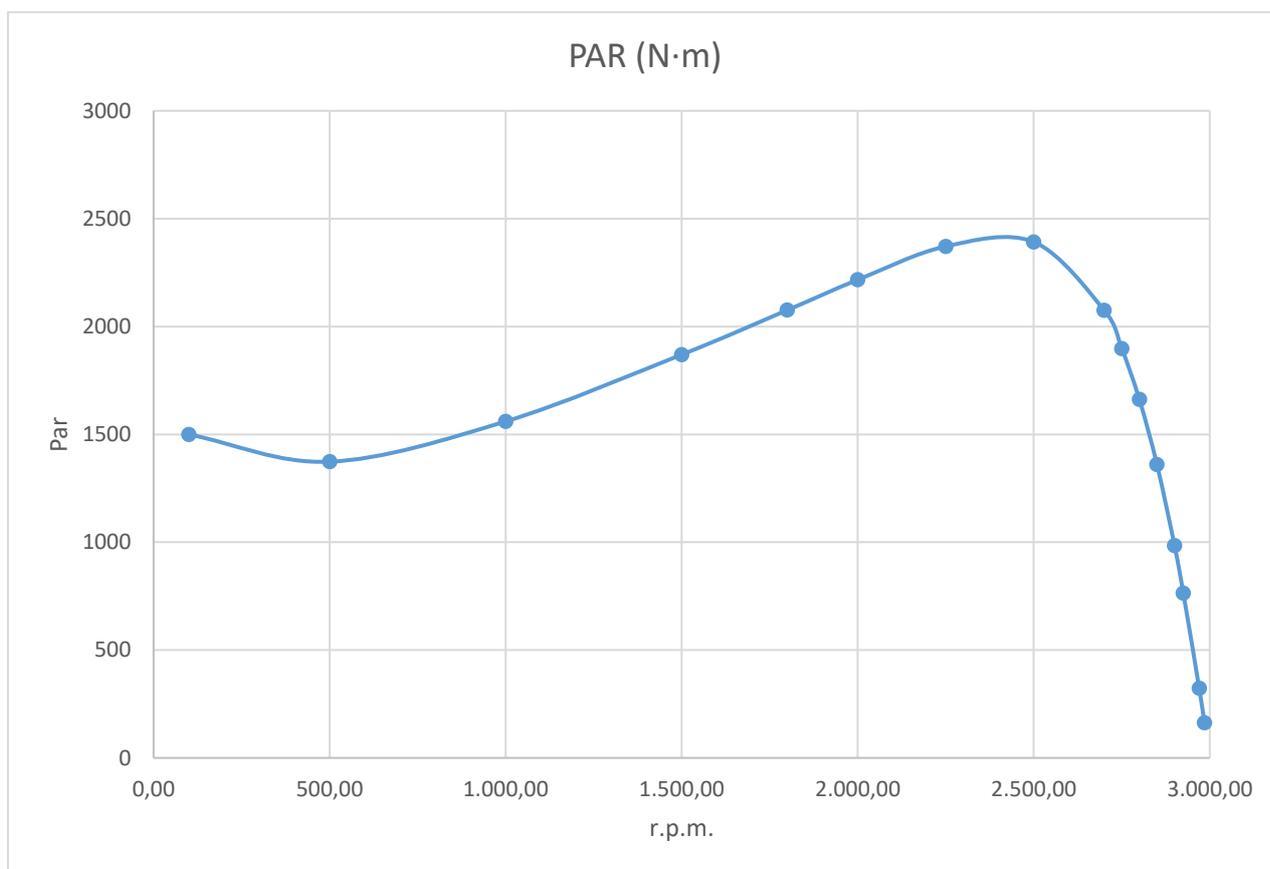


Figura 43: Curva Par-Velocidad del modelo final. (Fuente: Elaboración propia)

En la curva de par vemos que el arranque se produce con 4 veces el par nominal, $1500 N \cdot m$. Y un par máximo al 20% de deslizamiento de $2400 N \cdot m$, 6.7 veces el par nominal. Claramente sigue teniendo la forma característica de los motores con clasificación NEMA A.

11.2.2 Corriente absorbida

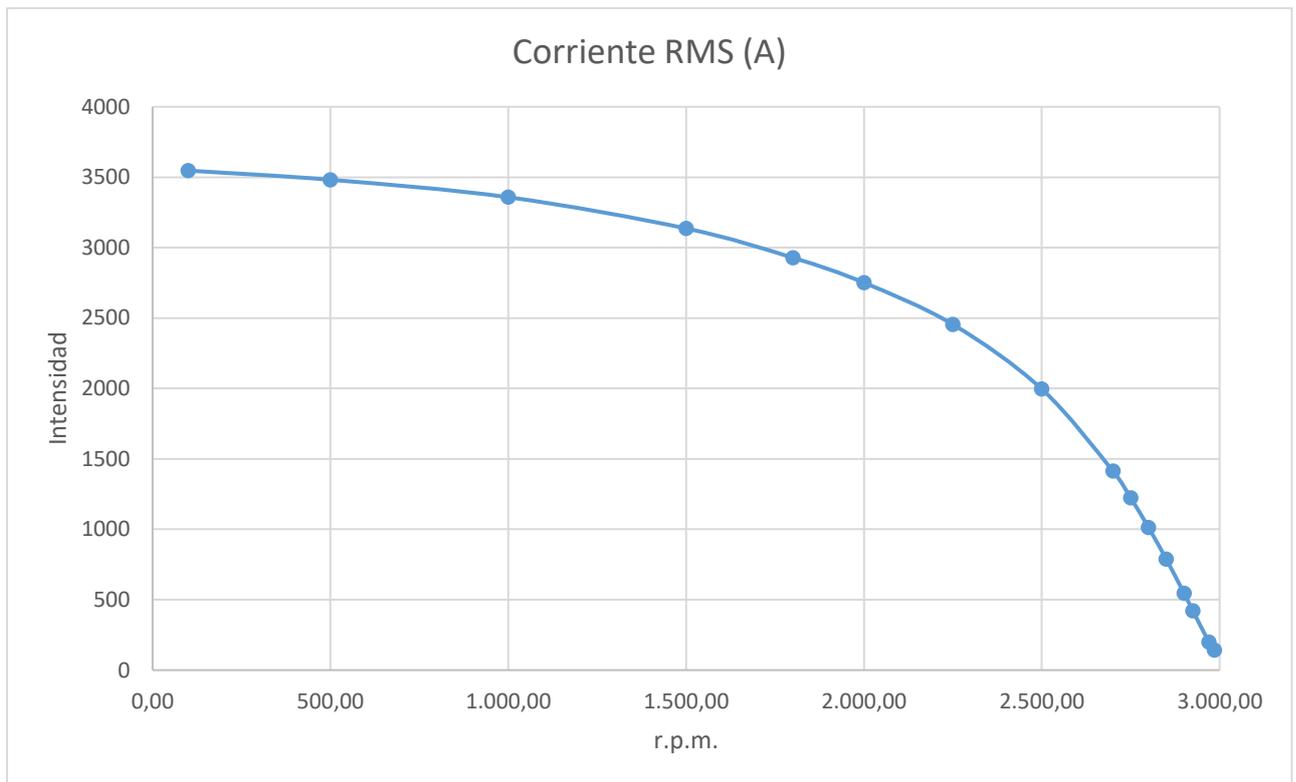


Figura 44: Curva Corriente-Velocidad del modelo final. (Fuente: Elaboración propia)

La evolución de la corriente con la velocidad es la característica, y la corriente en el arranque son 3550^a, 16 veces la corriente nominal.

11.2.3 Potencia

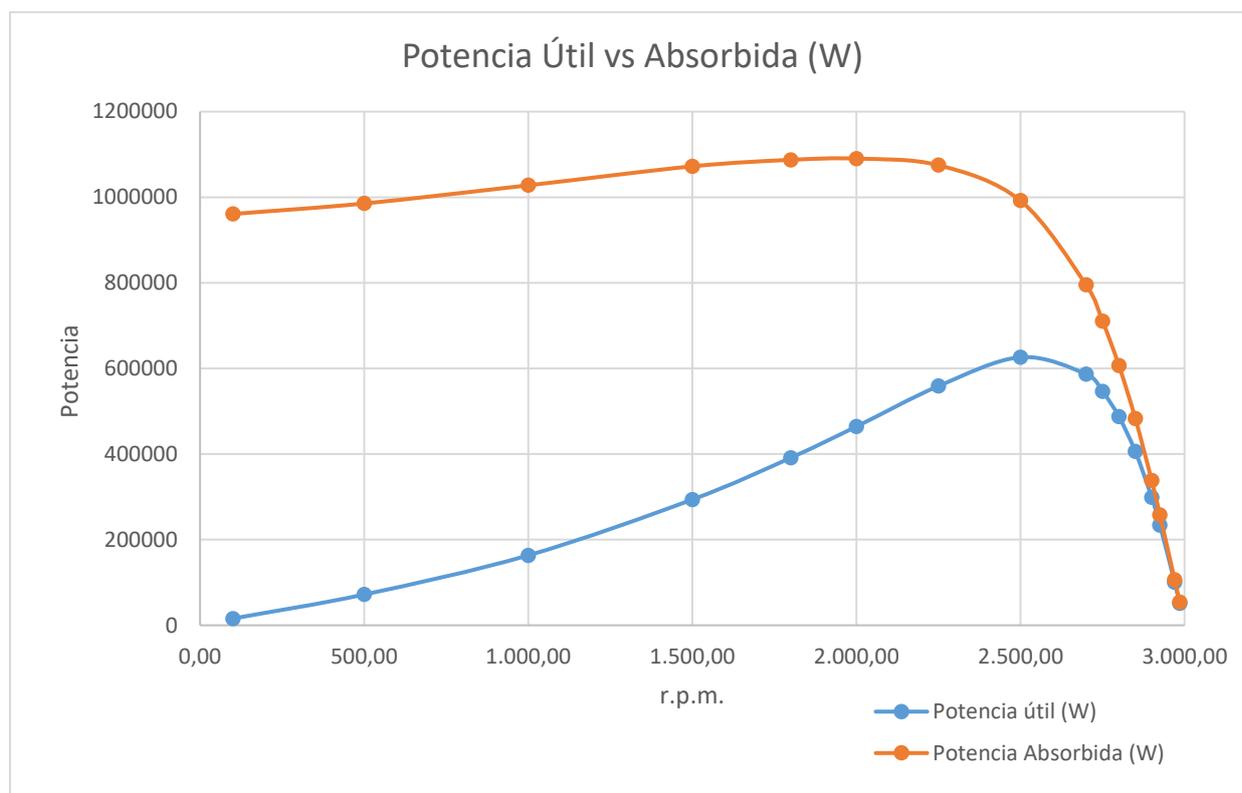


Figura 45: Curvas de Potencia-Velocidad del modelo final. (Fuente: Elaboración propia)

En la superposición de potencias observamos la evolución de éstas. Al inicio el rendimiento es nulo, ya que toda la potencia absorbida se disipa en pérdidas joule, se magnetiza el núcleo y se inicia el movimiento. A medida que aumenta la velocidad la potencia desarrollada aumenta y disminuye la absorbida, aumentando el rendimiento.

11.2.4 Rendimiento

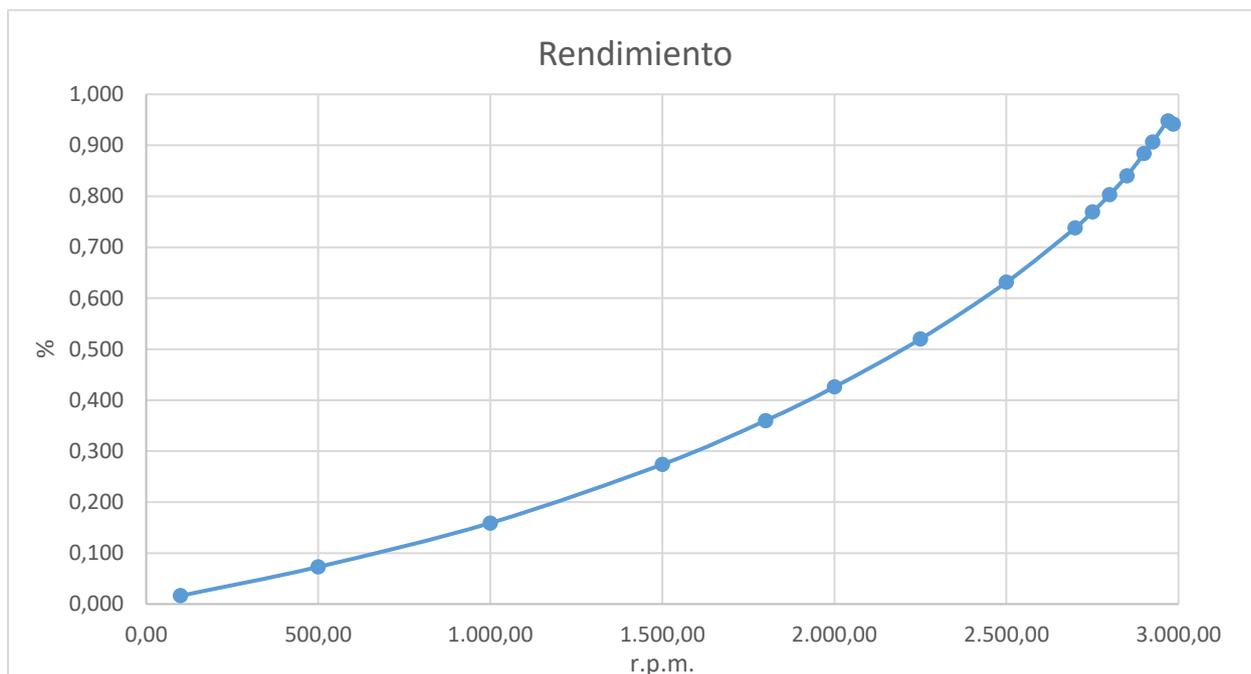


Figura 46: Curva de Rendimiento-Velocidad del modelo final. (Fuente: Elaboración propia)

Se confirma el comportamiento descrito en la comparación de potencias, aumentando paulatinamente a medida que se acerca al régimen nominal.

11.2.5 Factor de potencia

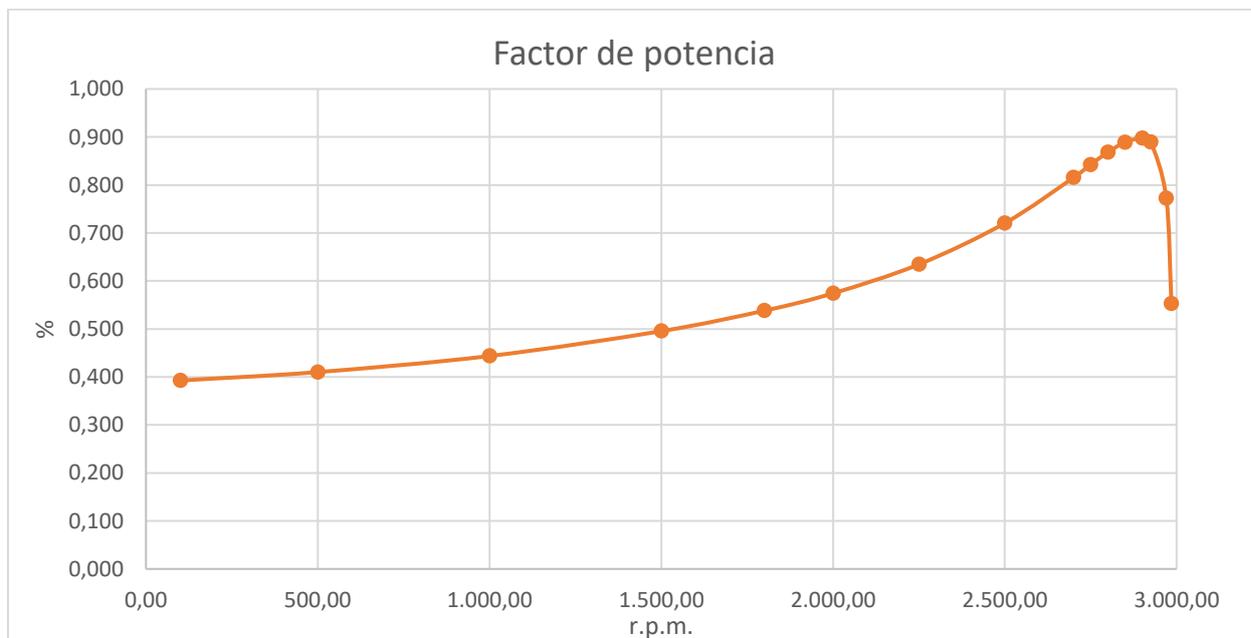


Figura 47: Curva de Factor de potencia-Velocidad del modelo final. (Fuente: Elaboración propia)

El factor de potencia aumenta al acercarse la velocidad al régimen nominal, donde la mayor parte de la potencia aparente absorbida tiene componente activa, que se transforma en potencia útil a través del rendimiento, y siendo la parte reactiva la necesaria para magnetizar el núcleo, incluyendo las pérdidas de ésta debidas a la dispersión.

11.3 COMPARACIÓN DE MODELO INICIAL Y FINAL

Se van a comparar ambos modelos mediante la superposición de sus respectivas curvas características.

11.3.1 Par

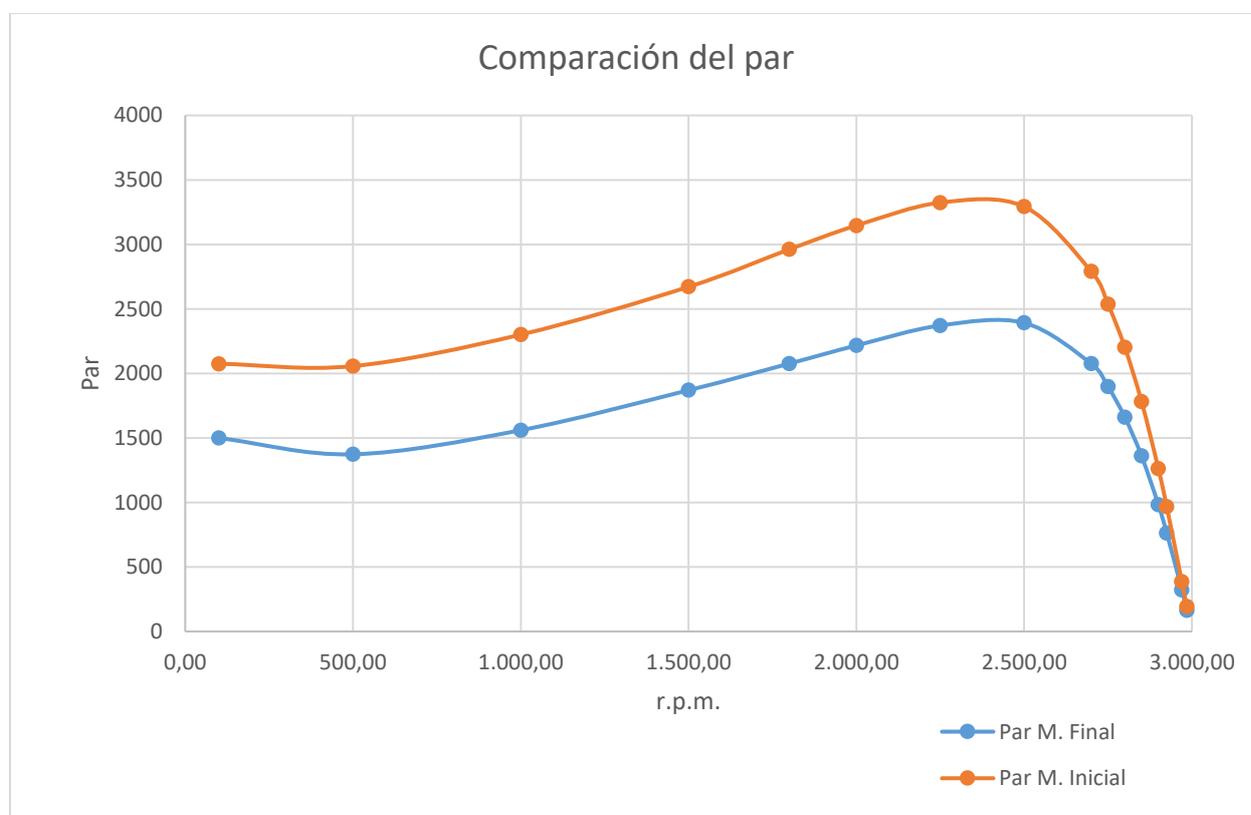


Figura 48: Curvas de par. (Fuente: Elaboración propia)

El par obtenido ha disminuido durante el aumento de velocidad, pero manteniéndose similar en torno al punto de trabajo.

11.3.2 Corriente

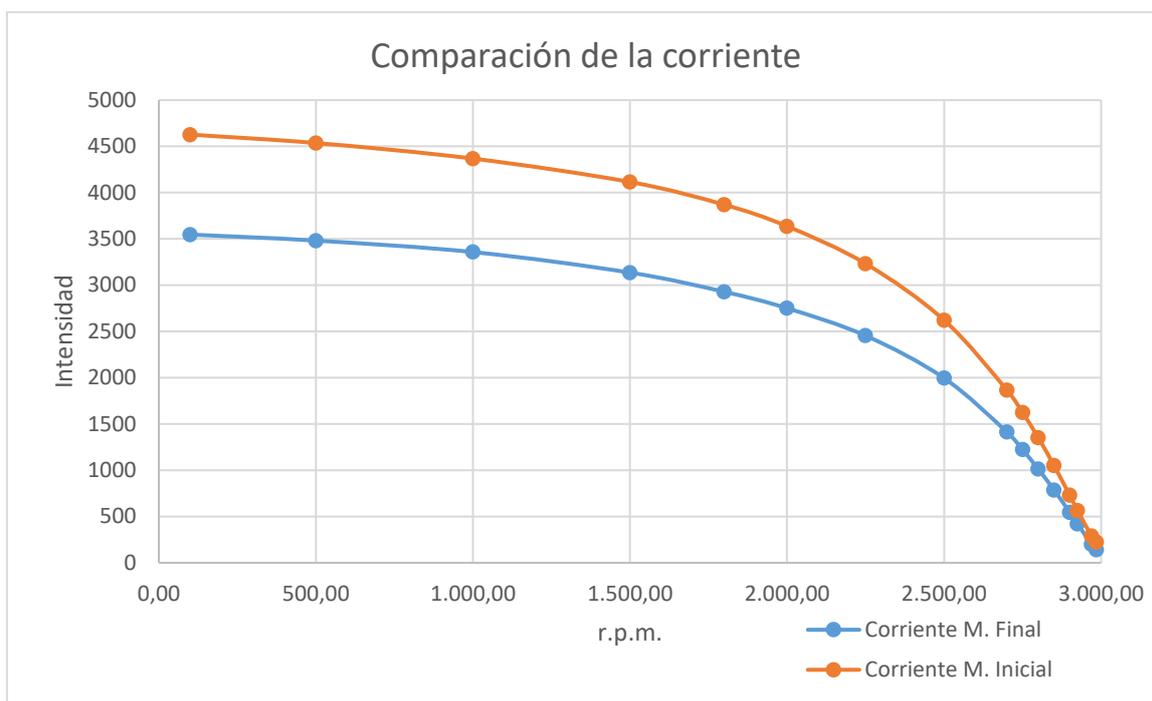


Figura 49: Curvas de corriente. (Fuente: Elaboración propia)

La corriente absorbida también disminuye de forma general, siendo similar cerca del vacío. Esto, junto con la diferencia en el par, tendrá implicaciones en las potencias y rendimientos.

11.3.3 Potencia útil

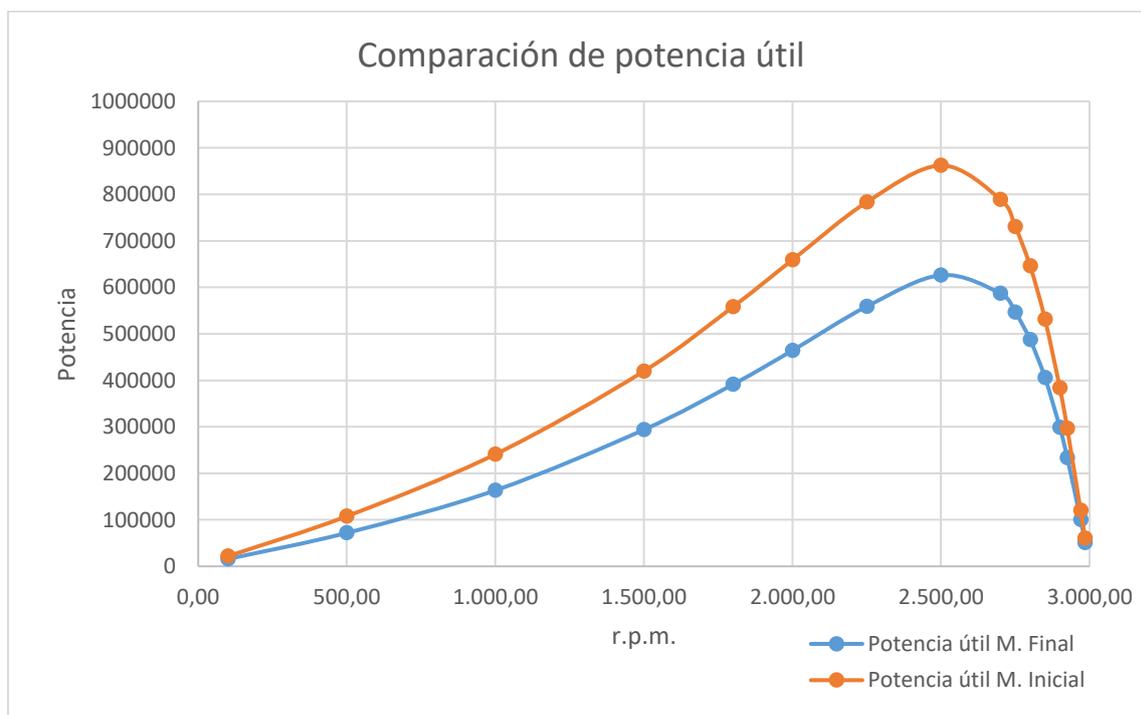


Figura 50: Curvas de potencia útil. (Fuente: Elaboración propia)

La potencia útil es un fiel reflejo del par obtenido, siendo menor en el modelo final, excepto en las zonas cercanas al régimen nominal. Esto en verdad, hará que las pérdidas sean menores durante el arranque.

11.3.4 Potencia absorbida

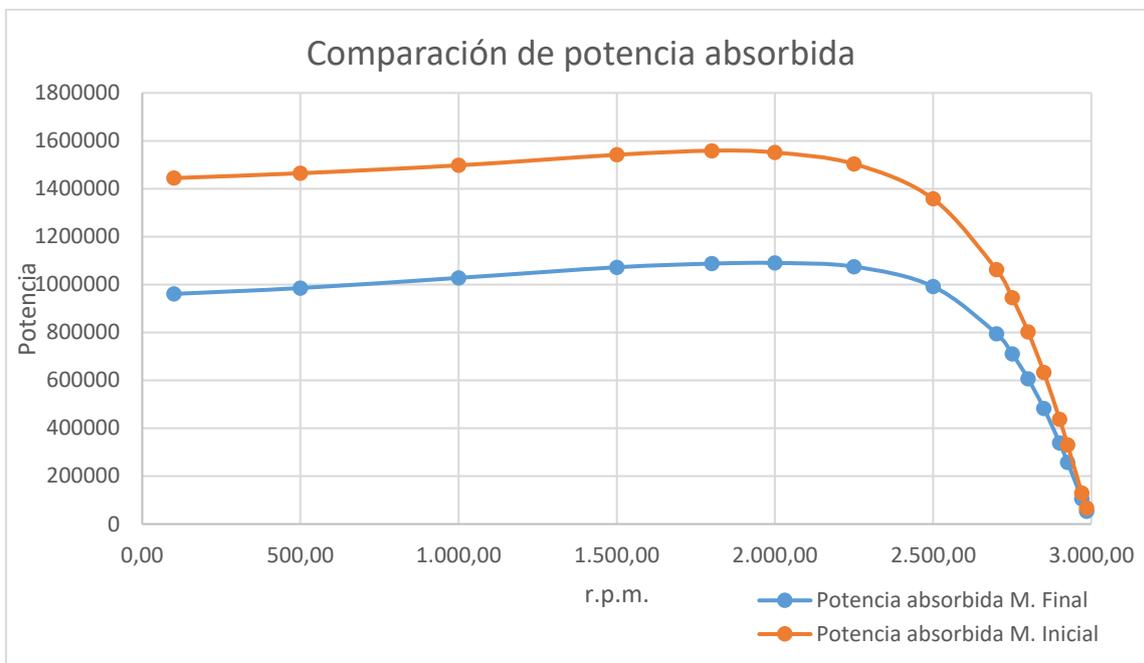


Figura 51: Curvas de potencia absorbida. (Fuente: Elaboración propia)

El modelo final, absorbe menos potencia durante el arranque. Esto hace que los arranques sean más eficientes y económicos.

11.3.5 Rendimiento

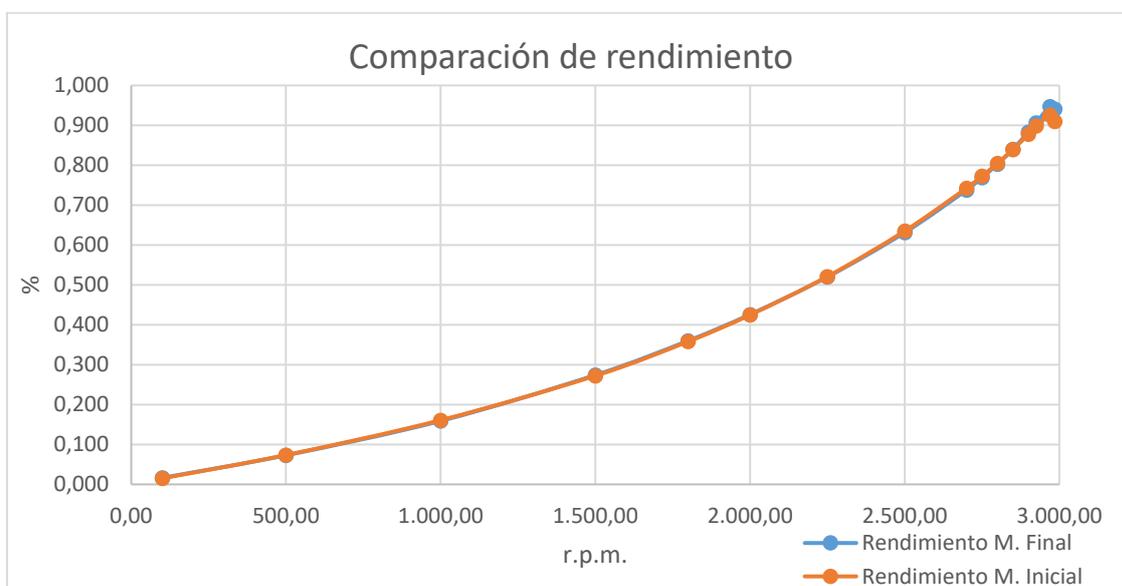


Figura 52: Curvas de rendimiento. (Fuente: Elaboración propia)

El rendimiento de ambos modelos se mantiene casi idéntico con la variación de velocidad, excepto en torno al punto de trabajo, donde se hace ligeramente mayor el del modelo final.

11.3.6 Factor de potencia

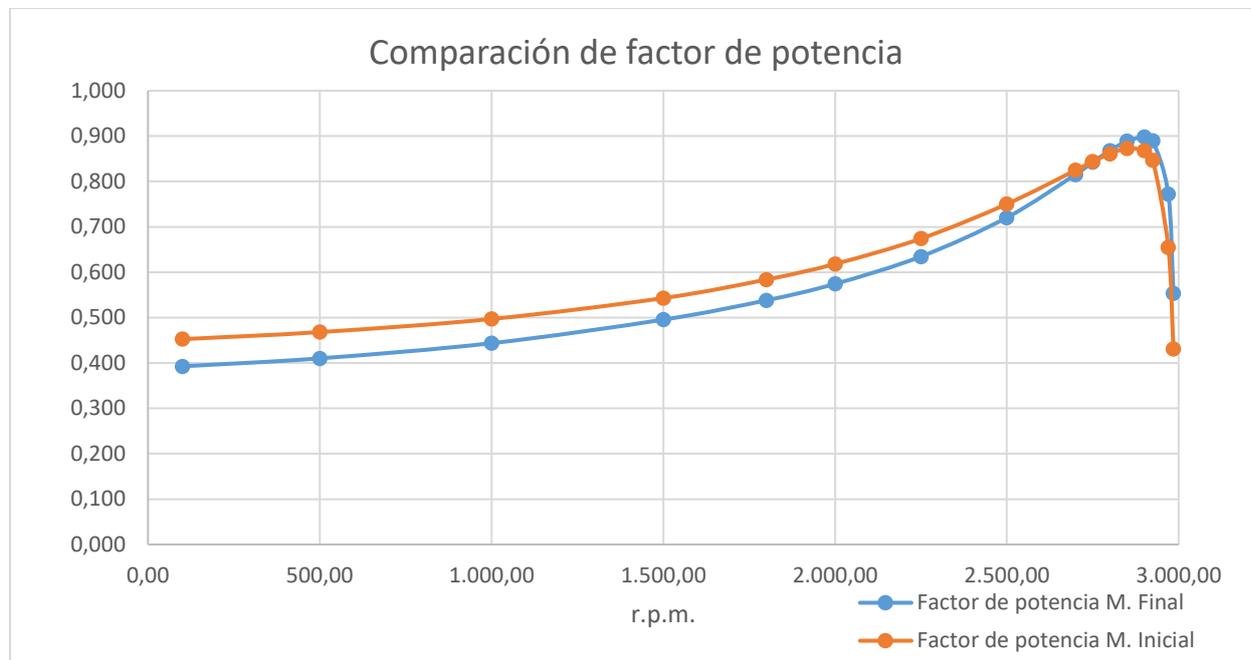


Figura 53: Curvas de factor de potencia. (Fuente: Elaboración propia)

El factor de potencia del modelo final es ligeramente menor durante el arranque, sin embargo, se impone en el tramo final.

11.4 MODELO FINAL EN RÉGIMEN NOMINAL

En la curva de Par-Velocidad se encuentra que el régimen nominal se produce para una velocidad de 2966 r.p.m. siendo el deslizamiento del 1.13%. Aun así, el punto de trabajo siempre será determinado por el par resistente al que se conecte el motor.

Tabla 9: Datos de régimen nominal del modelo final. (Fuente: Elaboración propia)

Modelo final	
Par (N·m)	359
$P_{\text{Útil}}$ (W)	111.598
$P_{\text{Absorbida}}$ (W)	118.159
I_{smedia} (A)	217
S (VA)	150.173
λ	0,787
η	0,944
$\eta \cdot \lambda$	0,743

12 CONCLUSIONES

El trabajo realizado parte de unas especificaciones objetivo, las cuales no se ven cumplidas por el modelo inicial que se desarrolla en primera instancia. Si bien dicho modelo no se ajustaba con demasiada precisión a dichas especificaciones, se emprende un trabajo de mejora de sus características de funcionamiento para alcanzar las deseadas, o incluso superarlas si fuera posible.

El modelo inicial presentaba menor valor de rendimiento y factor de potencia de lo especificado, y además excedía la potencia deseada en su punto de trabajo, estando los 110kW objetivo en un valor de deslizamiento excesivamente pequeño.

Para salvar las carencias de dicho modelo inicial era necesario llevar a cabo una optimización de dicho modelo, la cual permitiera obtener unas condiciones de trabajo adecuadas, tal y como se ha conseguido en el desarrollo del proyecto.

Para conseguir ese objetivo se realizó una parametrización; con ella se consiguió determinar cómo cambian las características del motor con su geometría, y dentro de qué límites, que es el paso previo e indispensable para poder plantear una optimización.

La optimización se llevó a cabo en dos fases. Una para el rotor, y lo concerniente a él; y otra para el estator, usando el rendimiento y el factor de potencia como funciones objetivo.

En ambas optimizaciones se ha conseguido mejorar tanto el rendimiento, como el factor de potencia, acercando el modelo optimizado a las especificaciones deseadas en primer lugar.

Al comparar el modelo obtenido con el inicial, encontramos curvas con un par menos elevado, lo mismo ocurre con la potencia. Como se había dicho, el modelo inicial tenía un exceso de potencia de salida, lo cual no ocurre con el modelo final.

Asimismo, la corriente es considerablemente menor en el modelo final que en el inicial, ajustándose a las densidades de corriente del diseño.

Se confirma cómo en el punto de trabajo, las especificaciones conseguidas son muy buenas y próximas a las de diseño.

En definitiva, el trabajo de diseño es bueno, y la optimización consigue llegar a un modelo que se ajusta a lo deseado, siendo el modelo final el de un motor de alta eficiencia, con características similares a motores reales que se encuentran en el mercado.

13 PRESUPUESTO FINAL

El presupuesto de ejecución por contrata del presente proyecto técnico, considerándose desde los aspectos formativos hasta el propio desarrollo del proyecto escrito, asciende a un total de **18.796,63€** (dieciocho mil setecientos noventa y seis euros y sesenta y tres céntimos).

Firmado, Héctor Fernández Rebolleda.

DOCUMENTO N°2: ANEXOS

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1	DATOS DE PARTIDA	9
1.1	ESPECIFICACIONES	9
1.2	CARACTERÍSTICAS EN CONDICIONES ASIGNADAS	9
2	CÁLCULOS	9
2.1	ANEXO 1: DISEÑO DEL MODELO DE REFERENCIA	9
2.1.1	Potencia total absorbida	9
2.1.2	<i>Output Coefficient</i>	10
2.1.3	Producto <i>D2L</i>	10
2.1.4	Flujo magnético por polo.....	11
2.1.5	Longitud de entrehierro.....	12
2.1.6	Diseño del devanado	12
2.1.7	Diseño de los conductores del estator	13
2.1.8	Diseño del núcleo del estator.....	14
2.1.9	Diseño de las ranuras del rotor	15
2.1.10	Diseño del núcleo del rotor	16
2.1.11	Diseño del anillo de cortocircuito.....	16
3	JMAG-EXPRESS.....	17
3.1	ANEXO 2: DIMENSIONADO DEL MODELO DE REFERENCIA.....	17
3.1.1	Geometría.....	17
3.1.2	Dimensiones.....	18
3.1.3	Materiales	18
3.1.4	Devanado	20
4	JMAG-DESIGNER	23
4.1	ANEXO 3: DEFINICIÓN DEL ESTUDIO	23
4.1.1	Propiedades del estudio: <i>Step control</i>	24
4.1.2	Propiedades del estudio: <i>Conversion</i>	25
4.1.3	Propiedades del estudio: <i>Circuit</i>	26
4.1.4	Propiedades del estudio: <i>Parallel computing</i>	27

4.1.5	Propiedades del estudio: <i>Solver</i>	28
4.1.6	Propiedades del estudio: <i>ICCG</i>	29
4.1.7	Propiedades del estudio: <i>Nonlinear</i>	30
4.1.8	Condiciones de material	30
4.1.9	Condiciones de funcionamiento	34
4.1.10	Condiciones de funcionamiento: <i>Boundary</i>	35
4.1.11	Condiciones de funcionamiento: <i>Current</i>	36
4.1.12	Condición de funcionamiento: <i>Motion</i>	38
4.1.13	Condición de funcionamiento: <i>Output</i>	39
4.1.14	Circuito	40
4.1.15	Mallado	43
4.2	ANEXO 4: ESTUDIO DEL MODELO INICIAL	47
4.2.1	Estudio paramétrico a distintas velocidades	47
4.2.2	Estudio a régimen nominal.....	51
4.2.3	Pérdidas en el hierro.....	51
4.3	ANEXO 4: EDITOR GEOMÉTRICO.....	53
4.4	ANEXO 5: PARAMETRIZACIÓN GEOMÉTRICA.....	55
4.4.1	Aumento del diámetro.....	57
4.4.2	Acercamiento de las barras del rotor al entrehierro.....	57
4.4.3	Disminución del área de las barras del rotor	58
4.4.4	Aumento del área de las ranuras del estator.....	59
4.5	ANEXO 6: OPTIMIZACIÓN.....	59
4.5.1	Función Objetivo.....	60
4.5.2	Casos iniciales.....	62
4.5.3	Opciones de optimización	62
4.6	ANEXO 7: OPTIMIZACIÓN DEL ESTATOR	64
4.6.1	Parámetros geométricos.....	64
4.6.2	Función Objetivo.....	64
4.6.3	Casos iniciales.....	64

4.6.4	Opciones de optimización	65
5	ANEXO 8: EXCEL.....	65

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1: RESULTADOS DEL MODELO INICIAL. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	51
TABLA 2: MEDIDAS DEL AUMENTO DEL DIÁMETRO. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	57
TABLA 3: VARIACIÓN GEOMÉTRICA DEL ACERCAMIENTO DE LAS BARRAS. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	57
TABLA 4: VARIACIÓN GEOMÉTRICA DE LAS DIMENSIONES DE LAS BARRAS DEL ROTOR. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	59
TABLA 5: VARIACIÓN DEL ANCHO DE LAS RANURAS DEL ESTATOR. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	59
TABLA 6: RANGO DE VALORES PARA LA OPTIMIZACIÓN GEOMÉTRICA DEL ROTOR. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	60

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: TIPOLOGÍA DE ROTOR Y ESTATOR DEL MODELO INICIAL. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA MEDIANTE JMAG).....	17
FIGURA 2: LISTADO DE MEDIDAS EN MILÍMETROS DEL ROTOR, ESTATOR, Y ANILLO DE CORTOCIRCUITO. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA MEDIANTE JMAG).....	18
FIGURA 3: DATOS CARACTERÍSTICOS DE LOS MATERIALES. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA MEDIANTE JMAG).....	19
FIGURA 4: CURVA BH DEL ACERO LAMINADO DE ROTOR Y ESTATOR. (FUENTE: JMAG, CATÁLOGO DE MATERIALES).....	19
FIGURA 5: CURVA DE PÉRDIDAS EN EL HIERRO A 50HZ EN FUNCIÓN DE LA DENSIDAD DE FLUJO MAGNÉTICO. (FUENTE: JMAG, CATÁLOGO DE MATERIALES).....	20
FIGURA 6: DATOS DEL DEVANADO. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA MEDIANTE JMAG).....	21
FIGURA 7: DIAGRAMA DE RANURAS DEL DEVANADO. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA MEDIANTE JMAG).....	21
FIGURA 8: DIAGRAMA DE DEVANADO DEL ESTATOR. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA MEDIANTE JMAG).....	22
FIGURA 9: DEVANADO DEL ESTATOR SOBRE EL MODELO GEOMÉTRICO. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA MEDIANTE JMAG).....	22
FIGURA 10: PANTALLA DE INICIO DE JMAG-DESIGNER. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).....	23
FIGURA 11: STEP CONTROL, VENTANA. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA MEDIANTE JMAG).....	24
FIGURA 12: FULL MODEL CONVERSIÓN, VENTANA. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA MEDIANTE JMAG).....	25
FIGURA 13: CIRCUIT SETTINGS, VENTANA. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA MEDIANTE JMAG).....	26
FIGURA 14: PARALLEL COMPUTING SETTINGS, VENTANA. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA MEDIANTE JMAG).....	27
FIGURA 15: SOLVER CALCULATION TOOL, VENTANA. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA MEDIANTE JMAG).....	28
FIGURA 16: ICCG, VENTANA. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA MEDIANTE JMAG).....	29
FIGURA 17: NONLINEAR CALCULATION, VENTANA. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA MEDIANTE JMAG).....	30
FIGURA 18: LISTADO DE MATERIALES. (FUENTE: JMAG).....	31
FIGURA 19: CONDICIÓN DE MATERIAL DEL ESTATOR. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA MEDIANTE JMAG).....	32
FIGURA 20: CONDICIÓN DE MATERIAL DEL ROTOR. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA MEDIANTE JMAG).....	32

FIGURA 21: CONDICIÓN DE MATERIAL DEL DEVANADO DEL ESTATOR. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA MEDIANTE JMAG)	33
FIGURA 22: CONDICIÓN DE MATERIAL DE LAS BARRAS DEL ROTOR. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA MEDIANTE JMAG)	33
FIGURA 23: ÁRBOL DESPLEGABLE CON MATERIALES. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA MEDIANTE JMAG)	34
FIGURA 24: LISTA DE CONDICIONES PARA EL ESTUDIO. (FUENTE: JMAG)	34
FIGURA 25: BOUNDARY CONDITIONS, LISTADO. (FUENTE: JMAG)	35
FIGURA 26: CURRENT CONDITIONS, LISTADO. (FUENTE: JMAG)	36
FIGURA 27: FEM COIL CONDITION. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA MEDIANTE JMAG)	36
FIGURA 28: FEM CONDUCTOR CONDITION. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA MEDIANTE JMAG)	37
FIGURA 29: GROUP (FEM CONDUCTOR): CAGE. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA MEDIANTE JMAG)	37
FIGURA 30: MOTION CONDITION, LISTADO. (FUENTE: JMAG)	38
FIGURA 31: ROTATION CONDITION. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA MEDIANTE JMAG)	38
FIGURA 32: OUTPUT CONDITIONS, LISTADO. (FUENTE: JMAG)	39
FIGURA 33: NODAL FORCE CONDITION. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA MEDIANTE JMAG)	40
FIGURA 34: FEM COIL DEL CIRCUITO. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA MEDIANTE JMAG)	40
FIGURA 35: FUENTE DE TENSIÓN TRIFÁSICA. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA MEDIANTE JMAG)	41
FIGURA 36: RECORTE DEL BLOQUE DE JAULA DE ARDILLA. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA MEDIANTE JMAG)	42
FIGURA 37: BLOQUE DE JAULA DE ARDILLA. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA MEDIANTE JMAG)	42
FIGURA 38: CIRCUITO COMPLETO. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA MEDIANTE JMAG)	43
FIGURA 39: MALLADO, PRIMER AJUSTE. (FUENTE: JMAG)	44
FIGURA 40: MALLADO, SEGUNDO AJUSTE. (FUENTE: JMAG)	44
FIGURA 41: MALLADO, TERCER AJUSTE. (FUENTE: JMAG)	45
FIGURA 42: MALLADO DE ESTATOR Y ROTOR. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA MEDIANTE JMAG)	45
FIGURA 43: MALLADO, DETALLE DEL ENTREHIERRO. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA MEDIANTE JMAG)	46
FIGURA 44: CALIDAD DE LOS ELEMENTOS DE LA MALLA. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA MEDIANTE JMAG)	46
FIGURA 45: PARÁMETROS DE VELOCIDAD. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA MEDIANTE JMAG) ..	47
FIGURA 46: CASOS PARAMÉTRICOS DE VELOCIDAD. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA MEDIANTE JMAG)	48
FIGURA 47: CURVA DE CORRIENTE-VELOCIDAD DEL MODELO INICIAL. (FUENTE: JMAG)	49

FIGURA 48: CURVA DE PAR-VELOCIDAD DEL MODELO INICIAL. (FUENTE: JMAG).....	49
FIGURA 49: CURVA DE PÉRDIDAS JOULE-VELOCIDAD DEL MODELO INICIAL. (FUENTE: JMAG) ...	50
FIGURA 50: CURVA DE POTENCIA ABSORBIDA-VELOCIDAD DEL MODELO INICIAL. (FUENTE: JMAG)	50
FIGURA 51: CONDICIÓN DE PÉRDIDAS EN EL HIERRO. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA MEDIANTE JMAG)	52
FIGURA 52: BUCLE DE HISTÉRESIS DEL MÉTODO APPLY LOOP. (FUENTE: JMAG).....	53
FIGURA 53: VENTANA DEL EDITOR GEOMÉTRICO.	54
FIGURA 54: ACTIVACIÓN DE ECUACIONES EN EL EDITOR GEOMÉTRICO. (FUENTE: JMAG).....	54
FIGURA 55: EJEMPLO DE APLICACIÓN DE ECUACIONES AL EDITOR GEOMÉTRICO. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA MEDIANTE JMAG)	55
FIGURA 56: SELECCIÓN DE PARÁMETROS DE CAD. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA MEDIANTE JMAG)	56
FIGURA 57: GENERACIÓN DE CASOS PARAMÉTRICOS. (FUENTE: JMAG)	56
FIGURA 58: DISTANCIA SUPERIOR DE LAS BARRAS. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	57
FIGURA 59: LONGITUD DE LAS BARRAS, SEPARACIÓN ENTRE CENTROS. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	58
FIGURA 60: RADIO SUPERIOR DE LAS BARRAS. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).....	58
FIGURA 61: RADIO INFERIOR DE LAS BARRAS. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	58
FIGURA 62: ANCHO DEL DEVANADO. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).....	59
FIGURA 63: FUNCIÓN OBJETIVO DE LA OPTIMIZACIÓN. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA MEDIANTE JMAG)	61
FIGURA 64: CASOS INICIALES USADOS EN LA OPTIMIZACIÓN. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA MEDIANTE JMAG).....	62
FIGURA 65: OPCIONES DE LA OPTIMIZACIÓN CON GA. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA MEDIANTE JMAG)	63
FIGURA 66: PARÁMETROS DE CAD DE LA OPTIMIZACIÓN DEL ESTATOR. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA MEDIANTE JMAG)	64
FIGURA 67: OPCIONES DEL GA DE LA OPTIMIZACIÓN DEL ESTATOR. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA MEDIANTE JMAG)	65

1 DATOS DE PARTIDA

1.1 ESPECIFICACIONES

Estimación de funcionamiento en régimen nominal para dimensionar la máquina:

- Potencia nominal: $P = 110kW$
- Frecuencia de la red: $f = 50Hz$
- Tensión de alimentación: $U = 400/230V$
- Velocidad de sincronismo: $n_s = 3000rpm$
- Rendimiento: $\eta = 90\%$
- Factor de potencia/coseno de phi: $\cos\varphi = 0.85$

1.2 CARACTERÍSTICAS EN CONDICIONES ASIGNADAS

- Número de polos: Siendo la velocidad de sincronismo 3000 *r.p.m.*, y siendo la frecuencia de red la establecida en España, $p = \frac{120f}{n_s} = 2 \text{ polos}$.
- La velocidad nominal y por tanto, el deslizamiento, dependerán de la curva de Par-Velocidad que resulte del diseño del motor, aunque se estima que el deslizamiento habitual debería estar entre el 5% y el 1% en motores de estas potencias.

2 CÁLCULOS

2.1 ANEXO 1: DISEÑO DEL MODELO DE REFERENCIA

En este apartado se procede a diseñar en base a fundamentos teóricos, las dimensiones principales de la máquina que será objeto del trabajo.

2.1.1 Potencia total absorbida

La potencia aparente absorbida por el estator será:

$$Q = \frac{P}{\eta \cdot \lambda} = \frac{110kW}{0.9 \cdot 0.85} = 143.79kVA$$

2.1.2 Output Coefficient

Es un parámetro fundamental que permite relacionar las dimensiones principales de la máquina con características electromagnéticas de su funcionamiento.

$$C_o = 1.11 \cdot \pi^2 \cdot B_{av} \cdot ac \cdot k_{ws} \cdot 10^{-3}$$

Dado que no tenemos ninguno de dichos parámetros, se debe establecer con qué valores se pretende que funcione la máquina. Para motores de este tamaño y potencia lo normal sería que la densidad de flujo magnético en el entrehierro se situara entre 0.7T y 0.9T, por lo que escojo un valor medio de $B_{av} = 0.8T$. Este parámetro determina la magnetización necesaria para la máquina; un valor alto supone dientes del estator más anchos, y además aumenta las pérdidas en el núcleo de hierro. Debemos también tener en cuenta que un valor mayor requerirá una mayor corriente de magnetización, lo que empobrece el factor de potencia en régimen nominal.

Igualmente, la carga eléctrica específica, o en inglés *specific electric loading*, debe estar entre los 43500 y 60000 Amperios-conductor/metro. En general se deberá coger el máximo posible, de forma que la densidad de corriente en los conductores esté cerca del límite superior; el cobre es la parte más cara de la máquina en proporción, por lo que optimizar el volumen de permite fabricar con menores costes. En este nuevo elijo un valor medio, ya que llevar al límite la densidad de corriente también aumenta las pérdidas de efecto Joule.

$$ac = 50000 \text{ Amperio} - \text{conductor}/m$$

El valor del factor de devanado aún no podemos saberlo, por lo que aplicamos un valor normal que luego será corregido:

$$k_{ws} = 0.955$$

Por tanto, el coeficiente de salida es:

$$C_o = 1.11 \cdot \pi^2 \cdot 0.8 \cdot 50000 \cdot 0.955 \cdot 10^{-3}$$

$$C_o = 418.5 \cong 419$$

2.1.3 Producto D^2L

Se relaciona la potencia aparente absorbida por la máquina con las dimensiones principales mediante el coeficiente de salida:

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

Debe tenerse en cuenta que la velocidad de sincronismo en esta ecuación se expresa en revoluciones por segundo y no en revoluciones por minuto.

$$D^2L = \frac{143.79kVA}{419 \cdot 50 \frac{rev}{s}} = 6.86 \cdot 10^{-3} (m^3)$$

A continuación, se debe establecer la relación entre el diámetro interno del estator, D , y la longitud axial de la máquina, L .

En motores de inducción, la corriente de magnetización disminuye, y por tanto aumenta el factor de potencia, cuanto mayor es el diámetro. Aunque esto también suele requerir aumentar el número de polos. El mejor factor de potencia se consigue cuando hay el número mínimo de polos, y mucho paso de polo. El paso de polo se mide en el diámetro interno del estator y se expresa:

$$\tau = \frac{\pi D}{p}$$

Se sabe que con $\frac{L}{\tau}$ entre 1 y 1.5 se obtienen resultados equilibrados de buen rendimiento y factor de potencia, por lo que tomo dicha relación como $\frac{L}{\tau} = 1.25$. Consecuentemente, se despejan las dimensiones principales de la máquina.

$$D = 151.79mm$$

$$L = 297.93mm$$

Estas medidas quedan modificadas al ver laminaciones prefabricadas a la venta por distintos distribuidores, en las cuales $D = 150mm$, por lo que $L = 304.88mm$ y la relación $\frac{L}{\tau} = 1.29$, estando aún en una buena proporción.

2.1.4 Flujo magnético por polo

Si se usan láminas de 0.5 milímetros de espesor, sabremos la cantidad exacta de láminas mediante la longitud de la máquina. Sin embargo, independientemente del espesor de las láminas, tendremos un factor de empaquetado. Dicho factor reduce la longitud axial real de la máquina, ya que las láminas no están juntas sin ningún tipo de separación, sino que suelen estar aisladas eléctricamente unas de otras. Un factor de laminación habitual es 0.95, es decir, 95% de la longitud real es hierro, y el 5% supone la separación entre láminas.

Esto es importante para calcular el flujo por polo, y posteriormente para el cálculo de pérdidas en el hierro (las laminaciones tienen un papel fundamental disminuyendo las pérdidas por corrientes de Eddy en los núcleos de acero).

El flujo por polo es la densidad de flujo media del entrehierro, multiplicada por el área de cada polo, es decir, el paso polar y la longitud real de hierro. Las longitudes se expresan en metros.

$$\phi = B_{av} \cdot \tau \cdot L_i = 0.8 \cdot 0.23561 \cdot 0.28963 = 54.6mWb$$

2.1.5 Longitud de entrehierro

La longitud del entrehierro es una de las medidas más importantes del motor de inducción, ya que a través del entrehierro se almacena la energía magnética. En la siguiente expresión se introduce el diámetro interno del estator expresado en milímetros.

$$l_g = 3.06 - \frac{6560}{2280 + D} = 0.36mm$$

Constructivamente, un entrehierro así es difícil de conseguir para una máquina de este tamaño, un valor más real sería:

$$l_g = 0.5mm$$

¿Podría conseguirse el entrehierro calculado? Sí, por supuesto, pero el coste de reducir tanto la tolerancia de las piezas, y, por tanto, el aumento de precisión de las máquinas supondría un aumento en el tiempo de producción y también en los costes de fabricación; por ello se opta por un entrehierro con un valor similar, pero más fácil de lograr. Es importante, cuando se diseña, tener en cuenta no solo los cálculos teóricos sino también la realidad de la industria y de los procesos de fabricación, que muchas veces condicionan el diseño de algunos productos.

2.1.6 Diseño del devanado

El número de ranuras por polo y por fase debe ser igual o superior a 2. En este caso se va a usar $q = 3$, ya que esto da lugar a 18 ranuras del estator:

$$S_s = q \cdot p \cdot m = 3 \cdot 2 \cdot 3 = 18 \text{ ranuras}$$

Esto se hace con la vista puesta en la futura combinación de ranuras estator/rotor, lo cual no es arbitrario como se comentará llegado el momento.

El paso de ranura del estator debe estar entre 7 y 45 milímetros. En este caso está situado en un valor hacia la mitad:

$$\tau_s = \frac{\pi D}{S_s} = 26.18mm$$

Para calcular el factor de devanado hay que calcular primero los factores de distribución y acortamiento. Para el factor de distribución calculamos primero el ángulo eléctrico de ranura:

$$\alpha_u = p \frac{\pi}{S_s} = 0.3491 \text{ rad}$$

El factor de distribución es entonces:

$$k_d = \frac{\sin \frac{q\alpha_u}{2}}{q \cdot \sin \frac{\alpha_u}{2}} = 0.96$$

El factor de acortamiento depende exclusivamente del número de ranuras del estator. Como en este caso el *coil pitch* va a ser de 9 ranuras, no existe acortamiento de ranuras, siendo el ángulo de ranura 20° tal y como hemos visto (0.3491 radianes), las 9 ranuras serán 180° , y el factor de acortamiento:

$$k_c = \sin \frac{180}{2} = 1$$

El factor de devanado es, por tanto:

$$k_{ws} = k_d \cdot k_c = 0.96$$

Debemos estimar la fuerza electromotriz inducida por fase en el devanado, conectado a 230V de la red:

$$E_s = 0.97 \cdot 230 = 223.1V$$

Calculamos ahora el número de vueltas en serie por fase:

$$T_s = \frac{E_s}{4.44 \cdot f \cdot \phi \cdot k_{ws}} = \frac{223.1}{4.44 \cdot 50 \cdot 54.6 \cdot 10^{-3} \cdot 0.96} = 19.17$$

El número total de conductores en motores trifásicos será seis veces el número de vueltas en serie y por fase:

$$N = 6 \cdot T_s = 115 \text{ conductores}$$

El número de conductores por ranura será:

$$n = \frac{N}{18} = 6.39 \cong 7 \text{ conductores por ranura}$$

Por tanto, el número de vueltas en serie por fase corregido es:

$$T_s = 21$$

A continuación, procede modificar el flujo por polo conocido T_s y k_{ws} :

$$\phi = \frac{E_s}{4.44 \cdot f \cdot T_s \cdot k_{ws}} = \frac{223.1}{4.44 \cdot 50 \cdot 21 \cdot 0.96} = 49.8mWb$$

Corregimos también el valor medio de densidad de flujo en el entrehierro:

$$B_{av} = \frac{\phi}{\tau \cdot L_i} = \frac{49.8 \cdot 10^{-3}}{0.23561 \cdot 0.28963} = 0.73T$$

2.1.7 Diseño de los conductores del estator

La corriente nominal en el devanado del estator deberá ser:

$$I_s = \frac{143790 VA}{3 \cdot 230 V} = 208.39A$$

Las densidades de corriente admisibles en las secciones de cobre están entre 3 y 8 Amperios por milímetro cuadrado. En principio no usaré el máximo por seguridad, pero si un valor elevado dentro del rango, para aprovechar el cobre todo lo posible.

$$J_s = 6 A/mm^2$$

El área necesaria del conductor de cobre será:

$$a_s = \frac{I_s}{J_s} = \frac{208.39}{6} = 34.73 \text{mm}^2$$

El diámetro del conductor de sección circular necesario sería:

$$D_s = \sqrt{\frac{4 \cdot a_s}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 34.73}{\pi}} = 6.65 \text{mm}$$

El siguiente diámetro normalizado sería de 7 milímetros, por lo que el área del conductor será:

$$a_s = 38.48 \text{mm}^2$$

Y la densidad de corriente en el devanado del estator será:

$$J_s = \frac{208.39}{38.48} = 5.41 \text{ A/mm}^2$$

El área total de los conductores de la ranura será todo el cobre en la ranura del estator:

$$A_s = n \cdot a_s = 269.36 \text{mm}^2$$

Si consideramos un factor de llenado del 60%, siendo esto el máximo, ya que habitualmente no encontraremos ranuras con un factor de llenado mejor que ese, el área mínima de ranura será:

$$A_{ss} = \frac{A_s}{0.6} = 448.93 \text{mm}^2$$

Las dimensiones exactas de la ranura se verán más adelante durante el modelado en JMAG-Express.

Es conveniente calcular la resistencia media de fase, para ello se calcula la longitud media de vuelta:

$$L_{mts} = 2 \cdot L + 2.3 \cdot \tau = 1.1485 \text{ metros}$$

Por lo que la resistencia por fase será:

$$r_s = \frac{\sigma \cdot T_s \cdot L_{mts}}{a_s} = \frac{1.8 \cdot 10^{-8} \cdot 21 \cdot 1.1485}{38.48 \cdot 10^{-6}} = 0.011 \Omega$$

Esto nos servirá más adelante para confirmar que se ha configurado correctamente el devanado en JMAG-Express.

2.1.8 Diseño del núcleo del estator

Para evitar altos valores de densidad de flujo magnético, y por tanto altas pérdidas en el hierro, deben establecerse valores límite de densidad de flujo en los dientes del estator y también en el núcleo de acero. Un valor habitual suele ser 1.7T, con lo que podemos establecer el ancho mínimo que deben tener los dientes, y la profundidad del núcleo.

- Ancho de los dientes:

$$B_{ts} = \frac{p \cdot \frac{\phi}{S_s}}{w_{ts} \cdot L_i} = 1.7T$$

$$w_{ts} = \frac{p \cdot \frac{\phi}{S_s}}{B_{ts} \cdot L_i} = 11.3mm$$

- Profundidad del núcleo:

$$B_{cs} = \frac{\frac{\phi}{2}}{d_{cs} \cdot L_i} = 1.5 T$$

$$d_{cs} = \frac{\frac{\phi}{2}}{B_{cs} \cdot L_i} = 60mm$$

Recordemos que estos no son valores medios, sino máximos que se pueden alcanzar.

2.1.9 Diseño de las ranuras del rotor

Para empezar, debemos elegir el número de ranuras, lo cual debe responder a unas reglas por las que se ha comprobado que determinadas combinaciones de ranuras provocan problemas de armónicos muy graves, pulsaciones en el par, etc. Por ello las **combinaciones prohibidas** son aquellas que, al restar al número de ranuras del estator, las del rotor se obtiene:

$$S_s - S_r = 0; \pm p; \pm 2p; \pm 3p; \pm 5p; \pm 1; \pm 2; \pm (p \pm 1); \pm (p \pm 2)$$

Del mismo modo tenemos combinaciones recomendadas, en este caso usaremos la combinación 18/23, donde la resta es $S_s - S_r = -5$, cumpliendo la condición anterior, y por tanto siendo una combinación segura.

La cantidad de cobre en las barras del estator normalmente es del orden del 65% del área de cobre en el devanado del estator, por lo que aproximamos:

$$A_r = \frac{0.65 \cdot A_s \cdot S_s}{23} = 137mm^2$$

Las dimensiones exactas de la barra se verán durante el modelado geométrico en JMAG-Express.

Dado que las barras de cobre se funden directamente sobre el núcleo de acero, el factor de llenado es unidad, y el área del conductor es igual al área de ranura. Procede ahora hallar la intensidad en las barras y comprobar que tienen una densidad de corriente aceptable.

$$I_b = \frac{2 \cdot m_s \cdot k_{ws} \cdot T_s}{S_r} \cdot I_s \cdot \cos \varphi = \frac{2 \cdot 3 \cdot 0.96 \cdot 21}{23} \cdot 208.39 \cdot 0.85 = 931 A$$

Por lo que la densidad de corriente en el rotor será:

$$J_r = \frac{931}{137} = 6.8 \text{ A/mm}^2$$

Se encuentra dentro del rango especificado de densidades de corriente, por lo que se toma como aceptable.

2.1.10 Diseño del núcleo del rotor

En este caso, la profundidad del núcleo está limitada por el diámetro externo, que es 149 milímetros, y además las barras del rotor también le restarán profundidad. Por tanto, constructivamente veremos cómo en principio, el diámetro del núcleo hasta la parte inferior de las barras será de aproximadamente 119 milímetros, al cual también debemos restarle el diámetro del eje. El diámetro del eje es como mínimo de 35 milímetro, por lo tanto, la profundidad del núcleo es:

$$d_{cr} = \frac{119 - 35}{2} = 42 \text{ mm}$$

Por tanto, podemos esperar que la densidad de flujo máxima en el rotor será:

$$B_{cr} = \frac{\frac{\phi}{2}}{d_{cr} \cdot L_i} = 2T$$

Habrà un valor elevado de densidad de flujo en el núcleo del rotor, si fuese superior sería preocupante, pero veremos que no es tan relevante al ser en el rotor, y que podremos reducir su valor durante la optimización.

2.1.11 Diseño del anillo de cortocircuito

La intensidad del anillo de cortocircuito se puede asumir que es casi completamente sinusoidal cuando los armónicos del entrehierro son pequeños. En ese caso, la corriente es casi sinusoidal gracias a la distribución de corrientes en las barras, siendo máxima en unas, y nula en otras alternativamente.

La intensidad en el anillo será:

$$I_{er} = \frac{I_b \cdot S_r}{\pi \cdot p} = \frac{931 \cdot 23}{\pi \cdot 2} = 3408A$$

Aplicando la misma densidad de corriente que en el rotor, $J = 6.8 \text{ A/mm}^2$, el área transversal del anillo será:

$$A_{er} = 501.84 \text{ mm}^2$$

Se usa por tanto una sección rectangular de 20x30 milímetros en la dimensión radial y axial respectivamente, dando lugar a un área de 600 mm^2 , reduciendo la densidad de corriente.

3 JMAG-EXPRESS

3.1 ANEXO 2: DIMENSIONADO DEL MODELO DE REFERENCIA

A continuación, se detalla la geometría creada mediante JMAG-Express, datos del devanado y demás características que definen el motor por completo conforme a los cálculos del Anexo 1.

3.1.1 Geometría

Se elige tipología de estator y rotor correspondiente al tipo A según la clasificación NEMA:

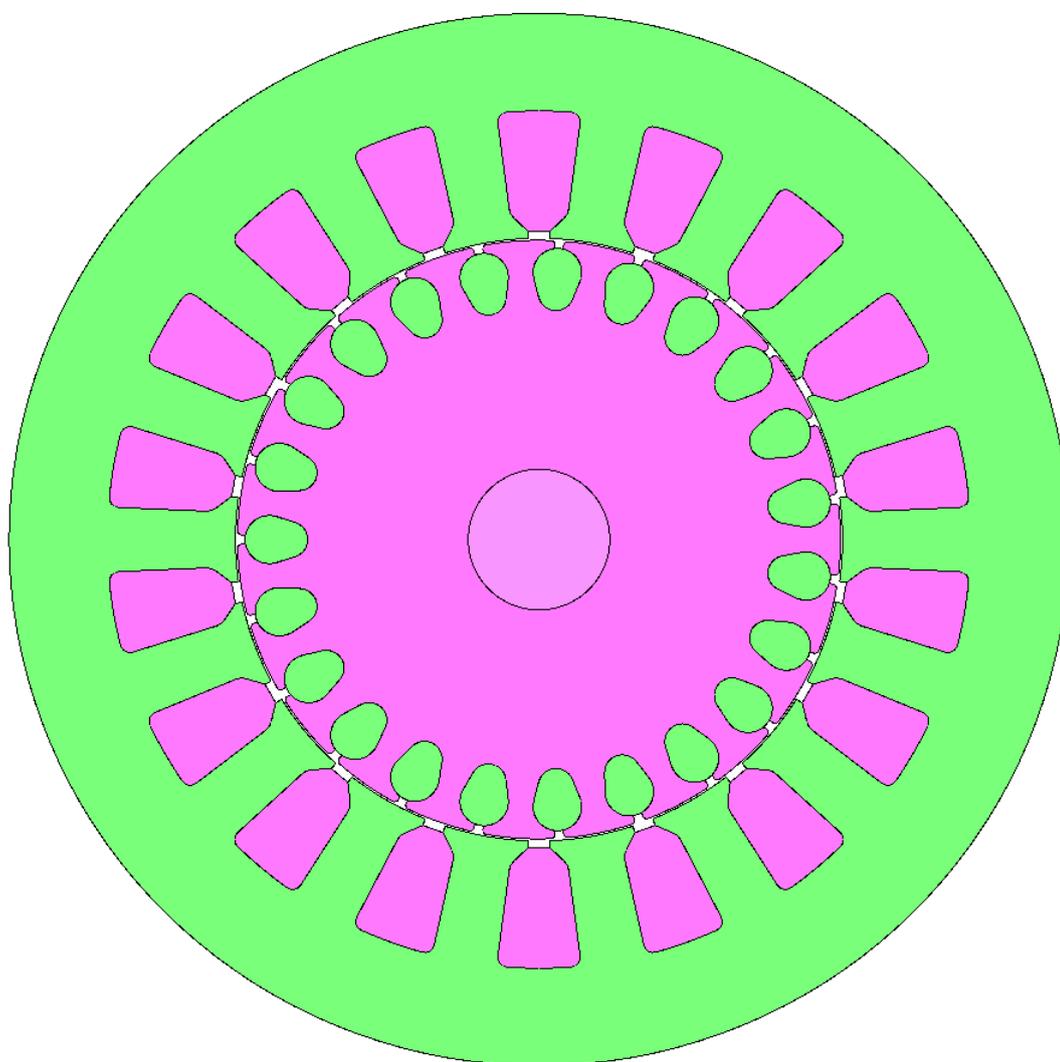


Figura 1: Tipología de rotor y estator del modelo inicial. (Fuente: Elaboración propia mediante JMAG)

3.1.2 Dimensiones

A continuación, se detallan todas las medidas que definen el modelo geométrico:

OUTD: Outer Diameter	261.9
GAP: Gap Length	0.5
Gap Type	Fix
HEIGHT: Stack Height	304
POLES: Number of Poles	2
stator : so_011	Modify...
SLOTS: Number of Slots	18
DS1: Stator Outside Diameter	261.9
DS2: Stator Bore Diameter	150
AngSlot: Angle of Slot	15
DSS: Depth of Stator Slot	31.7
WSSB: Width of Stator Slot-bot...	21
WSSO: Width of Stator Slot-op...	5.28
HSTT: Height of Stator Tooth-t...	1.7
AngSTT: Angle of Stator Tooth...	43.14
FRSSB: Fillet Radius at Stator Sl...	2.4
FRSST: Fillet Radius at Stator Sl...	3.6
im_rotor : rim_002	Modify...
BARS: Number of Secondary C...	23
RD1: Outside Diameter	149
RD2: Shaft Diameter	35
RL2: Bar Outer Side Radius	6
RL3: Bar Inner Side Radius	4.4
RC2: Bar Outer Center Depth	7.87
RC3: Distance between Bar Edg...	5.11
RW1: Slot Opening Width	2.2
RF1: Teeth Top R	0.655
End Ring	
Section Setting	Same
Section Type	Rectangle
CEH: Height	30
CEW: Width	20
CEP: Offset	0
CES: Effective Section Area(%)	100

Figura 2: Listado de medidas en milímetros del rotor, estator, y anillo de cortocircuito. (Fuente: Elaboración propia mediante JMAG)

3.1.3 Materiales

A continuación, se detallan los materiales escogidos para cada parte del motor, con sus datos característicos.

Materials		
Stator Core	Category	JFE_Steel - JN_Core
	Type	35JN300
	Density, kg/m ³	7650
Coil	Category	Copper
	Density, kg/m ³	8960
	Temperature, degC	20
	Base Temperature, degC	20
	Temperature Correction Factor, ppm/degC	0
Cage	Category	Copper
	Conductivity, S/m	6.45e+07
	Density, kg/m ³	8960
Rotor Core	Category	JFE_Steel - JN_Core
	Type	35JN300
	Density, kg/m ³	7650
Common Material Properties	Iron Loss Correction Factor	1

Figura 3: Datos característicos de los materiales. (Fuente: Elaboración propia mediante JMAG)

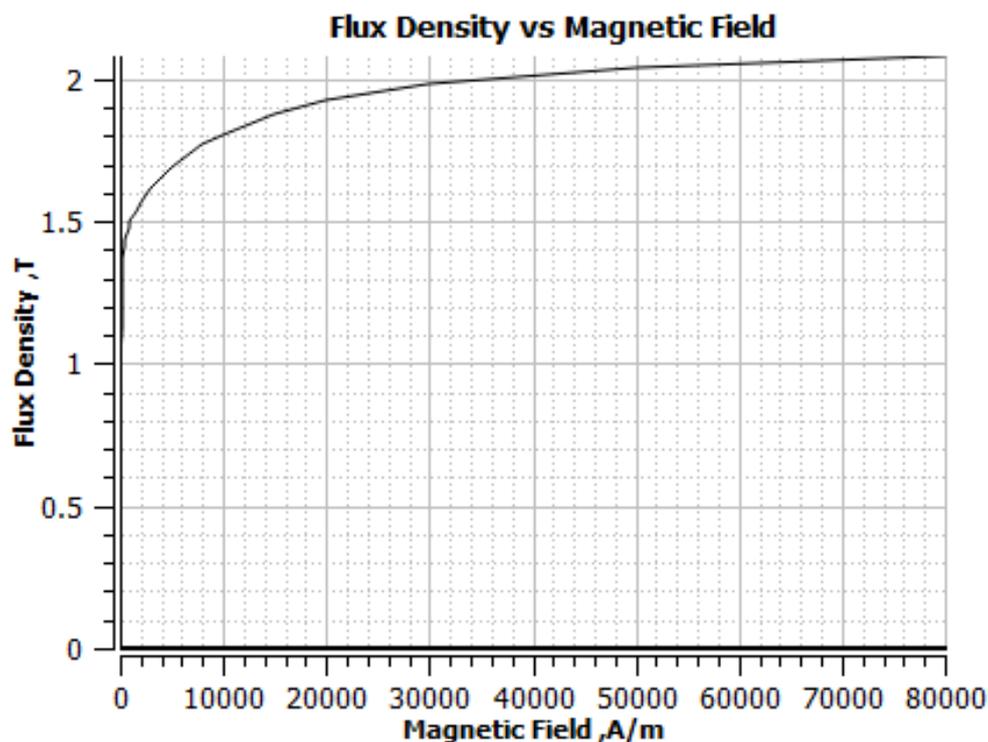


Figura 4: Curva BH del acero laminado de rotor y estator. (Fuente: JMAG, catálogo de materiales)

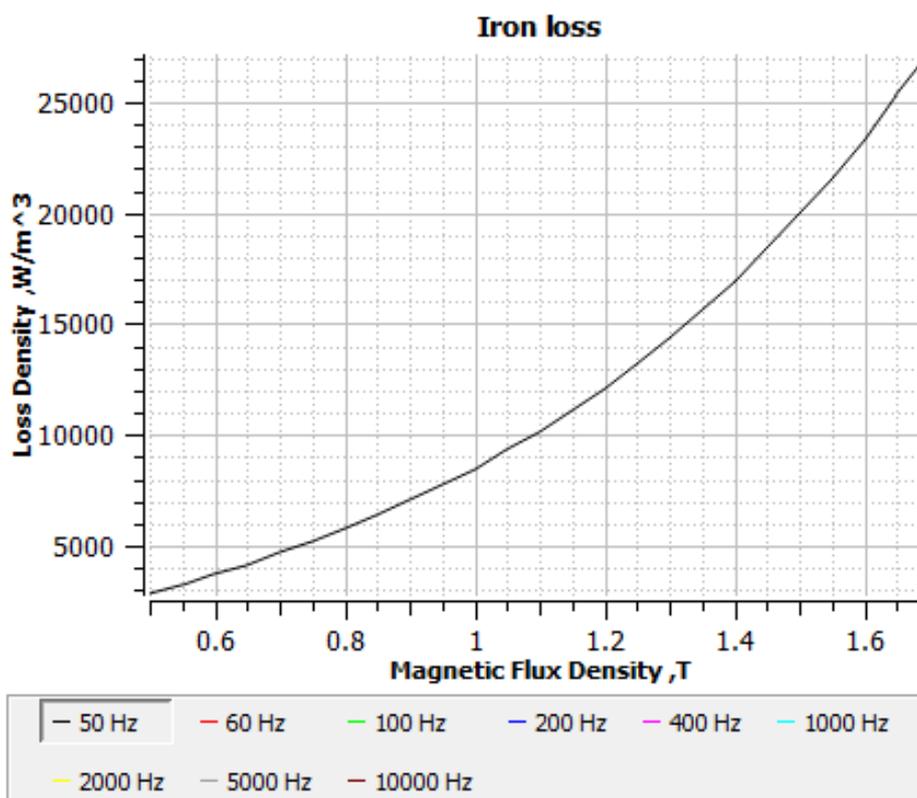


Figura 5: Curva de pérdidas en el hierro a 50Hz en función de la densidad de flujo magnético. (Fuente: JMAG, catálogo de materiales)

3.1.4 Devanado

En JMAG-Express tenemos varias opciones para definir el devanado del estator, a partir de dos parámetros fundamentales, al mismo tiempo el programa ajusta el resto de los parámetros que no introduce el usuario. En esta parte es donde conviene tener en cuenta características como el factor de llenado y la resistencia de fase; el primero se supuso del 60% y la resistencia de fase se calculó.

Se define el devanado mediante el número de vueltas, y las dimensiones de los conductores. Destacar que el programa JMAG es de origen japonés, y en la traducción se pierden matices, por ello conviene consultar los manuales de usuario siempre que exista duda. En este caso, JMAG pide número de vueltas, pero no son las vueltas calculadas, sino que se refiere al número de conductores dentro de una ranura, por lo que, en lugar de 21 vueltas, se introducen los 7 conductores que hay por ranura.

Se añade también el grosor del aislante; existen muchos tipos, y distintos grosores, se escogen 0.1 milímetros. Es un grosor coherente para este tipo de motor.

Connect Method: Star

Parallel No.: 1 Series No.: 6

Coil Property

Input Item: Turns/Wire Size

Number of Turns: 7

Setting Type: Round Wire Dimension

Wire Diameter: 7 mm

Film Thickness: 0.1 mm

Number of Strands: 1

Insulation Thickness: 0 mm

Slot-Fill Factor: 57.86227 %

Maximum of Slot-Fill Factor: 75 %

Correction Factor: 1

Phase Resistance: 0.01077 Ω

Layers: 1

Winding

Winding Scheme: Automatic

Coil Pitch: 9

Edit Phase: U-phase

Figura 6: Datos del devanado. (Fuente: Elaboración propia mediante JMAG)

Se comprueba que al introducir el número de conductores y sus dimensiones, tanto la resistencia de fase como el factor de llenado que calcula el programa se ajustan a los cálculos del diseño: 57% de factor de llenado (60% el original), y 0.01077 Ω la resistencia de fase (0.011 Ω el original).

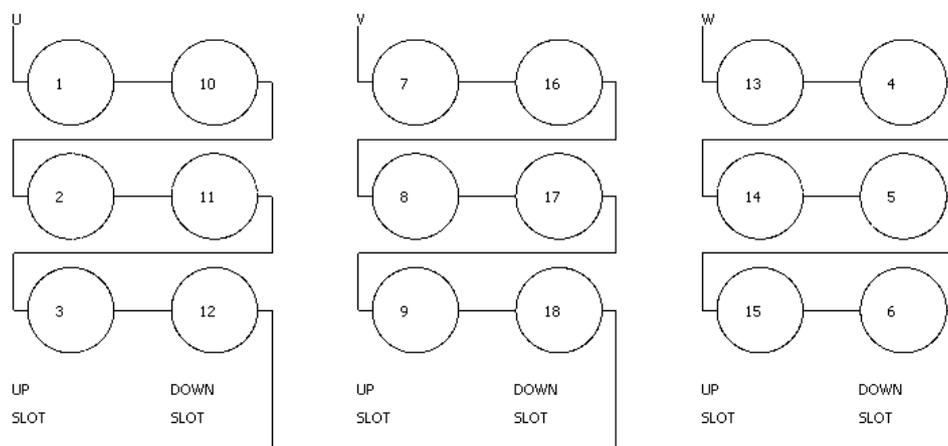


Figura 7: Diagrama de ranuras del devanado. (Fuente: Elaboración propia mediante JMAG)

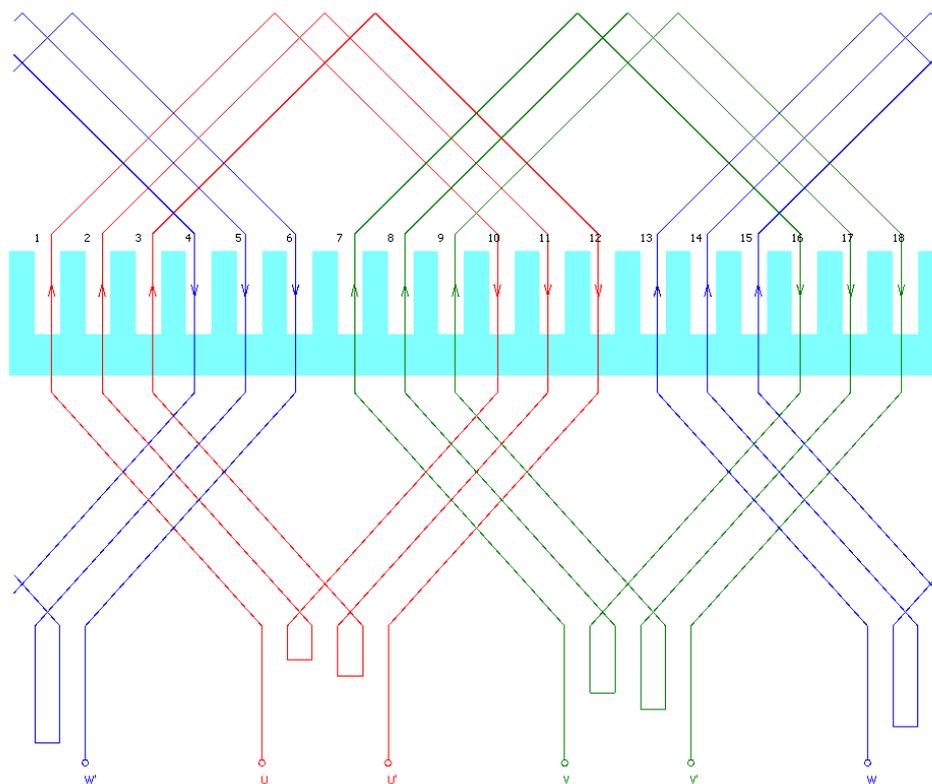


Figura 8: Diagrama de devanado del estator. (Fuente: Elaboración propia mediante JMAG)

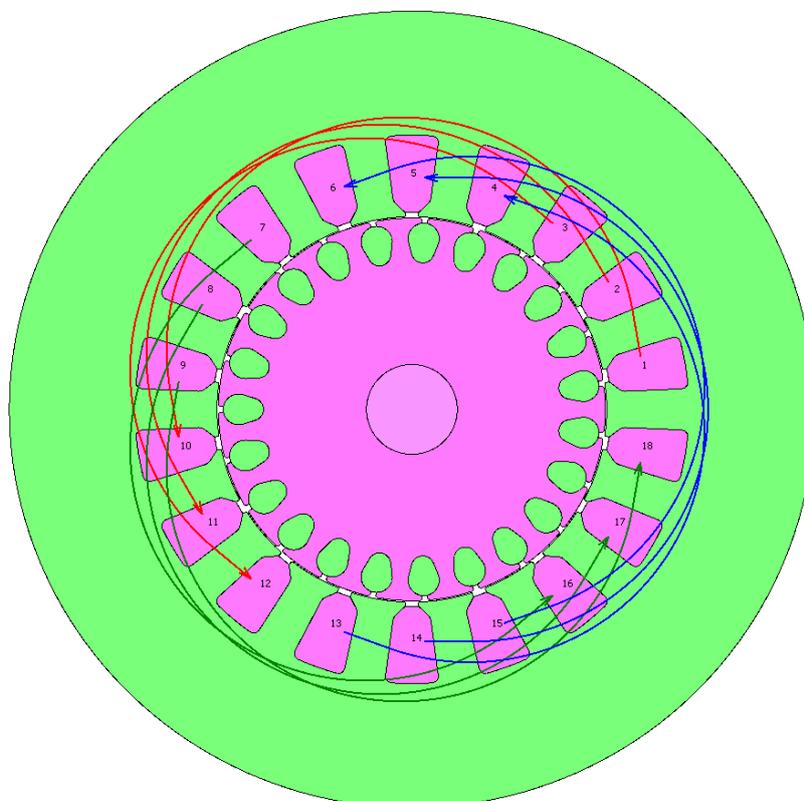


Figura 9: Devanado del estator sobre el modelo geométrico. (Fuente: Elaboración propia mediante JMAG)

4 JMAG-DESIGNER

4.1 ANEXO 3: DEFINICIÓN DEL ESTUDIO

Desde JMAG-Express, habremos guardado el modelo de referencia en el formato ‘.jcf’, lo cual nos permitirá abrir el motor desde el programa principal y definir el estudio.

Al iniciar JMAG-Designer, encontraremos la pantalla principal:

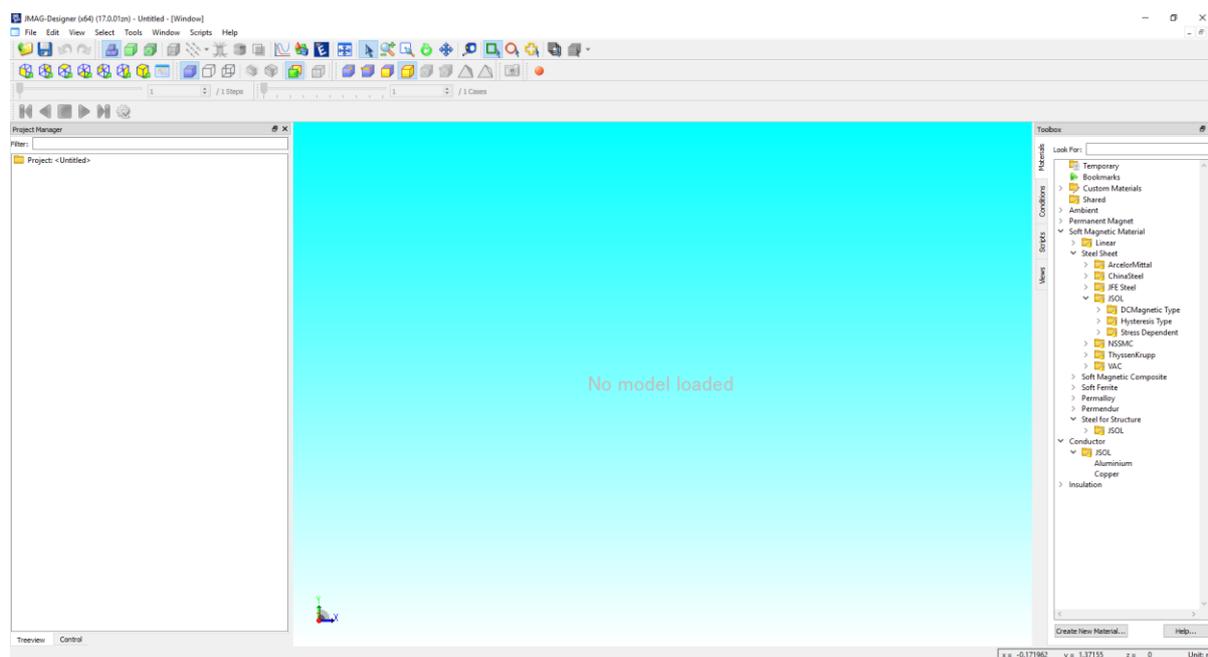


Figura 10: Pantalla de inicio de JMAG-Designer. (Fuente: Elaboración propia)

Cargaremos el archivo, y se creará un estudio de tipo magnético transitorio. En este estudio debemos definir las condiciones de materiales, de electromagnetismo, de datos de salida, el circuito eléctrico; creación de una malla y lo más importante, las propiedades del estudio.

4.1.1 Propiedades del estudio: *Step control*

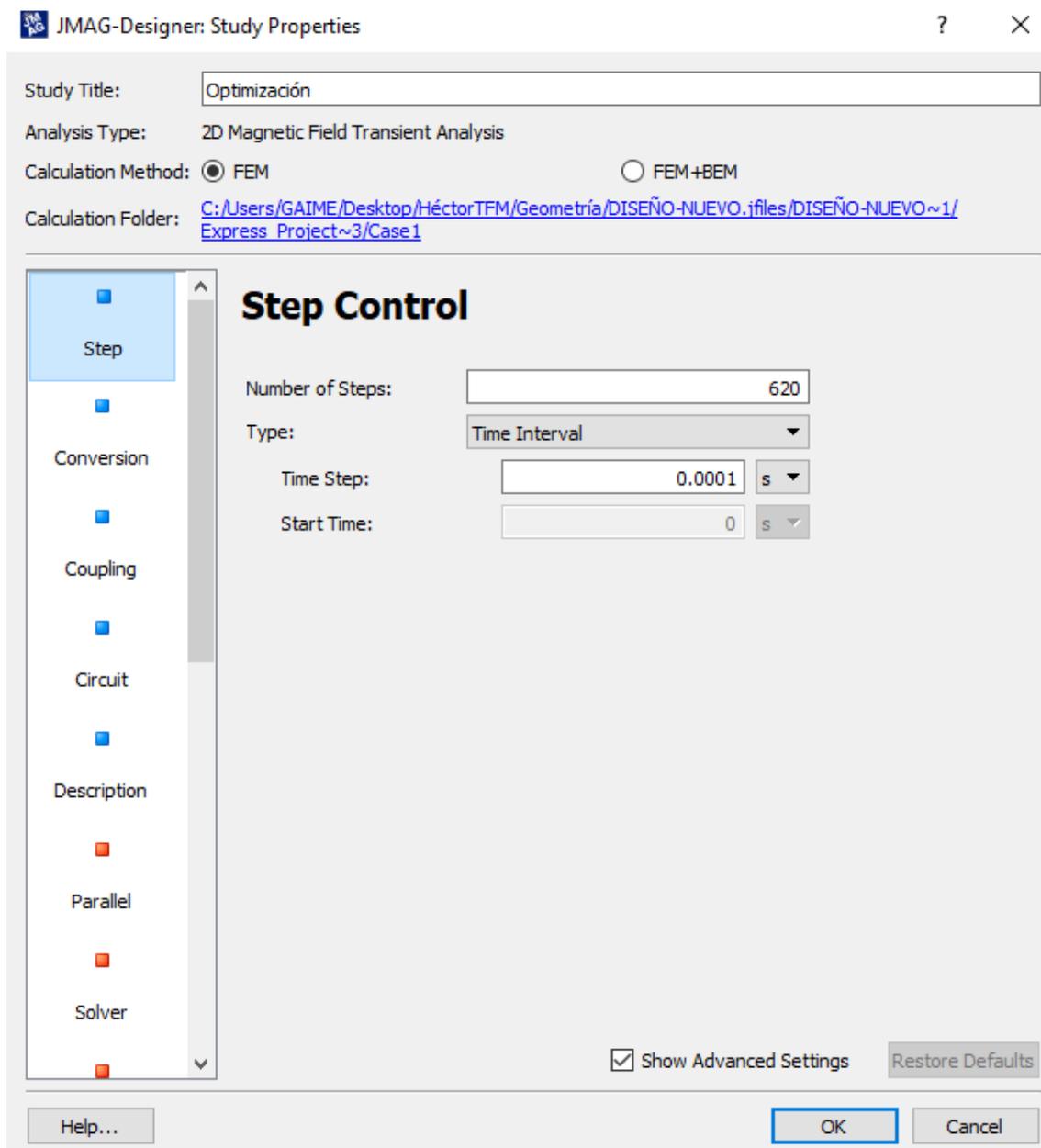


Figura 11: Step control, ventana. (Fuente: Elaboración propia mediante JMAG)

En esta propiedad se define la longitud del estudio, en este caso 620 pasos, siendo intervalos de tiempo de 0.1 milisegundos cada uno, por lo que el tiempo que abarca el estudio transitorio es el número de pasos por el tiempo de cada paso, 62 milisegundos. Este tiempo, gracias a otra propiedad del estudio que veremos próximamente, es suficiente para obtener resultados de estado estacionario (son algo más de tres ciclos a la frecuencia de red de 50Hz).

4.1.2 Propiedades del estudio: *Conversion*

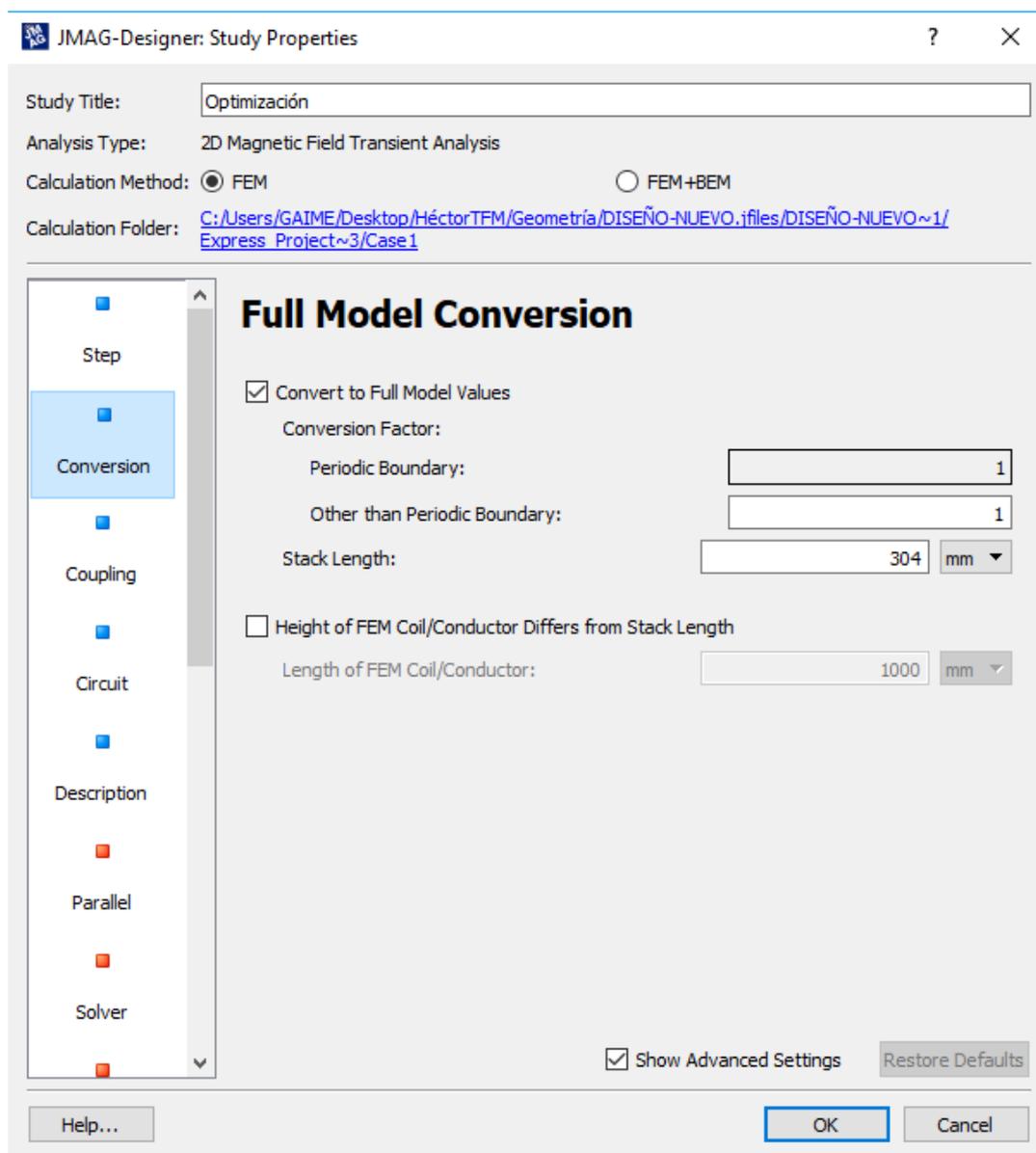


Figura 12: Full model conversión, ventana. (Fuente: Elaboración propia mediante JMAG)

Este apartado es el que transforma los resultados del modelo parcial utilizado, ya sea 2D como en este caso, o 3D; para ello se señalan características del modelo completo. En el caso de este motor estudiado en 2D, se indica la longitud axial de la máquina. Si estuviéramos usando un modelo parcial, por ejemplo, medio motor, se añadiría una condición de simetría para completar el modelo y convertir los resultados.

4.1.3 Propiedades del estudio: *Circuit*

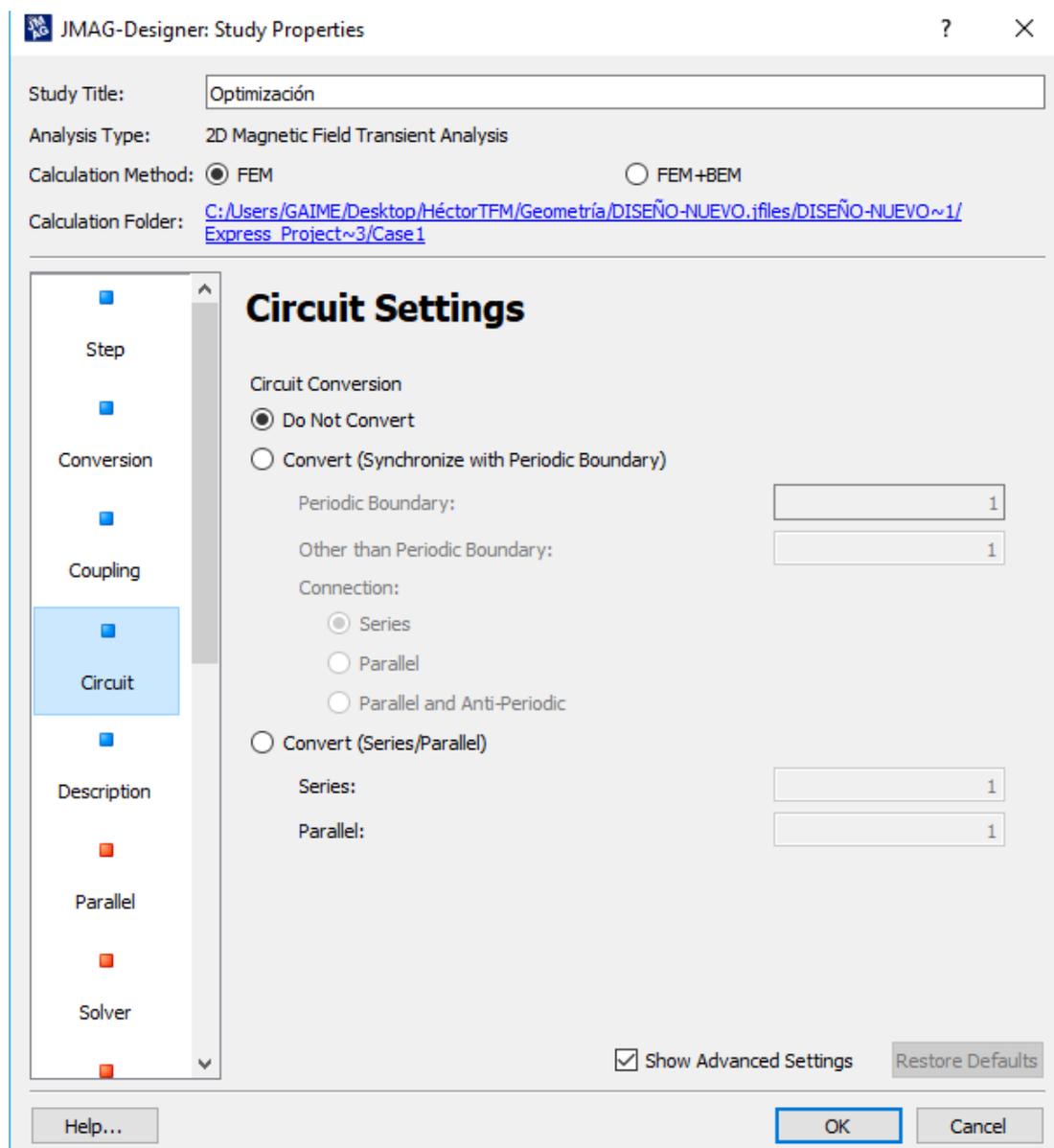


Figura 13: *Circuit settings, ventana. (Fuente: Elaboración propia mediante JMAG)*

Cuando se usan modelos parciales, se deberá indicar en esta ventana las características de simetría para completar el circuito. Sin embargo, en motores de inducción de jaula de ardilla no se debe usar nunca esta característica.

4.1.4 Propiedades del estudio: *Parallel computing*

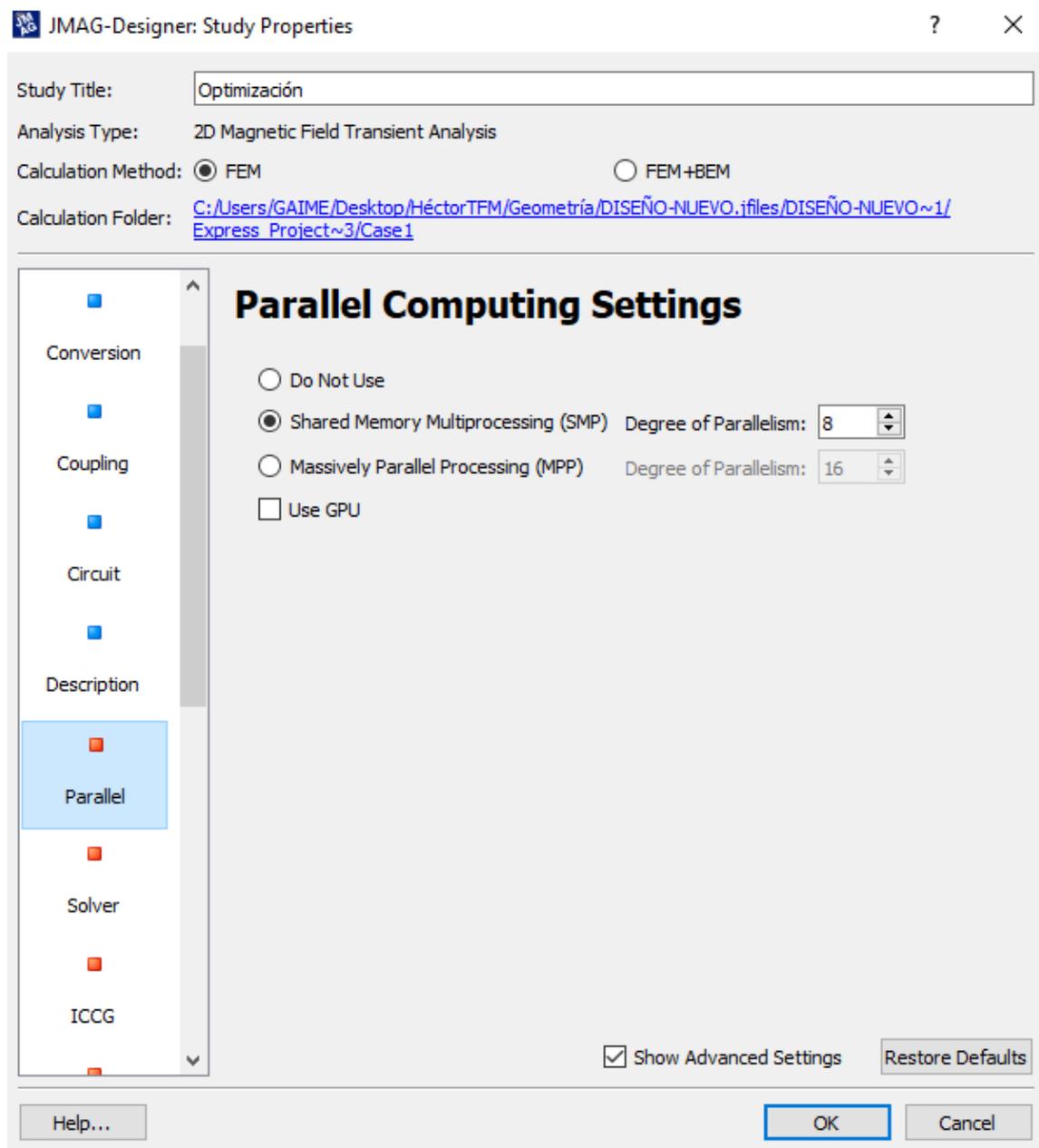


Figura 14: Parallel computing settings, ventana. (Fuente: Elaboración propia mediante JMAG)

Este ajuste no se refiere tanto a las características del modelo o estudio, sino que incide en la potencia computacional que se va a usar para resolver el estudio. En este caso, se dispone de licencia para un uso de 8 núcleos en paralelo, lo cual reduce considerablemente los tiempos de computación. Como se verá más adelante esto es muy importante dado el tiempo que lleva resolver cada caso individual.

4.1.5 Propiedades del estudio: Solver

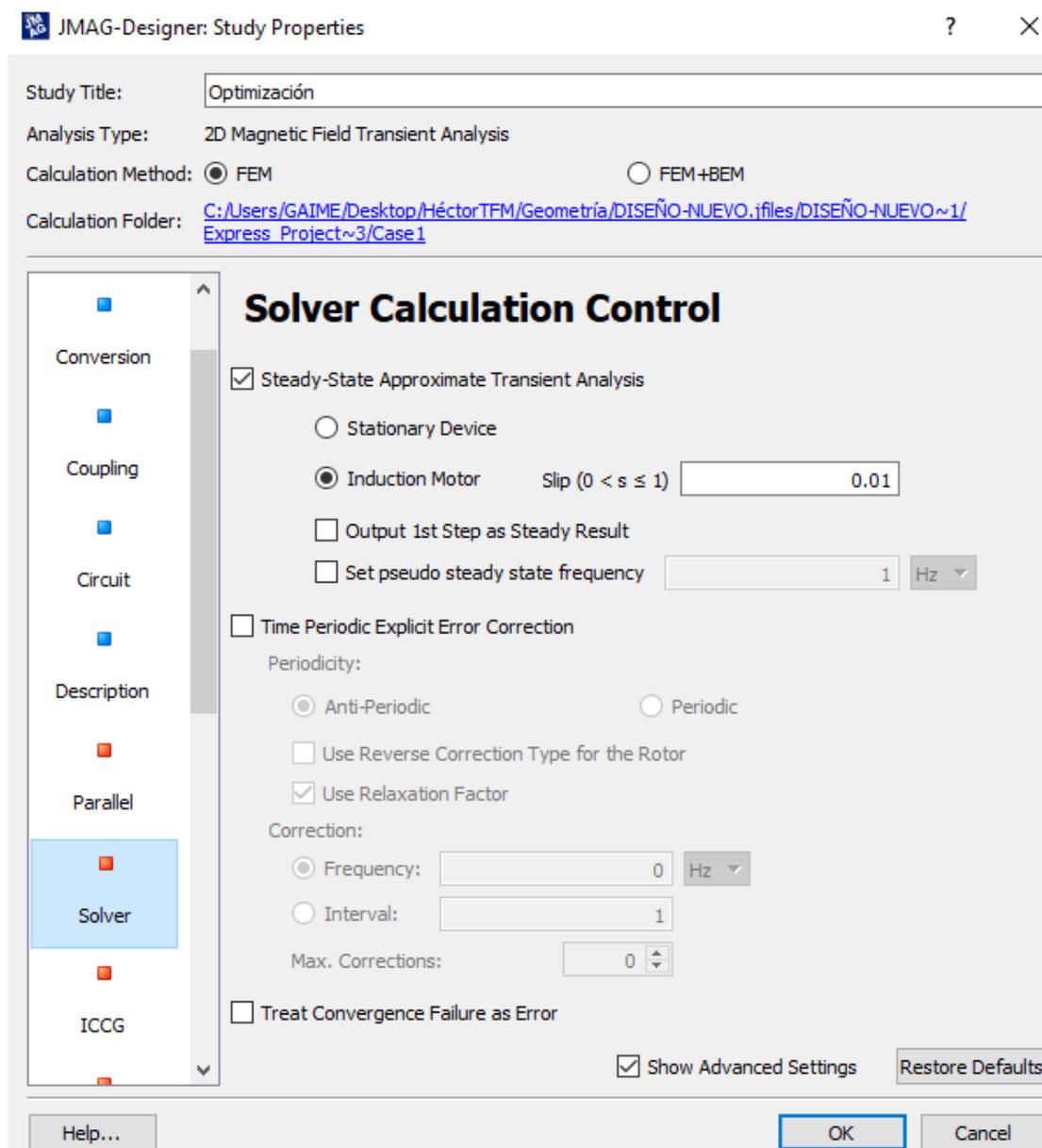


Figura 15: Solver Calculation Tool, ventana. (Fuente: Elaboración propia mediante JMAG)

En esta propiedad se nos permite crear una aproximación rápida del estado estacionario, permitiendo que el transitorio del estudio sea mínimo, y reduciendo el tiempo necesario para obtener valores de funcionamiento equivalentes a dicho régimen estacionario. Para ello, se indica que es un motor de inducción, y se introduce el deslizamiento correspondiente a la velocidad del estudio. Más adelante veremos cómo variar el parámetro al tiempo que la velocidad de rotación para aprovechar este ajuste al máximo.

4.1.6 Propiedades del estudio: ICCG

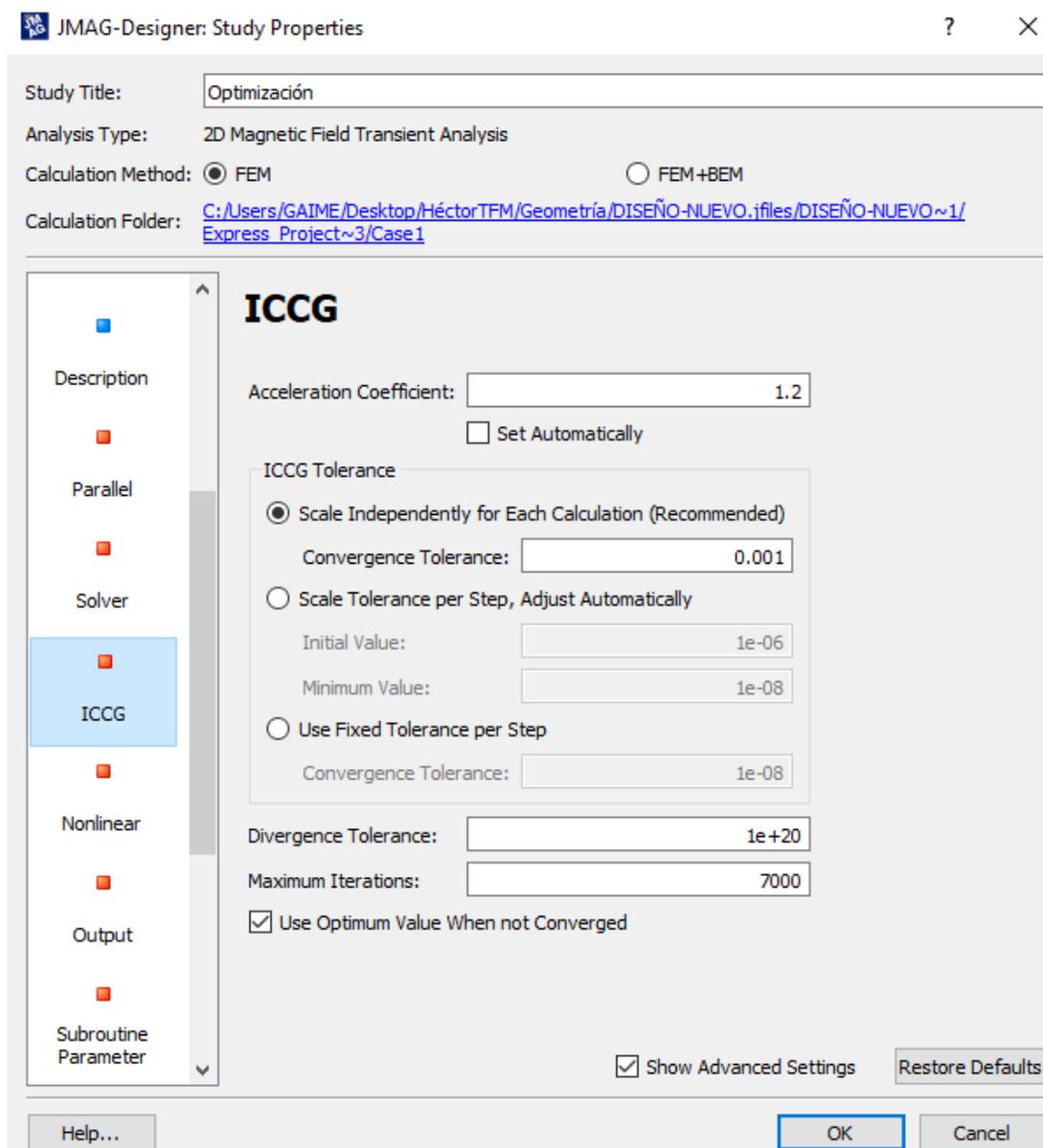


Figura 16: ICCG, ventana. (Fuente: Elaboración propia mediante JMAG)

En este ajuste definimos los parámetros del algoritmo del método de los elementos finitos que utiliza JMAG para resolver los modelos. En concreto, se usa Newton-Raphson; se establece el factor de aceleración como $\alpha = 1.2$, siendo el valor por defecto 1.05, en cuanto a la tolerancia se usa el ajuste recomendado. El número máximo de iteraciones por defecto es 5000, sin embargo, elevo dicho valor hasta 7000, ya que en algún caso podría no ser suficiente.

4.1.7 Propiedades del estudio: *Nonlinear*

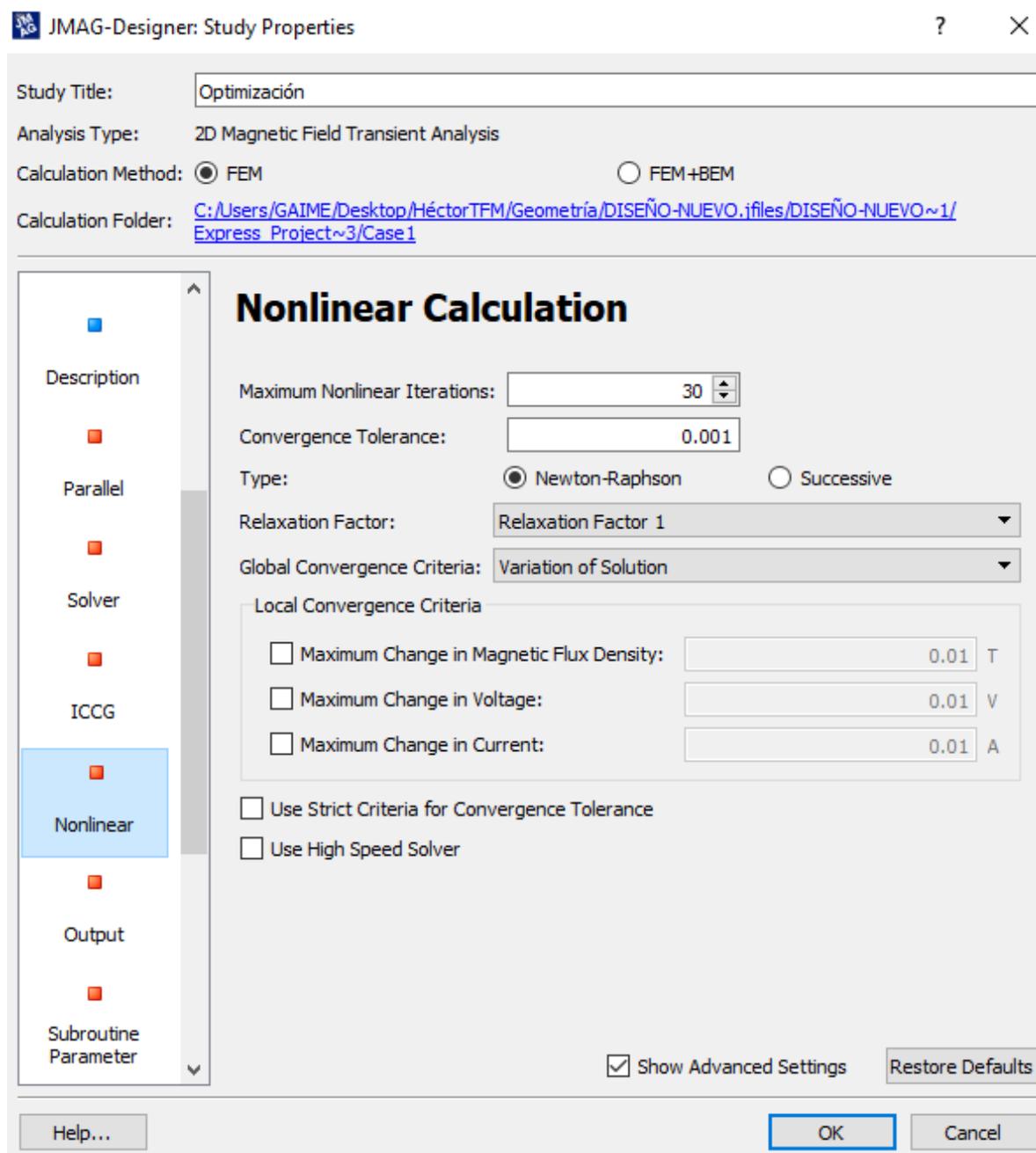


Figura 17: Nonlinear Calculation, ventana. (Fuente: Elaboración propia mediante JMAG)

Ajustamos los parámetros del algoritmo de resolución de ecuaciones no lineales, estableciendo el máximo como 30, con una tolerancia de una milésima.

4.1.8 Condiciones de material

JMAG nos presenta un catálogo de distintos materiales; desde conductores como aluminio y cobre, hasta aceros laminados o imanes permanentes. También da la posibilidad de crear un material definido por el usuario, con sus propias curvas de magnetización y pérdidas.

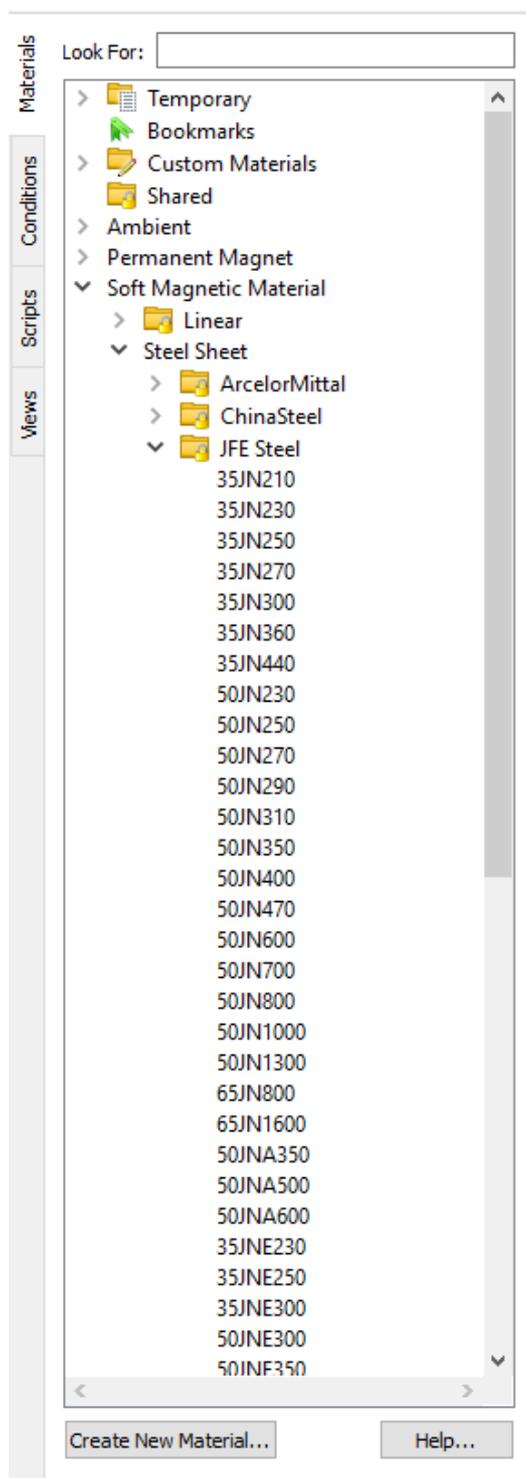


Figura 18: Listado de materiales. (Fuente: JMAG)

En este caso, vamos a seleccionar para las laminaciones de acero el material JFE Steel, 35JN300, cuyas curvas de magnetización y pérdidas se vieron previamente.

Para aplicar un material a una parte, se selecciona de la lista anterior, y se arrastra sobre la pieza. Para aplicar el acero laminado al estator, aparece el siguiente cuadro:

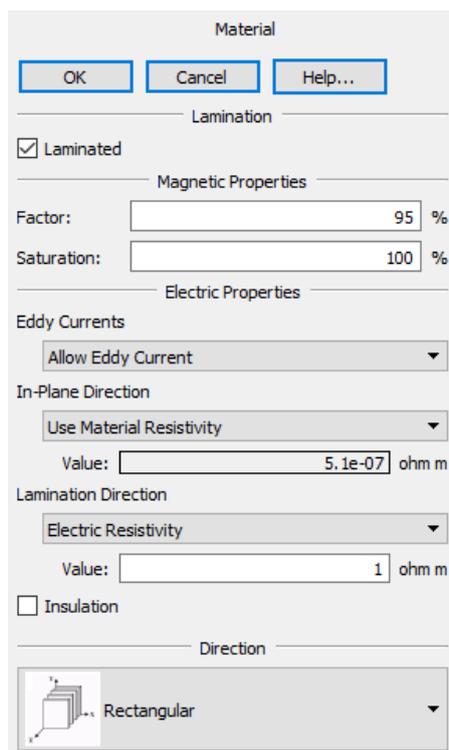


Figura 19: Condición de material del estator. (Fuente: Elaboración propia mediante JMAG)

Se selecciona la opción de material laminado, con un factor del 95% de acuerdo con los procedimientos de diseño del Anexo 1. Además, se señala que deben calcularse las corrientes de Eddy, definiendo la resistividad en el plano de las láminas, y entre ellas.

Se aplica el mismo acero al núcleo del rotor, con los siguientes ajustes:

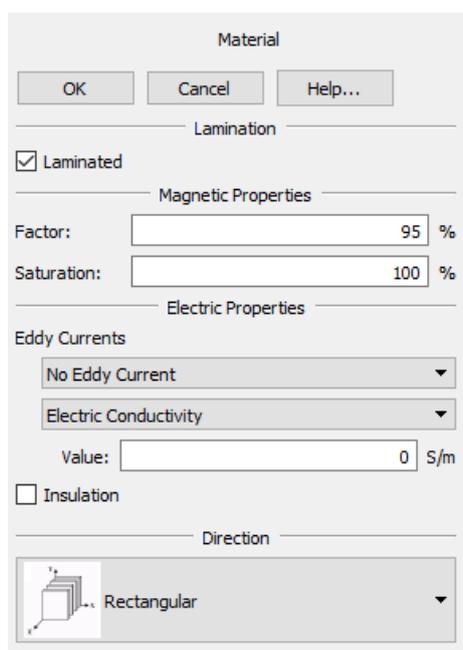


Figura 20: Condición de material del rotor. (Fuente: Elaboración propia mediante JMAG)

En el rotor se va a prescindir del cálculo de corrientes parásitas y en el hierro debido a su influencia casi nula en el balance de potencias; estas pérdidas dependen de la frecuencia, y la frecuencia en el rotor es el deslizamiento de funcionamiento multiplicado por la frecuencia del estator, es decir, la frecuencia de red. Las pérdidas en el rotor en deslizamientos entre el 5% y el 1% son despreciables; hablamos de frecuencias de 2.5Hz o 0.5Hz.

Se aplica el cobre a los devanados del estator:

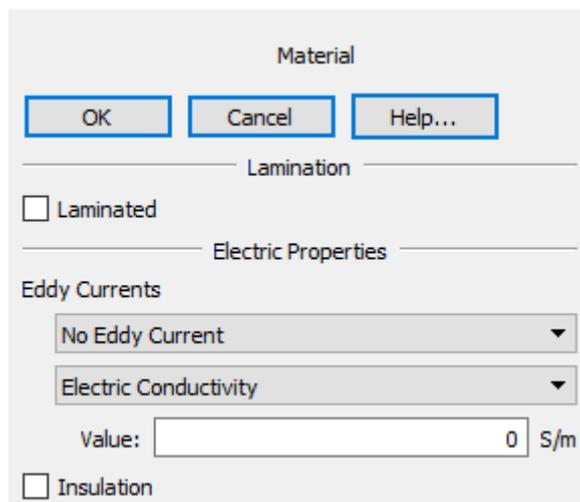


Figura 21: Condición de material del devanado del estator. (Fuente: Elaboración propia mediante JMAG)

Y a las barras del rotor:

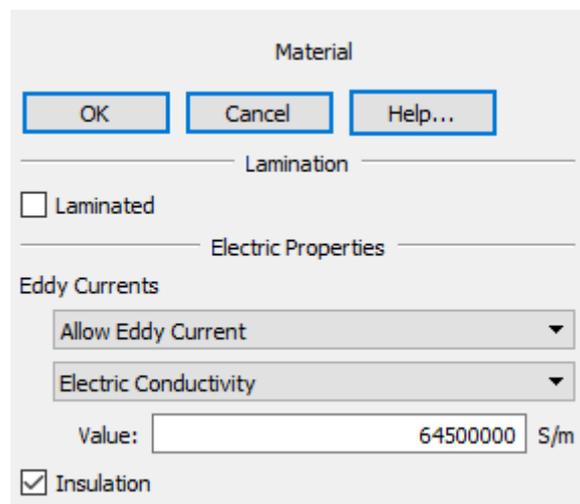


Figura 22: Condición de material de las barras del rotor. (Fuente: Elaboración propia mediante JMAG)

En este caso sí permitimos el cálculo de corrientes de Eddy en las barras, ya que la distribución de corriente en estas no es uniforme. Además, debido a la condición de conductores de estas barras, se recomienda no permitir corrientes de Eddy en partes próximas a las barras en estudios 2D; es decir, aunque quisiéramos, no podríamos obtener

buenos resultados de las corrientes de Eddy en el rotor, siendo otro motivo más para haberlas despreciado. Se selecciona en las barras del rotor la opción de aislamiento (*insulation*), siendo la única parte en la que se puede utilizar dicha opción al ser *FEM conductors*, como se verá posteriormente.

Con todos los materiales seleccionados se puede ver en el árbol desplegable como cada parte tiene su material asignado:

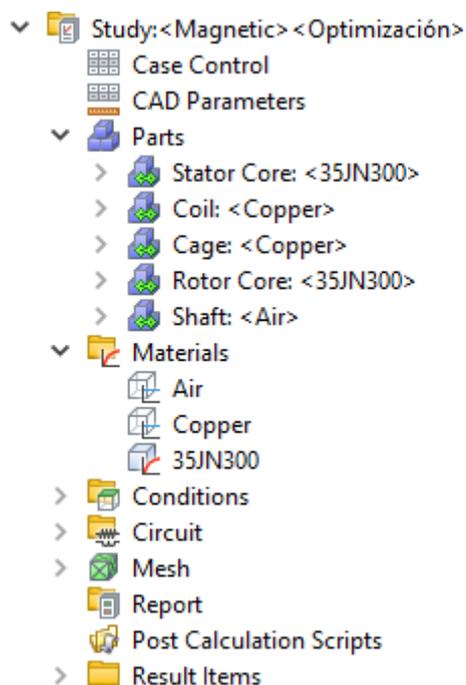


Figura 23: Árbol desplegable con materiales. (Fuente: Elaboración propia mediante JMAG)

4.1.9 Condiciones de funcionamiento

Al igual que con los materiales, las condiciones de funcionamiento se seleccionan de la siguiente lista y se arrastran hasta las partes correspondientes.

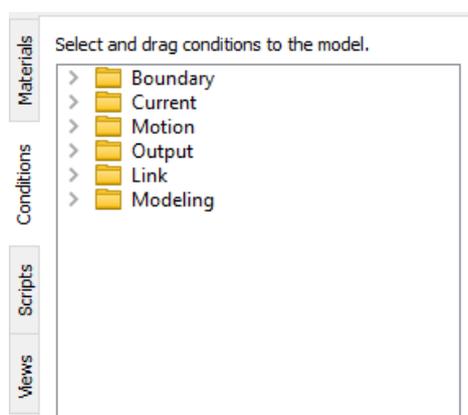


Figura 24: Lista de condiciones para el estudio. (Fuente: JMAG)

4.1.10 Condiciones de funcionamiento: *Boundary*

- ▼  **Boundary**
 -  **Rotation Periodic Boundary**
Specifies a periodic boundary for a partial model when the model has periodicity in the direction of rotation.
 -  **Translation Periodic Boundary**
Specifies a periodic boundary for a partial model when the model has periodicity in the direction of translation.
 -  **Symmetry Boundary**
Specifies a symmetry boundary when the magnetic flux flows parallel to the specified face.
 -  **Natural Boundary**
Specifies a natural boundary when the magnetic flux flows perpendicular to the specified face.
 -  **Vector Potential Boundary**
Specifies an arbitrary vector potential to the face set with the condition.
 -  **Slide**
Specifies slide when the model moves by motion condition.
Specifies slide for the boundary with duplicated nodes.

Figura 25: Boundary conditions, listado. (Fuente: JMAG)

Al ser un modelo en 2D y del motor completo, no tendremos que usar ninguna excepto la condición *Slide*, que fundamentalmente, modela el comportamiento del entrehierro al moverse el rotor. Si el modelo fuera de $\frac{1}{2}$ del motor, deberíamos usar *Rotation Periodic Boundary*, para señalar la simetría del medio modelo. De la misma forma, si el análisis fuera en 3D, debería aplicarse *Symmetry Boundary* a las caras de los devanados del estator y a las barras del rotor.

4.1.11 Condiciones de funcionamiento: *Current*

-  **Current**
 -  **FEM Coil**
 Specifies an FEM coil in the model to link to an FEM coil component in the circuit when the current distribution is assumed to be uniform in the coil.
 -  **FEM Conductor**
 Specifies an FEM conductor in a model when the current does not flow uniformly inside the coil. The FEM conductor can be linked to a circuit. This condition needs to be specified for each conducting wire.
 -  **Current**
 Specifies the amount of current flowing in the coil. Used when the current distribution is assumed to be uniform in the coil.
 -  **Current Density**
 Specifies the current flowing in the coil using the current density.

Figura 26: Current conditions, listado. (Fuente: JMAG)

Se usará la condición de *FEM Coil* para el devanado del estator, donde se supondrá que la corriente es uniforme en todos los conductores:

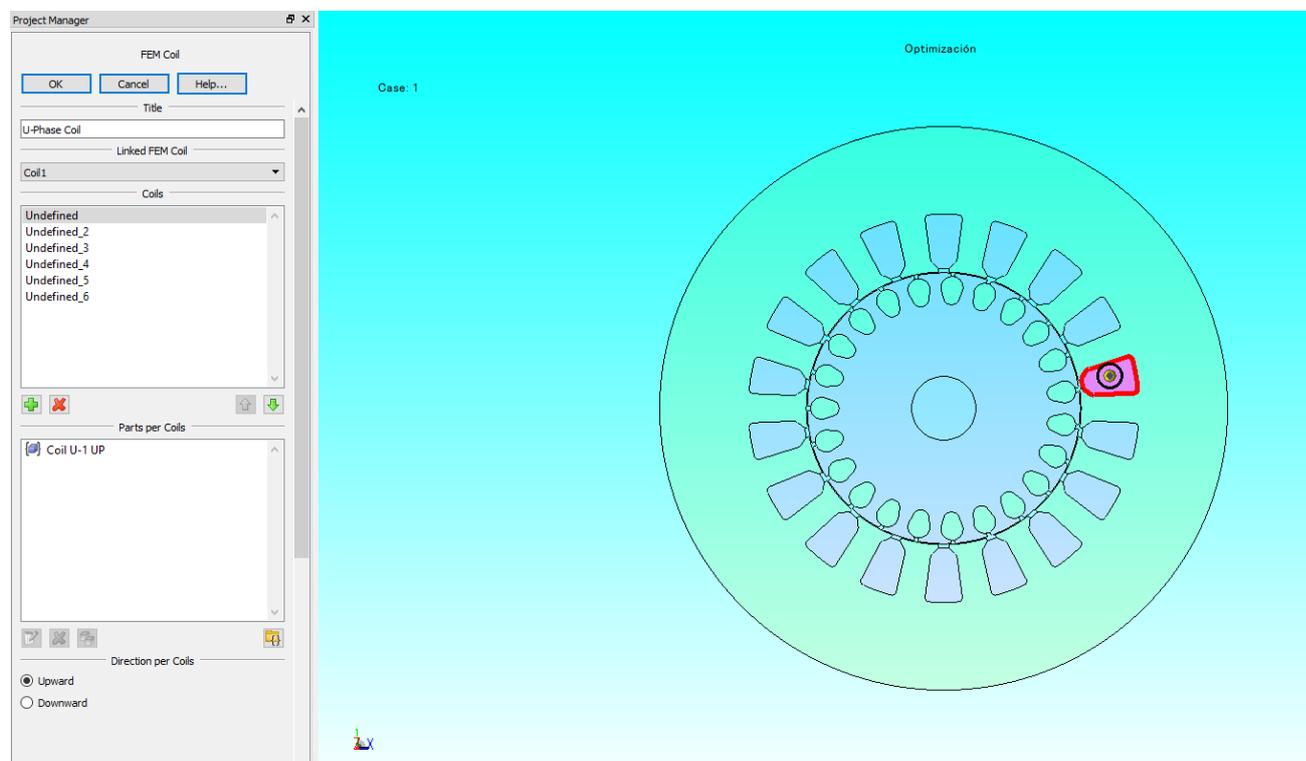


Figura 27: FEM Coil condition. (Fuente: Elaboración propia mediante JMAG)

Para las barras del rotor se usará *FEM Conductor*, donde la corriente en cada barra no es uniforme. Además, después se agruparán todas las condiciones de todas las barras en un *Group (FEM conductor)*.

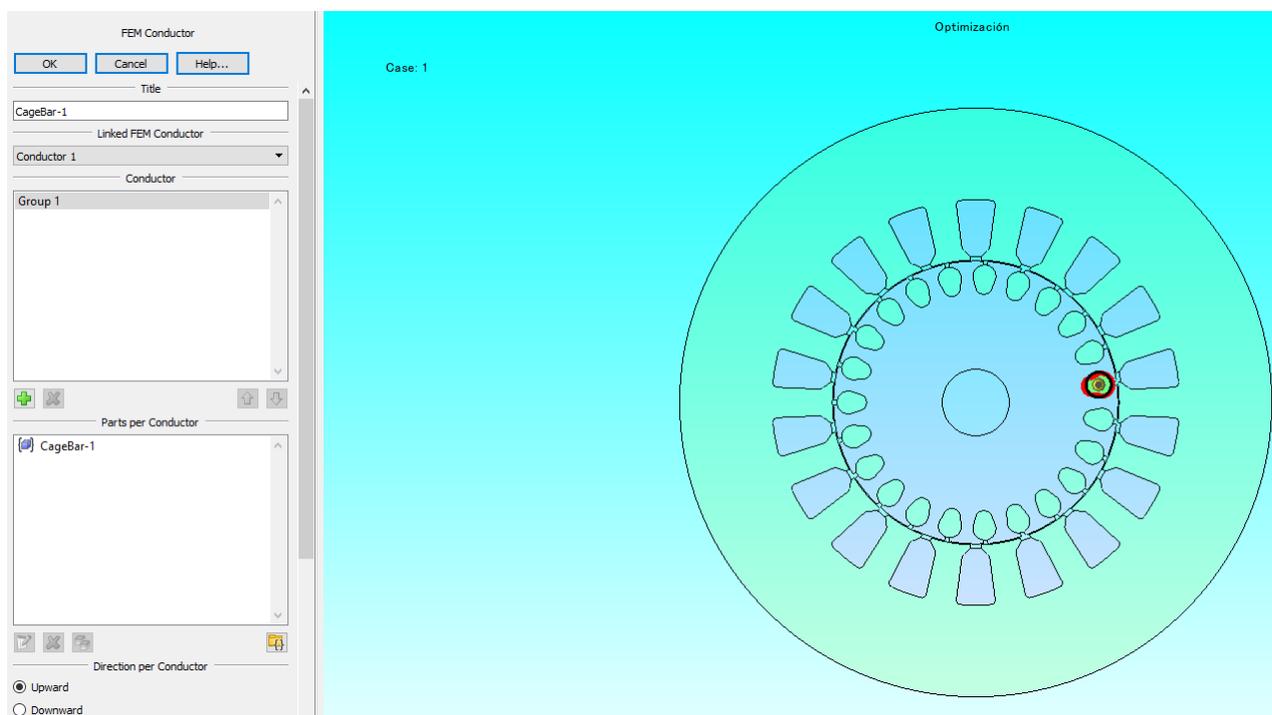


Figura 28: FEM Conductor condition. (Fuente: Elaboración propia mediante JMAG)

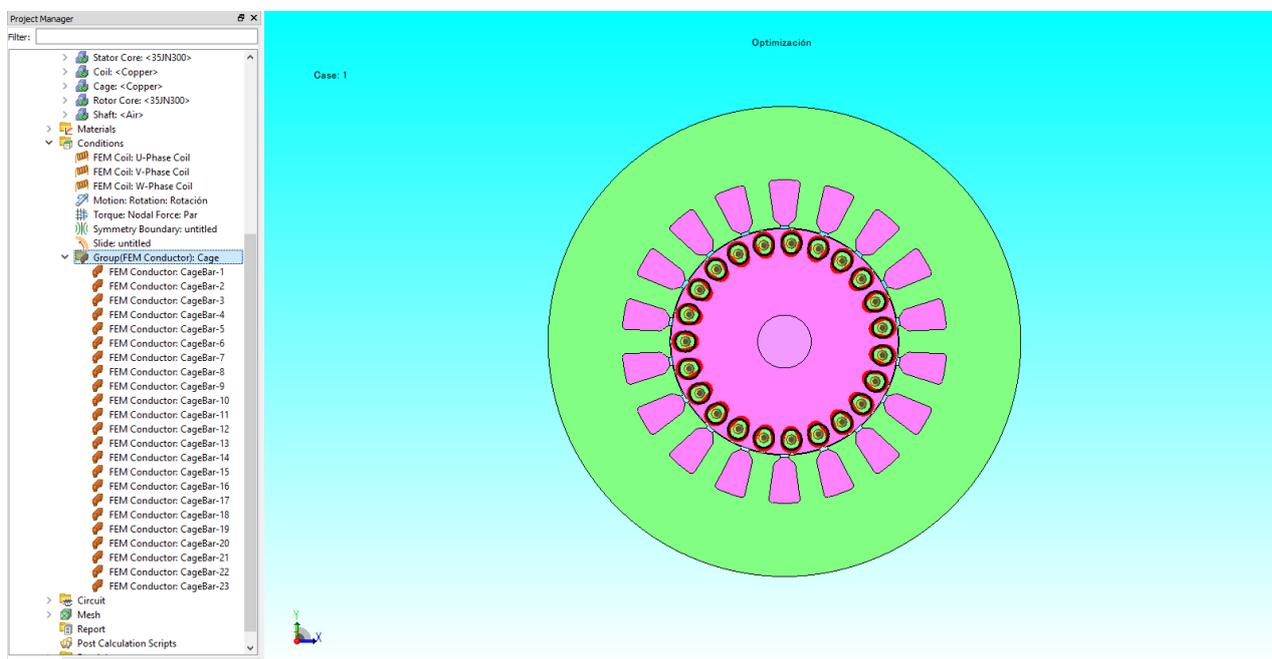


Figura 29: Group (FEM Conductor): Cage. (Fuente: Elaboración propia mediante JMAG)

4.1.12 Condición de funcionamiento: *Motion*

- 
Motion
 - 
Rotation
 Specifies the rotational motion of parts.
 - 
Translation
 Specifies the translation motion of parts.
 - 
Collision
 Specifies the collision of parts.

Figura 30: Motion condition, listado. (Fuente: JMAG)

Se usa la condición de rotación en los elementos del rotor: el núcleo, las barras y el eje. Se les asigna una velocidad de estudio; en principio se considerará la velocidad nominal como deslizamiento del 1%, es decir, 2970rpm.

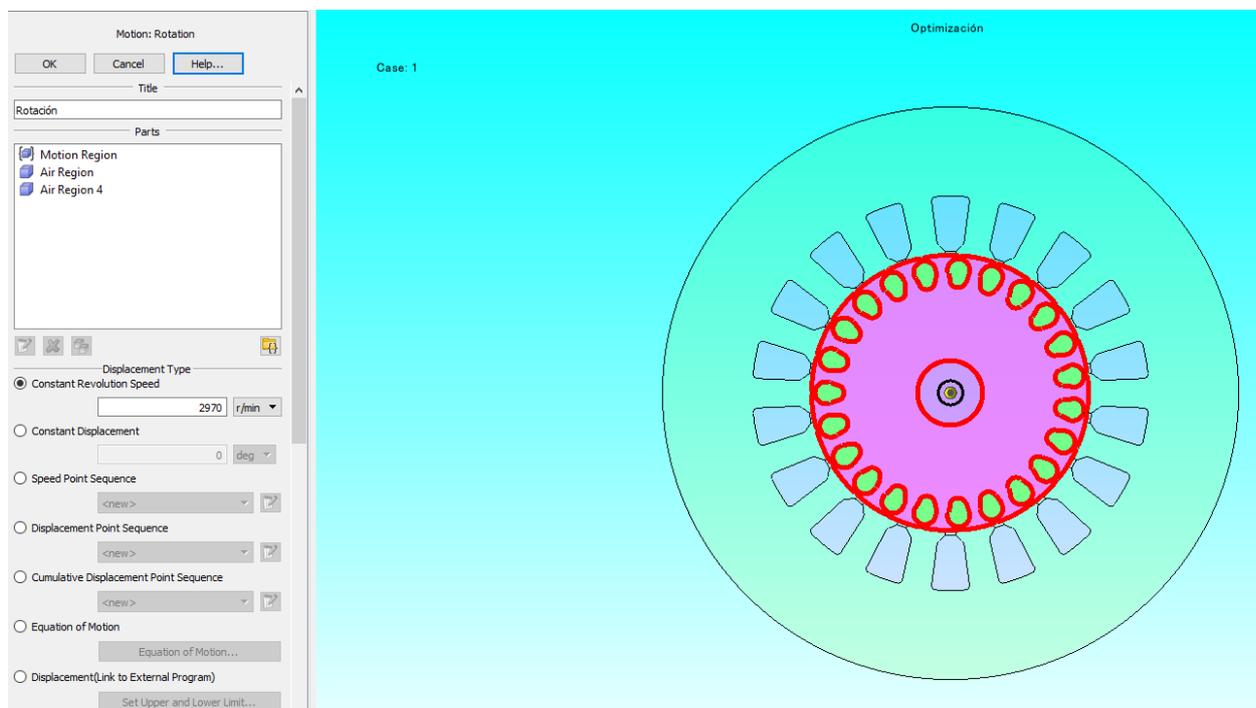


Figura 31: Rotation condition. (Fuente: Elaboración propia mediante JMAG)

4.1.13 Condición de funcionamiento: *Output*

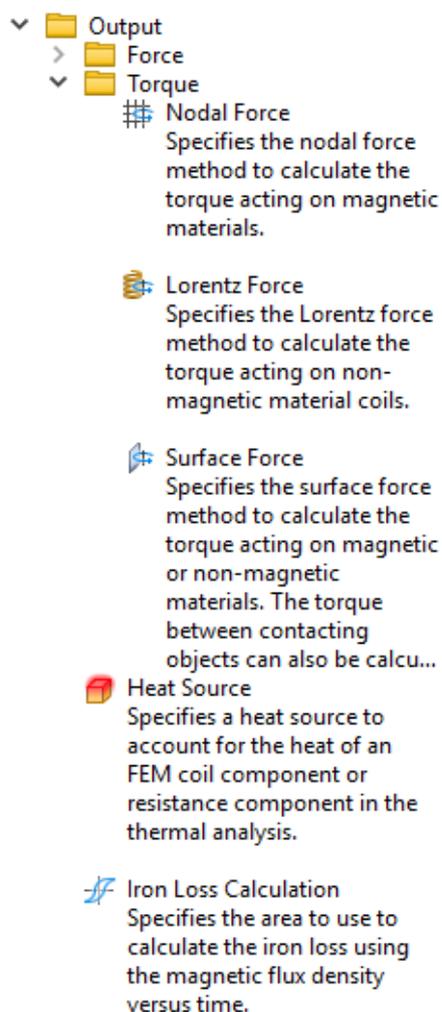


Figura 32: Output conditions, listado. (Fuente: JMAG)

Nos interesa obtener el par de salida en el rotor, por lo que se aplica la condición *Nodal Force* a todos los elementos del rotor, igual que se hizo con la condición de movimiento. Posteriormente se usará en un estudio separado la condición de *Iron Loss* para obtener las pérdidas en el hierro.

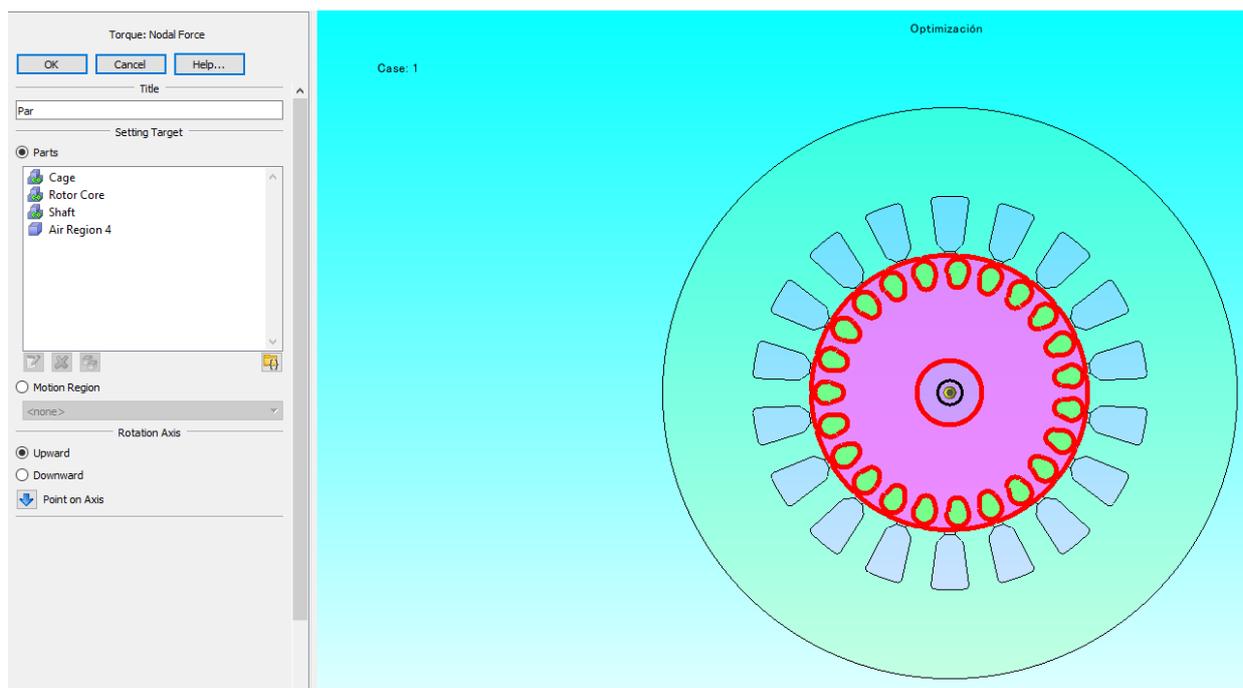


Figura 33: Nodal Force condition. (Fuente: Elaboración propia mediante JMAG)

4.1.14 Circuito

Para que todo lo anterior funcione, es necesario crear un circuito que alimente el motor. Estará formado por tres componentes *FEM COIL* conectados en estrella, que representarán las bobinas de las fases U, V y W, y que se usarán para conectar las condiciones de corriente de FEM Coil con su representación en dicho circuito.

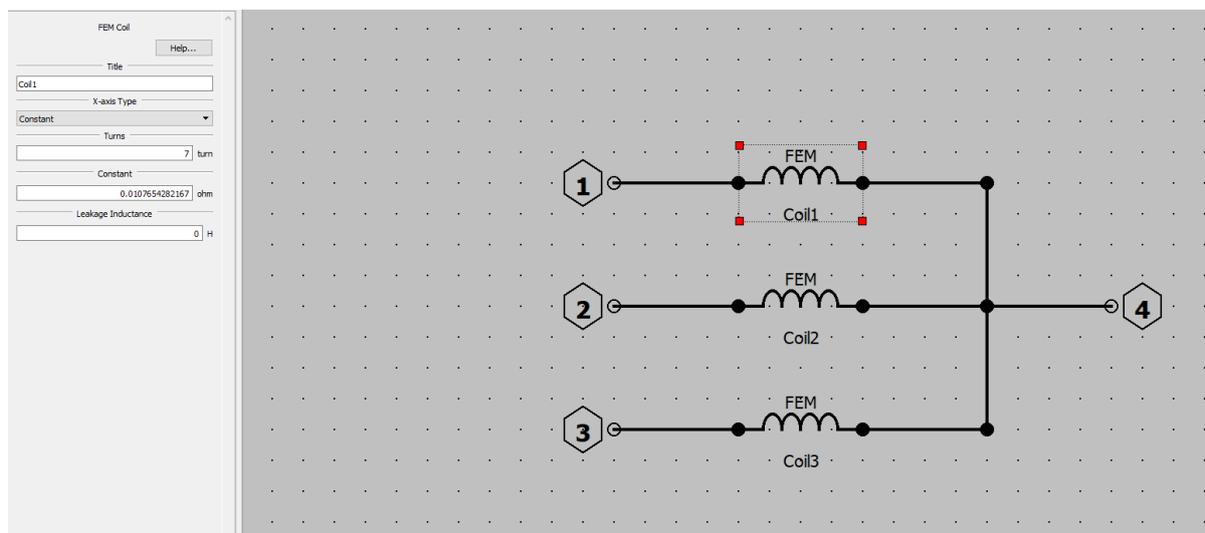


Figura 34: FEM Coil del circuito. (Fuente: Elaboración propia mediante JMAG)

En dichos elementos se establece la resistencia de las fases, el número de vueltas (JMAG interpreta número de vueltas como número de conductores por ranura), y la inductancia de

dispersión; la cual no tendría sentido incluir ya que dicho efecto se produce por si solo durante la simulación.

Se conectarán esos componentes *FEM COIL* a una fuente de tensión trifásica, de 50Hz y con una tensión de 230V, 325.26V valor de pico.

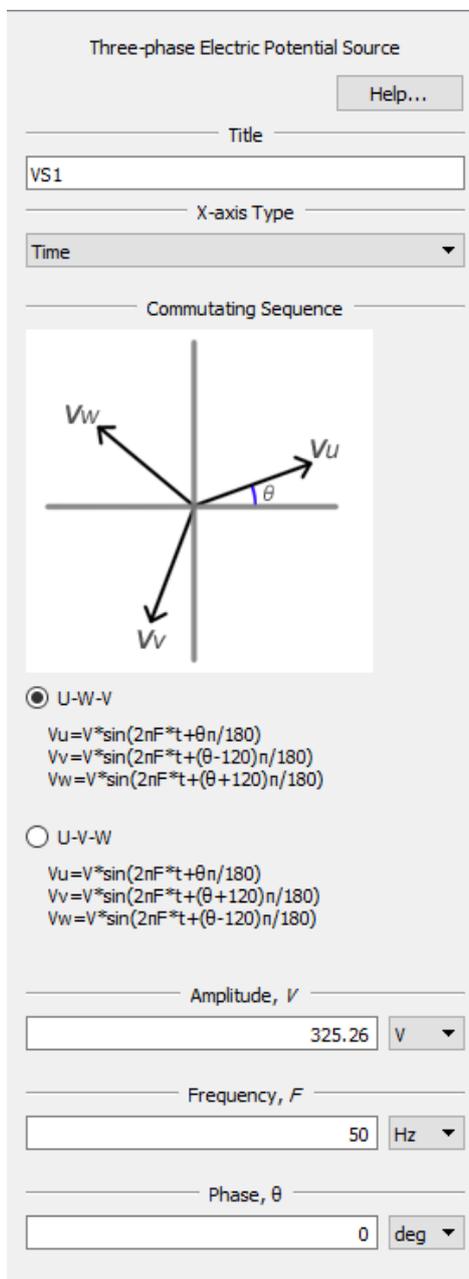


Figura 35: Fuente de tensión trifásica. (Fuente: Elaboración propia mediante JMAG)

A partir del grupo de *FEM Conductors* creado anteriormente, se incluye un bloque de jaula de ardilla, que JMAG construye automáticamente a partir de dichas condiciones y de la resistencia del anillo de cortocircuito que introduce el usuario.

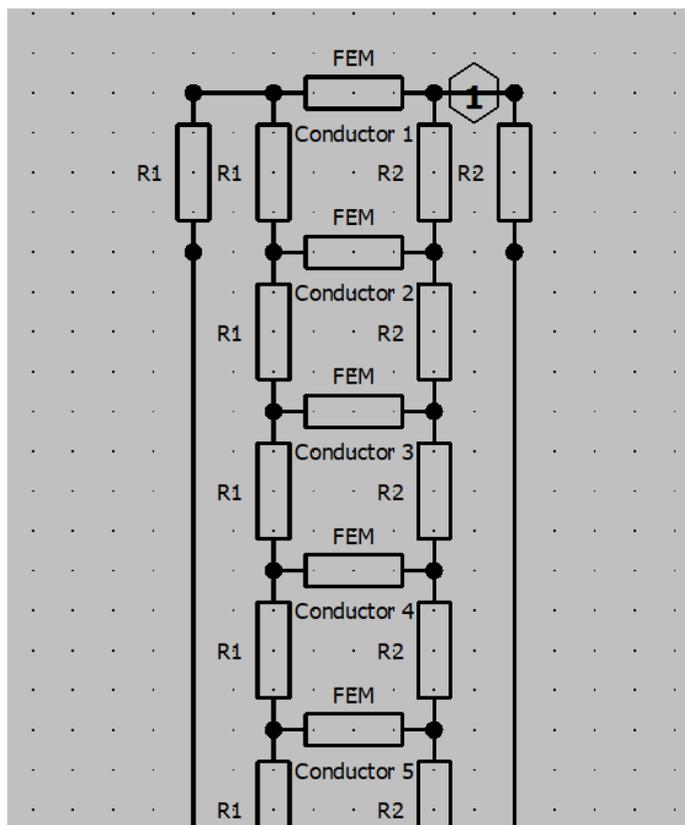


Figura 36: Recorte del bloque de jaula de ardilla. (Fuente: Elaboración propia mediante JMAG)

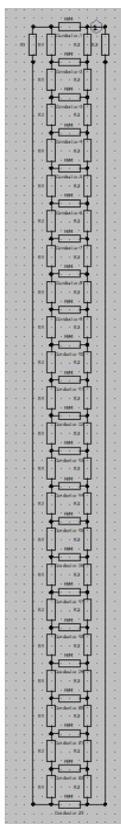


Figura 37: Bloque de jaula de ardilla. (Fuente: Elaboración propia mediante JMAG)

Finalmente, el circuito conectado sería:

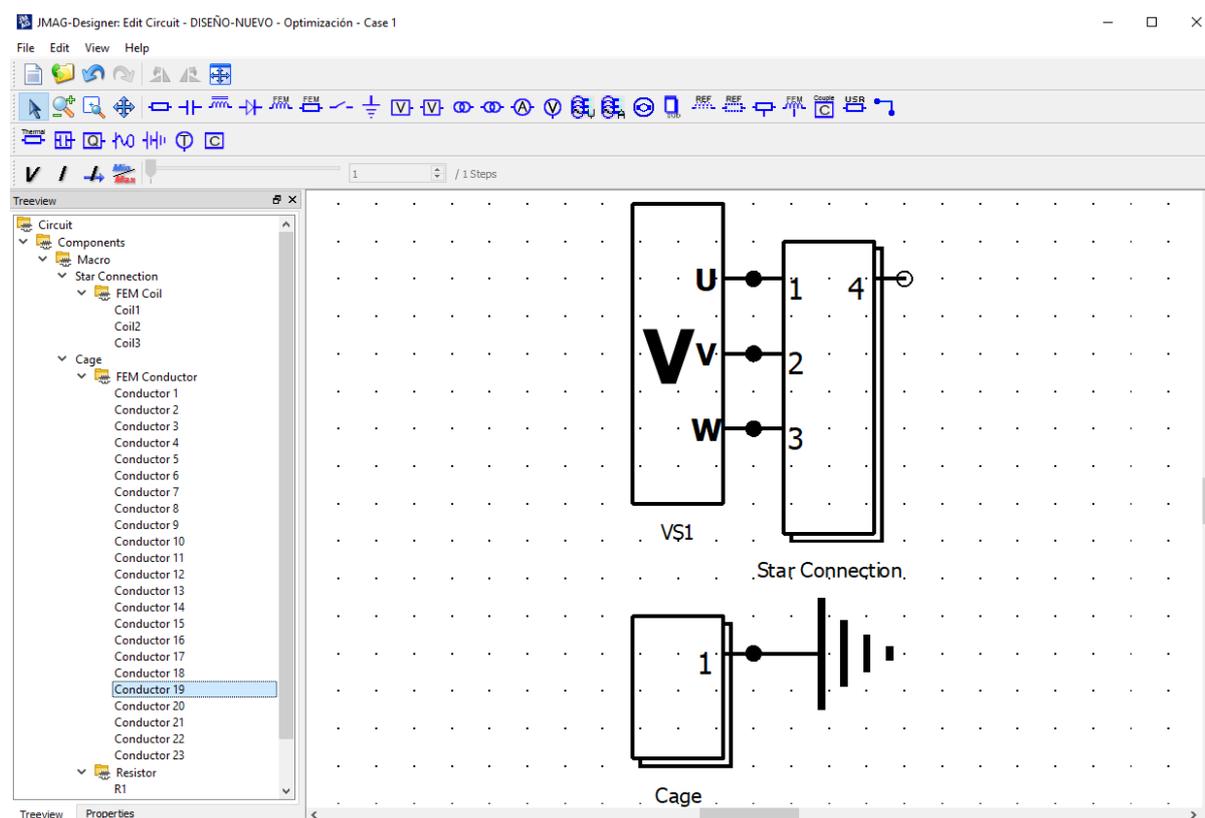


Figura 38: Circuito completo. (Fuente: Elaboración propia mediante JMAG)

4.1.15 Mallado

La creación de la malla es una de las partes más importantes del estudio, ya que de ella depende la precisión de los resultados y la veracidad de estos. Una malla muy 'gruesa', tendrá elementos grandes, con nodos muy separados entre sí; haciendo el tiempo de computación más corto a cuenta de obtener unos resultados muy pobres, y poco útiles.

Una malla 'fina', tendrá elementos pequeños, con nodos próximos entre sí; el tiempo de computación será mayor, pero los resultados serán notablemente mejores y podrán tomarse como buenos.

Entra en juego otro factor más del mallado, y es su calidad. La calidad se mide por la deformación del elemento base, en este caso un triángulo. En la medida en que los elementos se parezcan al triángulo base, serán de buena calidad, mientras que los elementos más deformados serán de mala calidad.

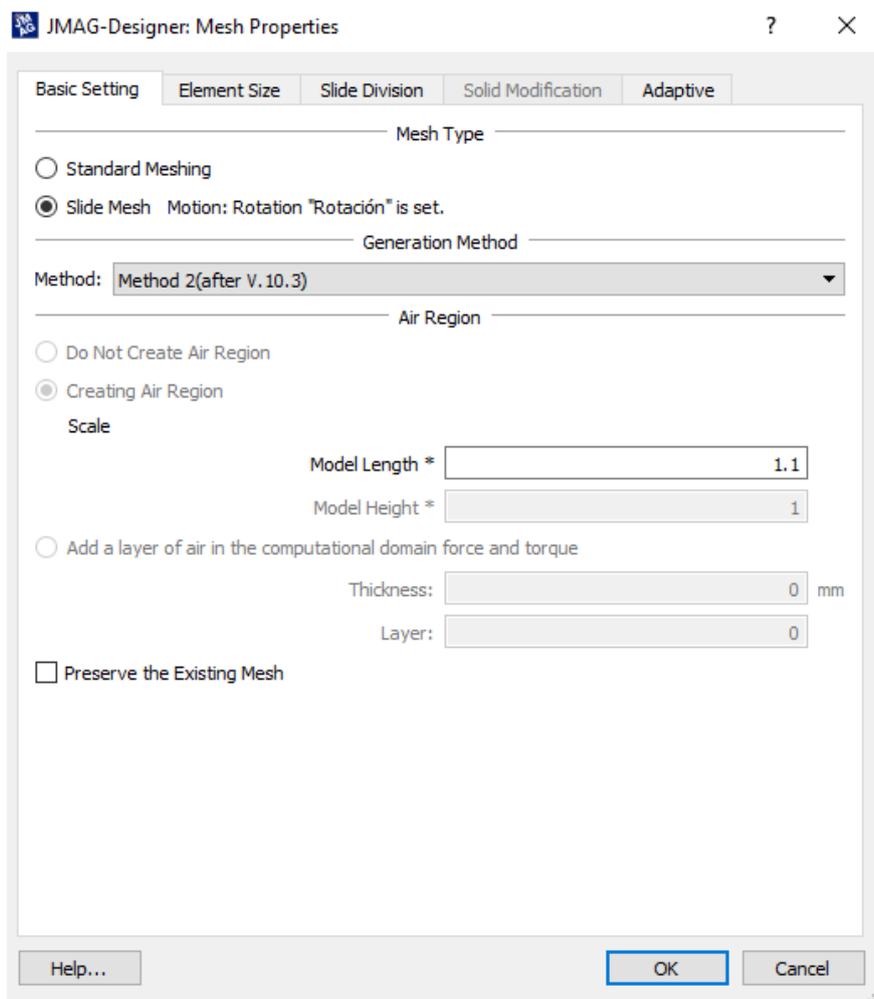


Figura 39: Mallado, primer ajuste. (Fuente: JMAG)

En el *Mesh Type* se elige la opción *Slide Mesh*, que creará una malla de desplazamiento en el entrehierro. En cuanto a la región de aire, se debe decir cuánto abarca ésta, siendo el mínimo 1.05 veces el tamaño del modelo. Dado que los efectos electromagnéticos fuera del motor son muy escasos, y no tienen influencia en lo que ocurre en su interior, se define el tamaño de la región de aire como 1.1 veces el tamaño del modelo.



Figura 40: Mallado, segundo ajuste. (Fuente: JMAG)

En el segundo ajuste se define el tamaño de los elementos. Se decide que 2 milímetros es un tamaño suficiente para obtener buenos resultados sin alargar demasiado los tiempos de simulación. Se permite que en las regiones de aire se dimensionen automáticamente los elementos; no se incluye el entrehierro en dicha región.

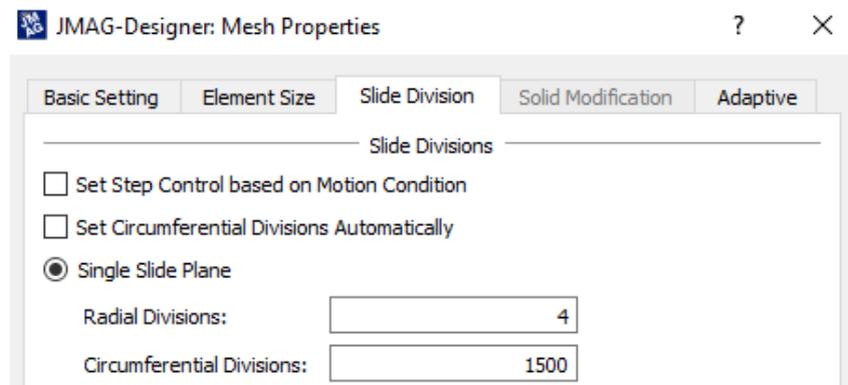


Figura 41: Mallado, tercer ajuste. (Fuente: JMAG)

En este último ajuste, se dimensiona el mallado del entrehierro, haciendo 4 divisiones radiales, y 1500 divisiones circunferenciales, es decir los 0.5 milímetros del entrehierro se dividen entre cuatro; y el diámetro del entrehierro se divide en 1500. El mínimo de divisiones circunferenciales sería de 720, sin embargo, se producía un descenso en la precisión considerable.

Bajo estos ajustes, se crea la malla del modelo, dando lugar a la siguiente representación de sus elementos.

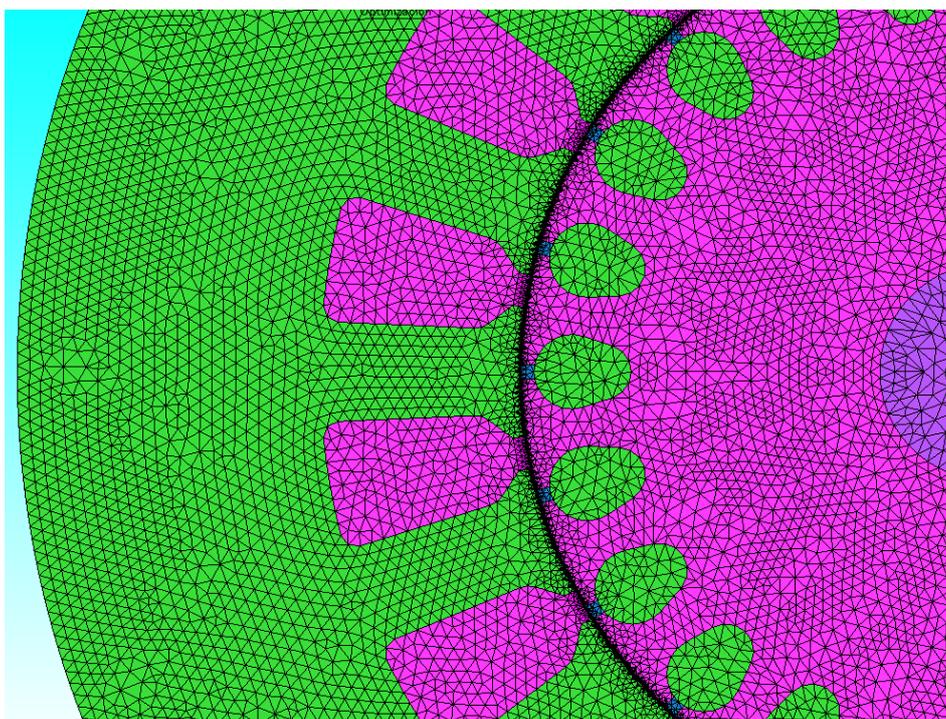


Figura 42: Mallado de estator y rotor. (Fuente: Elaboración propia mediante JMAG)

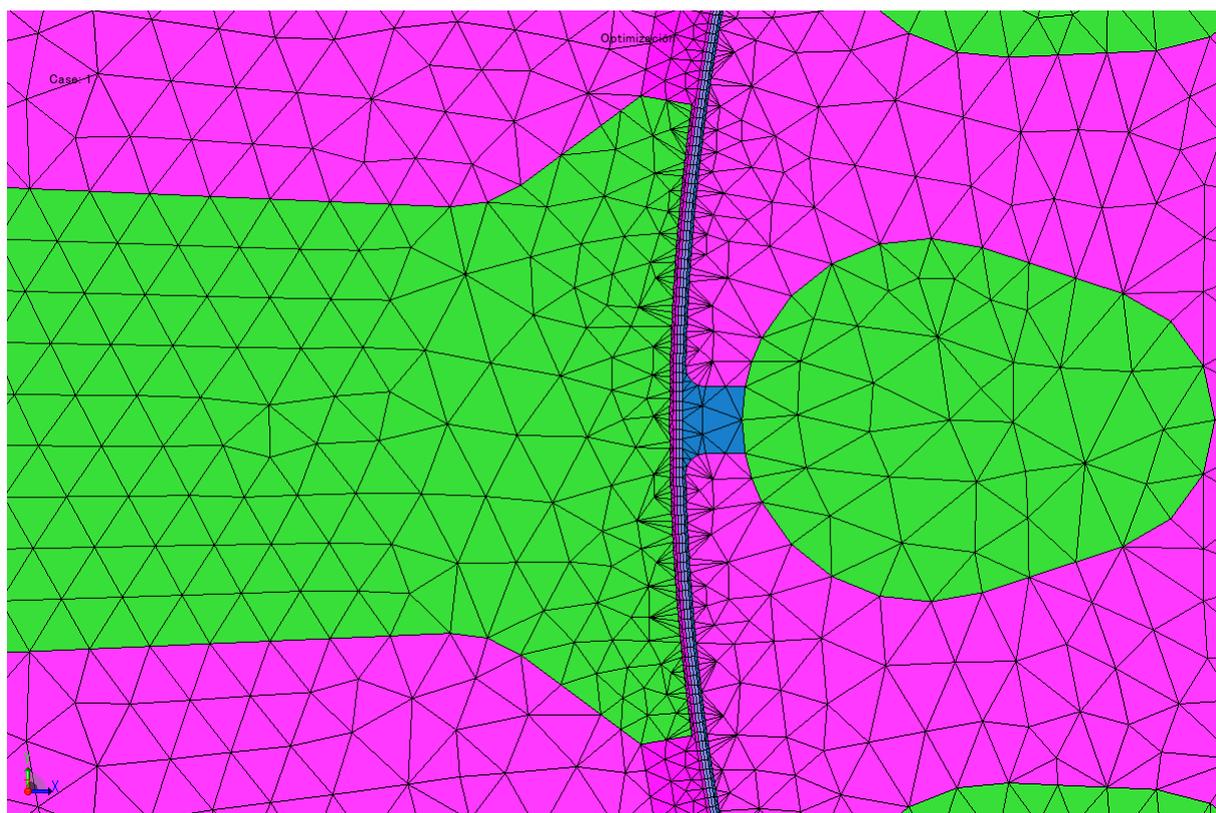


Figura 43: Mallado, detalle del entrehierro. (Fuente: Elaboración propia mediante JMAG)

A continuación, se presenta la calidad de malla conseguida, dividiendo el número de elementos con sus respectivas calidades, y el porcentaje del total que conforman.

	Quality	Element Count	Display	
↑	Flat 0.0 - 0.1:	<input type="text" value="0"/>	<input type="checkbox"/>	Elements: <input type="text" value="59936"/>
	0.1 - 0.2:	<input type="text" value="663"/>	<input type="checkbox"/>	Nodes: <input type="text" value="33764"/>
	0.2 - 0.3:	<input type="text" value="1766"/>	<input type="checkbox"/>	
	0.3 - 0.4:	<input type="text" value="3232"/>	<input type="checkbox"/>	
	0.4 - 0.5:	<input type="text" value="3180"/>	<input type="checkbox"/>	Minimum: <input type="text" value="0.100991"/>
	0.5 - 0.6:	<input type="text" value="2466"/>	<input type="checkbox"/>	Maximum: <input type="text" value="0.999192"/>
	0.6 - 0.7:	<input type="text" value="3792"/>	<input type="checkbox"/>	Average: <input type="text" value="0.786106"/>
	0.7 - 0.8:	<input type="text" value="6894"/>	<input type="checkbox"/>	Joint: <input type="text" value="0.675025"/>
	↓	0.8 - 0.9:	<input type="text" value="11780"/>	<input type="checkbox"/>
Regular	0.9 - 1.0:	<input type="text" value="26163"/>	<input type="checkbox"/>	

Figura 44: Calidad de los elementos de la malla. (Fuente: Elaboración propia mediante JMAG)

Siendo la media de calidad del 78.61%, podemos decir que es una malla de buena calidad y se obtienen resultados válidos y comparables a la situación real.

4.2 ANEXO 4: ESTUDIO DEL MODELO INICIAL

Definidas las características del estudio en el Anexo 3, el siguiente paso es estudiar el modelo inicial del motor, y crear sus curvas de velocidad.

4.2.1 Estudio paramétrico a distintas velocidades

Para llevar a cabo este estudio, y poder obtener las características de funcionamiento en función de la velocidad, se debe parametrizar y crear casos nuevos a distintas velocidades; para ello es fundamental no solo variar la velocidad de rotación de la *Rotation condition*, sino también el deslizamiento usado en la aproximación a estado estacionario.

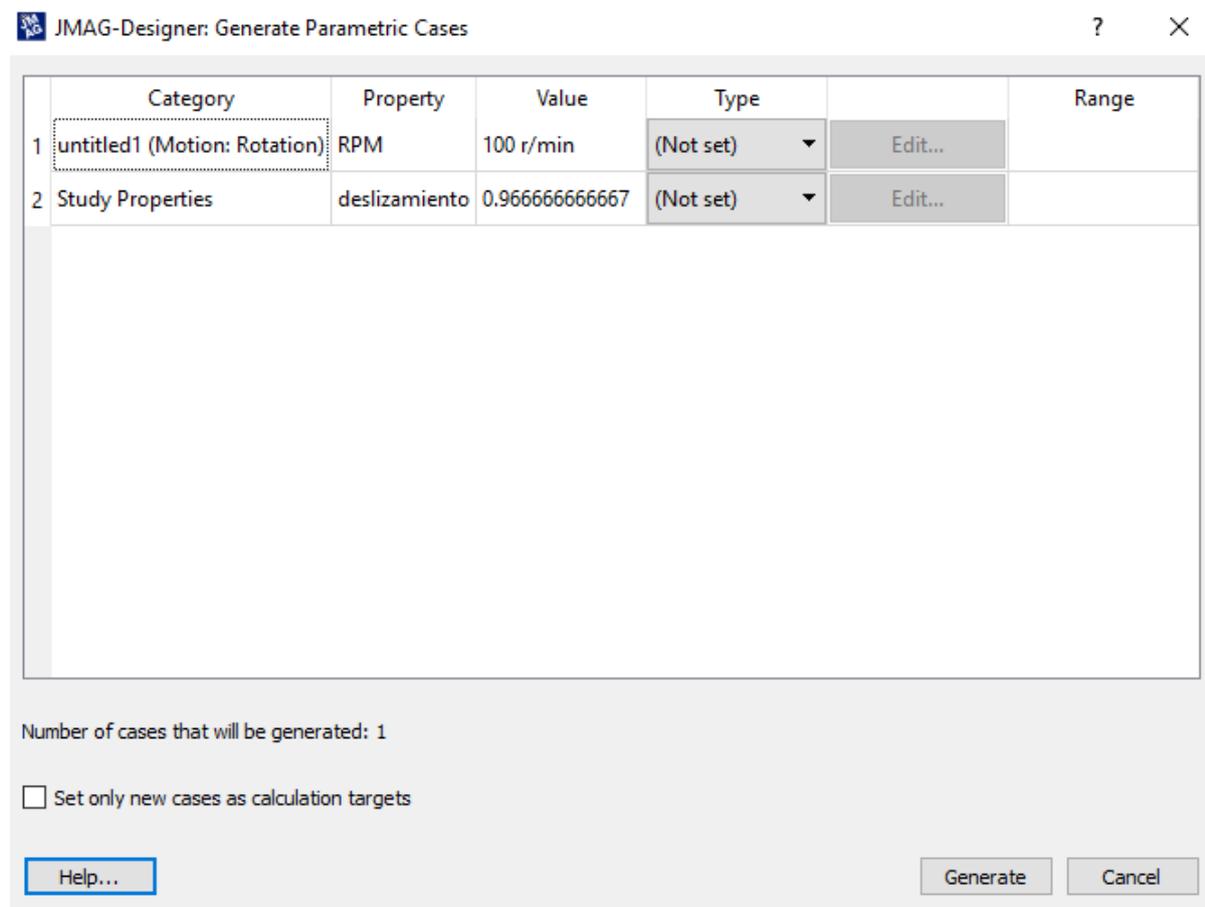


Figura 45: Parámetros de velocidad. (Fuente: Elaboración propia mediante JMAG)

Con dichos parámetros, se crea una serie de nuevos casos, cuyos resultados formarán las curvas del motor.

JMAG-Designer: Design Table

<input checked="" type="checkbox"/> Case	Label	Geometry	Groups	RPM	deslizamiento
<input checked="" type="checkbox"/> 1				100	0.9666666666666666
<input checked="" type="checkbox"/> 2				500	0.8333333333333333
<input checked="" type="checkbox"/> 3				1000	0.6666666666666666
<input checked="" type="checkbox"/> 4				1500	0.5
<input checked="" type="checkbox"/> 5				1800	0.4
<input checked="" type="checkbox"/> 6				2000	0.3333333333333333
<input checked="" type="checkbox"/> 7				2250	0.25
<input checked="" type="checkbox"/> 8				2500	0.1666666666666666
<input checked="" type="checkbox"/> 9				2700	0.1
<input checked="" type="checkbox"/> 10				2750	0.08333333333333333
<input checked="" type="checkbox"/> 11				2800	0.06666666666666666
<input checked="" type="checkbox"/> 12				2850	0.05
<input checked="" type="checkbox"/> 13				2900	0.03333333333333333
<input checked="" type="checkbox"/> 14				2925	0.025
<input checked="" type="checkbox"/> 15				2970	0.01
<input checked="" type="checkbox"/> 16				2985	0.005

Figura 46: Casos paramétricos de velocidad. (Fuente: Elaboración propia mediante JMAG)

De dicho estudio, se registran como variables de respuesta la corriente absorbida por las fases del estator, el par de salida, las pérdidas en el cobre, y la potencia activa absorbida. Con estos datos podemos calcular todo lo necesario para la posterior optimización del motor, y elegir su punto de trabajo, es decir, potencia y deslizamiento.

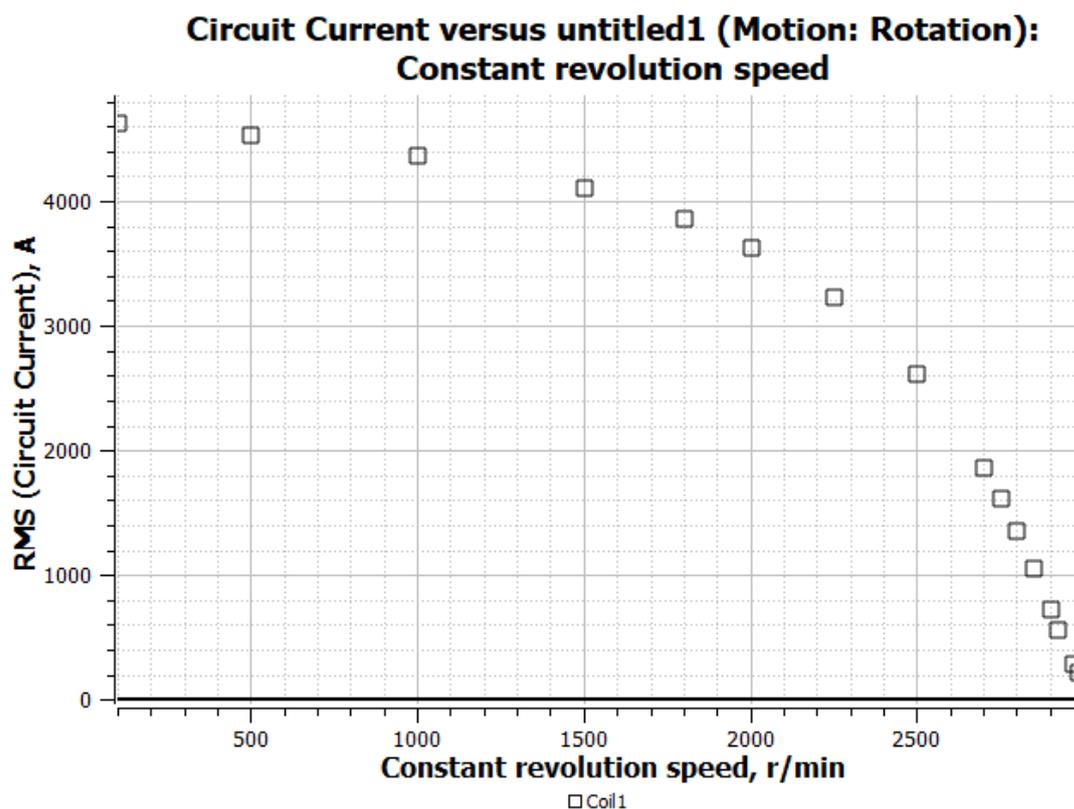


Figura 47: Curva de Corriente-Velocidad del modelo inicial. (Fuente: JMAG)

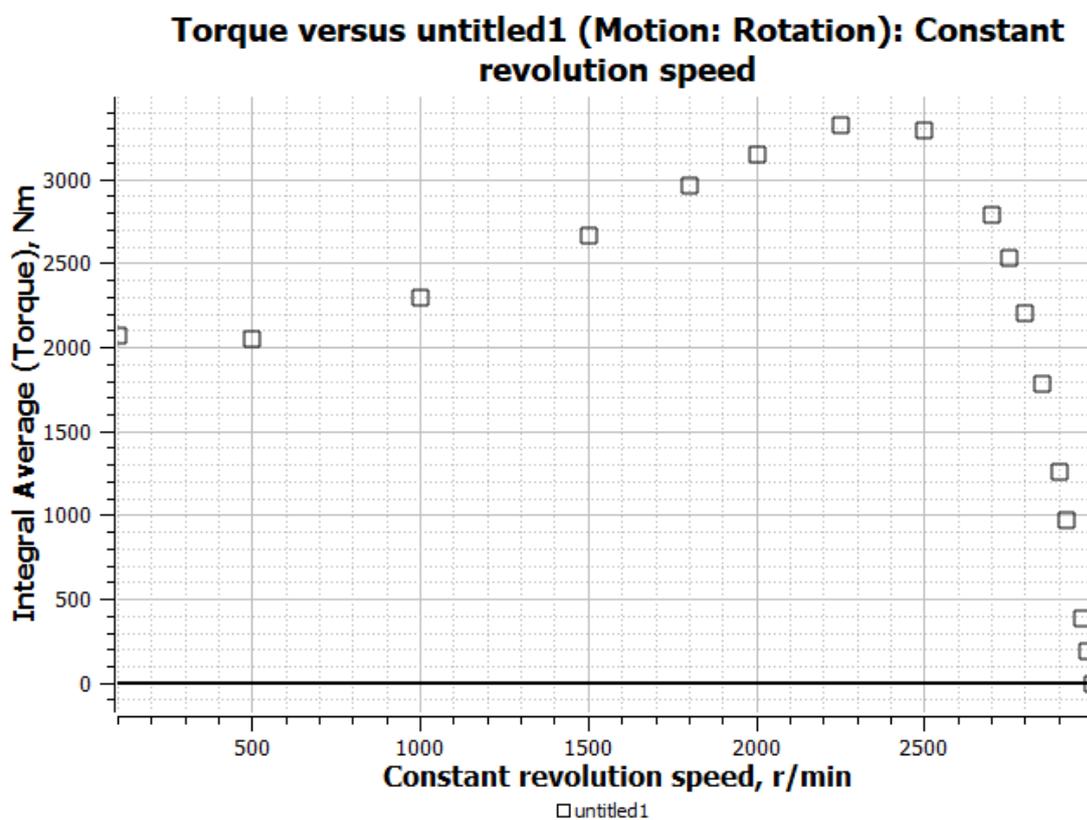


Figura 48: Curva de Par-Velocidad del modelo inicial. (Fuente: JMAG)

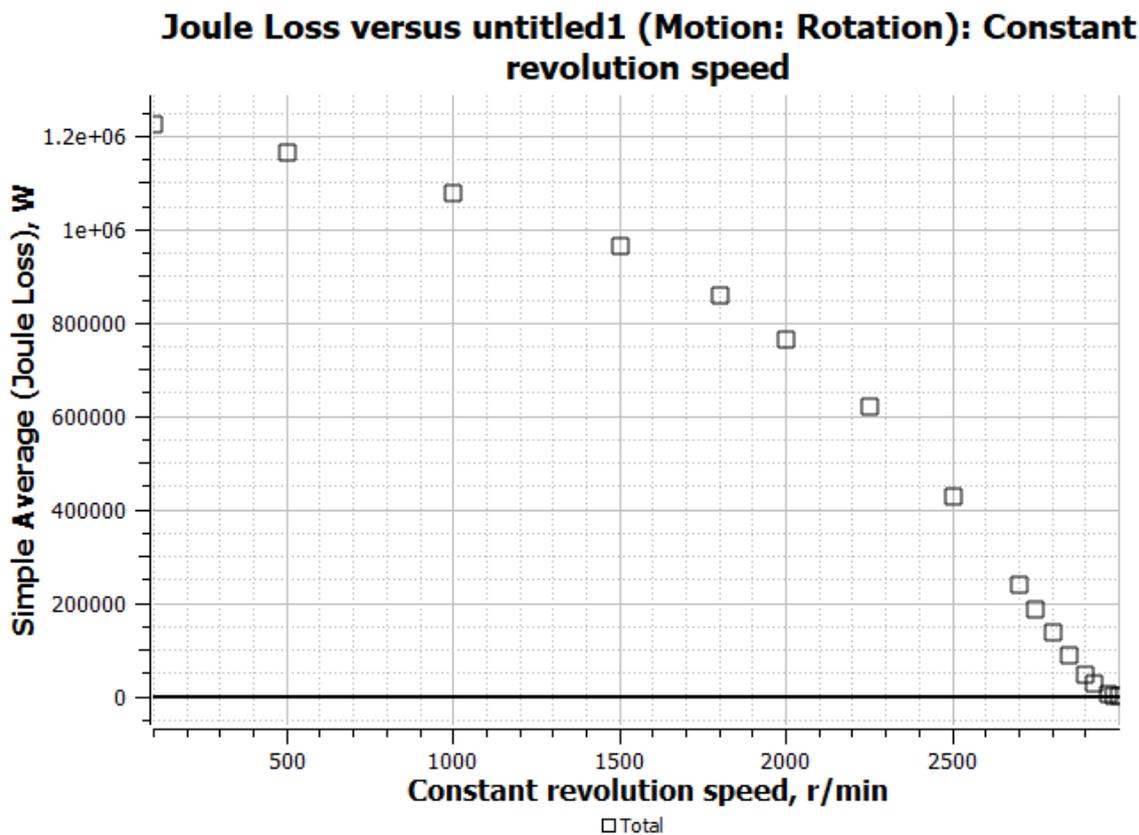


Figura 49: Curva de Pérdidas Joule-Velocidad del modelo inicial. (Fuente: JMAG)

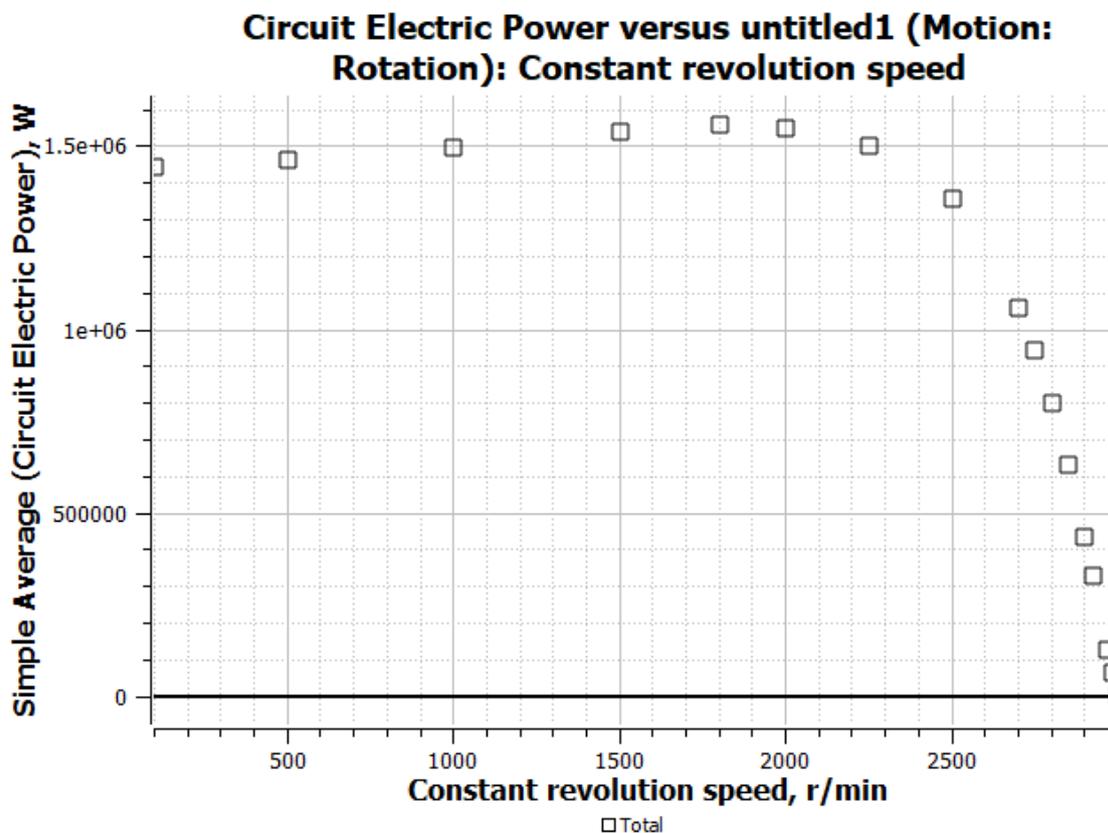


Figura 50: Curva de Potencia absorbida-Velocidad del modelo inicial. (Fuente: JMAG)

4.2.2 Estudio a régimen nominal

A partir de las curvas anteriores, se intuye que el punto de trabajo estará en torno a un deslizamiento del 1%, es decir, a una velocidad de 2970rpm. En este caso, los resultados del modelo inicial son los siguientes.

Tabla 1: Resultados del modelo inicial. (Fuente: Elaboración propia)

Par (N·m)	386
$P_{\text{Útil}}$ (W)	120052,8
$P_{\text{Absorbida}}$ (W)	130104
I_s (A)	288
S (VA)	198720
λ	0,65471
η	0,922745
Producto $\eta \cdot \lambda$	0,604131
B_{av} (T)	0,84484
B_{ts} (T)	1,749529
B_{cr} (T)	1,269591
B_{cs} (T)	1,769245
P_{Joule} (W)	7265,531

Por supuesto, estos valores no coinciden exactamente con los iniciales del diseño, puesto que, al diseñar, no podemos saber a qué velocidad, con qué deslizamiento, se van a dar los valores de diseño, tanto de potencia de salida como de rendimientos. Lo que sí sabemos es que esto será entre los deslizamientos habituales de 5% y 1%. Nos preocuparemos de ajustarlos y mejorarlos durante la optimización.

4.2.3 Pérdidas en el hierro

Para obtener con exactitud las pérdidas en el hierro, se debe crear un nuevo estudio dedicado a las mismas, cuando ya se ha estudiado el modelo en el estudio transitorio. En este estudio de pérdidas, la única condición que se impone es la de pérdidas en el hierro en el estator.

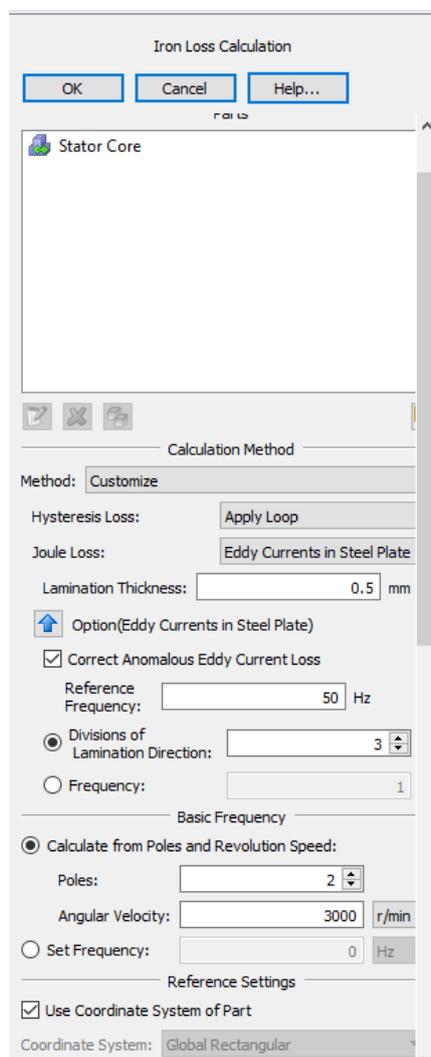
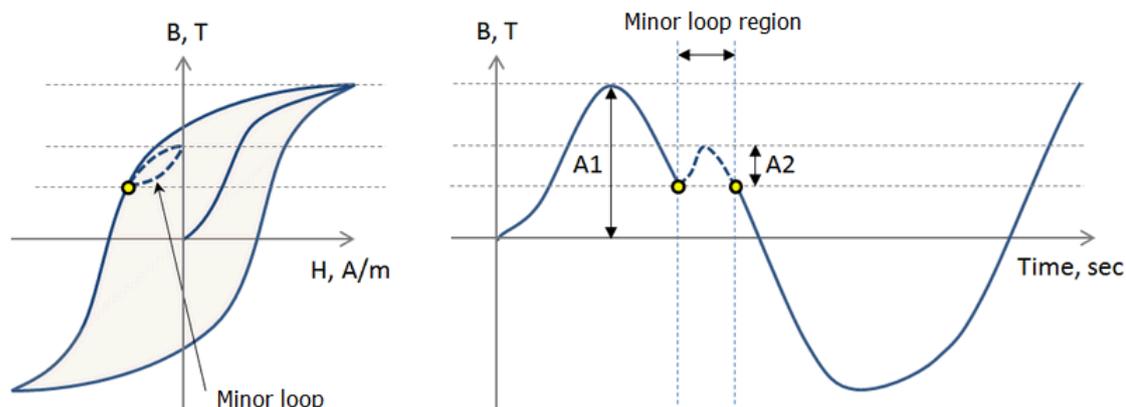


Figura 51: Condición de pérdidas en el hierro. (Fuente: Elaboración propia mediante JMAG)

En dicha condición, se define la frecuencia de funcionamiento para el cálculo de corrientes de Eddy, y también se define el número de polos y la velocidad de rotación síncrona. Se seleccionan los métodos *Apply Loop* y *Eddy Currents in Steel Plate*. *Apply Loop* detecta los valores máximo y mínimo de la densidad de flujo magnético; y a partir de ellos aplica un bucle virtual de histéresis.



left: hysteresis loop (thick lines: major loop, dotted line: minor loop),
 right: magnetic flux density waveform of time history
 (A1: amplitude of the major loop, A2: amplitude of the minor loop)

Figura 52: Bucle de histéresis del método Apply Loop. (Fuente: JMAG)

Eddy Currents in Steel Plate realiza un cálculo teniendo en cuenta la distribución de pérdidas en el interior de la lámina de acero.

Otra opción sería usar *FFT*, (*Fast Fourier Transform*), que calcula la amplitud de las pérdidas a cada frecuencia. Dicho ajuste, *FFT*, se usa también de forma complementaria para dar un valor claro a las pérdidas del hierro.

4.3 ANEXO 4: EDITOR GEOMÉTRICO

Para poder modificar la geometría inicial y obtener nuevos resultados gracias a la modificación del modelo y de sus distintas partes físicas, debemos ayudarnos del editor geométrico de JMAG.

Para ello, en la pantalla principal del estudio, se seleccionará el modelo inicial que se ha estudiado, y se activará la opción *Restore CAD link to Geometry Editor*. Esto abrirá una nueva pantalla, separada de la pantalla del estudio de JMAG, con la geometría del modelo y sus cotas geométricas.

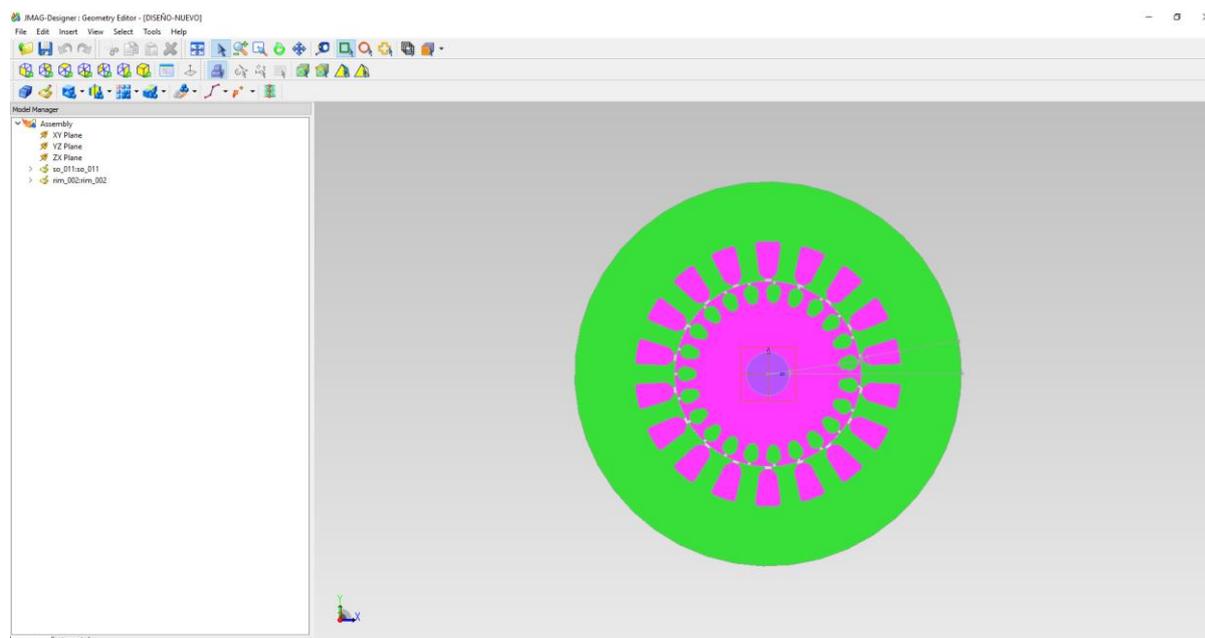


Figura 53: Ventana del editor geométrico.

Aparecerá un árbol desplegable llamado *Assembly*, que reúne los bocetos del rotor y el estator.

Para poder modificar estas medidas geométricas desde JMAG, debemos introducir ecuaciones en el editor geométrico.

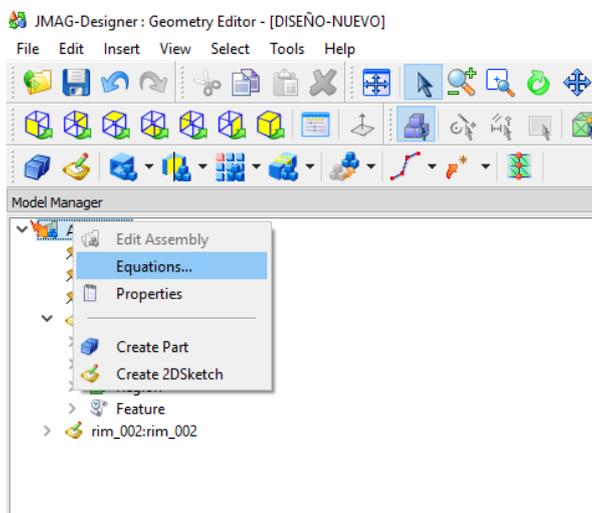


Figura 54: Activación de ecuaciones en el editor geométrico. (Fuente: JMAG)

En dicha pestaña, se introduce el nombre de una variable, y se le da un valor; en este caso, nombramos las variables que vamos a sumar y les damos su valor actual.

Para aplicar dichas ecuaciones, editamos los bocetos del rotor y el estator, y sustituimos el valor de las cotas deseadas, por el nombre de la variable.

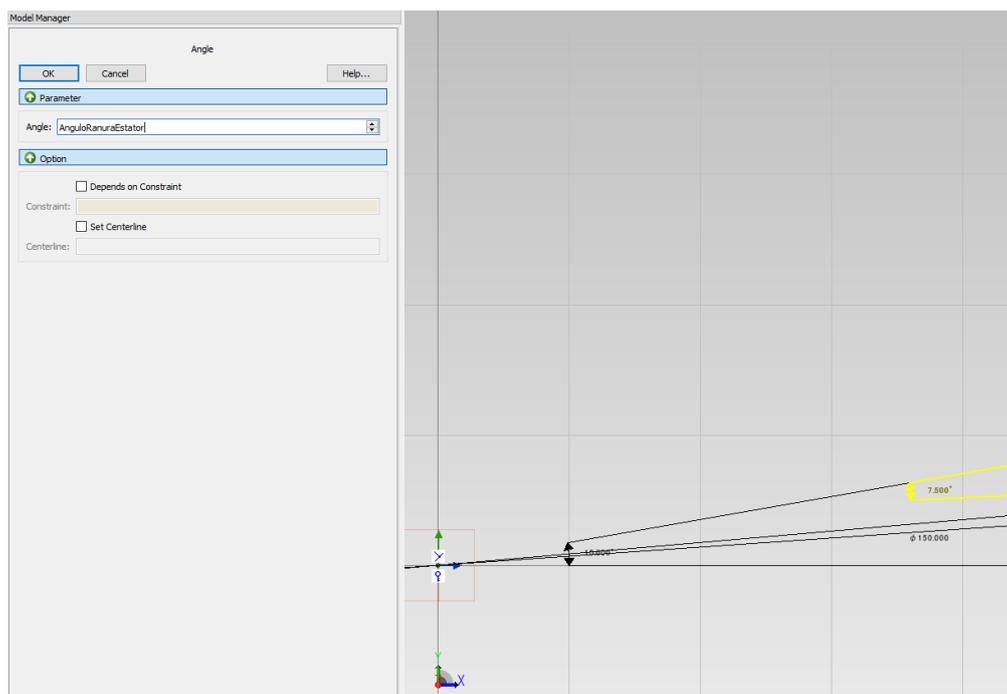


Figura 55: Ejemplo de aplicación de ecuaciones al editor geométrico. (Fuente: Elaboración propia mediante JMAG)

Hecho esto, se vuelve a la ventana de JMAG y se selecciona la opción *Update Model*, con lo que se crea un modelo nuevo enlazado al editor geométrico, y con las medidas geométricas modificadas con ecuaciones. En dicho modelo, se podrá usar la opción *Select CAD Parameters*, que permitirá crear nuevos casos variando la geometría del modelo.

4.4 ANEXO 5: PARAMETRIZACIÓN GEOMÉTRICA

Mediante la variación de parámetros geométricos del motor, se pretende distinguir la influencia que tiene cada uno de ellos sobre el funcionamiento de la máquina. Para ello, se crean cuatro variaciones de geometría para estudiar sus efectos: Aumento el diámetro interno del estator, acercamiento de las barras del rotor al entrehierro, disminución del área de las barras del rotor y aumento del área de las ranuras del estator. Para ello se deben seleccionar los parámetros de CAD mediante la opción *Select CAD Parameters*, y crear casos variando las medidas del modelo.

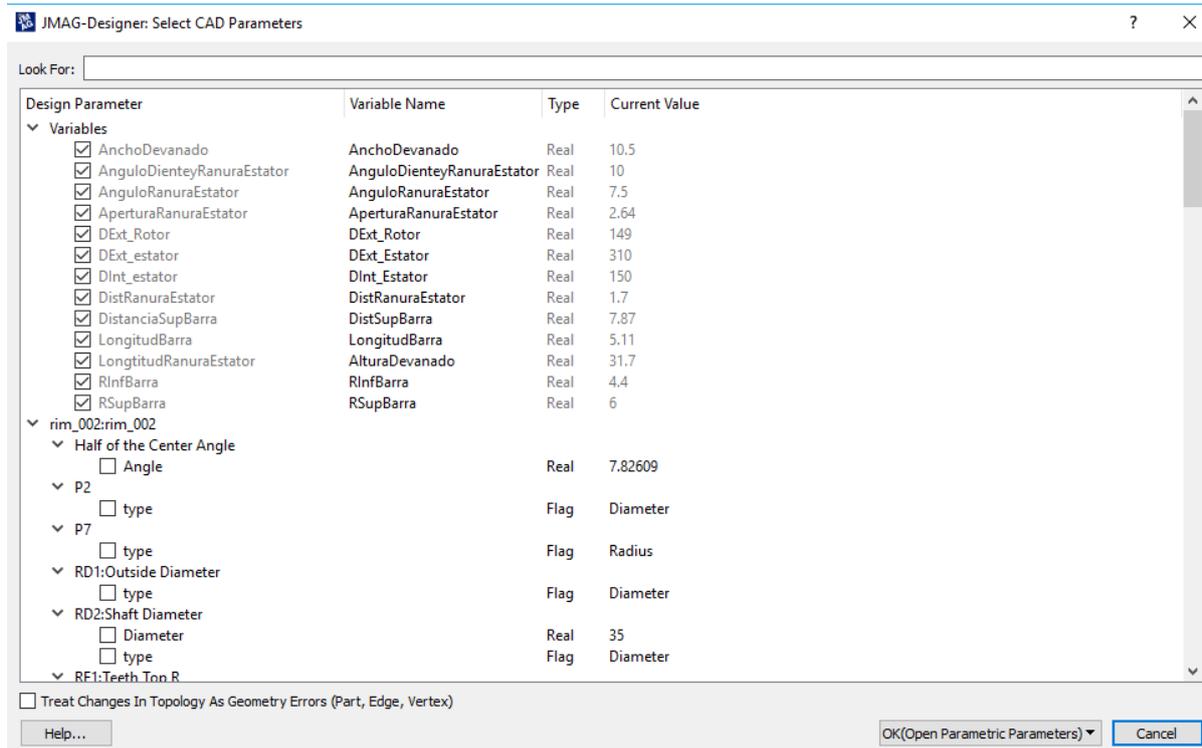


Figura 56: Selección de parámetros de CAD. (Fuente: Elaboración propia mediante JMAG)

Posteriormente se selecciona *OK(Open Parametric Parameters)*, y se procede a crear casos.

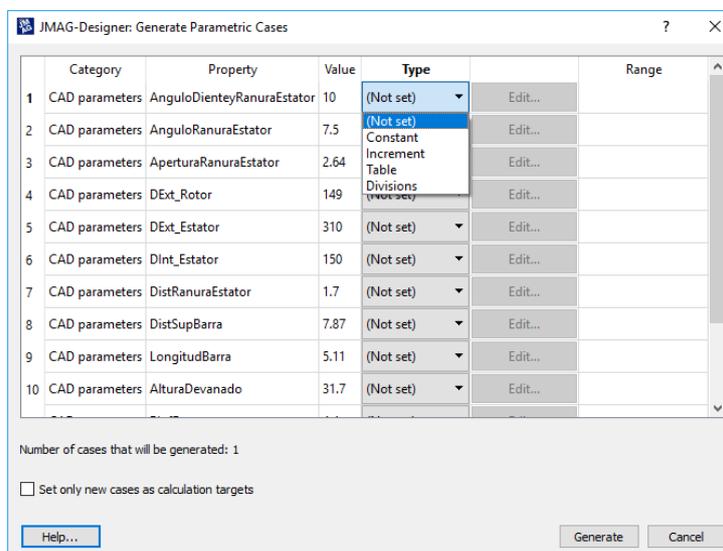


Figura 57: Generación de casos paramétricos. (Fuente: JMAG)

Para generar los casos se presentan varias posibilidades; introducir un valor nuevo constante, crear incrementos, tablas, divisiones... Usaremos tablas para ir creando los casos en los que solo se use un parámetro, en el resto se crearán de uno en uno ya que, de otra forma, JMAG crea una combinación de casos con todos los valores de las tablas, incrementos o divisiones. Por ejemplo. Si usáramos dos parámetros, y creáramos una tabla de tres valores para cada uno, JMAG no crearía tres casos, sino 9, con la combinación de ambos parámetros y sus tres valores.

4.4.1 Aumento del diámetro

El aumento del diámetro del entrehierro se realiza de forma que ningún otro parámetro se vea afectado, es decir, se mantiene la profundidad del núcleo del estator, y de sus ranuras; en definitiva, se aumentan los diámetros en la misma medida, el externo del rotor, interno del estator y externo del estator.

Tabla 2: Medidas del aumento del diámetro. (Fuente: Elaboración propia)

DExt_Rotor	DExt_Estator	DInt_Estator
149	310	150
154	315	155
159	320	160
164	325	165

En dicha tabla, DExt_Rotor es el diámetro externo del rotor, DExt_Estator es el diámetro externo del estator y DInt_Estator es el diámetro interno del estator. La primera fila se corresponde a las medidas del modelo inicial.

4.4.2 Acercamiento de las barras del rotor al entrehierro

En este caso se varía un solo parámetro geométrico, que se corresponde a la separación entre el centro de la circunferencia superior de la barra del rotor, y el exterior del rotor.

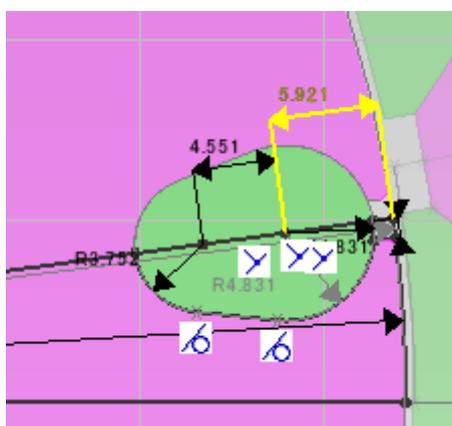


Figura 58: Distancia superior de las barras. (Fuente: Elaboración propia)

Siendo el en el modelo inicial la separación de 7.87 milímetros, se reduce a 7 sin cambiar ningún otro parámetro.

Tabla 3: Variación geométrica del acercamiento de las barras. (Fuente: Elaboración propia)

DistSupBarra	LongitudBarra	RInfBarra	RSupBarra	AnchoDevanado
7,87	5,11	4,4	6	10,5
7	5,11	4,4	6	10,5

4.4.3 Disminución del área de las barras del rotor

En esta parametrización se varían tres medidas: la separación entre los centros de circunferencia de las barras, y los radios superior e inferior de éstas.

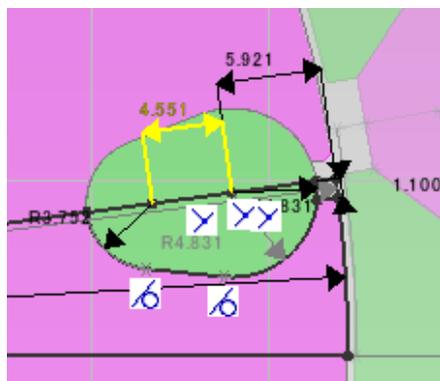


Figura 59: Longitud de las barras, separación entre centros. (Fuente: Elaboración propia)

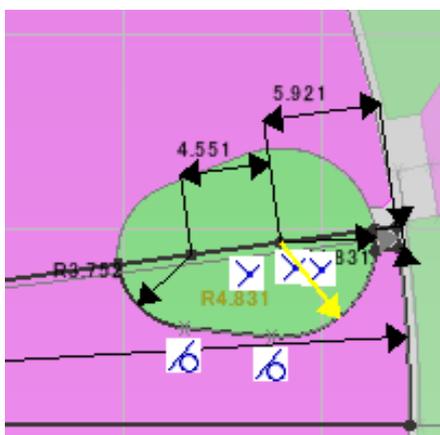


Figura 60: Radio superior de las barras. (Fuente: Elaboración propia)

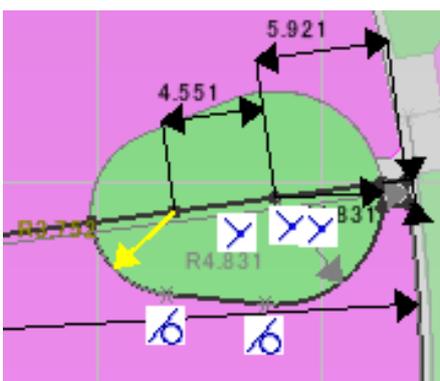


Figura 61: Radio inferior de las barras. (Fuente: Elaboración propia)

A continuación, se muestran las medidas iniciales frente a las parametrizadas.

Tabla 4: Variación geométrica de las dimensiones de las barras del rotor. (Fuente: Elaboración propia)

DistSupBarra	LongitudBarra	RInfBarra	RSupBarra	AnchoDevanado
7,87	5,11	4,4	6	10,5
7,87	4,47	3,85	5,25	10,5
7,87	4	3,52	4,8	10,5
7,87	3,8	3,3	4,5	10,5

4.4.4 Aumento del área de las ranuras del estator

En este caso solo se usa una medida, el ancho de las ranuras, el cual se mide desde la simetría de la ranura, es decir, que en verdad es la mitad de la anchura de la ranura.

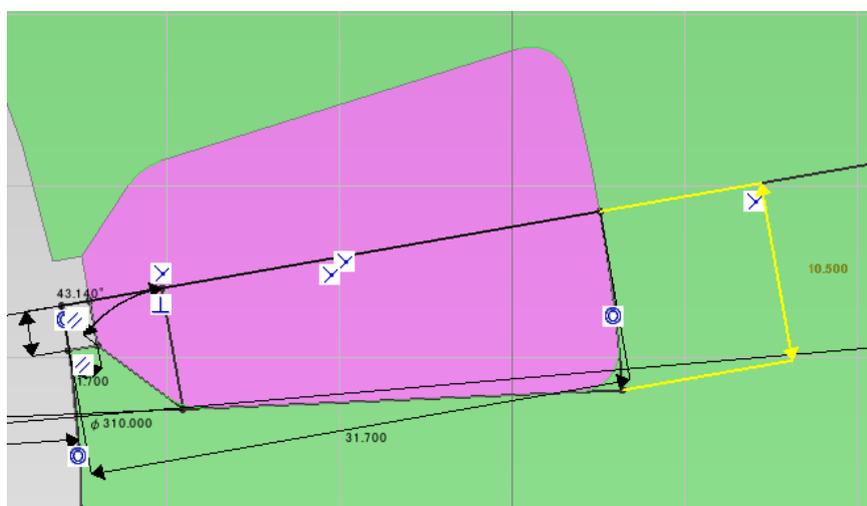


Figura 62: Ancho del devanado. (Fuente: Elaboración propia)

Este ancho se aumenta progresivamente, a continuación, se muestra la variación de dicho parámetro.

Tabla 5: Variación del ancho de las ranuras del estator. (Fuente: Elaboración propia)

AnchoDevanado
10,5
11,5
12,5

4.5 ANEXO 6: OPTIMIZACIÓN

Finalizada la parametrización, y en vista de los resultados que se obtienen, se seleccionan los parámetros que entrarán en juego durante la optimización, y el rango de valores en los que podrán variar dichos parámetros.

La optimización se basará, en primera instancia, en reducir el área de las barras del rotor y acercar éstas al entrehierro.

Para ello, las medidas con las que se permite al programa trabajar son los radios superior e inferior de las barras, la distancia entre ambos centros, y por último la distancia entre el centro de la circunferencia superior y el exterior del rotor.

Tabla 6: Rango de valores para la optimización geométrica del rotor. (Fuente: Elaboración propia)

Nombre de variable	Valor mínimo	Valor máximo
<i>DistSupBarra</i>	5.3	7.87
<i>LongitudBarra</i>	4.47	5.11
<i>RInfBarra</i>	3.3	4.4
<i>RSupBarra</i>	4.5	6

Los valores anteriores se eligen de acuerdo con la previa parametrización, y teniendo en cuenta ciertas restricciones, como por ejemplo el área mínima admisible de barras del rotor, o que las barras no pueden llegar a estar a distancia nula del exterior del rotor para no dar lugar a problemas en la construcción del modelo del editor geométrico.

4.5.1 Función Objetivo

Nuestro objetivo principal es mejorar la eficiencia del motor, y ello pasa por una mejora tanto del factor de potencia como del rendimiento. Por tanto, pretendemos optimizar, concretamente maximizar, el factor de potencia y el rendimiento del motor.

Deberíamos por tanto tener dos funciones objetivo, maximizar el factor de potencia, y por otro lado maximizar el rendimiento; esto sin embargo daría lugar a una optimización más costosa desde el punto de vista computacional, y más larga. Para evitarlo, pensamos que lo mejor es optimizar el producto de ambos factores, $\eta \cdot \lambda$.

En primera instancia puede parecer una argucia matemática, sin embargo, podemos ver la relación con el funcionamiento del motor muy rápidamente. Dicho producto, relaciona directamente la potencia aparente absorbida, con la potencia útil de salida:

$$\eta = \frac{P_{\text{Útil}}}{P_{\text{Absorbida}}}; \lambda = \frac{P_{\text{Absorbida}}}{S}; \eta \cdot \lambda = \frac{P_{\text{Útil}}}{S}$$

Visto así, ¿qué significado tendría entonces dicho producto? Dicho producto representa la relación entre el par de salida y la corriente absorbida por el motor.

$$P_{\text{Útil}} = M \cdot 2n\pi$$

De lo anterior se sabe que lo único variable en el estudio será el par, dado que 2 y π con constantes, y la velocidad de rotación del estudio también será invariante.

$$S = 3 \cdot 230 \cdot I_s$$

La potencia aparente es 3 veces la tensión de fase por la corriente, y la tensión de la red es invariable, por lo que lo único variable es la corriente absorbida.

$$\eta \cdot \lambda = \frac{2n\pi}{3 \cdot 230} \cdot \frac{M}{I_s} = Cte \cdot \frac{M}{I_s}$$

De esta forma, lo que se va a optimizar es la relación entre el par desarrollado y la corriente absorbida. Cuanto mayor sea el par para la misma corriente, mayor eficiencia tendrá el motor. Y cuanto menor corriente absorba para dar el mismo par, mejor eficiencia. De esta forma podemos obtener una optimización de ambos parámetros al mismo tiempo, sin tener que pasar por un algoritmo de optimización multivariable.

Por lo tanto, los únicos parámetros necesarios para el cálculo de la optimización son el par y la corriente.

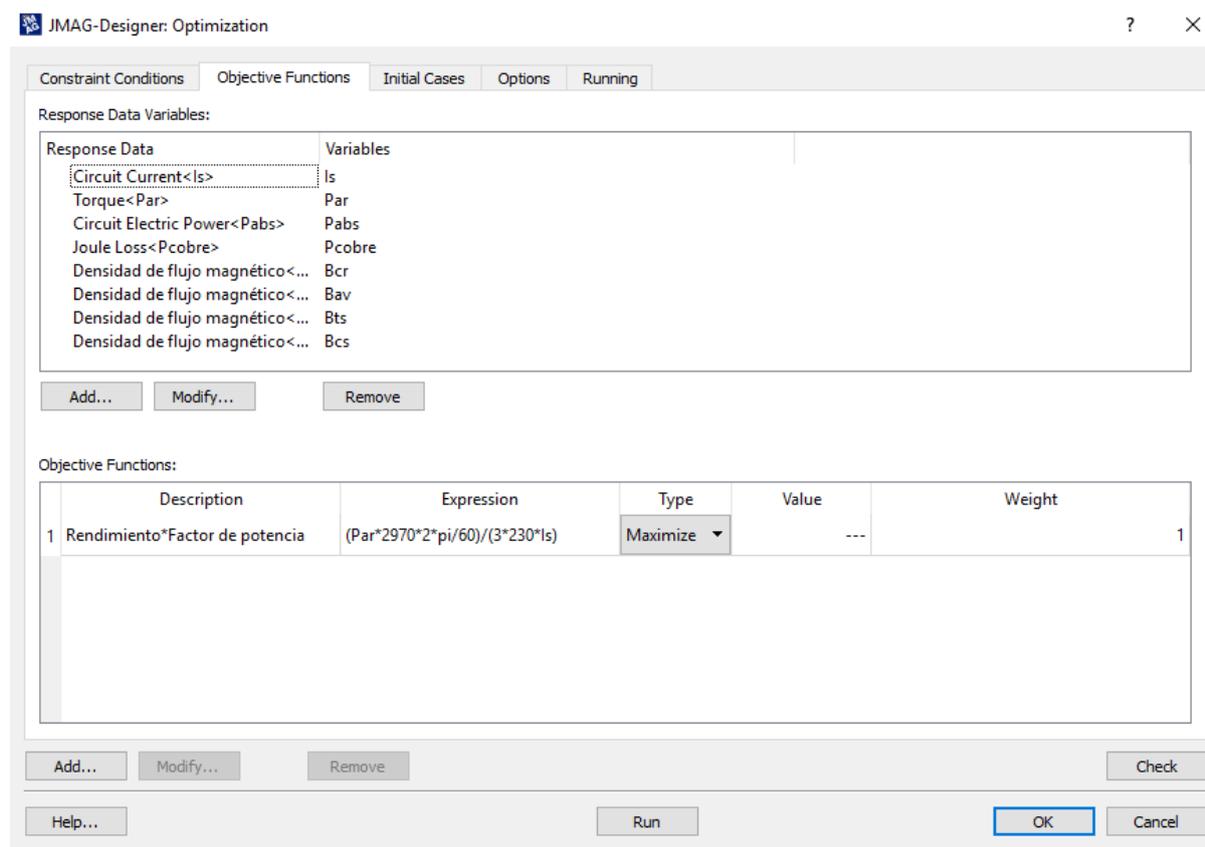


Figura 63: Función objetivo de la optimización. (Fuente: Elaboración propia mediante JMAG)

4.5.2 Casos iniciales

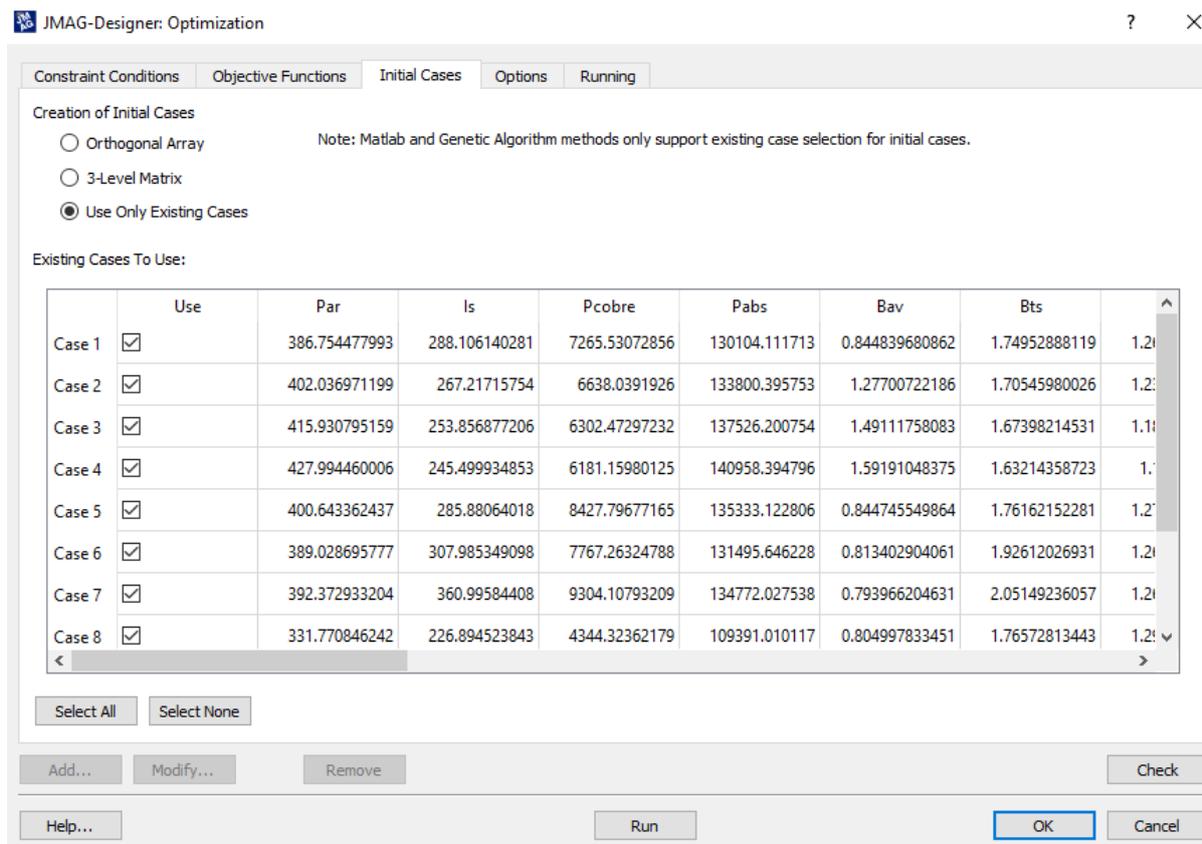


Figura 64: Casos iniciales usados en la optimización. (Fuente: Elaboración propia mediante JMAG)

Los casos que se usan como iniciales, son los casos parámetros usados para observar el comportamiento del motor ante variaciones geométricas. Se corresponden con los estudios del Anexo 5: Parametrización.

Seleccionar estos casos como iniciales ayuda a reducir el tiempo de optimización, al otorgar al programa y al algoritmo unos resultados preexistentes a la optimización.

4.5.3 Opciones de optimización

Debemos elegir el algoritmo que usará JMAG para llevar a cabo la optimización, así como los ajustes del mismo. Para ello tenemos dos opciones ya que se trata de una optimización de una sola variable; *Quadratic Response Surface* y *Genetic Algorithm*.

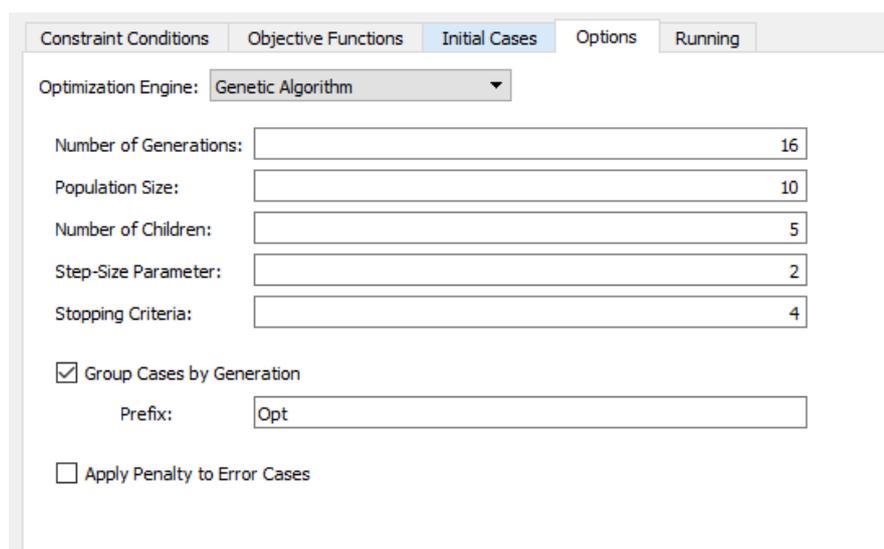
Para elegir, debemos conocer en qué se basa cada uno de ellos. *Quadratic Response Surface*, se basa en el uso de un polinomio de segundo grado para optimizaciones de un solo objetivo, como es el caso. Dicho método, si existe una única solución, se obtendrá en poco tiempo; sin embargo, cuando pueda haber más de una solución, no siendo aproximable por

un polinomio de segundo grado, no existen garantías de que se pueda obtener una solución correcta. Sabiendo esto, descartamos este método al ser la función objetivo muy distinta de un polinomio de segundo grado.

Genetic Algorithm es un método que usa números reales. Cuando una solución es multimodal, la capacidad de este método para obtener soluciones es mucho mayor que la de *Quadratic Response Surface*. Este método se usa para optimizaciones de un solo objetivo. Visto esto, se elige como método para nuestra optimización, siendo el más adecuado.

Los ajustes necesarios de este método son:

- *Population Size*: Número de individuos en cada generación.
- *Maximum Generations*: Número máximo de generaciones.
- *Number of Children*: Número de hijos que engendra cada generación.
- *Step-Size Parameter*: Determina la escala de desplazamiento en la dirección global de descenso del rango en que un hijo es engendrado. La dirección global de descenso es la dirección en la que se estima que la adaptabilidad del individuo mejorará. El valor recomendado es 2.
- *Stopping Criteria*: Se especifica el número de generaciones que pararán la optimización. Cuando la adaptabilidad de un individuo no cambie en las generaciones dispuestas en este ajuste, se dirá que la optimización ha convergido. Se recomienda que sea un cuarto del número máximo de generaciones.



The image shows a software interface for configuring optimization parameters. At the top, there are five tabs: 'Constraint Conditions', 'Objective Functions', 'Initial Cases' (which is selected), 'Options', and 'Running'. Below the tabs, the 'Optimization Engine' is set to 'Genetic Algorithm'. The following parameters are configured in text input fields:

Parameter	Value
Number of Generations	16
Population Size	10
Number of Children	5
Step-Size Parameter	2
Stopping Criteria	4

Below these fields, there are two checkboxes:

- Group Cases by Generation
- Apply Penalty to Error Cases

The 'Prefix' field is set to 'Opt'.

Figura 65: Opciones de la optimización con GA. (Fuente: Elaboración propia mediante JMAG)

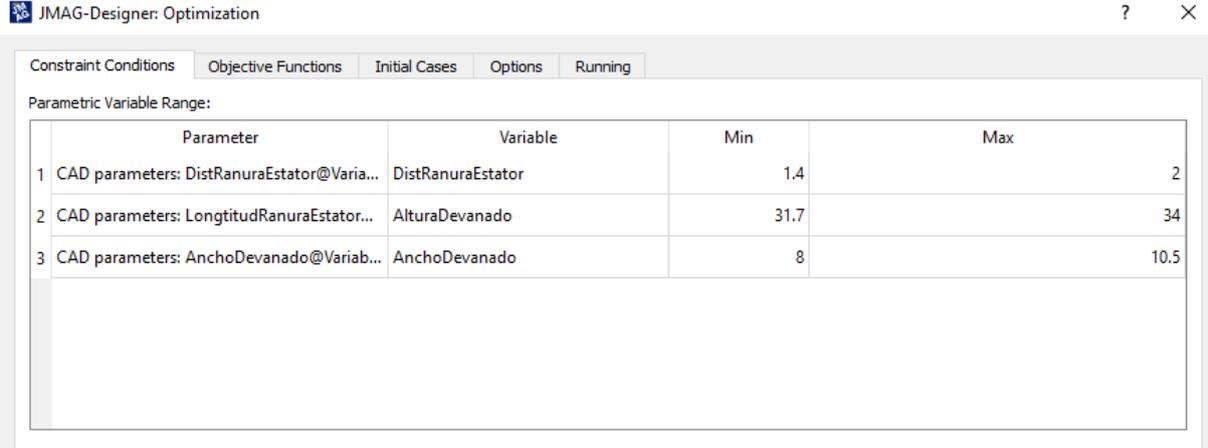
4.6 ANEXO 7: OPTIMIZACIÓN DEL ESTATOR

Terminada la optimización del rotor, se plantea una optimización del estator. Concretamente de los dientes y los espacios de las ranuras.

Durante la parametrización se comprobó que la idea de aumentar el área de las ranuras tenía consecuencias nefastas para el modelo. Por otro lado, reducir el área de estas sería beneficioso, pero no podemos recurrir a ello con facilidad dada la limitación del factor de llenado.

4.6.1 Parámetros geométricos

La solución por tanto es variar la geometría, pero mantener el área de las ranuras para no dañar el factor de llenado. Los parámetros que se variarán son la distancia de las ranuras hasta el entrehierro, la profundidad de las ranuras, y el ancho de las ranuras.



The screenshot shows the 'JMAG-Designer: Optimization' window with the 'Parametric Variable Range' tab selected. The table below lists the parameters to be optimized.

	Parameter	Variable	Min	Max
1	CAD parameters: DistRanuraEstator@Varia...	DistRanuraEstator	1.4	2
2	CAD parameters: LongitudRanuraEstator...	AlturaDevanado	31.7	34
3	CAD parameters: AnchoDevanado@Variab...	AnchoDevanado	8	10.5

Figura 66: Parámetros de CAD de la optimización del estator. (Fuente: Elaboración propia mediante JMAG)

4.6.2 Función Objetivo

La función objetivo es la misma que en la optimización del rotor, la maximización del producto del factor de potencia y del rendimiento.

4.6.3 Casos iniciales

En este caso, el único caso inicial que se selecciona es el estudio del motor optimizado, es decir, el caso óptimo de la optimización del rotor.

4.6.4 Opciones de optimización

De nuevo se usará el *Genetic Algorithm*, solo que se modifican los ajustes de la optimización al usar menos variables geométricas.

Optimization Engine: Genetic Algorithm ▼

Number of Generations:

Population Size:

Number of Children:

Step-Size Parameter:

Stopping Criteria:

Group Cases by Generation

Prefix:

Figura 67: Opciones del GA de la optimización del estator. (Fuente: Elaboración propia mediante JMAG)

5 ANEXO 8: EXCEL

A partir de una hoja de Excel se introducen los resultados y se calculan parámetros importantes como la potencia útil, potencia aparente absorbida, factor de potencia y rendimiento. Se crean también curvas que ayudan a la toma de decisiones y en la comparación entre resultados. Para ello se usan las siguientes ecuaciones.

- POTENCIA ÚTIL

$$P_{\text{útil}} = M \cdot \frac{n \cdot 2\pi}{60}$$

- POTENCIA APARENTE ABSORBIDA

$$S = 3 \cdot 230V \cdot I_s$$

- FACTOR DE POTENCIA

$$\lambda = \frac{P_{\text{Absorbida}}}{S}$$

- RENDIMIENTO

$$\eta = \frac{P_{\text{útil}}}{P_{\text{Absorbida}}}$$

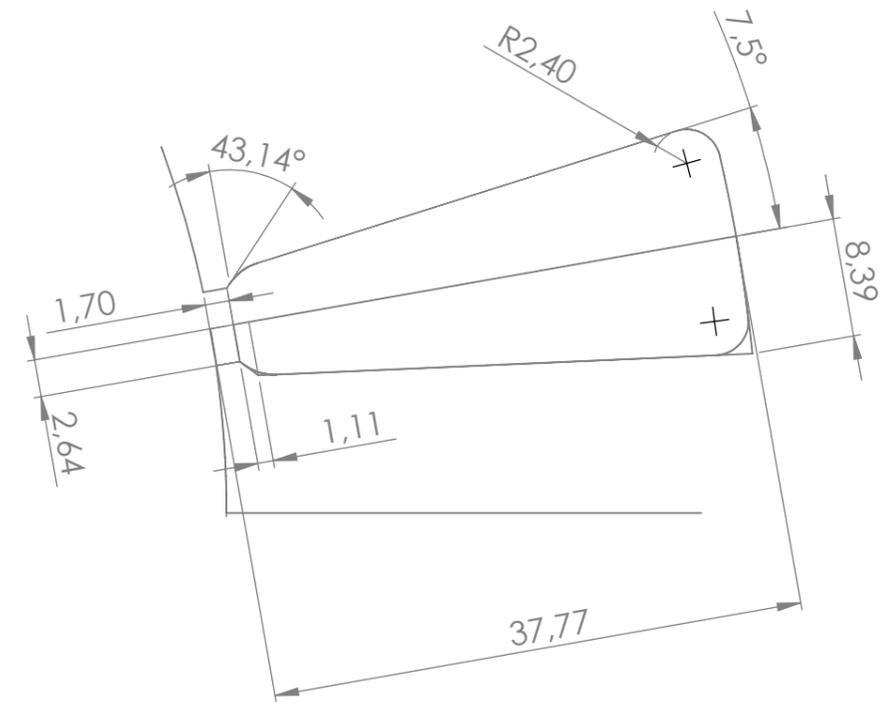
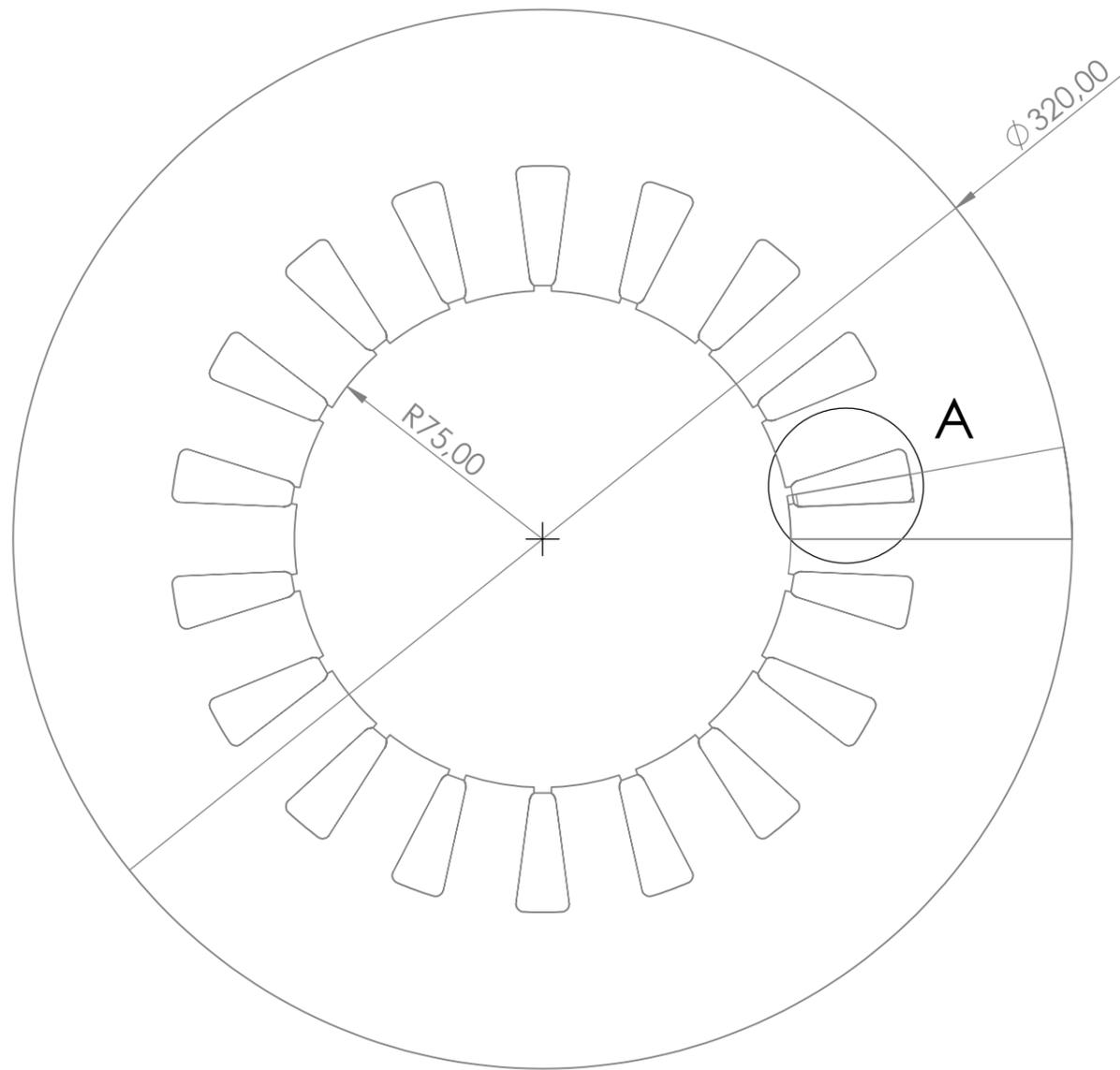
DOCUMENTO N°3: PLANOS

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1 PLANOS	3
1.1 PLANO DEL ESTATOR.....	4
1.2 PLANO DEL ROTOR.....	5

1 PLANOS

A continuación, se adjuntan los planos del estator y el rotor correspondientes al modelo final alcanzado mediante la optimización por elementos finitos.

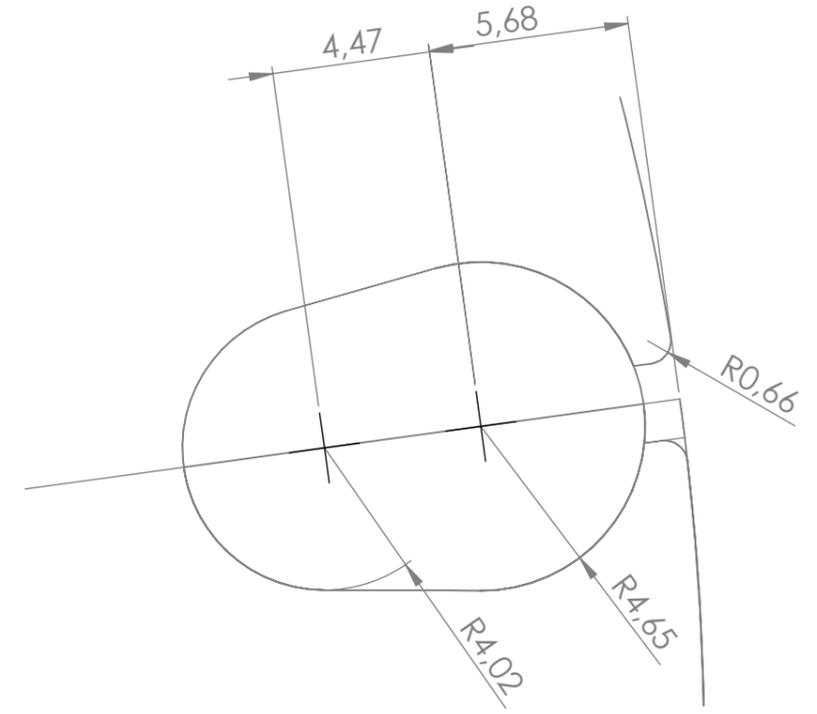
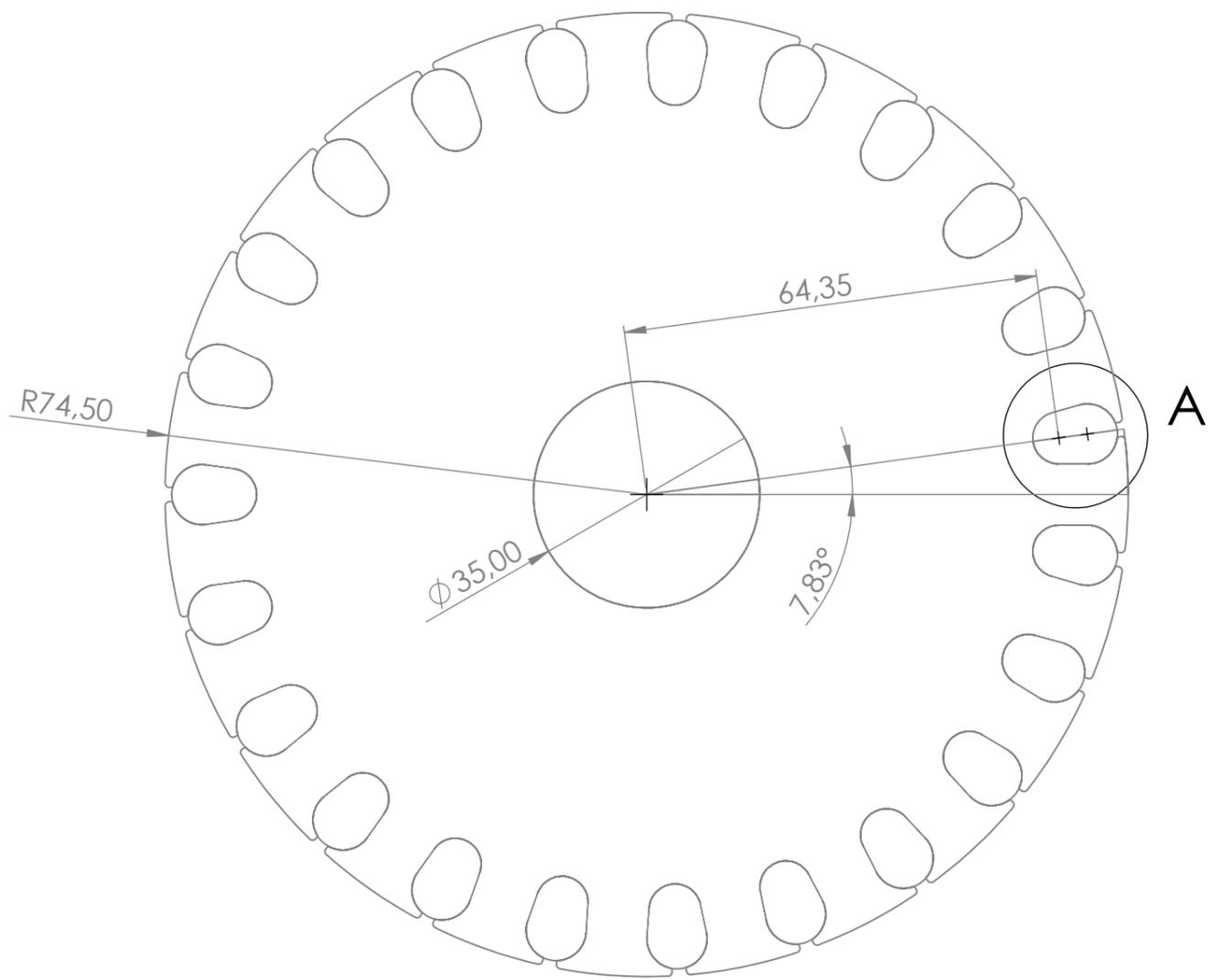


DETALLE A

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		NO CAMBIE LA ESCALA		REVISIÓN	
DIBUJ.		HÉCTOR FERNÁNDEZ		FECHA		07/08/18		TÍTULO: PLANO DEL ESTATOR	
VERIF.									
APROB.									
FABR.									
CALID.				MATERIAL : JFE Steel Sheets; 35JN300		N.º DE DIBUJO: 2		A3	
				PESO:		ESCALA:2:1		HOJA 1 DE 1	

8 7 6 5 4 3 2 1

F E D C B A



DETALLE A
ESCALA 5 : 1

A

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		NO CAMBIE LA ESCALA		REVISIÓN	
DIBUJ.		NOMBRE		FIRMA		FECHA		TÍTULO: PLANO DEL ROTOR	
VERIF.		HÉCTOR FERNÁNDEZ				07/08/18			
APROB.									
FABR.									
CALID.						MATERIAL : JFE Steel Sheets; 35JN300		N.º DE DIBUJO: 1	
						PESO:		ESCALA:2:1	
								HOJA 1 DE 1	
								A3	

8 7 6 5 4 3 2 1

DOCUMENTO N°4: PRESUPUESTO

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1 CUADRO DE PRECIOS N°1	4
1.1 CAPÍTULO 1: MANO DE OBRA	4
1.1.1 Investigación.....	4
1.1.2 Diseño	4
1.1.3 Simulación	5
1.1.4 Confección de planos	5
1.1.5 Redacción del proyecto	5
1.2 CAPÍTULO 2: SOFTWARE UTILIZADO	6
1.2.1 JMAG	6
1.2.2 SOLIDWORKS	6
2 CUADRO DE PRECIOS N°2.....	7
2.1 CAPÍTULO 1: MANO DE OBRA	7
2.1.1 Investigación.....	7
2.1.2 Diseño	7
2.1.3 Simulación	8
2.1.4 Confección de planos	8
2.1.5 Redacción del proyecto	8
2.2 CAPÍTULO 2: SOFTWARE UTILIZADO	9
2.2.1 JMAG	9
2.2.2 SOLIDWORKS	9
3 PRESUPUESTOS PARCIALES.....	9
3.1 CAPÍTULO 1: MANO DE OBRA	9
3.1.1 Investigación.....	9
3.1.2 Diseño	10
3.1.3 Simulación	10
3.1.4 Confección de planos	10
3.1.5 Redacción del proyecto	10
3.2 CAPÍTULO 2: SOFTWARE UTILIZADO	11

3.2.1	JMAG	11
3.2.2	SOLIDWORKS	11
4	PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL	11
5	PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN POR CONTRATA.....	11

1 CUADRO DE PRECIOS Nº1

1.1 CAPÍTULO 1: MANO DE OBRA

1.1.1 Investigación

Id.	Unidades	Descripción	Precio unitario	Precio unitario en letras
1.1.1	Ud.	Adquisición de conocimientos	1.500€	Mil quinientos euros
1.1.2	Ud.	Aprendizaje del uso de los programas informáticos	750€	Setecientos cincuenta euros

1.1.2 Diseño

Id.	Unidades	Descripción	Precio unitario	Precio unitario en letras
1.2.1	Ud.	Cálculo de los parámetros del primer modelo	750€	Setecientos cincuenta euros
1.2.2	Ud.	Dimensionado mediante software de los modelos	1.500€	Mil quinientos euros

1.1.3 Simulación

Id.	Unidades	Descripción	Precio unitario	Precio unitario en letras
1.3.1	Ud.	Evaluación, estudio, comparación, y mejora de los modelos	1.500€	Mil quinientos euros
1.3.2	Ud.	Definición y estudio de la optimización	2.250€	Dos mil doscientos cincuenta euros

1.1.4 Confección de planos

Id.	Unidades	Descripción	Precio unitario	Precio unitario en letras
1.4.1	Ud.	Confección de los planos de las partes del MODELO-3, y recopilación de datos gráficos	37,50€	Treinta y siete euros y cincuenta céntimos

1.1.5 Redacción del proyecto

Id.	Unidades	Descripción	Precio unitario	Precio unitario en letras
1.5.1	Ud.	Redacción de los documentos constituyentes del proyecto finalizado	2.400€	Dos mil cuatrocientos euros

1.2 CAPÍTULO 2: SOFTWARE UTILIZADO

1.2.1 JMAG

Id.	Unidades	Descripción	Precio unitario	Precio unitario en letras
2.1.1	Ud.	Licencia y mantenimiento	377,50€	Trescientos setenta y siete euros y cincuenta céntimos

1.2.2 SOLIDWORKS

Id.	Unidades	Descripción	Precio unitario	Precio unitario en letras
2.2.1	Ud.	Licencia y mantenimiento	5,10€	Cinco euros y diez céntimos

2 CUADRO DE PRECIOS Nº2

2.1 CAPÍTULO 1: MANO DE OBRA

2.1.1 Investigación

Id.	Unidades	Descripción			Precio unitario
1.1.1	Ud.	Adquisición de conocimientos			1.500,00€
		100h profesional	15€/h	1.500€	
1.1.2	Ud.	Aprendizaje del uso de los programas informáticos			750,00€
		50h profesional	15€/h	750€	

2.1.2 Diseño

Id.	Unidades	Descripción			Precio unitario
1.2.1	Ud.	Cálculo de los parámetros del primer modelo			750,00€
		50h profesional	15€/h	750€	
1.2.2	Ud.	Dimensionado mediante software de los modelos			1.500,00€
		100h profesional	15€/h	1.500€	

2.1.3 Simulación

Id.	Unidades	Descripción	Precio unitario
1.3.1	Ud.	Evaluación, estudio, comparación, y mejora de los modelos	
		100h profesional	15€/h 1.500€
1.3.2	Ud.	Definición y estudio de la optimización	
		150h profesional	15€/h 2.250€

2.1.4 Confección de planos

Id.	Unidades	Descripción	Precio unitario
1.4.1	Ud.	Confección de los planos de las partes del MODELO-3, y recopilación de datos gráficos	
		5h profesional	15€/h 75€

2.1.5 Redacción del proyecto

Id.	Unidades	Descripción	Precio unitario
1.5.1	Ud.	Redacción de los documentos constituyentes del proyecto finalizado	
		160h profesional	15€/h 2.400€

2.2 CAPÍTULO 2: SOFTWARE UTILIZADO

2.2.1 JMAG

Id.	Unidades	Descripción			Precio unitario
2.1.1	Ud.	Amortización de licencia y mantenimiento			
		250h de uso	1,51€/h	377,5€	
					377,50€

2.2.2 SOLIDWORKS

Id.	Unidades	Descripción			Precio unitario
2.2.1	Ud.	Amortización de licencia y mantenimiento			
		10h de uso	0,51€/h	5,10€	
					5,10€

3 PRESUPUESTOS PARCIALES

3.1 CAPÍTULO 1: MANO DE OBRA

3.1.1 Investigación

Id.	Unidades	Descripción	Medición	Precio unitario	Precio total
1.1.1	Ud.	Adquisición de conocimientos	1	1.500,00€	1.500,00€
1.1.2	Ud.	Aprendizaje del uso de los programas informáticos	1	750,00€	750,00€

3.1.2 Diseño

Id.	Unidades	Descripción	Medición	Precio unitario	Precio total
1.2.1	Ud.	Cálculo de los parámetros del primer modelo	1	750,00€	750,00€
1.2.2	Ud.	Dimensionado mediante software de los modelos	1	1.500,00€	1.500,00€

3.1.3 Simulación

Id.	Unidades	Descripción	Medición	Precio unitario	Precio total
1.3.1	Ud.	Evaluación, estudio, comparación, y mejora de los modelos	1	1.500,00€	1.500,00€
1.3.2	Ud.	Definición y estudio de la optimización	1	2.250,00€	2.250,00€

3.1.4 Confección de planos

Id.	Unidades	Descripción	Medición	Precio unitario	Precio total
1.4.1	Ud.	Confección de los planos de las partes del MODELO-3, y recopilación de datos gráficos	2	37,50€	75,00€

3.1.5 Redacción del proyecto

Id.	Unidades	Descripción	Medición	Precio unitario	Precio total
1.5.1	Ud.	Redacción de los documentos constituyentes del proyecto finalizado	1	2.400,00€	2.400,00€

3.2 CAPÍTULO 2: SOFTWARE UTILIZADO

3.2.1 JMAG

Id.	Unidades	Descripción	Medición	Precio unitario	Precio total
2.1.1	Ud.	Licencia y mantenimiento	1	377,50€	377,50€

3.2.2 SOLIDWORKS

Id.	Unidades	Descripción	Medición	Precio unitario	Precio total
2.2.1	Ud.	Licencia y mantenimiento	1	5,10€	5,10€

4 PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL

PRESUPUESTOS PARCIALES		TOTALES (€)
CAPÍTULO 1.	MANO DE OBRA	10.725,00
CAPÍTULO 2.	SOFTWARE UTILIZADO	382,60
TOTAL PRESUPUESTO EJECUCIÓN MATERIAL		11.107,60

5 PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN POR CONTRATA

Contribución	Porcentaje	Presupuesto (€)
Presupuesto de Ejecución material	-	11.107,60
Gastos Generales	13% sobre PM	1.443,99
Beneficio Industrial	6% sobre PM	666,46
%IVA	21% sobre PM+GG+BI	2.775,79
Presupuesto total de ejecución por contrata		18.796,63€