



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES

---

**MASTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL**  
**ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES**  
**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID**

**TRABAJO FIN DE MÁSTER**

**Simulación del funcionamiento del estator de un motor de  
inducción trifásico empleando el método de los elementos  
finitos**

Autor: D. Alberto Blanco Jiménez

Tutor: D. Daniel Moriñigo

Cotutora: D<sup>a</sup> Alicia Rodríguez Carrascal

Valladolid, Febrero 2017



## RESUMEN

Este documento trata de presentar una iniciación al programa de simulación Comsol. Se ha estudiado un motor de inducción trifásica.

Se presenta en esta memoria la simulación del estator, para 3 casos diferentes. Además, para cada caso se hace el estudio en estacionario y en transitorio.

- Caso 1: Para ver únicamente el campo magnético creado por el estator, se va a considerar el rotor como aire, para que no se induzcan corrientes y para que la reluctancia en la zona del rotor sea la correspondiente el aire.
- Caso 2: Consideraremos el núcleo del rotor como hierro dulce. Esto hará que la reluctancia del rotor disminuya, por lo que es de esperar que el flujo magnético aumente.
- Caso 3: Consideraremos las bobinas del rotor de aluminio. Esto producirá que en estas bobinas de induzcan ciertas corrientes, que a su vez crearán su propio flujo magnético, lo que afectará al campo magnético creado por el estator. Será el caso más real.

Finalmente, se realiza un estudio de sensibilidad del mallado, para asegurar que la opción elegida sea la correcta, y por tanto, comprobar que podemos tomar los resultados mostrados por Comsol para seguir con la investigación.

## ABSTRACT

This document tries to present an introduction to the simulation program called Comsol. A three-phase induction motor has been studied.

Stator simulation is presented for 3 different cases. In addition, for each case, stationary and transient study have been done.

- Case 1: In order to see only the magnetic field created by the stator, the rotor will be considered as air, so that currents are not induced and the reluctance in the rotor area is corresponding to the reluctance of the air.
- Case 2: the rotor core will be considered as soft iron. This will cause the reluctance of the rotor to decrease, so the magnetic flux is expected to increase.
- Case 3: Rotor coils will be considered as aluminum. This will cause induced currents in the rotor, which will create their own magnetic flux. This will affect the magnetic field created by the stator. It will be the most real case.

Finally, a sensitivity study of the meshing is carried out, to ensure that the chosen option is correct, and therefore, to verify that we can take the results shown by Comsol to continue with the investigation.



## **AGRADECIMIENTOS**

Este Trabajo Fin de Máster ha sido posible gracias al apoyo y ayuda de muchas personas a las que me gustaría dar mi agradecimiento, pues con cada uno de esos momentos, por pequeños que fuesen, he aprendido y me han hecho estar más cerca de este momento.

Destacaré aquí a las más importantes y de las que no me puedo olvidar. En primer lugar, he de dar las gracias a todos y cada uno de mis profesores tanto de este máster como del grado en ingeniería mecánica, en especial a mi tutor Daniel Moríñigo, así como a mi cotutora Alicia Rodríguez. Sin duda alguna, me han hecho crecer intelectualmente y, aún más, me han mostrado la infinita cantidad de saberes que puedo aprender todavía, para seguir creciendo, aportando lo que pueda y, ojalá, ayudando mínimamente a crecer a otros.

Agradezco su interés y ayuda, así como sabios consejos, a mis compañeros, especialmente a aquellos que me permitieron acercarme a sus centros y aulas sin los que esta investigación no hubiera sido posible.

Por supuesto, también a todos aquellos alumnos que, de manera totalmente desinteresada, tuvieron la bondad de colaborar.

A mis padres por su apoyo y presencia incondicional, tanto en buenos como en malos momentos.



# ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN:	1
1.1. Justificación	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Diagrama de Gantt del desarrollo del trabajo	2
1.4. Estructura de la memoria	4
2. MOTOR DE INDUCCIÓN TRIFÁSICO	5
2.1 Características constructivas	5
2.1.1 Estator de un motor de inducción	5
2.1.2 Rotor de un motor de inducción	6
2.2 Principio de funcionamiento	8
2.2.1 Características de funcionamiento	10
2.3 Ventajas e inconvenientes de los motores de inducción	12
3. ELEMENTOS FINITOS EN ELECTROMAGNETISMO	13
4. HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN COMSOL	15
5. MODELO A SIMULAR	21
5.1 Descripción del motor	21
5.2 Definición del campo computacional electromagnético	22
6. MODELADO EN COMSOL	31
6.1 Configuración general	31
6.2 Creación del modelo	32
6.3 Geometría	34
6.4 Materiales	46
6.5 Condiciones de funcionamiento del motor	51
6.6 Mallado	54
6.7 Simulación	56
7. RESULTADOS Y CONCLUSIONES OBTENIDOS	59
7.1 Caso 1	59
7.2 Caso 2	66
7.3 Caso 3	70
7.4 Conclusiones	76
8. POSIBLES LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	79
9. BIBLIOGRAFÍA	81
ANEXO 1	83
ANEXO 2	87







# 1. INTRODUCCIÓN:

En esta memoria se pretende estudiar el programa de simulación COMSOL. Este programa nos permite, mediante elementos finitos, simular numerosas situaciones, con una característica muy especial: nos permite la simulación multifísica. Esto es una gran ayuda y un gran avance ya que supone que se puedan simular numerosas situaciones.

## 1.1. Justificación

La simulación numérica basada en los elementos finitos puede ser una herramienta de análisis y diseño de máquinas eléctricas si se realiza correctamente. En la última década ha habido un gran desarrollo de herramientas comerciales de simulación de máquinas eléctricas por elementos finitos. Se pueden citar Opera, Flux, Ansys, Ls-Dyna, ... Entre estas herramientas también se encuentra COMSOL que es un paquete de simulación multifísica, no sólo de máquinas eléctricas. COMSOL se caracteriza por ser una herramienta muy potente, pero esta potencia se traduce en una gran variedad de opciones de configuración y control del proceso de simulación que no están disponibles en otros paquetes informáticos, que presentan un interfaz más amigable. Pero esto significa que el usuario presenta un menor control sobre el proceso de simulación. En cambio, COMSOL supone un reto, puesto que es necesario un mayor conocimiento y control del proceso. El proceso de simulación suele ser laborioso y largo. Suele ser aconsejable dividir la simulación completa en pasos más sencillos que permitan ir verificando que el proceso se va desarrollando correctamente.

El Departamento de Ingeniería Eléctrica de la EII tiene una línea de investigación relacionada con la detección de fallos en motores de inducción y su diagnóstico. Esta línea de trabajo resulta intensiva en cuanto al uso de técnicas experimentales, donde se prueban motores reales en laboratorio. Este método de trabajo es de tipo destructivo y supone disponer de medios materiales para provocar fallos en el motor que simulen el comportamiento real del mismo. Recientes trabajos están presentando iniciativas donde se emplean modelos numéricos de las máquinas para estudiar estos comportamientos en una fase previa. Para poder trabajar con estos modelos, hay que estar completamente seguros de la fiabilidad de la herramienta de simulación. Normalmente esta confianza se consigue a través de un proceso largo de simulación y verificación de los resultados. Esta verificación suele ser inicialmente por comparación con resultados teóricos fácilmente reproducibles, y finalmente por verificación de resultados experimentales conocidos y contrastados.

Este Trabajo Fin de Máster se enmarca dentro de la primera fase. En el Dpto. de Ingeniería Eléctrica de la EII se quiere comenzar a utilizar las herramientas de simulación para complementar sus líneas de investigación actuales. Por lo tanto, se plantea un trabajo de simulación a largo plazo de un motor de inducción. Como este un proceso largo que supera ampliamente las 300 horas de un TFM, se plantea un primer trabajo de simulación donde intentará simular el funcionamiento eléctrico del estator del motor de inducción.

## 1.2. Objetivos

El desglose de objetivos inicialmente planteados para este proyecto serían los siguientes:

Objetivos formativos:

- Realizar un estudio de los elementos finitos aplicados a la simulación electromagnética, como punto de introducción al tema.
- Estudio del funcionamiento del programa COMSOL.

Objetivos específicos:

- Buscar un modelo de motor de inducción.
- Dibujar el CAD del modelo en COMSOL.
- El modelo dibujado debería estar parametrizado para poder simular diferentes configuraciones del motor.
- Modelar los materiales y condiciones de contorno.
- Simulación eléctrica en estado estacionario del estator del motor.
- Simulación dinámica del estator del motor.
- Comparación de los resultados numéricos con análisis teóricos cualitativos.

Como este TFM se pretende que sea continuado por otros alumnos, se propone también que la escritura de la memoria sea didáctica para que sirva como formación a los alumnos que continúen el trabajo.

## 1.3. Diagrama de Gantt del desarrollo del trabajo

En este TFM se han desarrollado las siguientes tareas:

1. Reunión inicial con el Tutor del TFM para entender el problema planteado.
2. Reuniones de seguimiento de la elaboración del TFM.
3. Formación:
  - a. Máquina de Inducción.
  - b. Elementos finitos.
  - c. Elementos finitos en electromagnetismo.
  - d. Formación en el manejo de COMSOL.
4. Búsqueda de un modelo a simular y su estudio o entendimiento.
5. Modelado con COMSOL.
  - a. Dibujo de una geometría parametrizada.
  - b. Definición de materiales.
  - c. Definición de variables.
  - d. Definición condiciones de contorno y física del problema.
6. Simulación con COMSOL
  - a. Definición del problema.
  - b. Estudio de sensibilidad al tamaño del mallado.
  - c. Primer caso: Estacionario.
  - d. Segundo caso: Transitorio.
7. Análisis de los resultados.
8. Establecimiento de las conclusiones y líneas futuras de continuación.
9. Escritura de la memoria.

Se presenta a continuación, en la Fig. 1 un diagrama de Gantt, donde aparece la secuencia de ejecución de las diferentes tareas, así como su duración (420 horas).

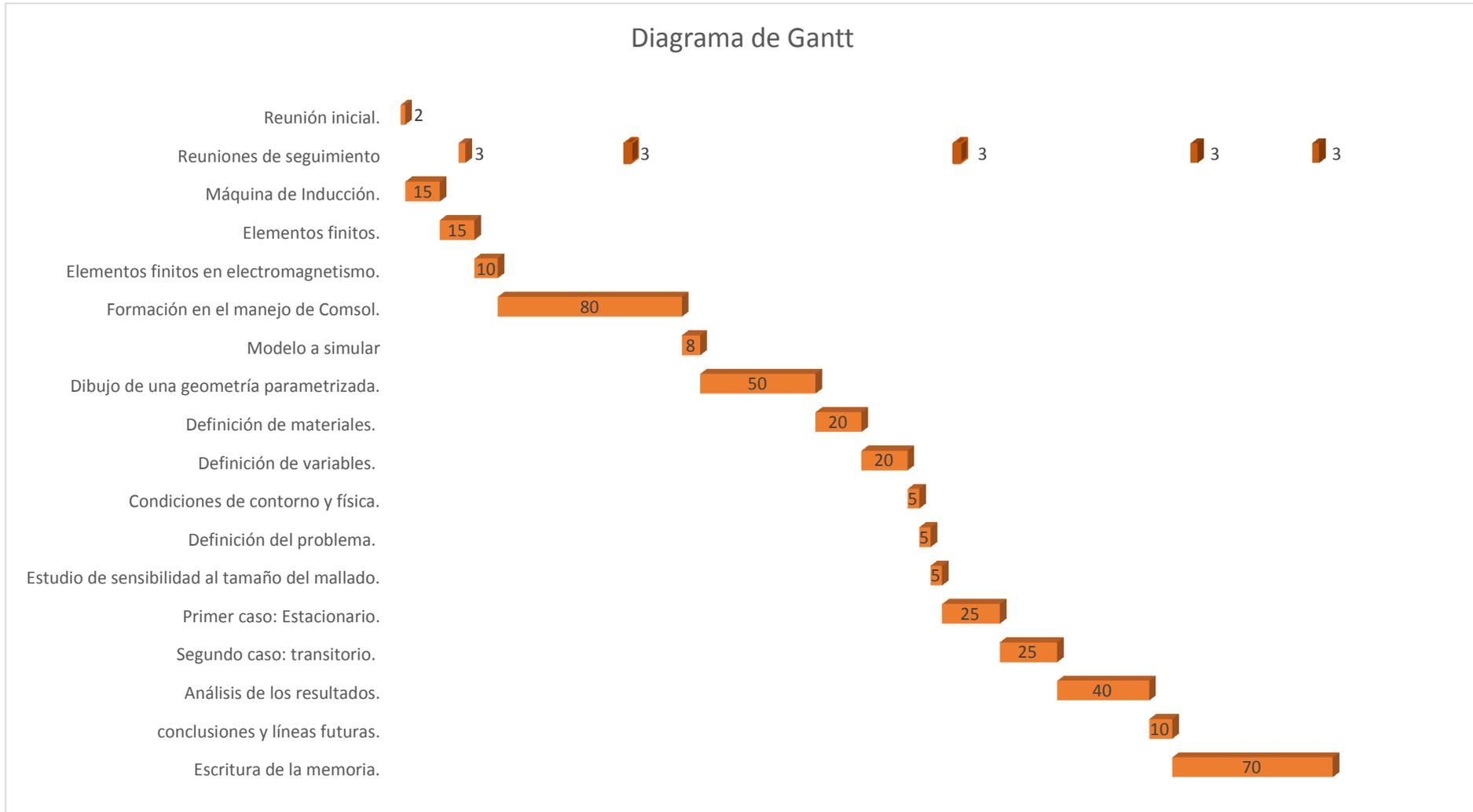


Fig. 1. Diagrama de Gantt

## 1.4. Estructura de la memoria

En esta memoria se recoge toda la documentación referida al Trabajo de Fin de Master que se presenta.

En primer lugar, se presenta una justificación del trabajo realizado, así como los objetivos que se pretenden conseguir. Además, se presentan todas las tareas que se han desempeñado con su duración.

En segundo lugar, se explica el funcionamiento de un motor similar al que se va a simular, así como sus características constructivas, y una pequeña referencia a sus partes más importantes que son el estator y el rotor.

En tercer lugar, se hace referencia tanto al método de los elementos finitos como al electromagnetismo.

En cuarto lugar, se expone la herramienta que va a ser utilizada: COMSOL.

En quinto lugar, se presenta el modelo que ha sido elegido para simularlo mediante COMSOL, con las características necesarias para realizar una correcta simulación.

En sexto lugar, se expone como se ha creado el modelo en COMSOL, con los diferentes casos que se han diferenciado.

En séptimo lugar, se obtienen los resultados y conclusiones del modelo, una vez hecha la simulación.

Finalmente, se presentan posibles futuras líneas de investigación, para proseguir con este trabajo fin de master.

## 2. MOTOR DE INDUCCIÓN TRIFÁSICO

El motor de inducción trifásico, también llamado motor asíncrono, es hoy día el motor eléctrico que más se utiliza en las aplicaciones industriales. De hecho, constituye el 80% de los motores eléctricos industriales empleados en la actualidad, sobre todo el motor con rotor de jaula de ardilla.

Se denominan máquinas de inducción ya que la corriente que circula por uno de los devanados, se debe a la f.e.m. o al voltaje inducido por la acción del flujo magnético giratorio creado a su vez, por el otro devanado.

También reciben el nombre de máquinas asíncronas debido a que la velocidad de giro del rotor es diferente de la velocidad de sincronismo impuesta por el número de polos de la máquina y la frecuencia de alimentación tal y como veremos a continuación.

La importancia de los motores asíncronos o de inducción, se debe a su construcción simple y robusta, sencillez de mantenimiento, facilidad de instalación y bajo coste (Oraá, 2013).

### 2.1 Características constructivas

Los motores de inducción están basados en el accionamiento de una masa metálica por la acción de un campo giratorio. Están formados por dos devanados con campos giratorios coaxiales: uno fijo, y otro móvil. También se les llama, respectivamente, estator y rotor.

El devanado del rotor conduce la corriente alterna que se produce por inducción desde el devanado del estator que está conectado directamente a la fuente de alimentación. Ambos devanados, consisten en una serie de conductores de cobre o aluminio colocados en las ranuras de propio estator. (Oraá, 2013)

#### 2.1.1 Estator de un motor de inducción

El estator de un motor de inducción, el mostrado en la Fig. 2, es el inductor, es decir, el encargado de crear el campo magnético.

Está formado por:

- Circuito magnético: tambor con forma cilíndrica y ranurado, formado de chapas de Fe aleado al Si, aisladas entre sí con Carlite, para reducir las pérdidas por corrientes parásitas. La misión de las ranuras es alojar a los conductores de los devanados.
- Circuito eléctrico: formado por tres devanados monofásicos que al conexionarlos en estrella o triángulo, forman un devanado trifásico.

En su concepción más elemental, estos devanados son tres bobinas desfasadas  $120^\circ$ . Cada bobina está formada por 2 conductores diametralmente opuestos (bobina de paso diametral) y el estator precisa por lo tanto de 6 ranuras para alojar dichas bobinas.

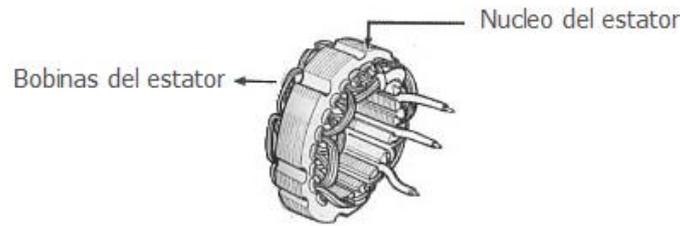


Fig. 2. Estator de un motor de inducción

### 2.1.2 Rotor de un motor de inducción

En el interior del estator va colocado el rotor, que es la parte giratoria de la máquina. El espacio de aire que separa el estator del rotor, necesario para que pueda girar la máquina, se denomina entrehierro. El campo magnético existente en el mismo es el que constituye el medio de acoplamiento entre los sistemas eléctrico y mecánico.

El rotor (parte giratoria) es el inducido en los motores de inducción, es decir sobre el cuál se induce el campo magnético creado por el estator.

Está formado por:

- Circuito magnético: formado de chapas de hierro (Fe) aleado al Silicio (Si), asiladas entre sí con Carlite, para reducir las pérdidas por corrientes parásitas.
- Circuito eléctrico: formado por un devanado trifásico. En función de la forma constructiva de este devanado, distinguimos entre rotor de jaula de ardilla y rotor bobinado.

Existen dos tipos básicos de rotores que dan lugar a los dos tipos fundamentales de motores de inducción:

- Rotor bobinado, lleva un devanado trifásico semejante al del estator, distribuido uniformemente en las ranuras (Fig. 3). Los anillos rozantes y sus escobillas permiten conectar resistencias exteriores principalmente para el arranque y, una vez en marcha normal, se cortocircuitan entre sí las escobillas.

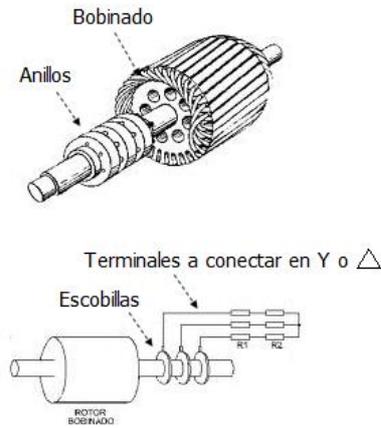


Fig. 3. Rotor bobinado

- Rotor de jaula de ardilla (Dolivo-Dobrovolsky, 1889): El devanado del rotor mostrado en la Fig. 4, está formado por un número determinado de barras soldadas por sus extremos a sendos anillos (anillos de cortocircuito). Hoy en día, y especialmente en los motores pequeños o medianos, el rotor es de aluminio moldeado formando un conjunto homogéneo con los anillos de cortocircuito. Los recientes avances en las técnicas de moldeo permiten fabricar el rotor de cobre, con las consiguientes rebajas en las pérdidas. Estos motores, de rotor de cobre, tienen un rendimiento mayor que los de aluminio. Con esta configuración, la máquina no requiere ni anillos rozantes ni escobillas para conectar la corriente al rotor ya que ésta se consigue por efecto de inducción del estator sobre el rotor.

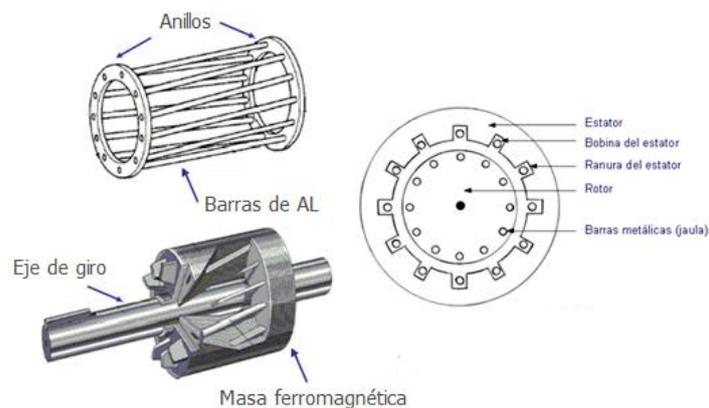


Fig. 4. Rotor de jaula de ardilla

## 2.2 Principio de funcionamiento

Los motores de inducción o asíncronos, son los más utilizados debido a su robustez, sencillez constructiva y poco mantenimiento. La utilización de los mismos, es apta para aquellos requerimientos en los cuales no se deba mantener una velocidad constante, ya que este tipo de motores, disminuye ligeramente su velocidad con el aumento de la carga en su eje.

El estator de un motor trifásico de inducción está formado por un conjunto de tres bobinas, como se ha visto anteriormente, las cuales son alimentadas por un sistema trifásico de corrientes, lo que da origen a un campo magnético giratorio de módulo constante. Este campo magnético gira a la velocidad que llamamos de sincronismo, que se puede obtener mediante la siguiente fórmula:

$$n = \frac{60 \cdot f}{P}$$

Donde:

- $n$  es la velocidad de sincronismo de la máquina
- $f$  es la frecuencia de la red
- $P$  es el número de pares de polos

Si colocamos dentro del estator una espira, montada sobre un eje, cuyo único movimiento permitido es el de rotación tal como se muestra en la Fig. 5, ésta concatenará un flujo magnético que varía con el tiempo, lo cual dará origen a una fuerza electromotriz inducida (Ley Faraday). El sentido de esta fuerza electromotriz inducida se puede obtener mediante la regla de la mano derecha. (Alvarez, 2012)

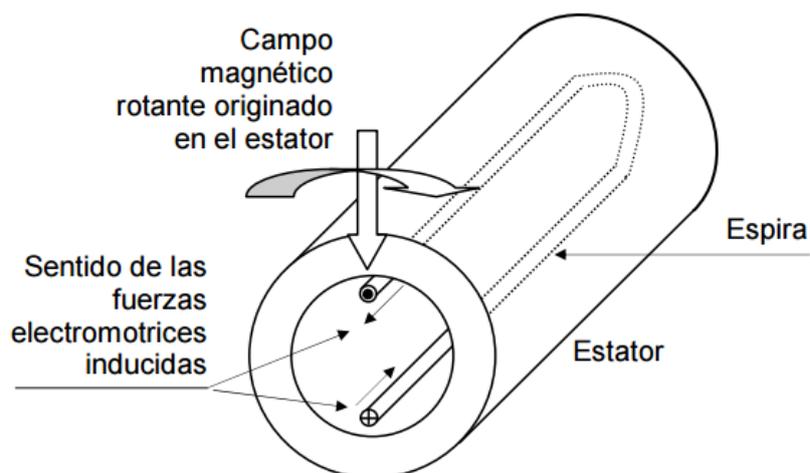


Fig. 5. Fuerza electromotriz inducida en una espira

Si ahora cerramos la espira por ejemplo cortocircuitándola, tal como se muestra en la Fig. 6, circulará una corriente en el mismo sentido de la fuerza electromotriz

inducida, cuyo valor dependerá de dicha fem y de la impedancia que presente dicha espira.

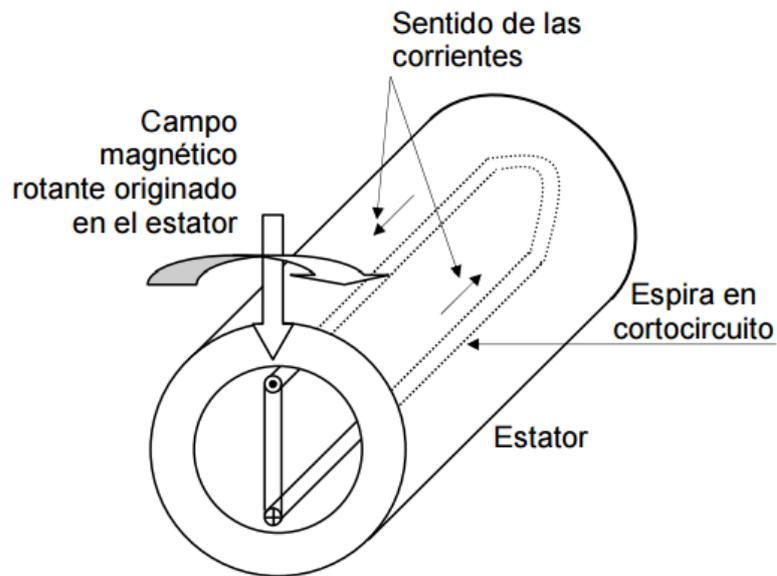


Fig. 6. Circulación de corrientes con la espira en cortocircuito

En esta situación nos encontramos, con un conductor por el cual circula corriente y se encuentra en presencia de un campo magnético, lo cual da origen a fuerzas en los conductores.

En nuestro caso, en el conductor superior la fuerza es hacia la derecha, y en el inferior hacia la izquierda, como se observa en la Fig. 7.

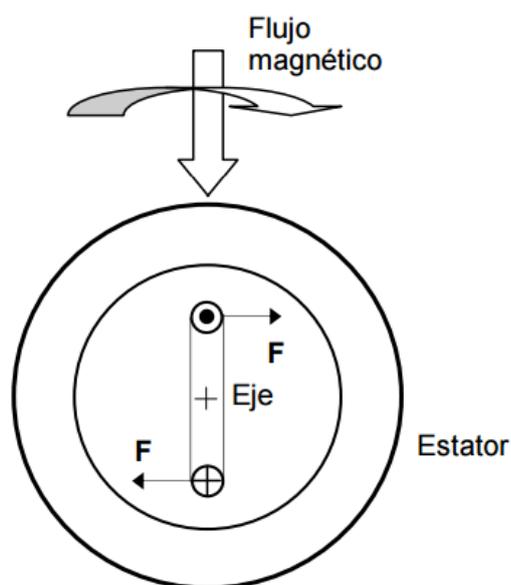


Fig. 7. Sentido de las fuerzas sobre los conductores

Las fuerzas se originan únicamente, a lo largo de los conductores paralelos al eje (Corriente perpendicular al flujo magnético). Al estar estos conductores separados, se produce una resultante que hace mover la espira, y estando ésta montada sobre un eje, comienza a girar, siguiendo el movimiento del campo magnético rotativo.

La espira aumenta su velocidad hasta llegar a una velocidad levemente inferior a la del campo magnético, ya que de alcanzar la misma, la espira no cortaría líneas de campo magnético, con lo cual no habría flujo concatenado variable lo cual llevaría a la desaparición de las fuerzas mencionadas

Por tanto, la velocidad de giro es levemente inferior a la del campo magnético rotativo, y la misma está determinada por el equilibrio entre las fuerzas resultantes analizadas y las fuerzas existentes antagónicas o resistentes (debidas a la carga mecánica en el eje y los rozamientos propios).

Por último, comentar que la conexión entre devanados, puede realizarse de dos formas distintas, bien conexión denominada en triángulo, bien en estrella, tal y como se puede ver en la Fig. 8y en la Fig. 9. El motor está construido para soportar la tensión necesaria, para la conexión que se tenga y tendremos un nivel de aislamiento correspondiente.

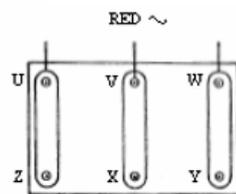


Fig. 8. Conexión en triángulo

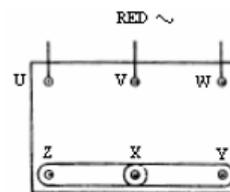


Fig. 9. Conexión estrella

## 2.2.1 Características de funcionamiento

Las características de funcionamiento son una presentación gráfica del comportamiento de:

- La velocidad.
- La corriente.
- El factor de potencia.
- La potencia.
- El rendimiento.
- El deslizamiento en función de la carga.

La Fig. 10 muestra las características de funcionamiento de un motor de inducción típico.

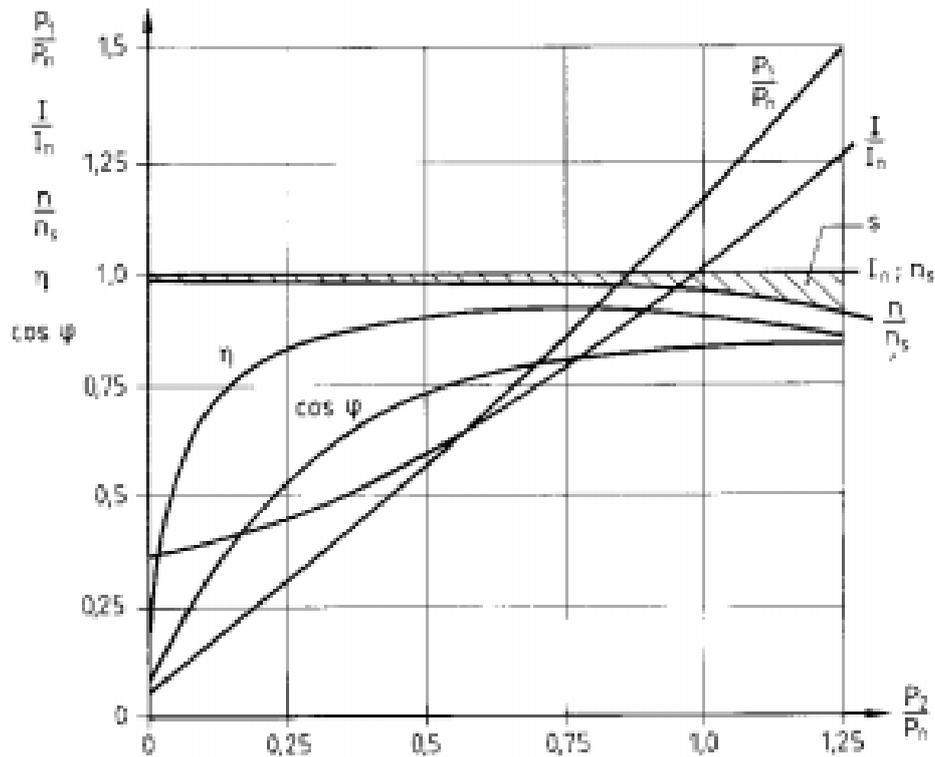


Fig. 10. Características de funcionamiento

Donde:

- $n$  = velocidad
- $P_1$  = potencia de entrada
- $\eta$  = rendimiento
- $I$  = corriente de entrada
- $s$  = deslizamiento
- $n_s$  = velocidad sincrónica
- $P_2$  = potencia de salida
- $\cos \varphi$  = factor de potencia
- $I_n$  = intensidad nominal
- $P_n$  = potencia nominal

A continuación se muestra una pequeña justificación de la variación de alguno de los parámetros que aparecen en la gráfica:

- $n$ : La velocidad  $n$  sólo disminuye ligeramente conforme aumenta la carga. Por consiguiente, los motores de jaula de ardilla estándar tienen unas características de velocidad "rígidas".
- $s$ : El deslizamiento  $s$  aumenta más o menos proporcionalmente con el incremento de la carga y se puede calcular mediante la siguiente fórmula:

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

Donde:

- $s$  es el deslizamiento
- $n_s$  es la velocidad de sincronismo
- $n_m$  es la velocidad angular del rotor

- $\cos\phi$ : El factor de potencia y depende en gran medida de la carga y normalmente alcanza su máximo durante la sobrecarga. En el régimen de carga parcial, es relativamente desfavorable, ya que, incluso con cargas parciales, la magnetización es prácticamente constante.
- $\eta$ : El rendimiento  $\eta$  muestra una característica relativamente plana y es prácticamente constante por encima de la media-carga. Suele alcanzar su máximo cuando está por debajo de la potencia de régimen  $P_n$ .
- $I$ : La intensidad  $I$  aumenta proporcionalmente comenzando más o menos a media-carga. Por debajo de la media-carga, la corriente disminuye sólo ligeramente hasta convertirse en la corriente de carga nula  $I_0$  (magnetización constante).
- $P$ : La potencia  $P_1$  aumenta más o menos en proporción con el inicio de carga comenzando en la potencia de carga nula. En el régimen de sobrecarga, la potencia aumenta algo más deprisa, ya que las pérdidas también se incrementan con más rapidez.

## 2.3 Ventajas e inconvenientes de los motores de inducción

Los motores de inducción son utilizados en numerosas aplicaciones ya que presentan numerosas ventajas. Podemos destacar las siguientes:

- Construcción simple y robusta, sin problemas de estabilidad ante variaciones bruscas de la carga (el motor recupera la velocidad ante variaciones de carga). Concretamente, el rotor de jaula de ardilla es muy robusto.
- Principio de reversibilidad: Debido a este principio podemos hablar tanto de motores como de generadores asíncronos. En nuestro caso el punto de vista a tener en cuenta será el del motor, aunque no por ello se puede descartar su uso como generador.
- No es necesario el uso de escobillas o de elementos rozantes, gracias a que no existe corriente conducida al rotor. Tienen par de arranque, y sólo una alimentación eléctrica, que se recibe a través de una línea trifásica. Excepto en el caso del rotor devanado (o bobinado).

Así mismo, este tipo de motores eléctricos, también presentan algunas deficiencias que los hacen inviables en otro tipo de aplicaciones, en las que hay que recurrir a otro tipo de solución. En las desventajas o inconvenientes que presentan podemos destacar las siguientes:

- Regulación complicada de la velocidad: Esto es debido a que es difícil que el motor mueva la carga a una velocidad fuera de la velocidad para la que estaba preparado, sin embargo mediante convertidores electrónicos de frecuencia se ha superado completamente este inconveniente.
- El motor absorbe una elevada intensidad en el arranque: Durante el arranque se absorbe una intensidad entre tres y seis veces mayor que la intensidad nominal, cuando el arranque es directo a la tensión nominal.

### 3. ELEMENTOS FINITOS EN ELECTROMAGNETISMO

El objetivo del presente proyecto es, como ya hemos anunciado, el estudio del estator de un motor de inducción trifásico mediante el método de los elementos finitos, con el programa de simulación COMSOL. Resulta por tanto adecuado, introducir tanto el método de los elementos finitos (FEM en adelante), como los principios básicos del electromagnetismo.

El primero es, como veremos a continuación, un método de cálculo numérico. Su utilización está muy extendida debido a que permite obtener buenas aproximaciones en problemas complejos. Por otro lado, la teoría electromagnética constituye una rama de la física que estudia los fenómenos electromagnéticos. Se trata de una teoría de campos, y su importancia en la historia de la física es vital. Tanto que, considerada como fuerza, constituye una de las 4 interacciones fundamentales. (Isla, 2014)

#### ➤ ¿Qué es FEM?

Mientras que el nombre de FEM es un término acuñado recientemente, el concepto subyacente se usa desde hace siglos. La discretización espacial y temporal mediante diversos métodos, y la aproximación numérica para encontrar soluciones a problemas complejos es un recurso ya conocido.

Aristóteles utilizó un método de este tipo, mediante polígonos, para obtener una aproximación al número  $\pi$ , al inscribir y circunscribir dichos polígonos a un círculo e ir aumentando progresivamente su número de lados. Del mismo modo, calculistas chinos aproximaron también el número  $\pi$  mediante divisiones del área del círculo en rectángulos inscritos y circunscritos.

Siglos más tarde, con el desarrollo del cálculo infinitesimal por parte de Newton y Leibniz, y su complementación por parte de ilustres científicos como Gauss, Lagrange, Cauchy, Navier y Euler, se desarrollaron las ecuaciones diferenciales, que permitían describir de forma analítica casi cualquier problema físico mediante una serie de ecuaciones de este tipo y sus correspondientes condiciones de contorno.

Sin embargo, la solución exacta a dichas ecuaciones diferenciales era, en la mayor parte de las situaciones, imposible de obtener. Esta evidencia hizo que se desarrollaran, a partir de comienzos del siglo XX, técnicas de discretización similares a las utilizadas por Aristóteles, en la resolución de las ecuaciones diferenciales. De este modo nacieron los métodos numéricos.

La estrategia de los métodos numéricos reside, básicamente, en transformar las ecuaciones diferenciales que gobiernan un problema, en un sistema de ecuaciones algebraicas con un número finito de incógnitas. Por contra, ese número de incógnitas podía llegar a ser en muchos casos de miles o incluso millones. Dicho de otro modo, seguían siendo cálculos muchas veces inabordables. Por ello, la aparición de los ordenadores supuso un gran impulso para estos métodos, que ganaron una enorme popularidad, y son actualmente los utilizados para el cálculo y la simulación de casi cualquier problema físico. De ahí su uso masivo en la ingeniería.

➤ ¿Qué es el electromagnetismo?

El electromagnetismo es el conjunto de leyes físicas que explican el comportamiento tanto del campo eléctrico como del magnético, su origen y la relación entre ellos. Su estudio y la formulación de dichas leyes vienen marcados por las Ecuaciones de Maxwell. Se trata de un conjunto de 4 ecuaciones que permiten calcular cómo es y cómo se comporta el campo electromagnético en una región determinada del espacio.

Las ideas principales que nos proporcionan estas ecuaciones son, de forma muy básica que, por un lado, el campo eléctrico tiene su origen en las cargas eléctricas. Más concretamente, el campo “nace” en las cargas positivas (divergencia positiva de “D”) y muere en las negativas (divergencia negativa de “D”).

Por otro lado, en cuanto al campo magnético, resulta que sus líneas de campo no “nacen” ni “mueren” de forma neta en ninguna parte, no existen los monopolos magnéticos.

Además, un campo eléctrico puede ser originado por un campo magnético variable, y ese campo eléctrico resultante será perpendicular y de sentido contrario a la dirección de dicha variación.

Por último, tenemos que un campo magnético puede ser producido por cargas eléctricas en movimiento y por la variación temporal de un campo eléctrico.

## 4. HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN COMSOL

COMSOL Multiphysics es una herramienta de modelado y análisis de prototipos virtuales de fenómenos físicos. Puede modelar cualquier fenómeno físico que pueda ser descrito con ecuaciones diferenciales en derivadas parciales (EDP's), desde transferencia de calor, movimiento de fluidos, electromagnetismo o mecánica estructural, y soportando, además, la integración de problemas de diferentes campos (Multifísica). (Isla, 2014)

Las prestaciones de multifísica integradas en COMSOL Multiphysics permiten al usuario modelar, simultáneamente, casi cualquier combinación de fenómenos. A través de estas prestaciones, COMSOL Multiphysics integra las dos formas posibles de modelar (a través de aplicaciones predefinidas que permiten crear el modelo fijando las cantidades físicas que caracterizan el problema, y a través de las ecuaciones que modelan el problema) y permite combinarlas.

La estructura sobre la que COMSOL trabaja es un sistema de Ecuaciones Diferenciales Parciales (EDP's), la descripción matemática de los fenómenos físicos basados en las leyes de la ciencia. Cualquier experto en su campo que sepa cómo crear simulaciones usando EDP's puede ampliar aquellos sistemas modelando explícitamente en términos de estos tipos de ecuaciones.

COMSOL simplifica el desarrollo de aplicaciones a través del uso de la Biblioteca de Modelos, que incorpora ejemplos de diversas áreas de aplicación. A través de ellos, los usuarios, sin necesidad de poseer profundos conocimientos en matemáticas o análisis numérico, podrán construir sus modelos.

En el presente proyecto nos centraremos en el módulo denominado AC/DC. Este módulo permite entender, predecir y diseñar campos eléctricos y magnéticos en aplicaciones de baja frecuencia, tanto estáticas, armónicos y transitorias o variables con el tiempo.

El módulo AC/DC simula campos eléctricos y magnéticos en dos y tres dimensiones junto con el modelado tradicional de elementos activos y pasivos basados en la teoría de circuitos. Todos los modelos y simulaciones que se formulan con el módulo AC/DC están basadas en las ecuaciones de Maxwell o subconjuntos de ellas, junto con algunos casos en los que se complementan con otras leyes aplicadas a materiales, como la ley de Ohm para el transporte de cargas. Para acceder a los diferentes modos de modelización se usan una serie de interfaces llamados 'AC/DC interfaces', que permiten crear y resolver modelos electromagnéticos. Dichos interfaces van desde electrostática, corriente continua, magnetoestática, corriente alterna y transitoria, magnetodinámica y formulaciones electromagnéticas en corriente alterna.

Internamente, el interfaz AC/DC formula y resuelve la forma diferencial de las ecuaciones de Maxwell junto con las condiciones iniciales y de frontera. La resolución se realiza utilizando el método de los elementos finitos, con discretización numérica estable de los elementos frontera, combinado con algoritmos de simplificación y resolviendo el sistema simplificado resultante. Los resultados se muestran en la ventana de gráficos del programa, a través de elementos ya predefinidos de campos eléctricos y magnéticos, corrientes y voltajes, o como expresiones de cantidades físicas introducidas por el usuario, así como variables

derivadas (resistencia, capacitancia, inductancia, fuerza electromagnética y par) obtenidas de la simulación.

La forma de trabajar con este módulo es directa y se realiza siguiendo los siguientes pasos: definir la geometría, seleccionar los materiales, seleccionar un interfaz adecuado de AC/DC, definir las condiciones iniciales y de contorno, definir el mallado para la aplicación del método de los elementos finitos, seleccionar un solucionador y visualizar los resultados. Todos estos pasos se siguen desde el escritorio de COMSOL. A la hora de resolver el sistema planteado, el solucionador lo intenta hacer automáticamente. Para ello, el solucionador o solver tiene unas opciones por defecto, que suelen funcionar para la mayoría de los problemas. Si no funcionan, ofrece un conjunto de opciones muy potente y amplio, pero que requieren un conocimiento muy avanzado del método de los elementos finitos para poder ajustar de forma adecuada y obtener resultados adecuados.

Como ya sabemos, el módulo AC/DC puede simular campos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos en aplicaciones de baja frecuencia. Esto quiere decir que se cubre el modelado de dispositivos con longitudes de onda electromagnética de hasta  $0.1 \text{ \AA}$ . Sin embargo, puede modelar nanodispositivos con frecuencias cercanas al rango visible o incluso, para dispositivos de tamaño humano, trabajar con frecuencias de hasta  $10 \text{ MHz}$ .

En muchas ocasiones las simulaciones de AC/DC se usan para obtener parámetros de un circuito. La Fig. 11 muestra el potencial eléctrico y las líneas de flujo magnético para un inductor con bobina de espiras cuadradas, usado como filtro paso de banda en sistemas microelectrónicos (MEMS). Se le aplica un voltaje continuo DC a la bobina resultando una corriente eléctrica que al girar genera un campo magnético a través y alrededor del dispositivo.

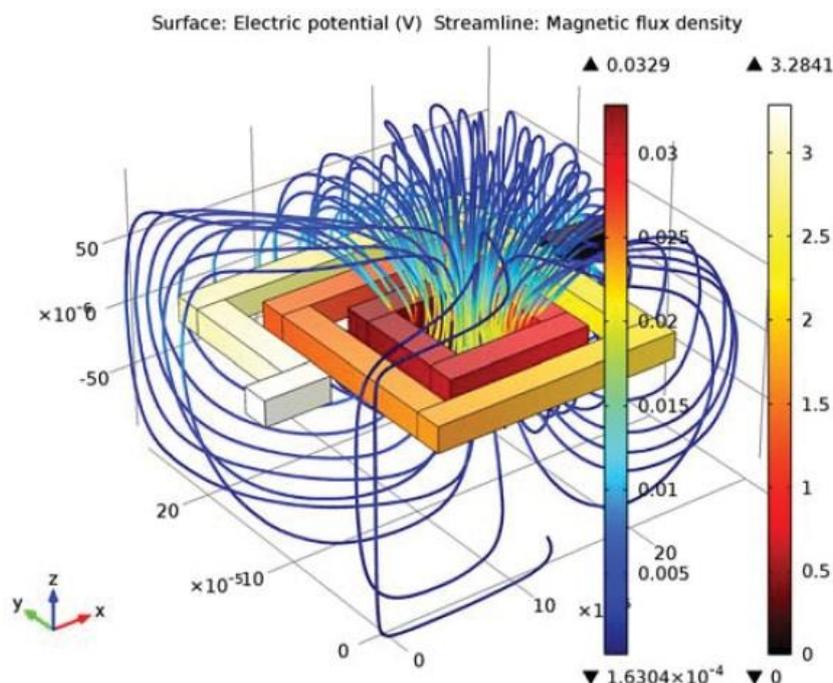


Fig. 11. Potencial eléctrico y líneas de flujo magnético

La distribución y fuerza de los campos eléctricos y magnéticos que nacen de la corriente aplicada y del voltaje permiten calcular valores de resistencias, capacitancias e inductancias para un modelo equivalente de circuito sencillo que

pueda entenderse y estudiarse tanto de forma cualitativa como cuantitativa. Esta forma de representar y entender un modelo simple se usa habitualmente para desarrollar diseños más complejos.

Otro uso muy extendido de COMSOL AC/DC es la predicción del movimiento y las fuerzas en motores y actuadores de un amplio rango de escalas. En las tres figuras siguientes mostramos la dinámica de un freno magnético. El freno consiste en un disco de material conductor y un imán permanente. El imán genera un campo magnético constante en el cual gira el disco.

Cuando un conductor se desplaza en un campo magnético se producen corrientes de Foucault, y las fuerzas de Lorentz de estas corrientes contrarrestan el giro del disco, como podemos observar en la Fig. 12.

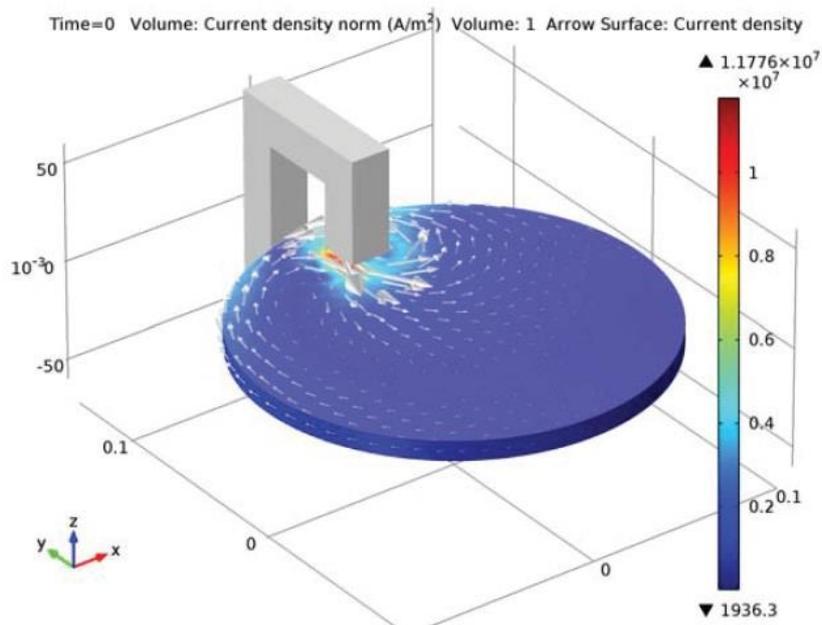


Fig. 12. Magnitud y dirección de las corrientes de Foucault en el giro del disco de un freno magnético

El par de frenado viene dado por el flujo magnético y las corrientes de Foucault, su valor en función del tiempo puede verse en la Fig. 13. La evolución de la velocidad angular en función del tiempo se muestra en la Fig. 14. Se crea un modelo de sólido rígido para realizar los cálculos mecánicos sobre el disco. COMSOL permite resolverlo de manera simultánea junto con el modelo electromagnético.

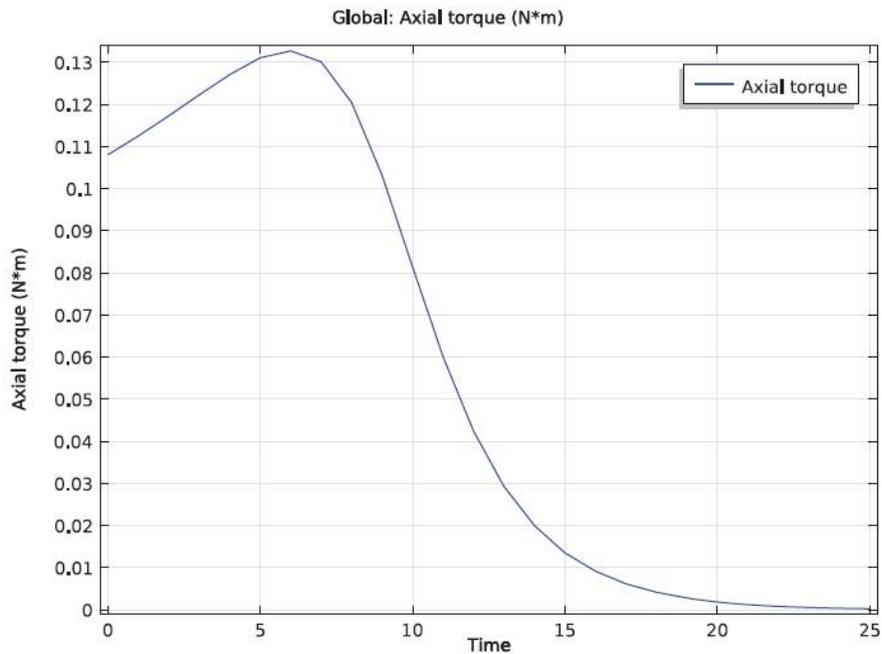


Fig. 13. Par de freno vs tiempo

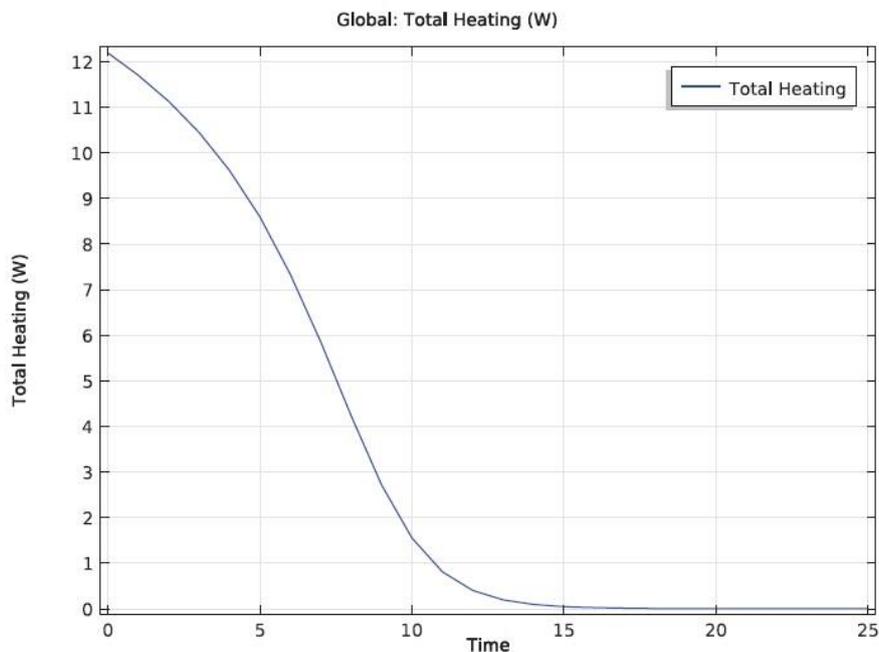


Fig. 14. Velocidad vs tiempo

Cada interfaz del módulo AC/DC define una serie de propiedades. Cada propiedad representa una operación que describe un término o una condición en la formulación de Maxwell subyacente. Además, cada término o condición tiene que estar definido en un lugar geométrico del modelo, como puede ser un dominio, una frontera (para modelos 3D) o un punto.

El módulo AC/DC incluye interfaces para diferentes formulaciones eléctricas y/o magnéticas. En la Fig. 15 se incluye el interfaz de dichas formulaciones, así como las correspondientes a la carpeta 'Heat Transfer', que contiene el interfaz de 'Induction Heating'.

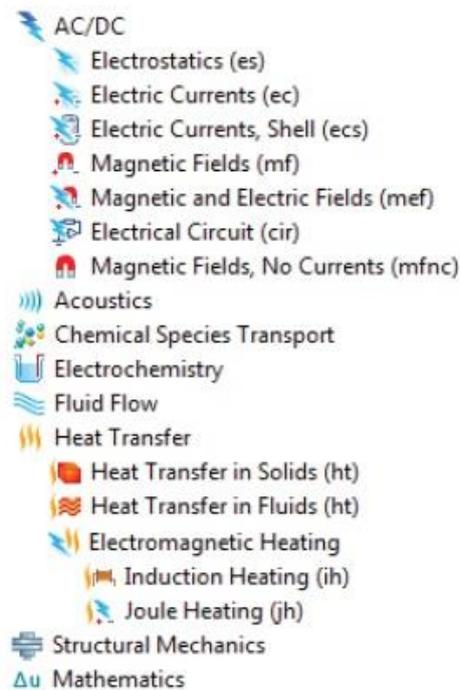


Fig. 15. Deferentes formulaciones eléctricas

Las formulaciones eléctricas disponibles son las siguientes:

- Interfaz electrostático: se encarga de resolver la ecuación de conservación de la carga para el potencial eléctrico, conocida la distribución espacial de la carga eléctrica. Se usa sobre todo para modelos de conservación de carga en dieléctricos bajo condiciones estáticas. Puede utilizarse también para condiciones transitorias, pero en ese caso se combina normalmente con un modelo separado de transporte de cargas. Dichos modelos pertenecen al módulo de 'Chemical Reaction Engineering' y al de 'Plasma'. Los elementos que más suelen simularse son condensadores, sensores dieléctricos y bujes aislantes para alto voltaje DC, por poner algunos ejemplos.
- Interfaz de corrientes eléctricas: se usa para modelar corrientes continuas, alternas y transitorias en medios conductores y capacitivos. Lo que hace es resolver la ecuación de conservación de la carga para el potencial eléctrico. Algunos de los usos más extendidos de este interfaz son el diseño de embarrados para distribuciones de corriente continua, el cálculo de distribuciones de corriente en sistemas de protección catódica contra la corrosión, así como el diseño de condensadores de corriente alterna.
- Interfaz 'Electric Current Shell Interface', disponible para geometrías en 2D, 2D axil simétricas y 3D. Su uso permite modelar corrientes de tipo continua, alterna y transitoria confinadas en capas de elementos conductores o capacitivos de espesor fijo o variable. Resuelve una ecuación de conservación de corriente en la frontera para el potencial eléctrico. La modelización de la puesta a tierra de un casco de barco o del chasis de un coche son dos ejemplos del uso de este interfaz.
- Interfaz de 'Magnetic Fields' resuelve la ley de Ampère para el vector potencial magnético. Se usa para modelar campos magnetoestáticos, corrientes alternas y magnetodinámica transitoria. Algunas aplicaciones

típicas son la simulación de imanes, actuadores magnéticos, motores eléctricos, transformadores y corrientes de Foucault. Puede trabajar tanto en medios lineales como en medios con saturación magnética.

- Interfaz 'Magnetic and Electric Fields', se usa en la simulación de magnetoestática y magnetodinámica de corriente alterna. Resuelve la ley de Ampère para el vector potencial magnético junto con la ecuación de conservación de la carga para el potencial eléctrico. Sus áreas de aplicación son por tanto casi las mismas que para el interfaz anterior. La introducción de potencial eléctrico permite que sea más flexible, además de poder crear condiciones de contorno eléctricas.
- Interfaz 'Magnetic Fields, No Currents', de tipo magnético, que se usa para modelar eficientemente modelos magnetoestáticos en regiones libres de corriente. Su aplicación se centra, por tanto, en el diseño de elementos de tipo imanes permanentes. Resuelve la ecuación de conservación del flujo magnético para el potencial escalar magnético. Permite también trabajar en medios lineales y medios con saturación magnética.
- Interfaz 'Electrical Circuit', posee las ecuaciones para modelar circuitos que pueden estar o no conectados a modelos de distribuciones de campos, calculando los voltajes, las corrientes y las cargas asociadas a los elementos del circuito. Los modelos pueden contener elementos pasivos como resistencias, condensadores y bobinas, así como elementos activos como diodos o transistores.
- Interfaz llamado 'Rotating Machinery, Magnetic', que combina las formulaciones de campos magnéticos (vector potencial magnético) y campos magnéticos sin corrientes (potencial escalar magnético) junto con una selección de estructuras predefinidas de velocidades de rotación. Comparte por tanto la mayor parte de sus características con el interfaz de 'Magnetic Fields'. Para cualquier simulación se requiere que las geometrías del rotor y del estator sean creadas de forma individual y luego ensamblarlas.
- Interfaz 'Induction Heating', el ejemplo de multifísica más claro ya que combina todas las características del interfaz de 'Magnetic Fields' en formulación armónico temporal junto con el interfaz 'Heat Transfer' para modelar el calor por inducción y por corrientes de Foucault. De forma predefinida se calculan las pérdidas electromagnéticas del campo magnético como fuentes de calor. En los cálculos se considera que el tiempo de ciclo del campo magnético es muy pequeño comparado con la escala de tiempo a nivel térmico (supuesto adiabático).

## 5. MODELO A SIMULAR

Uno de los objetivos de este trabajo es encontrar un modelo de un motor de inducción trifásico para poder simularlo en COMSOL. En este capítulo se va a mostrar dicho modelo. Después de una revisión bibliográfica, se ha optado por emplear el modelo mostrado en (Cedrat, 2006).

### 5.1 Descripción del motor

El modelo propuesto en (Cedrat, 2006) es el de un motor de inducción trifásico de 2 polos, conectado en estrella, con un bobinado imbricado distribuido de doble capa, y con las siguientes características:

- Potencia nominal: 7,5 kW.
- Tensión de alimentación: 380 V
- Frecuencia de red eléctrica: 50 Hz

Además, tienes las siguientes características geométricas, que también pueden observarse en la Fig. 16:

- El estator tiene 24 ranuras, mientras que el rotor tiene 20
- El diámetro exterior del estator es de 212 mm
- El diámetro interior del estator es de 120 mm
- El diámetro exterior del rotor es de 119 mm
- El entrehierro es de 0,5 mm
- El diámetro interior del rotor es de 40 mm
- La longitud del estator y del rotor es de 125 mm.

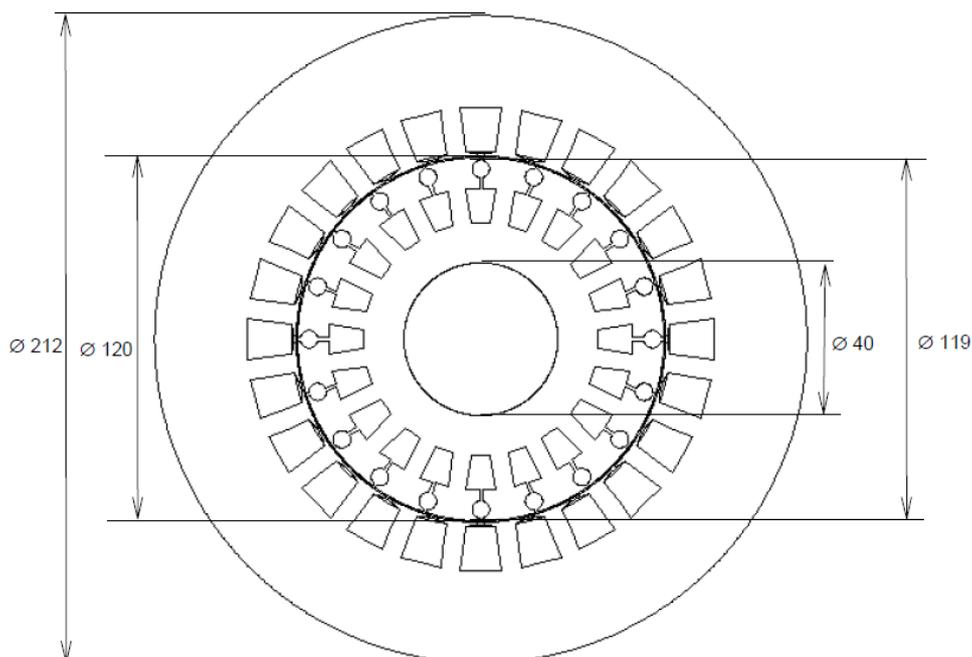


Fig. 16. Dimensiones del motor

Además, las dimensiones de las ranuras del rotor, de doble jaula, y del estator, ranura semicerrada, se pueden ver en la Fig. 17.

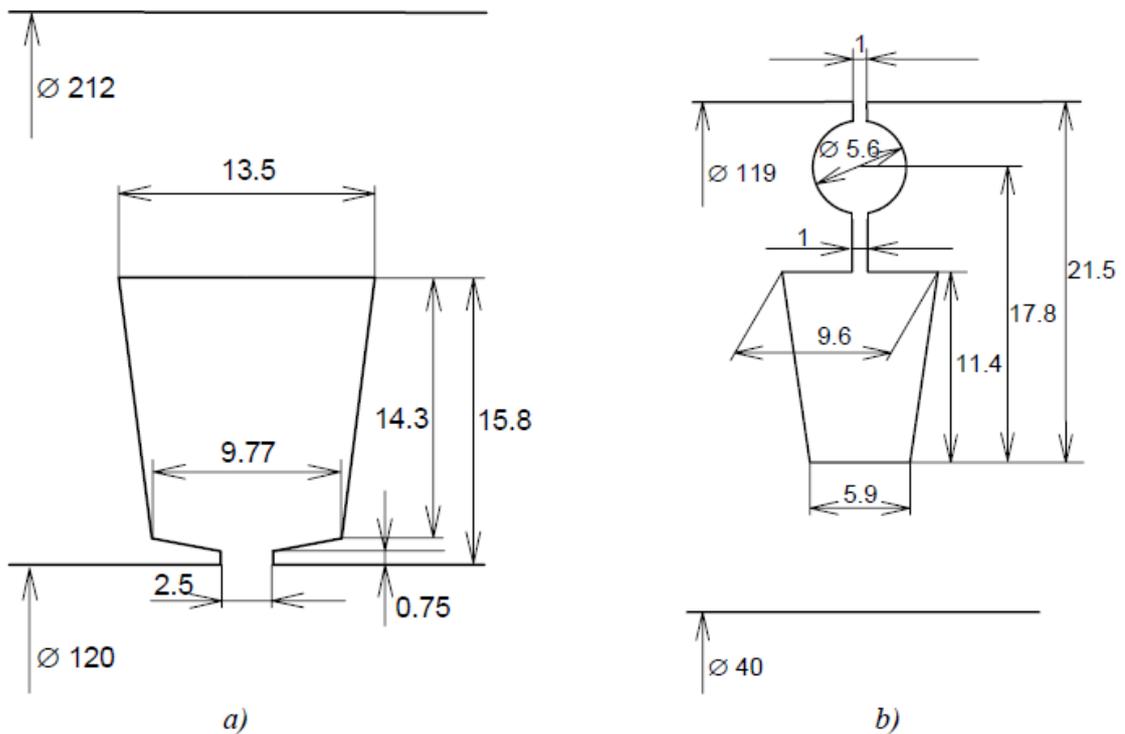


Fig. 17. Dimensiones de las ranuras del a) estator (ranura semicerrada) y b) rotor (de doble jaula)

## 5.2 Definición del campo computacional electromagnético

En el modelo se definen las siguientes regiones con sus propiedades físicas correspondientes (ver Fig. 18):

- Núcleo del estator: Región no conductora de corriente eléctrica, pero sí de flujo magnético.
- Núcleo del rotor: Región no conductora de corriente eléctrica, pero sí de flujo magnético.
- Entrehierro: Región no conductora de corriente eléctrica, situada entre las armaduras del rotor y las del estator.
- Aislamiento: Región no conductora de corriente eléctrica, situada en las ranuras del estator entre el bobinado y el hueco de aire.

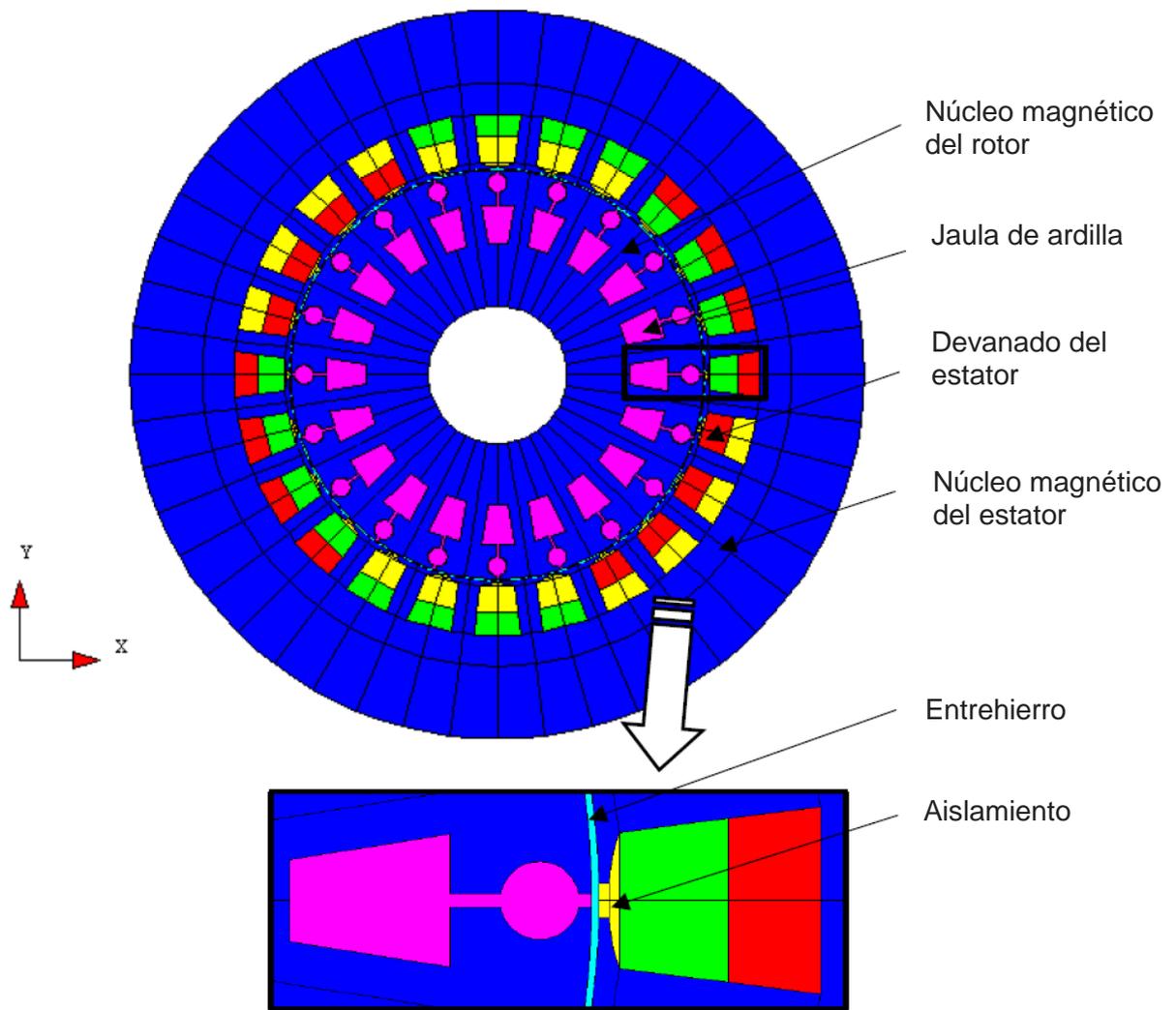


Fig. 18. Regiones del modelo del motor de inducción.

Como se puede ver en la Fig. 18, aparecen en el bobinado del estator diferentes colores. Cada uno de los colores representa una fase del bobinado trifásico distribuido. Cada fase consta de un conjunto de bobinas conectadas en serie y formando un devanado de doble capa. Es decir, en cada ranura se alojan conductores de dos fases diferentes.

Lógicamente, cada una de las 3 fases, porta corriente en diferentes direcciones según el corte transversal mostrado en la Fig. 18, es decir hay zonas donde la corriente es entrante y otras donde la corriente es saliente por la propia morfología del bobinado.

En cada uno de los colores se pueden distinguir cuatro grupos de cuatro ranuras cada uno. Es decir, las bobinas conectadas en serie de una fase se distribuyen en cuatro ranuras. Los lados de una bobina están en la capa interna y los otros lados de bobina en la capa externa de la ranura. En cada uno de estos grupos la corriente circula en la misma dirección por el embridado del bobinado.

A la hora de la nomenclatura, vamos a distinguir las 3 fases. Cada una de las fases tiene 4 grupos de bobinas. Nombraremos a cada uno de los grupos de bobinas en función de la fase a la que pertenezcan de la siguiente forma:

Tabla 1. Grupos de bobinas

FASE	COLOR	GRUPO
U	ROJO	U1
		U2
		U3
		U4
V	AZUL	V1
		V2
		V3
		V4
W	VERDE	W1
		W2
		W3
		W4

Para ver la dirección de la corriente en cada uno de los grupos, el modelo nos aporta un desplegable del estator, que se muestra en la Fig. 19 donde, podemos ver la dirección de la corriente en cada una de las ranuras. La Fig. 19 es una representación bidimensional del bobinado trifásico de la máquina. Están representadas las bobinas y las ranuras del estator están numeradas. Las bobinas se representan por sus lados, que son la parte que se introduce en las ranuras, y las cabezas que unen estos lados. Como se puede observar, el bobinado es de tipo imbricado. También se representan las conexiones entre las agrupaciones de 4 bobinas y las conexiones con las tres fases exteriores. También está representado el sentido de circulación de las corrientes.

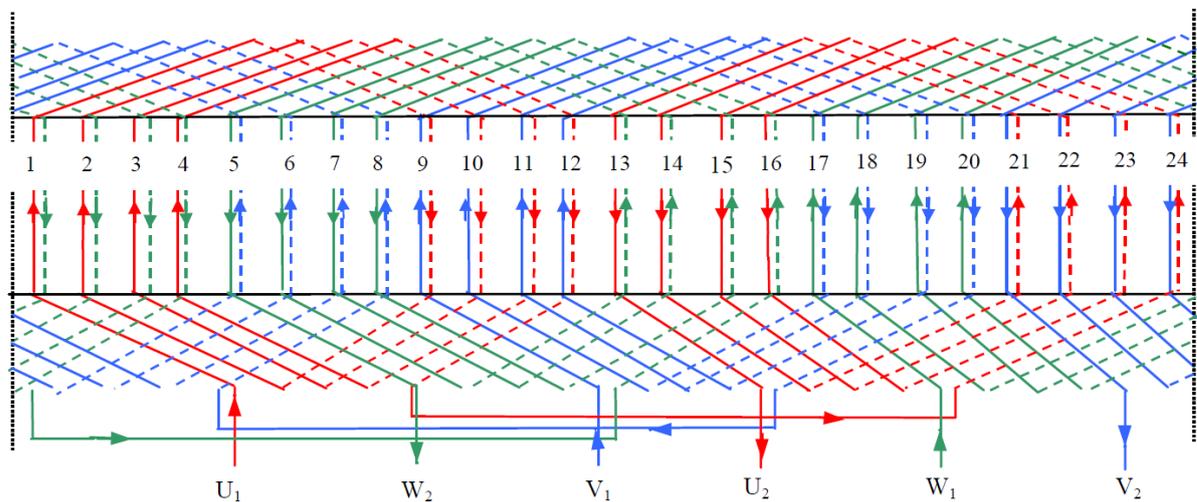


Fig. 19. Desplegable del estator

Si nos fijamos en cada una de las fases, obtenemos la dirección de la corriente para cada uno de los grupos, tal y como se muestra en la Fig. 20 para la fase U:

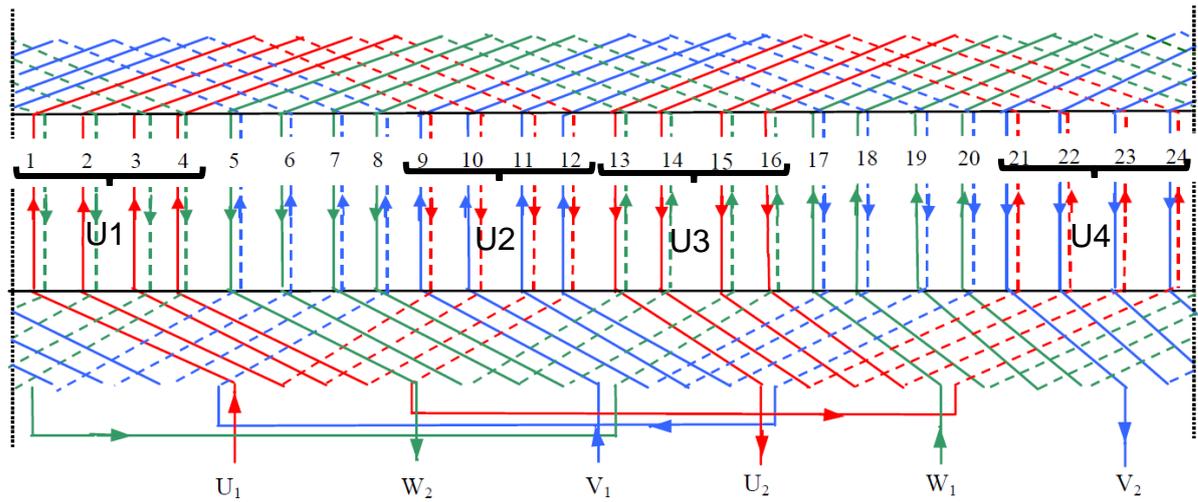


Fig. 20. Fase U

Podemos ver que tanto en el grupo U1, como en el U4, la corriente es ascendente, es decir, saliente si nos fijamos en la Fig. 18. Justamente lo contrario ocurre con los grupos U2 y U3.

Además, es importante identificar dónde se encuentran cada una de las bobinas de los diferentes grupos, tal y como se muestra en las Fig. 21, Fig. 22, Fig. 23 y Fig. 24.

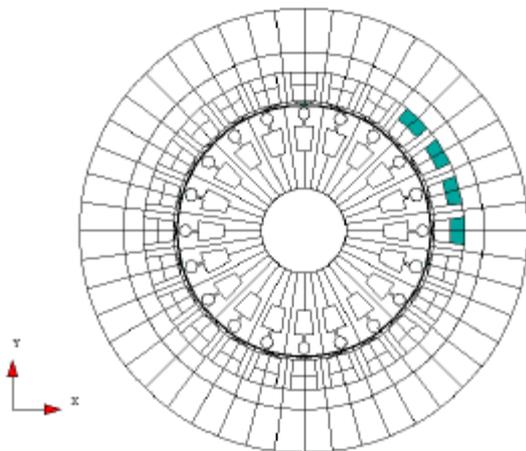


Fig. 21. Bobinas grupo U1

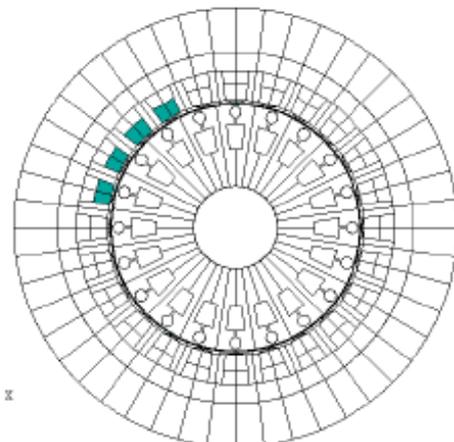


Fig. 22. Bobinas grupo U2

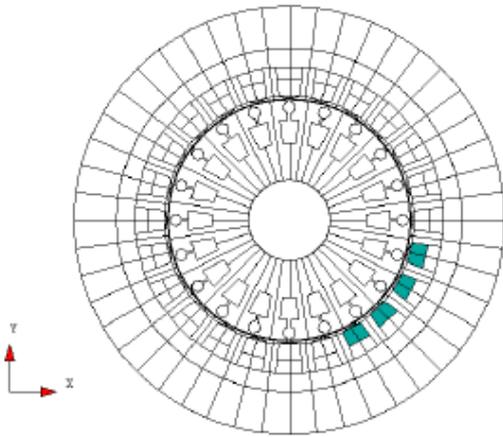


Fig. 23. Bobinas grupo U3

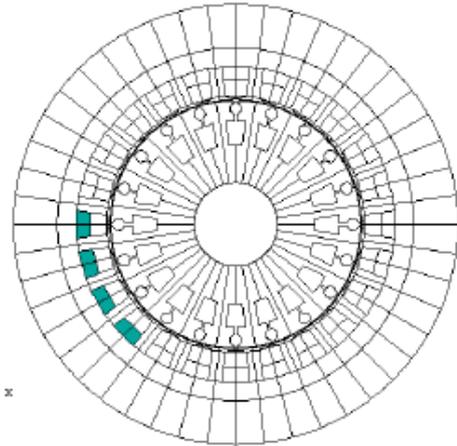


Fig. 24. Bobinas grupo U4

En la Fig. 25, se muestra la distribución en el ranurado del estator de la fase V o fase 2, de forma similar a como se ha hecho anteriormente con la fase U.

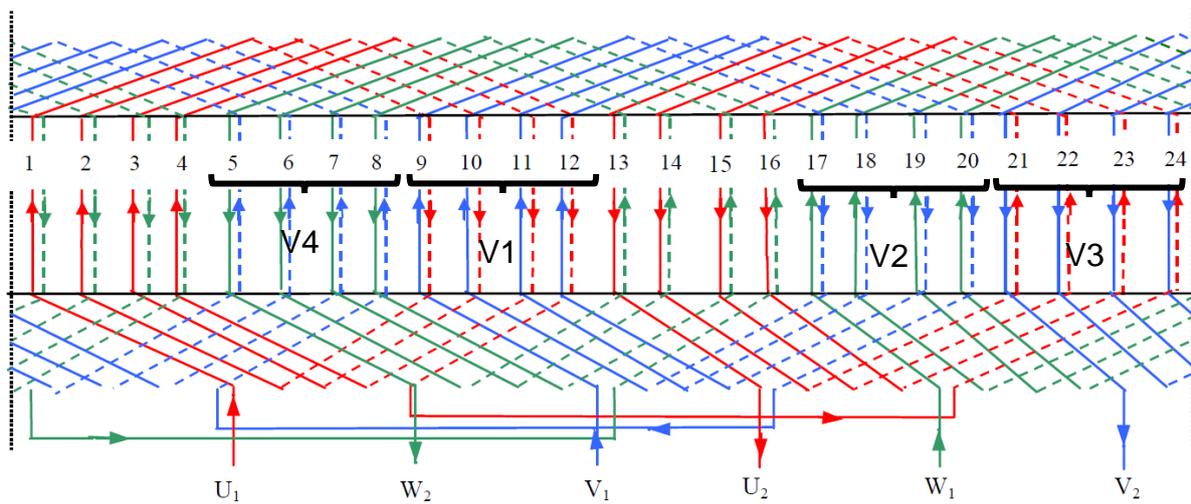


Fig. 25. Fase V

Podemos ver que tanto en el grupo V1, como en el V4, la corriente es ascendente, es decir, saliente si nos fijamos en la Fig. 18. Justamente lo contrario ocurre con los grupos V2 y V3.

Además, el modelo nos indica dónde se encuentran cada una de las bobinas de los diferentes grupos, tal y como se muestra en las Fig. 27, Fig. 26, Fig. 29 y Fig. 28.

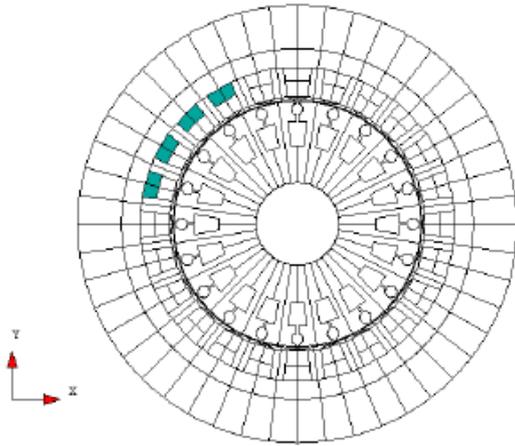


Fig. 26. Bobinas grupo V1

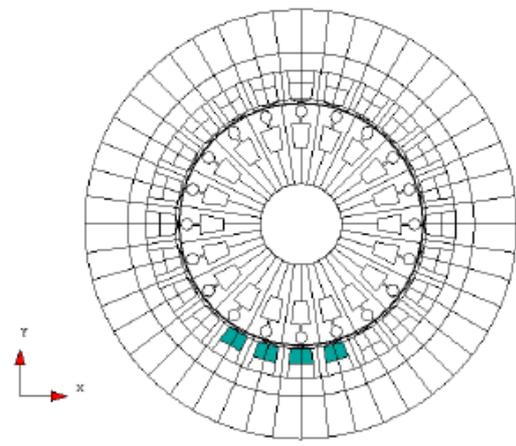


Fig. 27. Bobinas grupo V2

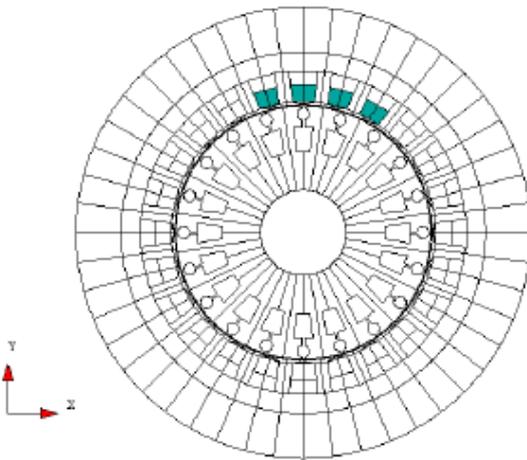


Fig. 28. Bobinas grupo V3

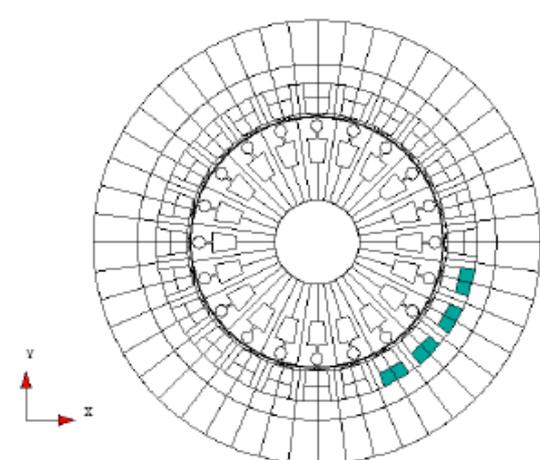


Fig. 29. Bobinas grupo V4

Por último, en la Fig. 30, se muestra la distribución del bobinado de la fase 3 o W.

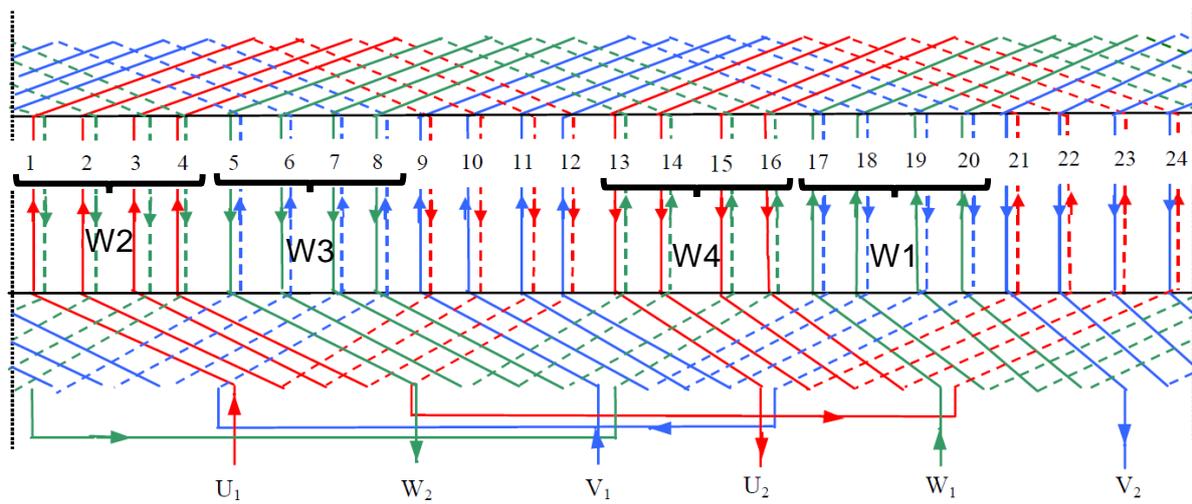


Fig. 30. Fase W

Podemos ver que tanto en el grupo W1, como en el W4, la corriente es ascendente, es decir, saliente si nos fijamos en la Fig. 18. Justamente lo contrario ocurre con los grupos W2 y W3.

Además, el modelo nos indica dónde se encuentran cada una de las bobinas de los diferentes grupos, tal y como se muestra en las Fig. 31, Fig. 32, Fig. 33 y Fig. 34.

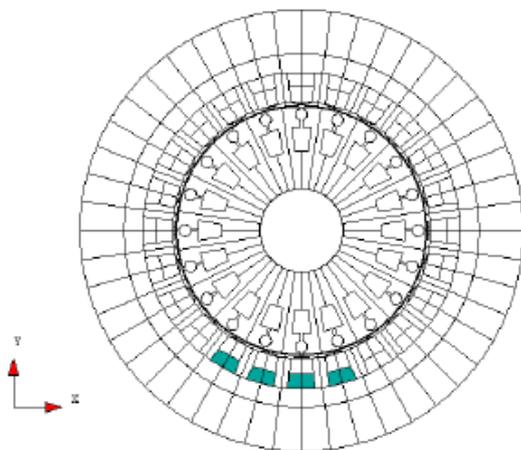


Fig. 31. Bobinas grupo W1

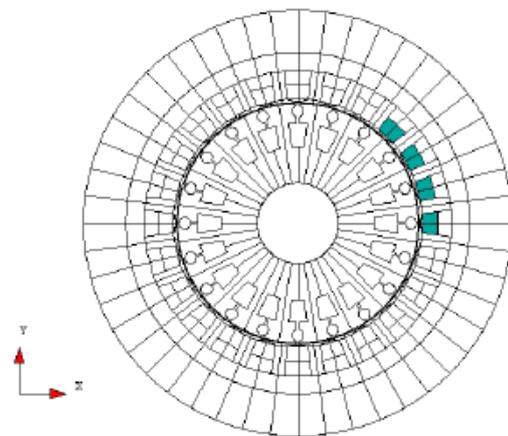


Fig. 32. Bobinas grupo W2

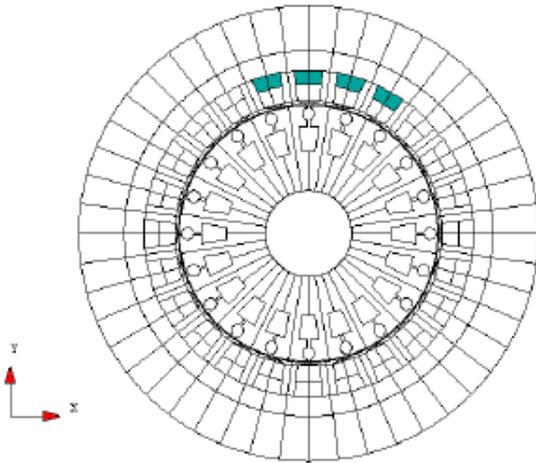


Fig. 33. Bobinas grupo W3

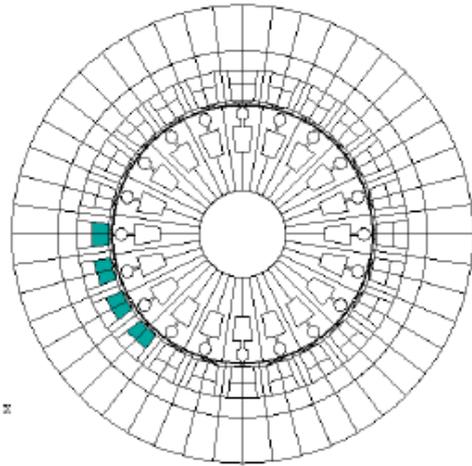


Fig. 34. Bobinas grupo W4

En los párrafos anteriores se ha hecho una descripción geométrica de la distribución de las tres fases en el ranurado del estator. También es necesario conocer el número de espiras que tiene cada bobina.

Según el modelo de referencia, la corriente que circula por cada una de las espiras tiene un valor de 8.89 A, teniendo cada una de las bobinas 104 espiras.

De donde se puede obtener fácilmente que la corriente total que circula por cada uno de los lados de bobina es de 924,56 A.

Sin embargo, aunque el valor de la intensidad máxima sea idéntico para las 3 bobinas por ser un sistema trifásico equilibrado, dependiendo de la fase en la que nos fijemos, la intensidad circulará con un desfase de  $0^\circ$ , de  $120^\circ$  o de  $240^\circ$ .

Precisamente este desfase es el que va a causar el flujo magnético variable que, como se ha explicado anteriormente, será el responsable de inducir una fuerza que moverá el rotor.



## 6. MODELADO EN COMSOL

El siguiente paso a seguir es este trabajo es implantar el modelo que se ha explicado en el epígrafe anterior en COMSOL.

Para ello, en primer lugar, hay que hacer un estudio de cómo funciona COMSOL, no solo el módulo AC/DC que es el que se va a utilizar, si no otros aspectos como la configuración general o la construcción de la geometría.

### 6.1 Configuración general

COMSOL ofrece numerosas opciones con las que poder interactuar. Por ejemplo, una de las cosas que se tuvieron que cambiar fue el renderizador, ya que la opción que viene por defecto no funcionaba correctamente.

Tal y como se puede mostrar en la Fig. 35, la opción adecuada es la de Direct X9, que es con lo que trabaja ahora el programa.

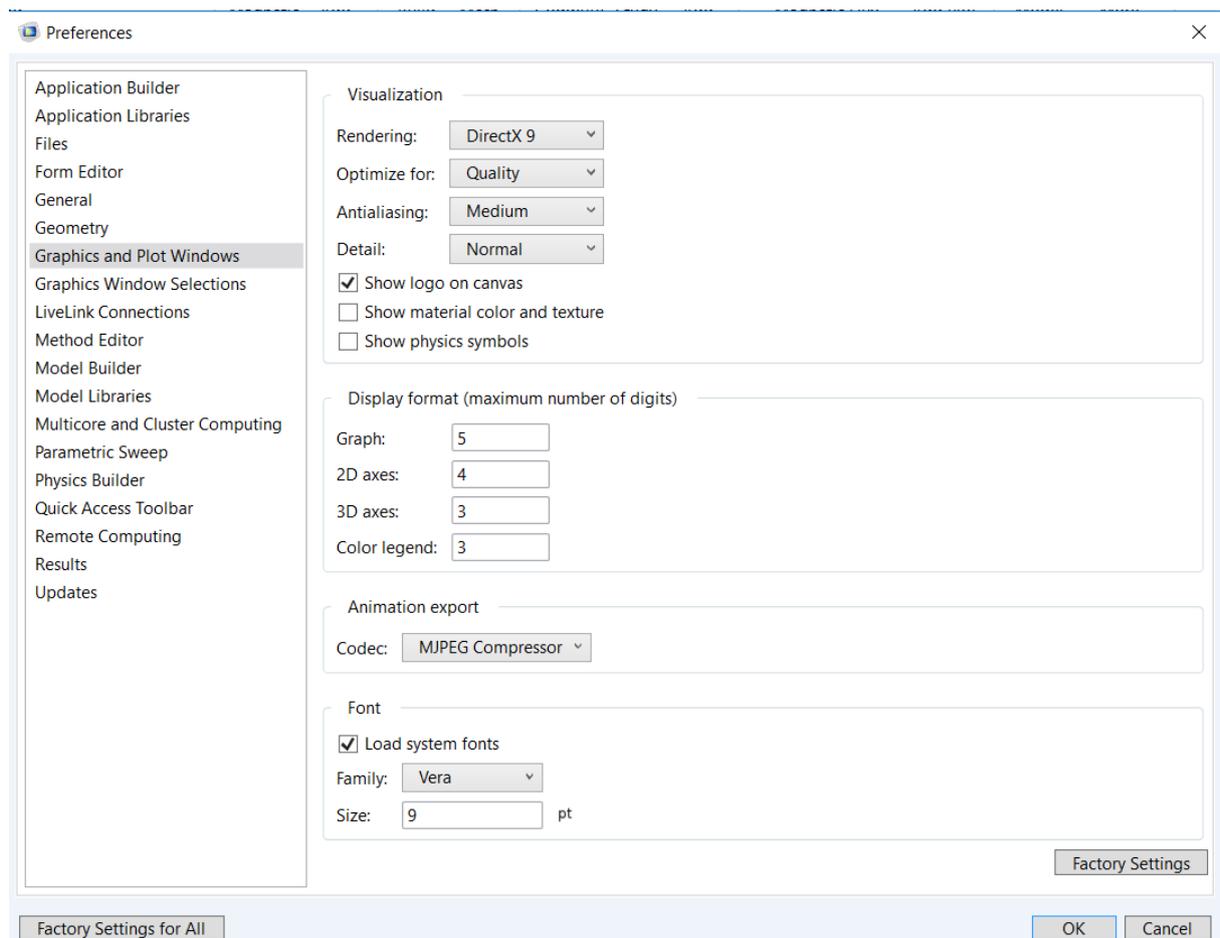


Fig. 35. Opciones generales

El renderizador es muy importante, sobre todo a la hora de construir la geometría. Si la opción seleccionada no es la adecuada, la geometría no aparece de forma correcta o no admite modificaciones.

También, a partir de aquí se puede tener acceso a una serie de librerías de modelos que tiene por defecto COMSOL donde se pueden encontrar ejemplos, y explicaciones que resultan muy útiles a la hora de realizar el modelo.

Una vez que tenemos correctamente la configuración inicial, nos centramos en el propio modelo que tenemos que simular. En primer lugar, debemos construir la geometría indicada.

## 6.2 Creación del modelo

En primer lugar, debemos construir el modelo, donde deberemos incluir el módulo o módulos con los que vamos a trabajar (en este caso el AC/DC), así como el tipo de geometría que vamos a necesitar.

En primer lugar, creamos el modelo, seleccionando *model wizard*, tal y como se muestra en la Fig. 36.

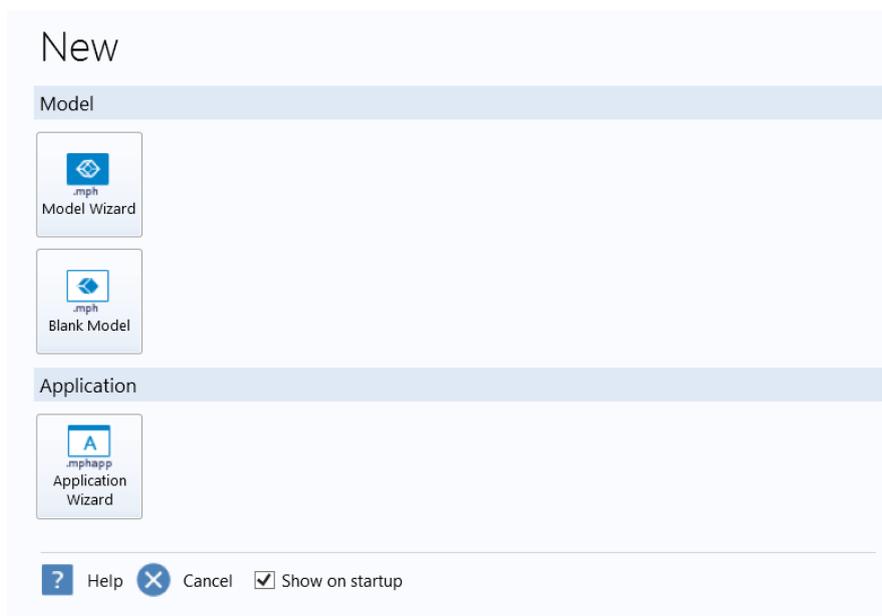


Fig. 36. Creación del modelo

Una vez que hemos creado el modelo, necesitamos indicar el tipo de geometría que vamos a utilizar (2D, 3D o 1D). En este caso, seleccionaremos geometría 2D que es lo que requiere el modelo, tal y como se muestra en la Fig. 37.

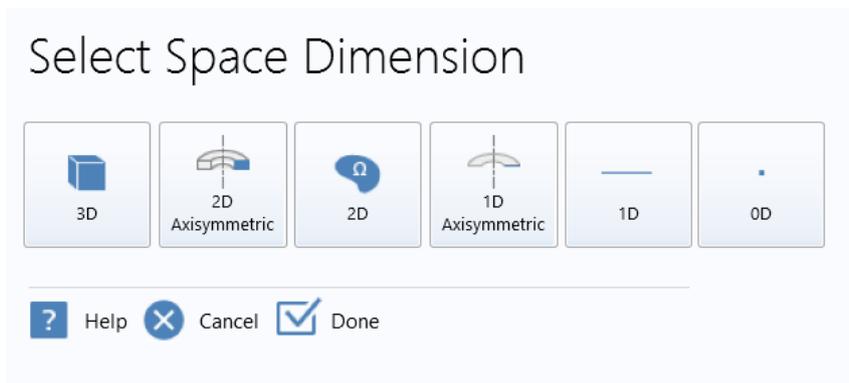


Fig. 37. Tipo de geometría

A continuación, debemos indicar el módulo o módulos que vamos a utilizar en la simulación. En este caso debemos seleccionar el módulo AC/DC, y dentro de éste módulo seleccionar magnetic fields, tal y como se muestra en la Fig. 38.

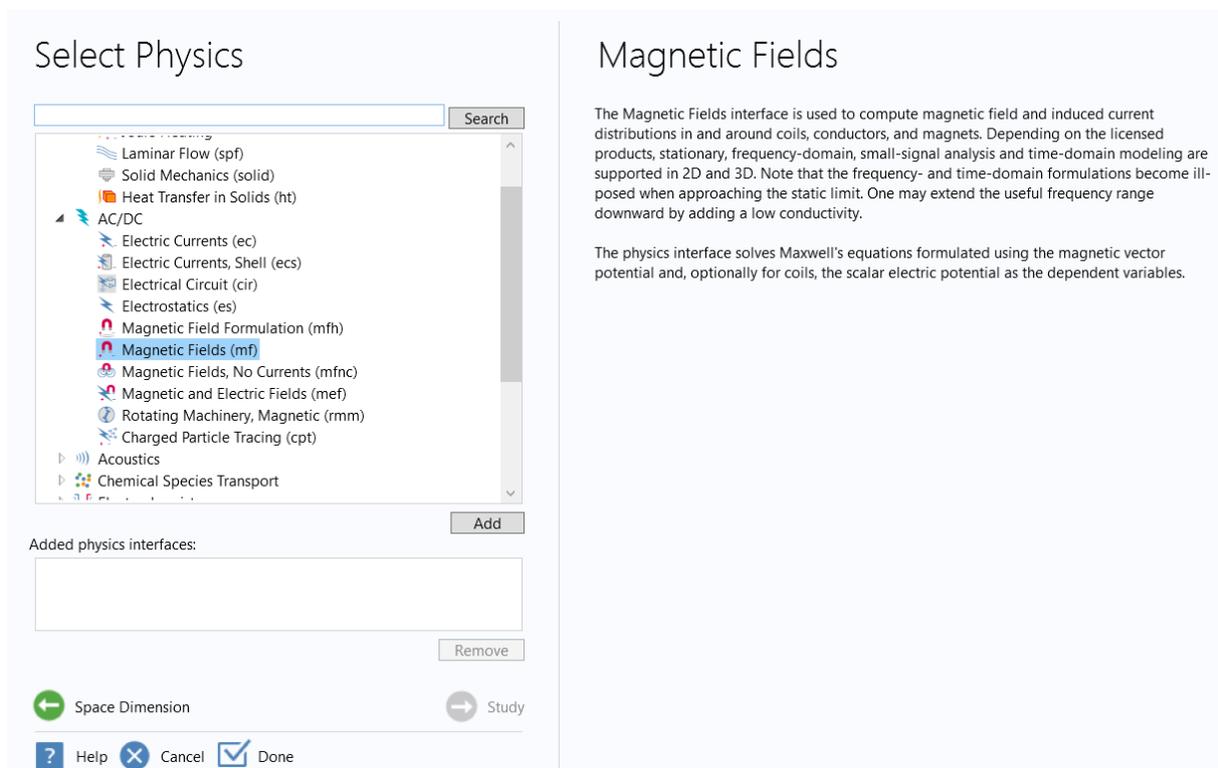


Fig. 38. Selección del módulo

En este momento tenemos nuestro modelo seleccionado (véase Fig. 39).

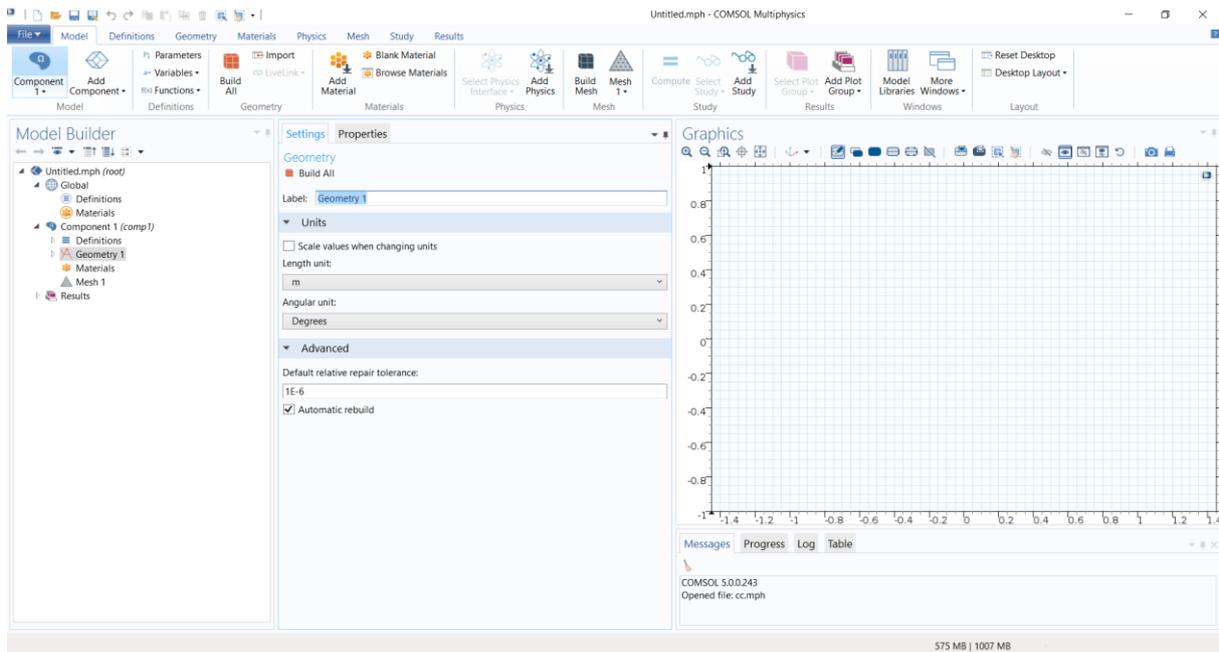


Fig. 39. Modelo COMSOL

El siguiente paso es construir la geometría que vamos a utilizar.

### 6.3 Geometría

COMSOL ofrece numerosas opciones para la construcción de la geometría. Por un lado, incorpora una herramienta que permite dibujar la geometría como un programa de dibujo o CAD.

Además, COMSOL permite importar geometrías en diferentes formatos, como CAD, lo cual es una gran ayuda a la hora de trabajar con geometrías complejas.

También, permite trabajar tanto en 2 dimensiones (2D), como en 3 (3D). En este caso, únicamente vamos a necesitar trabajar en 2D, ya que el modelo así está definido.

En este proyecto, la geometría se ha construido en COMSOL, lo que ha permitido definir unos parámetros que son modificables en función de las necesidades. Esto no hubiera sido posible si la geometría se hubiera construido con un programa externo y hubiera sido importada.

Así, en la opción parámetros, tal y como se puede observar en la Fig. 40 podemos definir cuantos parámetros necesitemos, por ejemplo, distancias, número de ranuras, ángulos...

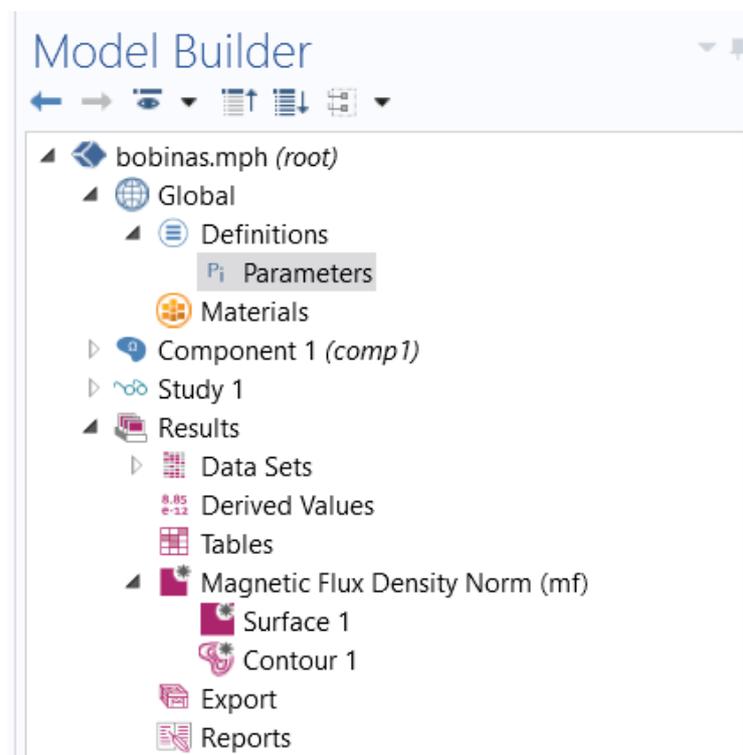
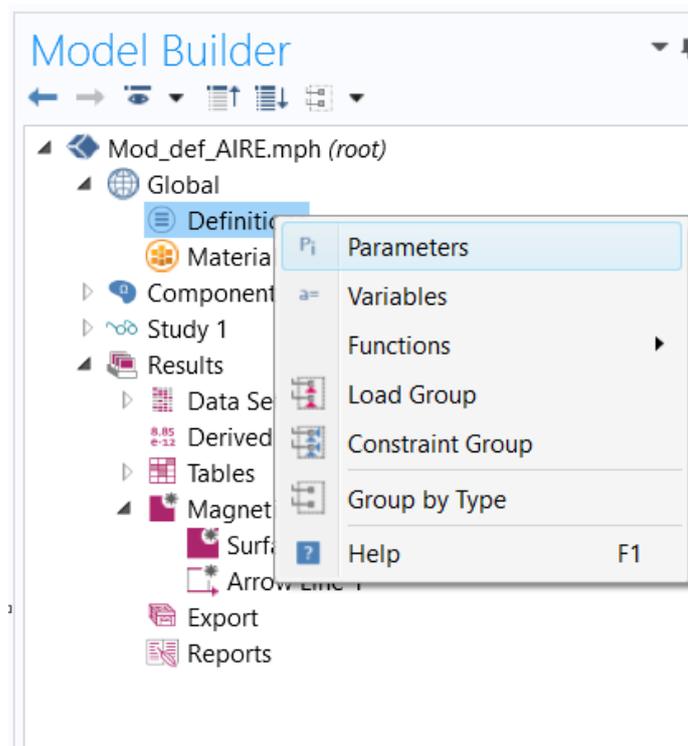


Fig. 40. Definición de parámetros

Los parámetros que se han utilizado, pueden verse en la Fig. 41.

Parameters			
▼ Parameters			
Name	Expression	Value	Description
ri	20 [cm]	0.2 m	Radio interior rotor
rp	5.6/2 [cm]	280 1/m	Radio bola rotor
L1	15 [cm]	0.15 m	
L2	5.9/2[cm]	295 1/m	
L3	1.85 [cm]	0.0185 m	
L4	11.4 [cm]	0.114 m	
L5	0.5 [cm]	0.005 m	
L6	7.4 [cm]	0.074 m	
L7	3.7 [cm]	0.037 m	
rer	(ri+L1+L4+L6+L7)	0.575 m	Radio exterior rotor
nr	20	20	Número ranuras rotor
alpha	(pi/(nr)) [rad]	0.15708 rad	
tan	tan(alpha)	0.15838	
rie	60[cm]	0.6 m	Radio interior estator
L8	2.5/2[cm]	125 1/m	
L9	0.75[cm]	0.0075 m	
L10	3.635 [cm]	0.03635 m	
L11	0.75 [cm]	0.0075 m	
L12	14.3[cm]	0.143 m	
L13	1.865 [cm]	0.01865 m	
L14	30.2[cm]	0.302 m	
ne	24	24	Número ranuras estator
beta	pi/ne [rad]	0.1309 rad	
tan2	tan(beta)	0.13165	
lg	10000*104*8.89/89.86	1.0289E5	Densidad intensidad 1
lp	10000*104*8.89/76.52	1.2083E5	Densidad intensidad 2

Fig. 41. Parámetros utilizados para dibujar la geometría del motor

Para dibujar la geometría se ha seguido una secuencia para aprovechar al máximo las posibilidades que ofrece COMSOL en cuanto a geometrías, rotación, etc.

Así lo primero que se ha dibujado es la figura mostrada en la Fig. 42 :

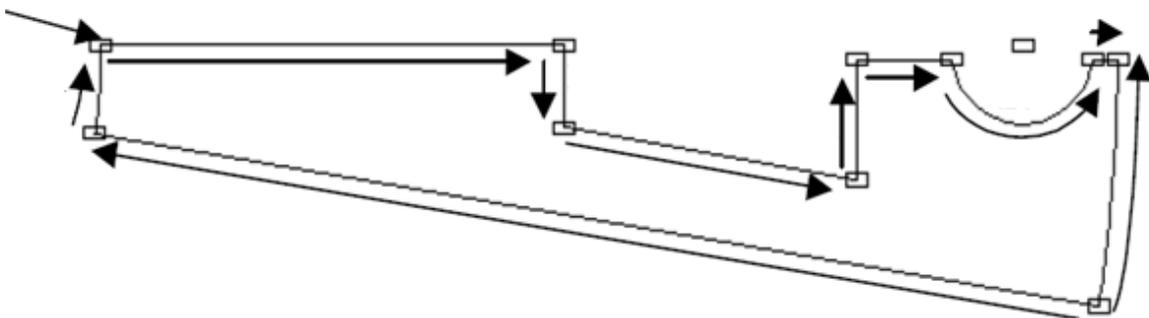


Fig. 42. Figura de partida rotor

Además, se pueden ver en la Fig. 42 los parámetros utilizados. Para dibujar esta figura se han seguido los siguientes pasos:

- En primer lugar, se ha dibujado todo con líneas rectas. Para ello, se ha utilizado la herramienta Polygon. Se puede ver que tanto la línea situada a la izquierda como la situada a la derecha tiene una cierta curvatura. Esta curvatura la conseguiremos posteriormente aplicando una operación booleana de intersección con una circunferencia. Además, vemos que hay una semicircunferencia. Dicha semicircunferencia la obtendremos también aplicando el mismo método. La figura obtenida se muestra en la Fig. 43.

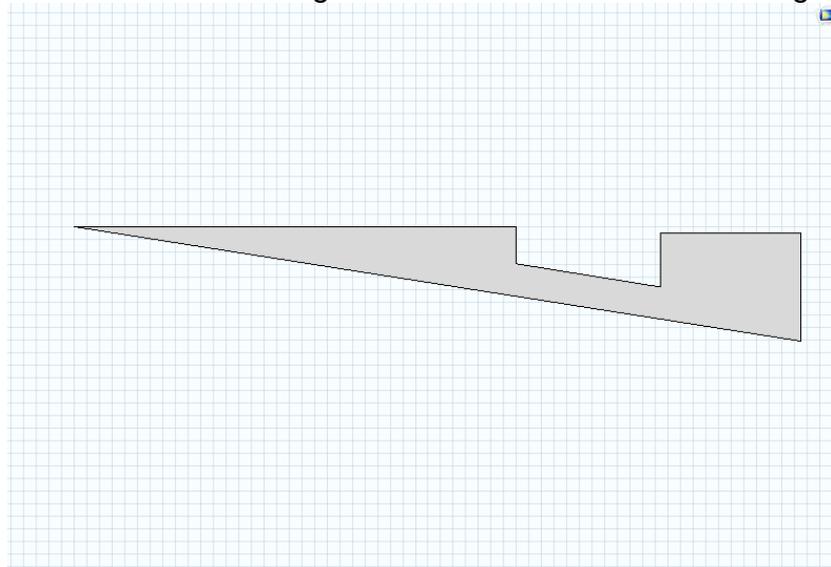


Fig. 43.

- Posteriormente se ha construido la parte que queda en blanco de la figura. Aunque este espacio no forma parte de la figura, a la hora de simular, debe tener asignado tanto un material como unas propiedades, por lo que hay que construirlo como parte ajena a la figura. De nuevo se ha utilizado la herramienta Polygon. Esta construcción se puede ver en la Fig. 44.

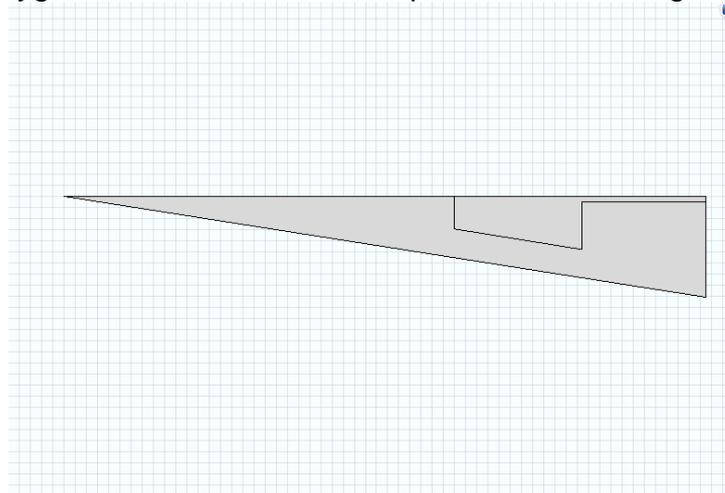


Fig. 44.

- A continuación, se construye una circunferencia para poder aplicar una operación booleana de resta y así poder obtener las líneas curvas deseadas. Estas operaciones se pueden observar en las Fig. 45, Fig. 46, Fig. 47 y Fig. 48.

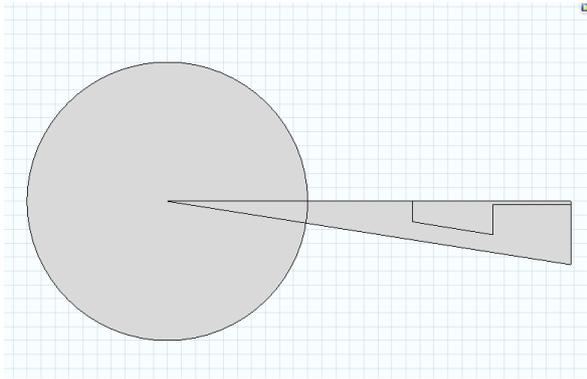


Fig. 47. Circunferencia interior

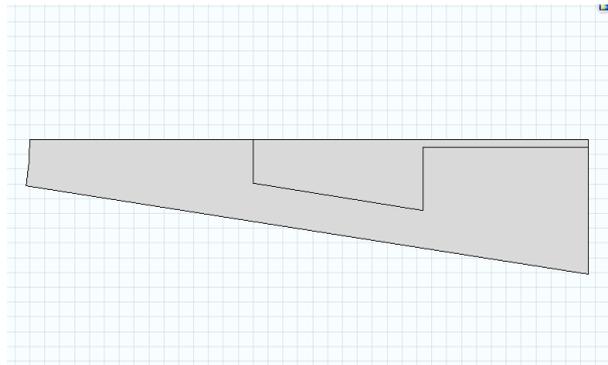


Fig. 48. Operación booleana resta 1

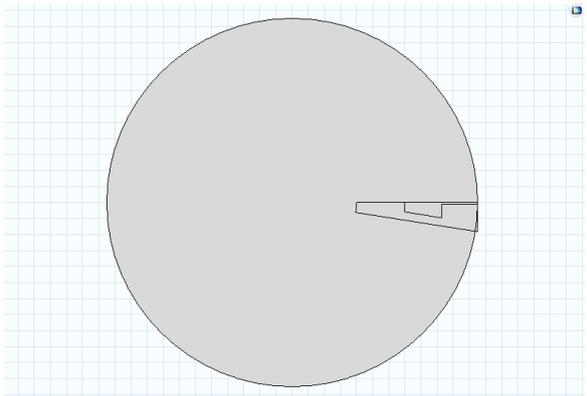


Fig. 46. Circunferencia exterior

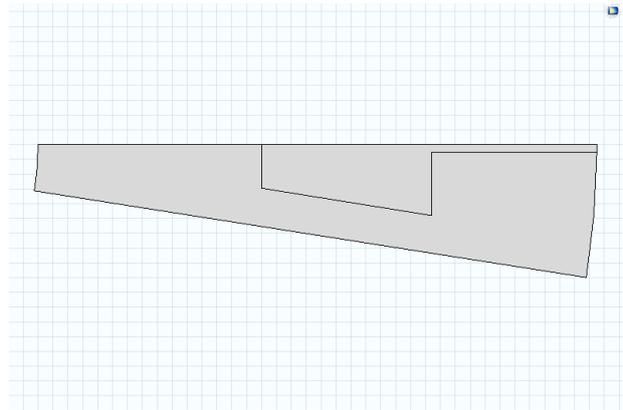


Fig. 45. Operación booleana resta 2

- A continuación, construimos una circunferencia, la unimos a la parte ajena a la figura se ha construido anteriormente. El motivo de esta operación es que, aunque este espacio aparezca en blanco, luego debe tener asignado material y propiedades a la hora de simular. Esta operación se puede observar en las Fig. 49 y Fig. 50:

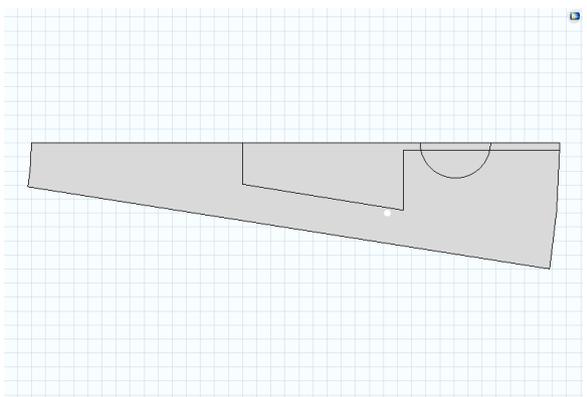


Fig. 49. Construcción circunferencia

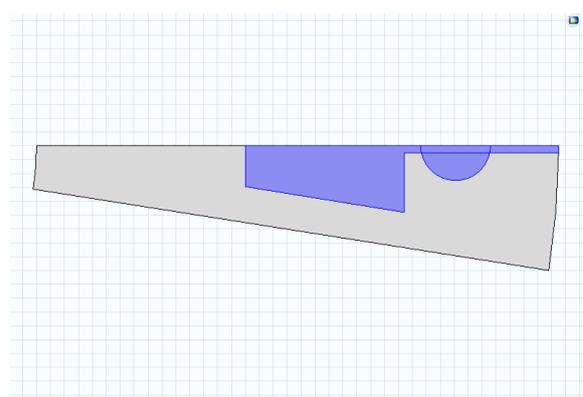


Fig. 50. Operación booleana de suma

En este momento tenemos construida la figura que buscábamos. El siguiente paso que debemos hacer es realizar una simetría. Para ellos, primero debemos duplicar la geometría que tenemos, y posteriormente aplicar la simetría. Estas operaciones se pueden ver en las Fig. 51, Fig. 52, Fig. 53 y Fig. 54.

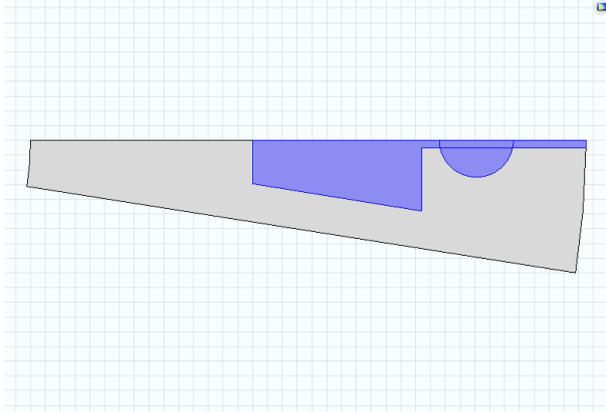


Fig. 53. Copiado 1

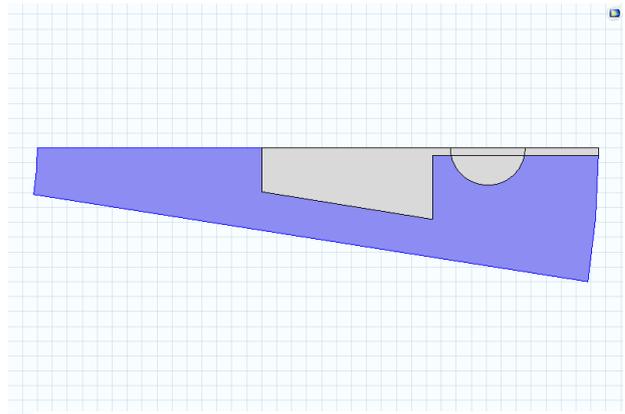


Fig. 52. Copiado 2.

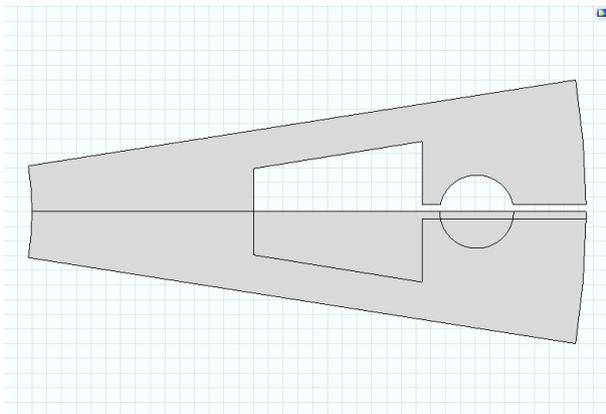


Fig. 54. Simetría 1

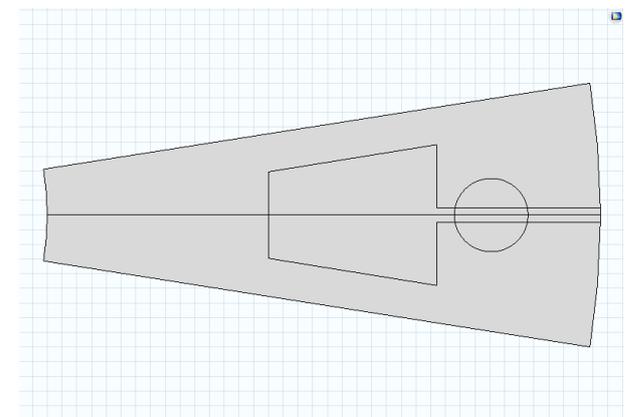


Fig. 51. Simetría 2

En este momento ya disponemos de una de las ranuras del rotor. A continuación, lo que debemos hacer es copiar y rotar esta figura para formar el rotor entero. Esta operación se muestra en las Fig. 55 y Fig. 56.

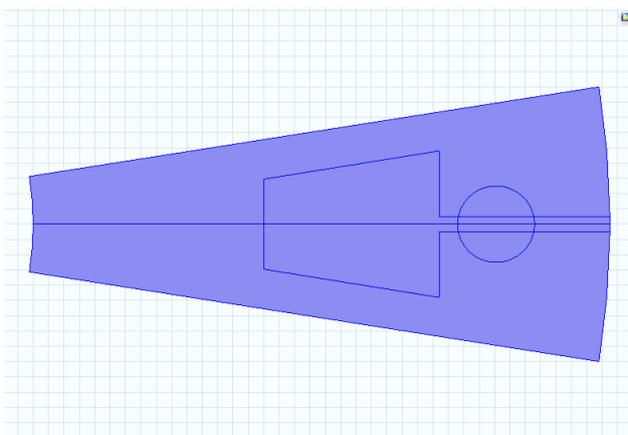


Fig. 56. Copiado

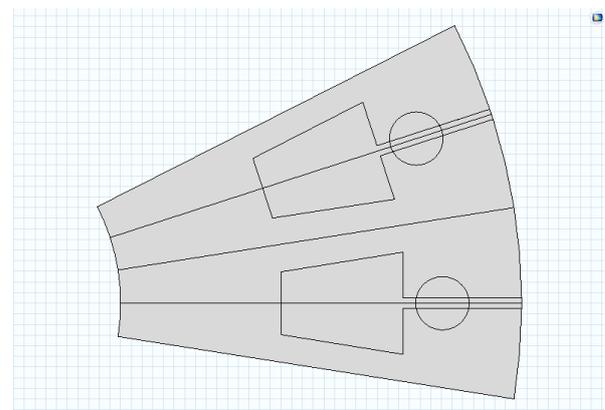


Fig. 55. Rotación de la figura

Esta operación la debemos repetir tantas veces como ranuras tenga el rotor. Dependiendo del número de ranuras, el ángulo que debemos girar al realizar la operación de rotación cambia. La geometría construida está programada para poder construir hasta 30 ranuras, tan solo es necesario modificar el parámetro “número de ranuras del rotor”.

Al cambiar este parámetro, cambia el ángulo de giro (véase parámetro alpha), así como el número de veces que se realiza el giro.

Para cambiar el número de veces que se realiza el giro en función del número de ranuras del rotor se ha definido un contador cuyo valor depende justamente de este número. Con la función condicional “if”, se puede controlar el número de veces que se realiza el giro en función del contador.

Así, si el valor del contador es menor que el número de ranuras del rotor, la función condicional devolverá un valor verdadero, y se llevará a cabo la rotación. Sin embargo, si el contador toma un valor igual o mayor que el número de ranuras del rotor, la función condicional devolverá el valor falso, y, por tanto, la rotación no se llevará a cabo.

El modelo consta de 20 ranuras en el rotor, por lo tanto, la geometría resultante es la mostrada en la Fig. 57:

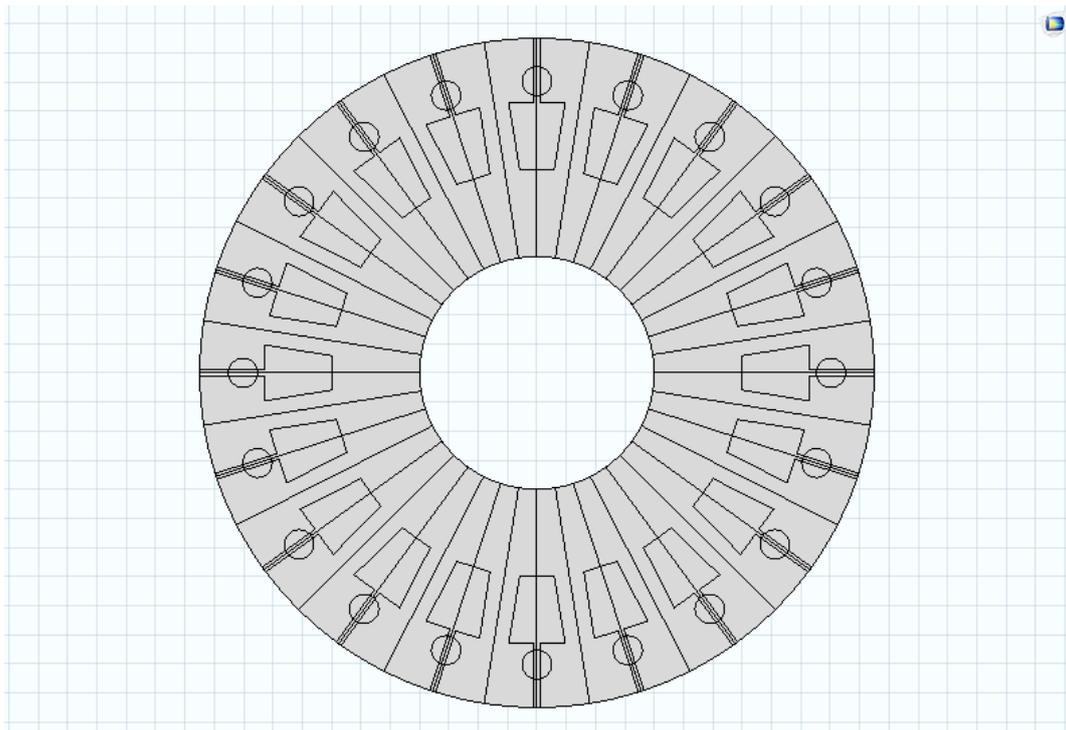


Fig. 57. Geometría del rotor

El próximo paso es dibujar el eje de estator. Esta geometría es simplemente una circunferencia, tal y como se puede mostrar en la Fig. 58:

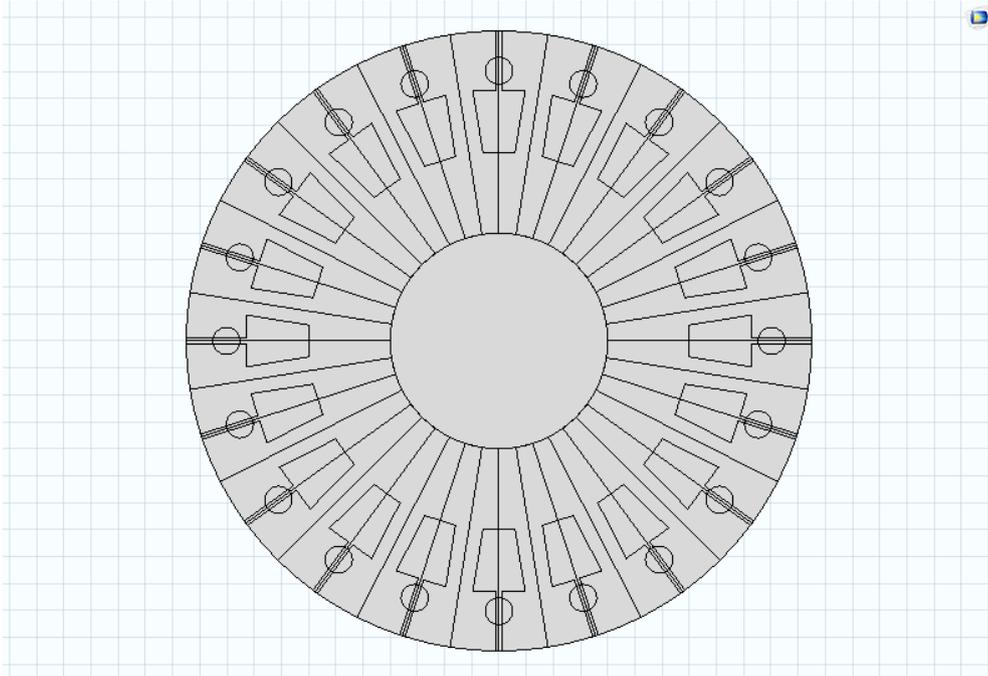


Fig. 58. Núcleo del estator

A continuación, procedemos a dibujar el entrehierro. Para eso, dibujamos dos circunferencias, para aplicar entre ellas una operación booleana de diferencia y así obtener la geometría toroidal correspondiente al entrehierro.

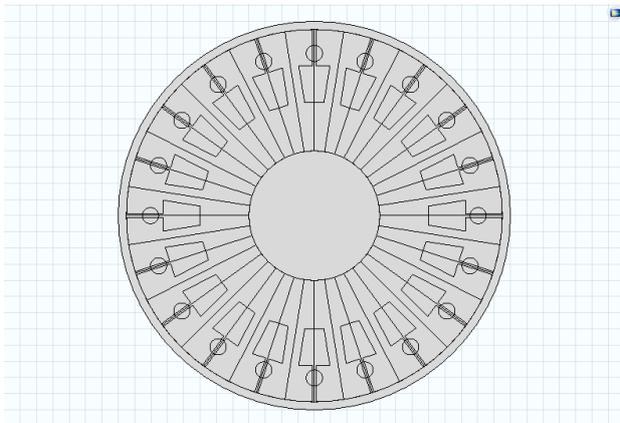


Fig. 60. Circunferencia entrehierro

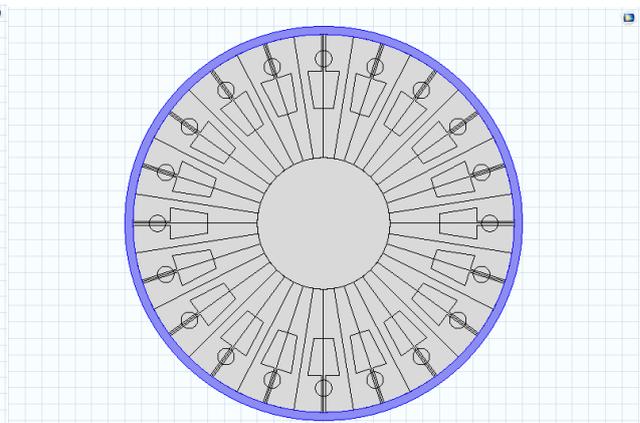


Fig. 59. Operación booleana resta

Por último, es necesario dibujar el estator del motor. Para ello, procedemos de forma similar que hemos hecho con el estator. En primer lugar, dibujamos la figura mostrada en la Fig. 61.

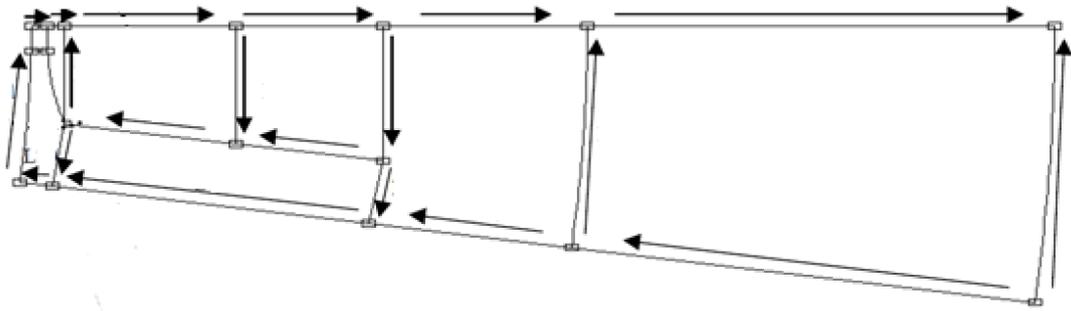


Fig. 61. Figura partida estator

De mismo modo que para dibujar la geometría mostrada en la Fig. 42, se han seguido los siguientes pasos:

- En primer lugar, se ha construido la figura mostrada en la Fig. 62. Para ello, se ha utilizado la herramienta Polygon.

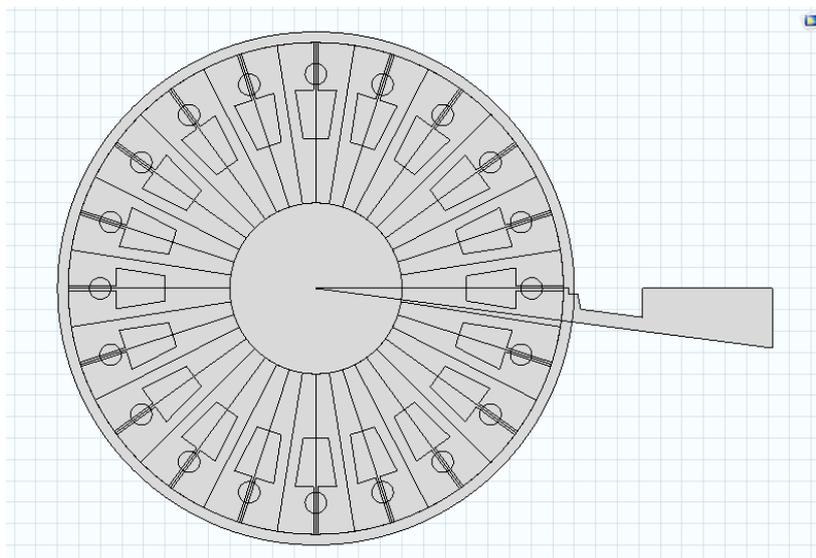


Fig. 62.

- Posteriormente se ha construido la parte que queda en blanco se la figura. Aunque este espacio no forma parte de la figura, a la hora de simular, debe tener asignado tanto un material como unas propiedades, por lo que hay que construirlo como parte ajena a la figura. De nuevo se ha utilizado la herramienta Polygon. Esta construcción se puede ver en la Fig. 63.

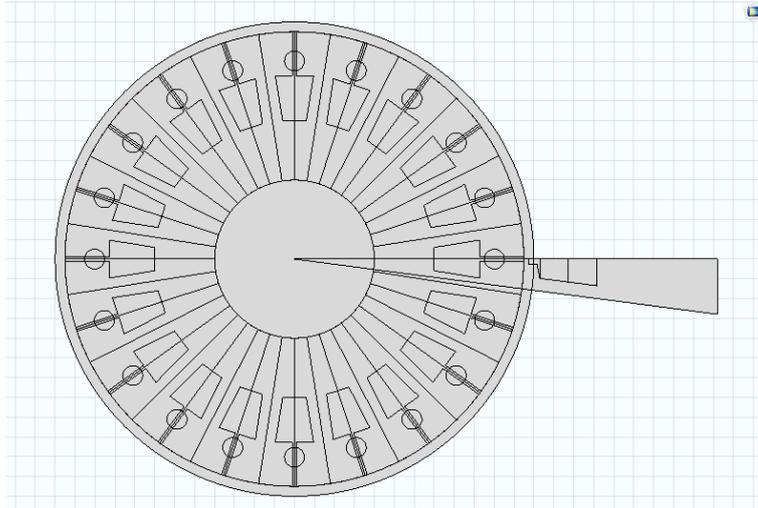


Fig. 63.

- A continuación, se construye unas circunferencias para poder aplicar una operación booleana de resta y así poder obtener las líneas curvas deseadas. Estas operaciones se pueden observar en las Fig. 64 y Fig. 65.

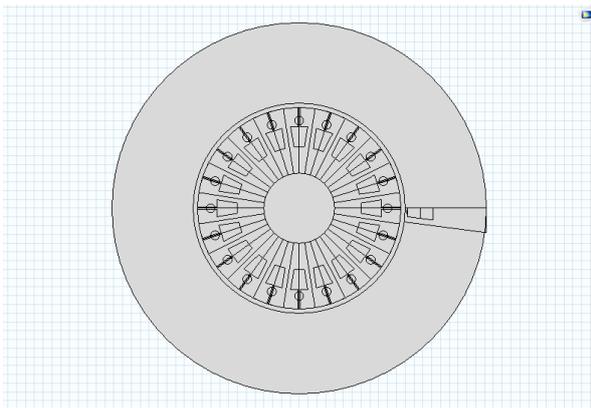


Fig. 65.

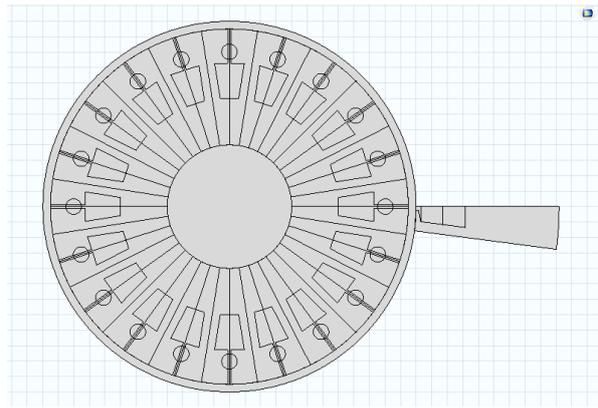


Fig. 64. Operación booleana resta

En este momento tenemos construida la figura que buscábamos. El siguiente paso que debemos hacer es realizar una simetría. Para ellos, primero debemos duplicar la geometría que tenemos, y posteriormente aplicar la simetría. Estas operaciones se pueden ver en las Fig. 66 y Fig. 67.

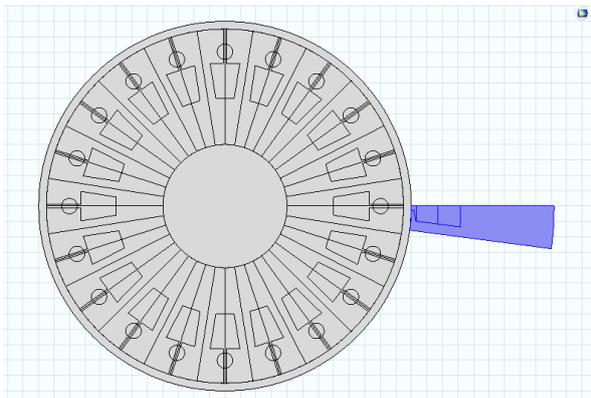


Fig. 67. Copiado

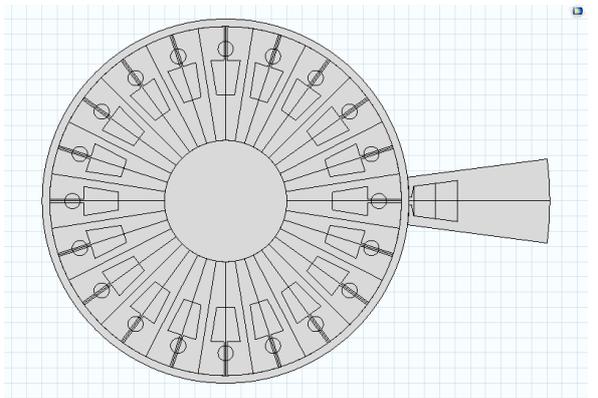


Fig. 66. Simetría

En este momento ya disponemos de una de las ranuras del rotor. A continuación, al igual que con las ranuras del rotor, lo que debemos hacer es copiar y rotar esta figura para formar el rotor entero. Esta operación se muestra en las Fig. 55 y Fig. 56:

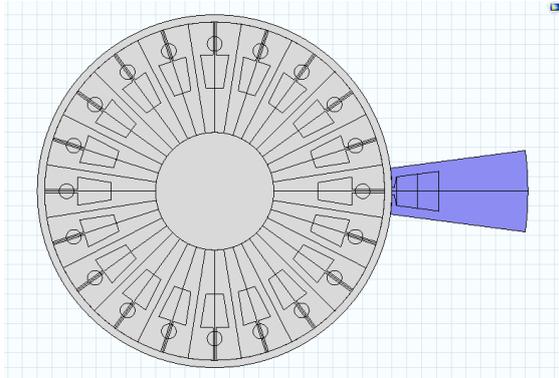


Fig. 68. Copiado

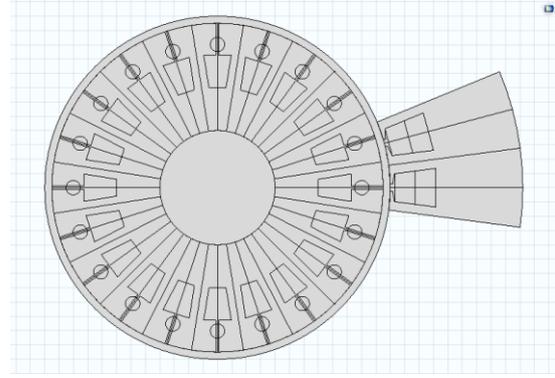


Fig. 69. Operación de rotación

Esta operación la debemos repetir tantas veces como ranuras tenga el estator. Dependiendo del número de ranuras, el ángulo que debemos girar al realizar la operación de rotación cambia. La geometría construida está programada para poder construir hasta 30 ranuras, tan solo es necesario modificar el parámetro “número de ranuras del estator”.

Al cambiar este parámetro, cambia el ángulo de giro (véase parámetro beta), así como el número de veces que se realiza el giro. Este procedimiento es similar al usado para la construcción del rotor, usando del mismo modo la función condicional “if”.

Así, si el valor del contador es menor que el número de ranuras del estator, la función condicional devolverá un valor verdadero, y se llevará a cabo la rotación. Sin embargo, si el contador toma un valor igual o mayor que el número de ranuras del estator, la función condicional devolverá el valor falso, y, por tanto, la rotación no se llevará a cabo.

El modelo consta de 24 ranuras en el rotor, por lo tanto, la geometría resultante es la mostrada en la Fig. 70.

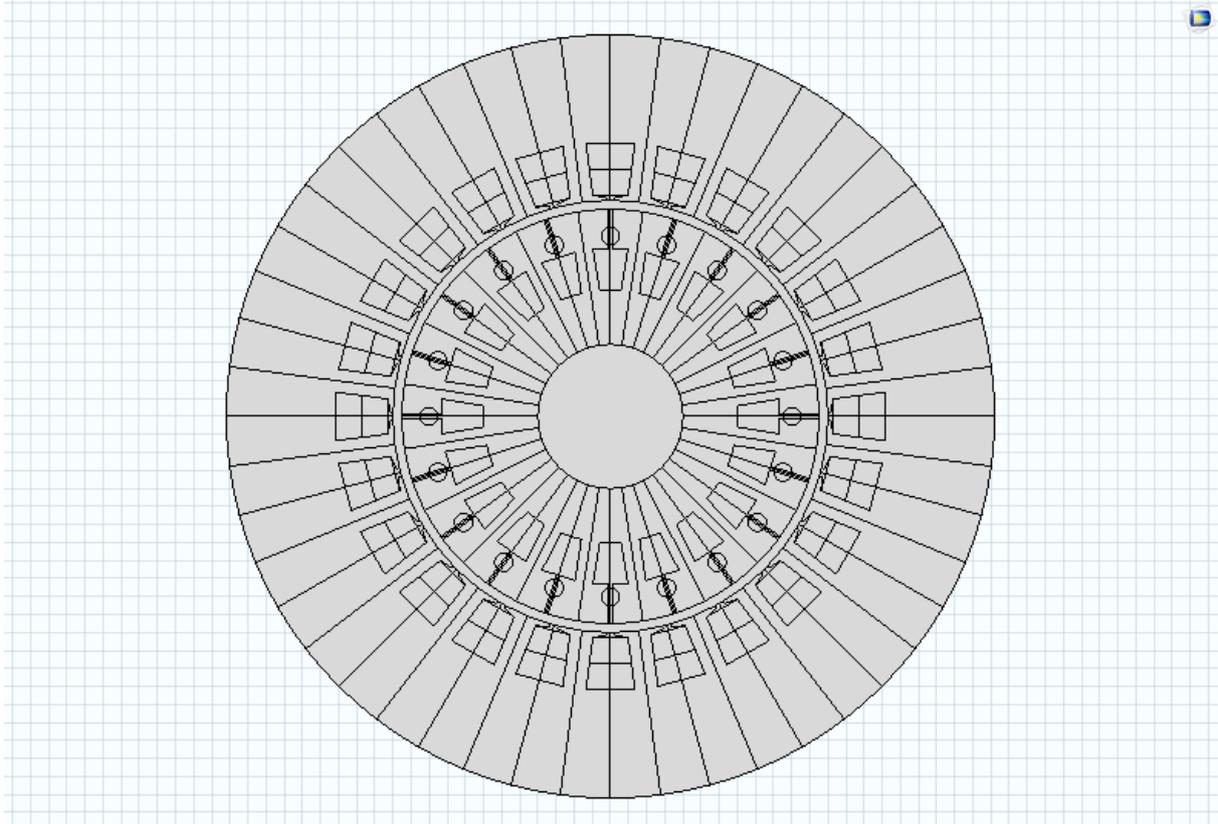


Fig. 70. Geometría resultante

Realizar la geometría con el propio programa de COMSOL resulta muy interesante ya que, al dejar todas sus medidas en función de parámetros, si se requiere cambiar alguna de ellas, podemos obtener la nueva geometría de una forma muy simple y rápida simplemente modificando los parámetros.

Esta parametrización de la geometría del modelo hace posible interactuar con diferentes geometrías de forma muy sencilla y rápida, lo que resultará muy interesante en otros trabajos que continúen este trabajo. En la Fig. 71 se representa un fragmento del programa, donde se pueden ver algunas de las funciones utilizadas, como la función condicional “if”

Si la geometría se hubiera dibujado con un programa externo esto no sería posible, y si en algún momento se deseara cambiar cualquier medida o ítem de la geometría habría que volver a rehacer todo.

Este es el principal motivo por el cual se decidió realizar la geometría en COMSOL y no importarlo desde un programa externo.

Una vez que tenemos dibujada la geometría, el siguiente paso es indicar el material del que están construidas cada una de las partes del motor.

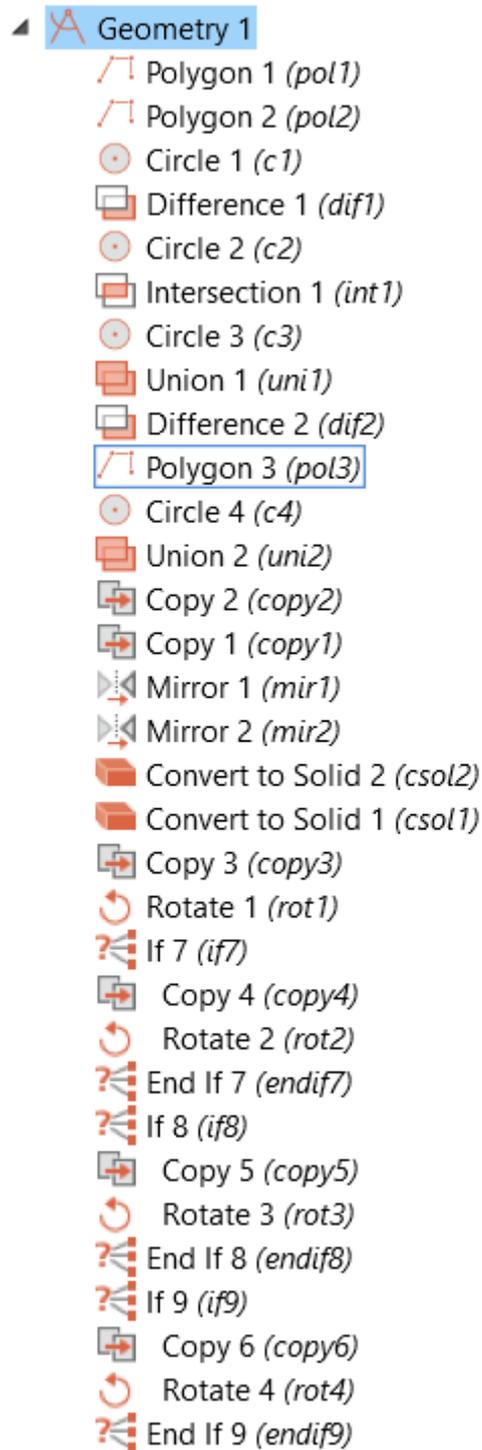


Fig. 71. Código Geometría

## 6.4. Materiales

COMSOL ofrece varias posibilidades a la hora de definir materiales. Por un lado, incorpora una librería con un dossier de materiales con sus propiedades predefinidas, aunque modificables.

Por otro lado, también permite definir un material desde cero, indicando las propiedades necesarias para la correcta simulación.

No obstante, COMSOL también nos indica si necesita conocer el valor de alguna propiedad para aplicar correctamente las ecuaciones, y que debemos indicarle, de lo contrario, la simulación no se llevará a cabo.

Tal y como se puede ver en la Fig. 72, en la pestaña materiales podemos elegir entre introducir un material (desde la librería) e introducir un material el blanco, para poder definir el valor de cada una de las propiedades.



Fig. 72. Introducción de material

En nuestro caso vamos a utilizar materiales predefinidos, que debemos buscar en la librería mostrada en la Fig. 73:

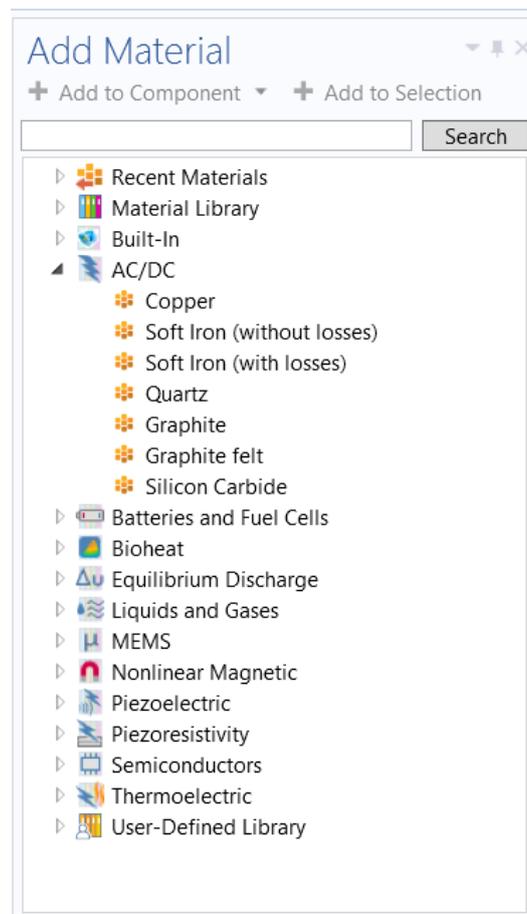


Fig. 73. Adición material

Los motores de inducción trifásico se componen de diferentes materiales:

- Tanto el núcleo del estator como del rotor son de hierro dulce, cuyas propiedades vienen predefinidas en COMSOL, y se pueden ver en la Fig. 74:

Material Contents					
Property	Name	Value	Unit	Property group	
✓ Electrical conductivity	sigma	0[S/m]	S/m	Basic	
✓ Relative permittivity	epsilon <sub>r</sub>	1	1	Basic	
✓ Relative permeability	mu <sub>r</sub>	1000	1	Basic	
Magnetic flux density norm	normB	BH(norm... T		BH curve	
normH	normH	sqrt(H1^... A/m		BH curve	
Magnetic field norm	normH	HB(norm... A/m		HB curve	
normB	normB	sqrt(B1^... T		HB curve	

Fig. 74. Propiedades del acero dulce

Para asignar este material a los ítems correspondientes simplemente tenemos que seleccionarlos tal y como se muestra en la Fig. 75. Este material se asigna al circuito magnético del estator y del rotor. En una continuación de este trabajo, se podrían emplear materiales con otras propiedades magnéticas y ver su efecto sobre las prestaciones de la máquina.

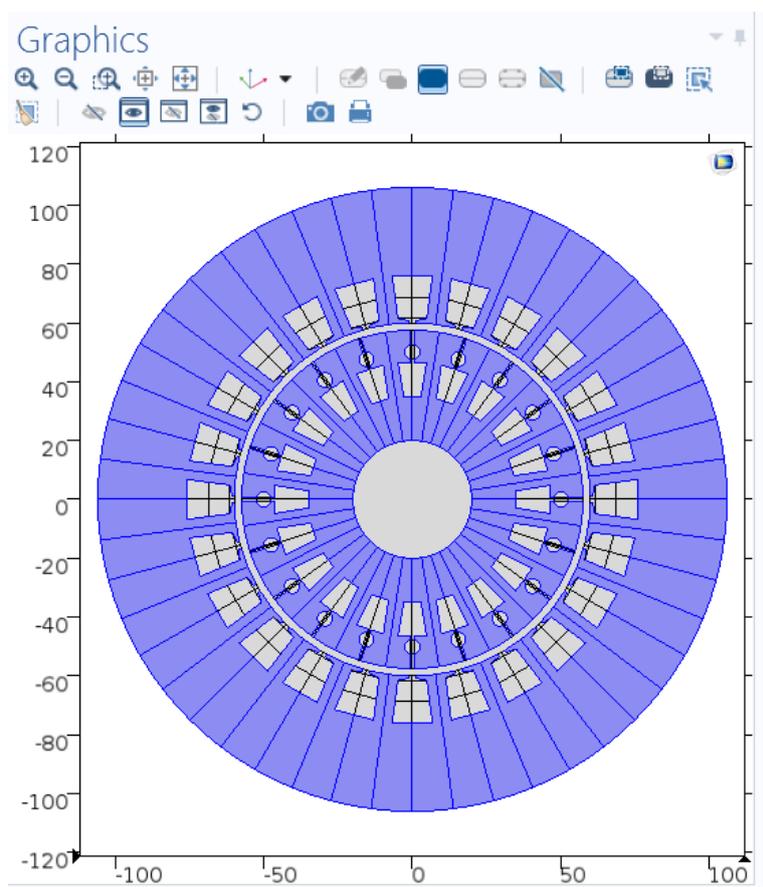


Fig. 75. Núcleo del estator y rotor

El bobinado del estator normalmente es de cobre y el del rotor puede ser de cobre o aluminio. En este caso, el material del rotor será aluminio. Sin embargo, la asignación de materiales puede resultar un problema en la simulación.

En las ranuras del estator, realmente se dispone de un bobinado con numerosas espiras. Estas espiras son de un diámetro muy pequeño,

comparado con las dimensiones de la ranura. Además, las espiras deberían estar aisladas entre sí. Esto supone, que la distribución de corriente en la ranura será homogénea. La densidad de corriente en la ranura se podría aproximar, sin mucho error, al ratio entre el número total de amperios entre la sección total de paso.

Sin embargo, a la hora de simular es complicado consideración esta estructura. Una de las formas de simular consiste en considerar una densidad de corriente en la ranura. Si se considera que la ranura es de material conductor eléctrico, por ejemplo de cobre, debido al efecto piel, la distribución de corriente en la ranura sería muy diferente de la real. La corriente tendería a circular por la periferia y no por el centro de la ranura.

Por este motivo, el material considerado para las bobinas del estator debería ser aire, que es un material que no conduce la electricidad. Posteriormente, le indicaremos al programa que por el bobinado circula una determinada densidad de corriente procedente de una fuente externa. Así, evitamos simular las corrientes parásitas debidas al efecto piel que en la realidad no existen, o al menos en esa cuantía.

En cuanto al bobinado del rotor, se van a considerar diferentes opciones. Por un lado, se considerará aire, para simular únicamente el campo creado por el estor, pero, por otro lado, para ser más realistas y ver lo que ocurre en un motor en la realidad, se considerará aluminio. En este caso, se inducirán en el rotor corrientes que a su vez generarán su propio campo magnético. Las propiedades del aluminio se pueden ver en la Fig. 76.

Material Contents					
Property	Name	Value	Unit	Property group	
✓ Electrical conductivity	sigma	35.5e6[S/m]	S/m	Basic	
✓ Relative permittivity	epsilon <sub>r</sub>	3	1	Basic	
✓ Relative permeability	mu <sub>r</sub>	1.2E-6	1	Basic	
Coefficient of thermal expansion	alpha	23.1e-6[1/...]	1/K	Basic	
Heat capacity at constant pressure	C <sub>p</sub>	904[J/(kg*...]	J/(kg·K)	Basic	
Density	rho	2700[kg/...]	kg/m <sup>3</sup>	Basic	
Thermal conductivity	k	237[W/(m...]	W/(m·K)	Basic	
Young's modulus	E	70.0e9[Pa]	Pa	Young's modulus and Poisson...	
Poisson's ratio	nu	0.35	1	Young's modulus and Poisson...	

Fig. 76. Propiedades del aluminio

De nuevo, para asignar este material a los ítems correspondientes simplemente tenemos que seleccionarlos tal y como se muestra en la Fig. 77.

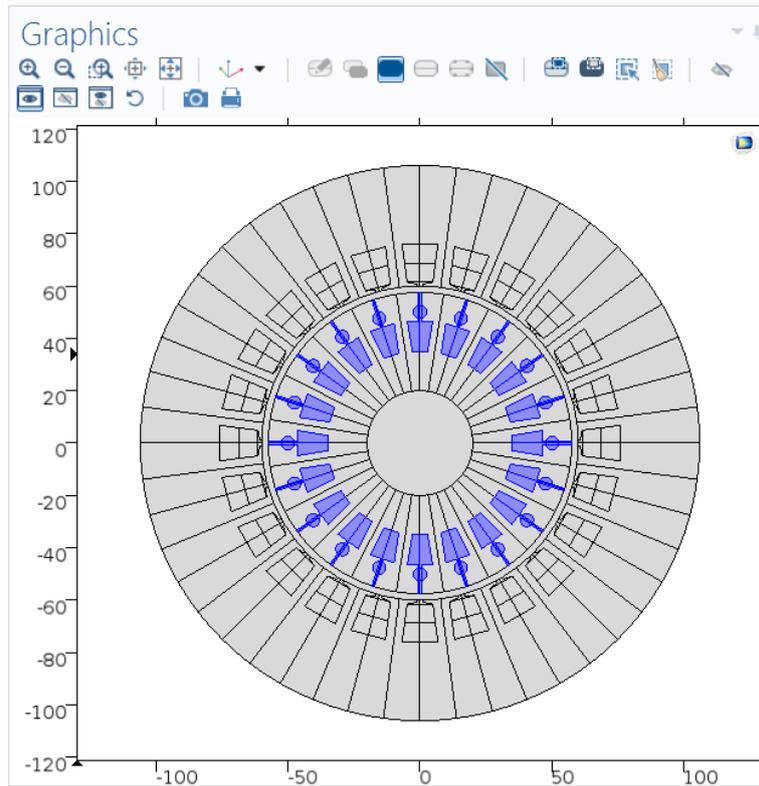


Fig. 77. Bobinado del rotor

- Tanto el entrehierro como el eje del rotor se consideran aire. Además, como se ha comentado, también consideraremos el bobinado del estator como aire. Las propiedades del aire se pueden ver en la Fig. 78.

Material Contents					
Property	Name	Value	Unit	Property group	
Relative permeability	mur	1	1	Basic	
Relative permittivity	epsilon <sub>r</sub>	1	1	Basic	
Electrical conductivity	sigma	0[S/m]	S/m	Basic	
Dynamic viscosity	mu	eta(T[1/K])...	Pa·s	Basic	
Ratio of specific heats	gamma	1.4	1	Basic	
Heat capacity at constant pressure	Cp	Cp(T[1/K])[...]	J/(kg·K)	Basic	
Density	rho	rho(pA[1/P...]	kg/m <sup>3</sup>	Basic	
Thermal conductivity	k	k(T[1/K])[...]	W/(m·K)	Basic	
Speed of sound	c	cs(T[1/K])[...]	m/s	Basic	
Refractive index	n	1	1	Refractive index	
Refractive index, imaginary part	ki	0	1	Refractive index	

Fig. 78. Propiedades del aire

Nuevamente, para asignar este material a los ítems correspondientes simplemente tenemos que seleccionarlos tal y como se muestra en la Fig. 79.

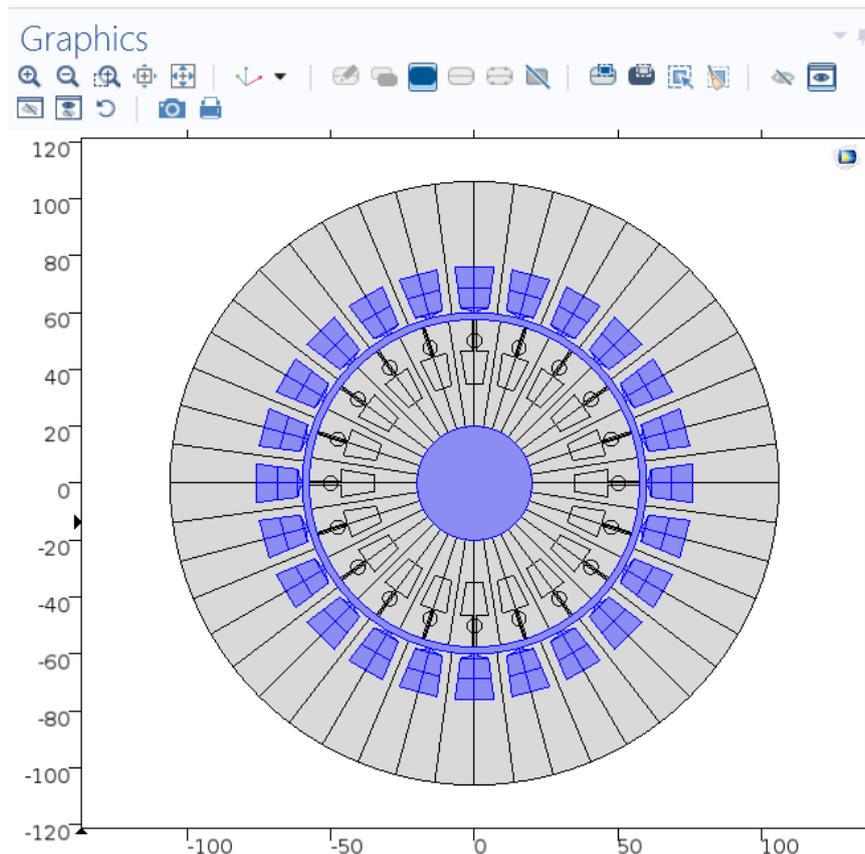


Fig. 79. Bobinado del estator, eje del rotor y entrehierro

Una vez que tenemos asignado a cada uno de los ítems el material correspondiente, debemos definir las condiciones de funcionamiento del motor. Para ello, debemos definir condiciones de contorno, condiciones iniciales y la intensidad que circula las y como se mostró en el epígrafe anterior de esta memoria.

## 6.5 Condiciones de funcionamiento del motor

Una vez que hemos definido los materiales, debemos indicar al programa la corriente que circula por las bobinas, su desfase, y su dirección. En COMSOL existen diferentes formas de dar esta información al programa: densidad de corriente, fuente de tensión externa y un modelado especial de bobinas, propio del programa. En este modelo se ha elegido hacerlo mediante la imposición de una densidad de corriente compleja en las ranuras. Simplemente se le indicará que por una superficie circula una determinada densidad de corriente. Para ello, tenemos que acceder al menú mostrado en la Fig. 80.

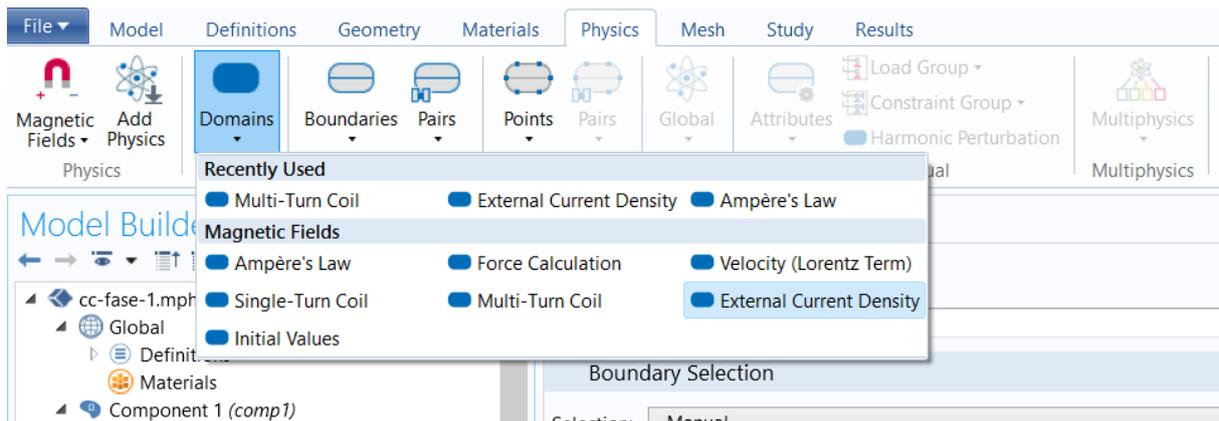


Fig. 80. Fuente de intensidad externa

Debemos introducir tantas fuentes de intensidad externa como grupos de bobinas tenemos. En este caso, tenemos 12 grupos diferentes (4 agrupamientos de lados de bobina, por tres fases), tal y como se muestra en la Tabla 1.

En cada una de estas fuentes de corriente, aparecerá un menú como el mostrado en la Fig. 81.

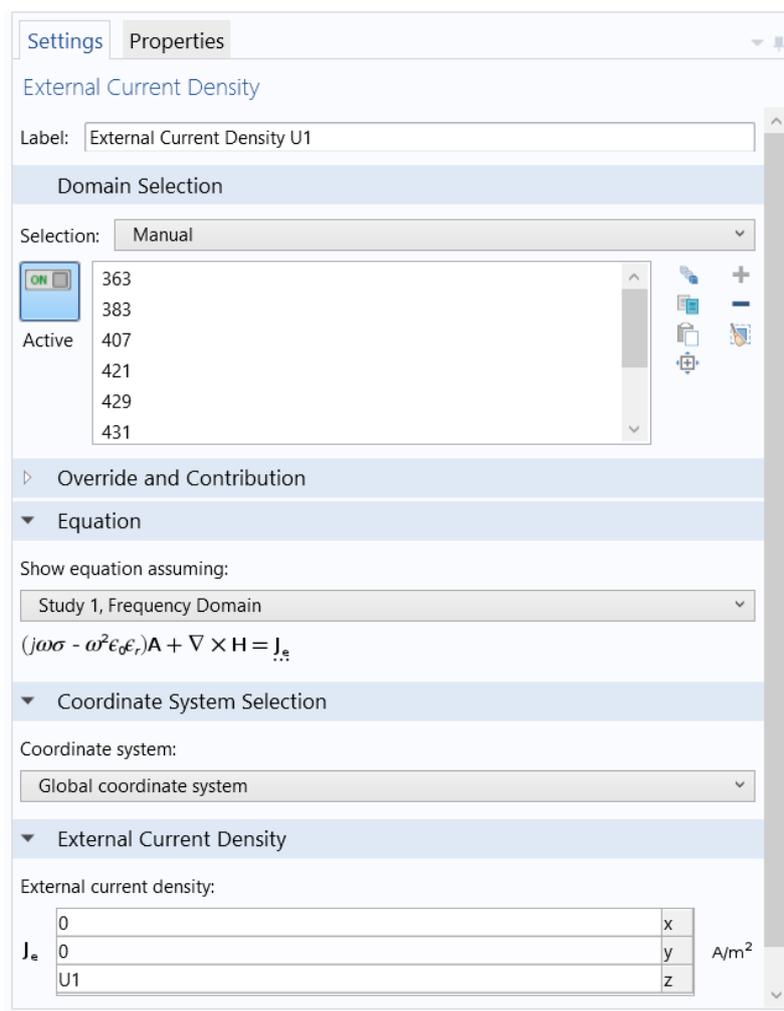


Fig. 81. Menú fuente externa de corriente

En este menú debemos seleccionar, por un lado, los grupos de bobinas por los que va a circular la densidad de corriente correspondiente. COMSOL ofrece la posibilidad de seleccionar dichos grupos directamente cliqueando sobre ellos en la geometría, e irán apareciendo en la lista de “domain selection” conforme los vayamos seleccionando. Además, debemos indicarle la densidad de corriente que va a circular por estos grupos de bobinas conforme a lo presentado en la Tabla 2 o en la Tabla 3, dependiendo del estudio que estemos realizando.

Al tener representado un corte transversal del motor, la corriente circulará únicamente en el eje Z. El signo de la corriente nos indicará la dirección conforme a lo presentado en las Fig. 20, Fig. 25 y Fig. 30.

Para calcular la densidad de corriente, debemos dividir la corriente que circula entre en área por la que circula. La corriente que circula la conocemos ya que nos la proporciona el modelo. Su valor asciende a 924,56 A, tal y como se mostró en esta memoria.

Para medir el área por la que circula la corriente, COMSOL dispone de una herramienta llamada *measure* (Fig. 82).

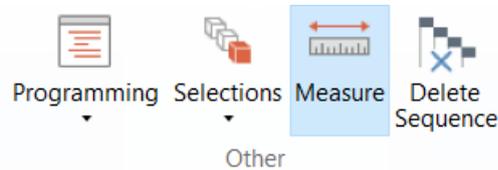


Fig. 82. Herramienta medición

Esta herramienta nos permite medir áreas. Si nos fijamos, dependiendo de si el bobinado se sitúa en la parte exterior o en la parte interior de la ranura, el área es diferente. Sin embargo, esta variación es muy pequeña, y, por tanto, para simplificar se obtendrá un área media de las 2 citadas anteriormente. Esta área asciende a  $82,74 \text{ mm}^2$ .

Por lo tanto, la densidad de corriente, si hacemos la división asciende a un valor de  $11,17 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$ . A esta corriente la llamaremos  $I_p$ . A partir de esta corriente, se definen las corrientes que pasan por cada uno de los grupos de bobinas, indicando el signo y el desfase. Dependiendo del estudio que realicemos, debemos indicar la intensidad en forma compleja (para estudios en el dominio de la frecuencia), o en forma cosenoidal (para el estudio en el dominio del tiempo). Para simplificar, la corriente que circula por cada uno de los grupos se ha nombrado con el propio nombre del grupo de bobinas. Las excitaciones resultantes se muestran en las Tablas 2 y 3. En esta última, la variable  $t$  representa el tiempo.

Tabla 2. Corriente por cada grupo de bobinas en forma compleja

GRUPO DE BOBINAS	CORRIENTE
U1	$I_p$
U2	$-I_p$
U3	$-I_p$
U4	$I_p$
V1	$I_p \cdot e^{i\frac{2\pi}{3}}$
V2	$-I_p \cdot e^{i\frac{2\pi}{3}}$

V3	$-I_p \cdot e^{i\frac{2\pi}{3}}$
V4	$I_p \cdot e^{i\frac{2\pi}{3}}$
W1	$I_p \cdot e^{-i\frac{2\pi}{3}}$
W2	$-I_p \cdot e^{-i\frac{2\pi}{3}}$
W3	$-I_p \cdot e^{-i\frac{2\pi}{3}}$
W4	$I_p \cdot e^{-i\frac{2\pi}{3}}$

Tabla 3. Corriente por cada grupo de bobinas en forma cosenoidal

GRUPO DE BOBINAS	CORRIENTE
U1	$I_p \cdot \cos(2\pi ft)$
U2	$-I_p \cdot \cos(2\pi ft)$
U3	$-I_p \cdot \cos(2\pi ft)$
U4	$I_p \cdot \cos(2\pi ft)$
V1	$I_p \cdot \cos(2\pi ft + \frac{2\pi}{3})$
V2	$-I_p \cdot \cos(2\pi ft + \frac{2\pi}{3})$
V3	$-I_p \cdot \cos(2\pi ft + \frac{2\pi}{3})$
V4	$I_p \cdot \cos(2\pi ft + \frac{2\pi}{3})$
W1	$I_p \cdot \cos(2\pi ft - \frac{2\pi}{3})$
W2	$-I_p \cdot \cos(2\pi ft - \frac{2\pi}{3})$
W3	$-I_p \cdot \cos(2\pi ft - \frac{2\pi}{3})$
W4	$I_p \cdot \cos(2\pi ft - \frac{2\pi}{3})$

En este momento debemos seleccionar para cada una de las 12 fuentes de intensidad externa, la geometría a la cual se va a aplicar esta excitación, así como el valor de la corriente indicada en la Tabla 2 o en la Tabla 3, según el tipo de estudio que realicemos.

## 6.6 Mallado

Una vez que tenemos que definidas todas las condiciones del estator, debemos proceder al mallado o discretización de la geometría. COMSOL ofrece 2 posibilidades: mallado controlado por el usuario, o mallado controlado por la geometría.

El primero de ellos, el usuario define el tamaño y forma de las celdas, mientras que el segundo se define automáticamente, dependiendo de la geometría, afinando en aquellas zonas que geoméricamente son más complejas. Además, también te permite seleccionar el tamaño de celda.

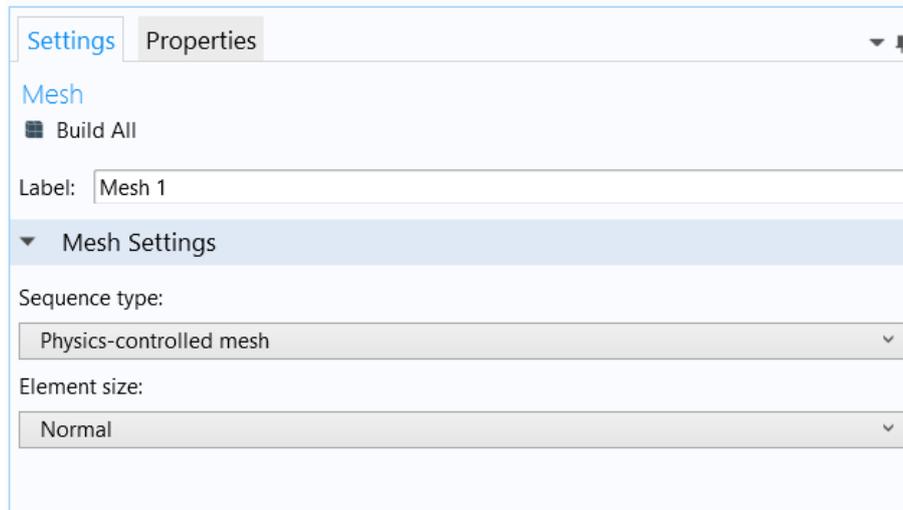


Fig. 83. Tipo mallado

En este caso, se ha seleccionado la segunda opción, con un tamaño de elemento normal. Se presenta en el anexo 1, un estudio de mallado, en el cual se determina qué influencia puede tener el tipo de mallado seleccionado en los resultados.

Es importante, a la hora del mallado ser coherente con los resultados y el coste computacional, es decir, se puede afinar muchísimo, pero a costa de un coste computacional que crece exponencialmente. Se debe buscar el equilibrio, dado que muchas veces afinar mucho y hacer un mallado muy denso no siempre garantiza unos resultados mejores y, sin embargo, el coste computacional se dispara.

En la Fig. 84 se muestra el mallado del modelo creado por COMSOL.

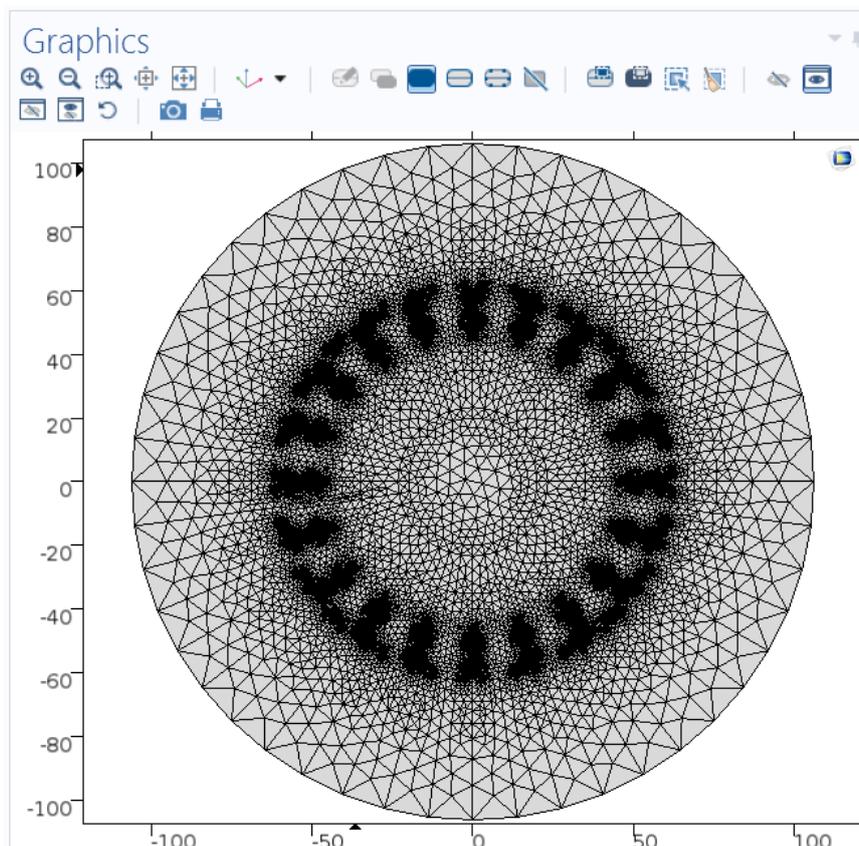


Fig. 84. Mallado del modelo

Como se puede observar, el mallado se afina en aquellos lugares en los que la geometría es más compleja. Sin embargo, en las zonas donde la geometría es uniforme, las celdas tienen un tamaño considerablemente más grande.

## 6.7 Simulación

El último paso es seleccionar el tipo de estudio que deseamos hacer. Tal y como se puede observar en la Fig. 85, COMSOL ofrece numerosas opciones.

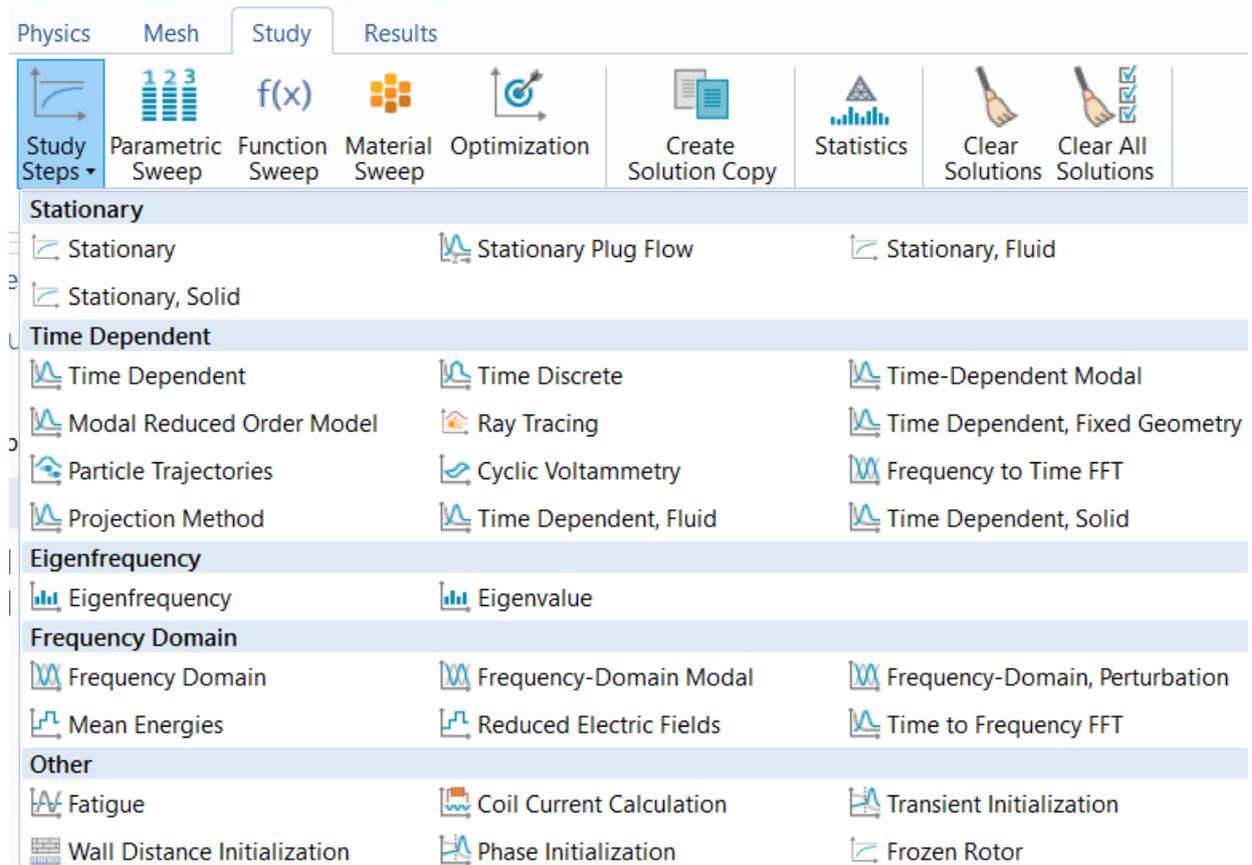


Fig. 85. Tipos de estudio

En esta memoria se presentan 2 tipos de estudio: un estudio en el dominio de la frecuencia (estacionario, Fig. 86) y otro en el dominio del tiempo (transitorio, Fig. 87).

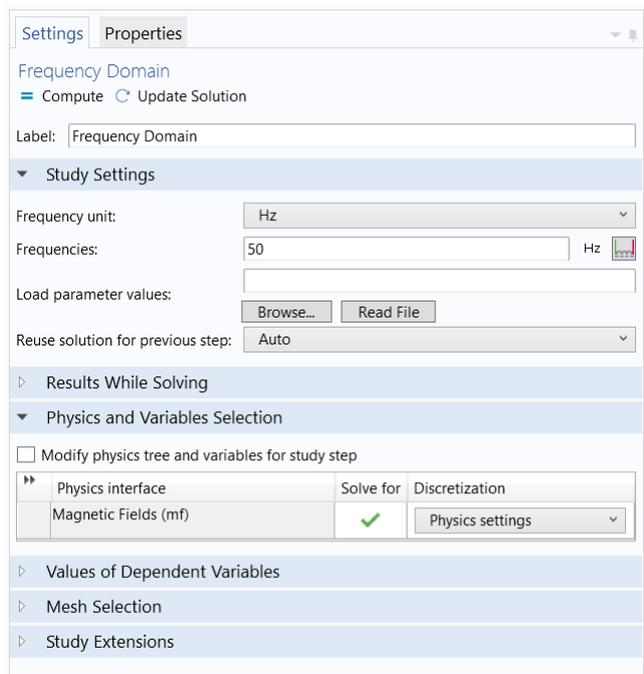


Fig. 86. Estudio en el dominio de la frecuencia

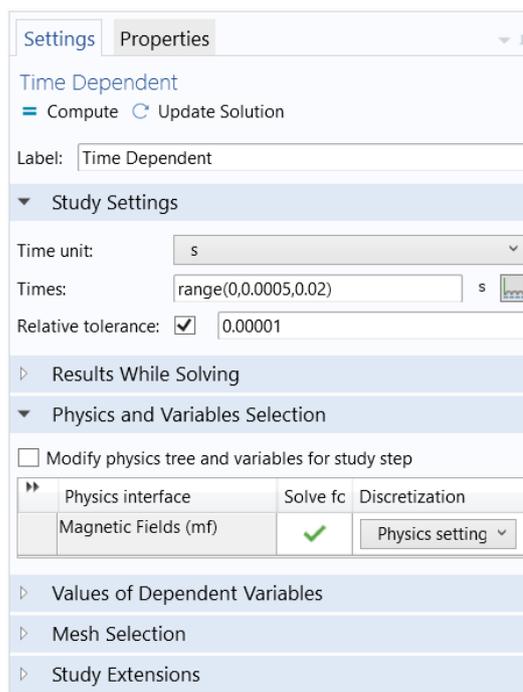


Fig. 87. Estudio en el dominio del tiempo

En el estudio estacionario o armónico, se debe indicar la intensidad en forma compleja, mientras que, para el estudio en transitorio, la intensidad se debe indicar en forma cosenoidal, dependiente del tiempo de la simulación, tal y como se ha explicado anteriormente.

Además, en el estudio en estacionario, debemos indicar la frecuencia de la red eléctrica (en España este valor es de 50 Hz), mientras que en el estudio en transitorio debemos indicar rango de tiempo que dura el estudio, así como los datos intermedios que deben ser obtenidos en este periodo de tiempo. El valor de la frecuencia está incluido en la definición de cada una de las densidades de corriente de la excitación.

Tal y como se puede ver en la Fig. 87, el rango de tiempo es entre 0 y 0,02 segundos. Este rango nos sirve para simular un ciclo, ya que, para una frecuencia de red de 50 Hz, cada ciclo dura exactamente 20 ms. Además, hemos tomado valores cada 0,0005 segundos.

En ambos casos, se ha utilizado el *solver* que COMSOL ofrece por defecto y no se ha cambiado ningún de sus ajustes. Los resultados obtenidos han sido satisfactorios y no ha sido necesario realizar ningún cambio.



## 7. RESULTADOS Y CONCLUSIONES OBTENIDOS

En este capítulo se mostrarán los resultados obtenidos. Como se ha comentado anteriormente, se han llevado a cabo diferentes simulaciones. El objetivo es ir añadiendo complejidad a la simulación, partiendo del caso más sencillo. De esta forma se puede ir comprobando si la simulación planteada es correcta. Los casos simulados son los siguientes:

- Caso 1: Para ver únicamente el campo magnético creado por el estator, se va a considerar el rotor como aire, para que no se induzcan corrientes y para que la reluctancia sea la correspondiente al aire.
- Caso 2: En este caso, consideraremos el núcleo del rotor como hierro dulce. Esto hará que la reluctancia del rotor disminuya, por lo que es de esperar que el flujo magnético aumente.
- Caso 3: Finalmente, consideraremos las bobinas del rotor de aluminio. Esto producirá que en estas bobinas se induzcan ciertas corrientes, que a su vez crearán su propio flujo magnético, lo que afectará al campo magnético creado por el estator.

### 7.1 Caso 1

En este caso, consideramos que las bobinas del rotor son de aire, es decir, que no se inducen corrientes. Además, el núcleo es de aire, por lo que la reluctancia del rotor será alta. Básicamente, lo que se busca es eliminar todo efecto con el que el rotor pueda influir en el campo magnético creado por el estator, de esta forma podemos conocer con exactitud el campo creado por el estator y comprobar que el modelado de las bobinas del estator es el correcto.

En primer lugar, se van a simular cada una de las 3 fases por separado. Deberá observarse el campo unidireccional creado por cada una de ellas. El campo deberá tener la dirección del eje del conjunto de bobinas que forman la fase. En la Fig. 88 se muestra la corriente que circula por las bobinas correspondientes a la fase U del estator.

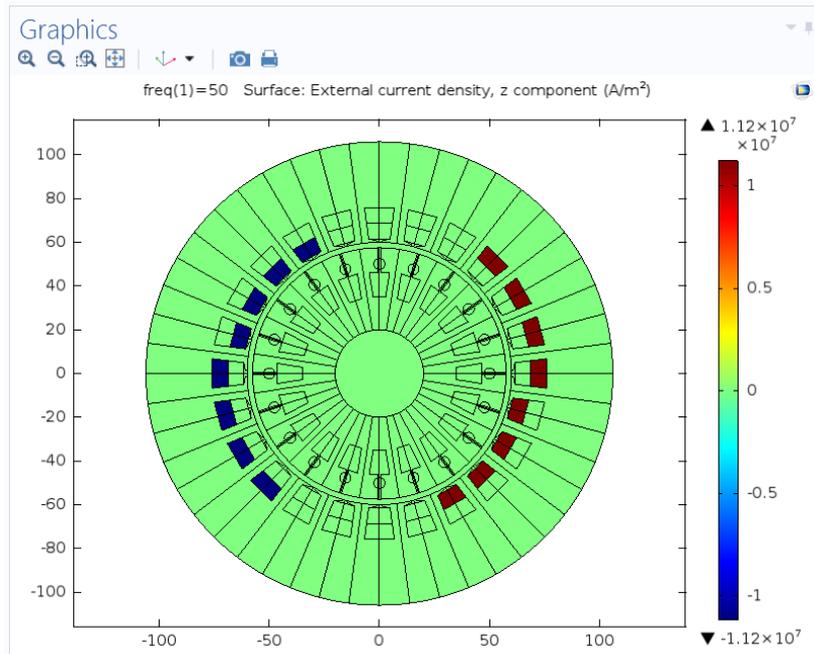


Fig. 88. Corriente que circula por las bobinas del estator, fase U

Lógicamente, ahora no se induce ninguna corriente en las bobinas del rotor, dado que éstas se han considerado aire y el aire no conduce electricidad.

En la Fig. 89 se puede observar el campo magnético creado en este caso, tanto su valor (escala de colores), como su dirección (flechas). Es importante tener en cuenta de ahora en adelante, que las flechas están normalizadas, es decir, no son proporcionales a la magnitud que representan, únicamente indican la dirección de ésta.

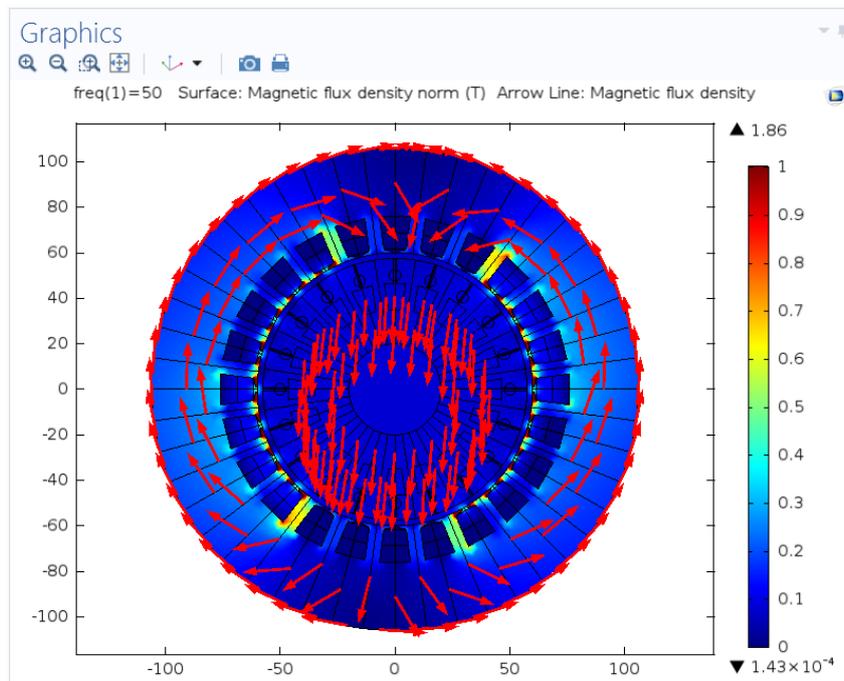


Fig. 89. Valor y dirección del campo magnético, fase U.

Si nos fijamos en la fase V, obtenemos unos resultados similares, como se pueden ver en las Fig. 90 y Fig. 91. Ahora el campo magnético se dirige a lo largo

del eje que definen las bobinas de esta fase. Se puede observar que está desplazado  $120^\circ$  geométricos respecto al eje de la fase U.

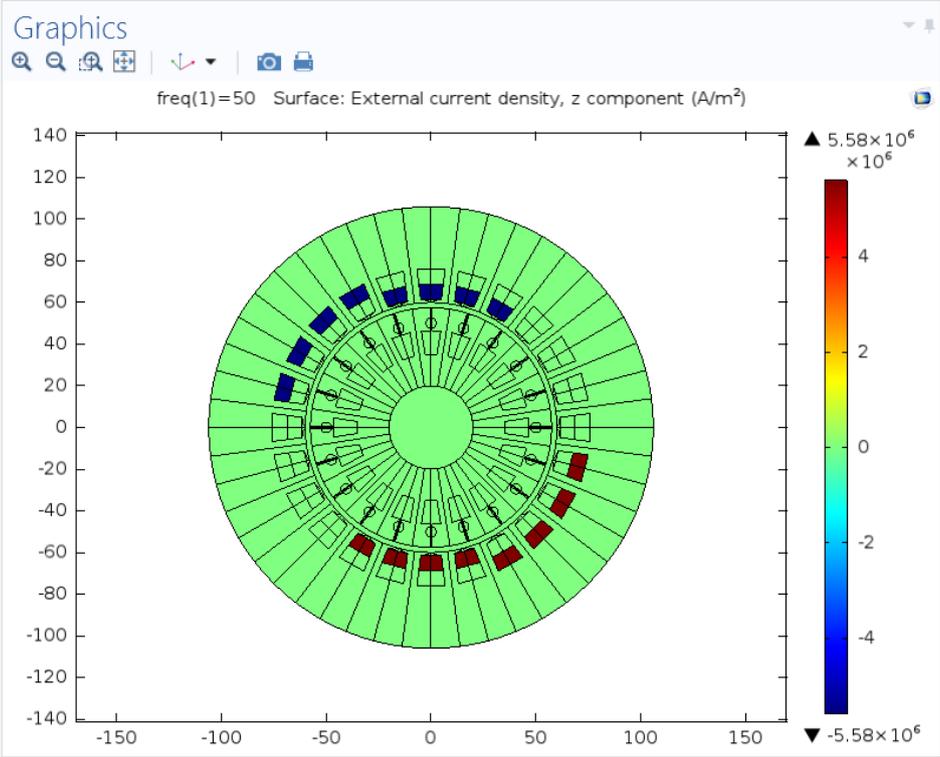


Fig. 90. Corriente que circula por las bobinas del estator, fase V

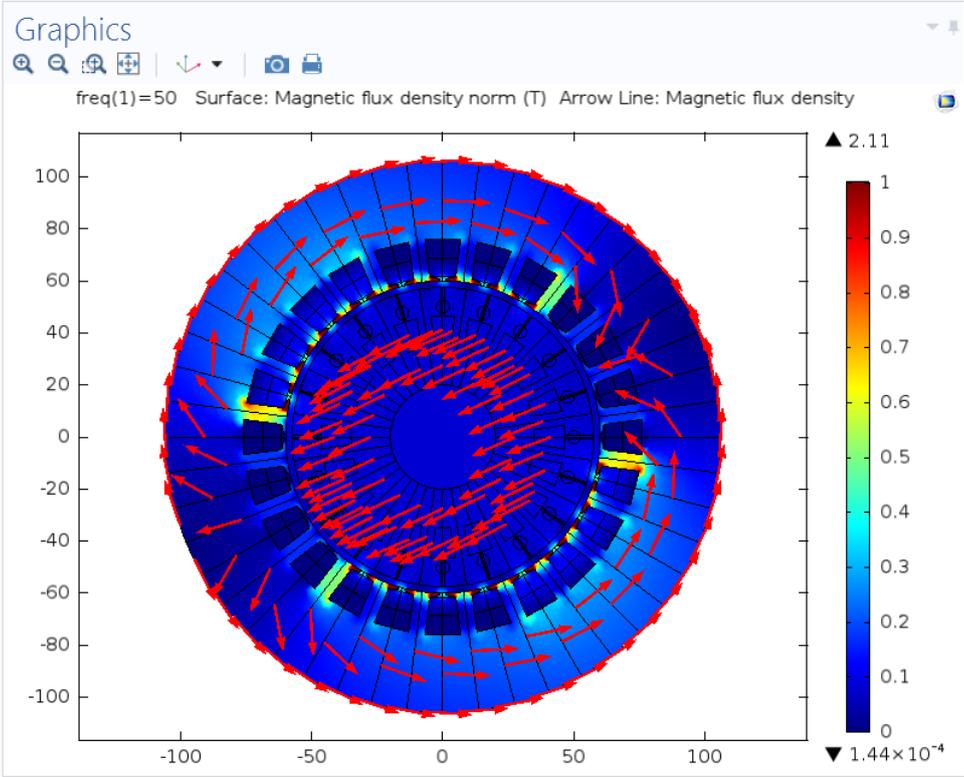


Fig. 91. Valor y dirección del campo magnético, fase V

Del mismo modo, hacemos el estudio para la fase W, y obtenemos las Fig. 92 y Fig. 93. En este caso, el eje del campo magnético está desplazado  $120^\circ$  geométricos respecto al eje de la fase U, pero el giro es de distinto signo al de la fase V.

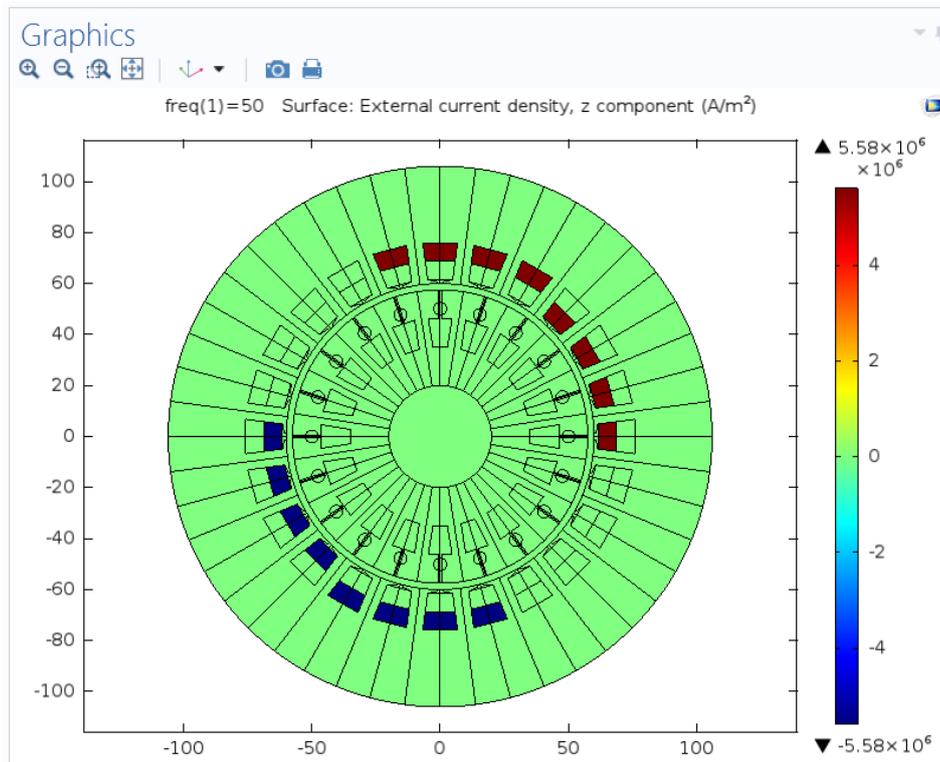


Fig. 92. Corriente que circula por las bobinas del estator, fase W

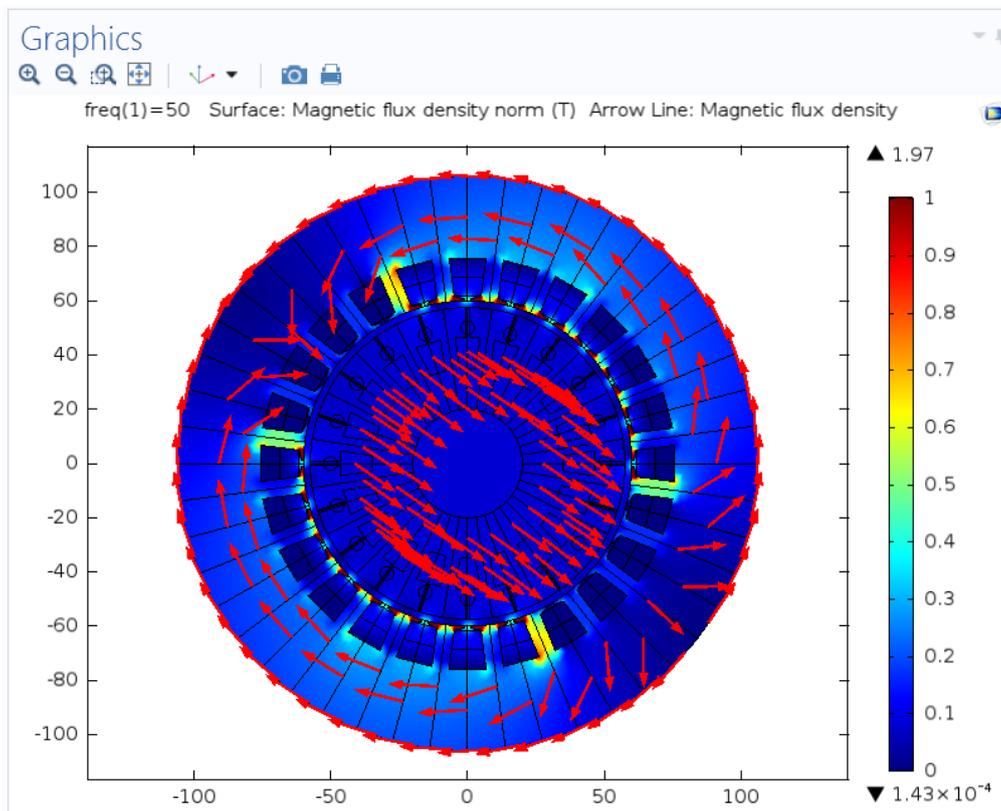


Fig. 93. Valor y dirección del campo magnético, fase W

Si realizamos la simulación de las 3 fases simultáneamente, obtenemos los siguientes resultados:

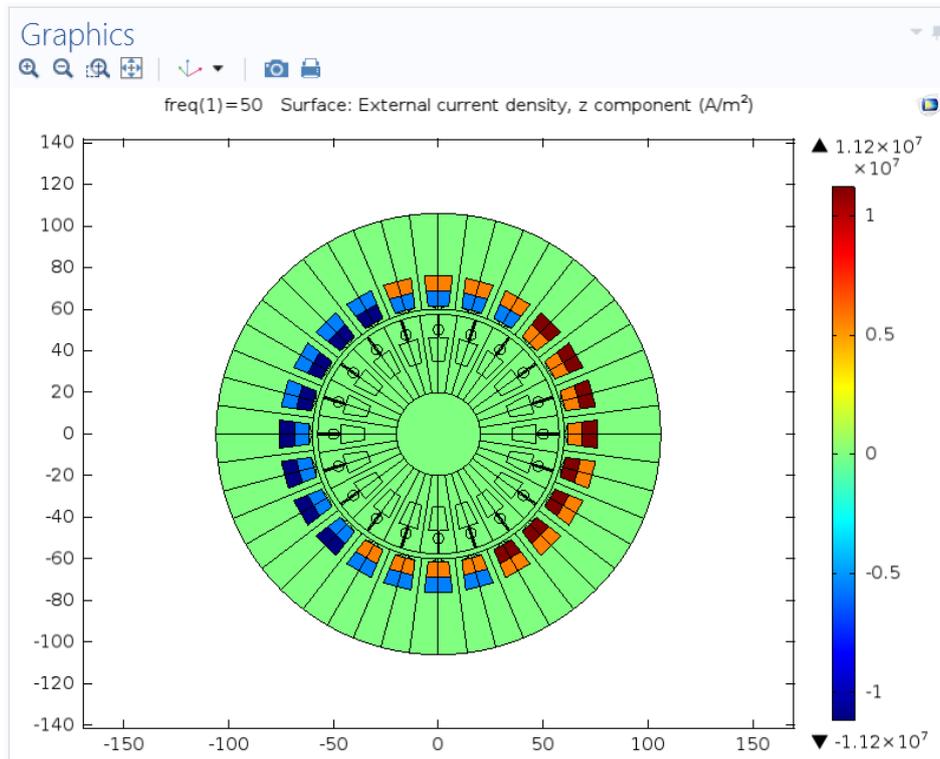


Fig. 94. Corriente que circula por las bobinas del estator, 3 fases

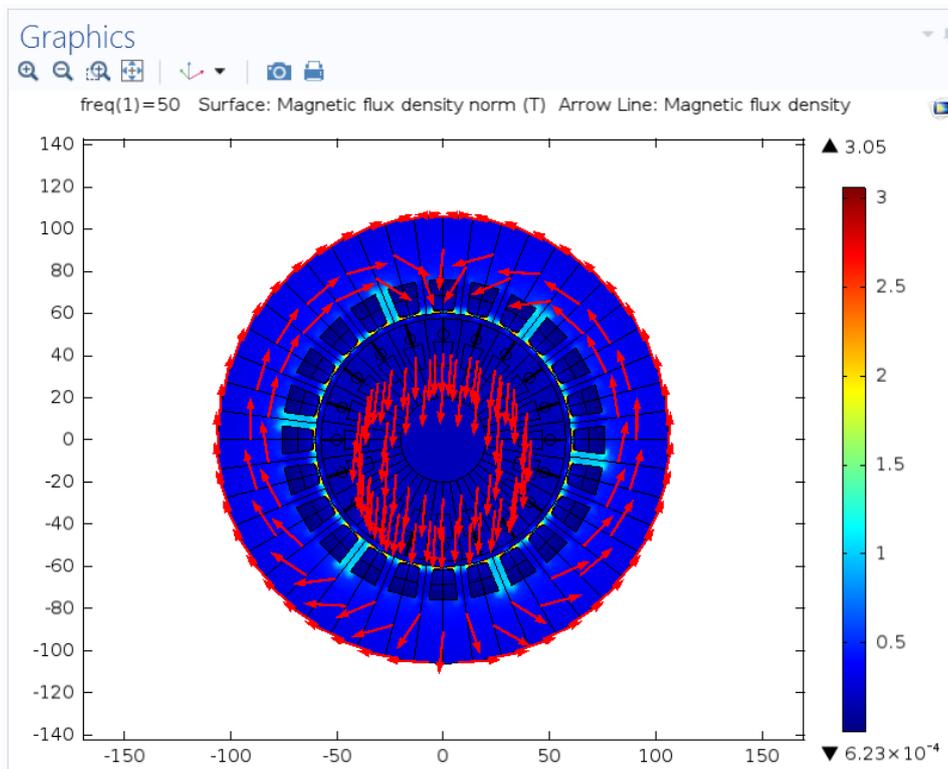
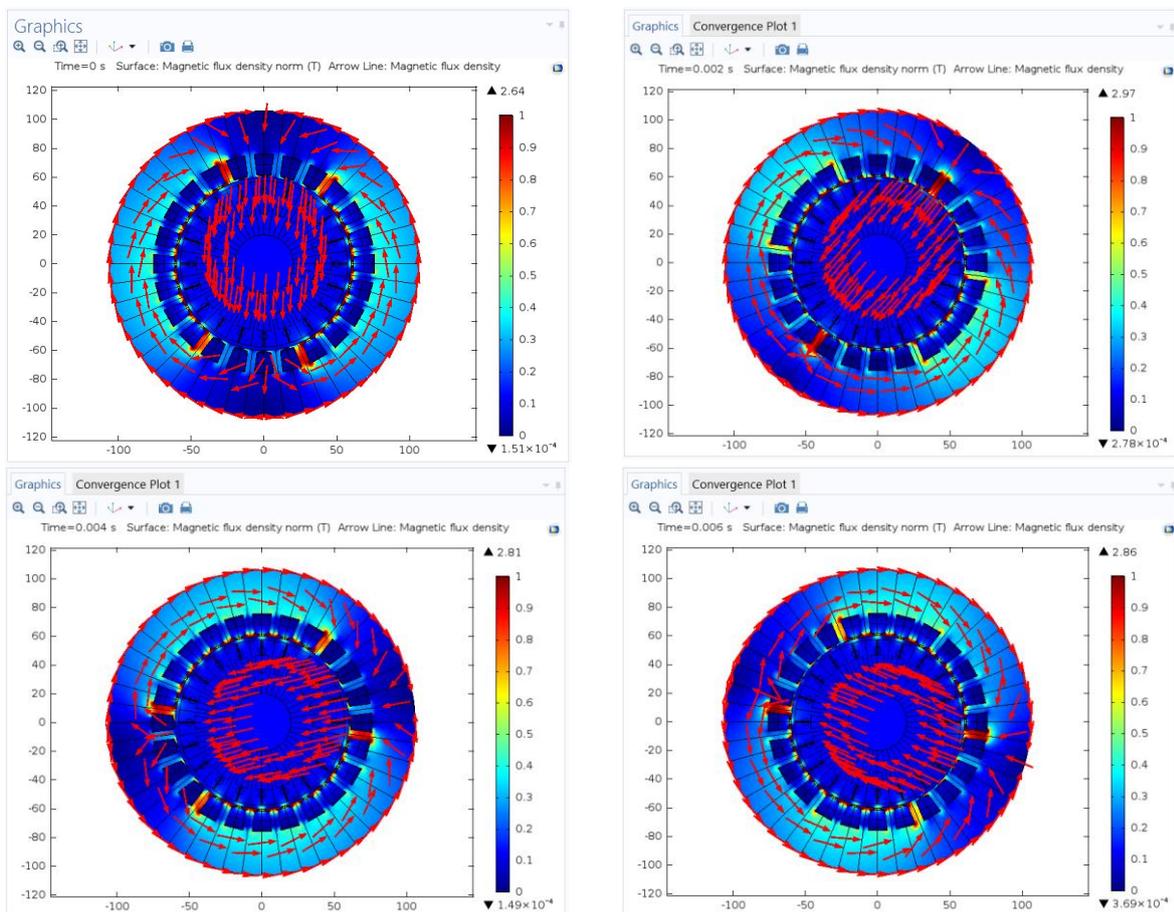


Fig. 95. Valor y dirección del campo magnético, 3 fases

En este caso, lo que ha hecho el programa es coger el valor para un instante de tiempo. En dicho instante, el valor de la corriente de la fase U es predominante, por ello, la dirección del campo magnético se parece mucho a la mostrada en la Fig. 89. Sin embargo, a medida que avanzamos en sucesivos instantes de tiempo la dirección del campo resultante deberá parecerse más al mostrado en la Fig. 93. Si avanzamos en el tiempo, la dirección deberá parecerse a la mostrada en la Fig. 92. El sentido del campo magnético dependerá del valor de la corriente, si es positiva o negativa.

Para realizar este estudio con exactitud se recurre al estudio en el dominio del tiempo, es decir, un estudio transitorio tal y como se ha comentado anteriormente. Dado que resulta imposible presentar una animación en una memoria, se han realizado diferentes capturas en diferentes instantes para mostrar cómo varía la dirección y el valor del campo magnético durante un ciclo de la corriente de alimentación.

Este estudio se puede observar en la Fig. 96, mostrándose capturas del flujo magnético cada 2 ms:



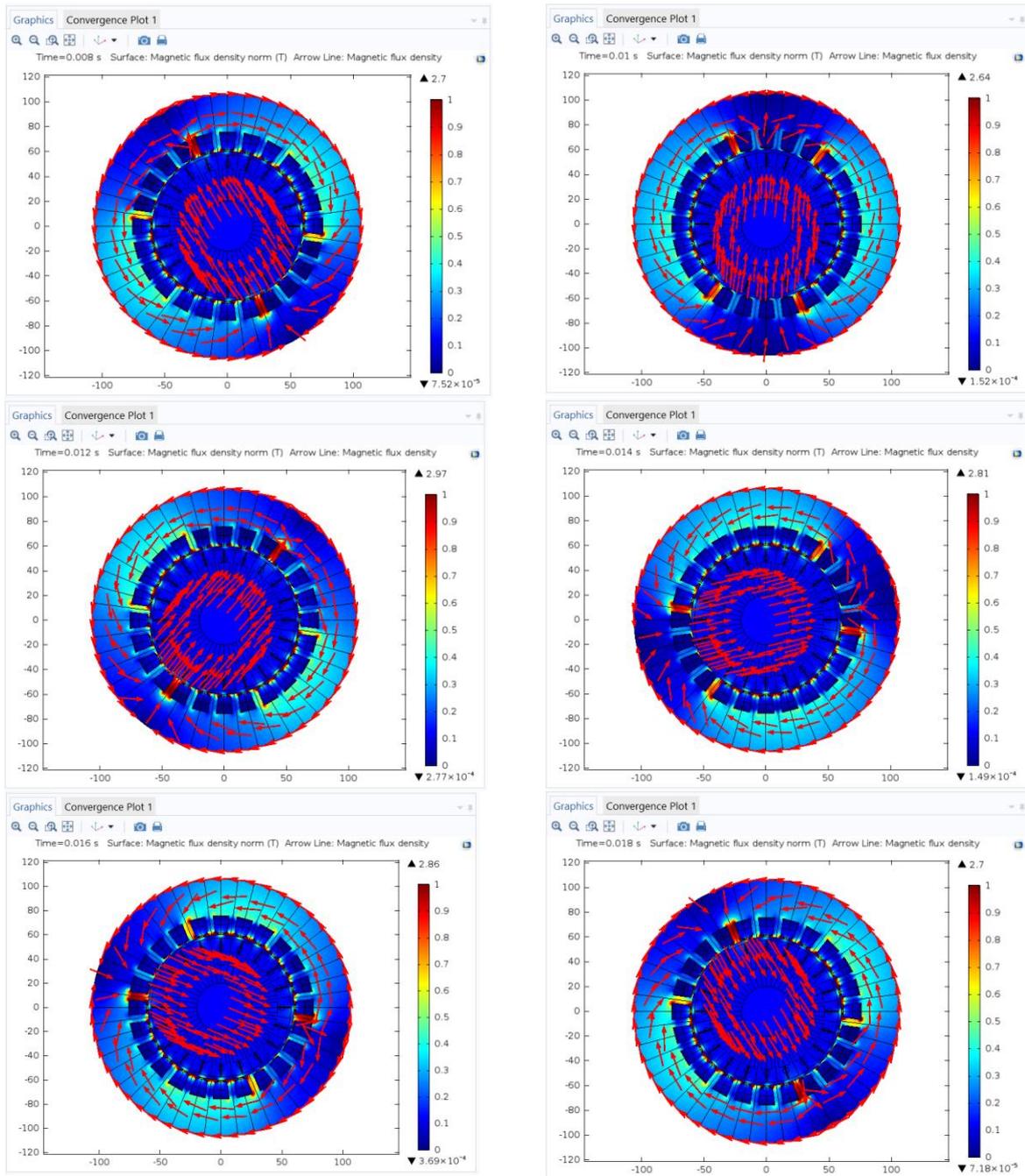


Fig. 96. Valor y dirección del campo magnético (inducción magnética) en diferentes instantes

Se puede ver claramente en la Fig. 96, como el campo magnético a medida que transcurre el tiempo cambia su dirección. El campo magnético resultado de los tres campos pulsantes creados por el sistema de corrientes trifásicas es un campo magnético giratorio. Se ha demostrado entonces, mediante simulación, el principio de funcionamiento del estator de estas máquinas. Se ha representado un ciclo que, para una frecuencia de 50 Hz, dura 20 ms.

## 7.2 Caso 2

En este caso, las ranuras del rotor siguen siendo aire. Sin embargo, el núcleo ahora sí que es hierro dulce. Esto implica que su reluctancia es menor que en el caso anterior, y la inducción magnética debería ser mayor.

De nuevo se van a simular en primer lugar las 3 fases por separado. Lógicamente, ahora la corriente que circula por el bobinado del estator es la misma que en la del caso anterior. Además, al igual que en el caso 1, no hay circulación de corriente por las bobinas del estator. El valor del campo magnético generado y su dirección para las distintas fases se muestra en las Fig. 97, Fig. 98 y Fig. 99.

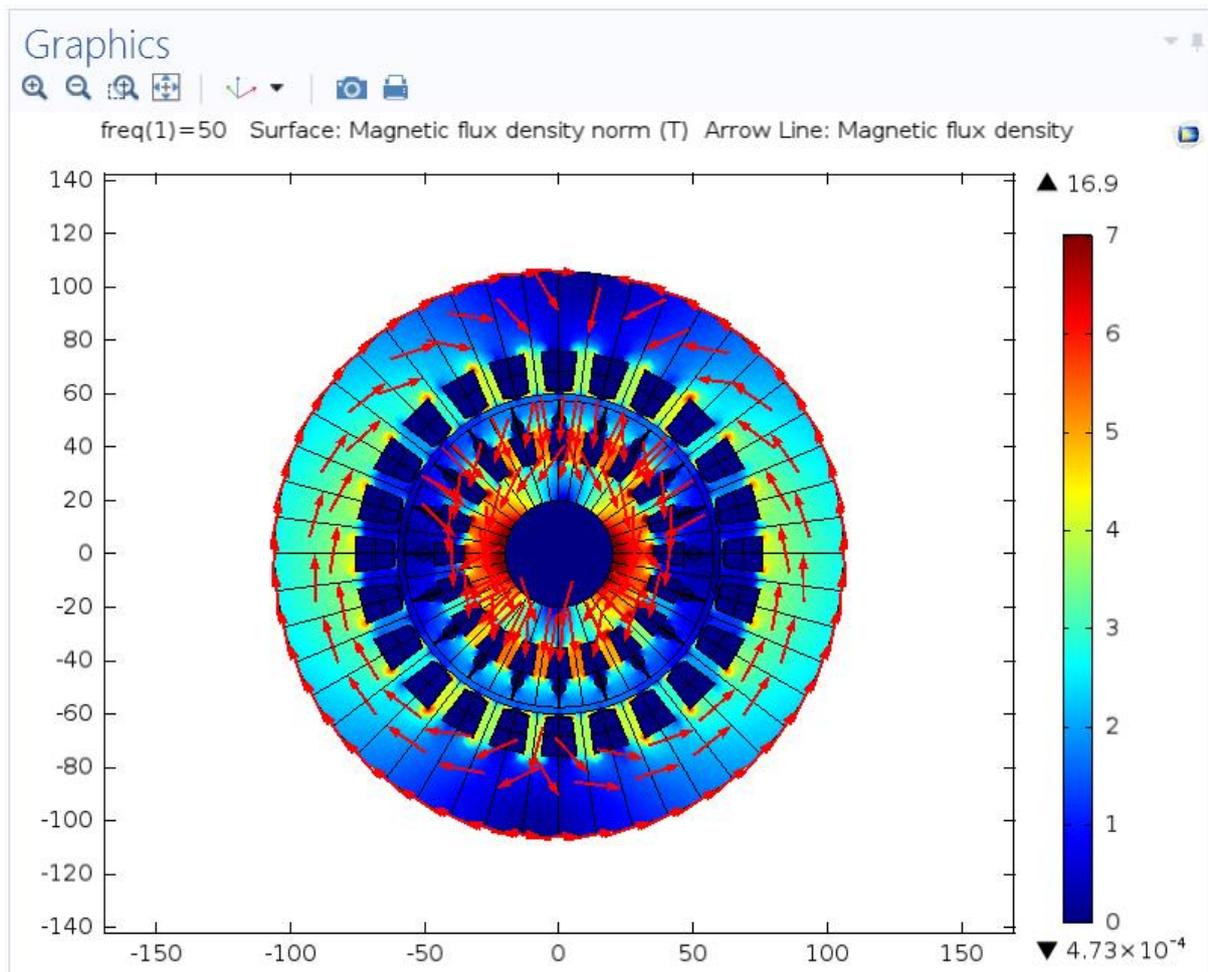


Fig. 97. Valor y dirección del campo magnético, fase U

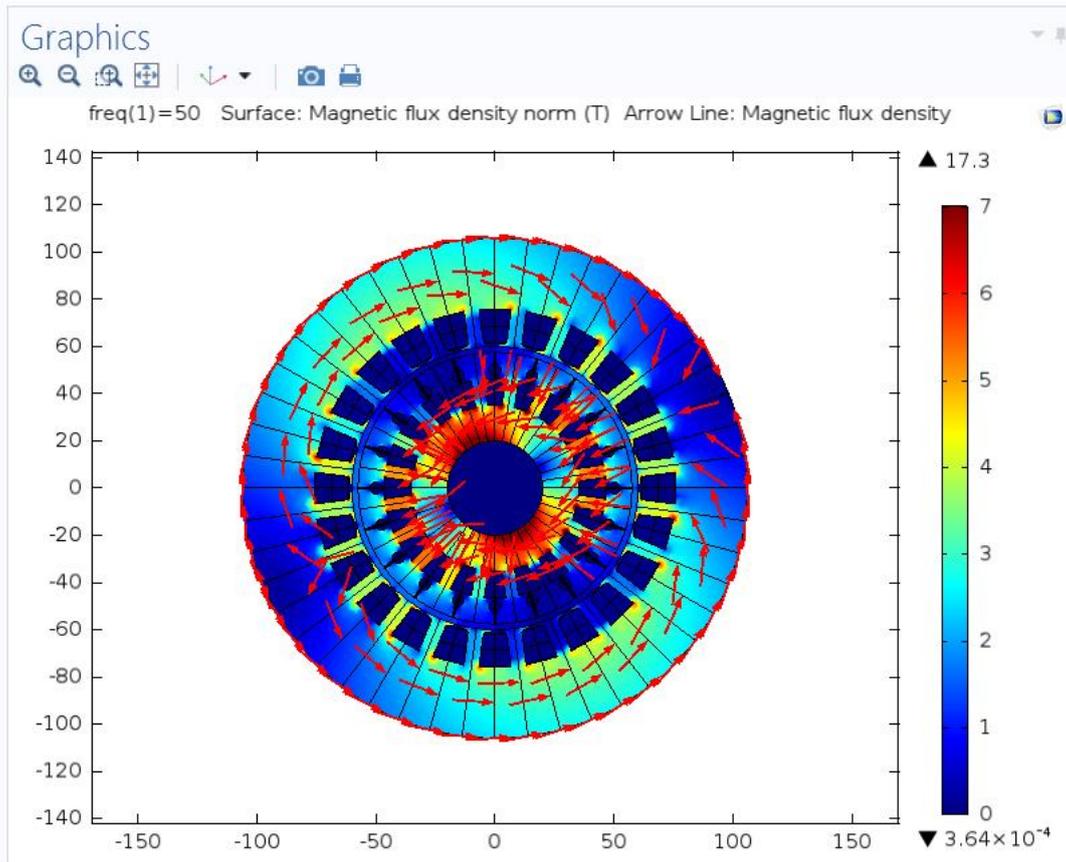


Fig. 98. Valor y dirección del campo magnético, fase V

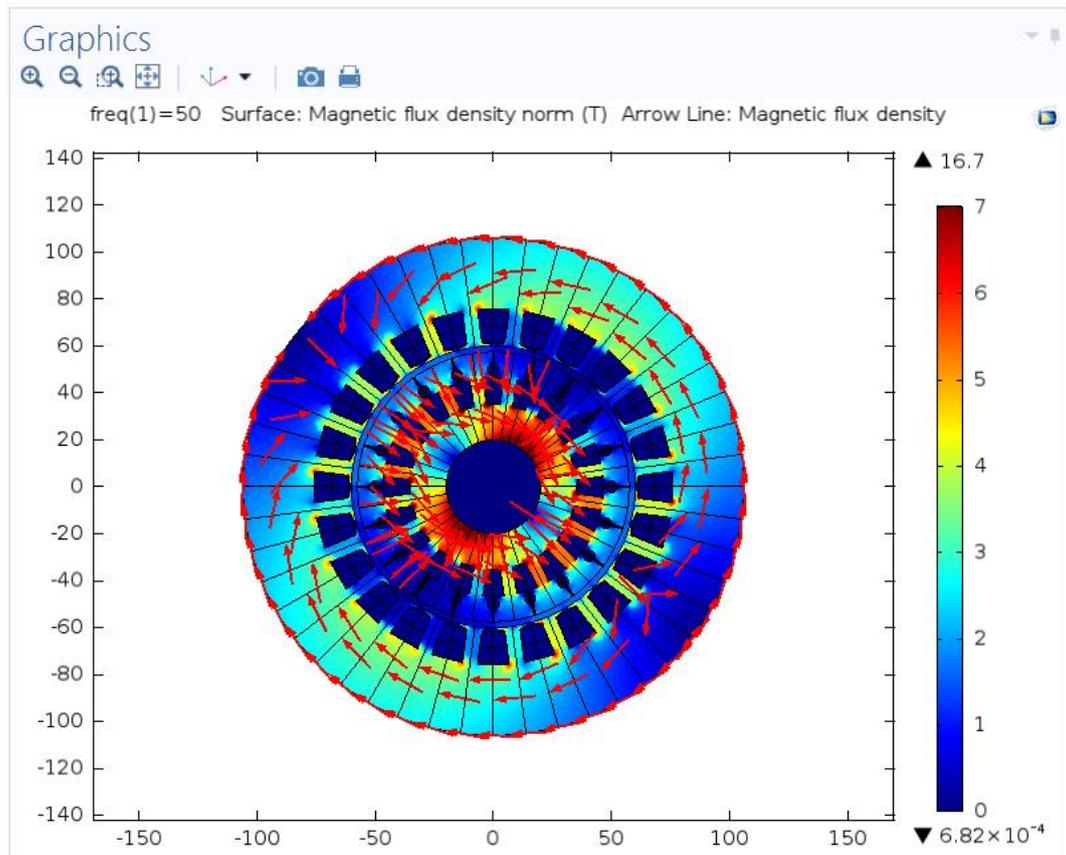


Fig. 99. Valor y dirección del campo magnético, fase W

Vemos que, como era de esperar, el flujo magnético ha aumentado, ya que la reluctancia ha disminuido. Por otro lado, a diferencia del caso 1, vemos una cierta tendencia del flujo magnético a circular por el hierro dulce del rotor, ya que presenta menor resistencia que el aire. De hecho, debido a que no circulan corrientes por el rotor, la inducción magnética es muy elevada y el rotor en condiciones reales estaría saturado.

Si realizamos la simulación de las 3 fases simultáneamente, obtenemos los siguientes resultados:

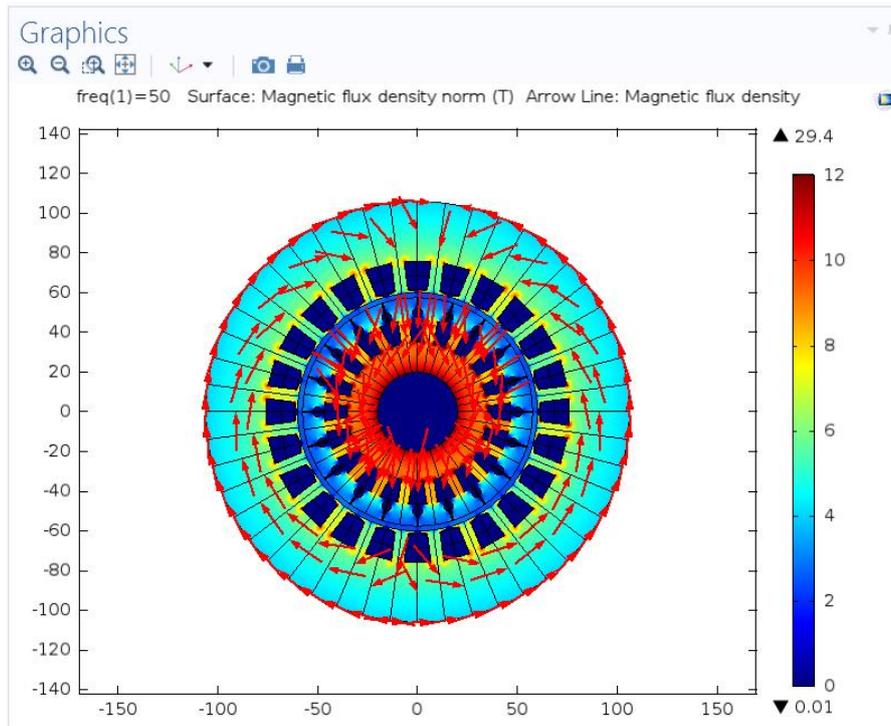
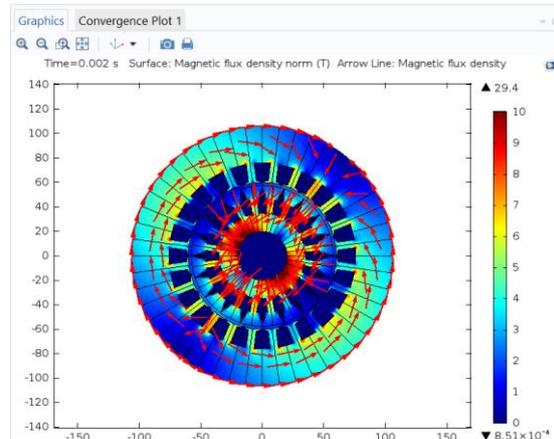
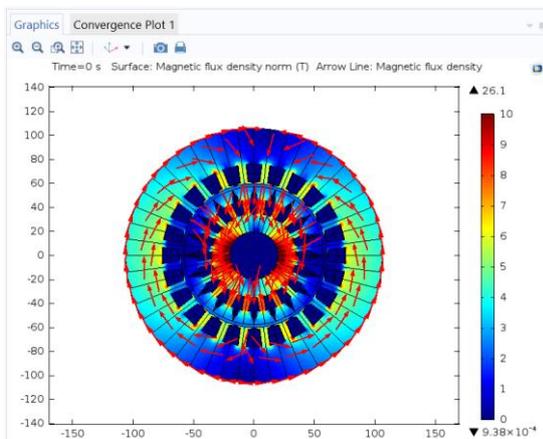


Fig. 100. Valor y dirección del campo magnético, 3 fases

Al igual que en los casos anteriores, lo que ha hecho el programa es coger el valor para un instante de tiempo. En dicho instante, el valor de la corriente de la fase U es predominante, por ello, la dirección del campo magnético se parece mucho a la mostrada en la Fig. 97. Sin embargo, si realizamos el estudio en función del tiempo, obtenemos los siguientes resultados:



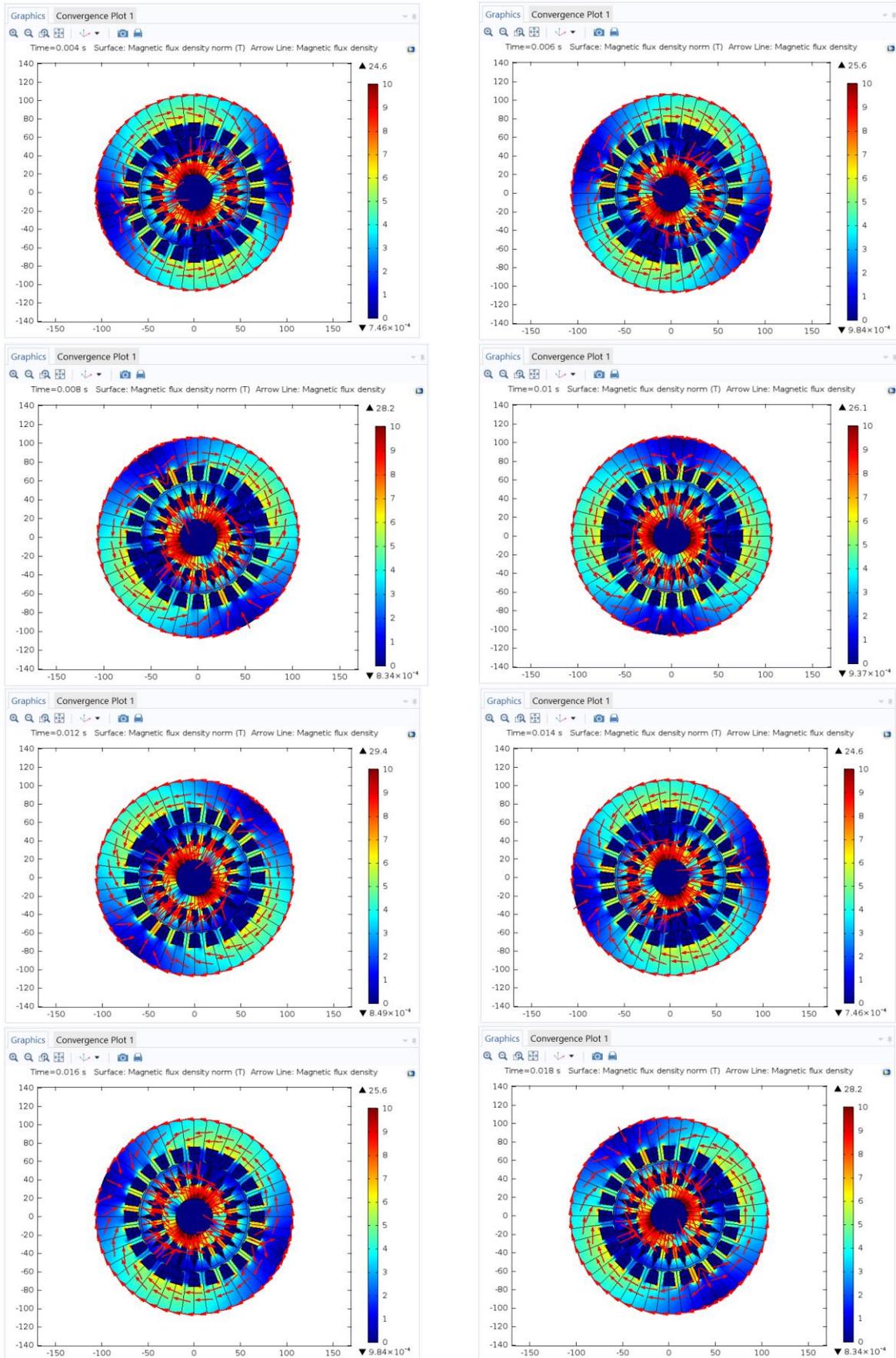


Fig. 101. Valor y dirección del campo magnético en diferentes instantes

### 7.3 Caso 3

Este caso, es el más realista y más parecido a un motor real. Las bobinas del rotor son consideradas aluminio y el núcleo es considerado hierro dulce.

En las bobinas del rotor, al ser de aluminio, se induce una corriente, que también va a contribuir al campo magnético. Es más, esta corriente inducida llega a ser de prácticamente el mismo valor que la corriente que circula por el estator.

Además, si nos atenemos a la ley de Lenz que dice: “*las corrientes inducidas serán de un sentido tal que se opongan a la variación del flujo magnético que las produjo*”, la corriente inducida debe oponerse al campo magnético creado y, por tanto, debe ser de signo opuesto que las corrientes externas, tal y como se puede ver en la Fig. 102.

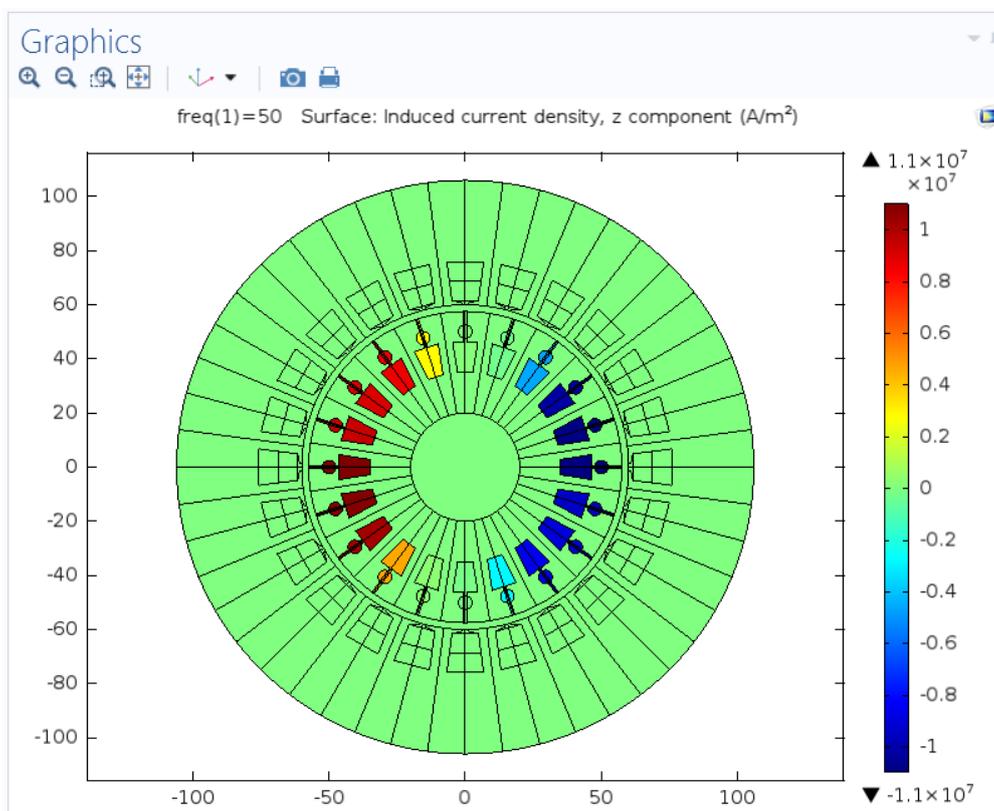


Fig. 102. Corriente inducida en las bobinas del rotor, fase U

En la Fig. 103 se muestra tanto el valor del campo magnético, como su dirección:

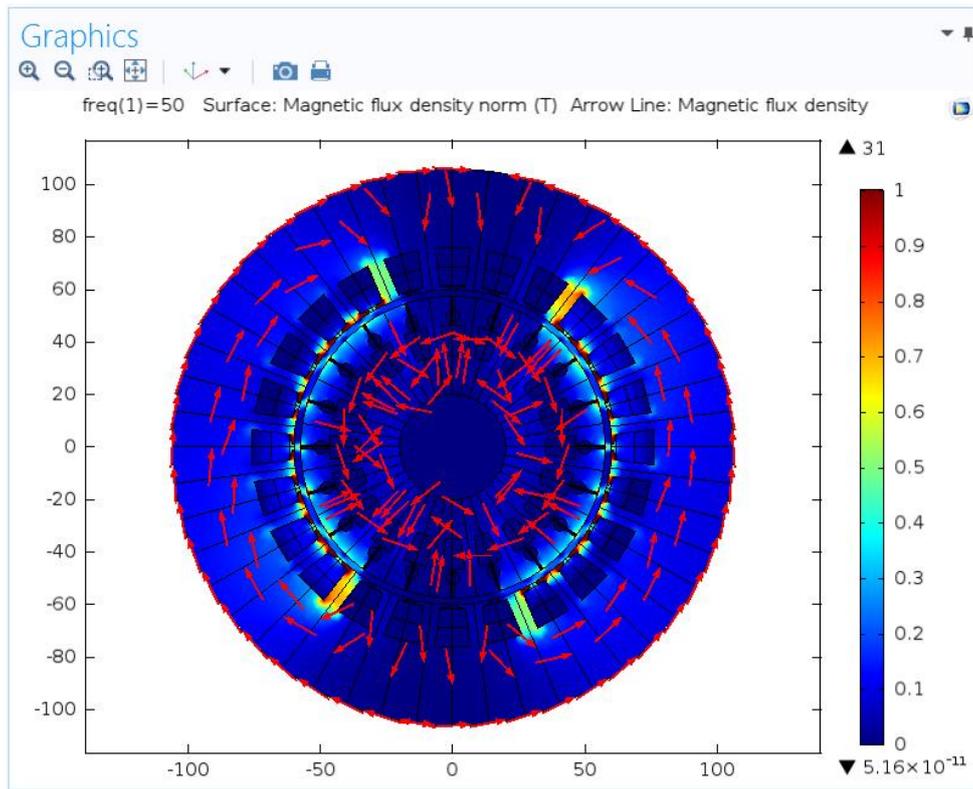


Fig. 103. Valor y dirección del campo magnético, fase U

Si estudiamos la fase V, obtenemos resultados similares, como se muestra a continuación.

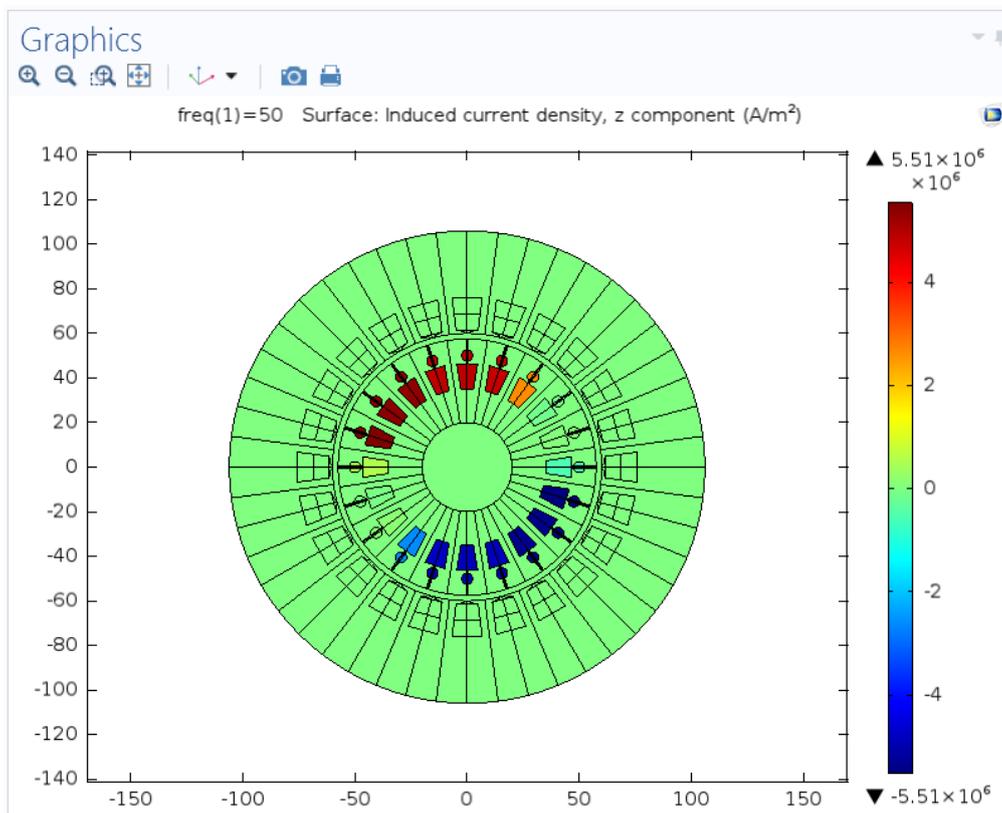


Fig. 104. Corriente inducida en las bobinas del rotor, fase V

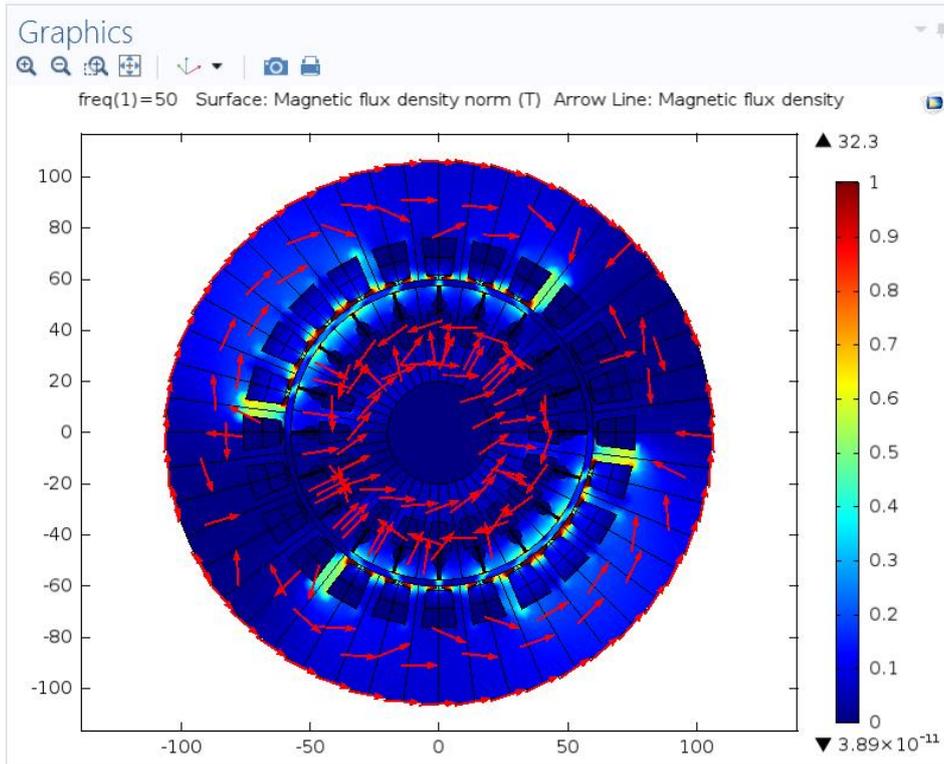


Fig. 105. Valor y dirección del campo magnético, fase V

Si estudiamos la fase W, obtenemos los siguientes resultados.

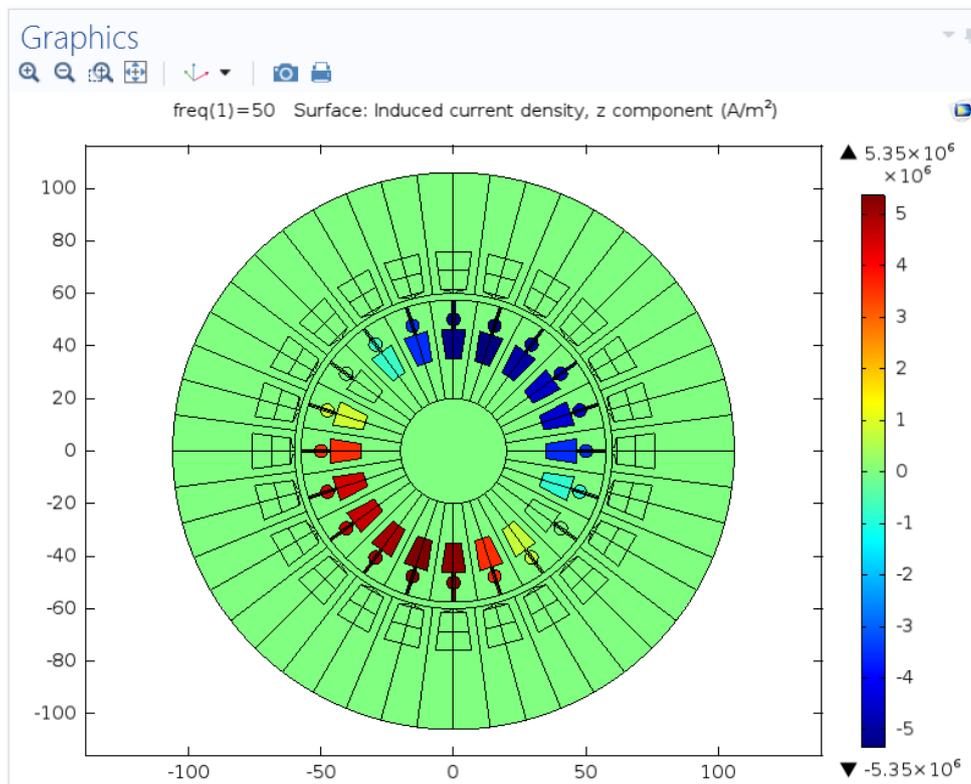


Fig. 106. Corriente inducida en las bobinas del rotor, fase W

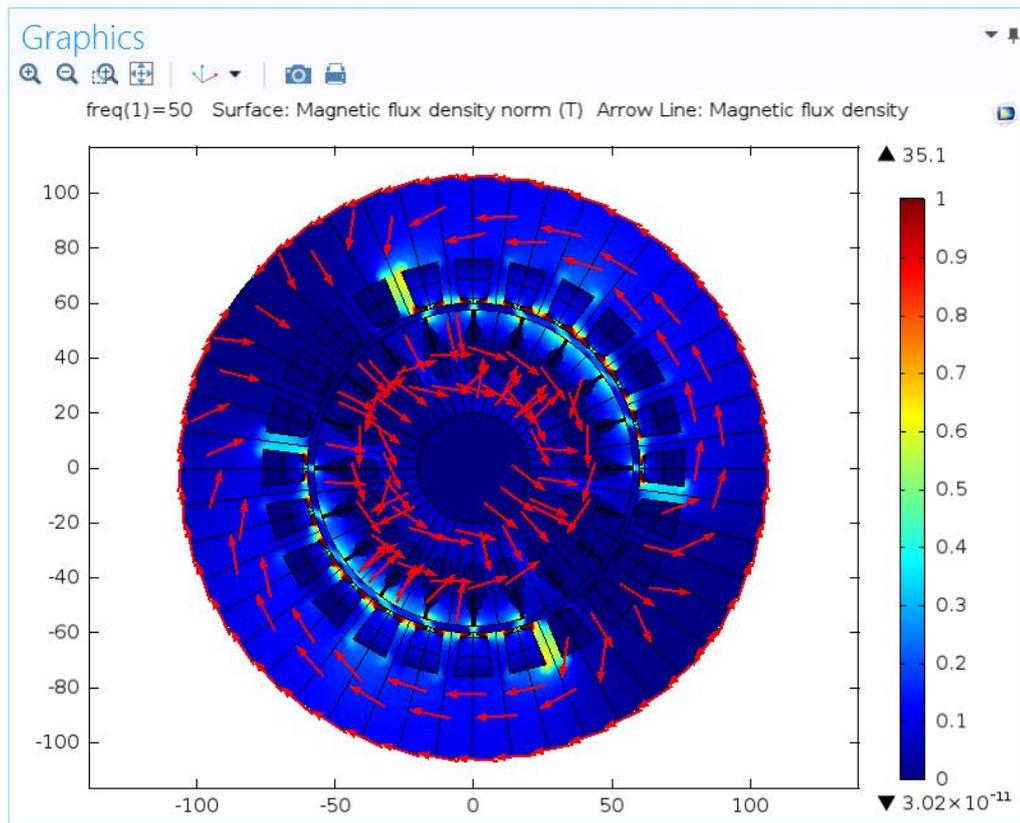


Fig. 107. Valor y dirección del campo magnético, fase W

Si realizamos la simulación de las 3 fases simultáneamente, obtenemos los resultados que se muestran en las Fig. 108 y 109.

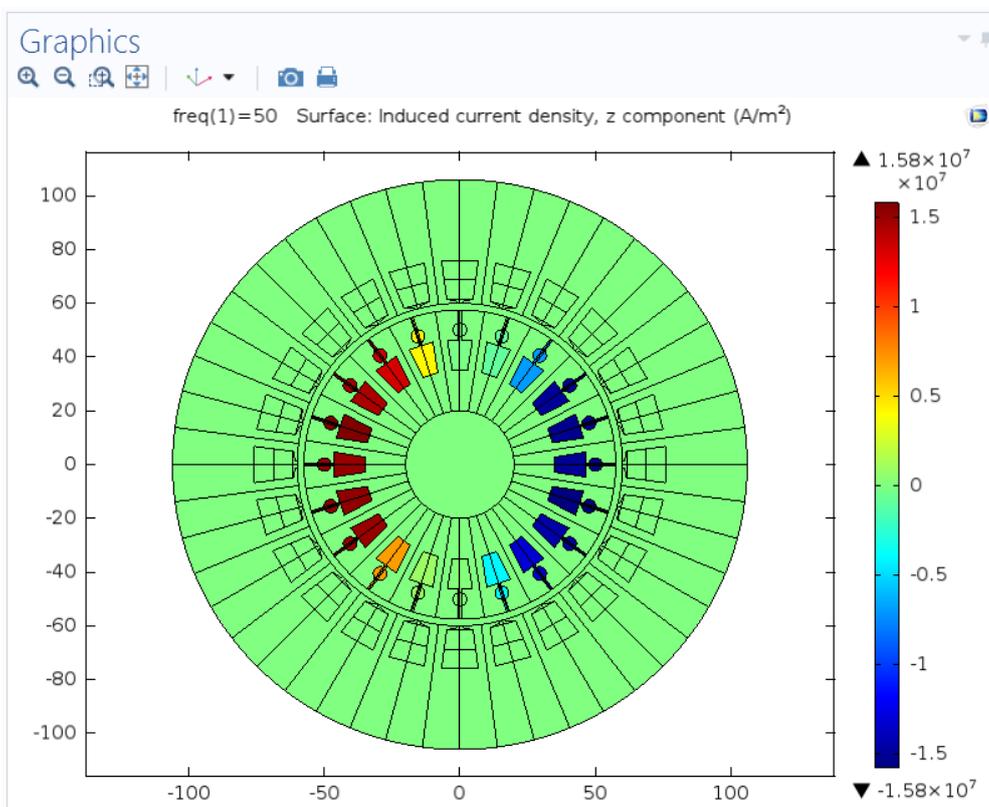


Fig. 108. Corriente inducida en las bobinas del rotor, 3 fases

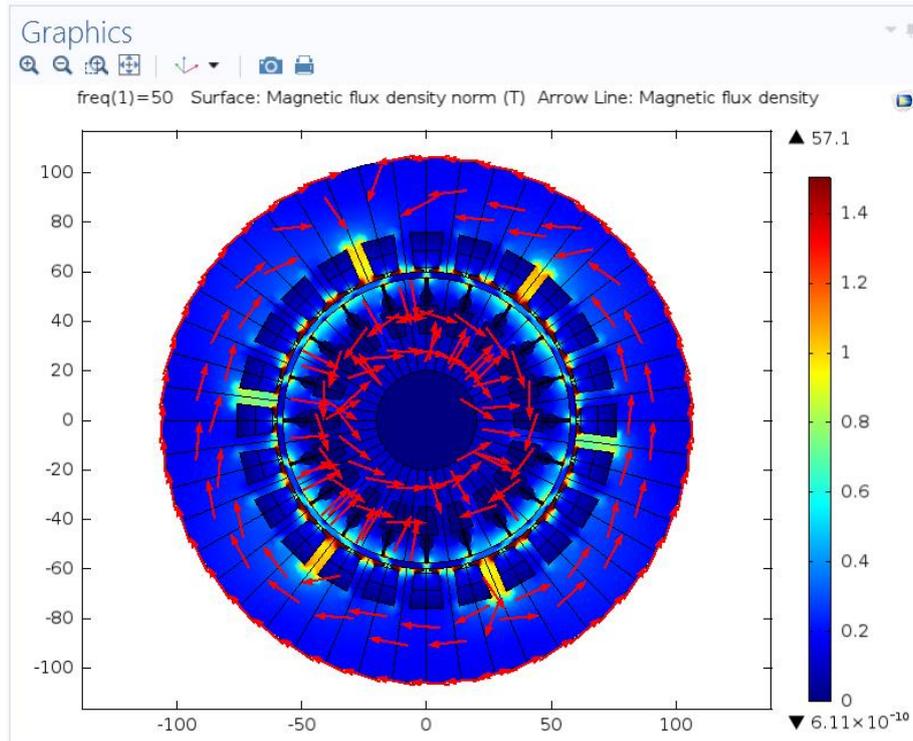
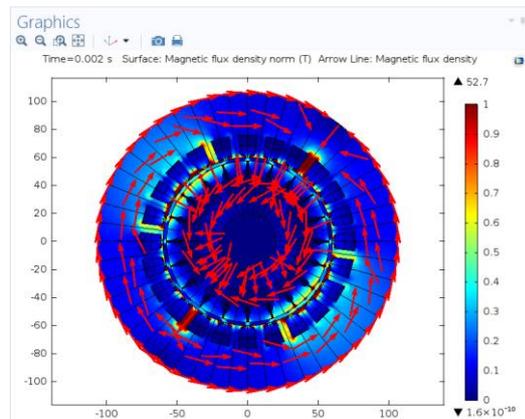
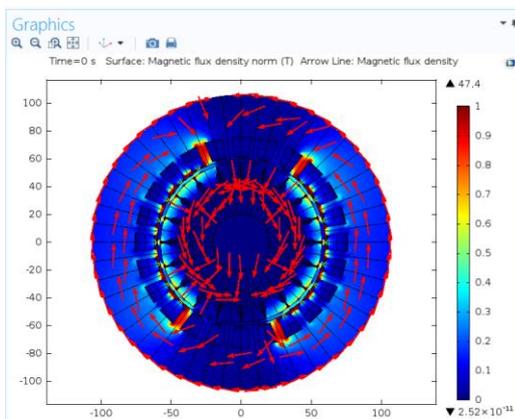


Fig. 109. Valor y dirección del campo magnético, 3 fases

Al igual que en el apartado anterior, en este caso, lo que ha hecho el programa es coger el valor para un instante de tiempo. En dicho instante, el valor de la corriente de la fase U es predominante, por ello, la intensidad inducida es similar a la que induce la fase U y la dirección del campo magnético también es similar a la dirección producida por la fase U. Sin embargo, a medida que avanzamos en sucesivos instantes de tiempo la dirección y sentido del campo resultante deberá ir rotando, pareciéndose al creado por cada una de las fases cuando cada una de ellas sea predominante.

Para realizar este estudio con exactitud se recurre, al igual que anteriormente, al estudio en el dominio del tiempo, es decir, un estudio transitorio. De igual modo que en los casos anteriores, se muestra un ciclo completo, mostrándose capturas cada 2 ms.



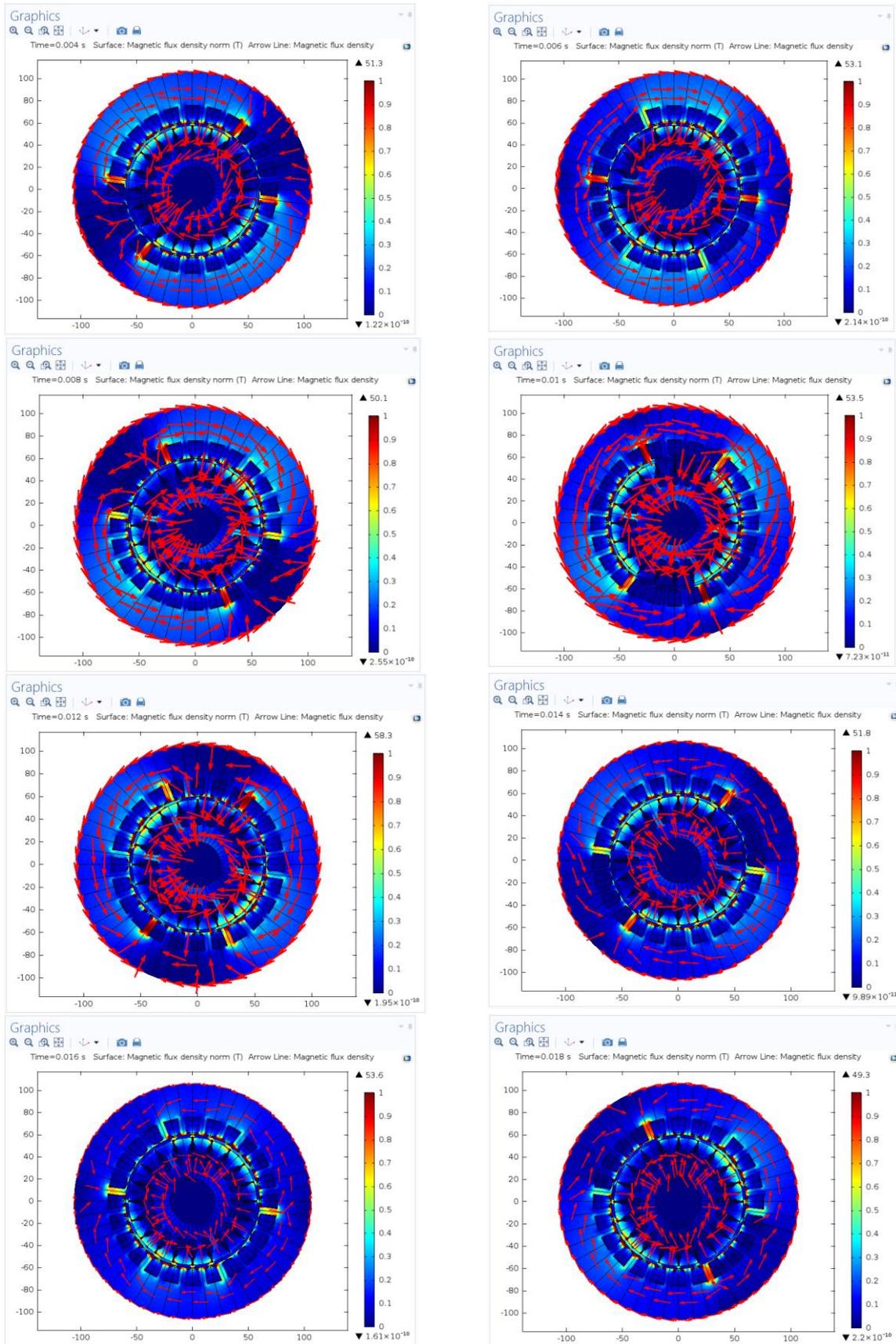


Fig. 110. Valor y dirección del campo magnético en diferentes instantes

## 7.4 Conclusiones

Se presentan en este epígrafe, las conclusiones que se pueden obtener de los resultados mostrados en los epígrafes anteriores:

- Se ha construido un modelo paramétrico de la geometría del motor que permitirá ampliar los estudios en una continuación de este trabajo.
- Se ha realizado la simulación del funcionamiento del estator, que sería la primera fase de la simulación completa de la máquina.
- Caso 1:
  - No se produce inducción de corriente en las bobinas del rotor, dado que éstas han sido consideradas como aire. Esto implica que únicamente vamos a simular el campo magnético creado por las bobinas del estator.
  - El flujo magnético es bajo, dado que la reluctancia del aire es elevada. El valor máximo del flujo magnético asciende a 1,86 T, si simulamos únicamente la Fase U; 2.11 T, si simulamos únicamente la fase V; 1.97 T si simulamos únicamente la fase W; y 3.05 T si simulamos simultáneamente las 3 fases en un instante de tiempo determinado.
  - El flujo magnético máximo será de aproximadamente 3 T, para el funcionamiento del motor en las condiciones del modelo.
  - La dirección del flujo magnético irá cambiando conforme pasen sucesivos instantes de tiempo, dado que la corriente que circula por cada una de las 3 fases varía en función del tiempo. Sin embargo, el valor del flujo magnético se mantiene constante. Esta es una condición necesaria para el correcto funcionamiento del motor.
- Caso 2:
  - No se produce inducción de corriente en las bobinas del rotor, dado que éstas han sido consideradas, de nuevo, como aire.
  - El flujo magnético aumenta respecto al caso 1, dado que la reluctancia del hierro dulce es menor que la del aire. El valor máximo del flujo magnético asciende a 16,9 T, si simulamos únicamente la Fase U; 17,3 T, si simulamos únicamente la fase V; 16,3 T si simulamos únicamente la fase W; y 29,4 T si simulamos simultáneamente las 3 fases en un instante de tiempo determinado.
  - El flujo magnético máximo será de aproximadamente 28 T, para el funcionamiento del motor en las condiciones del modelo.
  - Al igual que en el caso anterior, la dirección del flujo magnético irá cambiando conforme pasen sucesivos instantes de tiempo, dado que la corriente que circula por cada una de las 3 fases varía en función del tiempo. Sin embargo, el valor del flujo magnético se mantiene constante.
- Caso 3:
  - Sí se produce inducción de corriente en las bobinas del rotor, dado que éstas han sido consideradas aluminio, material conductor de electricidad.
  - La corriente inducida es de signo contrario a la corriente inductora ya que se opone a la variación del flujo magnético que la produce.
  - El valor máximo de la corriente inducida asciende a  $1,1 \cdot 10^7 A/m^2$ , si simulamos únicamente la Fase U;  $5,51 \cdot 10^6 A/m^2$ , si simulamos

únicamente la fase V;  $5,35 \cdot 10^6 A/m^2$  si simulamos únicamente la fase W; y  $1,58 \cdot 10^7 A/m^2$  si simulamos simultáneamente las 3 fases en un instante de tiempo determinado.

- El flujo magnético aumenta respecto a los casos anteriores, debido a que las bobinas del rotor, al circular por ellas una corriente, contribuyen a ese flujo magnético. El valor máximo del flujo magnético asciende a 31 T, si simulamos únicamente la Fase U; 32.3 T, si simulamos únicamente la fase V; 35.1 T si simulamos únicamente la fase W; y 57.1 T si simulamos simultáneamente las 3 fases en un instante de tiempo determinado.
- El flujo magnético máximo será de aproximadamente 50 T, para el funcionamiento del motor en las condiciones del modelo.
- Al igual que en los otros casos, la dirección del flujo magnético irá cambiando conforme pasen sucesivos instantes de tiempo, dado que la corriente que circula por cada una de las 3 fases varía en función del tiempo. Sin embargo, el valor del flujo magnético se mantiene constante.



## 8. POSIBLES LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Como continuación de este trabajo se proponen los siguientes puntos:

- Aprovechar las opciones de modelado bobinas que ofrece COMSOL y así eliminar la excitación mediante la imposición de una densidad de corriente en las ranuras.
- Conectar las bobinas modeladas con el procedimiento anterior a un circuito eléctrico externo. De esta forma, la excitación ya no es por corriente sino por tensión.
- Obtener la corriente que circula por el estator en el caso anterior como variable respuesta de la simulación.
- Calcular las fuerzas sobre las barras del rotor en estado estacionario.
- Dotar de movimiento al rotor.



## 9. BIBLIOGRAFÍA

En este apartado, se muestra la bibliografía consultada, que no ha sido expresamente citada en el texto.

- Álvarez, J. (2012). Motor de inducción trifásico.
- Cedrat. (2006). FLUX 2D Application Induction motor technical paper. France.
- Isla, P. B. (2014). Simulación de un transformador mediante elementos finitos empleando COMSOL. Valladolid.
- Oraá, B. R. (2013). Detección de fallos en Barras en motor de inducción utilizando histogramas. Valladolid.
- Baker, A.J., "Finite elements: computational engineering sciences," Wiley, West Sussex, UK, 2012.
- Zimmerman, William B.J., "Multiphysics modelling with finite element methods," World Scientific, Singapore, 2006.
- Pryor, Roger W., "Multiphysics modelling using COMSOL. A first principles approach," Jones and Bartlett Publishers, Boston, EE.UU., 2011.
- COMSOL, Manuales de Ayuda, COMSOL AB, Estocolmo, Suecia, 2015.



## ANEXO 1

A la hora de realizar una simulación, es de vital importancia la elección del mallado. Una elección errónea, puede suponer errores muy grandes lo que puede implicar la total invalidez de la simulación. Por ello, siempre que se lleve a cabo una simulación es esencial asegurarse que la elección del mallado que se ha realizado es la correcta.

En este anexo, se presenta el estudio de sensibilidad del mallado. Para ello, se ha realizado la simulación con diferentes mallados.

Como se ha mencionado en la memoria que se presenta, Comsol nos ofrece diversas posibilidades a la hora de la elección del mallado. Por un lado, tenemos el mallado controlado por el usuario, y por otro, el mallado controlado por la geometría.

El primero de ellos, el usuario define el tamaño y forma de las celdas, mientras que el segundo se define automáticamente, dependiendo de la geometría, afinando en aquellas zonas que geoméricamente son más complejas. Además, para esta segunda opción, también te permite seleccionar el tamaño de celda.

El estudio de mallado que aquí se presenta, se ha realizado para diferentes tamaños de celda en un mallado controlado por la geometría. Así, podemos elegir diferentes tamaños de celda:

- Extremely fine
- Extra fine
- Finer
- Fine
- Normal
- Coarse
- Coarser
- Extra coarser
- Extremely coarser

El primero de ellos tiene el tamaño más pequeño mientras que el último de ellos tiene el tamaño más grande.

Así mismo, Comsol nos ofrece información para saber la “calidad” del mallado. Para ello, usa diferentes parámetros, como son:

- Número de elementos
- Calidad mínima de elemento
- Calidad media de los elementos
- Relación del área del elemento
- Área de la malla
- Tasa máxima de crecimiento
- Tasa media de crecimiento

En la Tabla 4 se muestra el valor de estos parámetros para cada una de las mallas objeto de estudio. El mallado del tipo Extra Fine y el Extremely Fine, no se ha podido estudiar ya que no disponíamos de un ordenador lo suficientemente potente.

Tabla 4. Parámetros mallado

	Nº elementos	Calidad mínima	Calidad media	Rel. Del área	Área malla (mm <sup>2</sup> )	Tasa máx.	Tasa media
Extrem. Fine	-	-	-	-	-	-	-
Extra Fine	-	-	-	-	-	-	-
Finer	120.887	0,354	0,9206	$3,05 \cdot 10^{-9}$	1509	3,022	1,414
Fine	31.668	0,4388	0,9122	$3,18 \cdot 10^{-9}$	1509	3,679	1,457
Normal	31.239	0,4388	0,9122	$1,294 \cdot 10^{-8}$	1507	3,679	1,457
Coarse	46.354	0,4283	0,9112	$2,046 \cdot 10^{-8}$	1507	3,474	1,504
Coarser	133.060	0,3245	0,927	$3,176 \cdot 10^{-8}$	1508	4,366	1,405
Extra Coarser	30.6054	0,003786	0,8843	$2,12 \cdot 10^{-8}$	35200	4,428	1.657
Extrem. Coarser	26.686	$2,325 \cdot 10^{-4}$	0,8351	$3,215 \cdot 10^{-8}$	35200	5,526	1,782

Si nos fijamos en la calidad media, que es el indicador más completo, vemos que aumenta a medida que hacemos más pequeño el tamaño de celda tal y como se puede ver en la Fig. 111:

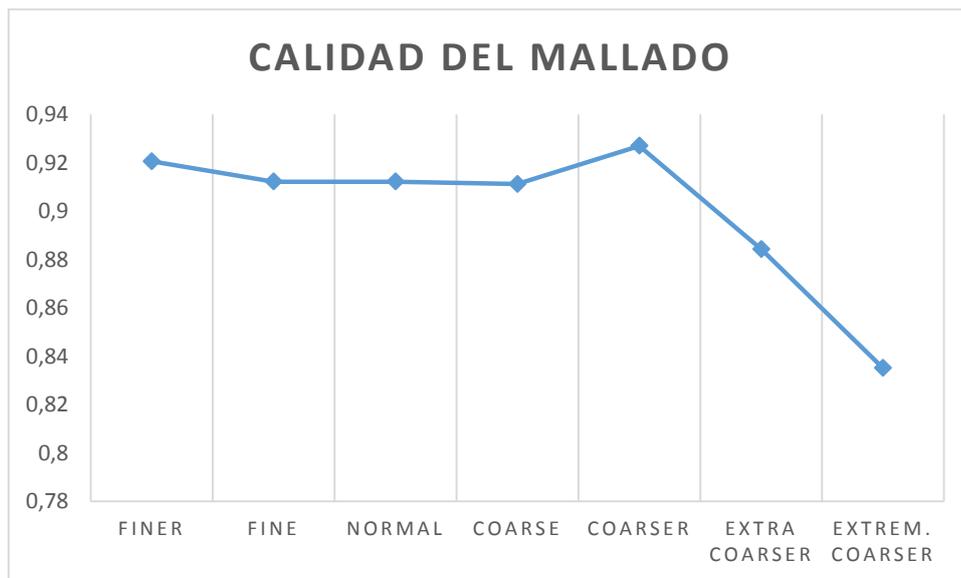


Fig. 111. Calidad del mallado

Para completar el estudio del mallado, se han tomado 3 puntos, en los cuales se estudiará cómo varía el campo magnético calculado por Comsol en función del tipo de mallado. Este estudio se ha realizado para el caso 3 en estacionario.

Los 3 puntos se encuentran en diferentes puntos del mallado. Uno de ellos, se encuentra en el rotor, otro en el entrehierro y otro en el estator, tal y como se muestra en las Fig. 112 ,Fig. 113 y Fig. 114.

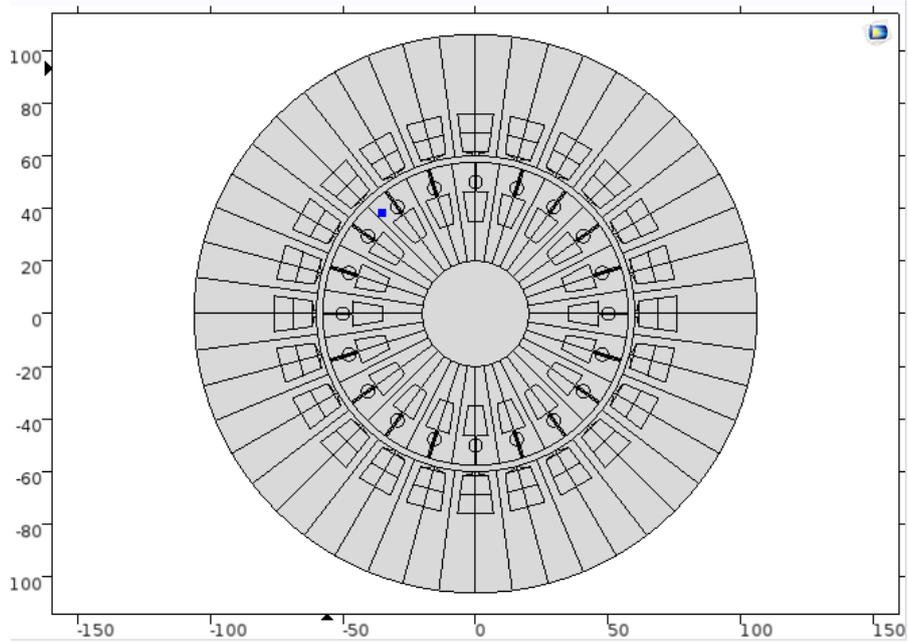


Fig. 112. Punto 1

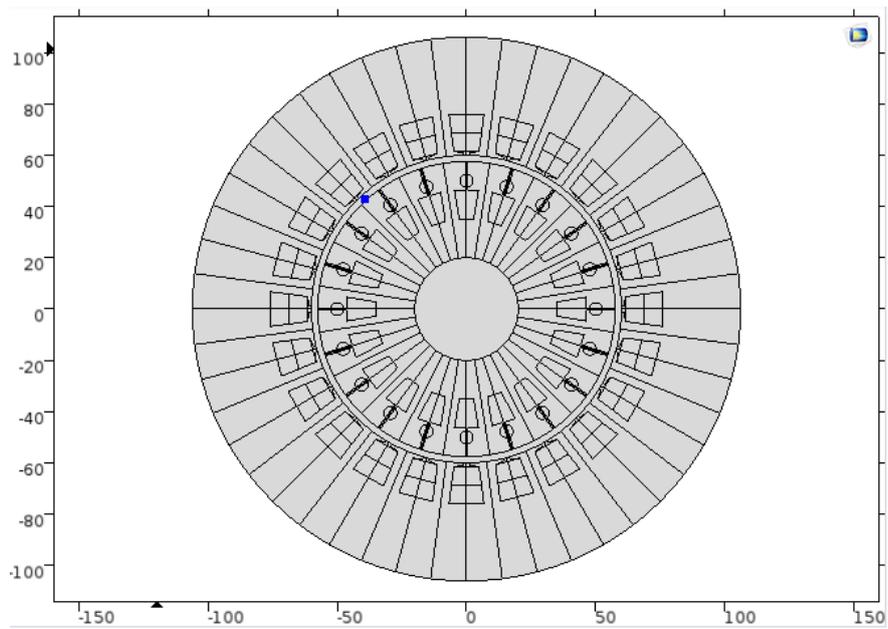


Fig. 113. Punto 2

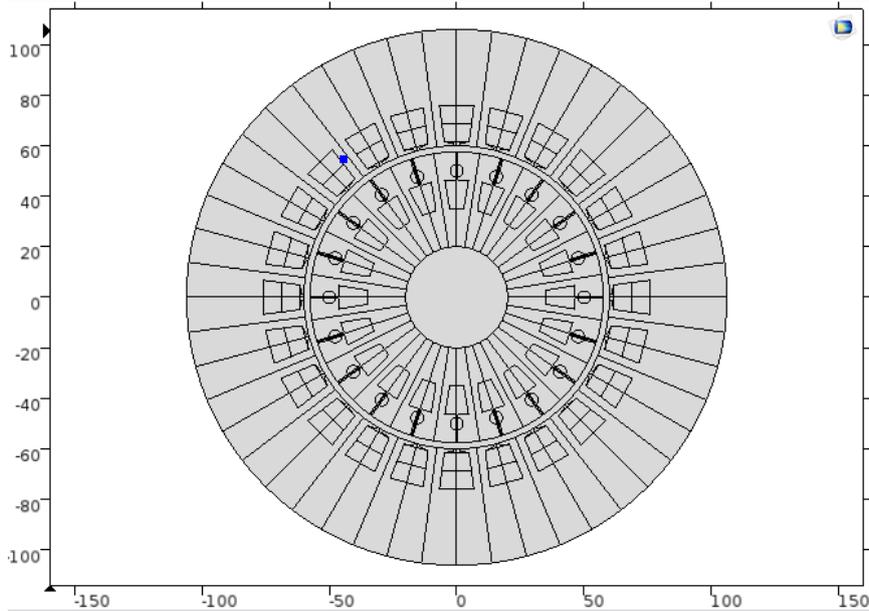


Fig. 114. Punto 3

En la Tabla 5 se presenta el valor del campo magnético (T) para en estos 3 puntos para diferentes mallados:

Tabla 5. Campo magnético en los 3 puntos

	Punto 1	Punto 2	Punto 3
Extrem. Fine	-	-	-
Extra Fine	-	-	-
Finer	0,23322	0,47295	0,13584
Fine	0,23314	0,47477	0,13570
Normal	0,23314	0,47477	0,13593
Coarse	0,23322	0,47375	0,13318
Coarser	0,23184	0,47085	0,13666
Extra Coarser	0,23087	0,46825	0,13627
Extrem. Coarser	0,23336	0,47346	0,13735

Como podemos observar, el valor del campo magnético en estos 3 puntos apenas varías en función del mallado elegido. Por ello, podemos decir que la elección del mallado que hemos usado (Normal) ha sido correcta.

## ANEXO 2

Se presentan en este anexo las características de los ordenadores utilizados para la simulación.

- Ordenador Asus, con las siguientes características:

Edición de Windows

Windows 10 Home  
© 2016 Microsoft Corporation. Todos los derechos reservados.



Sistema

Procesador: Intel(R) Core(TM) i5-4200H CPU @ 2.80GHz 2.79 GHz  
Memoria instalada (RAM): 4,00 GB (3,89 GB utilizable)  
Tipo de sistema: Sistema operativo de 64 bits, procesador x64  
Lápiz y entrada táctil: La entrada táctil o manuscrita no está disponible para esta pantalla

Fig. 115. Características ordenador ASUS

- Estación de trabajo HP Workstation Z600, con las siguientes características:

Edición de Windows

Windows 10 Pro  
© 2016 Microsoft Corporation. Todos los derechos reservados.



Sistema

Fabricante: Hewlett-Packard Company  
Modelo: HP Z600 Workstation  
Procesador: Intel(R) Xeon(R) CPU X5650 @ 2.67GHz 2.66 GHz (2 procesadores)  
Memoria instalada (RAM): 24,0 GB  
Tipo de sistema: Sistema operativo de 64 bits, procesador x64  
Lápiz y entrada táctil: La entrada táctil o manuscrita no está disponible para esta pantalla



Fig. 116. Características ordenador HP