



**Escuela de
Ingeniería y Arquitectura**
Universidad Zaragoza

ESTUDIO ELECTROMAGNETICO MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS DEL APANTALLAMIENTO DE UN SISTEMA DE CARGA INDUCTIVA DE VEHICULOS ELECTRICOS

DOCUMENTO 1: MEMORIA DESCRIPTIVA

AUTOR: Marcos Ons Fuertes

DIRECTOR: Juan Luis Villa Gazulla

ESPECIALIDAD: Electricidad

CONVOCATORIA: Septiembre 2012

CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	3
1.1	PLANTEAMIENTO DEL PROYECTO	3
1.2	PETICIONARIO	3
1.3	ANTECEDENTES	4
1.4	DESCRIPCIÓN	4
1.4.1	COMPOSICIÓN DEL SISTEMA	4
1.4.2	EL PROGRAMA	5
2	DESARROLLO	7
2.1	DESARROLLO FÍSICO	7
2.2	MATERIALES	13
2.3	FÍSICAS	15
2.4	MALLADO	17
2.5	ESTUDIOS Y SOLUCIONES	20
3	CÁLCULOS	21
3.1	PLANTEAMIENTO DE LOS CÁLCULOS	21
3.2	CÁLCULO DE LA INDUCTANCIA L_1	22
3.3	CÁLCULO DE LA INDUCTANCIA L_2	23
3.4	CÁLCULO DE INDUCCIÓN MUTUA M_{12}	24
3.5	CÁLCULO DE CAMPOS MAGNÉTICOS	28
3.5.1	CAMPO MAGNÉTICO CREADO POR PRIMARIO	28
3.5.2	CAMPO MAGNÉTICO CREADO POR SECUNDARIO	31
3.5.3	CAMPO MAGNÉTICO PRODUCIDO POR AMBAS BOBINAS	34
3.5.4	CAMPO MAGNÉTICO PRODUCIDO POR AMBAS BOBINAS CON FERRITA	37
3.5.5	CAMPO MAGNÉTICO PRODUCIDO POR AMBAS BOBINAS CON CHAPA DE ALUMINIO	41
3.5.6	CAMPO MAGNÉTICO CREADO POR EL SISTEMA COMPLETO	45
3.5.7	RESULTADOS FINALES Y TABLA COMPARATIVA	49
4	PROBLEMAS Y SOLUCIONES	50
4.1	LOS PARÁMETROS	50
4.2	LA FORMA DE DISEÑAR	50
4.3	LAS FÍSICAS Y CONDICIONES DE FRONTERA	51
4.4	MALLADO, GRADOS DE LIBERTAD Y PC	52
4.5	LA FALTA DE INFORMACIÓN	53
5	CONCLUSIÓN Y VALORACIÓN PERSONAL	54

1 INTRODUCCIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROYECTO

En el presente documento se recoge el estudio teórico del apantallamiento magnético sobre un sistema de carga de vehículos eléctricos por inducción mediante el programa de cálculo de elementos finitos *Comsol Multiphysics V4.2*. El correcto apantallamiento del sistema es parte esencial del estudio, ya que con un correcto apantallamiento se controla la transferencia de potencia y el cumplimiento de la normativa sobre los campos magnéticos que afectan al ser humano. El programa de cálculo de elementos finitos permite realizar una aproximación del sistema de carga real y poder contemplar como el campo magnético creado por el propio sistema se ve alterado según los materiales que introduzcamos en el mismo. El objetivo final de este estudio de apantallamiento es comprobar si el sistema cumple la normativa vigente sobre campos magnéticos que afectan al ser humano y comprobar como se puede apantallar dicho campo de la forma más sencilla y económica posible, manteniendo a su vez las mejores condiciones de trabajo y transferencia de potencia.

Este proyecto está centrado en el cálculo y distribución del campo magnético creado por el sistema de carga con sus diferentes variantes y distribuciones espaciales.

El objetivo principal es encontrar la situación correcta en la cual el sistema de carga sea capaz de transferir la mayor cantidad de potencia posible (buscar el caso de menores pérdidas) y evitar que el campo magnético salga fuera del sistema y pueda afectar a personas o elementos del entorno. Para ello sabemos que por normativa el campo magnético al que una persona puede estar sometida es de 10 microteslas.

1.2 PETICIONARIO

Como petionario de dicho proyecto figura:

Sr. Don Juan Luis Villa Gazulla

Área de ingeniería eléctrica de la Escuela de Ingeniería y Arquitectura de Zaragoza (EINA), en colaboración con el Centro de Investigación de Recursos y Consumos Energéticos (CIRCE).

1.3 ANTECEDENTES

El proyecto nace de la necesidad de contrastar la información y resultados teóricos del programa de elementos finitos en 2D *FEMM* con un modelo en 3D como el creado con *Comsol Multiphysics V4.2*. y a su vez comparar ambos dos con los valores reales medidos en el sistema de carga por inducción real instalado en los laboratorios del CIRCE. El mayor interés reside en la distribución de campo magnético creado por el sistema y la forma posible de como aislarlo del entorno para que no afecte fuera del mismo y que la pérdida de potencia sea la menor posible.

1.4 DESCRIPCIÓN

1.4.1 COMPOSICIÓN DEL SISTEMA

El sistema de carga de vehículos eléctricos por inducción instalado en el CIRCE consiste en dos bobinas cuadradas en disposición horizontal acopladas magnéticamente en resonancia, las cuales suministran 30 KV de potencia cuando trabajan a una frecuencia de 18000 Hz. La bobina principal, que consta de 5 espiras, es la que recibe la alimentación de la red, absorbe 441 A de la misma a potencia nominal y transfiere dicha potencia mediante campos magnéticos a la bobina secundaria. Dicha bobina secundaria, de 13 espiras, posee una corriente inducida de 141 A desfasada 90° ($\pi/2$) debido a la corriente que circula por la bobina primaria. Este sistema crea unos campos magnéticos muy altos los cuales han de ser controlados mediante un apantallamiento concreto que permita mantener la mayor transferencia de potencia posible y que además evite que dicho campo magnético salga al exterior y afecte al entorno.

El sistema se estudia teóricamente desde cuatro puntos de vista distintos:

- Las dos bobinas trabajando en condiciones nominales.
- Las dos bobinas con unas láminas de ferrita contiguas, que aumentan el efecto del campo magnético.
- Las dos bobinas con unas chapas de aluminio que eviten que el campo magnético salga a un exterior.
- Las dos bobinas con las láminas de ferrita y las chapas de aluminio, para comprobar si el efecto de la ferrita con el aluminio se compensan entre si y la transferencia de potencia resulta óptima.

El sistema de carga por inducción magnética real se encuentra aislado mediante una jaula de Faraday cuadrada de 2,5 metros de lado formando un cubo entorno al sistema. Dicho sistema se encuentra en el centro del cubo a una altura de 1 metro del suelo. Como el sistema trabaja a alta frecuencia se puede dar el problema del efecto

pelicular (skin effect) en los materiales conductores. El efecto pelicular causa que a grandes frecuencias la corriente se desplace únicamente por la superficie del sistema hasta una determinada profundidad, ignorando la sección completa del mismo, lo que acarrea un mayor calentamiento de los conductores con sus correspondientes pérdidas en forma de disipación de calor. Las bobinas que conforman este sistema están compuestas de hilo de Litz en vez de cobre estándar. El hilo de Litz no es más que una agrupación de N hilos de cobre con una envolvente, la cual conforma el cable. En el caso de estas bobinas, están compuestas de aproximadamente 500 hilos, los cuales, al tener muy poca sección, dejan que la corriente circule a través de toda su sección, con lo que consiguen crear un sistema de circulación de corriente homogéneo y por toda la sección del conductor, evitando así el efecto pelicular y consiguiendo así menor calentamiento del sistema y menores pérdidas por efecto Joule.

Por otro lado, las ferritas y las chapas de aluminio no se encuentran instaladas en el sistema real ya que es necesario comprobar y calcular teóricamente cuales serían las condiciones y especificaciones exactas, además de ver la distribución del campo magnético que acontecería con dichos materiales al añadirlos al sistema. Por ello es por lo que se han realizado los estudios con el programa *Comsol Multiphysics*.

1.4.2 EL PROGRAMA

Comsol Multiphysics V4.2 es un potente programa informático que realiza cálculos y simulaciones sobre sistemas físicos bajo unas condiciones concretas. Es capaz de simular casi cualquier cosa, ya que dispone de librerías de todo tipo que le permiten abarcar la mayoría de los estudios relacionados con ingenierías, física y química. Es compatible con la mayoría de los principales programas de cálculo y diseño (AutoCAD, Solidworks, MathLab...) y permite la importación y exportación de información de un programa a otro. Es un programa en constante evolución por lo que es necesario especificar siempre con versión se trabaja, ya que algunos archivos de diferentes versiones no son compatibles entre si o en determinada versión se ha subsanado o corregido algún error que aparecía en otra. Es capaz de diseñar en 3D, además de en 2D simétrico, 2D estándar y 1D, lo que le hace un programa muy interesante y utilizado por distintos centros de investigación y universidades, dado su amplio rango de aplicaciones.

El método de cálculo utilizado por el programa es el cálculo mediante elementos finitos a la vez que aplica unas ecuaciones concretas para poder obtener los resultados en función a las condiciones establecidas de estudio. El sistema de cálculo por elementos finitos consiste en tomar el elemento o sistema a estudiar y llenarlo de triángulos o tetraedros (si estamos hablando de un sistema en 3D para cubrir un volumen) y a través de los puntos de unión que crea un triángulo con otro poder tomar referencias de cálculo y trazar grados de libertad que permitan establecer ecuaciones

para poder calcular según las condiciones y físicas aplicadas. Este sistema de cálculo tiene el inconveniente de que cuanto más complejo es el sistema a analizar, mayor cantidad de triángulos o tetraedros ha de introducir en el mismo para aproximarse lo más posible a una solución certera, lo que requiere un PC potente y no convencional.

2 DESARROLLO

2.1 DESARROLLO FISICO

Los datos necesarios para crear el sistema físico en *Comsol Multiphysics* fueron facilitados por el director de proyecto. Como datos esenciales resultan la sección de ambas bobinas, la separación entre ellas y la distancia a la que se encuentran las ferritas y las chapas de aluminio, además de las dimensiones propias que deben tener cada una de ellas. Como estas últimas no están colocadas en el sistema real, sus dimensiones aproximadas se obtuvieron de un diseño en 2D creado en el programa de cálculo de elementos finitos *FEMM*. La distribución de ambas bobinas se sabe que es en torno a un rectángulo de 30 cm x 40 cm, siendo la espira central de cada bobina la que coincide con este rectángulo y todas las demás están o más hacia dentro o más hacia fuera de dicho rectángulo.

Así pues, como la distribución de las espiras no es exactamente conocida, lo primero y necesario es plantear un boceto en papel en el cual a base de realizar proporciones se pueda conocer la distancia a la que se encuentran cada una de las espiras respecto al rectángulo dado. Otro detalle desconocido es el hueco de separación que hay entre una espira y otra, ya que la bobina se reparte de forma cuadrada y horizontal pero siempre hay una separación existente entre vuelta y vuelta de cable. Como el sistema real no mantiene una medida concreta y precisa, se optó por utilizar una distancia de 1 mm de separación entre espira y espira de las bobinas. Se sabe también que el radio de curvatura de la espira central en torno al rectángulo de referencia es de 10 cm. Lo realmente complejo a realizar era el concepto de crear una espira que diera 5 vueltas o 13 vueltas respetivamente, ya que los radios de giro hacia dentro del rectángulo de referencia o hacia fuera para dar otra vuelta son totalmente desconocidos por lo que se optó por crear espiras cerradas sobre si mismas distribuidas en torno a ese rectángulo de referencia, todas a proporción de la espira central en cada caso. A efectos del campo magnético creado por la bobina, es exactamente igual el campo creado por una bobina de 5 espiras por la que circula una corriente de 441 Amperios que 5 bobinas de una espira cada una (5 conductores concéntricos) por los que en cada uno de ellos circula una corriente de 441 Amperios, por ello, se optó por el diseño más sencillo.

Para todas las medidas del sistema se utilizaron parámetros establecidos en el propio programa *Comsol Multiphysics* lo que permite definir un parámetro (por ejemplo: *Diametro1*) y asignarle a dicho parámetro un valor numérico, de forma que si fuera necesario modificar el modelo, porque se ha cambiado el conductor, se ha variado alguna distancia de separación o se desean realizar diversas comprobaciones, con solo cambiar el valor numérico del parámetro resulta suficiente.

Los parámetros definidos en *Comsol Multiphysics* se pueden encontrar en la pestaña *Global Definitions* en el nodo *Parameters*. Todas las pestañas y nodos se pueden encontrar a mano izquierda en la ventana principal del programa distribuidos en forma de un árbol y ramas sucesorias, lo que se denomina *Model Builder*. Los parámetros utilizados para crear este modelo son los siguientes:

Name	Expression	Value	Description
W	30[cm]	0.3 m	Anchura de conductor central
L	40[cm]	0.4 m	Profundidad de conductor central
Diametro1	11.3[mm]	0.0113 m	Diametro de primario
Gap1	1[mm]	0.001 m	Hueco entre cable y cable de primario
H	15[cm]	0.15 m	Distancia entre primario y secundario
Diametro2	5.64[mm]	0.00564 m	Diametro de secundario
Gap2	1[mm]	0.001 m	Hueco entre cable y cable de secundario
Lado1	11.4[cm]	0.114 m	Radio de giro 1 ^a /1°
Lado2	10.7[cm]	0.107 m	Radio de giro 1 ^a /2°
Lado3	10[cm]	0.1 m	Radio de giro 1 ^a /Central
Lado4	9.298[cm]	0.09298 m	Radio de giro 1 ^a /4°
Lado5	8.496[cm]	0.08496 m	Radio de giro 1 ^a /5°
SeparacionF	4.21[mm]	0.00421 m	Hueco entre devanado y ferrita
AnchuraF	385[mm]	0.385 m	Anchura de ferrita
RadioF	15[mm]	0.015 m	Curvatura de ferrita
SeparacionAl	10[mm]	0.01 m	Hueco entre ferrita y chapa
GrosorAl	10[mm]	0.01 m	Grosor de chapa
RadioAl	20[mm]	0.02 m	Primer giro de chapa
RectaAl	10[mm]	0.01 m	Parte recta vertical de chapa
GiroAl	18[mm]	0.018 m	Segundo giro de chapa
PlanaAl	130[mm]	0.13 m	Parte recta horizontal de chapa
RemateAl	4[mm]	0.004 m	Giro externo de chapa
ChapaAl	494[mm]	0.494 m	Base de chapa
DistanciaFAI	75[mm]	0.075 m	Distancia entre Ferrita y Chapa de aluminio
Lado11	8.87[cm]	0.0887 m	Radio de giro 2 ^a /1°
Lado22	8.58[cm]	0.0858 m	Radio de giro 2 ^a /2°
Lado33	8.29[cm]	0.0829 m	Radio de giro 2 ^a /3°
Lado44	8[cm]	0.08 m	Radio de giro 2 ^a /Central
Lado55	7.71[cm]	0.0771 m	Radio de giro 2 ^a /5°
Lado66	7.42[cm]	0.0742 m	Radio de giro 2 ^a /6°
Lado77	7.13[cm]	0.0713 m	Radio de giro 2 ^a /7°
AireCobre	1[cm]	0.01 m	Hueco de alimentación

Los parámetros aparecen con una breve descripción de la medida a la que hacen referencia. Los acompañados por “F” son los relacionados con la ferrita y los acompañados por “Al” hacen referencia a las medidas del aluminio. El término “Lado” es el radio que toma dicho conductor para girar 90° y describir el rectángulo. Los que llevan doble numeración (por ejemplo, lado11) son referidos a la bobina secundaria. Como son conductores concéntricos rectangulares y cerrados, es necesario dejar un mínimo de espacio sin cerrar (un hueco de aire) para poder alimentar con la corriente necesaria para simular el sistema. Este parámetro es AireCobre, que es un hueco de 1 cm que poseen todos los conductores para poder acoplar en el las fuentes de corriente.

La corriente que circula por el secundario en el sistema real es una corriente inducida debido a la corriente de alimentación que circula por el primario. Como el programa no puede simular el concepto de corriente inducida es necesario mantener dicho hueco también en la bobina secundaria y alimentar a través de él con fuentes de corriente equivalentes a la corriente que circularía por la bobina en condiciones nominales de funcionamiento real. Así pues, el diseño final de las dos bobinas es el siguiente:

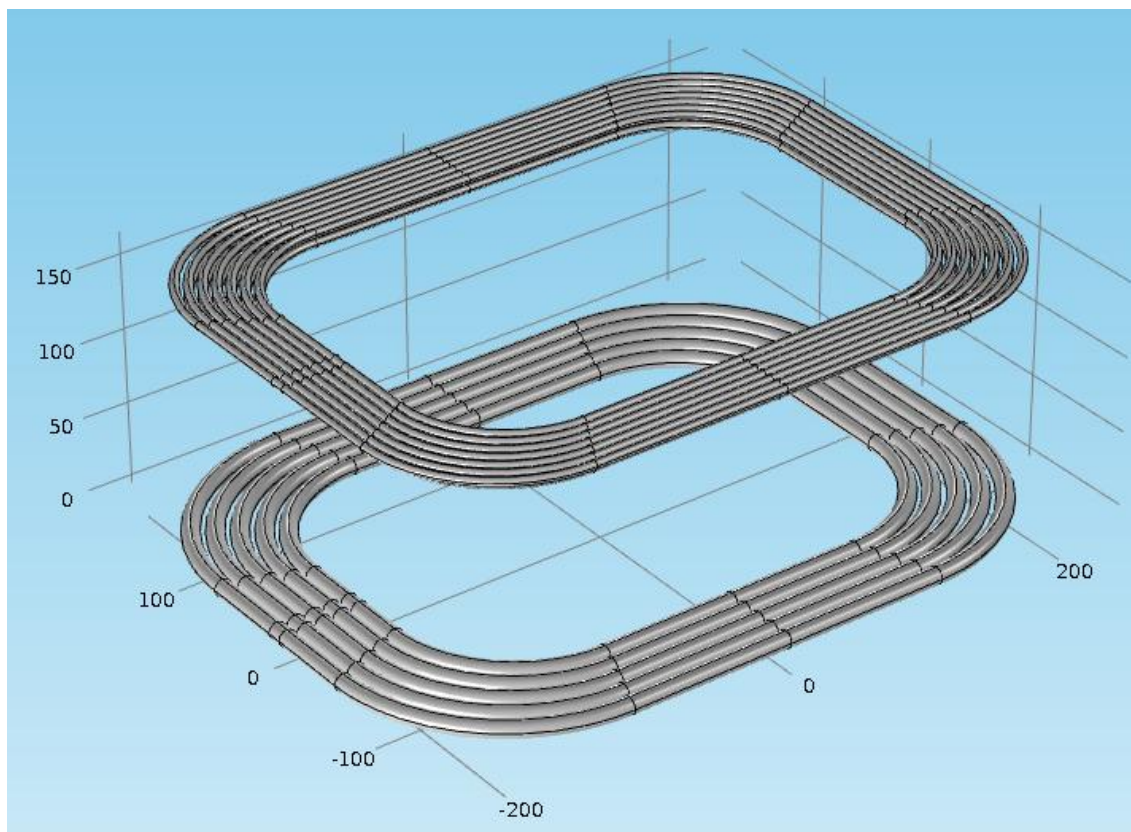


Figura 1: Diseño completo de las bobinas con los huecos de alimentación.

El programa *Comsol Multiphysics* es capaz de importar diseños ya realizados en AutoCAD o Solidworks, o directamente trabajar con el sistema de diseño que posee el mismo. Utilizando esta última opción se han creado tanto las bobinas como las piezas de ferrita y las chapas de aluminio. El modo de funcionamiento para diseñar es muy similar al que utiliza Solidworks: Hay que establecer un plano de trabajo (*work plane*) en el eje que nos interese y en el dibujar lo que queramos con las diferentes figuras y operaciones binarias que presenta el programa. Posteriormente, lo dibujado en ese plano se puede alargar una distancia (*extrude*) se puede girar respecto a un eje (*revolve*) y diversas funciones mas. El método de trabajo fue crear todo el sistema por simetría. Se comenzó a trabajar con el plano vertical situado en el origen y una vez que se tenía medio diseño del conjunto se hizo el restante por medio de reflejar el plano sobre si mismo (*mirror*) para que la pieza se reflejara por simetría de si misma. De esta forma se consigue diseñar más rápido y con menos planos de trabajo. El desarrollo figura en la sección *Model 1* en el nodo *Geometry 1*. Fueron necesarios 101 planos de trabajo para

lograr diseñar el modelo completo, aparte de las uniones de los elementos y los reflejos de los mismos para simplificar el desarrollo. A continuación se presenta el proceso descrito en 3 figuras:

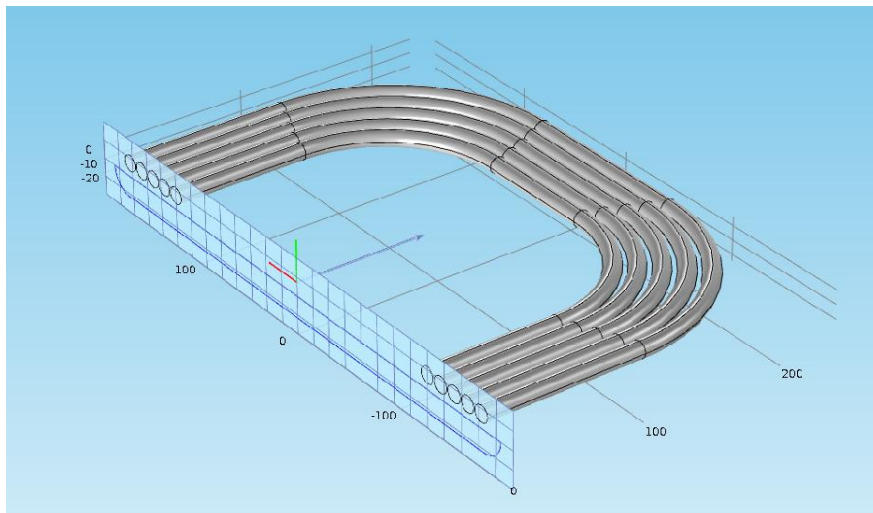


Figura 2: Se coloca un plano de trabajo y se dibuja en él lo que se desea.

En el caso de la figura 2 se ha dibujado el perfil de la pieza de ferrita. Para ello se ha añadido el plano de trabajo con la función *Add work plane* que figura al hacer clic con el botón derecho del ratón sobre el nodo *Geometry 1*. Dentro del plano de trabajo se permiten añadir figuras simples (cuadrado, círculo, polígonos...) y unirlos entre si con operaciones booleanas.

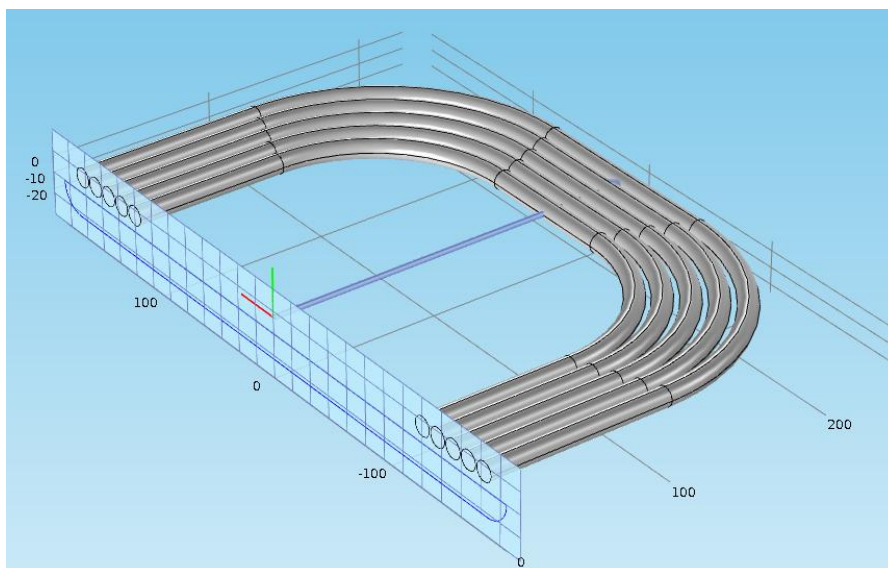


Figura 3: Se selecciona los elementos a alargar y en cuanto profundidad

En el siguiente paso representado en la figura 3, se decide que elementos se quieren manipular del plano. En este caso lo que se desea es darle profundidad a esa pieza de ferrita en el sentido que marca la flecha, de forma que se selecciona el elemento del plano y se aplica la opción *Extrude* disponible en nodo del plano de trabajo.

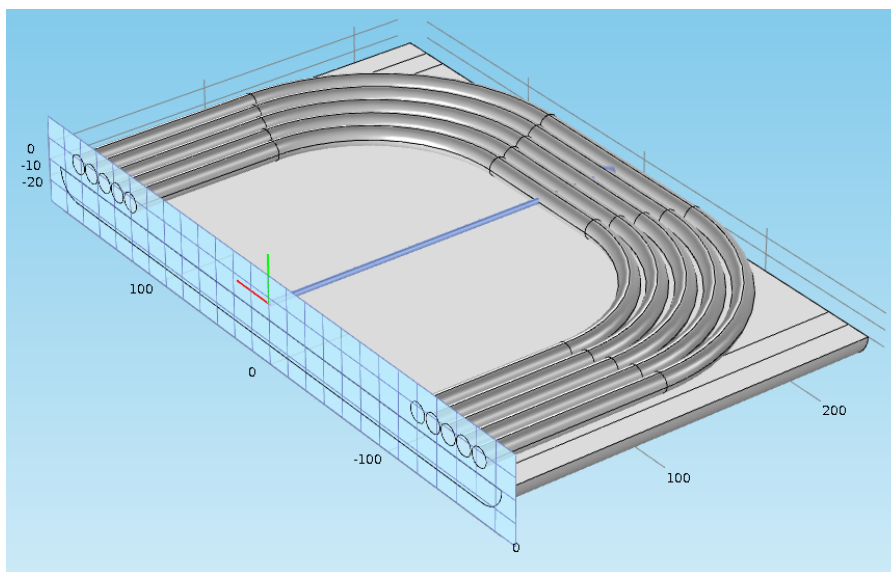


Figura 4: Se completa el diseño con los parámetros introducidos.

Por ultimo, una vez que se han decidido los elementos a alargar y la distancia, se construye el modelo utilizando el botón *Build selected* que completa la acción solicitada con los parámetros introducidos y queda tal como se aprecia en la figura 4. En este caso se ha creado el perfil de la pieza de ferrita y se ha alargado hasta una profundidad que alcanza el último conductor del devanado por completo.

Como se puede observar, el proceso de diseño físico es sencillo, pero requiere mucha precisión y sobre todo el uso exhaustivo de los parámetros ya que para introducir todas las medidas, distancias y dimensiones es mucho mejor hacer uso de estos. El motivo es sencillo: Con parámetros podemos variar en cualquier momento cualquier dimensión del sistema únicamente cambiando el valor del parámetro y haciendo clic izquierdo en el botón *Build all* que reconstruye todo el sistema con los parámetros introducidos. Si no se utilizan parámetros y se introducen valores directamente, sería imposible el poder variar cualquier magnitud, ya fuera diámetro de los conductores, separaciones, profundidades... Para ello, todas las distancias introducidas en el diseño están reflejadas con ecuaciones con los parámetros, de forma que en vez de aparecer el valor numérico, aparece una serie de operaciones con dichos parámetros (por ejemplo: $L/2+2*(\text{Diámetro1}+\text{Gap1})+\text{Diámetro1}/2$). De forma que al estar las operaciones con parámetros, cualquier variación en los mismos permite un cambio en el diseño. Esta es la mejor forma de diseñar el sistema físico

Siguiendo este procedimiento durante todo el proceso y uniendo y espejando las distintas partes de los elementos que lo componen, el resultado final de las bobinas con las piezas de ferrita y las chapas de aluminio es el representado en la figura 5:

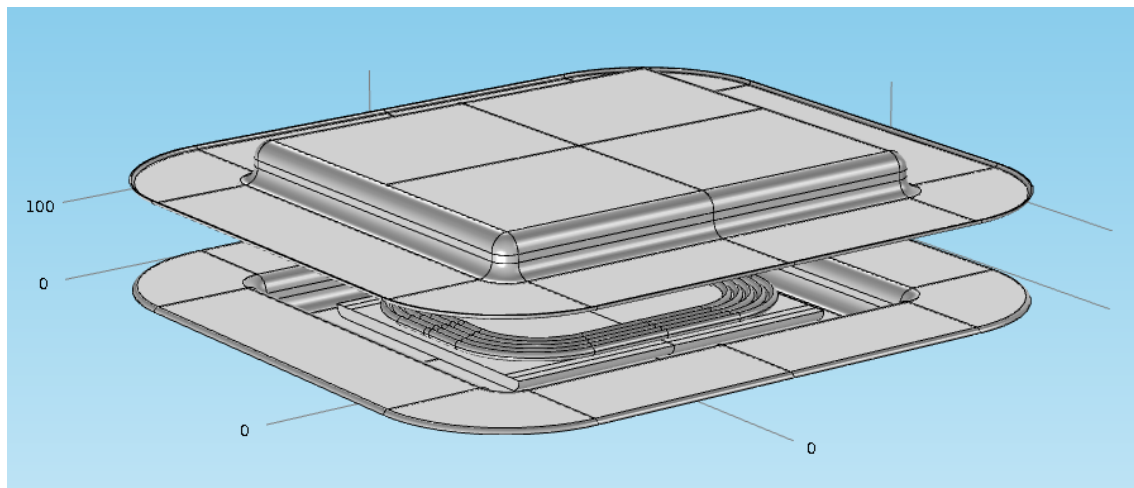


Figura 5: Bobinas con ferrita y chapa de aluminio.

Lo último para añadir al sistema físico es el equivalente a la jaula de Faraday que aísla al sistema real. Para ello se introdujo un cubo de 2,5 metros de lado y se desplazó su origen para cumplir que la bobina principal esté separada del suelo 1 metro. Una vez que todos los elementos físicos están implementados, es necesario que haya unión entre ellos. Para ello basta con seleccionar el icono al final del nodo de geometría y seleccionar formar unión (*form union*). Cuando se añade un elemento físico que engloba a otros, es necesario utilizar la opción *Wireframe rendering* situada en la ventana *Graphics*, que es donde aparece el diseño. Aplicar esta función implica el ver únicamente las aristas de los cuerpos y todo lo demás transparente, de forma que se puede apreciar lo que hay en el interior del cubo. El resultado final del conjunto total con jaula es el mostrado en la figura 6:

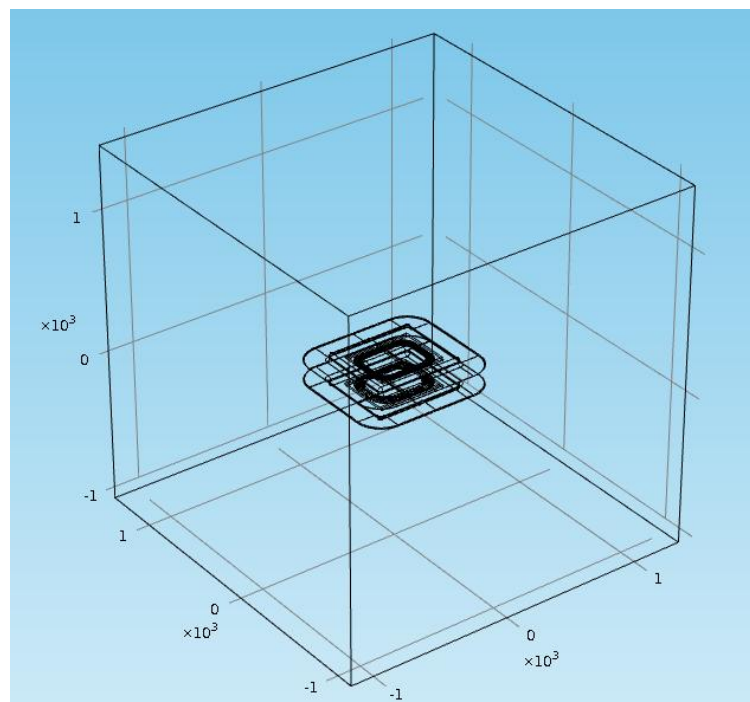


Figura 6: Sistema completo con Jaula de Faraday.

2.2 MATERIALES

Una vez que todo el desarrollo físico está completo, es necesario añadir materiales al modelo desde la librería de materiales del programa. Al añadir materiales lo que se consigue es que el programa comprenda lo que es cada uno de los elementos físicos que se le han diseñado y las condiciones que tiene que presentar cada uno de ellos a la hora de simular el sistema original.

La forma de añadir materiales al modelo es muy sencilla y se define en pocos pasos. El programa *Comsol Multiphysics* trabaja con cuatro niveles o rangos de escala: Dominio (*Domain*), Frontera (*Boundary*), Arista (*Edge*) y Punto (*Point*). Dominio afecta a lo que es un cuerpo y todo lo que hay dentro del mismo. Frontera afectaría únicamente a la superficie del cuerpo seleccionado. Arista solo tomaría las aristas del cuerpo o las aristas ficticias que crea el programa para definir según que cuerpos (como por ejemplo, un conductor cilíndrico, para el programa tiene cuatro aristas que lo recorren en toda su longitud). Punto únicamente tomaría un punto concreto del cuerpo, los cuales pueden estar distribuidos de forma automática por el programa o pueden ser definidos por el usuario. De esta forma, para cada nivel de selección disponible se puede definir un tipo de material, teniendo en cuenta lo descrito anteriormente.

Los materiales se añaden simplemente haciendo clic derecho sobre el desplegable *Materials* que permite abrir la librería con la opción *Open Material Browser*. En ella se puede encontrar una amplia selección de materiales definidos por el programa con todos los parámetros introducidos y desglosados por categorías según el material que se busque (materiales para AC/DC, química, físicas, calentamientos, motores, radiofrecuencia...). Se selecciona el material y se añade al sistema con la opción *Add material to model* que aparece al hacer clic derecho sobre el material deseado. Por defecto, el primer material introducido al sistema afecta a todos y cada uno de los cuerpos. Conforme se añaden todos los materiales resulta necesario definir conjuntos de cuerpos o elementos que compartan un material. Esto se puede hacer desde el nodo *Definitions* (Situado bajo el nodo *Model 1*) haciendo clic derecho sobre el y añadiendo *Selections – Explicit* de forma que se puede hacer una selección de diferentes cuerpos del diseño y agruparlos todos bajo un nombre (por ejemplo, seleccionar todos los conductores de las bobinas y llamarlos “Conductores”). Se pueden seleccionar según el rango que se desee explicado anteriormente (Dominio, Frontera, Arista o Punto). De esta forma, al añadir materiales al diseño, basta con seleccionar el conjunto que se ha definido como agrupación y que a ese conjunto le corresponda un determinado material. Por ejemplo: se selecciona el material cobre de la librería y en el podemos elegir el nivel de geometría al que afecta (Dominio, Frontera, Arista o Punto) y bajo este seleccionar la agrupación definida con anterioridad. De esta forma los materiales añadidos desde la librería son: cobre, aire y aluminio. Como la ferrita no existe como material de librería es necesario establecer sus parámetros desde cero. Para ello, en vez de abrir la librería

de materiales, se selecciona *add material* con el cual podemos definir un material a través de las siguientes características básicas: Conductividad eléctrica, permitividad relativa y permeabilidad relativa. La ferrita se considera un material con conductividad nula y permeabilidad en torno a las 2000 unidades, por lo que con introducir dichos valores es suficiente para dejar definido el material.

En el caso de los conductores de las bobinas es necesario establecer un Dominio que afecte a todo su interior y que lo defina como cobre y otra Frontera que defina toda su superficie también como cobre, para poder hacer circular toda la corriente que se desea por toda la sección de los conductores (tanto de primario como de secundario). En la figura 7 se puede apreciar la selección de material (en este caso, aluminio), el nivel de geometría al que afecta (*Geometric entity level*) y la selección a la que afecta este material. Como se ha definido una selección de las dos chapas de aluminio como “aluminio”, se selecciona esa agrupación desde el desplegable y afecta únicamente a esa selección. Como se aprecia en la ventana de *graphics* las dos chapas de aluminio aparecen resaltadas en azul, lo que indica que esos son los únicos cuerpos del sistema que se consideran aluminio. Este procedimiento se hace con todos los demás cuerpos hasta tener todos definidos con un material.

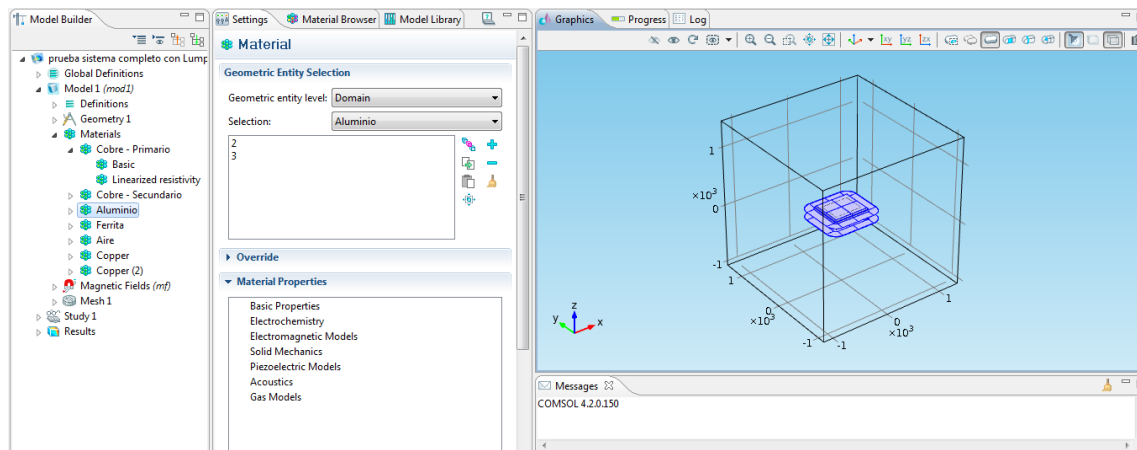


Figura 7: Ejemplo de selección de materiales.

En el caso del cubo que representa la Jaula de Faraday también es necesario definirlo como un volumen de aire, por lo que se establece un Dominio de aire que afecta a todo su volumen interior, a excepción de los otros elementos ya definidos con otro material.

2.3 FÍSICAS

Bajo un punto de vista subjetivo, las físicas son lo más importante a implantar en el modelo diseñado. Estas tienen que aproximarse lo mayor posible a la realidad y hacer que se cumplan las mismas condiciones que se cumplirían en un caso real a estudiar. En *Comsol Multiphysics* hay gran diversidad de físicas y estudios predefinidos, pero resulta totalmente necesario saber exactamente qué física hay que aplicar y en qué caso es necesario para que la simulación tenga sentido y sea comparable con el caso real. El propio programa se descompone en módulos según sea lo que queramos analizar (campos eléctricos, campos magnéticos, radiofrecuencia, química, mecánica, motores...) y en cada uno de estos módulos se pueden encontrar varios de los estudios más habituales del determinado campo.

En este caso lo que hay que analizar son campos magnéticos producidos por la circulación de corriente en conductores, por ello, el módulo de estudio más adecuado es el módulo AC/DC (*AC/DC module*). Dentro de él se pueden encontrar diversas físicas a aplicar, cada una de ellas con una ecuación fundamental básica como referencia, las cuales se aplican al modelo diseñado según sea la ecuación que rige las físicas. Para todos los estudios realizados sobre el sistema se han empleado tres físicas diferentes: Campos eléctricos y magnéticos (*electric and magnetic fields*), que aplican la ley de Ampere con la correspondiente conservación de la corriente. Campos magnéticos (*magnetic fields*), que aplican aislamiento magnético a los elementos seleccionados además de la ley de Ampere para los elementos conductores y circuitos eléctricos (*electrical circuits*), que permiten añadir excitaciones de corriente y tensión al sistema por medio de un sistema de unión por nodos, además de poder añadir los típicos elementos pasivos de circuitos. Para trabajar a altas frecuencias es necesario utilizar las físicas de campos magnéticos, ya que son las que permiten añadir un sistema de conexión por nodos para conectar las excitaciones. Las físicas como la de campos eléctricos y magnéticos permiten establecer una entrada y una referencia de corriente, lo que no es válido para corriente alterna de alta frecuencia según el programa, además que por defecto no aplican aislamiento magnético al sistema y por ello el desarrollo sería mucho más complejo.

Para añadir las físicas al sistema se puede hacer de diversas formas. Las más comunes es añadirlas con el asistente de inicio del modelo o sino haciendo clic derecho en el nodo del modelo (*Model 1*) y seleccionando añadir físicas (*add physics*). De la lista que aparece según el módulo de estudio elegido para el modelo, se selecciona la que más interese. Para que la física sea efectiva hay que seleccionar muy bien los elementos a los que afecta su ecuación principal y definir robustamente las condiciones de frontera para evitar fallos o errores de cálculo. Cuando se aplica la ley de Ampere basta con seleccionar los materiales conductores afectados con una circulación de corriente la cual se ha de conservar por principio físico. Una vez seleccionados el

programa genera unos subnodos correspondientes a la física en consecuencia con lo aplicable al modelo y los dominios a los que afecta. Cuando se aplica aislamiento magnético, basta con seleccionar la frontera en la que queremos que el campo magnético no vaya más allá. Esta opción es ideal para el efecto de la jaula de Faraday planteada en el modelo, ya que si se define esta misma con este concepto de aislamiento magnético, actúa como lo haría una jaula de Faraday real, evitando que el campo magnético se escape al exterior.

Dado que cada física interactúa con el modelo de una forma u otra, a veces es necesario aplicar a las físicas el concepto de elementos finitos o no. El nodo de elementos finitos le indica al sistema diseñado que a partir de la frontera que se definen los elementos finitos las dimensiones del entorno tienden a infinito. Es decir, se establece una zona a partir de la cual se considera que hay un espacio infinito que rodea al modelo a estudiar, lo que hace que el programa calcule únicamente lo que hay encerrado en un espacio definido (finito) y desprecie todo lo demás que esta fuera de determinado espacio. *Comsol Multiphysics* es más particular que otros programas de elementos finitos y no define la frontera de elementos finitos como una superficie, sino que necesita establecer ese concepto en una progresión a lo largo de dos superficies. En otras palabras, la jaula de Faraday que limita el sistema es a partir de la cual se empieza a establecer dichos elementos finitos, pero no se establecen si no hay un recorrido que le indique al programa que en un tramo dado se tiende desde la jaula hacia infinito. Dicho recorrido necesario se consigue dándole un grosor a la jaula de Faraday. El grosor tomado ha sido de 500 mm. De esta forma se crean dos cubos concéntricos, uno de 2,5 m y el otro de 3 m tal y como se puede apreciar en la figura 8:

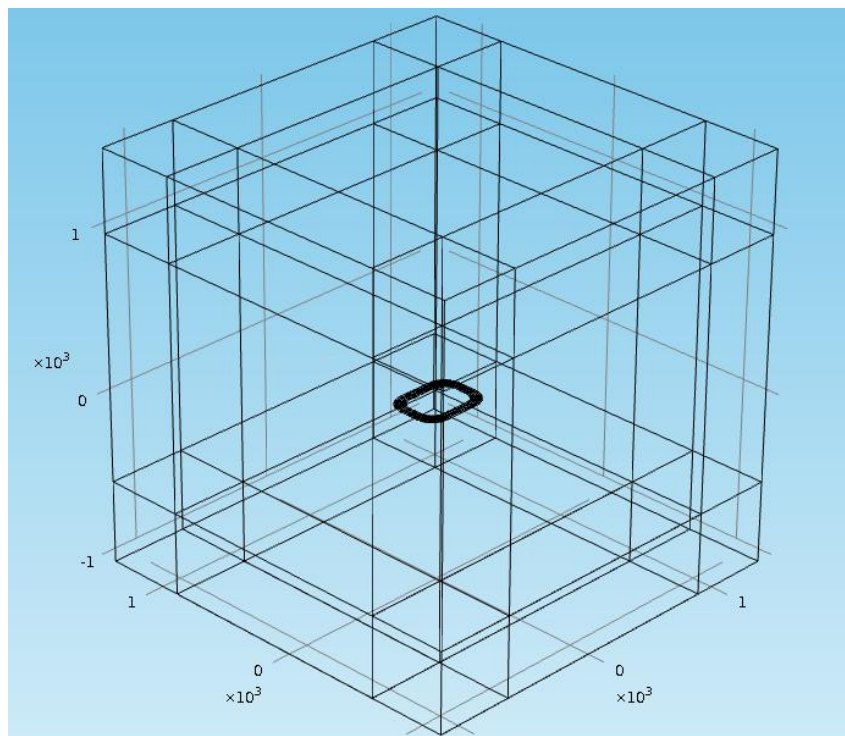


Figura 8: Cubo con grosor para aplicar elementos finitos.

De esta forma, el grosor establecido entre las superficies paralelas del cubo le permite al programa establecer que desde la superficie interior hacia la exterior las distancias de separación tienden a infinito y por lo tanto solo analizará y calculará los elementos que se encuentren dentro del cubo de 2,5 m.

Así pues, para las físicas aplicadas, resulta necesario añadir elementos finitos a la de campos eléctricos y magnéticos, ya que la ley de Ampere se aplica solo a los conductores de las bobinas pero el campo creado por ambas dos podría salir más allá de los límites de la jaula de Faraday, ya que no aplica aislamiento magnético. Por tanto, como hay que definir un límite robusto y libre de errores, es necesario aplicar este sistema. Por el contrario, para las físicas de campos magnéticos no es necesario aplicar elementos finitos, ya que es posible aplicar lo comentado anteriormente de aislamiento magnético a la propia jaula de Faraday, lo que aísla por completo el sistema respecto al exterior y sus fronteras quedan perfectamente definidas.

2.4 MALLADO

El mallado es otra parte fundamental del programa totalmente necesaria para poder ejecutar los cálculos. Mallar consiste en tomar todos los elementos que conforman el sistema a analizar por el programa y cubrirlos con una serie de triángulos entrelazados por los vértices que se distribuyen por toda su superficie. Si el sistema diseñado es un sistema en 3D, en vez de distribuir triángulos se distribuyen tetraedros, los cuales van llenando el volumen de todos y cada uno de los elementos del sistema. Este mallado le sirve al programa como referencia de cálculo, ya que todos los puntos y aristas que conforman la distribución de dichos triángulos o tetraedros le sirven al programa como referencia para poder calcular las ecuaciones impuestas por las físicas. El mallado puede hacerse automático o el usuario puede decidir su tamaño desde un rango establecido por el programa que va desde extremadamente grande (*extremely coarse*) a extremadamente fino (*extremely fine*), conformando una escala de 9 rangos diferentes. Otra opción es definir el mallado de forma manual, para lo cual hay que introducir diversos parámetros solicitados por el programa. Esta última opción no es muy recomendable, ya que tiene tendencia a dar errores generalmente porque los datos no están bien introducidos o no corresponden correctamente con el modelo.

El mallado puede hacerse uniforme por todo el sistema a analizar o puede separarse por partes y definir para cada elemento o grupo de elementos del sistema un mallado específico. Para ello es necesario añadir en cada caso el correspondiente nodo de tamaño relacionado con el mallado del elemento o elementos del sistema en cuestión haciendo clic derecho en el nodo de mallado (*mesh*) y seleccionando tamaño (*size*). Para definir el mallado por elementos se puede hacer manualmente o utilizar el mismo sistema de agrupaciones comentado anteriormente. Se puede elegir distinto tipo de

mallado seleccionando la opción más operaciones (*more operations*) en el menú del nodo de mallado. A continuación se muestran figuras de algunos de los elementos del sistema mallados con diferentes rangos:

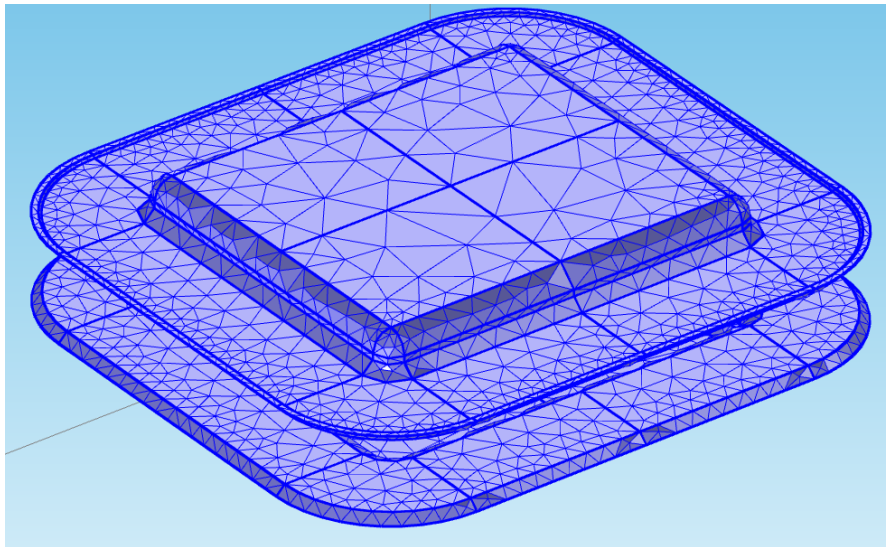


Figura 9: Sistema con mallado extremadamente grande.

Como se puede apreciar en la figura 9, en las zonas planas y homogéneas, el mallado se reparte de forma automática pero se dispersa mucho más que en las zonas donde hay giros o curvaturas, en las que hay mayor concentración de mallado, como se puede apreciar en los extremos de las chapas de aluminio. El mallado consta en este caso de 22428 elementos.

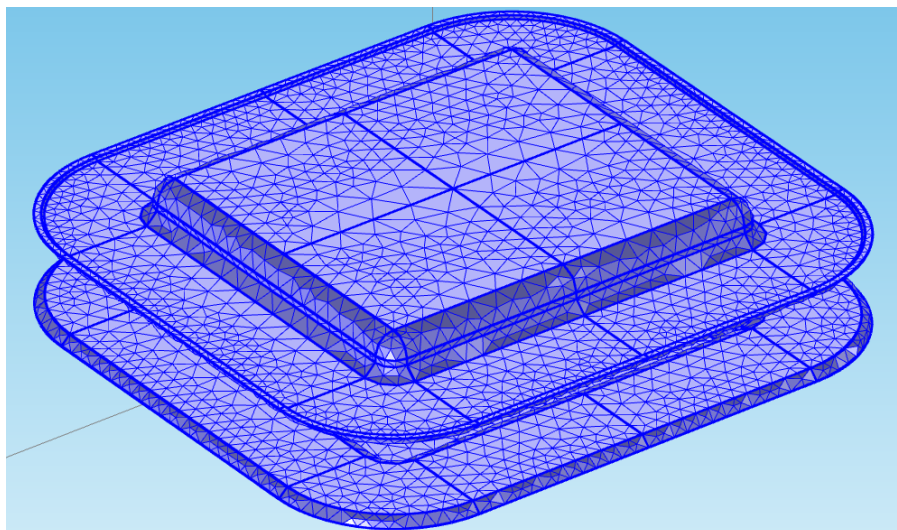


Figura 10: Sistema con mallado normal.

En la figura 10 se puede observar como el mallado ha aumentado de forma general, concentrándose todavía más en los extremos y curvas y en la parte plana y homogénea se comienza a ver un aumento del número de elementos a lo largo de la superficie. El mallado consta en este caso de 33980 elementos.

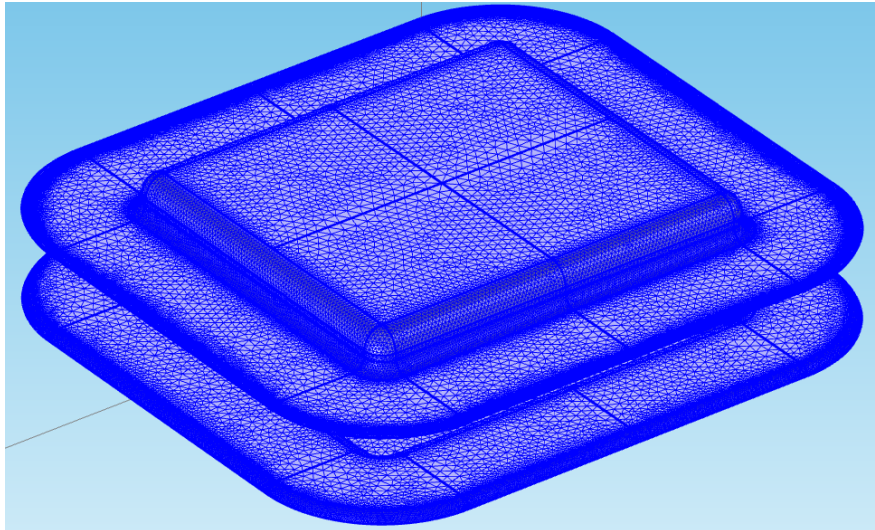


Figura 11: Sistema con mallado extremadamente fino.

La figura 11 muestra el mallado más fino posible, en el cual vemos una distribución uniforme por las zonas homogéneas y una concentración excesiva en las esquinas y extremos de las chapas. En este ultimo caso, el mallado consta de 8745450 elementos.

Como se puede apreciar gracias a esta comparación, conforme más fino se hace el mallado en el sistema, más aumenta el número de elementos que lo conforma. Por ello, para modelos complejos en 3D, es necesario crear y distribuir diferentes tamaños de mallado por cada uno de los elementos del modelo y poder especificar la precisión que queremos en cada uno de ellos. Hay que tener en cuenta que cuantos más elementos se dispongan en la malla, mayor precisión se obtiene en la solución, pero por el contrario, mayor cantidad de grados de libertad se toman como cálculo para la solución y según que PC se esté utilizando para el cálculo, un mallado muy fino será totalmente inviable e imposible de calcular. Es necesario destacar que en los modelos 3D se generan tetraedros por todo el volumen del elemento mallado, por lo que no solo son los triángulos que se ven por la superficie del mismo, sino que hay tetraedros en el interior del mismo, que aunque no estén a la vista, conforman parte del grupo de elementos totales. También hay que tener en cuenta que es necesario mallar todo el aire que afecta al modelo, por lo que el número de elementos totales de la malla puede ascender a gran valor si no se selecciona el mallado por partes.

2.5 ESTUDIOS Y SOLUCIONES

Los estudios (*study*) añadidos al programa permiten analizar el sistema gracias a todos los nodos definidos anteriormente. El nodo de materiales aporta las características físicas de cada elemento, el nodo de físicas implementa las condiciones a cumplir y las ecuaciones que se han de analizar en el sistema y el mallado proporciona al programa puntos de referencia a partir de los cuales desarrollar los cálculos. Con el nodo de estudios se puede definir como se desea que se calcule el sistema y en que condiciones (a tiempo dependiente, estacionario, variable...). Para los cálculos en corriente continua se utiliza un estudio estacionario (*stationary*). El estudio concluye cuando las iteraciones que realiza el programa llegan a un error menor de 10^{-3} . Dichas iteraciones se muestran en una gráfica que evoluciona a lo largo del tiempo. Para los cálculos en corriente alterna se utiliza un estudio de dominio de la frecuencia (*frequency domain*). Con este estudio se puede definir la frecuencia con la que se desea que el sistema trabaje y también se pueden implantar sistemas con incremento de frecuencia definiendo la frecuencia inicial, la final y el incremento de la misma a lo largo del tiempo (*steps*).

Para añadir un estudio al sistema basta con hacerlo desde el asistente de inicio o hacer clic derecho en el nodo estudio (*study*) que figura en el *Model Builder* a la izquierda de la ventana principal y dentro de él seleccionar pasos de estudio (*study steps*). Un estudio puede estar formado por un solo paso o por una sucesión de los mismos. De esta forma, se pueden enlazar estudios dependientes del tiempo con estudios estacionarios o estudios dependientes de la frecuencia. Para ejecutar el estudio basta con dar al botón calcular (*calculate*) para que comiencen las iteraciones. Lo primero que hace el programa es evitar elementos que alteran la forma del sistema, posteriormente calcula los grados de libertad con los que trabajar y por último comienzan las iteraciones. Cuando el error es mínimo se considera que se ha obtenido solución y que el resultado es válido. Hay que tener en cuenta que el resultado será más preciso cuanto más fina sea la malla impuesta en el sistema.

En el nodo resultados (*results*), también conocido como zona de postprocesado, se pueden manipular el aspecto visual de la solución final, se pueden calcular otros valores que vengan determinados por el valor principal calculado y se puede cambiar todo tipo de colores, acabados, efectos y rangos de valores. Hay que tener en cuenta también que el programa puede dar soluciones espaciales (como la distribución de campo magnético) pero para ello necesita planos en los que plasmar dichas soluciones. Es decir, no puede trazar esferas, líneas o formas que describan en el espacio el valor del campo. Si se puede utilizar elementos que muestren espacialmente como actúa una distribución, como flechas o conos, pero estos no pueden aportar un valor de la magnitud calculada. En este mismo nodo de resultados se pueden exportar (*export*) a otro formato (como Matlab) y hacer informes con los datos obtenidos (*report*).

3 CALCULOS

3.1 PLANTEAMIENTO DE LOS CALCULOS

Aunque el objetivo principal es comprobar y controlar la distribución de campo magnético en el espacio y su efecto en el entorno, se solicitó también calcular tres valores fundamentales que afectan directamente a dicho campo magnético. Estos son: Inductancia de la bobina primaria L_1 , inductancia de la bobina secundaria L_2 , y coeficiente de inducción mutua M_{12} . Como se tienen referencias teóricas (las obtenidas en el modelo 2D de FEMM y los cálculos en Mathlab realizados por el director de proyecto) y medidas precisas del sistema real (el propio sistema montado en CIRCE), se pueden contrastar los resultados obtenidos en *Comsol Multiphysics* del modelo 3D con los obtenidos en 2D y el modelo real en funcionamiento.

Los cálculos se han realizado en modelos separados para simplificar el modelo físico lo más posible y ceñirlo al calculo deseado. De esta forma, si por ejemplo solo se ha de calcular la inductancia de una de las bobinas, se suprime todo lo demás del entorno y con ello se simplifica mucho más el mallado, lo que aumenta mucho más la velocidad de cálculo. En total se han realizado 9 archivos con modificaciones del modelo completo para realizar todos los cálculos y comprobaciones necesarias. Así pues, los archivos que contienen dichos cálculos son los siguientes:

- Calculo L_1 con c.c.
- Calculo L_2 con c.c.
- Calculo M_{12}
- MF producido por primario.
- MF producido por secundario.
- MF producido por ambas bobinas.
- MF de bobinas + chapas Al
- MF de bobinas + ferritas
- MF sistema completo (bobinas + chapas Al + ferritas)

Con estos archivos es mucho más sencillo acceder al resultado deseado con solo abrir el que interese en cada momento. Existe la posibilidad de realizar todos los cálculos en un archivo, pero tiene la desventaja de que el modelo físico no se puede simplificar y por lo tanto el mallado afecta a todos los elementos independientemente de que el calculo afecte en ellos o no. Además siempre es necesario cambiar la configuración para obtener un resultado u otro, y si se aplica todo en conjunto, puede resultar más complejo que si se hiciera por separado. Si todo ello se encontrara en un solo archivo, otro problema adicional sería el gran tamaño del archivo (en megas) y la cantidad de memoria que requeriría para los cálculos, que sería mucho mayor que cotejar cada caso por separado.

3.2 CÁLCULO DE LA INDUCTANCIA L_1

El cálculo de la inductancia de primario L_1 , al igual que el de la inductancia L_2 es necesario hacerlo con las físicas de campos eléctricos y magnéticos (*electric and magnetic fields*) ya que es la única física que una vez realizados los cálculos es capaz de obtener las magnitudes eléctricas de resistencia, capacitancia e inductancia de un circuito eléctrico. La desventaja es que solo es aplicable corriente continua para realizar estos cálculos, ya que esta física no se puede poner a trabajar en altas frecuencias. Por ello, el cálculo de ambas inductancias no es tan preciso como se desearía, aparte de que depende mucho el mallado introducido en el sistema.

El proceso de cálculo es sencillo. Del modelo completo diseñado se deja únicamente la bobina principal y todo lo demás se elimina para agilizar los cálculos y disminuir el mallado. Como se aplica la Ley de Ampere gracias a las físicas de los campos eléctricos y magnéticos, es necesario aplicar lo antes mencionado en el apartado 2.3 de elementos finitos, dándole un cierto grosor al cubo que representa la jaula de Faraday y la distancia necesaria para que la frontera del sistema tienda a infinito. Como la excitación ha de ser en continua, se pone para cada conductor un terminal de corriente y otro de referencia, y se hace circular por ellos la corriente de funcionamiento nominal del sistema real (441 A). El modelo queda de la siguiente manera:

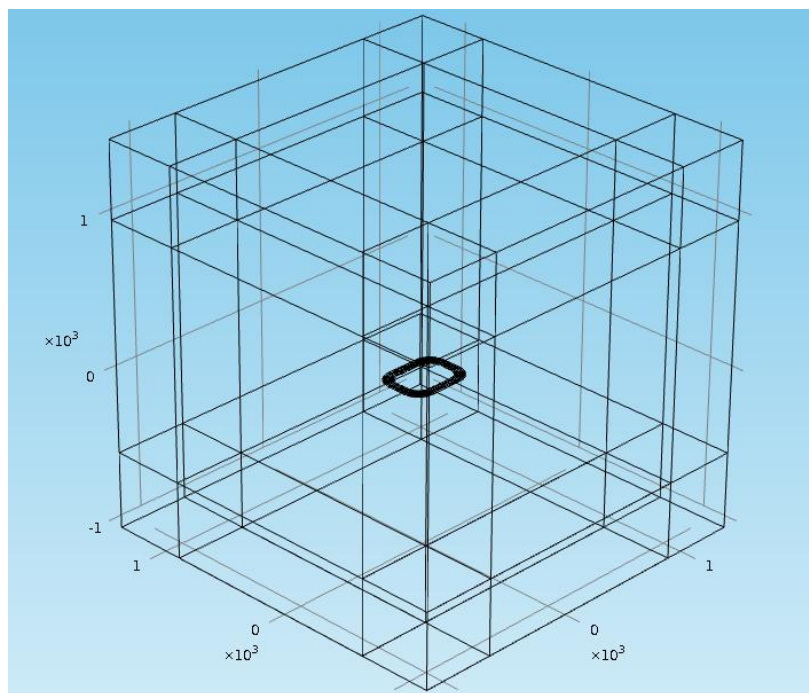


Figura 12: Modelo para cálculo de L_1

Se realizó el cálculo con un mallado “más fino” (*finer*) uniforme por todo el sistema. El estudio aplicado es estacionario (*stationary*) debido a que el cálculo es con corriente continua y esta no tiene variación con el tiempo. Una vez que se obtienen resultados, los valores eléctricos se pueden obtener desde el nodo resultados (*results*) en

el subnodo valores derivados (*derived values*) y dentro del mismo seleccionando evaluación global (*global evaluation*). De esta forma se obtiene un valor de inductancia de la bobina primaria de 15,1936 microHenrios. El valor difiere un poco del real, pero hay que tener en cuenta que es una simulación en 3D que requiere una estación de trabajo y dicha inductancia solo se puede obtener al aplicar corriente continua, no alterna, por lo que el cálculo no es tan preciso como se desearía. Aun así, la diferencia es de aproximadamente un 10% (19,3 μH es el valor real medido). Dicho modelo, cálculos y resultados se pueden encontrar en el archivo “Calculo L1 con c.c.”

Valor de inductancia de primario

15,1936 μH

3.3 CÁLCULO DE LA INDUCTANCIA L_2

El proceso de cálculo para la inductancia de la bobina secundaria es idéntico al utilizado para la bobina primaria. Las físicas utilizadas y el mallado son los mismos. Lo único que difiere es el modelo, que presenta únicamente la bobina secundaria y elimina todo lo demás del entorno, simplificando de nuevo cálculos y mallado. Se mantienen las distancias originales respecto al suelo de la jaula de Faraday, únicamente se suprimen los elementos que no interesan para este cálculo en concreto. El modelo de cálculo queda como aparece en la figura 13:

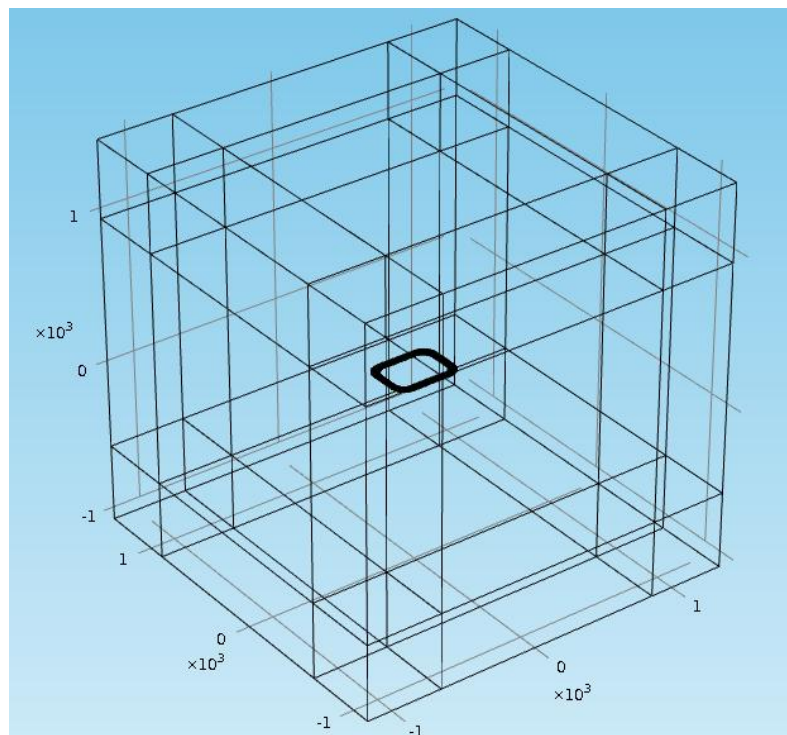


Figura 13: Modelo para calculo de L_2

De nuevo, las condiciones de cálculo y la forma de obtener los resultados es idéntica al modelo anterior. El valor de inductancia de la bobina secundaria es 113,4104 microHenrios. De nuevo el valor vuelve a diferir levemente del real, aparentemente por los motivos anteriormente descritos. Dicho modelo, cálculos y resultados se pueden encontrar en el archivo “Calculo L2 con c.c.”

Valor de inductancia de secundario

113,4104 μ H

3.4 CÁLCULO DE INDUCCIÓN MUTUA M_{12}

El cálculo de inducción mutua es un valor clave para conocer la transferencia de potencia que se da entre ambas bobinas. Se entiende por inducción mutua M_{12} el flujo magnético que crea la bobina de primario y llega a la bobina de secundario. En otras palabras, el flujo que le aporta una bobina a otra. Como ambas bobinas están acopladas y en resonancia, el coeficiente de inducción mutua es una constante, ya que es igual el flujo que influye el primario sobre el secundario, que el secundario sobre el primario. De ahí se obtiene que $M_{12} = M_{21} = M$.

El procedimiento para el cálculo es quizá el más complejo de todos los que hay que realizar. En el modelo se tienen ambas bobinas, la de primario y la de secundario, y todo lo demás se elimina para simplificar cálculos y agilizar el proceso. La física a aplicar es la de campos magnéticos (*magnetic fields*). Como la propia física permite aplicar aislamiento magnético, no es necesario aplicar elementos finitos sobre este modelo. De forma que se aplica el aislamiento magnético a la jaula de Faraday y el sistema queda definido para su estudio. Para poder realizar el cálculo correctamente, hay que excitar la bobina primaria con la corriente nominal y la secundaria mantenerla sin excitación, para ver únicamente el flujo que produce la bobina primaria y llega a la secundaria. El flujo a calcular es el flujo magnético que atraviesa una superficie dada, en webers. De forma que, como no hay ninguna superficie definida en el sistema, resulta necesario plantear un rectángulo de 30x40 cm (que es el tamaño de referencia central) y darle un grosor mínimo (de 1 cm por ejemplo) y una separación mínima respecto a los conductores (1 cm también) para que una vez realizado el cálculo y obtenidos los resultados, se pueda calcular el flujo que atraviesa esa superficie para obtener los webers que llegarían a la bobina secundaria excitando únicamente con el primario. En las figuras 14 y 15 se muestra el diseño del modelo, una detallando ambas bobinas y el rectángulo introducido para utilizarlo como superficie de referencia y una vista general del conjunto.

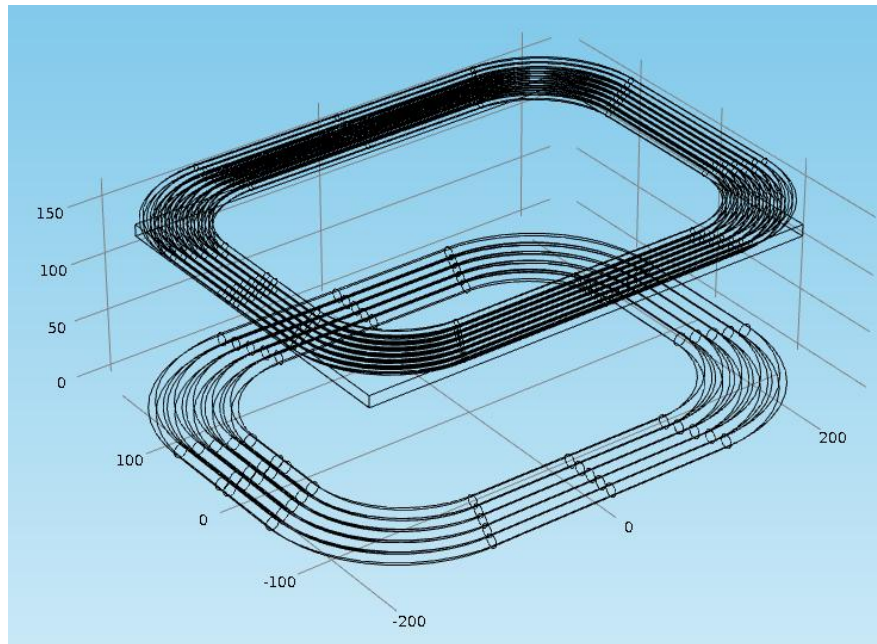


Figura 14: Detalle del modelo con el rectángulo añadido.

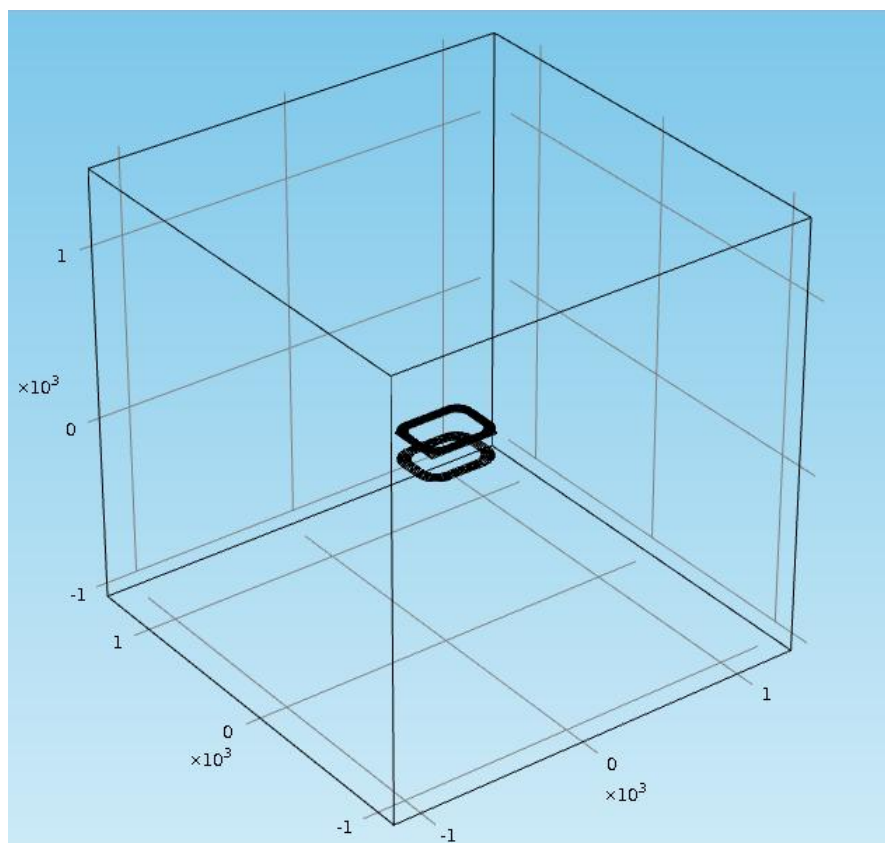


Figura 15: Modelo completo para el cálculo de M_{12}

Para el cálculo de la inducción mutua es necesario poner al sistema en las condiciones nominales de trabajo del sistema de carga real. Para ello, es necesario utilizar el nodo de circuitos eléctricos (*electric circuit*) dentro de las físicas, el cual permite añadir excitaciones y elementos típicos de circuitería. Para establecer una comunicación entre ambos nodos de físicas, es necesario establecer un código de

conexiones mediante nodos que permita al programa entender donde va cada elemento y que orden llevan. Para ello, lo primero que hay que hacer es establecer unos puertos (*lumped port*) en el propio sistema. Para añadirlos, se selecciona desde la física de campos magnéticos (*magnetic fields*) haciendo clic derecho sobre ella la opción *lumped port*. En esta opción se define una zona no conductora que se halle entre dos elementos conductores y cuya distancia de separación sea mucho menor a la longitud de onda que va a circular por el mismo. Esta selección se realiza mediante las fronteras del sistema, por lo que el conductor aparece descompuesto con cuatro fronteras (una por cada cuarto de círculo que forma el conductor). Así pues, se seleccionan las fronteras que conforman el espacio de alimentación dejado en cada conductor, haciendo un puerto de conexión por conductor. No se pueden dejar de forma uniforme porque el programa solo puede aplicar la opción de puerto uniforme para modelos de 2D o modelos que posean solo 2 elementos de puerto (no 4 como este caso). Así pues es necesario ponerlo en modo definido por el usuario (*user defined*) y poner la anchura total del puerto, que es la anchura de la zona no conductora, la altura total, que es el diámetro del conductor y el sentido en el que el puerto debe ir orientado. Se selecciona que van a ser terminales de tipo circuito (*terminal: circuit*), para poder establecer conexión con el nodo de circuitos eléctricos. A cada puerto se le asigna un número de puerto por defecto, que será el número de referencia para hacer conexión con el resto del circuito.

Una vez tenidos los puertos de alimentación definidos, se pueden añadir las fuentes de corriente desde las físicas de circuitos eléctricos. Para ello, se hace clic derecho sobre el nodo circuitos eléctricos (*electrical circuit*) y se selecciona fuente de corriente (*current source*). Así aparece un nodo secundario que representa la fuente de corriente, la cual se puede seleccionar como fuente de corriente continua, alterna o senoidal. Se selecciona corriente alterna y se introduce el valor de la corriente eficaz, ya que cuando el programa trabaja con valores alternos o senoidales, el valor de las fuentes ha de ser el valor eficaz (no el valor de pico), es decir, dividir entre raíz de dos para todos los valores de excitación. Para los elementos del circuito eléctrico es necesario definir los puntos de conexión. Por defecto en esta física siempre aparece el terminal 0 que es el terminal de referencia o masa. Estos terminales se definen en la ventana de ajustes (*settings*) de cada una de las fuentes. Así pues, para las fuentes de corriente alterna es necesario introducir como primer valor en los nodos de conexión el número de referencia que tenga el puerto definido anteriormente en la física de campos magnéticos. Así el programa entiende que la fuente de corriente esta conectada al puerto y a masa.

Para que el programa sea capaz de realizar los cálculos, es necesario que se cumpla la ley de Ohm, por ello, es necesario añadir una resistencia genérica desde el propio nodo de circuitos eléctricos. La resistencia introducida es únicamente simbólica, y para que no afectara en escala a los posibles cálculos se introdujo de $1\ \Omega$ de valor. La conexión de la misma se hace también numéricamente por nodos de conexión, con lo que se colocan valores numéricos que representen que la resistencia esta entre el

generador de corriente y el dispositivo siguiente a conectar, el cual es un elemento ficticio que permite relacionar el sistema con el sistema de cálculo de elementos finitos llamado *External I vs U*. Este último dispositivo tendrá conexión con uno de los extremos de la resistencia y con la referencia, de forma que así se consigue cerrar el circuito y se puede suministrar corriente al sistema. Que el sistema este cerrado de esta forma no implica que no pase corriente por la bobina, ya que este circuito añadido se conecta con el puerto de alimentación de cada espira de la bobina, por lo que la corriente fluye tanto por el circuito ficticio como por la bobina principal a alimentar.

Para el cálculo correcto de este sistema el estudio empleado es en dominio de la frecuencia (*frequency domain*) en el cual se define la frecuencia a la que se desea trabajar (los 18000 Hz) y se ajustan los parámetros de iteración para que calcule más rápido y sin error desde el nodo estudio 1 (*study 1*) seleccionando el subnodo configuración de la solución (*solver configurations*) y dentro de él, solucionador 1 (*solver 1*). Una vez en él, se accede al solucionador estacionario 1 (*stationary solver 1*) y dentro de él se selecciona el nodo iterativo 1 (*iterative 1*) dentro del cual se modifica en la ventana de ajustes (*settings*) se elige de solucionador (*solver*) BICGStab y la condición previa de cálculo (*preconditioning*) se selecciona derecha (*right*) en vez del que aparece por defecto (*left*). El programa calculará con las físicas introducidas y los parámetros establecidos el campo magnético en Teslas que se genera producido por la bobina principal, que es la única bobina excitada. En principio este valor no nos interesa a priori, pero es necesario que lo calcule para poder trabajar con la superficie que se ha introducido bajo el secundario para poder calcular la densidad de flujo magnético que la atraviesa. Así pues, para calcular dicho valor, se selecciona el nodo resultados (*results*) y desde dentro de él, se seleccionan valores derivados (*derived values*), se hace clic derecho sobre él y se selecciona integración (*integration*). Con esta integración elegimos la superficie en la cual queremos integrar el valor de campo magnético para poder calcular el flujo que la atraviesa en Webers. Aquí entra en acción el rectángulo introducido en el sistema, cuya superficie es la que hay que integrar para calcular dicho valor. El resultado es directo y se obtiene $2,8333 \cdot 10^{-4}$ Wb. A continuación se desea pasar dicho valor a Henrios para poder comprobarlo con los valores reales y los calculados con el *FEMM* de forma que es necesario aplicar la siguiente fórmula:

$$L = \frac{\varphi * N}{I}$$

Siendo φ el flujo magnético en Webers que genera la bobina principal sobre la bobina secundaria, N el número de espiras de secundario e I la corriente que circula por el primario. De esta forma se obtiene:

$$L = \frac{2,8333 * 10^{-4} * 13}{441} = 8,352 \mu H$$

El valor real medido es de $8,68 \mu H$, en este caso es comprensible que salga un poco menos, ya que la inductancia de las bobinas también sale menor a la real y al tener

menos inductancia, la inducción mutua también ha de ser levemente menor, por lo que los cálculos mantienen una coherencia lógica. Todo el proceso descrito se puede encontrar en el archivo “Calculo M12 (8,352microH)”. En el mismo se encuentran todos los parámetros de fuentes de corriente, resistencias, módulos de adaptación y puertos de alimentación para la bobina secundaria por si interesa hacer el cálculo inverso (M_{21}) u otro tipo de comprobación. Para activar unos y desactivar otros basta con hacer clic derecho sobre el que interese y seleccionar activar (*enable*) o desactivar (*disable*).

3.5 CÁLCULO DE CAMPOS MAGNÉTICOS

El cálculo de los campos magnéticos es la parte que más minuciosamente se ha tratado y se ha analizado de diversas formas. Primeramente se ha analizado el campo magnético creado por la bobina de primario, posteriormente el creado por la bobina de secundario y finalmente con ambas bobinas. Para seguir haciendo pruebas y comprobar la distribución de campo magnético según los elementos introducidos en el sistema y manteniendo las dos bobinas trabajando en condiciones nominales, se calcula el campo magnético introduciendo únicamente ferrita en el sistema, luego las chapas de aluminio y al final ambos elementos a la vez. A continuación se muestra cada uno de los modelos y el campo magnético obtenido.

3.5.1 CAMPO MAGNÉTICO CREADO POR PRIMARIO

Para analizar el campo magnético creado por la bobina primaria se eliminan todos los elementos del sistema excepto la bobina primaria. El sistema en cuestión se mantiene encerrado en la jaula de Faraday en las mismas condiciones y a la misma distancia. La física aplicada es la de campos magnéticos, por lo que se vuelve a aplicar aislamiento magnético a la jaula y el sistema queda completamente definido. Se definen los puertos de la forma descrita anteriormente en el apartado 3.4, pero en este caso como solo esta la bobina de primario, se selecciona en los propios puertos (*lumped ports*) tipo de terminal: corriente (*terminal type: current*) y se define en ellos mismos la corriente que ha de circular por el sistema, los 441 amperios, de forma que no es necesario añadir circuitos externos y el modelo queda más simplificado. El mallado se hace homogéneo en todo el sistema con el rango “más fino” (*finer*). El estudio se realiza en dominio de la frecuencia, a 18000 Hz y se aplican de nuevo los ajustes de la solución y el configurador como en el apartado 3.4. Una vez obtenidos los resultados se puede representar el campo magnético creado por medio de láminas dispuestas a diferente altura del sistema. El punto de referencia es a media altura, que servirá para comprobar los valores de los diferentes sistemas de estudio en un mismo punto. De esta forma, el

resultado principal obtenido se muestra en las sucesivas figuras 16 y 17. El campo magnético obtenido en el centro de la lámina trazada es de 13,7699 mT. Se observa que la distribución es concéntrica respecto a la bobina y la escala de colores representa el máximo y el mínimo obtenido en el sistema. La mayor concentración de campo se da en el centro y disminuye conforme se aleja del contorno de la bobina. En que hay ya una cierta separación de la misma, el campo magnético tiende a cero en toda la periferia hasta la propia jaula de Faraday. Si se desplaza la lámina que representa el campo magnético se observa que conforme se aproxima a la bobina el campo aumenta enormemente, ya que este varía en función del cuadrado de la distancia de separación. Por ello, un mínimo cambio en la distancia de medición del campo magnético puede dar una variación sustancial del valor del mismo.

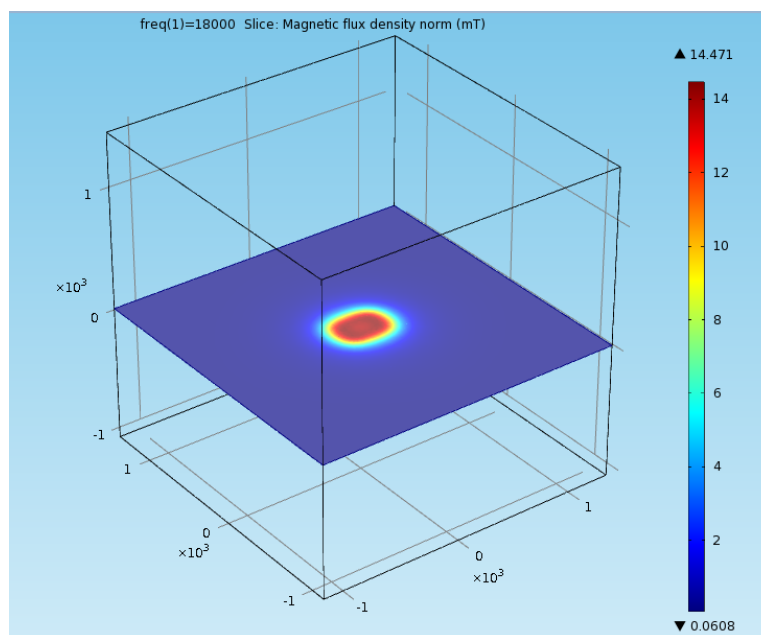


Figura 16: Campo magnético producido por la bobina de primario.

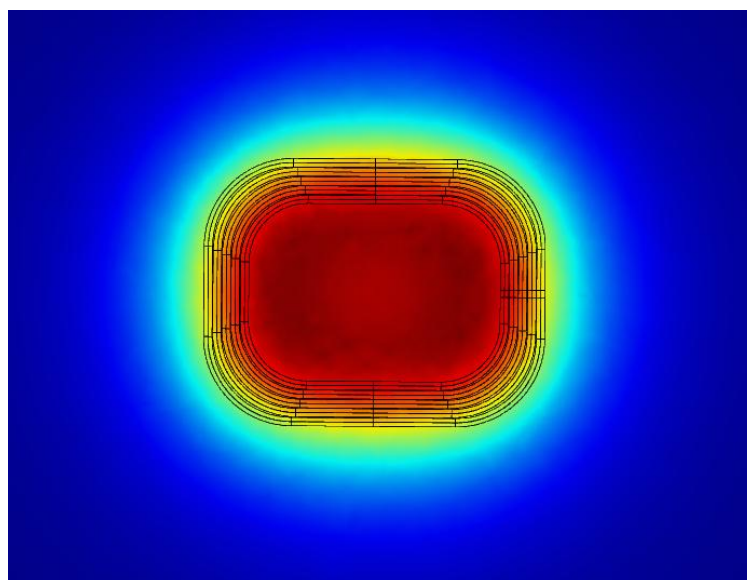


Figura 17: Detalle del campo magnético sobre la bobina de primario.

Como valores máximos y mínimos captados por el programa en este planteamiento son 14,471 mT y 0,0608 mT respectivamente. La altura del plano se puede variar desde la ventana de ajustes del plano (*settings*) en la sección datos del plano (*plane data – point*) y variar los parámetros x, y, z respectivamente. Estos planos representan el campo magnético que se obtiene a distintas distancias en paralelo a las bobinas. Si cambiamos el plano poniendo sus puntos en el origen y la normal cambiándola de eje, podemos obtener el campo que aparece perpendicular a los conductores, el cual es de gran magnitud e interesa conocerlo para ver su distribución y sus valores máximos, para ver como es posible que cumpla normativa.

De esta forma si se plantea un plano perpendicular, el programa toma unos valores máximos de 124,25 mT y es necesario manipular el rango de escalas para apreciar correctamente como se distribuye el campo por todo el espacio. Si se establece un rango de valores entre 1 y 20 mT se puede apreciar la distribución planteada en la figura 18:

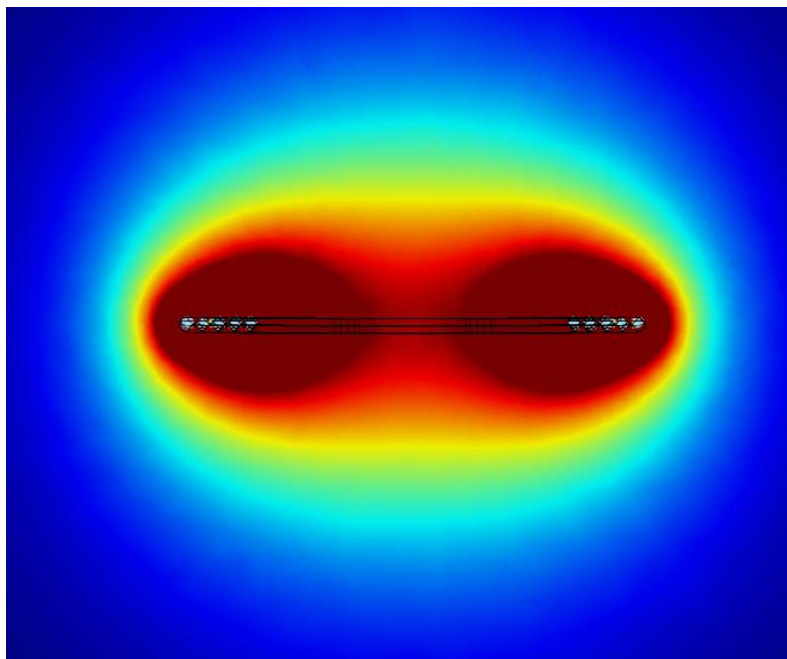


Figura 18: Distribución de campo magnético de la bobina de primario (1-20 mT)

Todas las zonas sombreadas en rojo oscuro implican que superan el máximo valor definido de 20 mT. Si se modifica la escala y se implanta un rango de 1 a 50 mT para ver donde se obtienen los valores máximos, se obtiene la figura 19, en la cual se puede observar que la mayor concentración de campo magnético reside en el entorno de los conductores. Todas las zonas sombreadas en rojo oscuro superan los 50 mT, que justamente son la periferia de los conductores. Conforme aumenta la distancia de separación, el campo disminuye fuertemente. Toda esta información, cálculos y resultados se puede encontrar en el archivo “MF producido por primario”

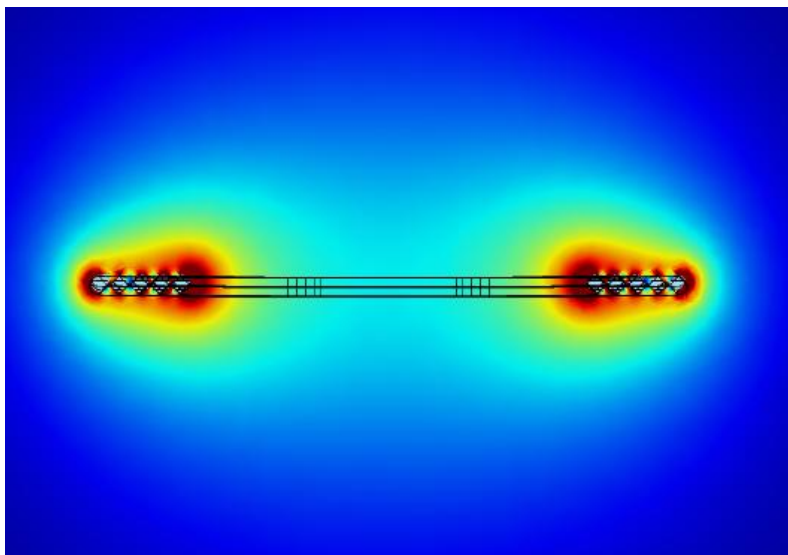


Figura 19: Distribución de campo magnético de la bobina de primario (1-50 mT)

3.5.2 CAMPO MAGNÉTICO CREADO POR SECUNDARIO

Para calcular el campo magnético creado por la bobina secundaria se eliminan todos los elementos del entorno excepto la bobina secundaria. Se mantienen las mismas dimensiones y las mismas distancias. El proceso de mallado y físicas se aplica exactamente igual que en el caso del campo magnético creado por primario, con la excepción de que en este modelo resulta necesario añadir la física de circuitos eléctricos, ya que la corriente de secundario va en 90° de desfase respecto a la de primario y la única forma de añadir dicho desfase es ponerlo de referencia en la fuente de corriente. Por ello, al añadir las fuentes de corriente como se comentó anteriormente (en el cálculo de M_{12}) y el circuito de alimentación, en la propia ventana de cada fuente se introduce el desfase correspondiente en radianes. Una vez realizados los cálculos, se ajusta la lámina de resultados a la mitad de altura, como en el caso anterior, para poder comparar los valores. El resultado principal se muestra en las figuras 20 y 21. El valor de campo magnético que figura en el medio de la lámina es de 5,9511 mT. La distribución espacial es del mismo tipo que en el caso de la bobina primaria, con mayor concentración en el centro de los devanados debido a la superposición de los conductores paralelos dos a dos. Si se establece de nuevo un cambio de plano y se observa la distribución de campo perpendicular a los conductores se puede observar que el programa calcula un máximo de 54,457 mT. Si se modifica la escala para poder observar su distribución y se define entre 1 y 20 mT, se puede observar en la figura 22 como el valor del campo magnético es superior a 20 mT en las zonas periféricas de los conductores que están sombreadas en color rojo oscuro. Si se plantea otra escala, como de 1 a 40 mT, queda de manifiesto en la figura 23 que los valores máximos de campo quedan presentes en los contornos de los conductores.

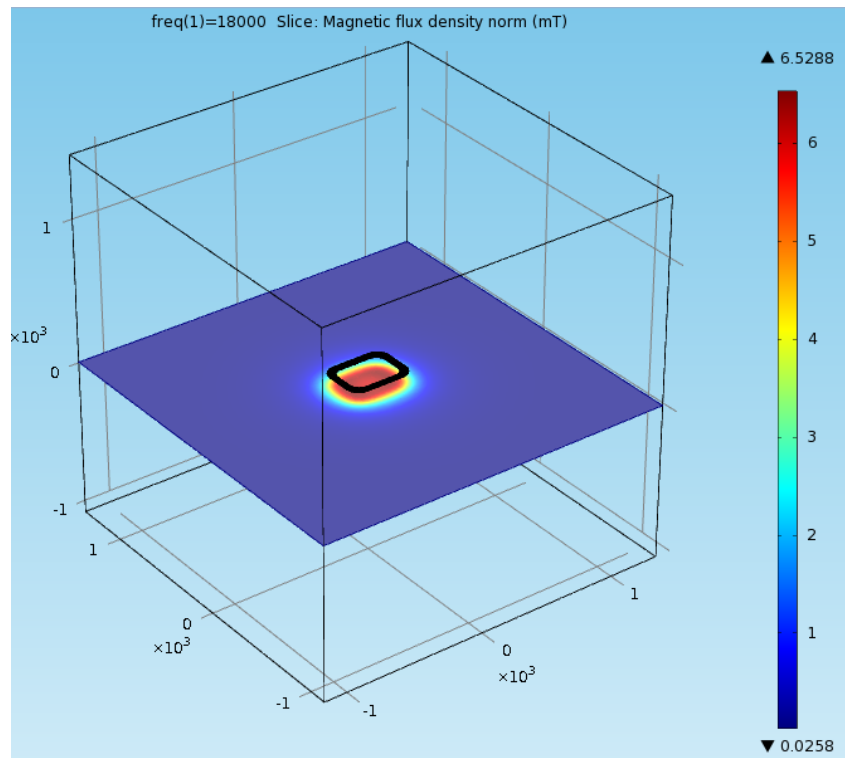


Figura 20: Campo magnético producido por la bobina de secundario.

Como se puede observar en el rango de valores, el programa capta como valor máximo 6,5288 mT y como valor mínimo 0.0258 mT.

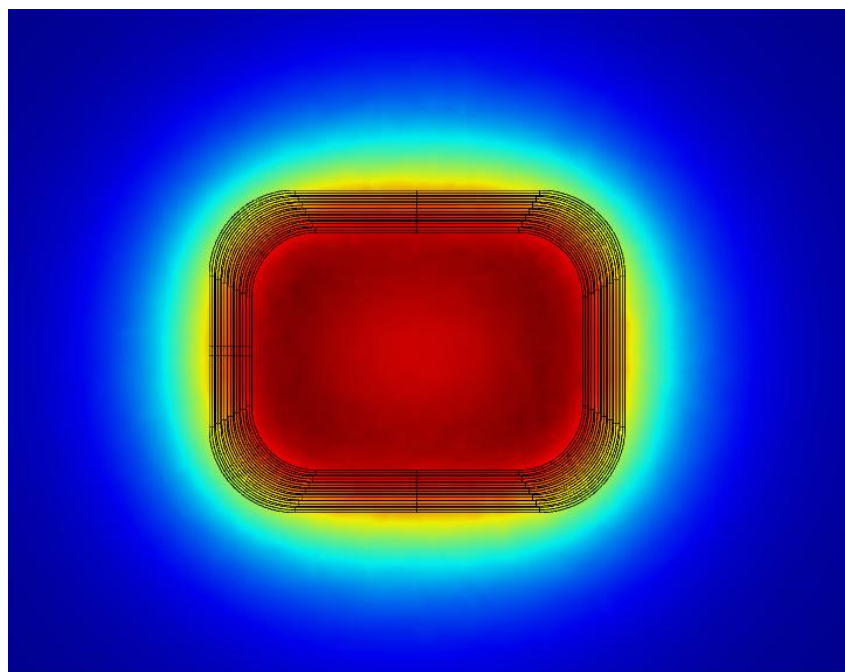


Figura 21: Detalle del campo magnético sobre la bobina de secundario.

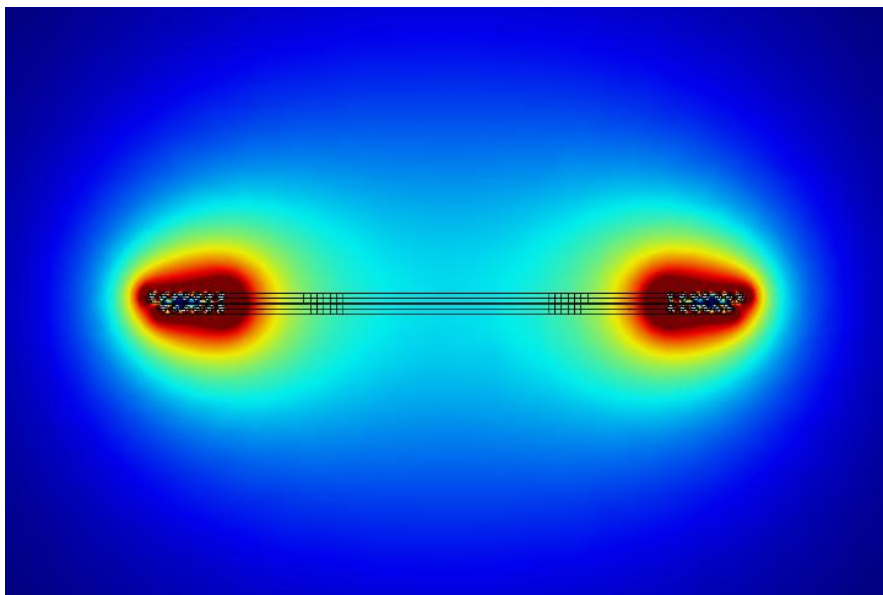


Figura 22: Distribución de campo magnético de la bobina de secundario (1-20 mT)

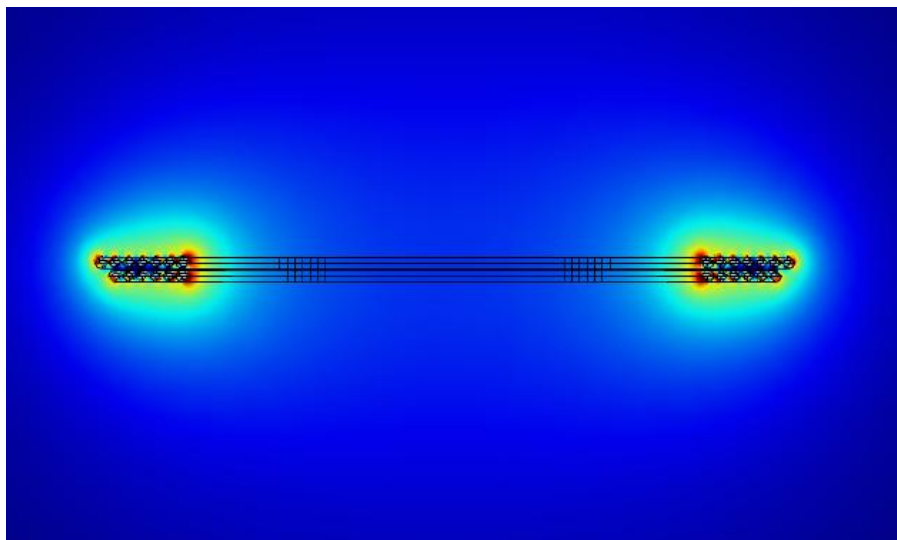


Figura 23: Distribución de campo magnético de la bobina de secundario (1-40 mT)

Toda esta información, cálculos y resultados se puede encontrar en el archivo “MF producido por secundario”

3.5.3 CAMPO MAGNÉTICO PRODUCIDO POR AMBAS BOBINAS

Para calcular el campo magnético que genera el sistema con ambas bobinas funcionando en condiciones nominales se crea un modelo que contenga únicamente ambas bobinas y todos los demás elementos se eliminan. De esta forma se simplifica el mallado y se agilizan los cálculos. Para el análisis y estudio de ambas bobinas conjuntas se utilizan las mismas físicas, mallado y planteamiento que en los dos casos anteriores. Se aplica la física de campos magnéticos y se aplica aislamiento magnético a la jaula de Faraday para definir las fronteras del sistema. Se utiliza la física de circuitos eléctricos para añadir las excitaciones a ambas bobinas. Se define una fuente de corriente por cada conductor, las de primario alimentando a 441 A sin desfase y las de secundario alimentando a 141 A y un desfase de 90° . Se diseña el mismo circuito de alimentación explicado en el apartado 3.5.2 con las resistencias, los elementos de cierre y los puertos de alimentación en cada conductor definidos de forma manual y considerados parte del circuito. Una vez realizados los cálculos y obtenido los resultados, se coloca el plano paralelo a los conductores exactamente a media altura entre ambos, en el mismo punto de referencia que para los anteriores cálculos. El resultado obtenido se muestra en la figura 24:

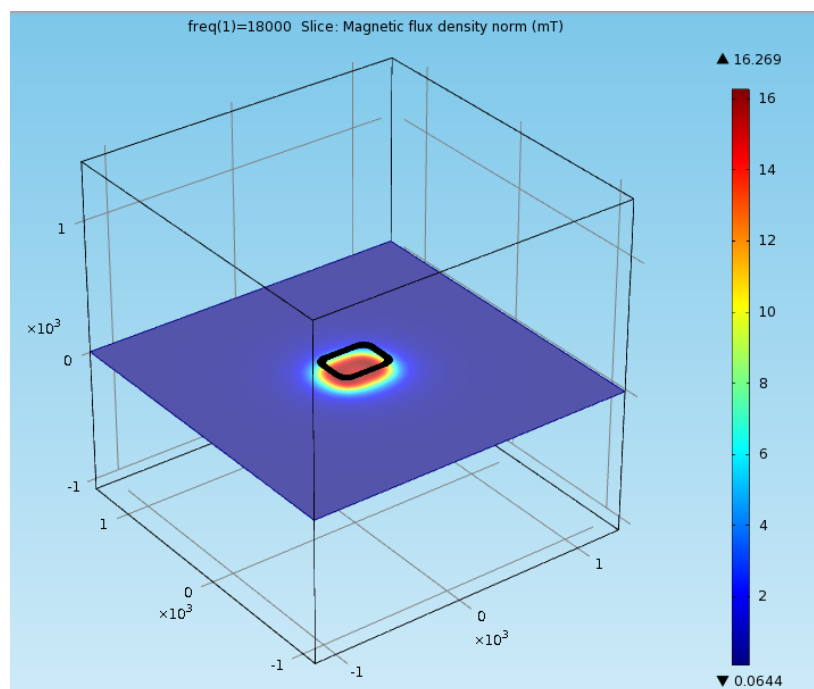


Figura 24: Campo magnético producido por ambas bobinas.

Como se puede apreciar, el rango de valores calculado por el programa muestra 16,269 mT de máximo y 0,0644 mT de mínimo. En el centro del sistema se obtiene un valor de 15,1679 mT. Como se puede observar en la figura 25, la distribución es más homogénea en el hueco central de las espiras que en los dos casos anteriores, debido a la acumulación de campo producido por ambas bobinas.

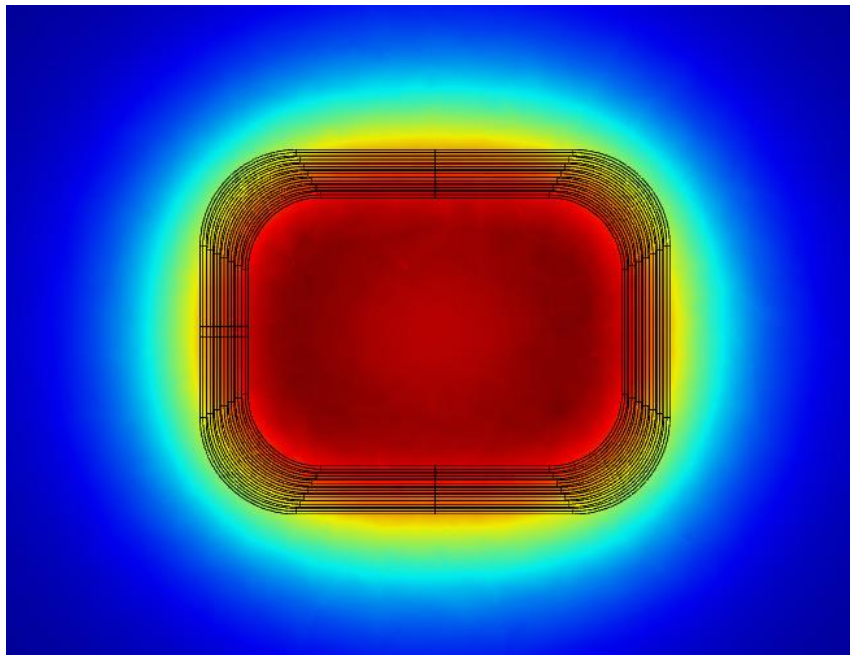


Figura 25: Detalle del campo magnético producido por ambas bobinas.

Si a continuación analizamos el campo magnético que se crea de forma perpendicular a los conductores, cambiando de nuevo el plano de coordenadas, obtenemos un valor máximo de 151,08 mT. Resulta necesario cambiar el rango de escala para mostrar debidamente la distribución de campo magnético en el espacio. Si se introduce un rango de escala entre 1 y 20 mT se obtiene lo que aparece en la figura 26:

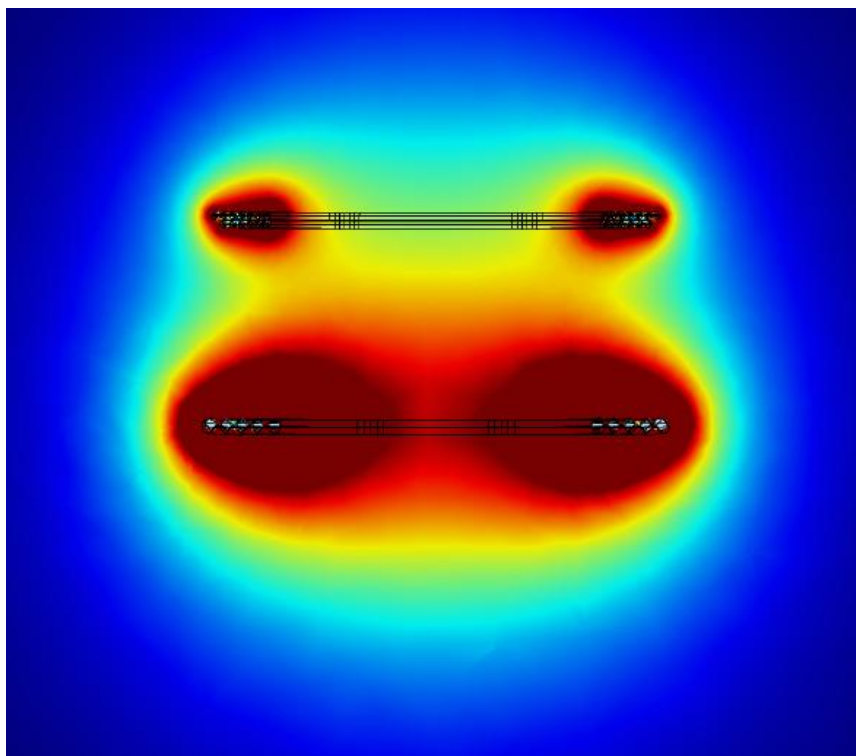


Figura 26: Distribución de campo magnético producido por ambas bobinas (1-20 mT)

Como se muestra en la figura 26, todas las partes sombreadas en rojo oscuro superan los 20 mT. Si se establece un nuevo rango de valores, entre 1 y 50 mT, se obtiene la figura 27:

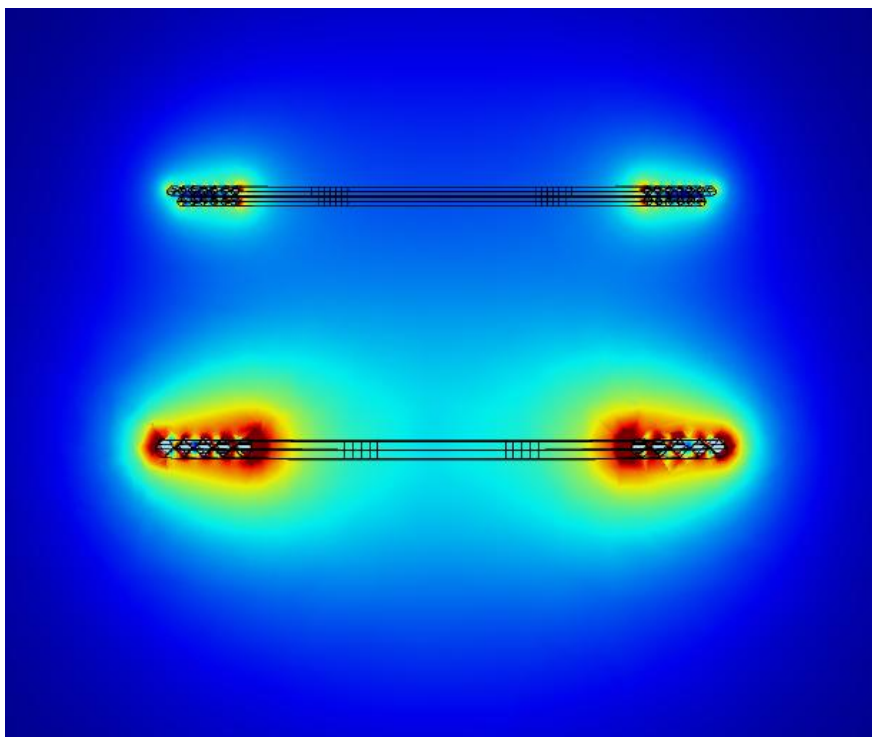


Figura 27: Distribución de campo magnético producido por ambas bobinas (1-50 mT)

Como se puede apreciar en la figura, los mayores valores de campo magnético se concentran en torno a los conductores, como ocurría anteriormente. Ahora bien, como ya se dispone de ambas bobinas funcionando en condiciones nominales, es necesario hacerse la siguiente pregunta: ¿Cumplen normativa tal y como están distribuidas en el espacio? Para ello es necesario comprobar la distribución máxima de campo magnético considerando el máximo permitido por reglamento de 10 μ T. Es evidente que no se va a cumplir, ya que comprobando las figuras 26 y 27 se aprecia la distribución en mT y su efecto en el espacio resulta bastante notorio, por lo que si se comprueba la misma magnitud en μ T, este campo magnético se va a extender por toda la jaula casi de forma homogénea. Dicha distribución se muestra en la figura 28. Como se puede ver, el sistema no cumple normativa, ya que toda el área sombreada en rojo oscuro implica un valor superior a 10 μ T, que es el valor que como máximo se puede permitir. De esta forma, resulta necesario buscar un sistema que aisle y concentre el campo magnético en el espacio existente entre las bobinas y que no salga más allá de la bobina de secundario. Por ello es necesario comprobar como afecta la ferrita al sistema, comprobar el apantallamiento del aluminio y ambos elementos a la vez, para ver si se puede evitar que el campo se expanda tan bruscamente y quede concentrado en el espacio del sistema.

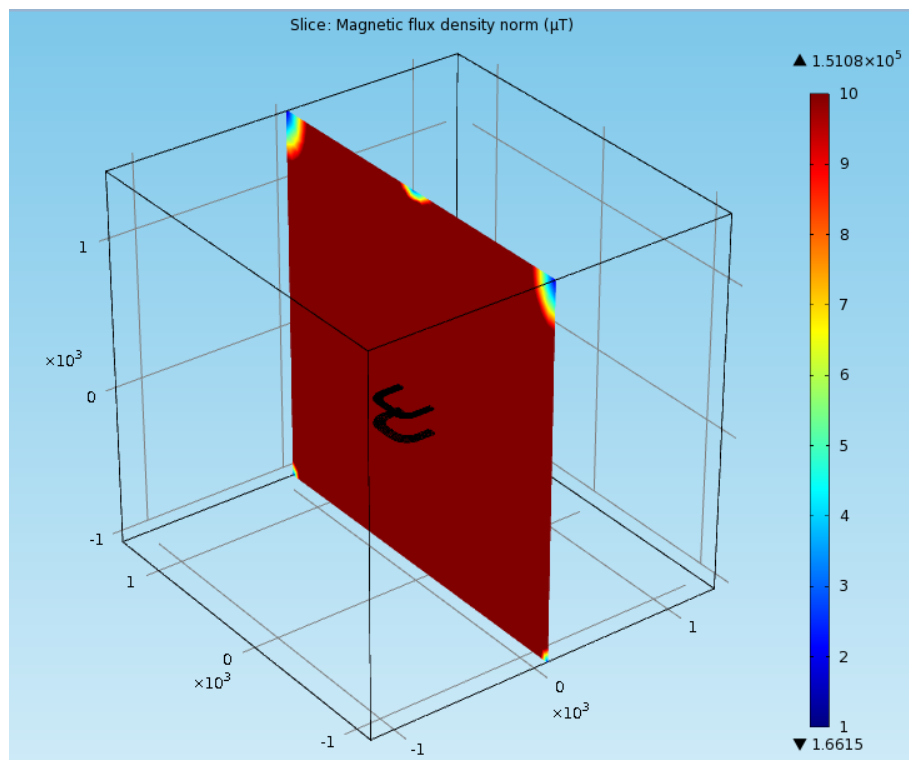


Figura 28: Distribución de campo magnético producido por ambas bobinas para normativa (Máx. $10 \mu T$)

Toda esta información, cálculos y resultados se puede encontrar en el archivo “MF producido por ambas bobinas”

3.5.4 CAMPO MAGNÉTICO PRODUCIDO POR AMBAS BOBINAS CON FERRITA

Para el estudio de este sistema se mantienen las dos bobinas alimentadas a condiciones nominales, utilizando las mismas físicas y estudios que en el apartado anterior, y se añaden las placas de ferrita que aparecen en el modelo completo, para ver como afectan al campo magnético visto anteriormente. El mallado es necesario cambiarlo y definirlo por partes para especificar la precisión que se desea en cada parte del sistema. Por ello, se deja en la mayoría de los elementos un mallado grueso (*coarse*) o extremadamente grueso (*extremely coarse*), y se define en el espacio circundante a las bobinas un mallado más fino (*finer*) para tener una buena precisión en la distribución de campo magnético, que es lo que realmente es necesario conocer con exactitud. La ferrita actúa como un amplificador, aumentando el efecto del campo magnético en el espacio intermedio entre ambas bobinas y concentrándolo en torno a los conductores, evitando que se expanda tanto hacia el centro del sistema. Para este modelo es necesario cambiar la jaula de Faraday que rodea al sistema, ya que al introducir elementos nuevos como las piezas de ferrita, los cálculos se complican bastante más que en los casos anteriores y es necesario buscar una forma de reducir variables para que un ordenador convencional pueda calcularlo. Por ello, en vez de encerrar el sistema en una jaula

cuadrada, se ha colocado una jaula esférica. El simple hecho de que sea esférica permite eliminar las aristas que tenía la jaula cuadrada y con ello disminuir sustancialmente el mallado, de forma que los grados de libertad también disminuyen. La jaula esférica necesita de un grosor para poder crear el sistema uniforme, pero no por ello es necesario aplicar elementos finitos al sistema. Con aplicar aislamiento magnético a la esfera interior es suficiente. La esfera exterior únicamente sirve para dar robustez y formar la unión del modelo. Con todo ello, el campo magnético que crea el sistema es el mostrado en la figura 29.

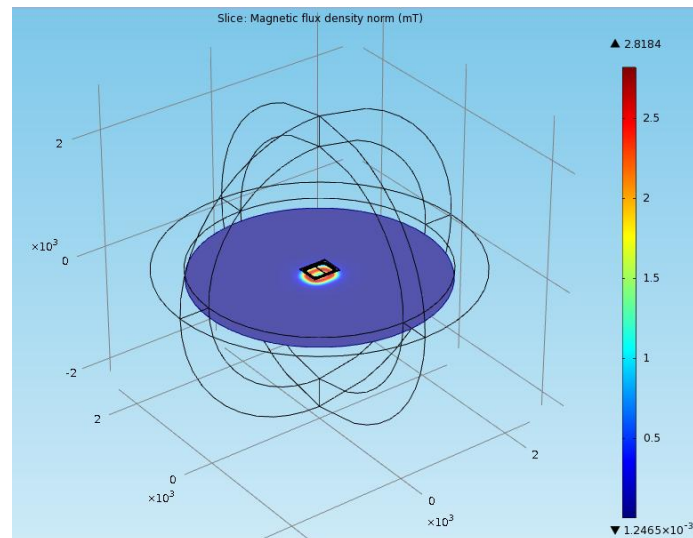


Figura 29: Campo magnético producido por ambas bobinas afectado por la ferrita.

Como se puede apreciar en la figura 29, el campo magnético máximo calculado por el programa es de 2,8184 mT, dando en el centro del sistema un valor de campo magnético de 1,1714 mT. De nuevo, el plano de cálculo para el campo magnético esta centrado a la altura media para poderlo comparar con los anteriores casos. En la figura 30 se muestra en detalle dicho campo.

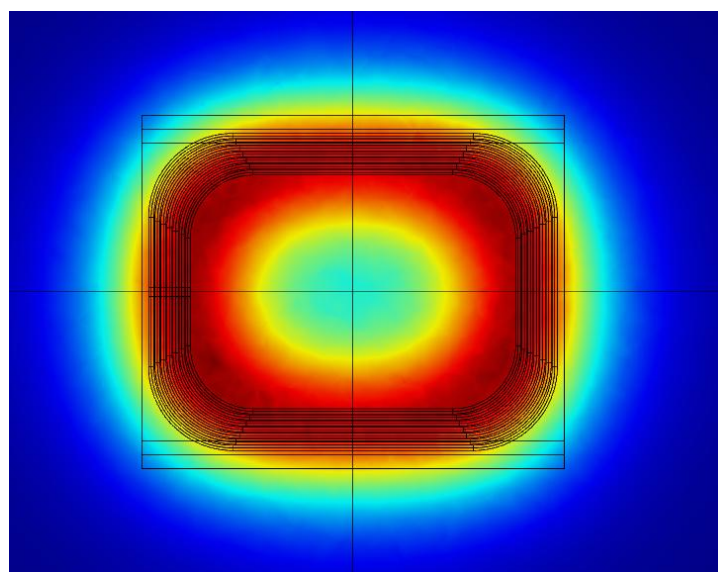


Figura 30: Detalle del campo magnético producido por ambas bobinas afectado por la ferrita.

Como se puede ver, el campo magnético creado en el espacio intermedio de ambas bobinas es mucho más pequeño que en el caso anterior, por lo que se puede deducir que la ferrita está haciendo su efecto de amplificación y concentración. Para comprobar realmente lo que está ocurriendo es necesario cambiar el plano de cálculo del campo magnético y contemplar como en los casos anteriores la distribución de campo magnético perpendicular a los conductores y ver como la ferrita afecta al mismo, tal y como se muestra en la figura 31:

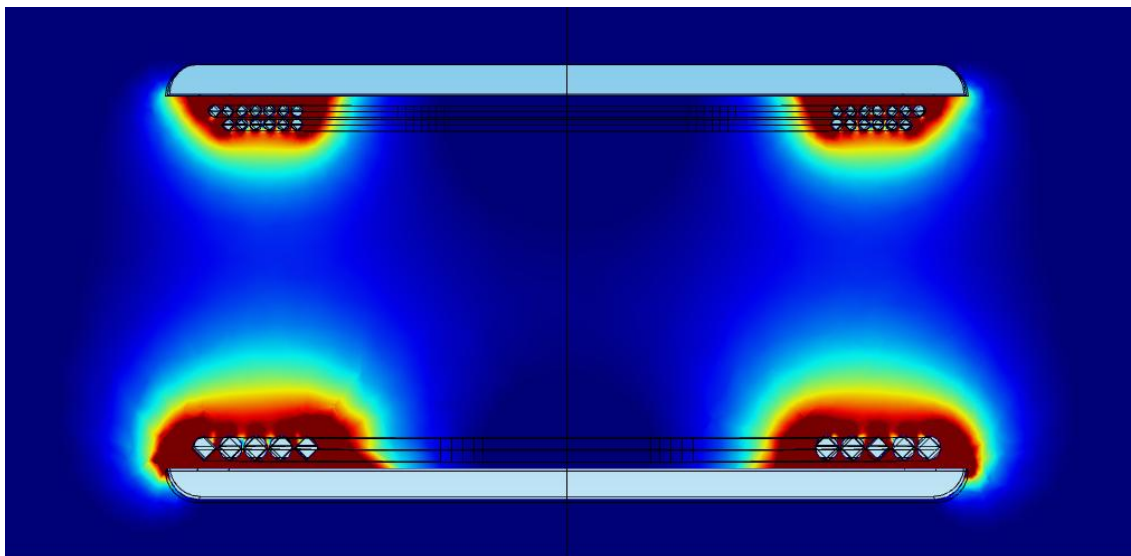


Figura 31: Distribución de campo magnético producido por ambas bobinas con la ferrita (1-10 mT)

Como se puede apreciar en la figura 31, la concentración de campo magnético reside principalmente en torno a los conductores, y por la zona central queda prácticamente anulado. El valor máximo medido por el programa es de 133,65 mT. En la figura se muestra una distribución desde 1 mT hasta 10 mT. Todas las zonas sombreadas en color rojo oscuro superan los 10 mT y en las proximidades del conductor, casi en su superficie, se da el valor máximo de campo magnético. También se aprecia que el campo no pasa más allá de la placa de ferrita a simple vista, pero si se modifica la escala para ver si cumple normativa obtenemos la figura 32. El sistema ideal será el que no deje escapar nada de campo magnético al entorno y lo concentre solo entre las bobinas, para permitir así la mejor transmisión de energía con las menores pérdidas posibles. Las placas de ferrita se podrían hacer más anchas o más largas, para intentar que recogieran más campo magnético. También se podrían hacer con curvatura por todos sus lados, ya que en el modelo que hay diseñado solo poseen curvatura por los lados y tanto el principio como el final están sin curvatura. Es decir, el diseño de la ferrita se podría adaptar de diversas formas según fuera necesario y según interese para el sistema.

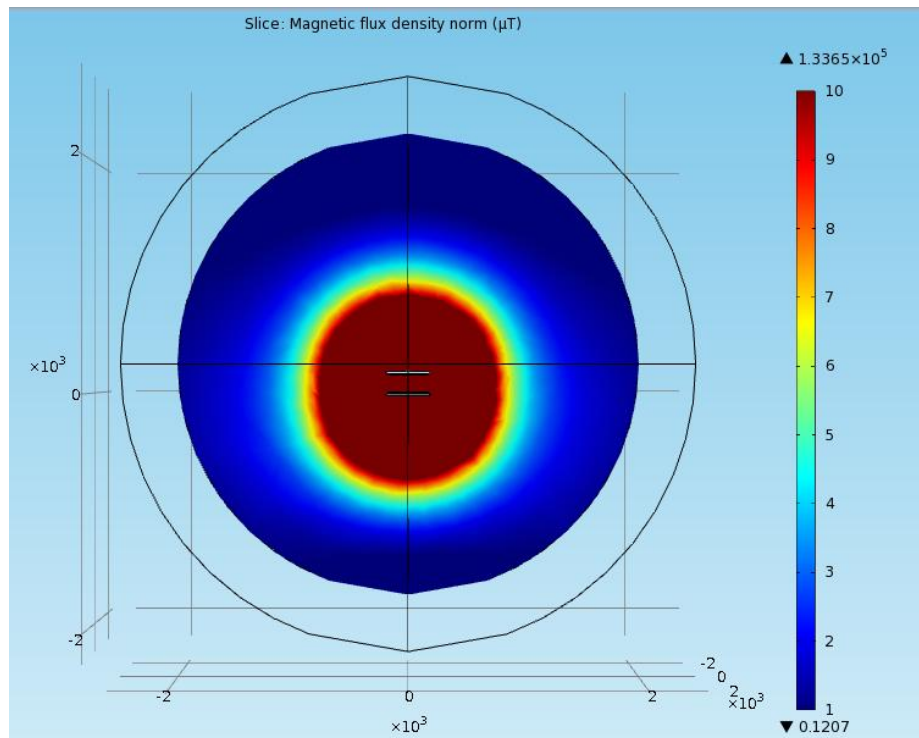


Figura 32: Distribución de campo magnético producido por ambas bobinas con la ferrita para normativa (Máx. 10 μT)

Como se puede apreciar en la figura 32, el campo magnético es superior a los 10 μT en un radio de aproximadamente un metro desde el punto medio de las dos bobinas, lo que hace que no cumpla normativa. También se puede ver que el hecho de utilizar una jaula de Faraday cuadrada o esférica no afecta al estudio del campo magnético, ya que este no se expande hasta los límites de la jaula, sino que se queda próximo al entorno de las propias bobinas sin llegar a ningún extremo de la jaula. De ello se deduce que el uso de una jaula esférica es totalmente válido y no interfiere para nada en la distribución del campo magnético.

Hay que comprender que este diseño simula un sistema real de carga de vehículos eléctricos por efecto de inducción magnética. La bobina de secundario teóricamente va adosada a la parte inferior del coche, y a poco más de distancia se encuentran las personas en el interior del vehículo. Según la normativa, el campo magnético que afecte a una persona no puede ser mayor de 10 μT y no puede superar la altura de la rodilla. El inconveniente es que las personas se encuentran sentadas dentro del vehículo, por lo que es estrictamente necesario evitar que entre cualquier campo magnético dentro del vehículo, por pequeño que sea, para garantizar la seguridad de los pasajeros y la viabilidad del sistema de carga. Así pues es necesario apantallar ese campo de alguna forma para evitar que se extienda tanto en el entorno.

Toda esta información, cálculos y resultados se puede encontrar en el archivo “MF de bobinas + ferrita”.

3.5.5 CAMPO MAGNÉTICO PRODUCIDO POR AMBAS BOBINAS CON CHAPA DE ALUMINIO

Tal como se ha comprobado en el apartado 3.5.4, el campo magnético creado por el sistema con ferrita supera la normativa y se extiende más de lo deseado en el entorno que lo rodea. Por ello, se busca la forma de aislar ese campo magnético y concentrarlo entre las dos bobinas. Partiendo de la misma base que en el apartado 3.5.3 con las dos bobinas alimentadas en condiciones nominales, se colocan las chapas de aluminio de forma que envuelvan las bobinas primaria y secundaria. Las chapas no son planas, sino que tienen una forma similar a un recipiente cuadrado, el cual tiene rebordes y curvas para adaptarse a englobar la bobina en cuestión. En otras palabras, las chapas son similares a un gorro o sombrero que se adapta a las bobinas para meterlas en su interior, tal y como se aprecia en la figura 33. Las chapas a utilizar idealmente han de tener un espesor entre 1 y 2 mm pero a la hora de simular el programa presentaba muchos problemas de cálculo con una chapa tan fina, ya que el mallado debía de ser muy fino para ajustarse a su reducido grosor. Por ello, fue necesario aumentar el grosor de la misma hasta 1 cm, que es cuando se podía aplicar un mallado aceptable en precisión y que a la vez el ordenador pudiera calcularlo. A términos reales de efectividad, igual da una chapa de 1 mm que de 1 cm ya que sobre el aluminio se va a producir efecto pelicular y solo va a contar la superficie del mismo, no el grosor, por lo que la aproximación de tomar una chapa mas gruesa para el caso de la simulación es totalmente valida y correcta, sin ningún error que pueda acarrearle al sistema.

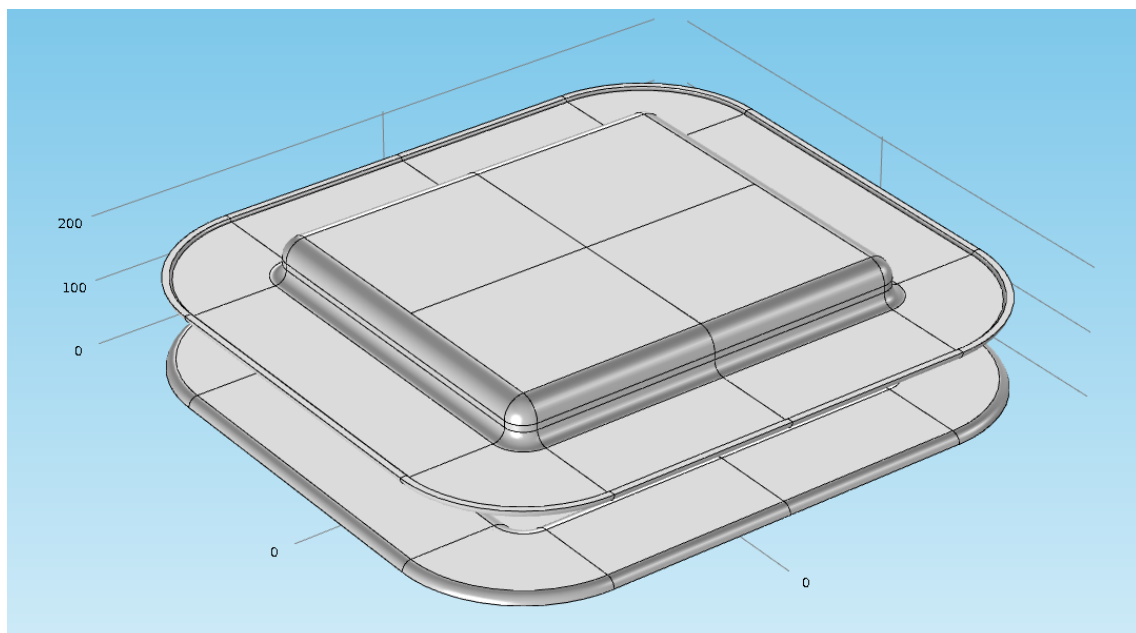


Figura 33: Modelo de bobinas con chapas de aluminio.

Partiendo de la misma base de físicas y estudios que en los casos anteriores, se vuelve a aplicar una esfera como jaula de Faraday equivalente para reducir el mallado y los grados de libertad, permitiendo así que el ordenador pueda calcularlo. El mallado se

establece más fino (*finer*) para el aire que engloba la jaula, y grueso (*coarse*) o extremadamente grueso (*extremely coarse*) para el resto de los elementos, ya que lo que interesa es conocer la distribución espacial del campo magnético y la precisión en los demás elementos tampoco ha de ser tan importante como la que se ha de tener en el espacio circundante. Así pues, volviendo a aplicar aislamiento magnético al sistema y grosor a la esfera que lo envuelve, el campo magnético calculado es el mostrado en la figura 34 y en detalle en la figura 35.

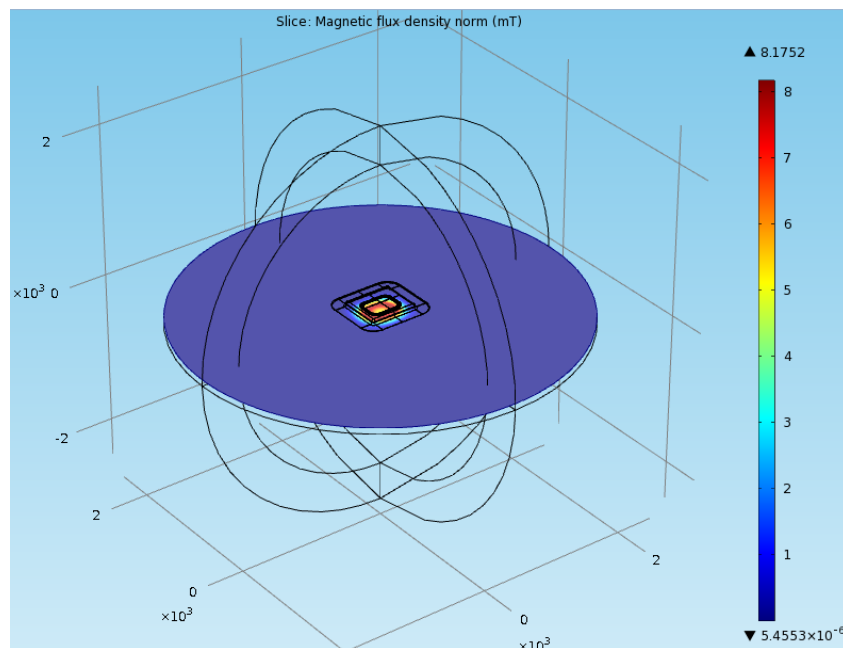


Figura 34: Campo magnético generado por ambas bobinas con aluminio.

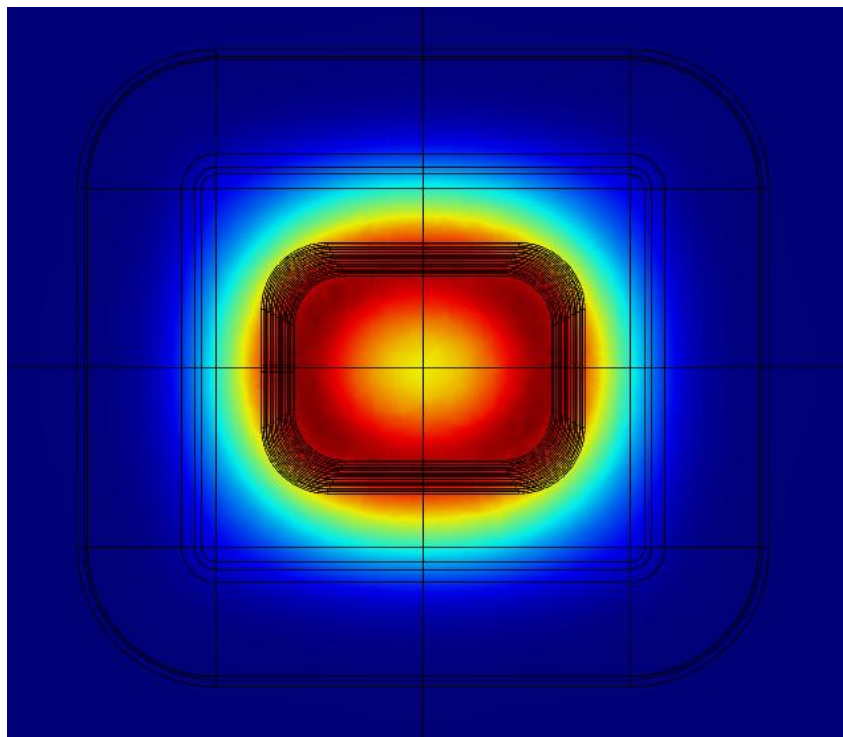


Figura 35: Detalle del campo magnético producido por ambas bobinas con chapas de aluminio.

Como se puede apreciar en la figura 34, el campo magnético máximo calculado por el programa es de 8,1752 mT, siendo el valor medido en el punto central de 5,1115 mT. Se comprueba también que hay más campo que en el caso anterior de las bobinas y las ferritas, ya que las propias ferritas lo que hacían es recoger el campo magnético y acumularlo en las proximidades a los conductores. El campo obtenido es prácticamente la mitad que en el caso 3.5.3, por lo que se puede deducir que el aluminio disminuye el efecto del campo magnético generado por las bobinas. Ahora lo que interesa conocer es la distribución de campo en el espacio cambiando el plano de cálculo de orientación, tal y como se muestra en la figura 36.

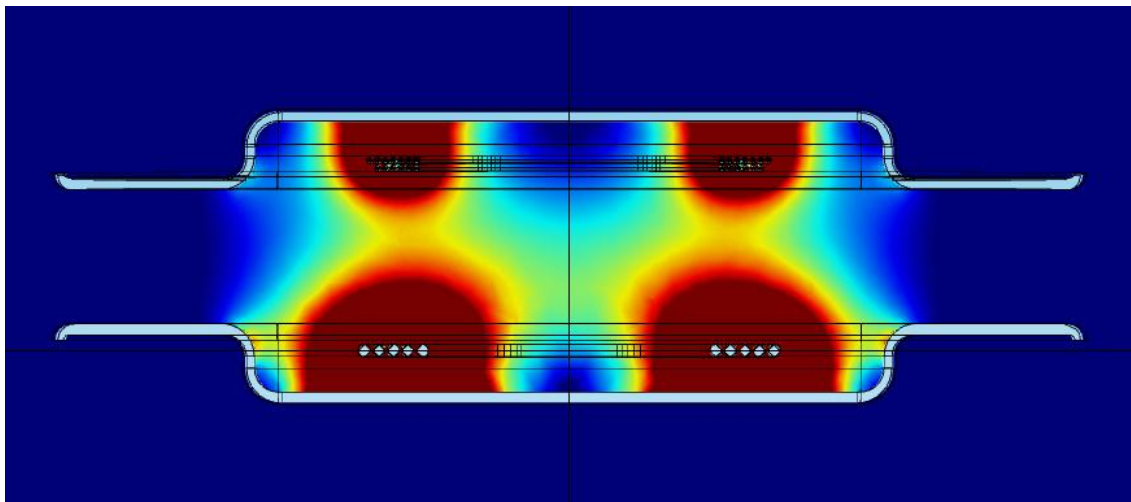


Figura 36: Distribución de campo magnético producido por ambas bobinas con chapas de aluminio (1-10 mT)

Como se puede ver en la figura 36, que tiene un rango impuesto en la distribución de campo magnético entre 1 y 10 mT, el campo no sale más allá de las chapas de aluminio. El programa calcula un máximo de 92,458 mT en el sistema estando el plano centrado en el origen de simetría y tal como se distribuye en la figura 36, la concentración máxima de campo magnético es alrededor de los conductores. Si se aumenta el rango de distribución del campo magnético se aprecia como la concentración reside en dicha zona, tal y como se puede ver en la figura 37:

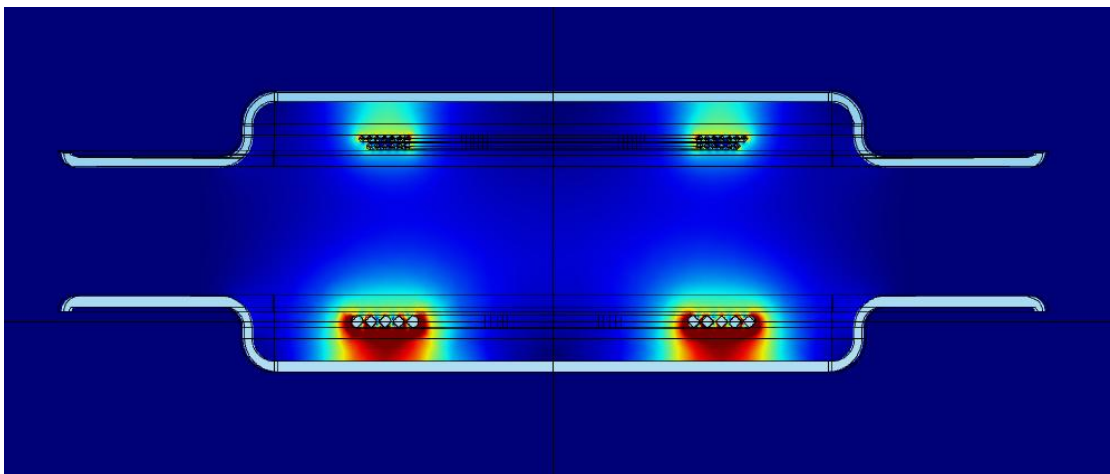


Figura 37: Distribución de campo magnético producido por ambas bobinas con chapas de aluminio (1-50 mT)

Al analizar este modelo queda comprobado que el campo magnético no escapa más allá de la propia chapa de aluminio. Ahora bien, es necesario comprobar si cumpliría la normativa impuesta para el ser humano, ya que hay que tener en cuenta para ella campos magnéticos muy pequeños. En la figura 38 se analiza la distribución de campo magnético para un rango entre 1 y 10 μT .

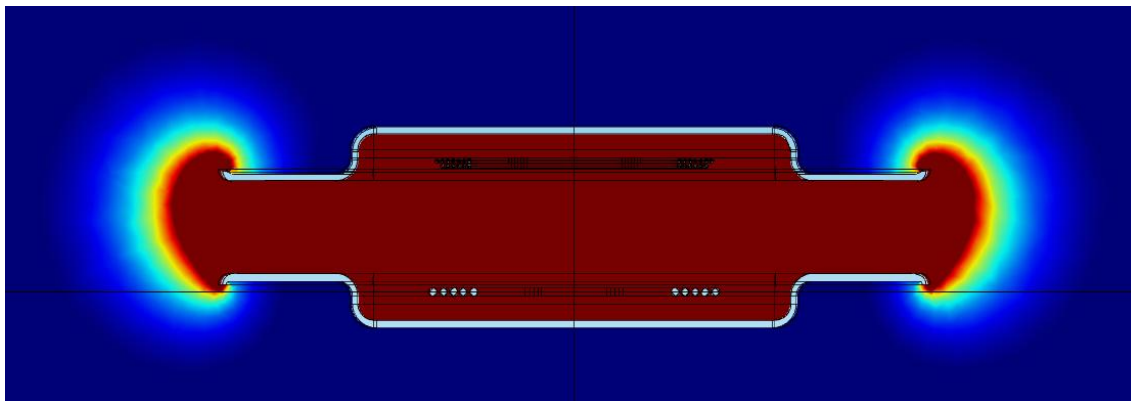


Figura 38: Distribución de campo magnético creado por ambas bobinas con chapas de aluminio para normativa (Máx. 10 μT)

Como se puede comprobar, todas las zonas sombreadas en rojo oscuro superan los 10 μT , pero no sale más allá de las chapas de aluminio, a excepción de los extremos, en los cuales se aprecia como el campo magnético sale al exterior y se cierra en el espacio circundante. Ahora bien, comparando este caso con el caso visto en el punto 3.5.4, es posible combinar ambos elementos, tanto la ferrita como el aluminio, para que se den a la vez los conceptos de amplificación magnética y aislamiento magnético y conseguir de esta forma que el campo magnético no escape del sistema, además de lograr una mayor concentración del mismo en el espacio intermedio de las bobinas, lo que mejorará la capacidad de transferencia de energía y el rendimiento general del sistema. Si se unen los casos 3.5.4 y 3.5.5 se logra tener el sistema completo definido al principio el cual consta de las dos bobinas trabajando en condiciones nominales, las dos placas de ferrita y las chapas de aluminio con la forma de “sombbrero” para poder cubrir las bobinas y las placas de ferrita. Con todo ello y tal como se ha visto el comportamiento en las figuras 32 y 38, si se superponen ambos casos, debería de obtenerse al final un campo concentrado en torno a los conductores que no escapara más allá del límite impuesto por las chapas de aluminio, incluyendo el efecto que se da en los extremos, ya que la ferrita se encargaría de agrupar el campo magnético y evitar dicha dispersión por los extremos de las placas. Cuanto más se consiga concentrar el campo magnético, menores pérdidas habrá en el entorno y mayor potencia se podrá transferir desde la bobina de primario a la bobina de secundario.

Toda esta información, cálculos y resultados se puede encontrar en el archivo “MF de bobinas + chapasAl”.

3.5.6 CAMPO MAGNÉTICO CREADO POR EL SISTEMA COMPLETO

El sistema completo es el mostrado al principio del documento el cual contiene las dos bobinas alimentadas en condiciones nominales, las dos laminas de ferrita y las dos chapas de aluminio, todo ello encerrado en una jaula de Faraday esférica, tal y como se ha mostrado en los puntos 3.5.4 y 3.5.5, para reducir el mallado y facilitar la posibilidad de cálculo. Las condiciones de físicas, de mallado y de estudio son iguales que en los dos apartados anteriores, es decir, se sigue aplicando la física de campos magnéticos aplicando aislamiento magnético a la superficie de la jaula de Faraday. Se aplican igualmente las físicas de circuitos eléctricos para poder alimentar el sistema con las corrientes nominales y poder introducir el desfase de 90° deseado utilizando el sistema de puertos de alimentación y nodos de conexión visto anteriormente y el estudio a aplicar sigue siendo en dominio de la frecuencia a un valor de 18000 Hz. El mallado se aplica igual que en los dos últimos casos, planteando un mallado grueso (*coarser*) o extremadamente grueso (*extremely coarse*) para los elementos y un mallado más fino (*finer*) para el entorno que engloba al sistema, para el cual se requiere más precisión para que el cálculo y distribución del campo magnético sea lo más preciso posible que permita el ordenador. De nuevo, la chapa de aluminio utilizada es de 1 cm en vez del 1 mm ideal por el mismo motivo anterior. En resumen, este modelo de estudio une y calcula el conjunto de los apartados 3.5.4 y 3.5.5 manteniendo las mismas condiciones que se dan en cada uno de los modelos y ejecutando un cálculo conjunto de todo el sistema unido. El estudio se muestra en la figura 39.

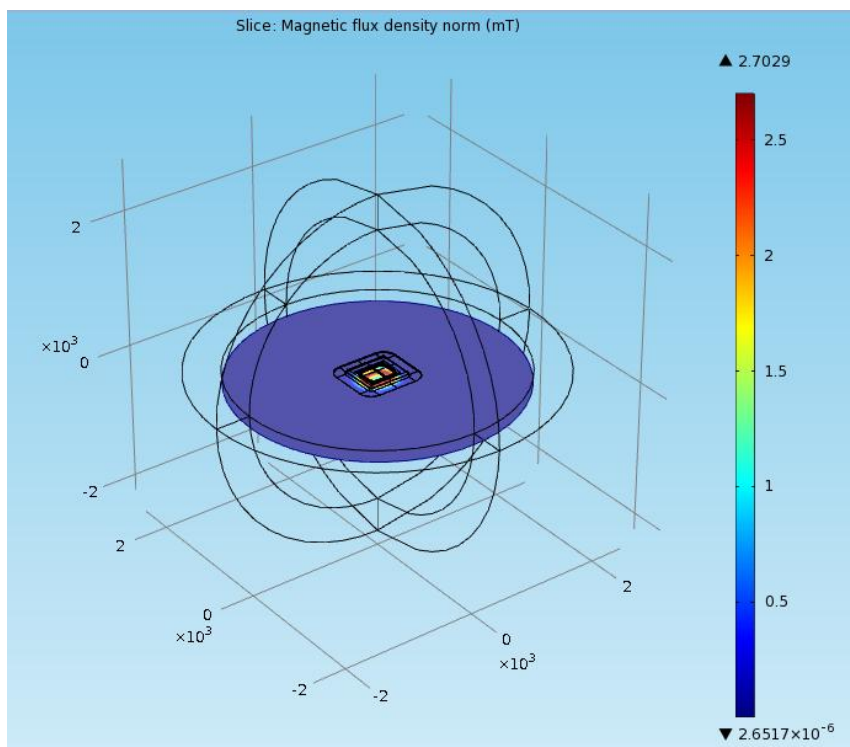


Figura 39: Campo magnético creado por ambas bobinas afectado por ferrita y aluminio.

Como se puede comprobar, el máximo valor calculado por el programa en el plano es de 2,7029 mT, siendo 1,148 mT el valor que se da en el centro del sistema, por lo que se puede entender que la ferrita esta aplicando el mismo efecto visto anteriormente en el apartado 3.5.4 de acumulación del campo magnético en torno a los conductores, aumentando también su valor nominal en torno a los mismos. Por ello, el campo magnético paralelo a los conductores va a ser mucho menor que en el caso que no hay ferrita, como el apartado 3.5.5. En la figura 40 se muestra un detalle del campo magnético producido, muy similar al obtenido en la figura 30.

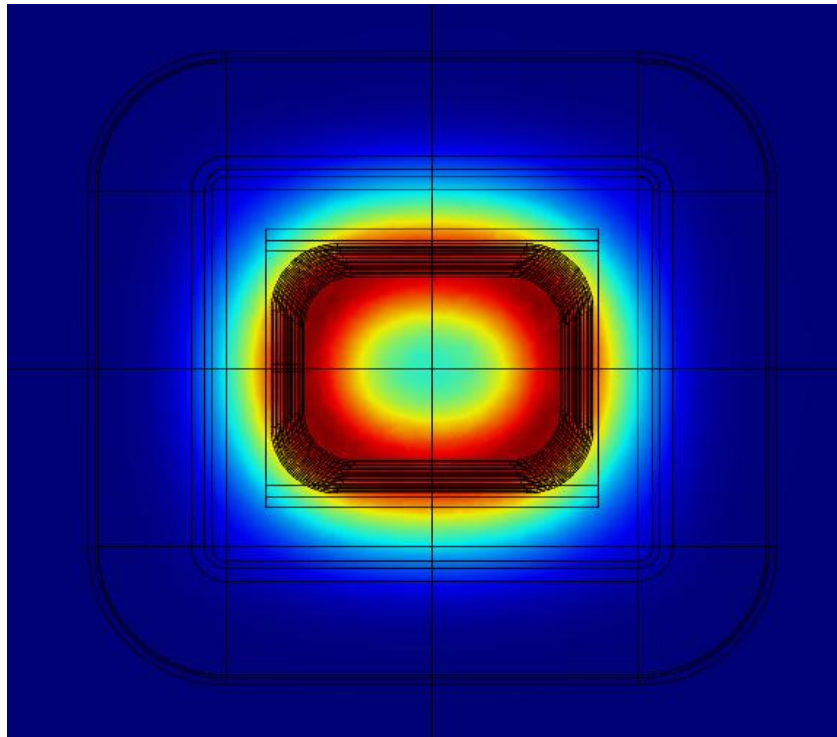


Figura 40: Detalle del campo magnético creado por ambas bobinas afectado por ferrita y aluminio

Ahora bien, si se cambia el plano de cálculo y se pone perpendicular a los conductores, tal y como se ha hecho en todos los casos anteriores, se podrá apreciar la distribución del campo magnético, el cual tendrá que estar acumulado en torno a los conductores y sin salir más allá de las chapas de aluminio, ni siquiera por los extremos, ya que la ferrita se encargará de acumular el campo y que no se disperse por el espacio de forma uniforme. En la figura 41 se muestra el plano perpendicular con el campo magnético correspondiente, centrado en el origen (justo en el punto de simetría del sistema) con un rango de 1 a 10 mT. Tal como se aprecia en la figura, el campo magnético se centra en torno a los conductores, dejando de nuevo el espacio entre las bobinas con un campo prácticamente nulo.

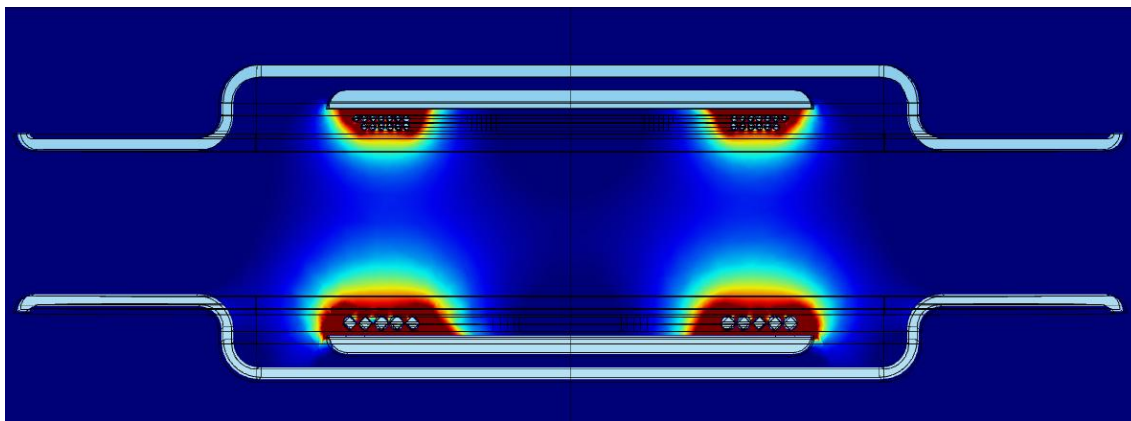


Figura 41: Distribución de campo magnético producido por ambas bobinas con ferrita y aluminio (1-10 mT)

Si se aplica el rango para comprobar normativa y ver la distribución de campo para un máximo de $10 \mu\text{T}$, se podrá apreciar si el campo magnético se escapa de los límites impuestos por las chapas de aluminio y el efecto de las láminas de ferrita. Esta distribución se muestra en la figura 42.

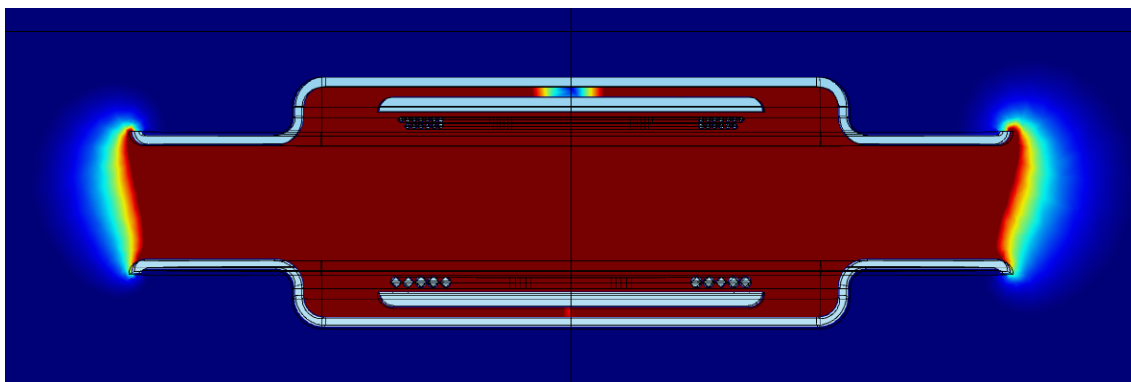


Figura 42: Distribución de campo magnético para normativa con ferrita y aluminio (Máx. $10 \mu\text{T}$)

Toda la zona sombreada en rojo oscuro supera el valor de $10 \mu\text{T}$. Comparando la figura 42 con la figura 38 vista en el apartado 3.5.5 se demuestra que efectivamente la ferrita retiene más el campo magnético y no sale con tanta dispersión por los extremos, por lo que todos los valores de $10 \mu\text{T}$ y superiores quedan encerrados entre las chapas de aluminio y no sale al exterior del sistema ningún campo superior al valor máximo permitido, por lo que se puede decir que el sistema esta completamente apantallado y que cumple la normativa impuesta. A efectos prácticos, el campo magnético calculado en la figura 42 es justo en el punto de simetría del sistema (en el medio) que es el punto en el que el valor del mismo debería de ser máximo. De todas formas es posible desplazar el plano de cálculo en profundidad para ver como se distribuye el campo en zonas más próximas a los extremos. En la figura 43 se muestra la distribución de campo magnético para normativa a 100 mm del punto de referencia (del centro). En la figura 44 se muestra a 200 mm del centro y en la figura 45 a 300 mm del punto central de referencia.

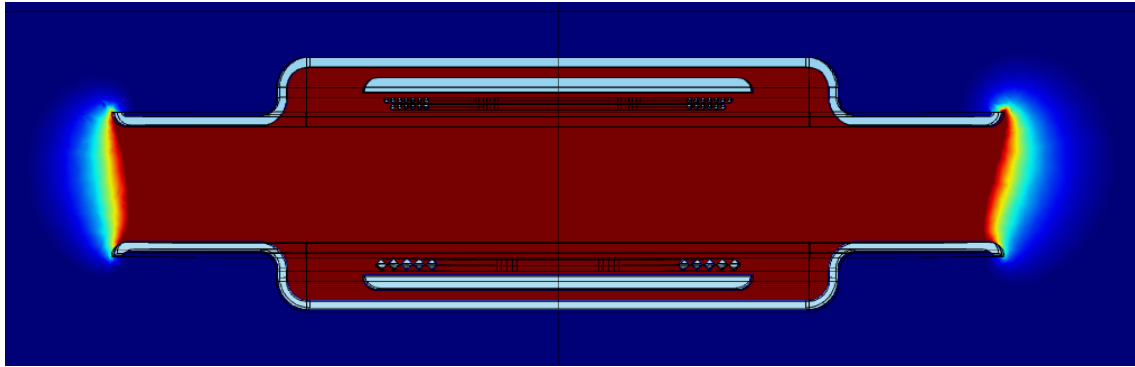


Figura 43: Distribución de campo magnético para normativa con ferrita y aluminio a 100 mm (Máx. 10 μ T)

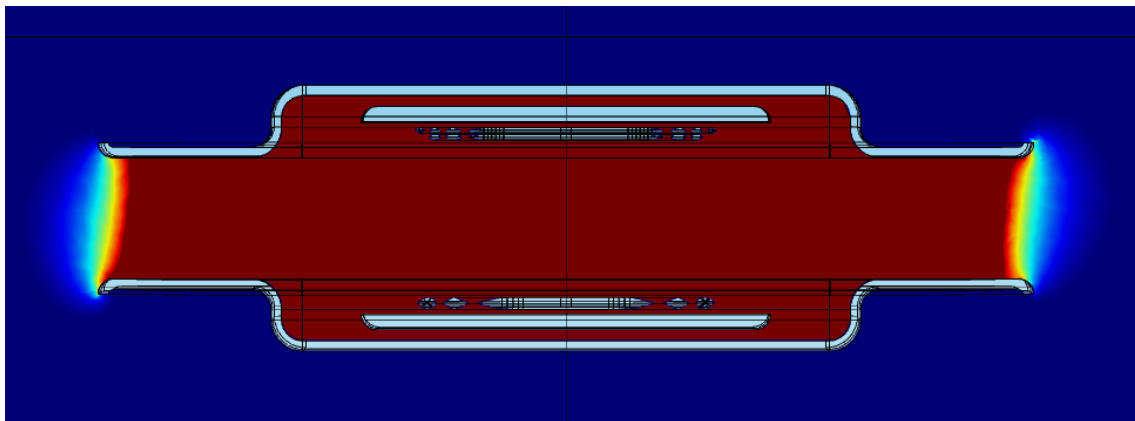


Figura 44: Distribución de campo magnético para normativa con ferrita y aluminio a 200 mm (Máx. 10 μ T)

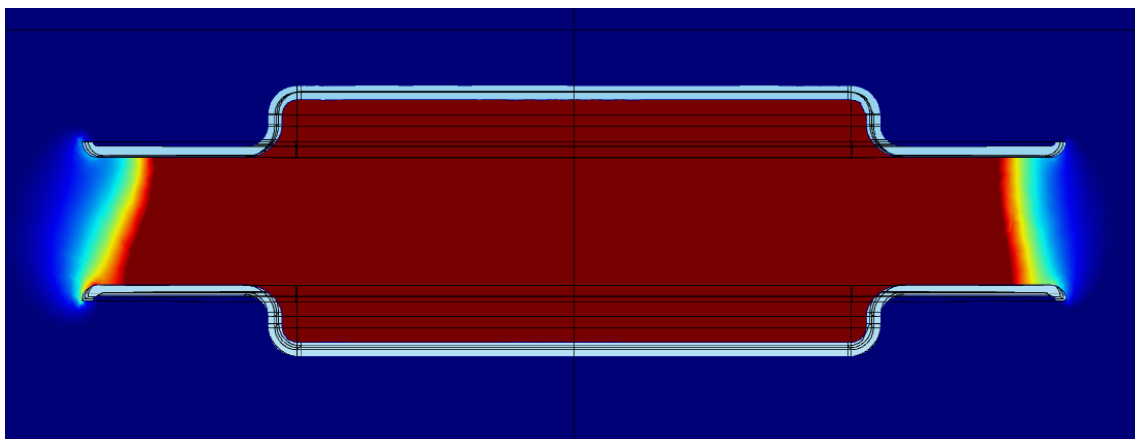


Figura 45: Distribución de campo magnético para normativa con ferrita y aluminio a 300 mm (Máx. 10 μ T)

Como se puede apreciar en las figuras, conforme aumenta la distancia de separación con el punto de simetría, el campo magnético disminuye y sale cada vez menos hacia el exterior del sistema por los laterales de las chapas de aluminio. Como el sistema es simétrico, las distancias tomadas es indiferente que sean hacia delante o hacia detrás, ya que a la misma distancia del origen o centro de simetría, el campo magnético ha de ser el mismo.

Toda esta información, cálculos y resultados se puede encontrar en el archivo “MF sistema completo (bobinas+Al+Ferrita)”.

3.5.7 RESULTADOS FINALES Y TABLA COMPARATIVA

Una vez realizados todos los cálculos y análisis necesarios sobre todos los modelos resulta interesante el poder comparar todo lo obtenido en el programa de simulación de elementos finitos *Comsol Multiphysics*, con los datos obtenidos en el programa de simulación en 2D *FEMM* y a la vez comparar ambos dos con las medidas reales ejecutadas sobre el sistema físico montado en el laboratorio del CIRCE.

La comparación de las magnitudes de campos magnéticos resulta inviable debido a que en el programa de simulación por elementos finitos en 2D *FEMM* solo se tiene en cuenta los conductores en un eje de dirección, como si fueran conductores paralelos, y no simula el efecto de los conductores perpendiculares a los mismos que formarían la bobina cuadrada. Por ello, el campo magnético que se obtiene en el programa *FEMM* siempre va a ser menor al obtenido en el programa *Comsol Multiphysics* y en el sistema real, debido a que no tiene en cuenta los conductores completos en toda su distribución espacial. Por otro lado, tampoco se puede comparar los resultados obtenidos con el programa *Comsol Multiphysics* con las magnitudes reales de campo magnético medidas en el sistema real debido a que no hay datos ni ensayos de laboratorio que recojan los valores de campo magnético en condiciones nominales, por lo que únicamente se pueden comparar los valores obtenidos de las inductancias y el coeficiente de inducción mutua, los cuales quedan reflejados a continuación:

Magnitud	Medidas reales	<i>FEMM</i>	<i>Comsol Multiphysics</i>
L_1	19,3 μH	20,6 μH	15,2 μH
L_2	124,75 μH	134,45 μH	113,41 μH
M	8,68 μH	8,41 μH	8,352 μH

Como se puede apreciar en la tabla, el programa *FEMM* es más preciso a la hora de calcular las magnitudes L_1 y L_2 , ya como se comentó anteriormente, y debido a que es un programa en 2D y por lo tanto no tiene el volumen de los elementos como tiene *Comsol Multiphysics* y por lo tanto no depende tanto del mallado como depende este ultimo. Por otro lado, el coeficiente de inducción M es muy aproximado en al valor real con cualquiera de los dos programas.

4 PROBLEMAS Y SOLUCIONES

El programa *Comsol Multiphysics* es un sistema en constante evolución y por lo tanto no se puede decir que este acabado o sea perfecto. Cada versión nueva que se lanza al mercado incluye mejoras y correcciones de errores de la anterior versión, por lo que resulta prácticamente imposible disponer de una versión que no tenga ningún problema. Muchas veces resulta necesario “engañar” al programa para que interprete lo que se desea, aunque eso implique añadirle más datos de los necesarios, definir otras superficies o similar. En esta sección se muestran los problemas sufridos a lo largo del desarrollo y el como se han subsanado en la medida de lo posible.

4.1 LOS PARÁMETROS

Los parámetros no son un problema como tal, pero pueden llegar a serlo si no se saben interpretar bien y trabajar con ellos. El fundamento principal de utilizarlos es por si resulta necesario cambiar en algún momento alguna medida o valor de las dimensiones del sistema. Su uso puede resultar más complejo que si se utilizan números reales para definir las medidas, ya que todas las ecuaciones para definir las distancias de separación entre elementos y la distribución en el espacio hay que hacerlas con los parámetros. Por el contrario tienen la ventaja de que si resulta necesario cambiar un valor (por ejemplo, el diámetro de los conductores) no es necesario ir uno por uno cambiando el valor numérico, sino que con cambiar el valor del parámetro y haciendo clic en el botón “*build all*” se rediseña todo el sistema completo con la nueva magnitud cambiada.

4.2 LA FORMA DE DISEÑAR

La forma de diseñar los elementos físicos en *Comsol Multiphysics* es realmente peculiar. El fundamento principal es similar a Solidworks, pero el problema viene cuando hay que diseñar objetos o elementos con radios de curvatura, agujeros en superficies o similares. Es necesario utilizar operaciones booleanas de unión, intersección o diferencia, por lo que siempre que se desea construir, por ejemplo, un arco que gira 90° y tiene un grosor de, por ejemplo, 2 mm, es necesario utilizar dos circunferencias concéntricas, la segunda 2 mm mayor que la primera para darle dicho grosor, y utilizar la operación booleana correspondiente para que cree un “aro” de 2 mm de grosor, al cual posteriormente hay que trocear por medio de cuadrados hasta conseguir el arco de giro deseado de 90°. En otras palabras, el diseño de elementos que se salen más allá de lo convencional es complejo, lento y tosco. Resulta mucho más

sencillo diseñar todo el sistema en AutoCad e importarlo al programa. En el caso de este proyecto, se diseñó todo sobre la base de *Comsol Multiphysics* porque resultaba útil el poder manipular de forma independiente cada elemento del diseño, ya que para el estudio de los campos magnéticos se ha analizado elemento por elemento, y si el sistema completo hubiera sido importado desde AutoCad o Solidworks, no se podría haber hecho tanta modificación del sistema. Hubiera sido necesario crear cada modelo de forma independiente en los programas correspondientes y luego exportarlo.

4.3 LAS FÍSICAS Y CONDICIONES DE FRONTERA

El mayor problema que se dio a la hora de plantear las físicas fue el definir correctamente las condiciones de frontera que había que aplicar al sistema y el como ejecutarlas para que el programa pudiera calcular. En el manual del programa, de más de 1000 páginas, no aparece ningún tipo de explicación de como aplicar las condiciones de frontera ni las físicas, la única referencia son los ejemplos que aparecen resueltos, los cuales sirven un poco de ayuda a la hora de poder plantear el sistema, pero no resuelven ningún tipo de duda. Fue necesario establecer en los conductores de las bobinas dos veces el mismo material (cobre) ya que había que definirlo en su volumen y en su superficie. A la hora de excitar las bobinas con corriente, era necesario crear los puertos de alimentación tal como se explicó. Los puertos de alimentación hacen que circule la corriente por la superficie, de forma que resulta necesario definirles una profundidad y una anchura, que el propio programa la interpreta como la sección por la cual debe de circular la corriente. Por ello resultaba necesario definir en los conductores el cobre tanto en la superficie como en el volumen, ya que sino, el programa entendía que le faltaba un material. A la hora de los cálculos, da igual que se tenga en consideración el efecto skin o no, ya que la corriente que circula por el conductor es la misma y el campo magnético creado es el mismo, ahora bien, no es lo mismo que la corriente circule solo por la superficie o por todo el conductor, ya que el primer caso acarrea mucho más calentamiento y pérdidas que el segundo, pero a la hora del campo magnético que crean, es el mismo en ambos casos. Aunque ya que se había establecido que el sistema real estaba creado con hilo de Litz y que el efecto skin no se producía, era mejor establecer el modelo en *Comsol Multiphysics* de la misma forma. Lo realmente frustrante son las horas e intentos invertidos en aplicar las físicas, los estudios y las condiciones de frontera en el programa hasta que por fin se pudo establecer una base solida con la que analizar todos los modelos. No ha habido ni explicación ni ayuda por ninguna parte, los resultados se han obtenido a base de ensayo y error lo mejor posible dentro de los conocimientos y limitaciones sobre el programa.

4.4 MALLADO, GRADOS DE LIBERTAD Y PC

Comsol Multiphysics es un programa diseñado para industria, laboratorios y centros de investigación que tengan grandes equipos preparados para realizar cálculos y desarrollos de gran calidad y detalle. Este programa, en su modo 3D, no se puede utilizar en un PC convencional, ni siquiera uno de última generación comprado hace 2 días. Los primeros cálculos realizados ya solicitaban una memoria RAM superior a 4 Gb. El PC utilizado para el cálculo y desarrollo tenía en un principio 4 Gb de RAM justos, por lo que fue necesario aumentar la memoria al doble (8Gb) para poder efectuar algún cálculo.

El ordenador utilizado para realizar los cálculos consta de las siguientes características:

- PC portátil SONY VAIO VPCEB4Z1E
- Intel Core I5 480M (Doble núcleo, cuatro hilos de comunicación, 2,66 GHz cada núcleo, 3GHz en modo overclock automático).
- 8 Gb de memoria RAM DDR3.
- Tarjeta gráfica ATI Mobility Radeon HD 5650 1Gb de memoria RAM propio.

Comsol Multiphysics es un programa que necesita calcular y procesar con la memoria RAM del PC además de utilizar el propio procesador para ejecutar los cálculos. En los modelos sencillos, los cálculos duraban entre 20 y 30 minutos. En los modelos avanzados (en los que se introduce ferrita, aluminio y ambas a la vez) eran necesarias hasta 8 horas de cálculo para que el PC pudiera dar un resultado. Tantas horas no son debidas a que el modelo sea muy complejo de calcular, sino porque el PC no podía ejecutar los cálculos a la misma velocidad que había ejecutado los anteriores. En otras palabras: se ahoga. El propio programa muestra en la esquina inferior derecha la cantidad de memoria en uso y la cantidad de memoria requerida por el mismo. En los primeros modelos utilizaba de 2 a 3 Gb de RAM y solicitaba 3,5 o 4 Gb. En los últimos modelos estaba utilizando 7,6 Gb de RAM (que es el máximo disponible que permite ceder el PC) y solicitaba 12,6 a 14 Gb. Como necesitaba prácticamente el doble de lo que disponía, el cálculo era mucho mas lento. Por ello, para calcular modelos en 3D con buena calidad y precisión, se necesita una estación de trabajo de laboratorio preparada para realizar dichos cálculos. Lo ideal para los modelos calculados hubiera sido lo siguiente:

- Dos procesadores Intel Core I7-3920 XM (cuatro núcleos, 8Mb de memoria cache, 3,8 GHz de RAM cada uno) dispuestos en paralelo.
- 32 Gb de memoria RAM DDR5
- Tarjeta gráfica ATI Radeon HD 7970 Black Edition (1 GHz, 3 Gb de RAM DDR5 propios.)

Dado que las limitaciones son más que evidentes, resultaba necesario modificar la jaula de Faraday que envolvía al sistema para disminuir el mallado y posteriormente mallar los elementos por separado, centrando el mallado más fino en las zonas a estudiar y utilizando un mallado mas grueso en las zonas menos importantes para los resultados. El calculo realizado podría ser mucho más preciso con un PC como el descrito, pero a falta del mismo, se ha hecho lo mejor que se ha podido. Por ello el objetivo principal en los modelos complejos fue el disminuir el mallado a toda costa, bajando la resolución del mismo en los elementos y buscando que el mallado total no superara el millón de elementos. En el momento que el mallado superaba el millón de elementos, los grados de libertad ascendían hasta los 4 millones y el PC no podía calcular nada. De hecho, aunque se intentara dejar mas tiempo al PC calculando por poner un mallado más fino, llega un momento que da un error alegando que no tiene memoria suficiente para ejecutar los cálculos (*run out of memory*). Sin embargo, si se trabajara con modelos 2D no sería problema el PC, ya que no hay profundidad representada en el diseño y eso simplifica mucho los cálculos. Por ello es recomendable trabajar con este programa en 2D si no se dispone de un PC preparado para calcular en 3D.

El mallado y los grados de libertad van íntimamente ligados. Por un lado, el mallado plantea una serie de tetraedros que se reparten en todo el volumen del sistema definido para poder crear un sistema de cálculo en el entorno definido. Cada vértice de los tetraedros representa un punto de cálculo para el sistema, por ello, cuanto más mallado se disponga, más puntos de cálculo habrá. Estos puntos de cálculo son los que utiliza el programa para aplicar las físicas y los estudios definidos, de forma que, a mayor cantidad de puntos, mayor número de variables y con ello, más grados de libertad. En función del número de grados de libertad se necesitará un PC de mayor o menor potencia. El cálculo más preciso del modelo sería aquel que permitiera definir el mallado de la forma más fina posible en todos los elementos, pero para ello sería necesario un PC como el descrito anteriormente.

4.5 LA FALTA DE INFORMACIÓN

Uno de los mayores problemas que tiene *Comsol Multiphysics* es que no es un programa conocido, por lo cual encontrar información sobre él resulta más complejo de lo habitual. El fabricante del programa, la empresa *Comsol*, posee una pagina web con un foro propio, en el cual se tratan diversas dudas en los aspectos particulares de cada uno de los usuarios, pero el problema reside en que la mayoría de los usuarios son noveles y no controlan el uso del programa, por lo que son incapaces de solventar la mayoría de las dudas planteadas. Por otro lado tampoco se dispone de un servicio de atención al cliente o foro de profesionales en el que preguntar cualquier duda, lo que aumenta mucho la dificultad de trabajar con este programa.

5 CONCLUSION Y VALORACIÓN PERSONAL

El desarrollo de este proyecto ha tenido unos aspectos buenos y otros no tan buenos. Resulta interesante trabajar en un concepto novedoso que todavía está prácticamente sin explorar, como es el sistema de carga de los coches eléctricos. Un estudio exhaustivo sobre la materia puede proporcionar muchos avances en el concepto e ideas principales y se puede lograr un cambio total a nivel mundial en el ámbito del automovilismo, el transporte y la eficiencia energética. Tal como está ahora la situación social y económica, resulta necesario buscar alternativas a los actuales combustibles, además de buscar la forma de economizar, ahorrar dinero y cuidar el medio ambiente.

El “boom” oficial apareció con los vehículos híbridos. Estos reducían en gran magnitud las emisiones de gases a la atmósfera y el consumo de combustible, utilizando un motor de combustión pequeño y un motor eléctrico alimentado por una batería, ofreciendo una alternativa mucho más económica y saludable respecto a los ya muy vistos motores de combustión de gasolina o diesel. El siguiente paso fue la creación de vehículos 100% eléctricos, los cuales no contaminan lo más mínimo y no consumen ningún tipo de combustible, gracias a su motor eléctrico alimentado por una batería, por lo que no hay necesidad de explotación ni gasto económico adicional. Ahora bien, el problema es que son vehículos muy nuevos y su desarrollo está todavía en los fundamentos básicos. La autonomía de ellos es prácticamente de 100 a 150 Km, debido a la capacidad de la batería, y su potencia es muy reducida (en torno a 45 a 60 CV) por lo que no son vehículos con los que se pueda recorrer grandes distancias o tengan capacidad para realizar un viaje. Los nuevos modelos que han de aparecer en el mercado durante los próximos meses constan ya de mayor autonomía (400 Km) y algo más de potencia (75 CV), pero sigue existiendo el mismo problema para todos: El tiempo de recarga de la batería. Para un modelo convencional, el tiempo de recarga de la batería es de aproximadamente 8 horas.

Es aquí donde entra el sistema desarrollado en el CIRCE de carga de las baterías por inducción magnética. Utilizando un sistema como el estudiado en este documento, se podría reducir el tiempo de carga de un vehículo eléctrico drásticamente, haciendo que se cargara en 15 minutos en vez de 8 horas. Las ventajas que este sistema plantea son infinitas, ya que si se unificara como un estándar, este sistema se podría implantar en áreas de servicio y centros de repostaje para que mientras el conductor efectúa su parada obligatoria en el trayecto, el vehículo se recargara plenamente y pudiera continuar su camino sin problema. De esta forma, las distancias ya no serían un problema, y los trayectos largos serían totalmente viables. Simplemente para cargar el vehículo, este se tendría que colocar sobre la bobina principal, que estaría empotrada en el suelo, y la secundaria estaría dispuesta bajo el vehículo, de forma que al activar el sistema de carga, se transfiere la energía desde la bobina principal a la secundaria

debido al acoplamiento magnético que llevan y la resonancia con la que trabajan, y como son 30KV de potencia, la carga de la batería es cuestión de minutos.

Dejando a un lado la idea principal del sistema y su aplicación física, la cual es la más interesante, a la hora de trabajar con el programa y realizar el estudio teórico del sistema real, lo peor de todo quizá haya sido el ponerse a trabajar con un programa totalmente desconocido y del que no hay ninguna ayuda disponible. Fueron muchas horas de trabajo con el programa, muchos intentos fallidos de cálculos, muchas pruebas para dar con los errores y muchas búsquedas de cual sería la mejor opción para efectuar el cálculo de los campos magnéticos de la forma más fiable. Lo ideal hubiera sido conocer a alguien que controlara el programa y conociera como manejarlo, para poder haber realizado algunos modelos con mucha más precisión de la que se han hecho, o calcular los parámetros de una forma más sencilla que la aplicada. Pero como no se disponía de ningún medio auxiliar, los modelos están calculados y desarrollados lo mejor posible según las circunstancias, aunque todo el compute de eventos hace que la situación sea frustrante.

Por el contrario resulta muy gratificante el lograr los resultados esperados con el estudio de los campos magnéticos y la distribución de los mismos en el espacio. Todo esfuerzo da sus frutos, y en este caso, son unos resultados bastante buenos para las limitaciones que hay debidas al PC. Si se hubiera podido utilizar una estación de trabajo con un PC avanzado, los cálculos podrían haber sido mucho más precisos y exactos, sin necesidad de hacer aproximaciones o simplificaciones para que se pudiera calcular el modelo. Quizá si se hubiera utilizado otro programa distinto de elementos finitos que utilizara menos recursos físicos del PC podría haberse realizado los cálculos de forma más precisa. Por otro lado hubiera sido ideal el poder representar la distribución de campo magnético en el volumen que conforma el sistema, para apreciarlo de mejor forma y que quedara plasmada su distribución espacial. Existe una forma de representar la evolución del mismo a través de flechas o conos, pero solo indican el sentido, no la magnitud del mismo campo y tampoco se aprecian bien visualmente, por lo que no resultan una herramienta muy útil. La forma de representarlo en láminas o planos es útil, pero de esa forma también representan los programas de 2D, la única ventaja es que en este caso se tiene en consideración todo el conductor, y no lo definido en el plano, como ocurre con los programas de 2D.

En conclusión final al menos resulta gratificante el haber trabajado y desarrollado algo que hasta la fecha nadie lo había hecho. El trabajar con el programa *Comsol Multiphysics* y el desarrollar un sistema tan novedoso como el sistema de carga por inducción magnética es algo que no se hace todos los días y que, además, supone un reto a alcanzar para poder obtener los resultados tal y como se deseaba. Es evidente que los posteriores estudios sobre el tema serán mucho más avanzados y mejores, pero este estudio en concreto casi se podría afirmar que es el pionero sobre este campo y el único existente hasta día de hoy.